

İki Aşamalı Risk Değerlendirme Yöntemi ile Havacılık Sektöründe Uygulama

A Two-Stage Risk Assessment Method in Aviation Sector

Beyzanur ÇAYIR ERVURAL¹ 

¹ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Havacılık Yönetimi Bölümü Konya, Türkiye

Öz

Globalleşen dünyada havacılık sektörü en önemli ulaştırma alanlarından biri olup, iyileştirilip geliştirilmesi için pek çok çalışma yapılmaktadır. Havaalanları yolcu trafiğinin ve yük taşımacılığının çok sıkı takip edildiği, ufak bir aksaklığın sektöre maliyetinin ciddi seviyede olacağı stratejik bölgelerdir. Bu çalışmada havaalanlarında meydana gelen hata ve risk türleri belirlenerek önleyici bakım planlama faaliyetlerinin geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu açıdan hata türü etkileri analizi (HTEA) yaklaşımı kullanarak havalimanı yetkilileri ile görüşülerek alınan bilgiler doğrultusunda en önemli hata türleri, risk öncelik sayısı (RÖS) ölçeği ile belirlenmiştir. Buna göre ilgili hata türlerinin önlenmesi için önleyici faaliyetler sıralanmıştır. Ayrıca HTEA yönteminin eksikliğini gidermek için objektif bir yöntem olan Entropi yaklaşımına dayanan karar verme yöntemi ile ağırlıklandırılarak hata türleri sınıflandırılmıştır. Buna göre hava alanlarında ortaya çıkan tehlike ve risk durumları iki aşamalı bir analitik yaklaşımla çok boyutlu bir açıdan değerlendirilmektedir. Elde edilen sonuçların, hava alanı yöneticilerinin öncelikle yapması gereken iyileştirme ve yatırım kararları hakkında yol gösterici olması beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Hata Türü Etkileri Analizi (HTEA), Entropi, Havacılık Sektörü, Risk Değerlendirme

Abstract

In the globalizing world, the aviation sector is one of the most important transportation areas and many studies are being carried out to improve and develop it. Airports are strategic areas where passenger traffic and freight transport are closely monitored, and a small disruption will lead to a serious cost for the entire sector. In this study, we aim to develop preventive maintenance planning activities by identifying different failure types and risks that occur at airports. In this direction, by using the failure mode effects analysis (FMEA) approach, the most important failure types were determined with the risk priority number (RPN) scale in line with the information obtained by interviewing the airport authorities. Accordingly, preventive actions are listed to prevent the related fault types. In addition, in order to eliminate the deficiency of the FMEA method, the failure modes were classified by weighting the failure modes with the decision-making method based on the Entropy approach, which is an objective method. In this direction, the hazard and risk situations arising at airports are evaluated from a multidimensional perspective with a two-stage analytical approach. It is expected that the results obtained will be a guide for the improvement and investment decisions that airport managers should take first.

Keyword: Failure mode effect analysis (FMEA), Entropy, Aviation sector, Risk evaluation

I. GİRİŞ

Rekabet koşullarının giderek ağırlaştığı günümüz piyasa şartlarında işletmelerin pazarda kalabilmeleri rekabet avantajı ile yani müşteri memnuniyeti ile mümkündür [1]. Ürün güvenilirliğinin sağlanmadığı işletmelerde kalite yakalanamayacağı için müşteri memnuniyetinin sağlanması mümkün değildir. Dolayısıyla ürün ve süreç hatasının en aza indirgenerek tehlikelerin belirlenmesinde risk analizi ile pazarda sürdürülebilirliğin sağlanmasına ihtiyaç vardır [2]. Risk analizi, mevcut süreç ve sistem yapısı incelenerek işletmelerde ortaya çıkacak tehlikeli durumların belirlenmesi ve bu tehlikelerin riske dönüşme derecesi değerlendirilerek gerekli tedbir ve önlemlerin alınması için yapılmaktadır [3].

Kapsamlı ve sistematik yaklaşımlarla uygulanan bir risk analizi yöntemi olan hata türü etkileri analizi (HTEA) ürün, tasarım, süreç, yöntem ve hizmet gibi durumlarda potansiyel hata türlerinin belirlenmesi ve olasılık, şiddet ve saptanabilirlik (tespit edilebilirlik) derecelerine göre risk öncelik sayısı (RÖS) belirlenerek kritiklik derecesi tespit edilmekte ve böylece hata türlerinin sınıflandırılması amacıyla kullanılmaktadır [4].

RÖS değeri incelenerek kritik hata türü etkisinin azaltılması için, olasılığının düşürülmesi ya da tespit edilebilirlik derecesini artırılması için önlemler alınmaktadır. Bu önlemlerden sonra yeniden RÖS değeri hesaplanarak sistemdeki iyileşme gözlenmektedir. Bu sayede sorunlar ortaya çıkmadan önce düzeltici önlemler alınabilmektedir. Bu şekilde müşteri şikâyetleri azaltılarak müşteri memnuniyetinin sağlanması ve kalitede sürdürülebilirlik amaçlanmaktadır.

İşletmelerin sürekli değişen müşteri isteklerine sağlıklı biçimde cevap vermeleri verimlilikle yürütülen üretim süreçleri ve doğru tasarlanmış tedarik zinciri ağ yönetimi ile mümkündür. Bu sebeple üretim süreçlerinin yalın üretim teknikleriyle değerlendirilmesi bu sayede boşa geçen sürenin düşürülmesi, üretim süresinin kısaltılması, üretimdeki atıl kapasite kullanım oranının ve ıskarta/fire miktarının azaltılması, üretimdeki kayıpların önlenmesi şeklinde tüm maliyeti artıran unsurların değerlendirilmesi gerekmektedir[5].

Günümüz piyasa koşullarında tüm işletmeler üretim süreçlerine devam etmektedir. Önemli olan husus en kısa sürede, yüksek verimlilikle ve istenilen kalitede müşteri beklentilerine yanıt verebilmektir. İşletmeler yüksek verimlilik ve düşük maliyet politikası çerçevesinde müşteri isteklerini değerlendirirken, hataları önlemek için çeşitli kalite iyileştirme stratejileri geliştirmektedirler. Bu sayede HTEA ortaya çıkabilecek potansiyel hataları doğru tespit ederek önleyici olma niteliğine sahip olmakla birlikte önemli bir kullanım alanına sahiptir ve etkin problem çözme tekniği olarak işletmelerde kullanılmaktadır. Yöntem sayesinde önemli olarak değerlendirilen hata ve risk faktörleri objektif yaklaşımlarla hesaplanmakta önleyici faaliyetlerle düşük risk seviyesine kavuşturulmaktadır.

Bu çalışmada havacılık sektöründe karar verme yöntemine dayalı bir HTEA uygulaması gerçekleştirilmiştir. Literatürde özellikle imalat sektörü ve hizmet sektöründe yaygın kullanımı olan HTEA'nın havacılık sektörü gibi stratejik önemdeki bir alanda çalışma sayısının oldukça kısıtlı olduğu gözlenmiştir. İki aşamalı olarak en riskli iş faaliyetleri HTEA ile belirlenmiş ardından Entropi yöntemiyle en önemli olan iş çeşitleri tespit edilerek önem dereceleri atanmıştır. Öncelikli olan risk unsurlarına yönelik olarak yatırım ve iyileştirme faaliyetleri sağlanmıştır. Bu sayede en tehlikeli/riskli, önceliğe sahip unsurlar sınıflandırılmış önem seviyeleri de tespit edilerek kritik iş kollarında hata türleri değerlendirilmiş ve etki seviyesi düşürülmüştür. Bu sayede işletme için büyük karlılık sağlanmış ve sonradan iyileşme-düzeltilme yerine en kritik unsurlar için önleyici tedbirler alınarak sürdürülebilir karar mekanizması geliştirilmiştir. Havacılık sektöründe yapılan çalışmaların kısıtlı olduğu ve bu alana halen ihtiyaç olduğu görülmektedir. Bu çalışmada önerildiği gibi entropi tabanlı

ağırlıklandırma yaklaşımıyla, havalimanlarında ortaya çıkan hata türleri çevresel, teknolojik ve donanımsal sınıflandırma altında objektif bir karar verme yaklaşımıyla değerlendirilmesi açısından literatüre katkı sunması beklenmektedir.

Ayrıca çalışmanın uygulama konusu, alınan verilerin içeriği ve gerçek hayat problemini değerlendirmesi açısından da bu konuda çalışan araştırmacılara katkı sunması beklenmektedir. Bu çalışmada ikinci kısımda literatür araştırılmış ardından üçüncü ve dördüncü bölümde ele alınan metotlar açıklanmıştır. Beşinci bölümde uygulama yapılarak elde edilen sonuçlar tartışılmıştır. Altıncı bölümde uygulama sonuçları ve tartışma kısmı verilmiştir. Sonuç ve öneriler son bölüm olan yedinci kısımda sunulmuştur.

II. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

HTEA, 1940'lı yılların sonunda Amerikan ordusu tarafından geliştirilmiş ardından NASA tarafından yürütülen uzay programında kullanılmıştır. 1970'lerde Ford Motor Şirketi, tasarım süreçlerinde HTEA'yı uygulamıştır. 1993 yılında AIAG (Otomotiv Endüstrisi Eylem Grubu) tarafından HTEA analizi otomotiv üretimi ve tedarikçileri için gerçekleştirilmiştir. Geleneksel tehlike/risk analizi uygulamalarında kullanılan farklı teknikler vardır. Bunlar tehlike ve işletilebilirlik (HAZOP), hata ağacı analizi (FTA), olay ağacı analizi (ETA) ve hata türü etkileri analizi (HTEA)'dır [6], [7].

Literatür araştırmalarına bakıldığında HTEA'nın farklı uygulamaları olduğu görülmektedir. Kullanım alanı itibarıyla, havacılık ve savunma sanayi, üretim/imalat sektörü, iş sağlığı ve güvenliği, tedarik zinciri ve lojistik, elektronik, tıp, bilgisayar bilimi, üretim, kimya ve otomotiv endüstrisi gibi pek çok uygulama alanında etkin biçimde yararlanılmaktadır [13-20].

Literatür araştırmalarından görüleceği gibi çalışmaların büyük kısmı klasik HTEA yöntemini ele alırken diğerleri yöntemin kısıtlarından (sübjektif yapısı ve belirsizlik) dolayı modifiye edilmiş HTEA yöntemini ve bulanık HTEA modelini kullanmaktadır. Klasik HTEA'yı kullanan çalışmalara örnek olarak Salah vd. [14, 21] verilebilir. Ayrıca, Fabis-Domagala vd. [22], Shafiee ve Dinmohammadi [23], Nguyen vd. [24] klasik HTEA'yı geliştirerek şiddet ve sıklık faktörlerini alt faktörlere göre değerlendirmiştir. Bu önerilen modellerde, geleneksel HTEA'ya göre birçok avantaja sahiptir ve karar vericilere ve araştırmaya ve geliştirme departmanlarına ürün güvenilirliğini artırmada yardımcı olmaktadır. Gökteş [25] kalite geliştirme metotlarından biri olan HTEA kullanarak şirketlerin karbon envanteri oluşturmaya yardımcı olarak, havalimanının karbon akreditasyon sürecinde inceleme yapmıştır. HTEA yöntemine dayanarak iyileştirme önerileri sunulmuştur. Omairey vd.[26], uçağın ağırlığının ne kadar fazla olması yakıt ihtiyacının o kadar fazla olması anlamına geldiğini açıklayıp yakıt tüketiminin artmasıyla karbon emisyon

salınıminin artması araştırılmıştır. HTEA kullanılarak çok işlevli gövde göstericisinin verimliliği için alet sistemlerinin geliştirilmesi sunulmuştur. Elahi [27], çalışmada risk analizi için tehlikelerin tanımlanmasında çeşitli araçlar kullanmıştır. En yaygın araçlardan ikisi Hata Ağacı Analizi (FTA) ve HTEA'dır. Bu bölümde üç tip HTEA ele alınmaktadır: DFMEA, PFMEA ve UFMFA'dır. Ayrıca, Zihin Haritası Analizi ve P-Diyagramı gibi diğer iki araç da sunulmuştur. Ceylan vd. [28], çalışmada karmaşık mühendislik sistemleri için sistem teorik kaza modeli ve süreçler (STAMP), HTEA ve AHP yöntemlerine dayanan hibrit bir kaza analizi çerçevesi önermiştir. Önerilen model kapsamında, ilk olarak, güvenli kısıtlamaları tanımlanarak, hiyerarşik bir kontrol süreci oluşturulmuş ve güvenli olmayan faaliyetler arasındaki bağlantılar belirlenerek bir kaza niteliksel olarak analiz edilmiştir. İkinci adım olarak, hata modları, bunların nedenleri ve sonuçları belirlenmiştir. Son olarak, elde edilen uzman görüşlerinin analizi ile her bir hata modunun risk puanları hesaplanmıştır. Bu adımda, geleneksel HTEA'dan farklı olarak, sonuçlar her bir kaza faktörünün AHP yaklaşımına göre bulunan ağırlık puanlarına göre hesaplanır. Salah vd. [29], çalışmada HTEA metodunu yoğurt doldurma makinesinde geleneksel bileşenler ve endüstri 4.0 bileşenleri için RÖS değerleri açısından karşılaştırmış ve RÖS faktörlerine ilaveten bağımlılık faktörünü de değerlendirmeye katmıştır. Pareto analizi ile riskler önceliklendirilmiştir. Sonuçlara göre endüstri 4.0 bileşenlerinden yakınlık sensörü ve renk algılama sensörünün en büyük önceliğe sahip olduğu görülmektedir. Kusumasari vd. [30], bir öğenin arızalanmasının sistem çalışması üzerindeki sonuçlarını veya etkilerini belirlemek ve her bir potansiyel arızayı ciddiyetine göre sınıflandırmak için HTEA yaklaşımını kullanarak Google Haritalar kullanımının güvenlik etkisini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Sonunda, HTEA, en yüksek risk seviyesine karşı öngörülen eylemleri, hafifletmeleri ve stratejileri önceliklendirmek için şiddet, olasılık ve tespitin ürünü olarak RÖS değeri belirleyerek Google Haritalar'ın güvenlik yönlerini de analiz edebilecektir. Mendes vd. [31], havacılık sektöründe riskleri azaltmak için kullanılan proaktif, interaktif ve öngörücü önlemlerle birleştirilmiş yöntemler de dahil olmak üzere risk yönetimi teknolojik gelişmelerine ilişkin sistematik bir literatür taraması sunmaktadır. Tahmine dayalı ve etkileşimli yöntemler hataya toleranslı sistemler yaratabilir, kazaları önleyebilir ve sisteme geri bildirim sağlayarak kalite ve emniyet sistemlerini iyileştirebilir. Sistematik literatür taramasının bulguları, mevcut risk araçlarının ve modellerinin reaktif olduğunu, ancak proaktif, etkileşimli ve öngörücü analiz yöntemlerini incelemek için son zamanlarda önemli bir çaba olduğunu göstermektedir. Havacılık sektöründe riskin daha öngörülü bir şekilde azaltılması için geliştirilmiş veri analizi araçlarını veya yapay zeka kullanarak geliştirme fırsatları bulunmaktadır. Andre Filz vd. [13], endüstriyel yatırım

mallarının kullanım aşamasına ait geçmiş ve operasyonel veriler üzerinden derin öğrenme modellerini kullanarak, veriye dayalı bir HTEA metodolojisi sunmuştur. Geliştirilen metodolojinin, şeffaflığı artıracak bir karar destek sistemi ile endüstriyel yatırım mallarına yönelik bakım planlamasını desteklemesi beklenmektedir. Bu nedenle, üretim ekipmanı veya uçaklar gibi endüstriyel yatırım mallarına yönelik bakım planlamasını geliştirmeye yönelik veri tabanlı bir HTEA çerçevesinde geliştirilmiş ve doğrulanmıştır. Ayrıca bu çerçevenin, bakım faaliyetlerinde ekonomik ve çevresel iyileştirme sağlamak amacıyla belirli arıza olasılıklarına ilişkin belirsizlikleri azaltarak bakım planlamasının doğruluğunu artırması amaçlanmaktadır.

Çalışmalar incelendiğinde diğer büyük bir kısmında problem karmaşıklığı ve büyük boyutlu olması nedeniyle çok kriterli karar verme yaklaşımlarından destek alındığı görülmüştür. Buna göre diğer karar verme teknikleriyle entegre edilmiş HTEA çalışmalarının bazıları şu şekildedir. Chang [32], yüksek teknoloji endüstrisinde bilgisayarın fiziksel donanımı destekleyecek şekilde ürün tasarımı için açıklanabilen ve açıklanamayan kriterleri birlikte değerlendirme imkanı sağlayan TOPSIS ve HTEA yöntemlerini birleştirerek, eksik bilgi altında cihaz tasarımında iyileşme amaçlamıştır. Liu vd. [33], QFD ve tasarım HTEA yöntemlerini birleştirerek yarı bitmiş ürünlerden LCD modüllerinde iyileştirme yapmayı amaçlamışlardır. Buna göre müşterilerden gelen kalite problemi kaynaklı şikâyetler düşürülmüştür. Hajiagha vd. [34], toplu ulaştırma sisteminde bekleme süresinden kaynaklanan aksaklığı gidermek için bulanık HTEA yöntemini bulanık inanç yapısını VIKOR yöntemiyle bileştirmiştir. Elde edilen sonuçlar insan kaynaklı nedenler, taşıma sistemi ve hat kaynaklı problemlerin gecikmelerde önemli rol oynadığını göstermiştir. Ahmadi vd. [35] karayolu inşaat proje risk değerlendirme çalışması için bulanık HTEA ve bulanık AHP yöntemlerini birlikte kullanmıştır. Romdhane vd. [36] HTEA ve AHP yöntemlerini kullanarak sistem yeterliliğinin kalite kontrol süreciyle değerlendirilmesi için küçük ve orta ölçekli işletmeler için 6 Sigma uygulamasını gerçekleştirmiştir. Fattahi ve Khalilzadeh [37], risk derece ağırlığı için bulanık AHP, MULTIMOORA ve bulanık çok amaçlı optimizasyon yöntemleriyle HTEA için yeni hibrit bir model geliştirmişlerdir. Her bir hata türü ağırlığı zaman, maliyet ve kar kriterlerine göre hesaplanmıştır. Nie vd. [38] atık su sistemlerine yönelik risk değerlendirmede HTEA uygulaması yapmışlardır ve hata türü risk derecelerinin belirlenmesinde BWM ve en büyük türetme yöntemini kullanıp COPRAS yöntemi ile sıralama yapmışlardır. Çok parçalı dilsel dağıtım değerlendirme yöntemiyle hesaplamalar yapılmıştır. Cano-Olivos vd. [39], AHP ve HTEA yöntemlerini birleştirerek satın alma departmanı faaliyetlerini değerlendiren bir risk analizi yapmışlardır. Bu entegre analiz yaklaşımı, tedarik zincirinin aksama süresini ve

mali açıdan etkisine neden olan potansiyel risklerin önceliklendirilmesini sağlamıştır. Uslu [40], savunma ve havacılık sanayisine yönelik araştırmalar yapıp ve bu alanda yapılan proses ve mevcut hataların tespitinin üzerinde durulmuştur. Çalışmada yeni ve geliştirilmiş bir HTEA ve çok kriterli karar verme tekniklerinin kullanılmasının yararlı olacağı öne sürülmüştür. Liu vd. [41] gaz istasyonunda gaz tedariki ve güvenlik riski süreçlerini olasılık ve küme teorisine dayanan yeni bir HTEA yaklaşımı önermişlerdir. Burada risk unsurlarını objektif biçimde değerlendirmek için Entropi yöntemiyle ağırlıklar hesaplanmıştır. Chiu vd. [42] ürün hizmet kontrol sürecinde HTEA ve önem performans analizini dahil etmişlerdir. Ayrıca gri ilişkisel analiz yöntemi ile alternatif hizmet noktaları değerlendirilmiştir.

Ayrıca belirsizliğin artması durumlarında da bulanık yaklaşımlardan yararlanılmıştır. Buna göre bulanık HTEA ve/veya ANFIS ve bulanık ÇKKV yöntemleriyle risk analizi ve hata araştırma çalışmaları yapılmıştır. Örneğin, Kumar vd. [43] LPG gaz tedariki istasyonunda hata türü derecelendirmesinde bulanık HTEA ve bulanık gri ilişki analizi yöntemlerini adapte etmişlerdir. Arabsheybani vd. [44], tedarik zinciri süreç yönetimi faaliyetleri kapsamında, ilgili tedarikçi performanslarının belirlenmesinde FMOORA'ya dayalı bulanık çok amaçlı optimizasyon modeli ile HTEA yaklaşımı geliştirmişlerdir. Tedarikçiler doğal afet veya politik değişkenlik gibi risklerle karşı karşıyadır. Tedarikçi risklerinin değerlendirilmesinde önerilen HTEA yaklaşımının başarılı sonuçlar sağladığı görülmüştür. Chen vd. [45], Choquet integraline ve sıralı ağırlıklı geometrik ortalama yöntemlerine dayalı bulanık HTEA yaklaşımıyla risk analiz değerlendirmesi yapmışlardır. Liu vd. [46] çalışmalarında sistemlerin, ürünlerin, süreçlerin ve hizmetlerin güvenilirliğini ve güvenliğini artırmak için çeşitli endüstrilerde uygulanan bulut model teorisine ve gri ilişki analizi yaklaşımına dayanan yeni bir HTEA yaklaşımı geliştirmiştir. Mentis [47], Aliğa Gemi Geri Dönüşüm Tesislerinde hem gemide hem de sahada gerçekleştirilen operasyonlarda ortaya çıkan risklerin analizi için HTEA, OWGA, FVIKOR ve dayanıklılık mühendisliği (RE) ilkelerini entegre eden yeni bir çerçeve sunmayı amaçlamaktadır. HTEA gibi geleneksel risk analizi yöntemleri, hata modlarını ve bunların sonuçlarını belirlemede etkili olmakla birlikte, özellikle insan ve organizasyon faktörlerinin önemli bir rol oynadığı karmaşık sistemlerde risklerin dinamik ve birbirine bağlı doğasını göz ardı edebilir. Bu makale, yeni bir proaktif risk analizi geliştirmek için hem klasik risk analizi yöntemlerinin güçlü yanları kullanmakta hem de RE ilkelerini kullanarak kapsamlı bir yaklaşım sunmaktadır. Proaktif ve yenilikçi yönleriyle bu yöntem, gemi geri dönüşüm endüstrisinde emniyet ve güvenilirlik standartlarında önemli gelişmeler vaat etmektedir. Goksu ve Arslan [48], çalışmada gemi operasyonları sırasında oluşabilecek potansiyel riskleri değerlendirmek için bulanık HTEA metodolojisine dayalı niceliksel bir deniz güvenliği analizi önermiştir.

Önerilen yaklaşımın uygulamasını pratikte göstermek amacıyla, gemi yanaşma/çıkarma operasyonlarında arıza modları belirlenmekte ve risk değerlerine göre önceliklendirilmektedir. Sonuçlara göre risk oranı daha yüksek olan arıza modları yorgunluk/bireysel hata, çok kuvvetli rüzgâr, aşırı sıcaklık, gelgit, gemi hızının artması/azalması olarak belirlenmiştir. Son olarak geminin emniyetini etkileyen arıza türlerinin de kontrol altına alınması ve bu arızaların etkilerinin proaktif bir yaklaşımla azaltılması veya ortadan kaldırılması için uygun düzeltici veya önleyici faaliyetler önerilmiştir. Park vd. [49], denizcilik sektöründeki siber güvenlik risklerini değerlendirmeyi ve denizde ve kıyı bölgelerinde güvenliği artırmayı amaçlamaktadır. İlk olarak, literatür taraması ve uzman görüşlerine dayanarak sektördeki ilgili tüm siber tehditler tanımlanmıştır. HTEA'nın kural tabanlı bayes ağı (RBN) ile birleştirildiği, denizcilikte yeni bir siber tehditleri risk değerlendirme çerçevesi önerilmekte ve belirlenen tehditlerin risk seviyelerini değerlendirmek ve genel denizcilik siber güvenliğine en çok katkıda bulunan tehditleri daha iyi anlamak için kullanılmaktadır. Sonuçlar, paydaşları siber operasyonlarındaki en hassas kısımlar hakkında bilgilendirebilir ve risk temelli kontrol önlemlerinin geliştirilmesini teşvik edebilmektedir. Daha spesifik olarak, siber tehditleri yönetmek için bir sonraki adım, kabul edilemez risk seviyeleriyle ilişkili tehditleri ele almak ve bunları yönetmek için uygun maliyetli önlemler olarak belirlenmiştir. Liu vd. [50], dengesiz tereddütlü bulanık dilsel kümeleri (UHFLTSs) ortamında uzman güvenilirliğini dikkate alarak IDG risk tanımlama ve sınıflandırma için bir hata türü etkileri analizi (HTEA) yaklaşımı oluşturmuştur. İlk olarak, UHFLTS'ler karar vericilerin (KV) belirsiz ve kesin olmayan dilsel bilgilerini etkili bir şekilde tanımlayabildiğinden ve pratik uygulamalara uyarlayabildiğinden, KV'lerin değerlendirmesini tasvir etmek için özel olarak seçilmiştir. İkinci olarak, uzmanların önem seviyesi, uzman güvenilirliği ve uzman ağırlığı birleştirilerek tam olarak değerlendirme yapılmaktadır çünkü uzman güvenilirliklerindeki varyasyonun nihai sıralama sonuçları üzerinde önemli bir etkisi olabilir. Buna ek olarak, risk faktörü ağırlığını belirlemek için grup en iyi-en kötü yöntemi (GBWM) entropi yöntemiyle birleştirilmiştir. Üçüncü olarak, sınıflandırmanın doğruluğunu ve istikrarını artırmak için, arıza modlarını daha rasyonel bir şekilde sınıflandırmak üzere yeni bir entegre TOPSIS-ELECTRE TRI karar çerçevesi önerilmiştir. You vd. [51], geliştirilmiş bir HTEA'ya dayalı veri varlıklarının kalite risklerini proaktif olarak değerlendirmek için bir çerçeve önermiştir. İlk olarak kalite risk ölçümleri, literatür araştırması ve uzman görüşleri yoluyla yaşam döngüsü perspektifinden tanımlamalar yapılmıştır. Daha sonra uzman değerlendirmesine ilişkin belirsiz ve karmaşık bilgileri ifade etmek için üçgen bulanık sayılar benimsenmiştir. Daha sonra, risk kontrolünün zorluğunu tanımlamak için yeni bir risk faktörü 'C

tanıtılmış ve risk faktörlerinin ağırlıklarını hesaplamak için bir VZA yaklaşımı uygulanmıştır. Son olarak, önerilen HTEA değerlendirme çerçevesini göstermek için pratik bir örnek sunulmuş, veri varlık kalitesi risklerini kontrol etmek için çeşitli öneriler sunulmuştur.

Literatür araştırmalarından elde edilen sonuçlara göre, HTEA'nın metotsal eksikliğini gidermek açısından çeşitli çok kriterli karar verme yöntemlerinin ve bulanık yaklaşımların yönetime entegre edildiği görülmektedir. Literatürde farklı uygulama alanlarında

HTEA' dan yararlanıldığı görülmektedir. Havacılık sektöründe yapılan çalışmaların kısıtlı olduğu halen bu alanda ihtiyaç olduğu görülmektedir. Bu çalışmada önerildiği gibi entropi tabanlı ağırlıklandırma yaklaşımıyla havalimanlarında ortaya çıkan hata türleri çevresel, teknolojik ve donanımsal sınıflandırma altında objektif bir karar verme yaklaşımıyla değerlendiren çalışmaya rastlanmamıştır. Bu açıdan literatüre katkı sunması beklenmektedir. Tablo 1'de özet literatür araştırması sunulmaktadır.

Tablo 1. Literatür araştırması

| Yazar | Uygulama alanı | Metot |
|-----------------------------|--|--|
| Chang [32] | Yüksek teknoloji endüstrisi | TOPSIS ve HTEA |
| Liu vd. [33] | LCD parça üretimi kalite sorunu | QFD ve tasarım HTEA yöntemi |
| Hajiagha vd. [34] | Toplu ulaştırma sisteminde | Bulanık HTEA yöntemi +bulanık inanç yapısı + VIKOR yöntemi |
| Romdhane vd. [36] | KOBİ'lerde 6-Sigma | HTEA ve AHP yöntemlerini |
| Chiu vd. [42] | Ürün hizmet kontrol sürecinde | HTEA ve gri ilişkisel analiz yöntemi |
| Ahmadi vd. [35] | Karayolu inşaat proje risk değerlendirme çalışması | Bulanık HTEA ve bulanık AHP |
| Liu vd. [46] | Sistem, ürün ve süreç iyileştirme | Bulut model teorisine ve gri ilişki analizi yaklaşımına dayanan yeni bir HTEA yaklaşımı |
| Göktaş [25] | Havalimanının karbon akreditasyon sürecinde | HTEA |
| Liu vd. [41] | Gaz istasyonunda gaz tedariki ve güvenlik riski süreçlerinin değerlendirilmesi | Yeni bir HTEA yaklaşımı+ Entropi |
| Fattahi ve Khalilzadeh [37] | Çelik endüstrisi | AHP, MULTIMOORA ve bulanık çok amaçlı optimizasyon yöntemleriyle HTEA için yeni hibrit bir model |
| Kumar vd. (2018) [43] | LPG gaz tedariki istasyonunda | Bulanık HTEA ve bulanık gri ilişki analizi |
| Nie vd. [38] | Atık su sistemlerine yönelik risk değerlendirmede | HTEA + BWM + COPRAS |
| Arabsheybani vd. [44] | Tedarik zinciri süreç yönetimi | FMOORA + bulanık çok amaçlı optimizasyon modeli+ HTEA |
| Cano-Olivos vd. [39] | Tedarik zinciri satınalma süreci | AHP ve HTEA |
| Chen vd. [45] | Risk analizi değerlendirmeleri- case study | Choquet integrali+ sıralı ağırlıklı geometrik ortalama + bulanık HTEA |

| | | |
|---------------------|---|---|
| Uslu [40] | Savunma ve havacılık sanayisine | HTEA ve çok kriterli karar verme teknikleri |
| Omairey vd. [26] | Uçak yakıt verimlilik mekanizması | HTEA |
| Kusumasari vd. [30] | Google haritalar | HTEA |
| Mendes vd. [31] | Havacılık sektöründe literatür araştırması | Proaktif, interaktif ve öngörücü önlemlerden oluşan yöntemler için literatür araştırması |
| Elahi [27] | Risk analizi için tehlike sınıflandırmaları | Hata ağacı analizi +HTEA |
| Mentes [47] | Aliağa gemi geri dönüşüm tesislerinde | HTEA+ OWGA+ FVIKOR + dayanıklılık mühendisliği |
| Ceylan vd. [28] | Karmaşık mühendislik sistemleri | Sistem teorik kaza modeli ve süreç modeli (STAMP)+ HTEA + AHP yöntemlerine dayanan hibrit model |
| Park vd. [49] | Denizcilik sektörü | HTEA' yı kural tabanlı bayes ağı birleştiren model yaklaşımı |

III. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Hata Türü ve Etkileri Analizi (HTEA)

Hata türleri ve etkileri analizi; mevcut bir durum veya olay/akış için potansiyel hata çeşitlerini analiz etmek için ortaya çıkan hataların olma olasılıklarına ve benzerliklerine göre gruplayarak ayıran bir ürün süreç iyileştirme yöntemidir [10]. Operasyonel süreç yönetim konularında yaygın ve etkin biçimde kullanılmaktadır. İyi tasarlanmış HTEA prosesi, yakın özelliklerdeki ürün grupları veya süreçlerin daha önceki durumları tespit edilerek hata türlerinin tespitinde yardımcı olur, bu hataların mevcut durum akışında en tasarruflu biçimde ürünün geliştirilme ve iyileştirilme süresini ve maliyetini düşürür [11]. Genellikle üretim sektöründe ürünlerin farklı kademelerinde yararlanılmakla beraber hizmet sektöründe de kullanım alanı yoğunlaşmıştır. HTEA' nın asıl çalışma prensibi, hatayı sonradan yakalamak ve revize etmek yerine hatanın önceden tespit edilmesi temkinli biçimde önüne geçmek ve tasarım aşamasından itibaren hataların olası nedenlerinin incelenmesidir. Bu yüzden toplam kalite yönetim sürecinde de önemli bir işleve sahiptir. Bütüncül ve sistematik bir yaklaşımla süreç genel hatlarıyla değerlendirilmekte ve yeni ürün ve süreçlerde ortaya çıkabilecek tasarım hatalarının tekrarlanması önlenir [52].

HTEA; hataların nedenlerini belirleyip ortaya çıkmadan önce hataları çözüme ulaştırmaktadır. Sistemdeki riskleri analiz edip süreç güvenilirliğini artırır. Bir hatanın göreceli riski ve etkileri üç faktör ile belirlenerek tahmini yapılmaktadır.

•Şiddet

- Olasılık
- Saptanabilirlik

Süreç bilgileri kullanılarak, bu faktörlerin her birine 1'den 10'a kadar düşükten yükseğe bir derecelendirme yapılır. Üç unsur (şiddet*olasılık* saptanabilirlik) için çarpım işlemi yaparak, her potansiyel hata türü etkisi için bir risk öncelik puanı (RÖP) belirlenir. Risk öncelik puanına göre hata türünü en aza indirmek için onarıcı eyleme duyulan ihtiyacı sıralamak için kullanılır. RÖP'den bağımsız olarak önem derecesine göre yüksek değere sahip olan hatalarsa öncelikle en yüksek RÖP'lere sahip hata türlerine daha da dikkat edilmelidir. Tedbir alındıktan sonra, önem derecesi, olasılık ve saptanabilirlik sıralamaları yeniden değerlendirildikten sonra arıza için tekrardan yeni bir RÖP değeri bulunur. İyileştirme çabaları elde edilen tüm RÖP hata türleri yok sayılana kadar sürdürülmelidir. Genel olarak bu üç madde, uzmanlar tarafından onay verilen değerlendirme kriterlerine bağlı olarak tahmin edilmektedir.

HTEA' nın dört çeşidi vardır [53].

- Tasarım: Ürünün tasarım esnasında yani daha tam ortaya konulmadan önce riskli bölgeleri bulup ortaya çıkarmak için uygulanan HTEA çalışmasıdır.
- Proses: Üretim aşamasında ortaya çıkan hataları analiz etmek için kullanılır.
- Sistem: Bütün donanımlar tamamlandıktan sonra sistem sırasında çıkan bozuklukları elverişli hale getiren hata türlerine bakar.

•Hizmet: Üretim ve kalite güvencesiyle verilen hizmetlerdeki hataları azaltmaya yönelik bir çalışmadır.

Bir proseste en önemli husus, üretime hazır hale gelindikten sonra süreç veya ürün güvenilirliğinin sağlanmasıdır. Güvenilirlik müşteri memnuniyetini ve piyasada devamlılığı sağlayan önemli kriterdir. Müşteriler, aldıkları ürün için hizmet süresinin uzun periyotlu ve sürdürülebilir bir mekanizmayla yanıtlanmasını beklemektedir. Bu sebeple ürün veya süreç güvenilirliğinin sağlanması için öncelikle ortaya çıkma potansiyeli olan hataların analiz edilmesi ve risk analiziyle çok boyutlu bir şekilde değerlendirmesinin yapılması buna göre süreç güvenilirliğinin sağlanması gerekmektedir.

3.1.1 HTEA türleri

HTEA temel olarak dört ayrı şekilde ele alınmaktadır. Bunlar Sistem HTEA, Proses dediğimiz Süreç HTEA, Servis HTEA ve Tasarım HTEA'dır. Bu çeşitlilik yapılırken en çok kullanıldığı bütünsel bir yöntemle alt hedeflere önem verilmiştir. İlk başta Stamatis'in ortaya çıkardığı bu çeşitlilik Şekil 1'de gösterilmiştir [59].

3.1.1.1 Sistem HTEA (SHTEA)

Sistemlerin ve alt sistemlerin daha yapılandırma bölümündeyken en kullanışlı hale gelmesi için yapılan analizlerdir. Yapılan analizler, daha doğru ve sistemli çalışabilmesi ve eksiksiz devam etmesi yönündedir. Tüm donanımların ve tasarımın tamamen bitmesinin ardından üretim ve kalite gibi sistemlerin gidişatını analiz etmek için kullanılır. Yani genel olarak odak noktası sistemdeki hataları en aza indirgeyerek sistemin kalitesini, güvenilirliğini, işleyişini arttırmaktır [12].

- Sistemdeki noksanlıkları meydana getiren hususların, açık bir şekilde ortaya koyarak,
- Sistem tasarım seviyesinde olduğu için faydalı olan tasarımı seçerek,
- Hataları ortaya çıkarıp, hataya sebep olan teşhisler için bulunan prosedür ve talimatlara alt zemin oluşturarak,
- Hataların oluşabilme ihtimaline karşın sistemdeki hataların sebeplerini bulup azaltarak,

HTEA'ya katkıda bulunmuştur.

3.1.1.2 Proses HTEA (PHTEA)

Diğer adı Süreç HTEA olan, genellikle süreçte olabilecek hataları ve bu hatalara karşı tespit edilen çözüm değişikliklerini öneren bir yöntemdir. Tasarımı bitmiş bir ürünü sıfır hata ile müşteriye ulaştırmak için hizmet ve üretim sırasında meydana gelebilecek hataları belirlemeye çalışır [12]. Üretim ve montaj işlerini düzeltmek için kullanılır. Sistemde gözden

kaçırılan olası hataları tekrar analiz etmek için proses HTEA kullanılır [54].

- Süreç kusurlarını tamamlayarak,
- İyileştirme faaliyetlerinde öncülük sağlayarak,
- İmalat ve montaj sürecine yardımcı olarak,
- Çalışanların soruna çekerek sürecin olumsuzluklarını ortaya koyarak,

HTEA'ya katkıda bulunmuştur.

3.1.1.3 Tasarım HTEA (THTEA)

Müşteri her ürünü tasarımında hatasız görmek ister. Bu yüzden ürünün tasarımı esnasında yani daha tam ortaya konulmadan önce riskli bölgelerin bulunup ortaya çıkarılması için yapılan HTEA çalışmasıdır [55]. İlk üretim olmadan hataların belirlenmesi ve iyileştirici faaliyetlerin uygulanmasını sağlayan analitik bir yöntemdir. Tasarım yaklaşımlarıyla ilgili karar tanımlayıp seçenekleriyle değerlendirilen yararlı bir metottür [54].

- İyileşme için çalışmalarında öncelikleri belirleyerek,
- Olası hataların ürün üretilmeden önce hataları tespit ederek,
- Tasarım esnasında yapılan gerçek bir belge sistemi ile gelecek ürün tasarımları için rehberlik ederek,
- Kritik noktaları belirleyerek,

HTEA'ya katkıda bulunmuştur.

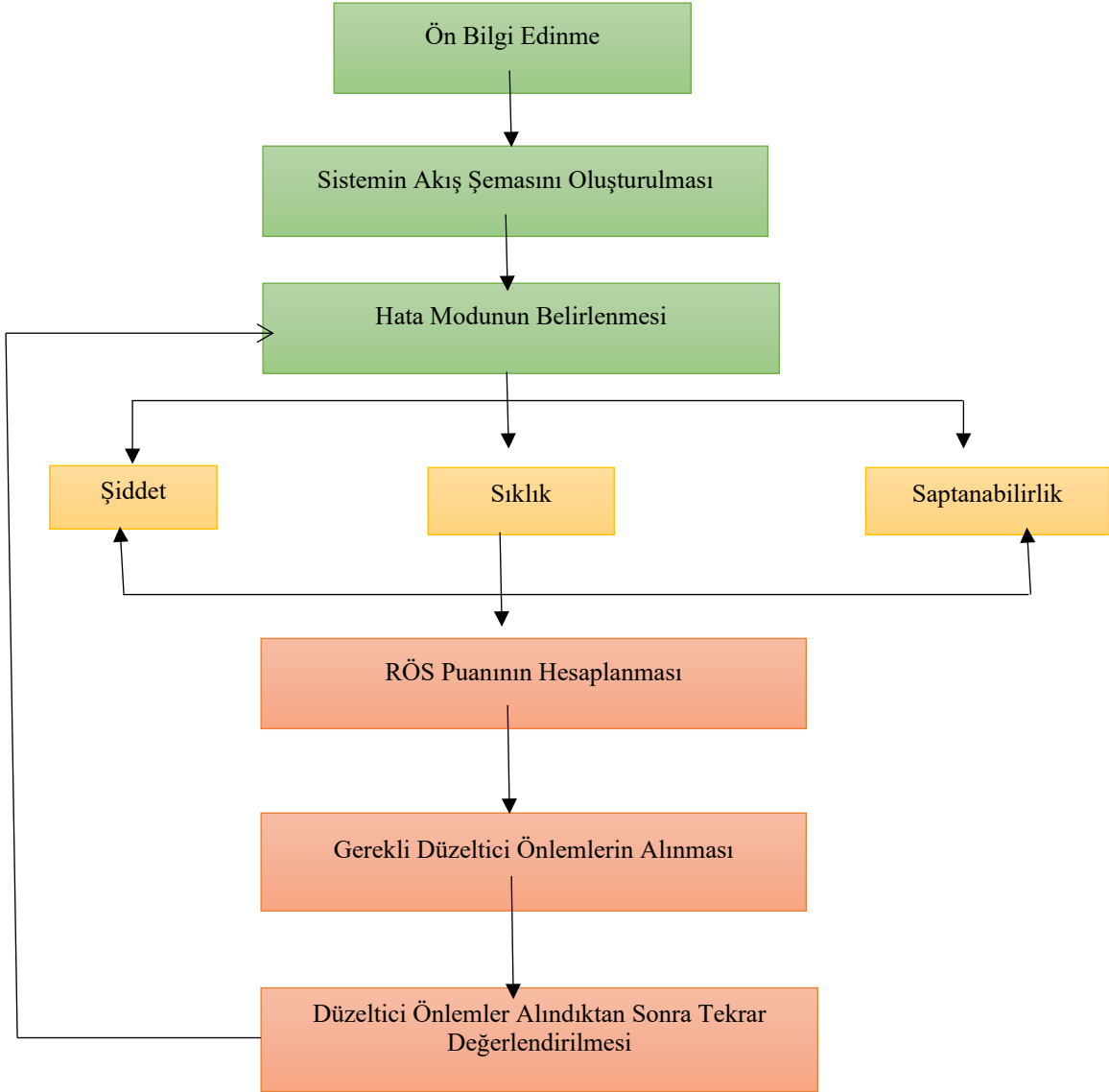
3.1.1.4 Servis HTEA (SeHTEA)

Müşteriye ulaşmadan, üretim, kalite güvencesini analiz ederek hataları kontrol altına alır. Bu hatalar ya servise ya da sisteme ait hatalardan gelen görev hataları üzerinde durulmuştur. Genel anlamda odaklandığı nokta, organizasyondaki hataları en aza indirgeyerek, kalitesi ve güvenilirliğiyle amacı müşteri memnuniyet oranını yüksek tutmaktır [56].

- İşlem yetersizliğini belirleyerek,
- İş akışını analiz ederek,
- Müşteri bazlı amaçladığı, müşteri talep ve memnuniyeti artırarak hataları organize edilerek,
- Sunulacak olan servisin kalite güvencesini artırarak,

- Gerçekleştirilen belgeleştirme sayesinde yapılan hataların tekrarlanmamasını engelleyerek, HTEA'ya katkıda bulunmuştur.

3.1.2 HTEA uygulama aşaması



Şekil 1. HTEA uygulama aşamaları

3.1.2.1 Hata türünün belirlenmesi

"Hata türü" terimi, bir ürünün veya bu ürünün bir bileşeninin kullanım ömrü anlamına gelir. Sürekli olarak beklenen fonksiyonel faydaları karşılayamayan bir durum olarak özetlenebilir.

Hata türünü belirlerken her işlevsel parça veya bileşen için ayrı ayrı karar verilmelidir. Ancak hatanın türü belirlenirken bir hata olmak zorunda değildir. Olası hatalar bu varsayımına göre belirlenir. Hata türü aslında bir performans sorunudur. HTEA çalışmaları mevcutsa, bu çalışmalar başarısızlık modlarını belirleyebilir. Tanımlanan hata türünü görmek yararlıdır. Hangi HTEA değişkeninin kullanıldığına bakılmaksızın hata türü bir karar verdikten sonra yapılacak ilk şey, fonksiyonel parçaları veya bileşenleri belirlemektir. Bir sonraki adım, hatanın etkisini belirlemektir.

3.1.2.2 Hata etkisinin belirlenmesi

Bir kusur, ürünün çalışmasını, işlevini veya durumunu etkiler. Ürettiği sonuçlar HTEA ekibi tarafından beyin

fırtınası faaliyetleri sonucunda belirlenir. Her hata modunun etkisi hem yerel hem de küreseldir (sistem). Müşteri memnuniyeti, hata modlarının etkisini belirlemek için önemlidir. Hata etkisi, fonksiyonel parça veya bileşeni tanımladıktan sonra arıza tipinin etkisidir. Yöntemin uygulanması sırasında yapılan değerlendirmelerde risk analizi ile hataların önceliğini açıklayan üç bileşen şu şekildedir:

3.1.2.3 Hata şiddeti (S)

Hata şiddeti, meydana gelen veya meydana gelebilecek hata türünün bir sonucudur. Şiddet, bir hatanın ciddiyetini tanımlar. Müşteriye yansıtılabilecek hata sonuçlarının miktarı değerlendirilir. Şiddet, yalnızca bir tür yanlış eylemle uygulanır. Şiddet konusu hatanın sonuçlarına ait bir kavramdır. Ürünün parçaları, sistemleri, alt sistemleri ve grupları, ürünün kendisi, yasa ve müşteri tarafından yapılan her tür hatanın ciddiyet derecesidir. Bu değerlendirme hatalara ait derecelendirmeyi verecektir [12]. Şiddet derecelendirme tablosu Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Şiddet derecelendirme

| Kriter | Derece |
|---|--------|
| Hata, çok büyük memnuniyetsizliğe, sistemin durmasına ve yasalarla uyumsuzluğa yol açar. | 10 |
| Hata, yüksek derecede müşteri memnuniyetsizliğine yol açar ve sistemin işlevselliğini etkiler. | 8-9 |
| Hata, müşteri memnuniyetsizliği ile sistem performansının düşmesine neden olur. Onarım gerekir. | 6-7 |
| Ürün performansı veya süreç üzerinde küçük şiddette etki. Hata müşteri tarafından fark edilir ve ürün kullanımında bazı rahatsızlıklar yaşanır. | 3-5 |
| Ürün performansı veya süreç üzerinde önemsiz etki. Hata müşteriler tarafından fark edilmez. | 1-2 |

3.1.2.4 Hata olasılığı(O)

Farklı hata türleri, farklı türde hatalar doğurur. Hatanın ortaya çıkabilme durumunu anlatır. Yani hatanın frekansını verir. Her bir hata türü için önceden belirlenmiş olasılık değeri ile hata nedeninin olasılık değeri çarpılarak belirlenir[12]. Bir hata nedenine olasılık değeri şu şekilde atanır: başka bir durum, bu

durumda, başka bir alternatif durum, arıza nedeninin etki düzeyini dikkate almak ve her arıza tipine karşılık gelen bir olasılık değeri atamaktır. Olasılık değerleri Tablo 3'de gösterilmiştir.

Tablo 3. Hata olasılık değerleri

| Hata Olasılığı | Olası Hata Oranları | Derece |
|-----------------------|---------------------|--------|
| Hemen hemen kesin | ½'den fazla 1/3 | 9-10 |
| Çok yüksek Yüksek | 1/8 | 7 |
| | 1/20 | 8 |
| Orta | 1/80 | 4 |
| | 1/400 | 5 |
| | 1/2000 | 6 |
| Düşük Çok Düşük | 1/15000 | 2 |
| | 1/150000 | 3 |
| Hemen Hemen Olanaksız | 1/1500000'den düşük | 1 |

3.1.2.5 Hata tespiti (T)

Hata türünün tüketiciye ulaşmadan önce tespit edilmesidir. Yani üretim esnasında birkaç aşamadan geçmesi gerekir ve tespit edilen hatanın giderilmesi gerekir. Saptama ile alakalı ihtimal değerleri ortaya

çıkan hata değerlerinin müşteriye ulaşmamasıdır. 1-10 arası derecelendirme yapılarak tanımlanan hatanın bir kusuru bulma ihtimalinin belirlenmesidir[12]. Hata tespit tablosu Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo 4. Tespit Etme

| Tespit Etme | Derece |
|-------------------|--------|
| İmkansız | 10 |
| Çok Zor | 9 |
| Zor | 8 |
| Çok Az | 7 |
| Az | 6 |
| Orta | 5 |
| Ortanın Üstü | 4 |
| Yüksek | 3 |
| Çok Yüksek | 2 |
| Hemen Hemen Kesin | 1 |

3.1.3 Risk öncelik sayısı (RÖS)'nin hesaplanması

Hatalar, şiddet, olasılık ve tespit edilebilirlik değeri kullanılarak risk yaratabilecek hataların önceden öğrenilmesi amacıyla hesaplanarak ortaya çıkması gereken sayısal değerlerdir[12]. Her olabilecek hatanın türleri ve etkisi bu üç faktörde ölçek ile değerlendirilerek hesaplama işlemi yapılır. Ölçeklendirme işlemi ile hangi hatanın üzerinde durulması gerektiği belirlenir. Yani hataların birbirine nazaran önem dereceleri belirlenerek hataları büyüklüğüne ve küçüklüğüne göre sıralama yapar.

Risk öncelik sayısının hesaplanmasında genel olarak kullanılan, hata şiddeti, hata olasılığı ve hata tespitine ilişkin değerlerin çarpım işlemi yapılarak hesaplanır [57].

- $RÖS = \xi \times O \times T$
- $RÖS < 40$ ise iyileştirme yapmaya gerek yoktur.
- $40 < RÖS < 100$ ise iyileştirme işlemi gerekebilir.
- $RÖS > 100$ ise iyileştirme işlemi kesin yapılmalıdır.

RÖS puanı belirlendikten sonra gerekli iyileştirmeler yapılır [58]. Düzeltici önlemler ile RÖS değerleri en aza indirgenmeye çalışılır[12]. En aza indirgenirse yapılacak olan iyileştirme çalışmaları azalacaktır. Bu değerlerin küçülmesi için de olasılık, şiddet ve tespit değerlerinin küçük olması gerekir. Gerekli

iyileştirmeler yapıldıktan sonra tekrar RÖS puanı hesaplanır ve gereken en az değere ulaşılmış ise sonuç başarılıdır [58, 59].

3.1.4 Düzeltici önlemlerin belirlenmesi

Düzeltici önlemler, olabilecek hata türlerini veya sebeplerini en aza indirmek için veya tamamen kaldırmak için veya olumsuz etkilerini sıfırlamak için modelleme, üretim süreci, malzeme veya üretim metodu gibi farklı verilerle uygulanabilecek farklılıklardır. Düzeltici önlemler ile RÖS değerleri en aza indirgenmeye çalışılır. Bu yüzden hata olasılığı, hata tespiti ve hata şiddeti değerlerini en aza indirmek gerekir [59]. Bu sebeple şu tavsiyelere uymak gerekir:

- Hatanın meydana gelebilme ihtimalini en aza indirmek için süreç yahut tasarımın tekrar optimize edilmesi gerekir.
- Şiddet değerini azaltmak için sadece tasarımın optimize edilmesi gerekir.
- Hata tespit ihtimalini arttırmak için, süreç işlemi tekrardan gözden geçirilmelidir. Kalite kontrol işlemlerinin çoğaltılması için olumlu bir düzeltici çalışma yapmak yerine çok zor olaylarda geçici bir düzeltme çalışmasıdır. Burada önemli husus, hataları bulmaktan ziyade onların meydana gelmesini engelleyecek faaliyetlerin çoğaltılmasıdır.

3.1.5 İzleme

Analizin bu aşaması, yapılması gereken önleyici hataların, yeterli faaliyette kullanılmaya uygun görülüp görülmediğinin doğrulanması ve yeni etkilerin incelenmesi değerlendirilmesi adıdır. Düzeltici önlemlerin devreye alınması bakımından fazlasıyla önemlidir. Bu adımda RÖS dereceleri en aza indirgenene kadar çözümler araştırılır ve değerlendirilme sürecine alınır. İzleme aşamasıyla birlikte:

- Düzeltici önlemlerin alınması,
- RÖS derecelerinin azaltılması,
- Yapılan iyileştirmelerin devamlılığı sağlanır.

Oluşabilecek hataların sebeplerine engel olmak için araştırılan yeni önlemler, izleme aşamasından sonra uygulanmaya başlanır [58, 59].

3.1.6 Doğrulama

Yapılan tüm işlemlerin hatasız olduğunu gösterebilmek için yapılan analizin en son adıdır. Bu adımda amaç:

- Ürünün üretimine başlamadan önce, düzeltici önlemlerin uygulanıp doğrulanması,

- Sistemin ise süreç içinde herhangi bir değişikliğe uğramamasının doğrulanmasıdır.

3.2 Entropi Yöntemi

Entropi kavramı, mühendislik, fen gibi pek çok temel bilim dalında matematik ve bilgi teorisinde kullanılan önemli bir kavramdır. Öncelikle, termodinamik konusunda Rudolph (1865) tarafından geliştirilmiş ardından Shannon (1948) [60] tarafından bilgi entropisi konusuna evrilmiştir.

Entropi yöntemi karar problemlerinde kriterlerin önem seviyelerini belirlemede kullanılan AHP, Delphi yöntemleri gibi karar verici subjektif yargılarına gerek kalmadan değerlendirme imkanı sunan bir objektif değerlendirme metodudur. Yöntemin aşamaları sırasıyla aşağıda verilmiştir [61].

$$\begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (1)$$

burada x_{ij} : i . alternatifin j . kritere göre başarı değeridir, $i = 1, 2, \dots, m$ ve $j = 1, 2, \dots, n$.

1. Karar matrisi normalizasyonu:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (2)$$

i : alternatif j : kriter r_{ij} : normalize değerler

x_{ij} : i . alternatifin j . kriter için karar matrisinde karşı gelen değeri

2. Kriterlere ait entropi değerlerinin elde edilmesi:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m r_{ij} \ln(r_{ij}) \quad \begin{matrix} i = 1 \dots m \\ j = 1 \dots n \end{matrix} \quad (3)$$

k , entropi sabiti, e_j entropi değeri

$$k = 1/\ln(m) \quad (4)$$

3. Bilginin farklılaşma derecesi hesabı

$$d_j = 1 - e_j \quad (5)$$

4. Entropi kriter ağırlıklarının hesaplanması

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{i=1}^m d_j} \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n w_j = 1 \quad (7)$$

IV. UYGULAMA

Bu çalışmada amaç, havacılık sektöründe hava alanı bakım yönetim faaliyetleri kapsamında HTEA ve karar verme yöntemlerini iki aşamalı bir yapı ile analiz ederek mevcut sistem yapısını etkileyen sorunların giderilmesi ve öncelikli risk seviyelerinin tespit edilmesi ve buna göre bütçe kısıtı altında yönetici ve yetkililerin alacağı yatırım kararlarına yardımcı olmaktır.

Öncelikle hava alanı yetkilileriyle görüşülerek HTEA analizi için önemli risk faktörleri ortaya konulmuş, ardından bu risk faktörlerinin objektif biçimde değerlendirilmesi için karar verme araçlarıyla analitik biçimde analiz gerçekleştirilmiştir.

Araştırma için, farklı havalimanı çalışanlarıyla odak grup toplantıları yapılmış anket uygulanmış ve gerekli veriler temin edilmiştir. Çalışma için ulaşılamayan havalimanı çalışanları için çevrimiçi anket uygulanmıştır. Çalışmada işletmelerin veri gizliliği politikası gereği alınan bilgi ve veriler ile yapılan anket açık biçimde paylaşılamamaktadır.

Ankete geniş katılım sağlanmasının istenme nedeni çalışanların hava alanları için hangi faktörleri riskli gördüklerinin belirlenmesidir. Yöntemin eksik noktalarından biri olan karar vericilere bağlı kalması ve özellikle kritik faktör olabilecek birkaç hata türünün olması ancak bunu ayırıştırıcı kısmının şiddet, olasılık ve tespit edilebilirlik kısımlarındaki sayısal niceliğin doğru tayin edilmesi hususunda olduğu anlatılmıştır.

Çalışmada değerlendirilen sorular çerçevesinde ve yönetici takımındaki görüşmeler sonucunda 21 temel hata türü belirlenmiştir. Havalimanı yöneticileriyle hata türü etkileri analizi için önerecekleri kişilerden takım oluşturup konu hakkında kapsamlı bir araştırma yapılması istenmiştir. Buna göre risk analizi ekibi kendi önerdikleri kıdemli çalışanlar arasından belirlenmiş ve beyin fırtınası yapılarak tüm sorunlar ortaya konulmuştur. Delphi yöntemi ile en önemli olabilecek hata türleri ilgili ekipçe kesinleşmiştir. Ekip üyelerine hata türü etkileri analizi hakkında bilgi verilmiş, analizin çalışma prensibi anlatılmıştır. Yöntemin olası yanlış yorumlama ve RÖS değerlendirme kısımlarında hesaplamalar konusunda örnekler verilerek açıklanmıştır. Anketlerde özellikle şiddet, olasılık ve tespit edilebilirlik konusunda nasıl değerlendirmeler yapıldığı incelenerek aralarından en tecrübeli ve daha önce risk analizi uygulamaları konusunda çalışmış donanımlı uzmanlar seçilerek onların görüşü ile geometrik ortalama operatörü kullanılarak uzman görüşleri birleştirilmiştir. Entropi yöntemi uygulanırken çalışmada tutarlı ve anlamlı katkı sunan havalimanı yöneticilerinin görüşü temel alınarak analiz gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde HTEA'nın subjektif tarafının daha objektif yöntemlerle birleştirilerek dayanaklı ve tutarlı bir uygulama yapılması amaçlanmıştır.

Yapılan anketlere bakıldığında, HTEA analizi kullanılarak 21 farklı hata türü ve veya/risk faktörü ortaya konulmuş ve bu sorunların çıkardığı olumsuz etkiler tespit edilerek gerekli çözüm önerileri sunulmuştur. Buna göre RÖS değerleri ve kabul edilebilir yeni RÖS değerleri belirlenmiştir. Genel olarak havalimanlarındaki bakım onarım faaliyetlerinin sürdürülebilir hale getirilmesinin sağlanması için yapılan anket ve hesaplamalar doğrultusunda gerçekleştirilen analiz değerlendirmeleri son derece önemlidir. Çalışmada çevreye duyarlılık ve karbon salınımı unsurları da değerlendirilerek çalışmanın çerçevesi daha kapsamlı ve güncel hale getirilmiştir. Sanayi geliştikçe, emisyon salınımı da onunla birlikte artmaya devam edecektir. Hava yolu taşımacılığı emisyon salınımına büyük ölçüde yol açan ulaştırma modlarından biridir. Emisyon salınımı tamamen ortadan kaldırılmasa bile en aza indirgeyecek önlemler alınabilir. Yapılacak çalışmalarla da çalışan, yönetici, havaalanında temin edilen araçlar için en uygun olanaklar ve çevreye daha az etki eden unsurlar belirlenecektir. Bu unsurlar doğrultusunda yaptığımız çalışmada iki aşamalı bir yöntem kullanarak Endüstri 4.0 teknolojisi ve karbon emisyon salınımını en aza indirgeyecek bakış açısıyla havaalanında en uygun bakım yönetim planlamasını ele alacak uygun bakım-yönetim stratejisi değerlendirilmektedir. Buna göre gerekli önlemler alınarak iyileştirme önerileri yapılmaktadır.

Yolcu ve yük taşımacılığı havacılık sektöründe çok önemli hususlardır. Havacılıkta sürdürülebilirlik ilkesi çerçevesinde uçuş emniyeti ve havacılık güvenliğinin uluslararası prosedürlere uygun biçimde sağlanması gerekmektedir. Bu açıdan devlet ve özel işletmeciler tarafından gerçekleştirilen bakım, onarım ve yenileme faaliyetleri havacılıkta güvenlik ve emniyetin sağlanması için kritik öneme sahiptir. Havacılık sektörünün son teknolojik ekipmanlarla desteklenmesi tedarik ve lojistik faaliyetlerinin titizlikle sürdürülmesi ayrıca günümüz gelişmelerini hızlı adapte edilebilmesi sayesinde rekabet koşullarında Endüstri 4.0 ile uyumlu teknolojilerin kullanılması vazgeçilmezdir.

Havacılıkta uygulanan bakım faaliyetleri yaygın biçimde uçuş öncesi ve uçuş sonrasında gerçekleştirilen bakımlar şeklinde düzenli olarak yapılan ve takip/kontrol işlemleri ile daha detaylı bir şekilde yapılan süreç ve proseslerden meydana gelmektedir. Buna göre farklı kategorilerden oluşan bakım onarım kontrolleri söz konusudur. Bu kontroller yolcu kabini, motor bağlantı aksamı, kanat, tüm hareketli parça kontrolü gibi uçuş sürelerine bağlı düzenli sıklıkta yapılan ciddi bakım faaliyetleridir. Ayrıca sivil havacılık faaliyetleri kapsamında değerlendirilebilecek hat bakımı, üs bakımı ve komponent bakımı gibi uçak

aprondayken yapılması gereken bakımlardır. Tablo 5'te HTEA'nın uygulaması gösterilmektedir. Tanımlanan tehlikeler ve karşı gelen RÖS değerleri ile risk azaltma çalışmalarından sonra yeni RÖS değerleri tabloda

gösterilmektedir. Uzmanlardan alınan görüşlerle hazırlanan HTEA tablosunda görüleceği gibi iyileştirme çalışmalarından sonra elde edilen yeni RÖS

değerleri önceki duruma göre düşmüştür, daha iyi seviyededir.

Tablo 5. Havaacılık sektöründe HTEA analizi uygulaması

| NO | Tanımlanmış tehlikeler | Zarar | RÖS değeri | | | | Risk azaltma çalışmaları | Yeni RÖS değeri | | | |
|----|--|--|------------|---|---|-----|--|-----------------|---|---|-----|
| | | | P | S | D | RÖS | | P | S | D | RÖS |
| 01 | İklimlendirme ekipmanları ve ısınma grubunun gereğinden fazla çalışması. | Elektrik tüketiminin artması neticesinde karbon salınımının artması. | 5 | 5 | 5 | 125 | Isıtılan hacmin homojen dağılması için projeler geliştirmek. Bina yalıtım elemanlarının kullanılması, çift kapı kullanılması vb. | 3 | 3 | 4 | 36 |
| 02 | Fazla elektrik tüketen teknolojik aletlerin kullanılması. | Elektrik tüketiminin artması neticesinde karbon salınımının artması. | 5 | 6 | 3 | 90 | Daha az elektrik tüketen teknolojik aletlerin kullanılması. | 3 | 3 | 3 | 27 |
| 03 | Uçağın fosil yakıt kullanması. | Yakıt tüketiminin artması neticesinde karbon salınımının artması. | 7 | 7 | 5 | 245 | Biyoyakıt kullanılması. | 3 | 4 | 3 | 36 |
| 04 | Çok yakıt tüketen uçakların kullanılması. | Yakıt tüketiminin artması neticesinde karbon salınımının artması. | 8 | 6 | 5 | 240 | Az yakıt tüketen uçakları tercih edilmesi. | 4 | 4 | 4 | 64 |
| 05 | Topla dağıtım ağ sisteminin olmaması. | Yakıt tüketiminin artması neticesinde karbon salınımının artması. | 7 | 6 | 4 | 168 | Az sayıda uçak seferlerinin olması. | 4 | 3 | 4 | 48 |
| 06 | Pist kapasitesinin az olması gecikme sürelerinin artması. | Yakıt tüketiminin artması neticesinde karbon salınımının artması. | 7 | 5 | 3 | 105 | Pist kapasitesinin artırılması. | 4 | 3 | 3 | 36 |
| 07 | Uçak motor ve gövde bakım periyodunun aksatılması | Bakım periyotlarının kaçırılması yüzünden beklenmedik arıza ve uçuş rötaları | 7 | 6 | 4 | 168 | Bakım periyotlarının aksatılmadan yönergelere uygun sıklık ve hassasiyette yapılması | 3 | 4 | 4 | 48 |
| 08 | Uçak kanat ve bağlantı parçalarının kontrol edilmemesi | Bakım periyotlarının kaçırılması yüzünden beklenmedik arıza ve uçuş rötaları | 8 | 6 | 5 | 240 | Her iniş ve kalkıştan sonra bakım rutinlerine dikkat edilmesi | 5 | 4 | 3 | 60 |

| | | | | | | | | | | | |
|----|---|---|---|---|---|-----|---|---|---|---|----|
| 09 | Uçak aprondayken hat bakım ve üs bakım kontrollerinin yapılmaması | Bakım periyotlarının kaçırılması yüzünden beklenmedik arıza ve uçuş rötarları | 8 | 6 | 5 | 240 | Bakım çalışmalarının özenli sürdürülmesi | 4 | 5 | 3 | 60 |
| 10 | Uçak yakıt kullanımının artırılması ve verimliliğinin azalması | Tasarruflu kullanılmayan yakıt yüzünden yüksek maliyet, karbon salınımında artış ve etkin olmayan uçuş hizmetleri | 5 | 4 | 4 | 80 | Verimli, çevre dostu yakıtların tercih edilmesi | 4 | 3 | 3 | 36 |
| 11 | Uçak aerodinamik temizliğinin sağlanmasında aksaklık | Uçak bakım onarım faaliyetinin aksaması ve uçak kazası | 8 | 8 | 4 | 256 | Hijyen şartlarının aksatılmadan sürdürülmesi | 4 | 4 | 4 | 64 |
| 12 | Uçak sistem kalibrasyonunun yapılamaması | Uçak bakım onarım faaliyetinin aksaması ve uçak kazası | 9 | 8 | 5 | 360 | Olası kazaların önüne geçmek için periyodik sistem bakım ve kontrol çalışmalarının teknik destek ekibince değerlendirilmesi | 5 | 3 | 3 | 45 |
| 13 | Endüstri 4.0 faaliyetleri ile entegrasyon çalışmasının sağlanamaması | Güncel teknolojiye entegre olmayan uçak uçuş sistemlerinde kaynaklı gecikme, rötar ve doğru çalışmayan optimizasyon modelleri ile hatalar | 5 | 4 | 3 | 60 | Endüstri 4.0 gelişmeleriyle entegrasyonu tamamlanmış sistemlerin kullanılması | 3 | 3 | 3 | 36 |
| 14 | Arttırılmış gerçeklik (AR) uygulamalarının uçak sistemlerine katılamaması | Karmaşık seviyedeki bakım faaliyetlerinde verimliliğin sağlanamaması, arttırılmış gerçeklik teknolojisinin katılmadığı uçak bakım eğitimlerinde başarısızlık, hatalar yetersiz kalitede uçuş testleri | 4 | 4 | 3 | 48 | AR uygulamalarının yaygınlaştırılması ile test sürüş, pilot eğitimi, uçuş sırasındaki tüm durumların simülasyonun sağlanması ile başarılı uçuşlar | 3 | 3 | 3 | 36 |

| | | | | | | | | | | | |
|----|---|--|---|---|---|-----|---|---|---|---|----|
| 15 | Eklemeli imalat teknolojisinin uçuş imalat ve süreç yönetim aşamalarına dahil edilememesi | Bozulan, arızalanan ve yıpranan parçanın hızlı tedarikinin sağlanamaması, uyumsuz ve kalitesiz ve pahalı yedek parçalarla uzun süreçte masraf ve bakım planlama faaliyetlerinin aksaması | 6 | 5 | 5 | 150 | Eklemeli imalatla paralel çalışan yönetim felsefesi ile uygun kaliteli ve hızlı parça tedarikinin sağlanması | 4 | 3 | 3 | 36 |
| 16 | Aynı kompartmana yüklenmesi sakıncalı tehlikeli maddelerin aynı kompartmanda taşınması | Maddelerin tepkimeye girip yangına sebep olması | 8 | 7 | 5 | 280 | Tehlikeli madde taşımacılık yönergelerine uyulması | 4 | 4 | 4 | 64 |
| 17 | Göndericinin, ürünü prosedürüne aykırı kargolanması | Yanlış paketlenen ürünün uçağa zarar vermesi | 7 | 5 | 4 | 140 | Uygun paketlenmeyen ürünün yüklemesi yapılmadan önce tekrar kontrol edilmesi | 3 | 4 | 4 | 48 |
| 18 | Kullanılan uçaklarda sistem yetersizliği olması | Meydana gelen olayların geç fark edilmesi | 8 | 6 | 5 | 240 | Uçak bakımlarının daha sık yapılması | 4 | 5 | 3 | 60 |
| 19 | Tehlike anında yanlış müdahale veya müdahalenin geç başlaması | Gecikmeler ve geç tespitler olay ve kazaların daha büyümesine sebep olur | 8 | 8 | 5 | 320 | Olaylara müdahale konusunda yetersiz kalan mürettebatın AR ve VR ortamlarında eğitimler alması | 4 | 4 | 3 | 48 |
| 20 | Mürettebat arasında iletişim eksikliği | Herhangi bir kaza anında eksik iletişim kaynaklı mürettebatın olası olaylara karşı önlem alamaması | 7 | 5 | 4 | 140 | Verilen eğitimler dahilinde mürettebatın bir arada değerlendirilmesi gerekliliği, son teknolojik ekipman desteği ile iletişim sıklığı, ekip için uyumluluk sağlanması | 3 | 4 | 4 | 48 |
| 21 | Alınması gereken yenileme kurslarının yetersizliği | Kurs zaman aralıklarının uzun olması sebebiyle temel bilgilerin zayıflaması | 6 | 4 | 4 | 96 | Verilen kursların zaman aralığını sıklaştırarak, harici AR ve VR ortamlarında da eğitimlerini desteklemek | 4 | 3 | 3 | 36 |

Havalimanları, yoğun insan trafiği ve yüksek güvenlik standartları nedeniyle çok hassas yerlerdir. Hata türleri genellikle operasyonel, teknik, güvenlik ve insan faktörleri gibi farklı kategorilere ayrılabilir.

Havalimanlarında yaşanabilecek hatalar, çok sayıda probleme neden olabilir. Bunlar arasında uçuşların gecikmesi veya iptal edilmesi, uçak kazaları, yolcuların mağdur olması, hava trafiğinin aksaması ve hatta ölümlü kazalar gibi ciddi sonuçlar yer alabilir.

Hata analizi, havalimanlarında güvenliği artırmak ve hizmet kalitesini iyileştirmek için önemlidir. Bu analiz, hata kaynaklarını, nedenlerini ve sonuçlarını tespit etmek için kullanılır. Bu bilgiler, gelecekte benzer hataların önlenmesine yardımcı olmaktadır. Havalimanı yöneticileriyle yapılan görüşmeler sonucunda yaşanabilecek hataların türleri arasında, teknik hatalar, personel hataları, hava koşulları,

güvenlik açıkları ve planlama hataları yer alabilir. Teknik hatalar, havalimanı ekipmanlarının veya sistemlerinin arızalanması gibi sorunları kapsamaktadır. Personel hataları ise görevlerin yanlış yapılması veya görev atamalarının yanlış yapılması gibi insan kaynaklı sorunlardır. Güvenlik açıkları, havalimanının güvenlik sistemlerindeki hatalardan kaynaklanan sorunlar olabilir. Planlama hataları ise, havalimanı faaliyetlerinin planlanması veya yönetimi sırasında ortaya çıkan sorunlardır. Tablo 6'da görüldüğü gibi ilgili hata türünün çevresel, teknolojik, teknik donanım ve personel kaynaklı olmalarına göre gruplandırılmıştır.

Tablo 6. Hata türü kaynakları

| Çevresel | Teknolojik | Donanımsal | Personel |
|----------|------------|------------|----------|
| HT1 | HT7 | HT13 | HT16 |
| HT2 | HT8 | HT14 | HT17 |
| HT3 | HT9 | HT15 | HT18 |
| HT4 | HT11 | | HT19 |
| HT5 | HT12 | | HT20 |
| HT6 | | | HT21 |
| HT10 | | | |

Entropi yönteminde üç uzman görüşü alınarak olasılık, şiddet ve tespit edilebilirlik kriterlerine göre 21 hata türü değerlendirilmiştir. Birleştirilmiş uzman görüşü tablosu, normalize karar matrisi ve entropi ağırlık dereceleri aşağıda verilmiştir. Karar Matrisinin Oluşturulması: Çalışmada ilgili RÖS parametrelerinin

önem seviyelerinin belirlenmesinde objektif değerlendirme yaklaşımı olan Entropi yaklaşımdan yararlanılmıştır. Buna göre her hata türünün ilgili bileşenlerinin (olasılık, şiddet, tespit) üç uzman tarafından değerlendirme karar matrisi Tablo 7'de şu şekilde yer almaktadır.

Tablo 7. Karar verici görüşleri

| KV1 | | | KV2 | | | KV3 | | |
|-----|---|---|-----|---|---|-----|---|---|
| P | S | D | P | S | D | P | S | D |
| 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 6 | 5 |
| 5 | 6 | 3 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 4 |
| 7 | 7 | 5 | 6 | 8 | 5 | 5 | 7 | 6 |
| 8 | 6 | 5 | 8 | 5 | 5 | 7 | 6 | 5 |
| 7 | 6 | 4 | 6 | 5 | 5 | 7 | 6 | 5 |
| 7 | 5 | 3 | 7 | 5 | 4 | 6 | 6 | 5 |
| 7 | 6 | 4 | 6 | 7 | 3 | 6 | 5 | 4 |
| 8 | 6 | 5 | 7 | 5 | 5 | 8 | 7 | 5 |
| 8 | 6 | 5 | 7 | 5 | 5 | 8 | 5 | 4 |
| 5 | 4 | 4 | 6 | 5 | 4 | 7 | 4 | 4 |
| 8 | 8 | 4 | 7 | 7 | 5 | 6 | 6 | 4 |
| 9 | 8 | 6 | 8 | 8 | 5 | 7 | 6 | 6 |
| 5 | 4 | 3 | 4 | 6 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 4 | 4 | 3 | 4 | 5 | 4 | 5 | 5 | 4 |
| 6 | 5 | 5 | 5 | 6 | 6 | 5 | 5 | 5 |
| 8 | 7 | 5 | 8 | 8 | 7 | 7 | 7 | 6 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 | 5 | 4 | 6 | 5 | 4 | 7 | 4 | 5 |
| 8 | 6 | 5 | 8 | 7 | 4 | 7 | 6 | 6 |
| 8 | 8 | 5 | 7 | 7 | 7 | 6 | 6 | 8 |
| 7 | 5 | 4 | 6 | 4 | 4 | 7 | 5 | 6 |
| 6 | 4 | 4 | 6 | 6 | 6 | 5 | 5 | 5 |

Ardından bu üç uzman görüşü geometrik ortalama operatörü ile birleştirilmiş ve aşağıdaki Tablo 8 elde edilmiştir.

Tablo 8. Birleştirilmiş Uzman Görüşü

| P | S | D |
|-------|-------|-------|
| 4,641 | 5,313 | 5 |
| 4,641 | 5,313 | 3,914 |
| 5,943 | 7,318 | 5,313 |
| 7,651 | 5,646 | 5 |
| 6,649 | 5,646 | 4,641 |
| 6,649 | 5,313 | 3,914 |
| 6,316 | 5,943 | 3,634 |
| 7,651 | 5,943 | 5 |
| 7,651 | 5,313 | 4,641 |
| 5,943 | 4,308 | 4 |
| 6,952 | 6,952 | 4,308 |
| 7,958 | 7,268 | 5,646 |
| 4,641 | 4,932 | 4,217 |
| 4,308 | 4,641 | 3,634 |
| 5,313 | 5,313 | 5,313 |
| 7,651 | 7,318 | 5,943 |
| 6,649 | 4,641 | 4,308 |
| 7,651 | 6,316 | 4,932 |
| 6,952 | 6,952 | 6,542 |
| 6,649 | 4,641 | 4,578 |
| 5,646 | 4,932 | 4,932 |

Normalize edilmiş karar matrisi aşağıda Tablo 9’da formül yardımıyla ilgili kriterin ilgili sütun toplamına sunulmuştur. Entropi metodunun sunulduğu ikinci oranlanmasıyla normalize değerler elde edilmiştir

Tablo 9. Normalize Karar Matrisi

| P | S | D |
|-------|-------|-------|
| 0,034 | 0,044 | 0,050 |
| 0,034 | 0,044 | 0,039 |
| 0,044 | 0,061 | 0,053 |
| 0,057 | 0,047 | 0,050 |
| 0,049 | 0,047 | 0,046 |
| 0,049 | 0,044 | 0,039 |
| 0,047 | 0,049 | 0,036 |
| 0,057 | 0,049 | 0,050 |
| 0,057 | 0,044 | 0,046 |
| 0,044 | 0,035 | 0,040 |
| 0,051 | 0,057 | 0,043 |
| 0,059 | 0,060 | 0,056 |
| 0,034 | 0,041 | 0,042 |
| 0,032 | 0,038 | 0,036 |
| 0,039 | 0,044 | 0,053 |
| 0,057 | 0,061 | 0,059 |
| 0,049 | 0,038 | 0,043 |

| | | |
|-------|-------|-------|
| 0,057 | 0,052 | 0,049 |
| 0,051 | 0,057 | 0,065 |
| 0,049 | 0,038 | 0,046 |
| 0,042 | 0,041 | 0,049 |

Kriterlere ilişkin entropi değerleri aşağıdaki Tablo 10'da paylaşılmıştır. Önceki tabloda yer alan normalize değerler ile logaritması alınan değerler çarpılmıştır. Ardından bu işlem sonucu hesaplanan değerler

toplanarak entropi değeri elde edilmiştir. Formülde yer alan k entropi katsayısı $1/\ln 21$ (0,328) hesabı ile bulunarak formüle adapte edilmiştir.

Tablo 10. Entropi değerleri

| P | S | D |
|---------|---------|---------|
| -0,1164 | -0,1380 | -0,1503 |
| -0,1164 | -0,1380 | -0,1273 |
| -0,1381 | -0,1706 | -0,1565 |
| -0,1633 | -0,1438 | -0,1503 |
| -0,1489 | -0,1438 | -0,1430 |
| -0,1489 | -0,1380 | -0,1273 |
| -0,1439 | -0,1488 | -0,1209 |
| -0,1633 | -0,1488 | -0,1503 |
| -0,1633 | -0,1380 | -0,1430 |
| -0,1381 | -0,1194 | -0,1292 |
| -0,1534 | -0,1650 | -0,1360 |
| -0,167 | -0,1698 | -0,162 |
| -0,1164 | -0,1312 | -0,1340 |
| -0,1104 | -0,1258 | -0,1209 |
| -0,127 | -0,1380 | -0,1565 |
| -0,1633 | -0,1706 | -0,1684 |
| -0,1489 | -0,1258 | -0,1360 |
| -0,1633 | -0,155 | -0,1490 |
| -0,1534 | -0,1650 | -0,1790 |
| -0,1489 | -0,1258 | -0,1417 |
| -0,1333 | -0,1312 | -0,1490 |

Buna göre elde edilen e_j değerleri 0,9946, 0,9956, 0,9960 şeklinde bulunmuştur. Ardından bilginin farklılaşma dereceleri 1'den çıkartılarak hesaplanmıştır (0,005347; 0,004368; 0,003945). Tablo 11'e göre faktörlerin entropi dereceleri ve her bir kriterin ağırlık

değeri şu şekilde bulunmuştur. Olasılık değeri 0,391, tespit edilebilirlik değeri 0,288 ve şiddet değeri 0,319 olarak elde edilmiştir. İlgili ağırlık değerleri entropi temelli HTEA analizinde kullanılmıştır.

Tablo 11. Faktörlere ait Entropi ve ağırlık değerleri

| | P | S | D |
|---------|--------|--------|--------|
| Entropi | 0,9946 | 0,9956 | 0,9960 |
| w_j | 0,391 | 0,319 | 0,288 |

V. UYGULAMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Hata analizi yapılırken, öncelikle hataların türleri ve sıklıkları belirlenir. Sonra, hataların nedenleri tespit edilir. Bu nedenler, teknik arızalar, personel eğitimi eksikliği veya hatalı yönetim kararları gibi çeşitli faktörlere bağlı olabilir. Son olarak, hata analizinin sonuçları değerlendirilir ve alınabilecek önlemler belirlenir. Sonuç olarak, herhangi bir havalimanında hata türü etkileri analizi hava limanı güvenliğini artırır, hizmet kalitesini iyileştirir ve hava trafiğinin daha güvenli ve verimli olmasını sağlar.

Havalimanları teknik ekiplerinden alınan görüşlere göre, havalimanı karbon salınımında görülen hata türleri, genellikle enerji kullanımı, uçuş operasyonları, araç kullanımı ve binaların enerji tüketimiyle ilgilidir. Bu hataların etkisi, karbon salınımının artması ve dolayısıyla çevreye zararlı etkilerin artmasıdır. Enerji kullanım hataları, havalimanındaki aydınlatma, ısıtma ve soğutma sistemlerinin yanlış kullanımı veya verimli olmayan ekipmanların kullanılması gibi nedenlerden kaynaklanabilir. Bu hatalar, enerji verimliliğini azaltır ve karbon salınımını artırır. Kuruluşlar, çevresel performansları sürekli olarak gözden geçirerek, karbon emisyonu süreçlerini daha iyi yönetmek için gerekli adımları atabilirler. Uçuş operasyon hataları, uçakların yakıt verimliliğinin düşük olması, uçakların fazla yakıt alması, uçuş rotalarının düşük verimlilikte olması ve uçakların motorlarının eski ve verimsiz olması gibi

nedenlerden kaynaklanabilir. Bu hatalar, uçuşların karbon salınımını artırmasıyla sonuçlanır.

Havalimanlarının karbon salınım hatalarının etkisi, çevreye zararlı etkilerin artması ve iklim değişikliğinin hızlanmasına yol açmaktadır. Bu nedenle, havalimanında karbon salınımını azaltmak için enerji verimliliğini artırmak, uçuş operasyonlarını optimize etmek, araç kullanımını azaltmak ve bina enerji tüketimini azaltmak gibi tedbirlerin alınması önemlidir. Ayrıca, yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırım yapmak karbon salınımını azaltır.

Klasik HTEA analizi ve Entropi yöntemine dayalı (entropi ağırlıklarıyla çarpılan) sıralamalar Tablo 12'de şu şekilde verilmiştir. Tablodan görüleceği gibi HT12, HT19, HT16, HT11 ve HT3 klasik HTEA yönteminde ilk beş önemli hata türü olarak ortaya çıkmaktadır. Diğer taraftan HT2, HT10, HT13 ve HT14 son sıralarda yer alan HTEA faktörleri olarak ortaya çıkmıştır. Entropi yöntemine dayanan ağırlıklandırmada ise HT16, HT12, HT13, HT18 ve HT8 ilk beş önemli hata türü olarak değerlendirilmiş diğer taraftan HT1, HT10, HT2, HT13 ve HT14 son sıralarda yer alan HTEA faktörleri olarak ortaya çıkmaktadır.

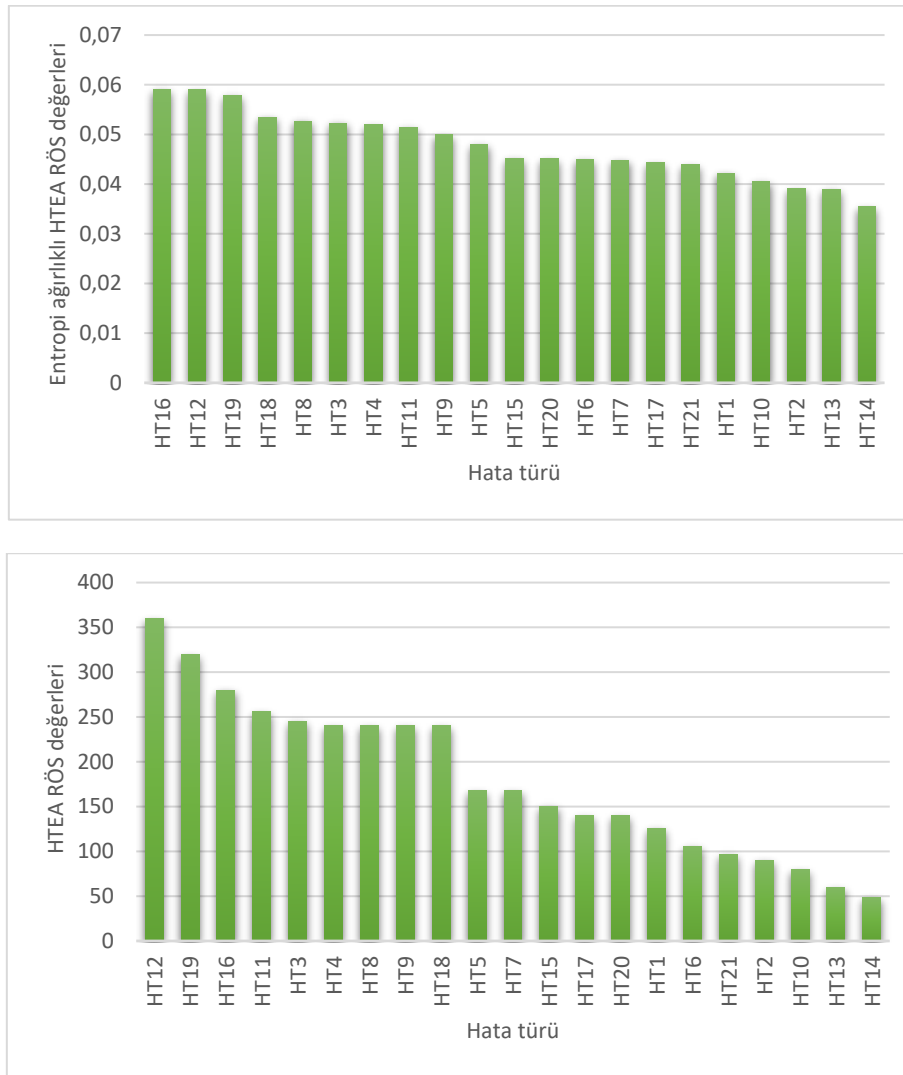
Yöntem sonuçları karşılaştırıldığında benzer sıralamalar elde edilmiştir. Her iki sonuçta da HT13 ve HT14 sonda yer alan en az önemli risk faktörleridir. HT12, HT19 ve HT16 her iki yöntemde de ilk üç sıralamada yer alan en önemli risk unsurudur.

Tablo 12. Klasik HTEA ve Entropi yöntemi

| Klasik HTEA | | Entropi metodu | |
|-------------|------|----------------|------|
| | Rank | | Rank |
| HT12 | 1 | HT 16 | 1 |
| HT19 | 2 | HT 12 | 2 |
| HT16 | 3 | HT 19 | 3 |
| HT11 | 4 | HT 18 | 4 |
| HT3 | 5 | HT 8 | 5 |
| HT4 | 6 | HT 3 | 6 |
| HT8 | 7 | HT 4 | 7 |
| HT9 | 8 | HT 11 | 8 |
| HT18 | 9 | HT 9 | 9 |
| HT5 | 10 | HT 5 | 10 |
| HT7 | 11 | HT 15 | 11 |

| | | | |
|------|----|-------|----|
| HT15 | 12 | HT 20 | 12 |
| HT17 | 13 | HT 6 | 13 |
| HT20 | 14 | HT 7 | 14 |
| HT1 | 15 | HT 17 | 15 |
| HT6 | 16 | HT 21 | 16 |
| HT21 | 17 | HT 1 | 17 |
| HT2 | 18 | HT 10 | 18 |
| HT10 | 19 | HT 2 | 19 |
| HT13 | 20 | HT 13 | 20 |
| HT14 | 21 | HT 14 | 21 |

Şekil 2’de HT’lerin önem sıralaması verilmiştir.



Şekil 2. Hata türlerinin önem sıralaması

Buna göre, özellikle hangi türde hatanın daha öncelikli olduğu ve o konuda yatırım ve iyileştirme çalışmalarına ağırlık verilmesi gerektiği sonucuna ulaşılabilir. Hata türü sıralamaları değerlendirildiğinde ilk üç önem sırasında yer alan HT16, HT19, HT 12’ nin personel ve

teknoloji kaynaklı hatalar olduğu değerlendirilebilir. Dolayısıyla havaalanı işletmelerinin ilgili bakım yönetim faaliyetlerinde öncelikle bu hususlara yatırım yapılacağı sonucu çıkmaktadır. Son sırada yer alan HT 13 ve HT 14’ün ise donanımsal kaynaklı hatalar olarak

kategorize edildiği bu konulara yönelik hataların nadiren ortaya çıktığı dolayısıyla donanımsal faktörlerin daha az önem derecesinde değerlendirilmesi gerekmektedir.

Elde edilen sonuçlara göre özellikle dikkate alınması gereken hata türlerinin HT12, HT19 ve HT16 olduğu görülmektedir. Bu hata türleri HT12: Uçak sistem kalibrasyonun yapılamaması, HT16: Aynı kompartımana yüklenmesi sakıncalı tehlikeli maddelerin aynı kompartımanda taşınması, HT19: Tehlike anında yanlış müdahale veya müdahalenin geç başlaması personel ve teknolojik hata kaynaklı faktörlerdir. Buna göre havalimanı yöneticilerinin özellikle personel kaynaklı hatalarını en aza indirmek için, olaylara müdahale konusunda yetersiz kalan mürettebatın artırılmış gerçeklik (AR) ve sanal gerçeklik (VR) simülasyon ortamlarında eğitimlerle desteklenmesi gerektiği sonucu çıkarılmıştır. Bu sayede olaya yaşanmadan daha önce farklı senaryolarla tecrübe kazanıldığı için anlık yaşanan durumlara daha rasyonel kriz yönetim stratejileri uygulanabilmektedir. Daha az önemli sayılabilecek hata türleri ise çevresel ve donanımsal faktörlerdir. HT10: Uçak yakıt kullanımının artırılması ve verimliliğinin azalması HT2: Fazla elektrik tüketen teknolojik aletlerin kullanılması. HT13: Endüstri 4.0 faaliyetleri ile entegrasyon çalışmasının sağlanamaması HT14: Arttırılmış gerçeklik (AR) uygulamalarının uçak sistemlerine katılamaması olarak ortaya çıkmıştır.

Uçak bakım ve kontrollerinin düzenli bir periyoda göre uzman teknik ekipçe değerlendirilmesinin olası kazaların önüne geçmek konusunda ciddi bir katkı sağlayacağı ön görülmüştür. Ayrıca tehlikeli madde taşımacılık talimatlarının uygulanması ve yeniden tazeleme eğitimleri ile personelin tepkimeye girebilecek, yangına veya patlamaya sebep olacak maddeleri bir arada aynı kompartımanda bulundurmaması bilgisine göre tehlikeli madde taşımacılık yönergelerine birebir uyulmasının risk yönetiminde önemli olduğu sonucu çıkarılmaktadır.

Uygulanan yöntem sonuçlarına göre süreç yönetiminde bütüncül bir yaklaşımla çözüm yaklaşımları sürdürülebilir çerçeveden sunulmaktadır. Çözümler anlık tek seferlik ortaya çıkan sorunları gidermeye yönelik değil, uzun vadeli durum analizleri ve kalıcı çözüm yaklaşımları içermesi bakımından kayıpların en aza indirgenmesi açısından düşük maliyetli ve sürdürülebilir bir karar mekanizması sunmaktadır. Literatür araştırmalarına göre ve bu çalışmanın uygulama kısmında elde edilen sonuçlara göre HTEA analizinin en büyük eksikliği subjektif bir yapı sergilemesi uzman görüşlerine bağlılığı ve atanan RÖS değerlerine olan hassasiyet seviyesidir. Örneğin olasılık değeri 5 sıklık 7 ve şiddet 9 olduğunda elde edilen RÖS değeri ile olasılık değeri 7 sıklık 9 ve şiddet

5 olduğunda da aynı sonuç sunulmaktadır. Ancak dikkat edilmesi gereken husus RÖS parametrelerinin ayrı ayrı değerlendirilerek hata türü risk analizini doğru ve sağlıklı biçimde yapılmasının gerekliliğidir.

HTEA yöntemi, kalitenin devam etmesi sorun ortaya çıkmadan önlenmesi ve sürecin iyileştirilmesi açısından büyük katkı sunmaktadır. Ancak literatürde yöntemin bazı eksiklikleri olduğundan bahsedilmektedir. Bunlar kısaca şu şekilde ifade edilebilir. RÖS değerinin hesabında uzman görüşlerine bağlı olunması nedeniyle tam bir standart yoktur. Uygulanan sektöre, uygulamayı yapan işletmeye göre şiddet, olasılık ve saptanabilirlik skorları değişiklik gösterebilir. Diğer bir eksiklik aynı RÖS değerini farklı risk faktörü ağırlıklarıyla elde edilebileceği dolayısıyla hangisinin daha önemli hata türü olarak ortaya çıktığı kısmındaki belirsizliktir. Diğer bir eksik nokta ise risk faktörlerinin numerik veriye dönüştürmede yaşanan yetersizliktir. Ayrıca RÖS'ü belirleyen faktörlerin eşit önem derecesine sahip olması da yöntemin dezavantajı olarak değerlendirilmektedir [62]. Zaten tüm eksikleri gidermek için yöntemte entegre başka yöntemler dahil edilmekte ya da bulanık yaklaşımlarla değerlendirilmekte veya faktörleri eşit önem derecesinde almak yerine farklı karar verme yöntemleriyle ağırlıkların belirlenip ardından HTEA çalışması uygulanmaktadır.

Bu çalışmada, Entropi yönteminin kullanılma nedeni, objektif bir karar verme modeli olmasıdır. Sayısal verilerle hesaplama imkânı sunmaktadır. AHP yaklaşımındaki gibi niteliksel faktörleri içermeyen ve karar vericinin subjektif yargısından uzak bir yaklaşım sunmaktadır. Bu çalışmada HTEA'nın bahsedilen eksiklikleri nedeniyle objektif biçimde ağırlık hesaplanmasına yardımcı olan daha nesnel değerlendirme imkânı sağlayan Entropi tabanlı bir yaklaşımla çalışma yürütülmüştür. Stratejik öneme sahip olan ve ufak bir arızanın veya kazanın milyonlarca dolara mal olacağı havacılık sektöründe daha düşük riskli değerlendirmelerin analitik ve sistematik çerçeveden yapılma imkânı sunulmuştur. Entropi yöntemi objektif ve niceliksel hesaplamaya dayanan bir teknik olması nedeniyle avantaj sağlamaktadır. Bu yaklaşımın da dahil edilmesi ile çalışma daha bütüncül ve tutarlı değerlendirme imkânı sunmakta ve sırf karar vericinin takdirinden ibaret olma kısmı elimine edilmektedir. Çalışmanın elde edilen hata türü karşılaştırmaları açısından değerlendirildiğinde ilk üç ve son dört sıralamanın aynı olduğu görülmektedir. Aradaki değişimler yöntemlerin çalışma mekanizmalarındaki farklılıktan kaynaklanmaktadır.

Çalışma sonuçlarına göre, özellikle hangi faktörlerin daha öncelikli olması ve işletme yöneticilerinin neye öncelikli yatırım yapması gerektiği bu şekilde bir çalışmayla havaalanı bakım yönetim faaliyetlerinin

daha geniş çerçeveden ve sürdürülebilir bir yaklaşımla ele almaları gerektiği vurgulanmıştır.

VI. SONUÇ VE ÖNERİLER

Havacılık sektörü en önemli ulaştırma alanlarından biridir. Havaalanlarının stratejik lokasyonlar olması nedeniyle ortaya çıkabilecek herhangi bir hatanın ciddi maliyetlere yol açacağı ortadadır. Hem can kayıpları hem yaşanacak bazı kazalar ve bunların sonuçları ciddi bedellere ve maliyete neden olacaktır. Bu durumda yolcu emniyet ve güvenliğinde tereddüt, zamanında ulaşım problemleri, uçak rötarları ve olası arıza ve kazalar kaçınılmaz olacaktır. Hata türü etkileri analizi sayesinde olası risk faktörleri tanımlanarak bu tarz tehlikelerin önüne geçilebilecektir. Literatürde HTEA uygulamalarının pek çok konuda yapıldığı görülmekle beraber havacılık sektöründe hala ihtiyaç olduğu ve bu konuda kısıtlı çalışmanın ele alındığı dikkat çekicidir.

Bu çalışmada havalimanlarında en kritik gözlenen arıza, bakım ve onarım durumları dikkate alınarak uzman görüşlerinden yararlanılarak detaylı bir risk analizi yapılmıştır. Buna göre en önemli risk faktörlerinin uçak bakım planlama kontrol sistemlerinin doğru biçimde ayarlanması ve uçak gövde, motor ve kanat parçalarında oluşabilecek kalibrasyon ve sistematik bakım sorunları olduğu görülmüştür. Ardından tehlikeli madde taşımacılığında kaynaklı hata türlerinin ortadan kaldırılması önemli görülmektedir. İletişim kaynaklı problemlerin ve alınacak ek destek kursları faktörlerinin en az riskli faktörler olduğu anlaşılmaktadır. Sürdürülebilirlik ve yeşil enerji konuları kapsamında yakıt tasarrufu ve çevre hassasiyeti konularında da karbon emisyonunun en az olduğu koşulların oluşturulması beklenmektedir Buna göre karbon salınımı düşük olan yakıt türü, havada boşa menzil yapılması, az yakıt tüketen uçak türlerinin karbon emisyonunu düşüreceği sonucu ortaya çıkmaktadır.

Bu çalışmada farklı uzman görüşleri dikkate alınarak önemli hata türleri tespit edilmiştir. Buna göre çevresel, teknolojik ve donanımsal faktörler altında hatalar gruplandırılabilir. HTEA yöntemini sübjektif yapısı risk derecelendirmedeki yorumu açık yapısı nedeniyle objektif bir yaklaşım olan Entropi yöntemine göre hata türleri değerlendirilmiştir. Bu çalışma sayesinde bütüncül bir yaklaşımla havaalanlarındaki risk faktörleri geniş bir çerçeveden ele alınmıştır. Hava alanı yöneticilerinin öncelikle dikkate alacağı risk unsurları bu çalışma aracılığıyla ortaya çıkartılmıştır. Çalışmanın önem derecelerine göre yapılacak iyileştirmeler veya yatırım kararları konusunda yol gösterici olması beklenmektedir.

Gelecek çalışmalar için yöntem biraz daha modifiye edilerek diğer karar verme yaklaşımlarıyla entegre çalıştırılabilir. Ya da bulanık yaklaşımlardan yararlanılarak belirsizlik faktörü altında

değerlendirilebilir. Yeni hata türleri de araştırılarak çalışmanın kapsamı genişletilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] A. A. Ekinci, “Ülke riski analizi: Türkiye ve BRIC ülkeleri üzerine ampirik bir uygulama,” *Yüksek Lisans Tezi*, 2018, Accessed: Aug. 14, 2023. [Online]. Available: <http://acikerisim.nevsehir.edu.tr/xmlui/handle/20.500.11787/802>
- [2] C. Aydın, “Sağlık kuruluşlarında risk değerlendirme ve bir üniversite hastanesinde risk azaltma çalışması,” 2010, Accessed: Aug. 14, 2023. [Online]. Available: <http://acikerisim.uludag.edu.tr/jspui/handle/11452/2098>
- [3] Claudia R. Carvalho, E. Oliveira, J. C. Pereira, and N. D. Pizzolato, “Combined application of condition-based maintenance and reliability centred maintenance using PFMEA and lean concepts - a case study,” *Int. J. Inf. Decis. Sci.*, vol. 15, no. 3, pp. 302–325, 2023, doi: 10.1504/IJIDS.2023.132825.
- [4] A. ve Toraman and B. Gökkaya, “Hata Türleri Ve Etkileri Analizi (Fmea) Ve Sağlık Alanında Uygulamaları,” *SDÜ Sağlık Yönetimi Derg.*, vol. 5, no. 1, pp. 26–39, Jul. 2023, Accessed: Aug. 14, 2023. [Online]. Available: <https://dergipark.org.tr/en/pub/sdusyd/issue/79238/1292149>
- [5] D. Demirkıran, “Yalın üretim teknikleri ve Porsche firmasında uygulanması.” İstanbul Kültür Üniversitesi / Lisansüstü Eğitim Enstitüsü / İşletme Ana Bilim Dalı, 2019. Accessed: Aug. 14, 2023. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/11413/6385>
- [6] C. Wan, X. Yan, D. Zhang, Z. Qu, and Z. Yang, “An advanced fuzzy Bayesian-based FMEA approach for assessing maritime supply chain risks,” *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 125, pp. 222–240, May 2019, doi: 10.1016/J.TRE.2019.03.011.
- [7] S. Fan, E. Blanco-Davis, Z. Yang, J. Zhang, and X. Yan, “Incorporation of human factors into maritime accident analysis using a data-driven Bayesian network,” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 203, p. 107070, Nov. 2020, doi: 10.1016/J.RESS.2020.107070.
- [8] B. Salah, M. Alnahhal, and M. Ali, “Risk prioritization using a modified FMEA analysis in industry 4.0,” *J. Eng. Res.*, Jul. 2023, doi: 10.1016/J.JER.2023.07.001.
- [9] Soltanali, H., & Ramezani, S. (2023). Smart Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) for Safety-Critical Systems in the Context of Industry 4.0. In *Advances in Reliability, Failure and Risk Analysis* (pp. 151-176). Singapore: Springer Nature Singapore.
- [10] S. Shi, H. Fei, and X. Xu, “Application of a FMEA method combining interval 2-tuple linguistic

- variables and grey relational analysis in preoperative medical service process,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 13, pp. 1242–1247, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.IFACOL.2019.11.368.
- [11] C. L. Chang, C. C. Wei, and Y. H. Lee, “Failure mode and effects analysis using fuzzy method and grey theory,” *Kybernetes*, vol. 28, no. 8–9, pp. 1072–1080, 1999, doi: 10.1108/03684929910300295/FULL/PDF.
- [12] Putcha, C. S., Kalia, P., Pizzano, F., Hoskins, G., Newton, C., & Kamdar, K. J. (2008). A case study on FMEA applications to system reliability studies. *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, 15(02), 159–166.
- [13] Filz, M. A., Langner, J. E. B., Herrmann, C., & Thiede, S. (2021). Data-driven failure mode and effect analysis (FMEA) to enhance maintenance planning. *Computers in Industry*, 129, 103451. <https://doi.org/10.1016/J.COMPIND.2021.103451>
- [14] Salah, B., Janeh, O., Bruckmann, T., & Noche, B. (2015). Improving the Performance of a New Storage and Retrieval Machine Based on a Parallel Manipulator Using FMEA Analysis. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 1658–1663. <https://doi.org/10.1016/J.IFACOL.2015.06.324>
- [15] Ahn, J., Noh, Y., Park, S. H., Choi, B. I., & Chang, D. (2017). Fuzzy-based failure mode and effect analysis (FMEA) of a hybrid molten carbonate fuel cell (MCFC) and gas turbine system for marine propulsion. *Journal of Power Sources*, 364, 226–233.
- [16] Liu, H. C. (2019). *Improved FMEA methods for proactive healthcare risk analysis* (pp. 73-96). Singapore: Springer.
- [17] Mou, A. T., Uddin, M. T., & Rahman, M. H. (2023). Empirical assessment of species vulnerability for biodiversity conservation: A case study on Chalan beel of Bangladesh. *Heliyon*, 9(4).
- [18] Park, C., Kontovas, C., Yang, Z., & Chang, C. H. (2023). A BN driven FMEA approach to assess maritime cybersecurity risks. *Ocean & Coastal Management*, 235, 106480.
- [19] Price, C., & Taylor, N. (1997, July). Multiple fault diagnosis from FMEA. In *Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence* (pp. 1052-1057). John Wiley & Sons Ltd.
- [20] Vinodh, S., & Santhosh, D. (2012). Application of FMEA to an automotive leaf spring manufacturing organization. *The TQM Journal*, 24(3), 260-274.
- [21] Salah, B., Alkahtani, M., & Ziout, A. (2017). Using FMEA analysis for assessing air conditioners remanufacturing processes (pp. 2431–2437). IEOM Society. <https://research.uaeu.ac.ae/en/publications/using-fmea-analysis-for-assessing-air-conditioners-remanufacturing>
- [22] Fabis-Domagala, J., Domagala, M., & Momeni, H. (2021). A Concept of Risk Prioritization in FMEA Analysis for Fluid Power Systems. *Energies* 2021, Vol. 14, Page 6482, 14(20), 6482. <https://doi.org/10.3390/EN14206482>
- [23] Shafiee, M., & Dinmohammadi, F. (2014). An FMEA-Based Risk Assessment Approach for Wind Turbine Systems: A Comparative Study of Onshore and Offshore. *Energies* 2014, Vol. 7, Pages 619–642, 7(2), 619–642. <https://doi.org/10.3390/EN7020619>
- [24] Nguyen, T. L., Shu, M. H., & Hsu, B. M. (2016). Extended FMEA for Sustainable Manufacturing: An Empirical Study in the Non-Woven Fabrics Industry. *Sustainability* 2016, Vol. 8, Page 939, 8(9), 939. <https://doi.org/10.3390/SU8090939>
- [25] Gökteş, P. & Özler, C. ,”Havalimanı Karbon Akreditasyonu Süreci Uygulamalarının İyileştirilmesinde Hata Türü ve Etkileri Analizinin Kullanılması “, Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi ,2017.
- [26] S.L. Omairey S. Sampethai ,L. Hans ,C. Worall ,S. Lewis, D.Negro ,T. Settar ,E. Ferrera ,E. Blanco, J.Wighton ,L. Muijs ,S. L. Veldman ,M. Doldersum ,R. Tonnaer ,N. Jayasree, M. Kazılas, Development Of İnnovative Automated Solutions For The Assembly Of Multifunctional Thermoplastic Composite Fuselage, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021.
- [27] Elahi, B. (2022). Risk Analysis Techniques. *Safety Risk Management for Medical Devices*, 89–153. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85755-0.00014-X>
- [28] Ceylan, B. O., Karatug, Ç., Akyuz, E., Arslanoğlu, Y., & Boustras, G. (2023). A system theory (STAMP) based quantitative accident analysis model for complex engineering systems. *Safety Science*, 166, 106232. <https://doi.org/10.1016/J.SSCI.2023.106232>
- [29] Salah, B., Alnahhal, M., & Ali, M. (2023). Risk prioritization using a modified FMEA analysis in industry 4.0. *Journal of Engineering Research*. <https://doi.org/10.1016/J.JER.2023.07.001>
- [30] Kusumasari, W., Rabung, Y. Y., Ilmi, F. M., & Ellizar, E. (2022). Assessing the safety effect through Google Maps usage: FMEA approach (Case study: Indonesia). *Case Studies on Transport Policy*, 10(3), 1917–1929. <https://doi.org/10.1016/J.CSTP.2022.08.006>
- [31] Mendes, N., Geraldo Vidal Vieira, J., & Patricia Mano, A. (2022). Risk management in aviation maintenance: A systematic literature review. *Safety Science*, 153, 105810. <https://doi.org/10.1016/J.SSCI.2022.105810>
- [32] Chang, K. H. (2015). A novel general risk assessment method using the soft TOPSIS approach. <http://dx.doi.org/10.1080/21681015.2015.1070375>, 32(6), 408–421. <https://doi.org/10.1080/21681015.2015.1070375>

- [33] Liu, S. F., Cheng, J. H., Lee, Y. L., & Gau, F. R. (2015). A case study on FMEA-based quality improvement of packaging designs in the TFT-LCD industry. *Http://Dx.Doi.Org/10.1080/14783363.2015.1004308*, 27(3–4), 413–431.
- [34] Hajiagha, S. H. R., Hashemi, S. S., Mohammadi, Y., & Zavadskas, E. K. (2016). Fuzzy belief structure based VIKOR method: an application for ranking delay causes of Tehran metro system by FMEA criteria. *Vilnius Gediminas Technical University*, 31(1), 108–118. <https://doi.org/10.3846/13923730.2015.1068847>
- [35] Ahmadi, M., Behzadian, K., Ardeshir, A., & Kapelan, Z. (2017). Comprehensive risk management using fuzzy FMEA and MCDA techniques in highway construction projects. *Vilnius Gediminas Technical University*, 23(2), 300–310. <https://doi.org/10.3846/13923730.2015.1068847>
- [36] Ben Romdhane, T., Badreddine, A., & Sansa, M. (2016). A new model to implement Six Sigma in small- and medium-sized enterprises. *Http://Dx.Doi.Org/10.1080/00207543.2016.1249430*, 55(15), 4319–4340.
- [37] Fattahi, R., & Khalilzadeh, M. (2018). Risk evaluation using a novel hybrid method based on FMEA, extended MULTIMOORA, and AHP methods under fuzzy environment. *Safety Science*, 102, 290–300. <https://doi.org/10.1016/J.SSCI.2017.10.018>
- [38] Nie, R. xin, Tian, Z. peng, Wang, X. kang, Wang, J. qiang, & Wang, T. li. (2018). Risk evaluation by FMEA of supercritical water gasification system using multi-granular linguistic distribution assessment. *Knowledge-Based Systems*, 162, 185–201. <https://doi.org/10.1016/J.KNOSYS.2018.05.030>
- [39] Cano-Olivos, P., Hernández-Zitlalpopoca, R., Sánchez-Partida, D., Caballero-Morales, S. O., & Martínez-Flores, J. L. (2019). Risk analysis of the supply chain of a tools manufacturer in Puebla, Mexico. *Journal of Contingencies and Crisis Management*, 27(4), 406–413. <https://doi.org/10.1111/1468-5973.12258>
- [40] T. Uslu, “Savunma ve Havacılık Sanayisi İçin Çok Kriterli Karar verme Temeli Yeni Bir Proses Hata Tipi Hata Türü ve Etkileri Analizi Yaklaşımının Geliştirilmesi ” Yüksek Lisans Tezi, Ankara Başkent Üniversitesi /Fen Bilimleri Enstitüsü/Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı 2020.
- [41] Liu, Y., Kong, Z., & Zhang, Q. (2018). Failure modes and effects analysis (FMEA) for the security of the supply chain system of the gas station in China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 164, 325–330. <https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2018.08.028>
- [42] Chiu, M. C., Chu, C. Y., & Chen, C. C. (2017). An integrated product service system modelling methodology with a case study of clothing industry. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1374570>, 56(6), 2388–2409.
- [43] Maniram Kumar, A., Rajakarunakaran, S., Pitchipoo, P., & Vimalasan, R. (2018). Fuzzy based risk prioritisation in an auto LPG dispensing station. *Safety Science*, 101, 231–247. <https://doi.org/10.1016/J.SSCI.2017.09.011>
- [44] Arabsheybani, A., Paydar, M. M., & Safaei, A. S. (2018). An integrated fuzzy MOORA method and FMEA technique for sustainable supplier selection considering quantity discounts and supplier’s risk. *Journal of Cleaner Production*, 190, 577–591. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.04.167>
- [45] Chen, Y., Ran, Y., Wang, Z., Li, X., Yang, X., & Zhang, G. (2020). An extended MULTIMOORA method based on OWGA operator and Choquet integral for risk prioritization identification of failure modes. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 91, 103605. <https://doi.org/10.1016/J.ENGAPPAI.2020.103605>
- [46] Liu, H. C., Wang, L. E., You, X. Y., & Wu, S. M. (2017). Failure mode and effect analysis with extended grey relational analysis method in cloud setting. <https://doi.org/10.1080/14783363.2017.1337506>, 30(7–8), 745–767.
- [47] Mentés, A. (2023). Risk analysis of on-field and on-board activities and resilience investigation of Izmir Aliaga Ship Recycling Facilities. *Ocean Engineering*, 287, 115891. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2023.115891>
- [48] Goksu, S., & Arslan, O. (2023). A quantitative dynamic risk assessment for ship operation using the fuzzy FMEA: The case of ship berthing/unberthing operation. *Ocean Engineering*, 287, 115548. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2023.115548>
- [49] Park, C., Kontovas, C., Yang, Z., & Chang, C. H. (2023). A BN driven FMEA approach to assess maritime cybersecurity risks. *Ocean & Coastal Management*, 235, 106480. <https://doi.org/10.1016/J.OCECOAMAN.2023.106480>
- [50] Liu, Z., Zhao, Y., & Liu, P. (2023). An integrated FMEA framework considering expert reliability for classification and its application in aircraft power supply system. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 123, 106319. <https://doi.org/10.1016/J.ENGAPPAI.2023.106319>
- [51] You, J., Lou, S., Mao, R., & Xu, T. (2022). An improved FMEA quality risk assessment framework for enterprise data assets. *Journal of Digital Economy*, 1(3), 141–152. <https://doi.org/10.1016/J.JDEC.2022.12.001>

-
- [52] Üçkardeş, İ., & Ünal, D. (2012). Risk analizi ve havacılık sektöründe kaza risklerinin incelenmesi. *Ç.Ü Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(2), 174–181.
- [53] Ravi Sankar, N. and Prabhu, B.S. (2001), "Modified approach for prioritization of failures in a system failure mode and effects analysis", *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 18 No. 3, pp. 324-336. <https://doi.org/10.1108/02656710110383737>
- [54] Yılmaz, A., Hata Türü ve Etki Analizi, İstanbul Teknik Üniversitesi F.B.E. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 1997.
- [55] Düzgüner, E. (2002). *Ürün geliştirme sürecinde önleyici kalite güvence: FMAE Metodu ve bu metodun bir sanayi işletmesindeki uygulaması* (Master's thesis, Sosyal Bilimler Enstitüsü).
- [56] Durhan, D. (2006). Hata türü ve etkileri analizi (FMEA) ve bir uygulama. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Ankara*.
- [57] Mirghafouri, S. H., Asadian Ardakani, F., & Azizi, F. (2014). Developing a method for risk analysis in tile and ceramic industry using failure mode and effects analysis by data envelopment analysis. *Iranian Journal of Management Studies*, 7(2), 343-363.
- [58] Ford Motor Company Limited, (1995), *Quality Criteria Process Guide*, Ford Motor Company Limited, Quality Office, Vehicle Centre 1, Dunton Research & Engineering Centre, Laindon, Revision 1.00, (Restricted) 31st July
- [59] Stamatis, D. H. (2003). *Failure mode and effect analysis*. Quality Press.
- [60] C. E. Shannon, A mathematical theory of communication, *Bell system technical journal*, vol. 27, pp. 379-423, 1948
- [61] Karami, A. ve Johansson, R. (2014). Utilization of multi attribute decision making techniques to integrate automatic and manual ranking of options. *Journal of Information Science and Engineering*, 30, 519-534
- [62] Dale, B. G., & Shaw, P. (1990). Failure mode and effects analysis in the UK motor industry: A state-of-the-art study. *Quality and Reliability Engineering International*, 6(3), 179-188.