



Konferans Bildirisi

BOEING 787 Model Daha Elektrikli Uçak Sistem Yenilikleri ve Araştırılan Sorunları

Nur Tuğçe GÖZÜKÜÇÜK¹

¹Uşak Üniversitesi, Sivil Havacılık MYO, <https://orcid.org/0000-0002-4936-0002>,
nur.gozukucuk@usak.edu.tr

(First received September 14, 2023 and in final form December 25, 2023)

3rd International Conference on Design, Research and Development
(RDCONF 2023)
December 13 - 15, 2023

Reference: Gözükcük, N., T. BOEING 787 Model Daha Elektrikli Uçak Sistem Yenilikleri ve
Araştırılan Sorunları. Orclever Proceedings of Research and Development,3(1), 458-468.

Özet

MEA teknolojisi son yıllarda güç elektroniği, hataya dayanıklı mimari, elektro-hidrostatik aktüatörler, uçuş kontrol sistemleri, yüksek yoğunluklu elektrik motorları, güç üretimi ve dönüştürme sistemleri alanında gelişmeler meydana getirmiştir. Geleneksel uçak sistemlerinde itici olmayan sistemler, hidrolik, pnömatik, mekanik ve elektrik gibi farklı ikincil güç kaynaklarının bir kombinasyonu ile çalıştırılırken daha elektrikli uçak (MEA) konsepti, itici olmayan tüm sistemler için optimum elektrik gücünün kullanılmasını sağlamaktadır.

Geleceğin uçak teknolojisinin hedefi; verimlilik, emisyonlar, güvenilirlik ve bakım maliyetleri gibi çeşitli uçak özelliklerini iyileştirmek için çevresel kontroller ve motor çalıştırma gibi elektrik dışı güç kullanan sistemlerin büyük bir kısmını elektrik sistemleriyle değiştirmektir. Modern zamanların daha elektrikli uçak özelliğindeki ilk sivil hava aracı olan B787 serisi uçaklar, kompozit gövde ve kanat profilleri, kablolu uçuş kontrolleri, gelişmiş kokpit ve General Electric veya Rolls-Royce motor özelliklerine sahiptir. Geçmiş tasarımlarından farklı olarak Boeing, B787 teknolojisinde motorlardan çıkan havanın kullanımını en aza indirmiş ve geleneksel pnömatik olarak çalışan sistemler yerine elektrikle çalışan sistemleri kapsamlı olarak kullanmaktadır. B787 yeni nesil yolcu uçaklarında uçak ağırlığı, yakıt tüketimi, toplam yaşam döngüsü maliyetleri, karbon nötrlüğü, bakım kolaylığı ve uçak güvenilirliği gibi önemli iyileştirmelerin olumsuz çevresel koşul etkilerini azaltacağı öngörülmektedir.



Bu çalışmada, daha elektrikli uçak konsepti olan ve tasarım süreci boyunca farklı test ve çalışma yöntemleri getiren B787 uçak modelinin sistem yenilikleri ve yeni sistemlerin oluşturduğu sorunlar araştırılmıştır.

Anahtar: *Boeing 787, daha elektrikli uçak, sistem yenilikleri, sistem sorunları*



BOEING 787 Model More Electric Aircraft System Innovations and Researched Problems

Abstract

In recent years, MEA technology has brought about developments in the field of power electronics, fault-tolerant architecture, electro-hydrostatic actuators, flight control systems, high-density electric motors, power generation and conversion systems. Non-propulsive systems in traditional aircraft systems, it is powered by a combination of different secondary power sources such as hydraulic, pneumatic, mechanical and electrical while the more electric aircraft (MEA) concept ensures the use of optimum electrical power for all non-propellant systems.

The goal of future aircraft technology is to replace the majority of non-electrical power-using systems, such as environmental control and engine starting, with electrical systems to improve various aircraft characteristics such as efficiency, emissions, reliability and maintenance costs. B787 series aircraft, the first civil aircraft with more electric aircraft features of modern times, it features composite fuselage and wing profiles, fly-by-wire flight controls, advanced cockpit and General Electric or Rolls-Royce engines. Different from previous designs, Boeing has minimized the use of air from the engines in the B787 technology and makes extensive use of electrically powered systems instead of traditional pneumatically powered systems. B787 new generation passenger aircraft, it is anticipated that significant improvements such as aircraft weight, fuel consumption, total life cycle costs, carbon neutrality, ease of maintenance and aircraft reliability will reduce the effects of adverse environmental conditions.

In this study, the system innovations of the B787 aircraft model, which is a more electric aircraft concept and introduces different testing and working methods throughout the design process, and the problems caused by the new systems were investigated.

Keywords: Boeing 787, more electric aircraft, system innovations, system problems



1. Giriş

Uçak teknolojisinde büyük, karmaşık, güvenlik açısından kritik sistemler için tasarım gereksinimlerinin belirlenmesi zorlu bir süreçtir. B787 gereksinimlerinin geliştirilmesi için, milyonlarca parçaya on binlerce gereksinim uygulanmaktadır. Ayrıca her parça, bileşen ve sistem birden fazla gereksinime tabidir. Sağlam bir gereksinim geliştirme süreci, yeterli doğrulama ve geçerlilik sağlar, böylece risk uygun şekilde yönetilir ve gereksinim sorunları bulunup ele alınabilir [1].

B787 elektrik güç sistemi, geleneksel uçak teknolojisinde yaygın olarak kullanılan üç fazlı 115 VAC sistemin yerine üç fazlı 230 VAC elektrik gücünü kullanmaktadır. Voltajdaki 2:1 kat artış elektrik dağıtım sistemindeki fider kayıplarını azaltmakta ve daha az kablolama ile avantaj sağlamaktadır. Daha yüksek 230 VAC faz voltajının veya hattan hatta 400 VAC kullanılması ile oluşabilecek kısmi deşarjın olası etkilerinden kaçınmak için tasarım gereksinimleri büyük önem arz etmektedir [2].

Gaynor, Boeing 787 Dreamliner'ın tasarım sürecinde yeni bir teknolojinin ortaya çıkmasında yeni üretim yöntemleri, küresel iletişim, genişletilmiş tedarik zincirler, kapsamlı dış kaynak kullanımı ve proje yönetimi konularında karşılaşılan problemleri ele almıştır [3].

Karimi, geleceğin daha elektrikli uçak güç sistemlerinden ve geleceğin teknolojisinden örnekler vererek entegrasyondaki zorluklardan bahsetmiştir [4].

Tang ve ark., Boeing'in 787'nin alışılmadık tedarik zincirine ilişkin mantığını analiz ederek Boeing'in bunu yönetme konusundaki zorluklarını açıklamıştır [5].

Pecht ve ark., Boeing 787 Dreamliner teknolojiyle birlikte gelen güvenlik sorunlarını incelemiş ve bu sorunlara sebep olan üretim, tedarik zinciri ve organizasyonel faktörleri FAA (Federal Havacılık İdaresi) verilerine göre değerlendirilmiştir [6].

2. Boeing 787 Elektrik Güç Sistem Özellikleri

Daha elektrikli uçak konseptinde olan Boeing 787 teknolojisi, yeni özellikleri ile tamamen elektrikli uçak konsepti için önemli bir adımdır. Boeing 787 motorlarındaki hava tahliyesi büyük ölçüde ortadan kaldırılmış olup mevcut kullanılan hidrolik aktüatörler güçlerinin çoğunluğunu elektrik gücünden almaktadır. Boeing, elli yıllık uygulamadan koparak, elektrikli kompresörlerin motor tahliyesinden daha uygun olduğunu ve birçok tasarruf sağladığını öne sürmüştür. B787 elektrik güç sisteminde, geleneksel uçaklarda kullanılan üç fazlı 115 VAC güç faktörü yerine üç fazlı 230 VAC elektrik gücünün kullanılması

benimsenmiştir. Gerilimin arttırılması elektrik dağıtım sistemindeki besleyici kayıplarını azaltmış ve kablolanmanın önemli ölçüde azaltılması sağlamıştır.

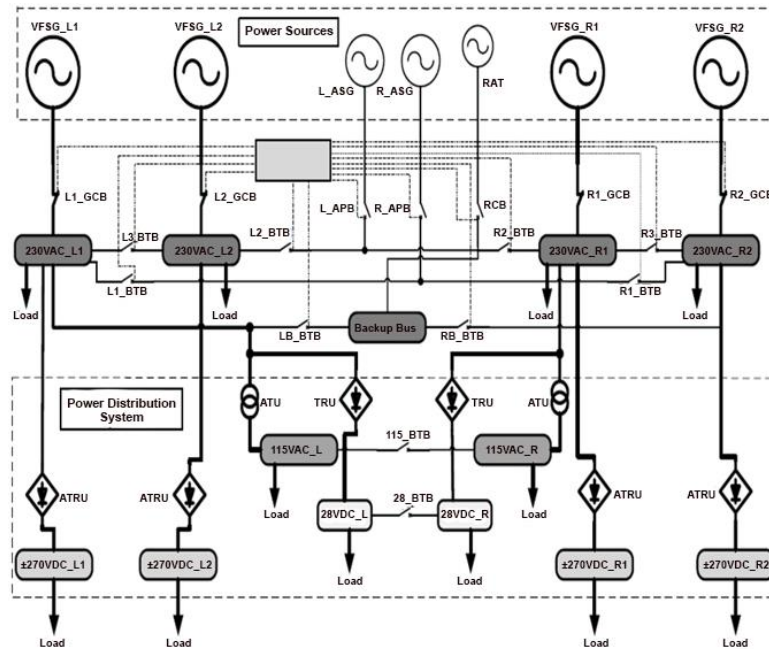
B787 elektrik güç sistemi, geleneksel uçaklarda bulunan sabit frekanslı (CF) 400 Hz güç yerine yeni teknoloji değişken frekans (VF) özellikte tasarlanmıştır.

B787 elektrik güç sisteminin göze çarpan özellikleri şunlardır:

- Motor başına 2×250kVA starter/jeneratör ile kanal başına 500kVA güç üretilir. Jeneratörler, son teknolojik gelişmeleri yansıtan VF değişken frekans özelliktedir.
- 2×225kVA APU starter/jeneratörler bulunur ve her starter/jeneratör APU'yu çalıştırır.
- Her ana jeneratör, güç dağıtım sistemini beslemeden önce kendi 230 VAC ana veri yolunu besler. Sistemde elektrik gücü 230 VAC yüklere güç sağlamanın yanında geleneksel konsepte olan eski alt sistemleri beslemek için 115 VAC ve 28 VDC güce dönüştürülür.

B787 gövdesinde artık tahliye havası kullanılmadığından çevresel kontrol sistemine, kabin basınçlandırma sistemine, kanat buzlanma önleme sistemine ve ayrıca havayla çalışan diğer alt sistemlere hava beslemesi bulunmamaktadır. Motordan alınan tek hava, motor kaputunun buzlanmasını önlemek için kullanılan düşük basınçlı fan havasıdır. Hava tahliyesiz motorunun benimsenmesi ile uçak motorlarının geleneksel yöntemlerle, yani yüksek basınçlı hava ile çalıştırılmamaktadır. Motorlar bu amaç için dahili marş motorunu/jeneratörleri kullanır ve motoru çalıştırmak için yaklaşık 180kVA güç gerekmektedir [2].

Şekil 1’de B787’nin MEA yapısında bulunan elektrik güç sistem kaynakları gösterilmiştir.



Şekil 1. B787’nin elektrik güç sistemi (Electric Power System, EPS) dağıtım mimarisinin model yapısı



Şekil 1’de görüldüğü gibi sistem, dört değişken frekanslı senkron jeneratör (Variable Frequency Synchronous Generator, VFSG), iki APU senkron jeneratör (APU Starter Generator, ASG) ve bir Ram hava türbini (RAT) jeneratöründen oluşmaktadır. VFSG’ler, normal uçuş sırasında elektronik ekipmana güç sağlayan ana jeneratörlerdir. ASG’ler ve RAT ise yedek güç kaynakları olarak çalışır. B787’nin toplam üretim kapasitesi, diğer Boeing modellerinin yaklaşık dört katı olan 1450 kVA büyüklüktedir [7].

3. Boeing 787 Elektrik Sistem Yeniliklerinin İncelenmesi

Federal Havacılık İdaresi (FAA) ve Boeing firması, B787’nin sertifikasyon süreci sırasında gerçekleştirilen çalışmaları doğrulamak ve uçağın amaçlanan güvenlik seviyesini karşıladığından emin olmak için kapsamlı incelemeyi yürütmek üzere B787 Kritik Sistem İnceleme Ekibini (CSRT) kurmuştur. CSRT yaptığı incelemeler sonucunda, belirli B787 sistemlerinin bazı parçalarında bireysel sorunlar olmasına rağmen sistemlerin sağlam bir mimariye ve yeterli yedekliliğe sahip olduğunu tespit etmiştir. Ayrıca, ilgili sorunların oluşturduğu bileşen arızalarından sonra sistemlerin güvenli bir şekilde çalışmaya devam ettiğini gözlemlemiştir. Tasarım sürecinde karşılaşılan hizmet içi sorunların altında yatan nedenlere entegre sistem bileşenlerinin doğrudan bir sebep vermediği karşılaşılan problemlerin büyük ve karmaşık yeni bir uçak geliştirme programında meydana gelen temel iletişim ve koordinasyon sorunları olduğu bulgusuna ekip tarafından ulaşılmıştır.

B787, birçok yeni teknolojiyi, yenilikçi tasarımı ve mimariyi kullanmıştır. Aşağıda açıklanan VFSG’ler, yüksek güçlü elektrik sistemi, elektrikle çalışan spoiler aktüatörleri ve kompozit gövde imalatı özellikleri B787’deki önemli teknolojik yeniliklerdendir.

3.1. VFSG, GCU ve birincil güç panelleri

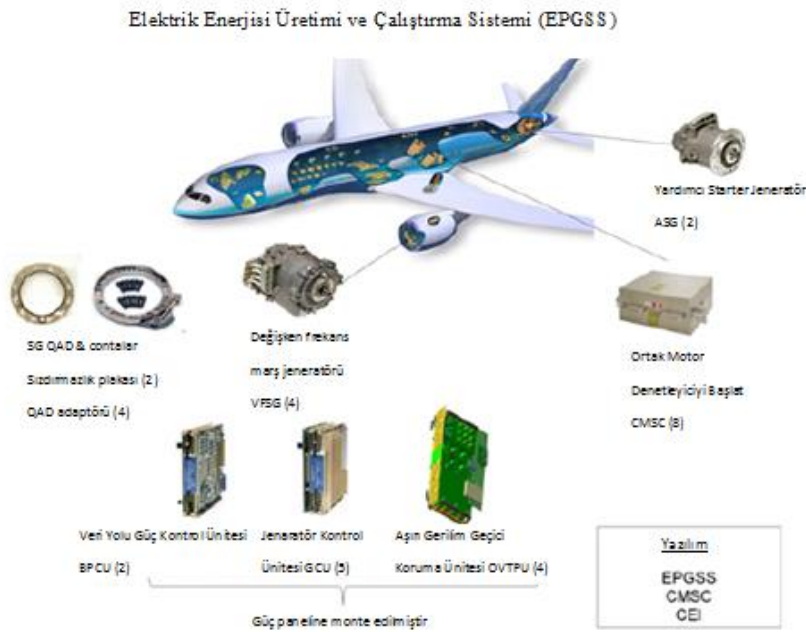
B787’de her ana motora iki adet monte edilmiş ve bir dişli kutusu aracılığıyla bağlanan dört adet VFSG (Değişken Frekanslı Marş Jeneratörü) bulunmaktadır. VFSG’ler ana motorların elektrikle çalıştırılması ve motor çalıştırıldığında uçağa elektrik gücü sağlanması temel işlevini yerine getirir ve VFSG alternatif akım çıkışının frekansı, motorun hızına göre değişir.

B787’de her jeneratör için bir tane olmak üzere altı GCU (Jeneratör kontrol ünitesi), dört ana motor jeneratörü ve iki yardımcı güç ünitesi jeneratörü bulunmaktadır. Her GCU, ilgili jeneratörden gelen gücü kontrol eder ve bir motor veya jeneratörün arızalanması durumunda uçağın kapasitesinin korunmasını sağlamak için güç sistemini yeniden

yapılandırır. Her GCU ayrıca ilgili jeneratörün voltaj regülasyonunu ve korumasını sağlar.

Birincil güç panelleri, motor VFSG'lerinden gelen gücü uçağın geri kalanına kontrol etmek ve dağıtmak için kullanılan motor jeneratörü GCU'larını ve kontaktörleri barındırmaktadır. Arka elektronik bölmesinde iki ana güç paneli bulunur ve her biri, her motordaki iki jeneratörden güç alır.

VFSG, GCU ve birincil güç panellerinin tümü, Şekil 2'de gösterildiği gibi uçak elektrik enerjisi üretim ve başlatma sisteminin (EPGSS) bir parçasıdır. Bu bileşenler, uçaakta kullanılan değişken frekanslı elektrik gücünün üretilmesi ve dağıtılması için gerekli ekipmanı içermektedir.



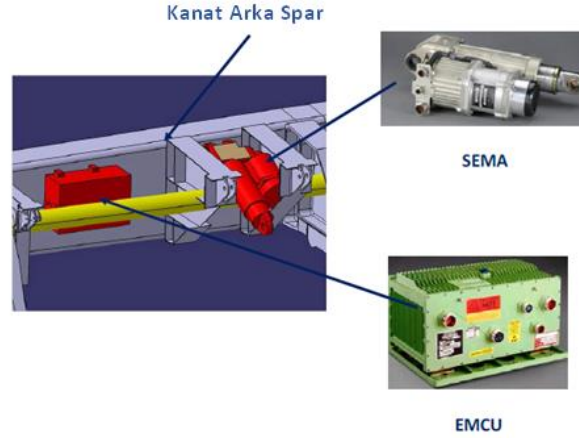
Şekil 2. Elektrik Enerjisi Üretimi ve Çalıştırma Sistemi (EPGSS) [1]

3.2. Spoiler elektromekanik aktüatörler (SEMA)

SEMA'lar kanat yüzeylerindeki yedi spoyler çiftinden ikisini kontrol eder ve geri kalan spoylerler yüzeylerinde hidrolik aktüatörlere benzer şekilde yuvarlanma kontrolü, hava/yer hız freni ve eğme yetenekleri sağlar.

Şekil 3'de kanadın arka direğine monte edilmiş bir SEMA ve SEMA'nın çalışmasını kontrol eden ilgili elektronik motor kontrol ünitesi (EMCU) gösterilmiştir.

Elektromekanik aktüatörün, sivil nakliye veya askeri uçaklarda birincil uçuş kontrol yüzeyinde ilk kullanım örneği SEMA'dır.

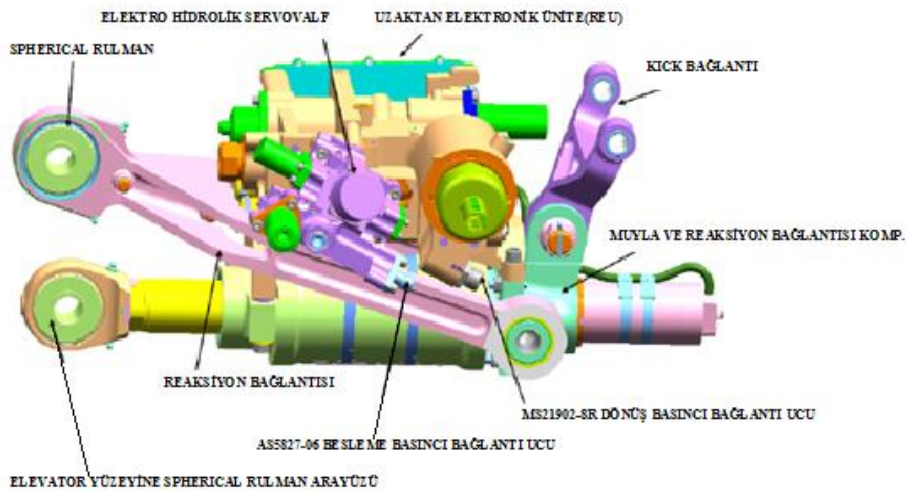


Şekil 3. Spoiler Elektromekanik Aktüatörler (SEMA) [1]

3.3. Birincil uçuş kontrol sistemi hidrolik aktüatörleri:

Hidrolik aktüatörler, tüm ana uçak kontrol yüzeylerini (kanatçıklar, flaperonlar, irtifa dümenleri ve dümenler) konumlandırmak için kullanılmaktadır. Aynı zamanda, uçuş kontrol elektroniği ve uzak elektronik ünitelerden (REU) gelen komutlara yanıt olarak birincil kontrol yüzeyi aktüatörlerinin konumunu da kontrol eder.

Şekil 4'de, tüm birincil hidrolik aktüatörlerde tipik olan elevatör aktüatörünün görseli sunulmaktadır.



Şekil 4. Elevatör Aktüatörü [1]



4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, daha elektrikli uçak konsepti olan B787 uçak modelinde yeni sistemlerin oluşturduğu sorunlar araştırılmıştır. B787'nin çoğu alanda performans beklentilerini karşıladığı ancak B787 programının birkaç alanının iyileştirilmesi gerektiği sonucuna da varılmıştır.

Tasarım sürecinde karşılaşılan sorunlara ilişkin bazı bulgular aşağıda verilmiştir [1];

- Önceki teknolojilerde kullanılan mühendislik uygulamalarına veya geçmiş tasarım bilgilerine dayanarak varsayılan gereksinimlerin doğrulanmadığı gözlemlenmiştir. Örneğin; SEMA motor çözümleyicinin çalışmasında bir ortam değişikliği söz konusu olduğunda çalışma performansının da değişeceği varsayımının yanlış olduğu tespit edilmiştir. Önceki tasarımlara ait varsayımların yeni teknolojiler için geçerli olmayabileceği sonucuna ulaşılmıştır.
- Gereksinimlerin, Boeing'den birincil tedarikçiye ve daha sonra alt düzey tedarikçilere aktığı çok sayıda tedarikçinin yer aldığı aynı tedarik zincirinde ürünün tanımlanmış bir sahibin bulunmaması bu gereksinimlerin iletilememesi ve doğrulanamamasıyla sonuçlanmıştır. Örneğin; birincil elektrik güç panelinde parçada tasarım yetersizliği ve arızalara yol açan işleyiş görülürken, VFSG hava-yağ ısı eşanjörü devresinin tasarımında devrenin farklı parçalarının farklı tedarikçilere ait olması tasarım sınırları aşıldığında gereksinim sahibinin tanımlanmasını zorlaştırmıştır.
- Kanıtlanmış tasarım çözümlerinin yeni tasarımlara aynı şekilde uygulanabileceği görüşü tasarım inceleme süreçlerinin takip edilmesinde ilave gözetim ve özenin gerekli olduğunu göstermiştir. Örneğin; VFSG yağ soğutma sistemindeki değişken yağ basıncının ve VFSG dönen diyetlerin, GCU transorbları üzerindeki arıza modlarının etkilerine katkısı sistemin dinamikleri üzerinde bazı olumsuz etkilere sahip olsa da tek başına bir güvenlik riski oluşturmamıştır.
- Boeing'in tasarım standardı için özel bir gereklilik dayatmamış olması nedeniyle tasarımların belirli bir standarda tabi olmadığı belirlenmiştir. Örneğin; güç paneli baskılı devre kartlarının tasarımında endüstri standartlarına uyulmaması tasarım değişikliği söz konusu olduğunda problem oluşturmuştur.
- Yetersiz ortam koşullarında yapılan testlerin uygulama sorunlarını tespit edememesi, ileriki tasarım geliştirme aşamalarında düzeltilmesi zor ve pahalı sonuçlar meydana getirmiştir. Örneğin; EMCU yerine laboratuvar güç kaynağı kullanılması sebebi ile



VFSG yağ soğutma devresinin ve SEMA motor freninin test ortamları uçak ortamını temsil etmeyen yetersiz test düzenekleri olarak gözlemlenmiştir.

- Karmaşık sistemler için tüm arıza modlarını ve etkilerini tam anlamıyla tahmin etmek ve tüm olası arıza modlarını doğrulamanın mümkün olmadığı gözlemlenmiştir. Örneğin, VFSG döner diyotta açık devre olduğunda voltaj dalgalanması meydana gelmesi ile GCU üzerindeki arıza modlarına etki analizleri düzgün şekilde tanımlanamamıştır. Analiz eksiklikleriyle ilgili istenmeyen sistem etkilerinin uçak üzerinde güvenlikle ilgili bir etkiye yol açmadığı fakat karmaşık sistemlerin arıza modlarında bazı problemler oluşturabileceği sonucuna ulaşılmıştır.
- Bakım uygulamalarında havayolları zaman kaybı yaşamamak adına, sistem arızası durumunda arızaya neden olabilecek bileşenleri incelemek yerine arızalı olarak kaydederek parçayı tamamen yenisi ile değiştirmiştir. Bu bakım uygulaması, süreç içerisinde tüm bileşenler incelendiğinde arızası olmayan fakat arızalı olarak kaydedilen parçaların sayısını arttırmıştır. Örneğin; bir VSFG arızası olduğunda arıza VSFG'de veya onu yöneten GCU'da olabilir. Havayolları, arızalı bileşeni izole etmek için genişletilmiş sorun giderme işlemini gerçekleştirirken daha uzun bir gecikmeye maruz kalmak yerine genellikle hem VFSG'yi hem de GCU'yu değiştirmiştir. Operasyonda zamanında kalkışı sağlamak için sorunları çözmek adına en az zaman harcayarak ve en güvenilir yaklaşımın benimsenmesi bakım uygulamalarında bazı parça problemlerinin meydana gelmesi ile sonuçlanmıştır.

MEA elektrik güç sistemlerinde uçağın elektrifikasyonu, geliştirilmiş güvenlik, uçak performansının optimizasyonu ile elektrik güç sistemlerinde koruma, izleme ve kontrol teknolojilerindeki gelişmeler yeni nesil bir uçak sistem teknolojisi getirmektedir [8].

B787 MEA yeni nesil uçak teknolojisi incelenerek yeni teknolojinin sistemler üzerinde oluşturduğu sorunlar araştırılmıştır. Ayrıntılı sonuçların değerlendirilmesi ile eksikliklerin her birinin nedeninin benzersiz olduğu görülmüştür. CSRT ekibi uçağın kritik sistemlerinde amaçlanan emniyet seviyesini karşıladığından emin olunması amacıyla tüm sorunları gözlemleyerek raporlamıştır.

Referanslar

- [1] Boeing 787-8 Critical Systems Review Team. (2014), Boeing 787-8 design, certification, and manufacturing systems review. Washington ,D. C.: Federal Aviation Administration.



- [2] Moir, I., Seabridge, A. (2008), Aircraft Systems: Mechanical, Electrical, and Avionics Subsystems Integration, John Wiley & Sons., 3rd. Ed. Ch-5, pp. 271-274, 536.
- [3] Gaynor, G. H., (2015), Decisions: An Engineering and Management Perspective, Wiley-IEEE Press, 1st edition, pp. 320.
- [4] Karimi, K. J., (2007), Future aircraft power systems-integration challenges. The Boeing Company.
- [5] Tang, C. S., Zimmerman, J. D., Nelson, J. I..(2009), Managing new product development and supply chain risks: the Boeing 787 case. Supply Chain Forum: An International Journal, 10 (2), 74-86.
- [6] Pandian, G., Pecht, M., Zio, E., Hodkiewicz, M. (2020), Data-driven reliability analysis of Boeing 787 Dreamliner. Chinese Journal.of Aeronaut. 33 (7), 1969–1979.
- [7] Gözüküçük, N.T. (2023), IDG'nin Benzetim Yöntemleri Kullanılarak Modellenmesi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, Türkiye.
- [8] Gözüküçük, N.T. (2023), Daha Elektrikli Ve Tamamen Elektrikli Uçaklarda Güç Dağıtım Sistemlerine Genel Bakış. 3. International Antalya Scientific Research and Innovative Studies Congress, February 13-14, Antalya, Türkiye, 299-308.