



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 19.12.2022
Kabul Tarihi : 18.04.2023

Received Date : 19.12.2022
Accepted Date : 18.04.2023

UÇAK İTKİ SİSTEMLERİNDE KULLANILAN BATARYA SİSTEMLERİNİN GÜVENİLİRLİK ANALİZİ

RELIABILITY ASSESSMENT OF BATTERY SYSTEMS USED IN AIRCRAFT PROPULSION SYSTEMS

*Tahmineh RAOOFI*¹ (ORCID: 0000-0002-7988-1853)
Melih YILDIZ^{2*} (ORCID: 0000-0002-7546-4462)

¹ Eastern Mediterranean University, Faculty of Engineering, Industrial Engineering Department, Famagusta, Mersin 10, Türkiye
² Erciyes Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Kayseri, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Melih YILDIZ, melihy@erciyes.edu.tr

ÖZET

Elektrikli Uçak ve Hibrit Elektrikli Uçağın en önemli bileşenlerinden biri olan enerji depolama cihazlarının güvenliği ve güvenilirliği esastır. Bu nedenle, bataryaların güvenilirlik değerlendirmesi bilhassa elektrikli itki sistemlerinin tasarım mimarisi için çok önemlidir. Li-ion batarya sistemlerinin güvenilirlik değerlendirmesi, arızaların veya bozulma olasılığının batarya kapasitesi ve çekilebilir güç üzerindeki etkisinin hesaplanması olarak tanımlanır. Li-ion batarya hücrelerinin arızaları hem güvenlik sorunlarına (yangın ve patlama) neden olan arızaları hem de tasarım amacına göre bataryanın ideal performansını azaltan arızaları içerir de bu çalışmanın ana odak noktası batarya performans kaybına yol açan arızalardır. Elektrikli itki sistemlerinin güvenilirliğini tahmin etmek için, yaşlanma etkileri ile batarya performansı arasındaki bağlantıyı tanımak çok önemlidir. Bu çalışmada, uçaklarda kullanılacak lityum-iyon batarya sistemlerinin, uçak tasarım aşamalarından itibaren sistem, bileşen ve işlev güvenilirlikleri açısından analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada elektrikli itki sistemlerinde kullanılan batarya sistemlerinin güvenilirlik analizi gerçekleştirilerek, analiz sonucu ile sertifikasyonuna yönelik mevcut standartlar karşılaştırılmış ve sektörün elektrikli tahrik sistemlerini yaygın ve güvenilir olarak kullanmasının önündeki yasal boşluklara dikkat çekilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hibrit elektrikli uçak, uçak bataryası, lityum-iyon batarya, batarya güvenilirliği

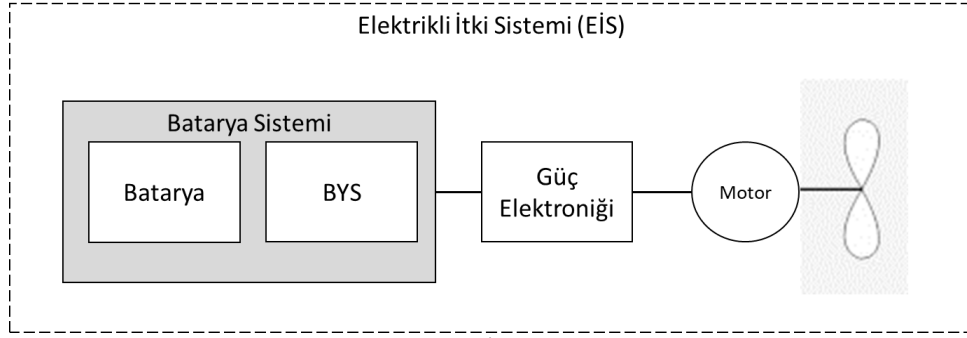
ABSTRACT

Safety and reliability of the energy storage devices as one of the most important components of Electric Aircraft and Hybrid Electric Aircraft is essential. Therefore, reliability evaluation of batteries is crucial for Electric Propulsion System design architecture. Li-ion battery reliability assessment is defined as calculating the faults or degradation occurrence probability and its impact on the obtainable capacity and power. Although failures of Li-ion battery cells involve both failures that cause safety issues (fire and explosion) and failures that reduce the ideal performance of the battery against the design intent, the focus of this study is on failures that lead to battery degradation. To estimate Electric Propulsion System reliability, it is critical to recognize the link between aging effects and battery performance. In this study, the lithium-ion battery systems to be used in aircraft were analyzed in terms of system, component and functional reliability from the aircraft design stages. In this study, reliability analysis of battery systems used in electric propulsion systems was performed, analysis results and current standards for certification were compared, and legal gaps in front of the industry's widespread and reliable use of electric propulsion systems were pointed out.

Keywords: Hybrid electric propulsion, aircraft battery, lithium-ion battery, battery reliability

GİRİŞ

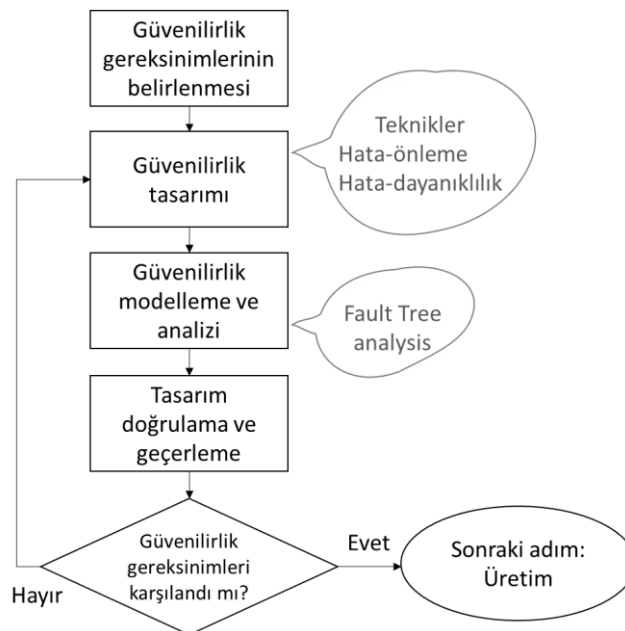
Hava araçlarında gerek çevresel etkinin, gerek maliyetlerin azaltılması amacı ile farklı enerji türleri kullanımı arayışı bulunmaktadır. Hava araçları için elektrikli itki sistemi (EİS), önceleri çevre kirliliğine karşı önerilmiş olsa da enerji verimliliği ve ömür devri maliyetlerine yönelik avantajlar içerdiğinden havacılık endüstrisinin dikkatini çekmiştir. Havacılıkta elektrik enerjisinin itki sisteminde kullanımı görece yeni olduğundan beraberinde bazı zorluklar da getirmektedir. Havacılıkta, hava aracının uçuş sırasında sistemlerinin istenen işlevleri tam olarak yerine getirmesi beklenir. Normal dışı bir işleyiş veya kaza durumunda ise sistemlerin işlevlerini en azından güvenli uçuş şartlarını sağlayabilecek kadar yerine getirmesi önemlidir. Uçaklarda EİS enerji kaynağı olarak kullanılacak bataryaların da güvenilirlik analizi önemlidir.



Şekil 1. EİS Mimarisi

Uçak yaşam döngüsünün güvenilirliği tasarım ve geliştirme aşamasında, tasarım gereksinimlerini karşılayacak bileşenlerin seçimi ve sistemlerin tasarımı sırasında kazanılan bir yetkinliktir. Ardından tasarım süreci, tasarım çözümlerinin gereksinimleri karşıladığından emin olmak için doğrulama ile tamamlanır. Lityum-iyon bataryaların (LIB) elektriksel, mekanik ve çevresel durumlardan kaynaklanan belirli risklere dayanıklılığını test için standardizasyon üzerine çalışan kurumlar deney prosedürleri geliştirmiştir. Bununla birlikte, teknolojiye sürekli ilerleme nedeniyle LIB'nin olası performans kaybı durumları halen araştırılmaya devam etmektedir (Stephens vd., 2017).

Güvenilirlik tasarımı ve geliştirme süreci, Şekil 2'de gösterilen adımlardan oluşur. Bu çalışmada, Elektrikli Uçak (EU) ve Hibrit Elektrikli Uçağın (HEU) için güvenilirlik tasarımı ve geliştirme aşamaları detaylandırılmıştır. Çalışmanın odak noktası, EİS'nin ana birimi olarak batarya sistemini güvenilirliğini ve sistemin genel güvenilirliğini etkileyen önemli faktörleri tanımlamaktır. Araştırmanın metodolojisi ve işlem adımları Şekil 2'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2. Güvenilirlik Tasarımı ve Geliştirilmesi

METOD

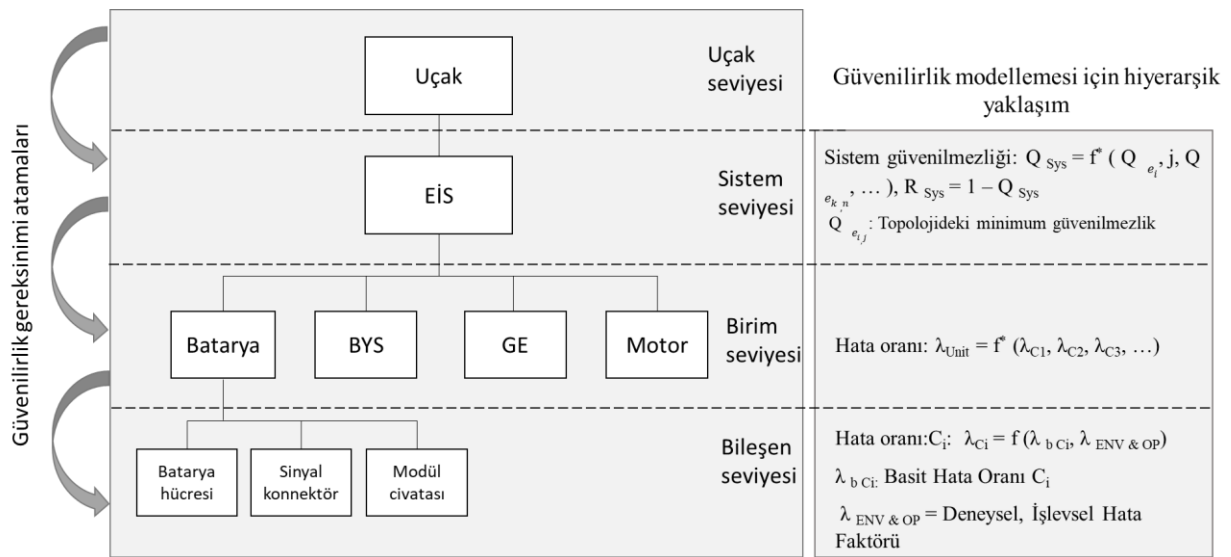
Bu çalışmada havacılık endüstrisinin gündemine giren elektrikli itki sistemlerinde kullanılması düşünülen LIB sistemlerine yönelik güvenilirlik analizi gerçekleştirilmiştir. Uçak elektrik sistemlerinin tasarım aşamasında güvenilirliğini modelleyerek değerlendirmek için literatürde genel kabul gören Hiyerarşik Seviye (HL) yaklaşımı (Xu vd., 2019) kullanılmıştır. Bu yaklaşıma göre öncelikle güvenilirlik gereksinimleri sistemin farklı seviyelerine atanmıştır. Her bir sistem seviyesinde karşılaşılan hatalar literatür analizi ile tanımlanmış ve karşılaşılan durumlarına göre güvenilirlik kriterleri incelenmiştir. Sistem seviyelerinde görülen hata modları daha sonra bir balık kılıçığı diyagramı üzerinde incelenmiş ve aralarındaki ilişkiler gösterilmiştir. Bu ilişkilere göre hata modları dört temel alanda gruplandırılmıştır. Elde edilen bu model ile endüstrinin kullandığı standartlar karşılaştırılmış, mevcut standartların güvenilirlik açısından bu alanları kapsayıp kapsamadığı değerlendirilmiştir.

GÜVENİLİRLİK GEREKSİNİMLERİ TANIMLAMA VE ATAMA

Tasarım güvenilirliği, uçak seviyesinde güvenilirlik gereksinimlerinin tanımlanmasıyla başlar. Bu gereksinimler daha sonra uçak seviyesinden sistem seviyesine ve son olarak da bileşen seviyesine atanacaktır. Başlıca güvenilirlik indeksleri Tablo 1'de listelenmiştir. EİS kullanan elektrikli uçaklarda, hiyerarşik model (Xu vd., 2019) Şekil 3'te gösterilmektedir. Bu yöntemle göre güvenilirlik 3 seviyede hesaplanır. Birinci seviye (Ünite seviyesi), yük (güç/akım) ve sıcaklık gibi operasyonel ve çevresel özellikleri dikkate alarak bileşen seviyesindeki arıza oranı ile ilgilidir. İkinci seviye, bileşenlerden oluşan alt sistemlerin güvenilirliğinin modellendiği Birim seviyesidir. Üçüncüsü, alt sistem güvenilirlik modeline dayalı olarak sistem güvenilirliğini ölçmek için Sistem seviyesidir. Bu yöntem, aşağıdan yukarıya bir yaklaşım kullanarak sistem güvenilirliği özelliklerini sayısal olarak elde etmeye imkân sağlar (Xu vd., 2019).

Tablo 1. Güvenilirlik Gereksinim Atamaları

Güvenilirlik İndeksleri	Uçak Seviyesi	Sistem Seviyesi	Birim Seviyesi	Bileşen Seviyesi
		EİS	Batarya Modülü	Batarya Hücresi
Emniyet	√	√	√	√
Güvenilirlik	√	√	√	√
Dayanıklılık	√	√		
Hazır bulunurluk	√	√		
Bakım yapılabilirlik	√	√		
Tahmin edilebilirlik	√	√		√

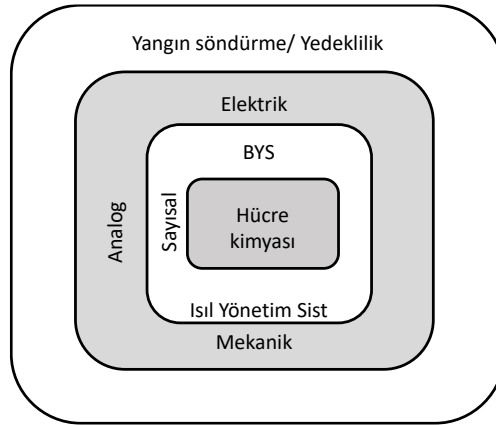


*Fonksiyon mimariye bağlıdır

Şekil 3. Güvenilirlik Modellemesi için Hiyerarşik Yaklaşım

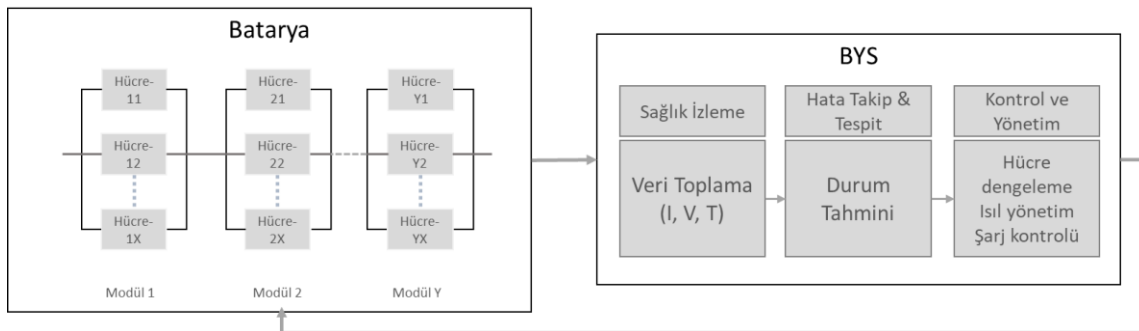
GÜVENİLİRLİK TASARIMI

Güvenilirlik tasarımı, güvenilirlik analizindeki bir sonraki adımdır. Bu aşamada, belirlenen güvenilirlik gereksinimlerini karşılayabilecek uygun tasarım özelliklerini geliştirmek için güvenilirlik teknikleri kullanılır. Batarya için hiyerarşik yaklaşım göz önüne alındığında, batarya hücresi, eleman seviyesinde tasarım tekniklerinin uygulanması için önemli bir bileşendir. Eleman seviyesindeki arıza analizi, uçak seviyesindeki arıza için bir temel sağlayabilir. Havacılıkta tasarım teknikleri çoğunlukla hatadan kaçınma ve hataya dayanıklı olarak sınıflandırılır (Zio vd., 2019). İlk çözüm, donanımın güvenilirliğini artırmayı ve herhangi bir arıza olasılığını azaltmayı amaçlar ve ikincisi, bir veya daha fazla bileşen çoğunlukla fazlalık nedeniyle arızalansa bile bir sistemin normal işlevselliğini korumaktır. Batarya hücresi arıza durumu, Dahili ve Harici arıza olmak üzere 2 ana gruba ayrılır (Stephens vd., 2017). Dahili arıza, ekzotermik reaksiyonlar/termal kaçak, dahili kısa devreler, yaşlanma ve dahili mekanik stres ile ilgilidir. Harici arızalar harici elektriksel, mekanik, kimyasal ve termal nedenler olarak kategorize edilebilir. Hataya dayanıklı tekniklerin uygulanması, olası tüm arızaların üstesinden gelmek için farklı arıza koruma mekanizmaları sağlayabilir. Katman katman “Soğan güvenlik mekanizması”, hücre kimyası, hücre tasarımı ve paketleme, kısa devre koruması (sigorta), batarya konektörü (kontaktör), Sistem tasarımı ve hücre muhafazası, BMS, Isıl Yönetim Sistemi ve mekanik çarpışma korumasını içerir (Larsson ve Mellander, 2017). Ayrıca, Yedeklilik ve yangınla mücadele mekanizmaları, arıza etkisinin şiddetini azaltacaktır. EPS batarya sistemindeki olası arıza koruma tekniklerinin bir özeti Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 4. Çok Katmanlı Hata Önleme Teknikleri

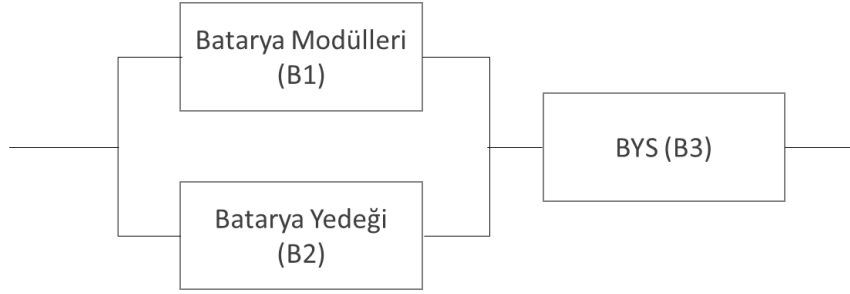
EİS'de gerekli güç ve voltajın sağlanabilmesi için ister silindir ister poşet şeklinde yüzlerce, binlerce hücrenin seri ve paralel bağlanması gerekir. Bir modüldeki her bir batarya hücresindeki arıza, diğer batarya hücrelerinin yaşlanma sürecini artıracaktır, bu nedenle bir batarya hücresi arızası bile batarya modülünün sağlığını ve batarya sisteminin toplam güvenilirliğini etkileyebilir (Shu vd., 2020). X*Y hücreleri ve BYS işlevlerinden oluşan batarya sisteminin bir topolojisi Şekil 5'te gösterilmektedir. BYS, her bir hücre durumu ve genel performans hakkında veri toplamak için sensör kullanır. Verileri uygun bilgilere dönüştürmek ve bataryanın sağlık durumunu analiz etmek için farklı arıza teşhis ve tahmin teknikleri uygulanmaktadır. Arıza teşhisi, arızanın konumu ve modları hakkında bilgi verirken, prognoz, bir batarya hücresinin ve batarya sisteminin tahmini Kalan Faydalı Ömrünü (RUL) sağlar. Son olarak, arıza teşhisi ve prognoz sonuçlarına göre güvenli çalışma penceresinde pil çalışmasına ilişkin pil kontrolü ve yönetimi gerçekleştirilir.



Şekil 5. Batarya Hücreleri Bağlantı Topolojisi ve BYS İşlevi

GÜVENİLİRLİK MODELİ ANALİZİ

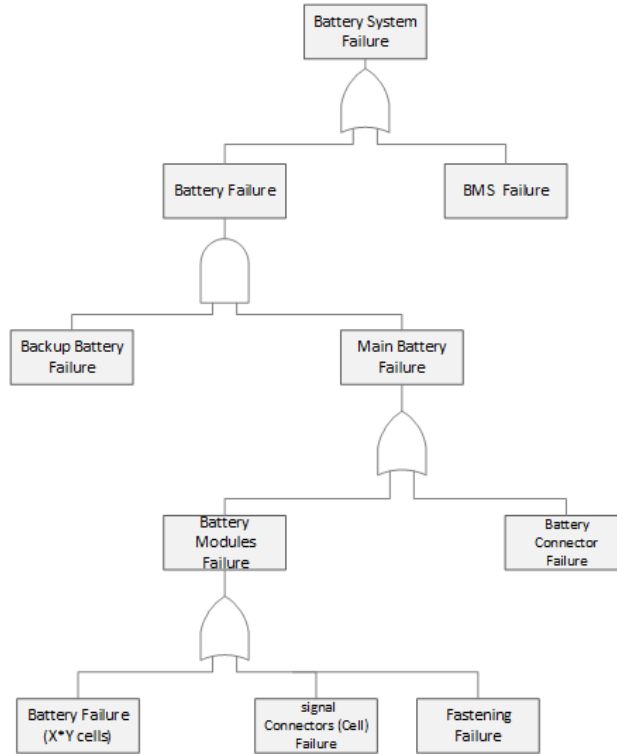
Tasarlanan mimariye ve sunulan tedbirlere dayalı olarak bir sonraki adım güvenilirlik modeli analizidir. Güvenilirlik Blok Diyagramları (RBD) ve Hata Ağacı Analizi (FTA) "ELEKTRONİK GÜVENİLİRLİK TASARIM EL KİTABI"nda sunulmaktadır. "Bir RBD, her kullanım durumu için öğenin tüm seviyeleri (birimler veya bileşen) veya işlevsel grupları arasındaki karşılıklı bağımlılıkları gösterir" ve "FTA tekniği, alt seviye öğeleri oluşturan blok diyagramları oluşturmak için bir yöntemdir" (DoD, 1998). Bataryanın güvenilirlik blok şeması Şekil 6'daki gibidir. Sunulan topolojiye göre batarya sistemi batarya modülleri ve batarya yedeklemesinden oluşmaktadır (Shu vd., 2020). Batarya sisteminin güvenilirliği Denklem 1'e göre tahmin edilir. Burada RB3 batarya konektörünün güvenilirliğidir, RB1 ve RB2 sırasıyla batarya modülünün ve yedek bataryanın güvenilirliğidir.



Şekil 6. Batarya Güvenilirliği Blok Diyagramı

$$R = R_{B3} (1 - R_{B1}R_{B2}) \quad (1)$$

Batarya sisteminin her bir elemanının güvenilirliğini hesaplamak için, Tablo 2'de verilen arıza indekslerine dayalı olarak Şekil 7'de ki gibi FTA kullanılır.



Şekil 7. Batarya sistemi Hata Analizi Ağacı (FTA)

Önerilen topolojiye bağlı olarak, ana batarya hatası (λ_{B1}) Denklem 1'e göre hesaplanır:

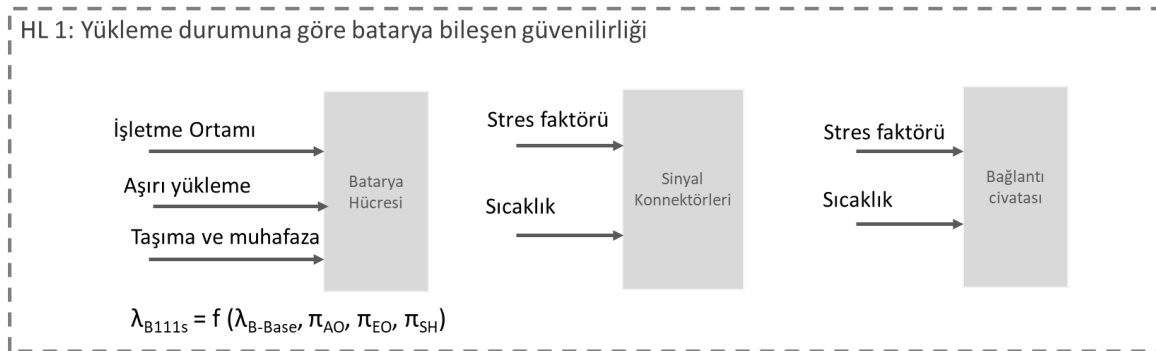
$$\lambda_{B1} = \lambda_{B11} + \lambda_{B12} = [1/X * \lambda_{B11s} * Y + Y * \lambda_{B112} + (Y+1) * \lambda_{B113}] + \lambda_{B12} \quad (2)$$

Burada λ_{B111s} tek hücre hatasıdır. Eğer yedek batarya ve ana batarya hata oranları eşit kabul edilirse; $\lambda_{B1} = \lambda_{B2}$. Buradan da $\lambda_B = \lambda_{B1}/2$ olacaktır. O zaman batarya sistemi hata oranı $\lambda_{B5} = \lambda_B + \lambda_{B3}$.

Tablo 2. Olay Hata İndeksi

Olay	Hata Oranı
Batarya sistem hatası	λ_{BS}
Batarya hatası	λ_B
Ana batarya hatası	λ_{B1}
Yedek batarya hatası	λ_{B2}
BYS Hatası	λ_{B3}
Batarya modülü hatası	λ_{B11}
Batarya konnektörü hatası	λ_{B12}
Batarya hatası (X*Y hücre)	λ_{B111}
Sinyal konnektörü hatası	λ_{B112}
Bağlantı civatası hatası	λ_{B113}

Xu vd. tarafından sunulan güvenilirlik modeli 3 HL'ye göre (Xu vd., 2019), her bileşenin güvenilirliği, bağlantı sıcaklığı ve yükleme koşullarının bir fonksiyonu olarak modellenmiştir. Bir batarya hücresi arıza oranı, temel arıza oranının ($\lambda_{B-Temel}$) bir fonksiyonu olup, tasarım ve üretim özellikleri ve ayrıca ortam çalışma koşulu (π_{AO}), aşırı çalışma koşulu (π_{EO}) ve depolama ve taşıma koşulları (π_{SH}) tarafından belirlenir. Benzer şekilde, bataryanın diğer bileşenleri de çevresel ve mekanik faktörlerden etkilenir (sinyal konektörleri ve sabitleme vidaları). Genel olarak, batarya hücrelerinin güvenilirlik değerlendirmesi için kimyasal, elektrik, mekanik ve termal olmak üzere dört ana faktör dikkate alınmalıdır (Gandoman vd., 2021). Bileşen seviyesinde batarya güvenilirliği Şekil 8'de gösterilmektedir.



Şekil 8. Bileşen Seviyesinde HL1

Bataryanın işlevselliği, batarya ömrü boyunca kademeli olarak gelişen güç azalması, kapasite düşüşü ve empedans artışı şeklinde olumsuz yönde gelir (Sripad vd., 2021; Vetter vd., 2005). Batarya performans kaybını etkili bir şekilde ele almak için, öncelikle nedenleri belirlemek önemlidir. Ancak, LIB yaşlanma mekanizmasının karmaşıklığı nedeniyle, kapasite ve güç azalmasının temel nedenlerinin araştırılması zorluklar barındırmaktadır; bu kayıplar tekil bir kaynaktan değil, farklı nedenlerden kaynaklanmaktadır (Vetter vd., 2005). Her bir LIB bileşeninde (anot, katot ve elektrolit) yaşlanma süreci farklıdır (Hendricks vd., 2015; Vetter vd., 2005). Döngünün etkisi altındaki bir anotta, elektrolit ayrışması, empedans artışıyla aynı anda kapasite ve gücün azalmasına neden olan lityum kaybına yol açar.

Öte yandan, aktif karbonda lityum korozyonu meydana gelir, bu da lityum kaybı dolayısıyla kendi kendine deşarj ve kapasite düşüşüne neden olur. Ayrıca çevrim sırasında hacim değişiklikleri sonucu aktif malzeme katmanlarının birbiri ile temaslarını kaybetmesi, aktif malzeme kaybına yol açarak kapasite düşüşüne ve empedans artışına neden olur. Katot tarafında, yığın malzemenin yapısındaki faz geçişleri ve değişiklikler yaşlanmayı hızlandırır ve anottaki süreçlerden daha önemli olumsuzluklara yol açar (Vetter vd., 2005). LIB'de kapasite ve güç azalmasına yol açan yaşlanmaya katkıda bulunan nedenlerin (Ilie ve Ciocoiu, 2010) bir özeti Şekil 9'da bir kılçık diyagramı şeklinde gösterilmektedir. Yaşlanma, kullanım, ortam koşulu (yüksek/düşük sıcaklık), aşırı kullanım/çalışma koşulu (yüksek çevrim hızı, yüksek C oranı ve aşırı şarj/deşarj) ve bunların kombinasyonu (Diao vd., 2019; Hendricks vd., 2015; Vetter vd., 2005) ile oluşur. Batarya hücresi arıza oranının değerini tahmin etmek için ölçülmesi gereken parametreler, batarya paketi tasarımında yer alan sensörler ile okunan hücre sıcaklığı, voltaj ve akımdır.

Juarez-Robles vd. (2020) voltaj ve sıcaklık çalışmaları, SOC'nin iç dirence ve ısı üretim hızına bağlı olduğunu göstermiştir. Şarj ve deşarj döngülerinin etkisi altında bataryanın maksimum enerji kapasitesi (Ah) azalır. Sağlık Durumu (SOH), bataryanın başlangıç kapasitesine oranla anlık kapasitesi olarak tanımlanır. Literatür daha çok SOH modellemesine odaklanırken, elektrikli uçakların uçuş emniyeti açısından, güç kapasitesi ve ani işlev kaybı riskini tahmin etmek ve pilota doğru olarak göstermek önemlidir (Sripad vd., 2021). Bu tür arızaların analizi, elektrikli uçak tahrik sistemlerinin güvenilirliği açısından uçuş sırasında ortaya çıkabilecek işlev kayıplarının önlenmesi için çok önemlidir (Bills vd., 2020).

Bataryanın tasarımında uygun elektrokimyanın seçilmesi, güvenilirliğin temel faktörüdür (Can vd., 2022). Bunun yanı sıra, bataryanın güvenilirliği, Şekil 10'da gösterildiği gibi EİS uygulamasındaki diğer çalışma parametrelerinden de bağımsız değildir.

DOĞRULAMA VE GEÇERLEME

Güvenilirlik analizi süreci ve tasarım tamamlandığında, sistem prototipi güvenilirlik gereksinimlerine uygun olduğunu doğrulamak için test edilir. LIB için hassas üretim kalite kontrolü ve testi uygulamak, batarya hücresi temel arıza oranını azaltmak için çok önemlidir. Sertifikasyon sürecinde bataryanın uygunluğu ve güvenilirliği tecrübe veya RTCA-DO-311, DO-347, UN T 38.3 ve UL-1642 gibi geçerli standartlara göre testler yapılarak, otorite onayı ile elde edilebilir. Bununla birlikte CS-25.1309 "Ekipman, sistemler ve kurulumlar"ın gereksinimleri de karşılanmalıdır. Felaket ve tehlikeli durum güvenlik gereksinimlerinin bir örneği, "batarya içindeki herhangi bir arızanın sonucu olarak sıcaklık veya basınçta kendi kendine devam eden, kontrolsüz artışlar her uçuş saati için 10-9 değerinden az olmalıdır" şeklindedir.

Tablo 3. Büyük Uçaklar için LIB Gereksinimleri (CS-25)

Kabul Edilebilir Uygulamalar (MOC)	Test Gereksinimleri	Sistem Emniyet Değerlendirmesi	Karmaşık Elektronik Donanım	Yanıcılık
Part 21 CS-25.1301 Equipment Function and Installation (Ekipman işlevleri ve kurulumu) CS-25.1309 Equipment, Systems, and Installations (Ekipmanlar, sistemler ve kurulumlar) CS-25.1351 Electrical Systems and Equipment, General (elektrik sistemleri ve ekipmanları, genel) CS-25.1353 Electrical Equipment and Installations (elektrik ekipmanları ve kurulumları) SC E-19 EHPS.380 Propulsion Battery (İtki bataryası)	DO-160G/ ED-14G Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment (uçuş ekipmanları için çevresel şartlar ve test prosedürleri) RTCA DO-311 Minimum Operational Performance Standards for Rechargeable Lithium Battery Systems (Şarj edilebilir batarya sistemleri için minimum işletme performans standartları)	ARP 4761 AMC CS-25.1309	AMC 20-152A/ DO-254/ED-80	CS 25.869 Fire protection: systems (yangın önleme: sistemler) CS 25.863 Flammable fluid fire Protection (yanıcı sıvı yangınları: korunma) CS 25.853 Compartment interiors (iç kompartmanlar)

Öngörülebilir herhangi bir şarj veya deşarj durumunun bir sonucu olarak hücre sıcaklığında veya basıncında sürekli, kontrolsüz artışlar ise her bir uçuş saatinde 10-7 değerinden daha az olmalıdır. Diğer hata durumları da FAA § 25.1309 veya EASA CS-25.1309 (büyük uçaklar için) gereksinimlerini sağlamalıdır. Bununla birlikte, itki sistemi bataryası için arıza modunun etkilerinin geleneksel bataryalardan farklı olması beklenir. Bu nedenle itki sistemi bataryalarının havacılık endüstrisindeki teknolojik ilerlemenin kümülatif deneyiminin yansıtıldığı Kabul edilebilir uygulamalarda (MOC) veya endüstri standartlarında yeni bir açılım gerekmektedir. Tablo 3'de, örnek olarak büyük uçaklar için LIB için sertifikalandırma sürecine ilişkin uçuşa elverişlilik gereksinimlerinin, kabul edilebilir MOC'lerin ve standartların listesi verilmiştir. Görüleceği gibi bu standartların ana konusu itki sistemi bataryaları olmadığı için, itki sistemleri gereksinimleri doğrudan tanımlanmamıştır, ancak ASTM, diğer standartlara referanslar vererek, onlarla birlikte kullanılması amacı ile "F3235-17a Uçak Elektrik Enerjisi Depolama Bataryaları için Standart

Şartnamesi”ni geliştirmiştir. ASTM F3235, itki enerjisi depolama gereksinimlerine yer verse de büyük uçakların itki sistemi gereksinimlerine bu standartta değinilmemiştir. .

Havacılığa özgü düzenlemelere ve standartlara ek olarak, Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (IEEE), Sigortacılar Laboratuvarları (UL), Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC), Uluslararası Otomotiv Mühendisleri Derneği (SAE), diğer düzenleyici kurumlar da batarya standartları üzerine çalışmaktadır. Uluslararası Standardizasyon Örgütü ve Amerika Birleşik Devletleri Gelişmiş Batarya Konsorsiyumu (USABC), elektrikli araçlardaki olası batarya arıza modlarına karşı elektrik tasarımı sertifikasyonu ve yürütülecek güvenlik testleri için standartlar geliştirmektedir (Stephens vd., 2017; Hunt, 1996). Elektrikli araçlar için geçerli standartların ve testlerin listesi Tablo 4 ile verilmiştir.

Tablo 4. Elektrikli Araç Bataryası Standartları ve Testleri

Kurum	Kodu	Uygulama seviyesi				Testler
		Hücre	Modül	Paket	Araç	
SAE International	SAE J2464	√	√	√		Mekanik şok, düşme, ezilme, daldırma, mekanik bütünlük, delinme Isıl control olmadan döngü, pasif İlerleme, seperatör tıkanması, kısa devre testleri aşırı şarj/deşarj
	SAE J2929				√	Titreşim, ısıl şok, nem, ışığa maruz kalma, düşme, daldırma, mekaik şok, elektrik kısa devre, aşırı şarj/deşarj koruma, system hatası, ısıl control system arızası, yüksek gerilim koruması
International Organization for Standardization	ISO 6469-1	√	√	√		Elektrik itkili kara yolu araçları emniyet gereksinimleri Kısım 1: Araç üstü şarj edilebilir enerji depolama sistemi
	ISO 6469-2				√	Elektrik itkili kara yolu araçları emniyet gereksinimleri Kısım 2: Araç kullanma emniyet esasları ve hatalara karşı koruma
Underwriters Laboratories	UL 2580		√	√		Aşırı şarj lkoruması, kısa devre, aşırıdeşarj koruması, sıcaklık testi, dengelemesiz şarj, yalıtım direnci, soğutma/ısıl denge system arızası, Şok, ezilme, düşme, ısıl döngü, harici/dahili yangın durumu
United States Advanced Battery Consortium		√	√	√		Performans, emniyet, aşırı kullanım, ömür devri

Testlerin çoğunun, akut ısıl tehlikelere dayanmayı amaçladığı, EU ve HEU'da ise herhangi bir ani güç veya kapasite azalmasının kapsamadığı görülmektedir. USABC yaşam döngüsü testi, hızlandırılmış yaşlanmayı veya yaşam döngüsü testlerini içermektedir (Hunt, 1996). Elektrikli Araç Bataryası Test Prosedürleri Kılavuzuna dayalı olarak, bataryaların hizmet ömrünü (takvim ve döngü) incelemek için bir dizi test gereksinimleri belirlenmiştir. Hem hızlandırılmış yaşlanma hem de normal koşullar, batarya performansındaki bozulmayı yaşamın bir işlevi olarak yetkin bir şekilde tanımlamak ve uygulanabilir arıza modlarını tanımak için kullanılır. EİS kullanımında, bataryanın normalden daha yüksek döngü hızındaki hızlandırılmış yaşlanma sonucu yeni bir arıza modu ortaya çıkmamalıdır. USABC yaşam döngüsü test prosedürü şunları kapsar:

- **Hızlandırılmış Yaşlanma:** Normal kullanım sırasında batarya ömrünü azaltan veya bozulmayı hızlandıran stresli parametreler uygulamak (kazalar veya kötüye kullanım koşulları hariç). Örneğin, bu prosedürde sürekli elektrik döngüsü gereklidir.
- **Gerçek Kullanım Simülasyonu:** Elektrikli araç bataryasının gerçek işletimde çalışabileceği koşullar uygulama ortamlarında geniş bir sıcaklık aralığından farklı düzenli ve coğrafi değişikliklere kadar simüle edilir.
- **Referans Performansı:** farklı performans ve arıza özelliklerini belirlemek için aralıklı olarak tekrarlanan bir grup elektrikli performans testi dahil olmak üzere bataryanın ömrü boyunca meydana gelebilecek bozulmayı göstermek için gerçekleştirilir.
- **Temel Yaşam Döngüsü:** hızlandırılmış ömür testinin sonuçlarıyla karşılaştırma için bir “referans” olarak veya batarya ömrünü belirlemek için gerçekleştirilir (Hunt, 1996).

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, EİS’lerde kullanılan LIB için güvenilirlik değerlendirmesi ve güvenilirlik analizi yapılmış ve her bölümde tasarım aşamasında güvenilirliğe yönelik adımlar açıklanmıştır. Güvenilirlik gereksinimi tanımı yapılarak 3 hiyerarşik seviyede güvenilirlik yaklaşımı ile uçak seviyesinden sistem, ünite ve bileşen seviyesine güvenilirlik gereksinimlerinin dağılımı açıklanmıştır. Bir batarya sistem tasarımının örnek mimarisi için hata toleransı ve hatadan kaçınma tekniklerini içeren güvenilirlik tasarımı uygulanmıştır. Ardından güvenilirlik modeli analizi, güvenilirlik blok diyagramını ve FTA’yı kullanılarak sistemin genel güvenilirliğinin, batarya hücresi güvenilirliğinin bir fonksiyonu olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle, kılçık diyagramını kullanarak batarya hücrelerinin arıza modları, batarya hücresi arızasının nedenlerini ve katkıda bulunan faktörler belirlenmiştir. Batarya hücresi güvenilirliğinin, tasarım ve üretim açısından temel güvenilirliğe ek olarak operasyonel, çevresel ve depolama ve taşıma koşullarından etkilendiği gösterilmiştir. Son olarak, mevcut geçerli havacılık gereksinimleri ve elektrikli araç standartları dikkate alınarak tasarım kriterlerinin doğrulanması için güvenlik testleri tanıtılmış ve havacılıkta LIB güvenilirliği için bilhassa yaşlanma açısından yeni düzenlemelere ihtiyaç olduğu gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

- Bills, A., Sripad, S., Fredericks, W. L., Guttenberg, M., Charles, D., Frank, E., & Viswanathan, V. (2020). Universal Battery Performance and Degradation Model for Electric Aircraft. <https://doi.org/10.26434/chemrxiv.12616169.v1>
- Can, S., Gül, C. G., Koruyucu, E., & Yıldız, M. (2022). Reliability Considerations of the Common Unit in Hybrid Electric Propulsion. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1226(1), 012076. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1226/1/012076>
- Diao, W., Saxena, S., & Pecht, M. (2019). Accelerated cycle life testing and capacity degradation modeling of LiCoO₂-graphite cells. *Journal of Power Sources*, 435, 226830. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.226830>
- DoD. (1998). Military Handbook Electronic Reliability Design Handbook. In DoD (MIL-HDBK-3, Issue 1 October).
- Gandoman, F. H., Ahmadi, A., Bossche, P. Van den, Van Mierlo, J., Omar, N., Nezhad, A. E., Mavalizadeh, H., & Mayet, C. (2019). Status and future perspectives of reliability assessment for electric vehicles. *Reliability Engineering and System Safety*, 183, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.11.013>
- Gandoman, F. H., Ahmed, E. M., Ali, Z. M., Berecibar, M., Zobaa, A. F., & Aleem, S. H. E. A. (2021). Reliability evaluation of lithium-ion batteries for e-mobility applications from practical and technical perspectives: A case study. *Sustainability (Switzerland)*, 13(21). <https://doi.org/10.3390/SU132111688>
- Hendricks, C., Williard, N., Mathew, S., & Pecht, M. (2015). A failure modes, mechanisms, and effects analysis (FMMEA) of lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 297, 113–120. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.07.100>
- Hornung, M., & Sizmann, A. (2013). Battery Pack Modeling.
- Hunt, G. (1996). Electric Vehicle Battery Test Procedures Revision 2. Idaho National Engineering Laboratory (INEL), January, 1–40.

- Ilie, G., & Ciocoiu, C. N. (2010). Application Of Fishbone Diagram To Determine The Risk Of An Event With Multiple Causes Management Research Application Of Fishbone Diagram To Determine The Risk Of An Event With Multiple Causes. *Management Research and Practice*, 2(1), 1–20. <http://mrp.ase.ro/no21/f1.pdf>
- Juarez-Robles, D., Jeevarajan, J. A., & Mukherjee, P. P. (2020). Degradation-Safety Analytics in Lithium-Ion Cells: Part I. Aging under Charge/Discharge Cycling. *Journal of The Electrochemical Society*, 167(16), 160510. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/abc8c0>
- Larsson, F., & Mellander, B. (2017). Lithium-ion Batteries used in Electrified Vehicles – General Risk Assessment and Construction Guidelines from a Fire and Gas Release Perspective. Borås, 1–25. <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/252355/252355.pdf>
- Shu, X., Yang, W., Guo, Y., Wei, K., Qin, B., & Zhu, G. (2020). A reliability study of electric vehicle battery from the perspective of power supply system. *Journal of Power Sources*, 451, 227805. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.227805>
- Sripad, S., Bills, A., & Viswanathan, V. (2021). A review of safety considerations for batteries in aircraft with electric propulsion. *MRS Bulletin*, 46(5), 435–442. <https://doi.org/10.1557/s43577-021-00097-1>
- Stephens, D., Shawcross, P., Stout, G., Sullivan, E., Saunders, J., Risser, S., & Sayre, J. (2017). Lithium-ion Battery Safety Issues for Electric and Plug-in Hybrid Vehicles. US DOT, October, chapter 2-page 7, 10. www.ntis.gov.
- Vetter, J., Novák, P., Wagner, M. R., Veit, C., Möller, K. C., Besenhard, J. O., Winter, M., Wohlfahrt-Mehrens, M., Vogler, C., & Hammouche, A. (2005). Ageing mechanisms in lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 147(1–2), 269–281. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.01.006>
- Xu, Q., Xu, Y., Tu, P., & Zhao, T. (2019). Systematic Reliability Modeling and Evaluation for On-Board Power Systems of More Electric Aircrafts. *IEEE Transactions on Power Systems* 34(4), 3264–3273. <https://doi.org/10.0.4.85/TPWRS.2019.2896454>
- Zio, E., Fan, M., Zeng, Z., & Kang, R. (2019). Application of reliability technologies in civil aviation : Lessons learnt and perspectives. *Chinese Journal of Aeronautics*, 32(1), 143–158. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2018.05.014>