



BİR VANA ÜRETİM SÜRECİNDEKİ İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ RİSKLERİNİN BULANIK HATA TÜRÜ VE ETKİLERİ ANALİZİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

EVALUATION OF OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY RISKS IN A VALVE PRODUCTION PROCESS WITH FUZZY FAILURE MODE AND EFFECTS ANALYSIS

Gökmen TAK¹

Fatih ÖZTÜRK²

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbid.1624713>

*Sorumlu Yazar
(Corresponding Author)*
fatih.ozturk@medeniyet.edu.tr

*Geliş Tarihi
(Received)*
21.01.2025

*Revizyon Tarihi
(Revised)*
25.03.2025

*Kabul Tarihi
(Accepted)*
07.04.2025

Öz

Ülkemizde yerleşik kurum ve kuruluşlarının faaliyetleri iş sağlığı ve güvenliği kapsamlı çıkartılan Kanun ve Yönetmelikler ile yeniden düzenlenmesiyle yeni bir yön bulmuştur. İş sağlığı ve güvenliği kapsamında temel amaç proaktif yaklaşımı benimseyerek meydana gelebilecek iş kazası ve meslek hastalıklarını ortaya çıkmadan önce kaynağında bertaraf etmektir. Bunu sağlamak üzere yapılacak ilk iş risk değerlendirme çalışmasıdır. Hata türü ve etkileri analizi, incelenen sistemdeki hatalı durumların meydana gelmeden önce tespit edilerek önceliklendirilmesini böylece iyileşme hareketinin nereden başlanacağı konusunda yön gösteren bir metottür. Ancak her metod gibi dezavantajları sonuçlar üzerine etki etmektedir. Bunun ortadan kaldırılabilmesi için bulanık mantık ilkeleri uygulanabilir. Bu çalışmada hata türü ve etkileri analizi yöntemi kullanılarak vana üretimi yapan bir işletmedeki üretim süreci değerlendirilmiş, ayrıca bulanık mantık ile çözümlenerek sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Bulanık mantık, FMEA, vana üretimi, risk değerlendirme.

Abstract

The activities of institutions and organizations established in our country have found a new direction with the reorganization of occupational health and safety by comprehensive Laws and Regulations. The main aim within the scope of occupational health and safety is to eliminate work accidents and occupational diseases that may occur at the source before they occur, by adopting a proactive approach. The first thing to do to achieve this is a risk assessment study. Failure modes and effects analysis is a method that identifies and prioritizes faulty situations in the system under review before they occur, thus guiding where the improvement action should begin. However, like every method, its disadvantages affect the results. To eliminate this, fuzzy logic principles can be applied. In this study, the production process in a company that produces valves was evaluated using the failure modes and effects analysis method, and the results were compared by analyzing it with fuzzy logic.

Keywords: Fuzzy logic, FMEA, valve production, risk assessment.

¹ İstanbul Medeniyet Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalı, Türkiye. gokmentak@gmail.com.

² İstanbul Medeniyet Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Türkiye. fatih.ozturk@medeniyet.edu.tr

1. GİRİŞ

Son 10 yılda ülkemizde işletmelerin iş sağlığı ve güvenliği ile ilgili faaliyetleri yeni çıkarılan kanun ve yönetmeliklerle yön değiştirmiştir (Çelik & Öztürk, 2017). Yakın tarihimize bakıldığında 1973 yılında işçi sağlığı ve iş güvenliği tüzüğü Bakanlar Kurulu tarafından 1475 sayılı iş kanunu yayımlanmış ardından 2003 yılında 4857 sayılı iş kanununun Beşinci bölümünde iş sağlığı ve güvenliği kapsamındaki yükümlülükler ilk defa bir kanun içerisinde yer almıştır. 20 Haziran 2012 yılında yayımlanan 6331 sayılı Kanun ile iş sağlığı ve güvenliği konusunda müstakil bir kanun yayımlanarak daha etkin ve detaylı şekilde ele alınmıştır. Kanun ile birlikte gelen yükümlülükler doğrultusunda yeni yönetmelik ve tebliğler yayımlanarak daha uygulanabilir hale gelmiştir.

Farklı iş kollarında farklı üretim yöntem ve teknikleri uygulanarak İmalat sanayinde fiziksel, kimyasal, biyolojik vb. pek çok faaliyeti kapsayan işlemler gerçekleştirilir (Tak & Öztürk, 2024). İş sağlığı ve güvenliği kapsamında temel amaç proaktif yaklaşımı benimseyerek meydana gelecek iş kazası ve meslek hastalıklarını ortaya çıkmadan önce kaynağında bertaraf etmektir. Bunu sağlamak üzere yapılacak ilk iş risk değerlendirme çalışmasıdır (Ayvaz ve ark., 2018). Bu çalışmadaki temel amaç risklerin değerlendirilerek belli ölçütlere göre skorlanması ve risk düzeyi yüksekten düşüğe doğru sıralanarak önceliklendirilmesidir. Risk değerlendirme çalışması için çeşitli yöntemler kullanılabilmekte ve bazı sektörlere özel olabilmektedir (Çelik & Öztürk, 2017). Öztürk ve ark. (2022) Tenerife uçak kazasını analiz ettikleri çalışmada hata türleri ve etkileri analizi, sistem teorisine dayalı nedensel analiz (CAST) ve hata ağacı analizi metodlarını karşılaştırmıştır. Çalışmanın sonucunda büyük kazaların analizinde CAST'ın daha kullanışlı olduğu sonucuna varmışlardır.

Nitekim iş sağlığı ve güvenliğinde birbirine göre avantaj ve dezavantajlara sahip çeşitli risk analiz yöntemleri bulunmaktadır (Öztürk, 2014). İş sağlığı ve güvenliği alanında en sık kullanılan yöntemlerin başında matris yöntemi gelmektedir. L tipi matris yöntemindeki risk seviyesi riskin meydana gelme olasılığı ile gerçekleştiği andaki şiddetinin çarpımına eşit olarak ele alınmaktadır. Olasılık ve şiddet düzeylerinin belirlemek için 1 ile 5 puan arasında değer verilir. Belirlenen Olasılık ve Şiddet değerlerinin birbiriyle çarpımı risk puanını belirler. Risk puanları yüksekten düşüğe doğru sıralanır. Risk seviyesi kabul edilemez seviye olan 25 değerinden 8 olan kabul edilebilir risk seviyesine düşürülmesi hedeflenir. Ancak risk seviyesi olasılık ve şiddet değerlerinin çarpımına eşitlenerek analiz yapılmaktadır. Belirlenen Olasılık seviyesi 5 ile şiddet seviyesi 4 olarak belirlenmesiyle tam tersi puanlama yapıldığında risk seviyesi 20 puana eşit olmakta ve aynı şekilde yorumlanmaktadır. Bu durumda puanlar aynı iken risk etkiler oldukça farklıdır. Bu yöntemin kullanım sıklığının fazla olmasının nedenleri olarak basit olması, kolay anlaşılması ve hızlı değerlendirmeye imkan vermesi olduğu söylenebilir. Ancak bu yöntemin fazlaca yüzeysel kalması ve detaylı analize imkan vermemesi nedeniyle daha kapsamlı risk değerlendirme yöntemlerine doğru ilgi artmaktadır. Yıllar içindeki gelişim ile birlikte sektörel risk değerlendirme yöntem ve metodları da gelişmektedir.

Hata ağacı analizi metodu, 1962'de ABD Hava Kuvvetlerine ait füze fırlatma kontrol sisteminin güvenlik analizi için Bell Laboratuvarları tarafından geliştirilmiştir. Yöntem, 1966 yılından itibaren ticari bir şirket olan Boeing tarafından ticari uçakların

geliştirilmesi için kullanılmaya başlanmıştır. İlerleyen yıllarda nükleer enerji sanayisinde, kimya, otomotiv, demiryolu taşımacılığı, robotik gibi alanlarda kullanımı yaygınlaşmıştır. Hemen hemen her sektörde kaza araştırmalarında kullanılmakta olan hata ağacı analizi, her tehlike durumunun varlığında uygulanmamaktadır, sadece kritik olan güvenlik tehlikeleri için uygulanmaktadır (Ak & Zorluer, 2022).

Ön tehlike ağacı analizi yöntemi, sistemin veya prosesin potansiyel tehlikeli parçalarını tespit ederek değer biçmek ve tespit edilen her bir potansiyel tehlike için az ya da çok kaza ihtimallerini belirlemektir. Bu metodolojiden çıkan sonuç, hangi tür tehlikelerin sıklıkla ortaya çıktığını ve hangi analiz metotlarının uygulanmasının gerektiğini belirler. Tanımlanan tehlikeler, sıklık/sonuç diyagramının yardımı ile sıraya konur ve önlemler öncelik sırasına göre alınır. Ön tehlike analizi analistler tarafından erken tasarım aşamasında uygulanır, ancak tek başına yeterli bir analiz metodu değildir, diğer metodolojilere başlangıç verisi olması aşamasında yararlıdır. Başka yöntemlerle desteklenmesi yöntemi daha faydalı hale getirebilir (Akpınar & Çakmakaya, 2014).

İş Güvenlik Analizi, yapılacak işe dair görevler üzerine yoğunlaşan, kişi veya gruplar ile gerçekleştirilen bir yöntemdir. Bu yöntem işletmede yada bir tesisteki iş ve görev tanımları iyi bir şekilde tanımlanması halinde uygulanmaya uygundur. Bu analiz yönteminde incelenen işe dair görevden kaynaklanan tehlikeleri doğrudan irdeler. Bu yöntemde tehlikelerin teker teker tanımlanmasına müteakip belirlenen şiddetin değerine, meydana gelme olasılığına ve etkilenebilecek kişi sayısına göre değerlendirilir. Risk sınıflandırılması olasılık ve risk durumuna göre belirlenir ve en büyük değerden başlanmak suretiyle alınması gereken eylemler ve tedbirler tanımlanarak önleyici faaliyetler gerçekleştirilir (Akpınar & Çakmakaya, 2014). Ancak görevler ve yapılacak işlerin iyi tanımlanmadığı işyerlerinde uygulanması mümkün değildir. Etkin uygulanmasını sağlanması amacıyla gerçekleştirilen her bir işe ait görev adımları belirlenmeli ve bu adımlara göre değerlendirme yapılmalıdır.

HAZOP ilk olarak kimyasal proses tesislerinin güvenliğini değerlendirmek için 1970'li yılların başında İngiltere'de Kimyasal Endüstri Enstitüsü (Institute of Chemical Industry, ICI) tarafından geliştirilerek bir risk analizi tekniği haline gelmiştir. İngiltere'de ise 1977 yılında Kimyasal Endüstrileri Birliği (Chemical Industries Association, CIA) tarafından HAZOP rehberi yayımlanarak HAZOP analizi yıllar içerisinde geliştirilmiş ve iyileştirilmiştir. Daha sonraları bu metot teknolojik kazalar ile karşılaşan veya acil durum planı geliştirmek iste- yen firmalar tarafından kullanılır hale gelmiştir. HAZOP çevresel risk değerlendirmelerinde ve basit teknolojilerin yer aldığı şirketlerde de kullanılabilir. HAZOP analizi farklı tecrübeleri olan uzmanların bir araya gelip beyin fırtınası yapıp sistematik olarak dizayndan sapmaları, bu sapmaların sonuçlarını ve alınması gereken önlemleri belirlemeleri ilkesine dayanmaktadır (Kabakulak, 2019). Ancak bu analizi yapacak kişilerin tecrübeli olmaları gerekmekte olup analizin başarısı için oldukça önemlidir.

Diğer yöntemlerden biri olan hata türü ve etkileri analizi incelenen sistemin hatalı durumlarının meydana gelmeden önce tespit edilmesi ve Risk Öncelik Sayısının (RÖS) belirlenerek iyileşme hareketinin nereden başlanacağını konusunda yön gösteren bir metottur. Bu metot kullanılarak sistemin güvenilirlik boyutunun artırılması sağlanır. Risk öncelik sayısının belirlenmesinde ilgili alanda uzmanlığa sahip kişilerin değerlendirmeleri ele alınmakta olduğundan dolayı belirlenen sonuçlar uzmanın

seviyesine göre değişebilmektedir. Bundan dolayı FMEA ekip üyelerinin farklı tecrübe ve bilgi düzeyindeki değişkenli de FMEA'nın sonuçlarının etkileyen faktörlerdendir. Geleneksel FMEA yönteminde uzmanların ortak risk değerlendirmeleri ele alınmakta ancak her bir risk etkeni için ayrı ayrı değerlendirme yapılmamaktadır. RÖS Olasılık (O), Şiddet (Ş) ve Denetlenebilirlik (D) değerlerinin çarpılmasıyla oluşturulur. Ancak RÖS değerlerinin aynı değeri farklı risk temsilleri anlamına gelebilir. Örneğin (O), (Ş), (D) derecelendirmeleri için 6, 2, 1 ve 2, 3, 2 değerlerine sahip iki farklı arıza modunu düşünün. Her ikisi de aynı RÖS değeri olan 12'ye ve dolayısıyla eylemler için aynı önceliğe sahip olacaktır. Aslında risk temsilleri pratikte farklı olabilir (Yeh & Hsieh, 2007).

Diğer risk analiz yöntemleri ile geleneksel FMEA yöntemindeki bahsedilen dezavantajlar değerlendiricilerin risk faktörlerini kesin olarak belirleyemeyeceği, uzmanlık derecelerinin farklı olması ve yaptıkları değerlendirmelere dair skorlamanın değişiklik göstermesidir. İşte bu farklılığın giderilmesi için bulanık hata türü ve etkileri analizi bu çalışmada benimsenmiştir.

Örneğin, (Özfirat, 2014) yaptığı çalışmada bulanık önceliklendirme yöntemi ile hata türü ve etkileri analizi harmanlayan yeni bir risk analiz yöntemi önermiştir. Turan ve Gönen (2019) transformatör imalatı yapan bir işletmenin transformatör tasarım ve süreçlerinde Bulanık FMEA çalışması gerçekleştirerek bir uygulama yazılımı geliştirmiş ve firma üretim süreçlerine bir prosedür ile kalite standardı olarak entegre edilmesini sağlamıştır. (Halfarová, ve ark., 2013) bulanık FMEA sürecini boru ve membran üretimi yapan bir işletmede uygulamış ve sonuçlarını karşılaştırmıştır. Yeh & Hsieh (2007) geleneksel metottan ziyade bulanık hata türü ve etkileri analizi uygulamasını önermiş ve uygulamanın etkinliğini göstermek için bir atıksu arıtma tesisinde uygulamışlardır. (Ivanova, ve ark., 2021) yaptıkları çalışmada elektronik cihazların üretim sürecinde bir robotun risk operasyonlarının analizi için FMEA ve bulanık mantık uygulaması yapmışlar ve iş sürecinde başarısızlıklara veya hatalara neden olabilecek parametrelerin herhangi bir zamanda optimize edilmesine ve iyileştirilmesine olanak sağlayacağını vurgulamışlardır. Mohammed ve ark. (2023) yaptıkları çalışmada petrol ve gaz endüstrisindeki farklı hata türü risklerini bulmak için bulanık mantık ve hata türleri ve etkileri analizine dayanan hibrit bir risk değerlendirme yaklaşımı önermiştir. Bulgular, önerilen risk değerlendirme yaklaşımının belirlenen bozulmuş beton temellerin risk faktörlerini önceliklendirmede etkili olduğunu göstermiştir. Testik ve Ünlü (2023) yaptıkları çalışmada test ve kalibrasyon laboratuvarlarında risk oluşturabilecek ve iyileştirmeye ihtiyaç duyabilecek alanların belirlenmesinde geleneksel FMEA ve bulanık FMEA'nın karşılaştırmıştır. Çalışmaları sonucunda bu iki analiz arasında 0,97'lik yüksek bir korelasyon olduğunu ve Bulanık Risk Öncelik Numarası hesaplamasına dayalı öncelik sırasının, Risk Öncelik Numarası dizisi ile örtüşüğünü göstermiştir.

Ayrıca modern yöntemlerden Makine Öğrenimi (ML) ve Çok Kriterli Karar Verme (MCDM) tabanlı risk değerlendirme çalışmaları da yapılmaktadır. Makine öğrenimi tabanlı risk değerlendirme büyük veri setlerinden örüntüler çıkarmak suretiyle risk tahminleri yapabilmekte, karmaşık sistemlerdeki riskleri daha doğru bir şekilde tahmin edebilmektedir. FMEA ve bulanık FMEA gibi geleneksel yöntemler daha çok insan uzmanlığına dayalı öznel değerlendirmeler içerebilmektedir. Makine öğrenimi ise veriye dayalı objektif sonuçlar sunabilmektedir. Makine öğreniminin dezavantajı ise

büyük miktarda veriye ve uzmanlığa ihtiyaç duyması ve sonuçların yorumlanmasını zorlaştırabilmektedir. Çok kriterli karar verme yöntemleri (örneğin, AHP, TOPSIS, VIKOR vb.) birden fazla kriteri dikkate alarak karmaşık problemleri çözmekte kullanılmaktadır. FMEA yöntemine karşın çok kriterli karar verme yöntemleri risk faktörlerini ağırlıklandırma ve sıralama konusunda daha esnektir. Ancak bu yöntemler öznel ağırlıklandırmaya dayanabilir ve bulanık mantık entegre edilmediği durumlarda belirsizlik yönetmekte zorlanabilmektedir.

Güncel çalışmalarda FMEA, bulanık mantık, Makine Öğrenimi (ML) ve Çok Kriterli Karar Verme (MCDM) yöntemleri, farklı endüstrilerde risk değerlendirmesi ve karar verme süreçlerini iyileştirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin, otomotiv endüstrisinde üretim süreçlerindeki riskleri önceliklendirmek için bulanık FMEA yaklaşımı kullanılmış (Gul et al., 2021), sağlık sistemlerinde ise bulanık FMEA ve bulanık AHP entegre edilerek daha kapsamlı bir risk değerlendirmesi yapılmıştır (Liu et al., 2020). Makine öğrenimi, tedarik zinciri yönetiminde (Zhang et al., 2022) ve üretim ekipmanlarında arıza tahmini (Wang et al., 2021) gibi alanlarda büyük veri analizi ve yüksek doğrulukta tahminler sunmuştur. MCDM yöntemleri, rüzgar çiftliklerindeki riskleri değerlendirmek için AHP ve TOPSIS ile (Kahraman et al., 2020), inşaat projelerinde ise bulanık AHP ve bulanık TOPSIS ile (Karsak et al., 2019) kullanılmıştır. Ayrıca, hibrit yaklaşımlar (FMEA + ML + MCDM) akıllı üretim (Li et al., 2022) ve sağlık hizmetleri (Smith et al., 2021) gibi alanlarda hem önelliği azaltmış hem de veriye dayalı tahminler sunmuştur. Bu çalışmalar, geleneksel ve modern yöntemlerin avantajlarını birleştirerek risk değerlendirme süreçlerini daha etkili hale getirmektedir.

FMEA (Hata Türleri ve Etkileri Analizi) ve bulanık mantık gibi geleneksel risk değerlendirme yöntemleri ile Makine Öğrenimi (ML) ve Çok Kriterli Karar Verme (MCDM) gibi modern yöntemler arasında karşılaştırmalı analiz Tablo 1’de verilmiştir.

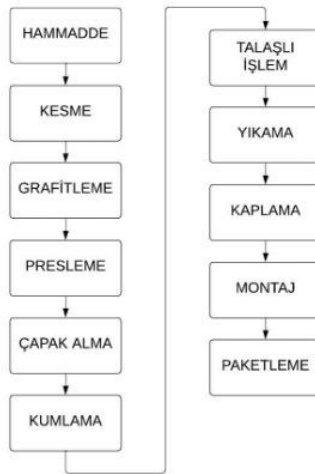
Tablo 1. FMEA, Bulanık Mantık ve Modern Risk Değerlendirme Yaklaşımlarının Karşılaştırması

Özellik	FMEA	Bulanık Mantık	Makine Öğrenimi (ML)	MCDM Yöntemleri
Belirsizlik Yönetimi	Zayıf	Güçlü	Orta	Orta (Bulanık MCDM ile güçlü)
Büyük Veri Uyumu	Zayıf	Orta	Güçlü	Orta
Özellik	Yüksek	Orta	Düşük	Orta
Dinamik Sistemler	Zayıf	Orta	Güçlü	Orta
Uygulama Kolaylığı	Kolay	Orta	Zor	Orta
Maliyet	Düşük	Orta	Yüksek	Orta
Yorumlanabilirlik	Yüksek	Orta	Düşük (Kara Kutu)	Yüksek
Entegrasyon Potansiyeli	Sınırlı	Yüksek	Yüksek	Yüksek

2. METOT

2.1. Vana Üretim Süreci

Vana üretimi Şekil 1’de görüleceği üzere hammadde olarak başlar. Hammaddeler üretilecek vana boyutuna uygun çapta seçilerek üretim sürecine alınır. İlk olarak boy kesme tezgahlarında kesilir. Kesilen parçalar grafitleme işlemine tabi tutulur. Bu işlemin amacı malzemenin işlenmesini kolaylaştırmaktır. Grafitlenen hammaddeler otomatik pres tezgahlarına alınarak preslenir. Preslenen ürünler bekleme alanına soğutulduktan sonra fazla çapaklarının kesilmesi amacıyla çapak kesme işlemine tabi tutulur. Çapakları kesilen vanalar kumlama işlemine tabi tutulduktan sonra talaşlı imalat tezgahlarında kanal, delik, diş vb. açmak üzere işlenir. Böylece vananın ana hatları tamamlanmıştır. Sonrasında vanalar yüzey temizleme işleminin yapıldığı yıkama bölümüne getirilerek temizlenir. Temizlenen vanalar krom kaplama ünitesine alınarak yüzeyleri krom ile kaplanır. Kaplanan vanalar montaj bölümüne sevk edilerek diğer parçalar ile birleştirilir. Montaj işlemini test işlemi takip eder. Testi geçen ürünler paketleme ünitesine getirilerek paketleme işlemi gerçekleştirilir. Paketlenen vanalar kolilenerek sevke hazır hale getirilir.

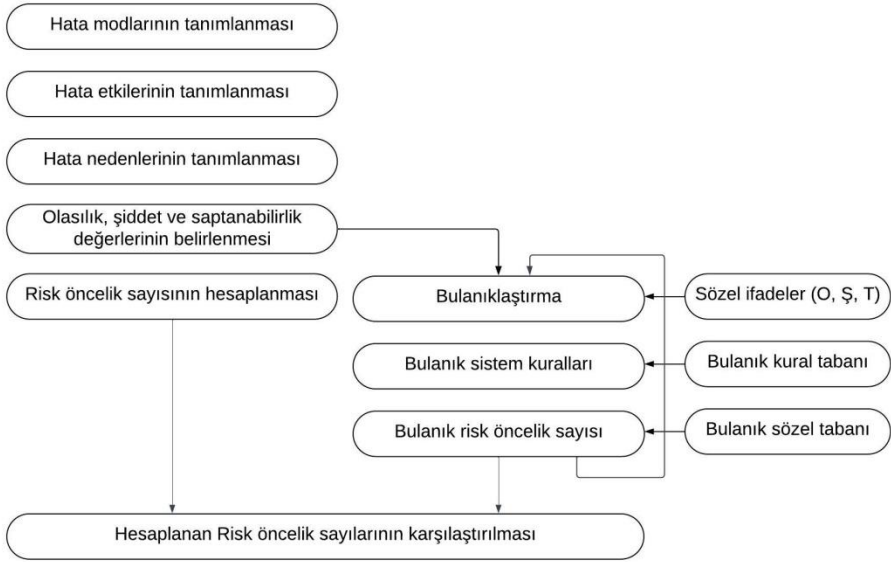


Şekil 1. Vana Üretim Süreci

2.2. Çalışmanın Tasarımı

Bu çalışmada hata türleri ve etkileri analizi ile bulanık mantık yaklaşımıyla ele alınarak bir vana üretim süreci analiz edilmiştir. Şekil 2’de görüldüğü üzere öncelikle bir geleneksel yöntemle göre hata türleri tanımlanmış daha sonra hata etkileri ve nedenleri tanımlanmıştır. Hatanın meydana gelmesi ile ilgili olasılık, meydana gelirse oluşturacağı şiddet ve hatanın denetlenebilirliğiyle ilgili değerler önem derecesine göre 1 – 10 a kadar belirlenmiştir. Belirlenen değerler birbiriyle çarpılarak risk öncelik sayısı (RÖS) hesaplanmıştır. Ardından bulanık mantık bulanık küme üyelik fonksiyonlarından üçgensel üyelik fonksiyonları kullanılarak MATLAB programının

“Fuzzylogictoolbox”ı aracılığıyla öncelikle sözel ifadeler belirlenerek üyelik fonksiyonları ve kural tabanları oluşturulmuş, bulanık mantık RÖS ifadeleri belirlenmiştir. Daha sonra elde edilen sözel RÖS ifadeleri bulanık olmayan değerlere dönüştürülmüştür. Geleneksel ve bulanık FMEA sonuçları karşılaştırılarak değerlendirme yapılmıştır.



Şekil 2. Çalışmanın Tasarımı

2.3. Hata Türleri ve Etkileri Analizi

FMEA çalışmalarındaki temel amaç, tasarım, sistem, süreç veya servisten ortaya çıkabilecek hataların belirlenmesi, risk öncelik sayısı yüksek olan hataların önüne geçilmesi ve kaynaklardan daha etkin şekilde faydalanılmasını sağlamaktır (Turan & Gönen, 2019).

“Hata Türü, Etkileri ve Riskinin Analizi Üzerine Prosedürler” olarak adlandırılan Askeri Prosedür MIL-P-1629, 9 Kasım 1949 tarihinde başlatılmıştır. Sistem ve donatım hatalarının etkilerinin belirlenmesi için güvenilir bir teknik olarak kullanılmıştır. 1969da NASA tarafından, 1970-1975 arasında ABD Uçak Sanayisinde, 1975 yılında Japon NEC firmasında, ilk endüstriyel uygulaması yapılmıştır. Ardından 1980 yılında FORD tarafından otomotiv sanayisinde uygulaması başlatılmış daha sonra ise bu yöntem Fransız Renault ve Citroen otomotiv şirketlerince AMDEC olarak isimlendirilmiştir. 1985 yılında IEC tarafından IEC 60812 standardı yayımlanmış ve 2016 yılında son halini almıştır (Taş & Koç, 2013).

FMEA çalışması beş aşamada uygulanmıştır: (1) sistem alt sistemlere ayrılmış, (2) hata türleri tanımlanmış, (3) hata türlerinin etkileri ve nedenleri belirlenmiş, (4) Olasılık (O), Şiddet (Ş) ve Denetlenebilirlik (D) puanları 1den 10a kadar önem derecesine göre

belirlenmiş ve (5) risk öncelik sayısı (RÖS); O, Ş ve D puanları çarpılarak hesaplanmıştır.

2.4. Bulanık Mantık

Aristo tarafından ileri sürülen bulanık mantık 0–1, Evet-Hayır, Siyah-Beyaz gibi ikili mantık sistemine karşı geliştirilmiştir. Hayatın olağan akışında sadece Evet / Hayır ya da Siyah-Beyaz olmadığını, bunların dışında daha farklı seçeneklerin olabileceği düşüncesiyle hareket eden Azerbaycanlı bilim insanı Zadeh tarafından ilk defa 1965 yılında bulanık mantık teorisi ortaya atılmıştır. Zadeh, olgulara 0–1 arasında üyelik fonksiyonları tanımlayarak olguların hangi oranlarda gerçekleşeceğini belirlemeye çalışan çoklu bir mantık sistemi önermiştir (Görgülü and Şahinler, 2016).

Bu çalışmada bulanık mantık kurgusu aşağıda sıralanan şekilde gerçekleştirilmiştir;

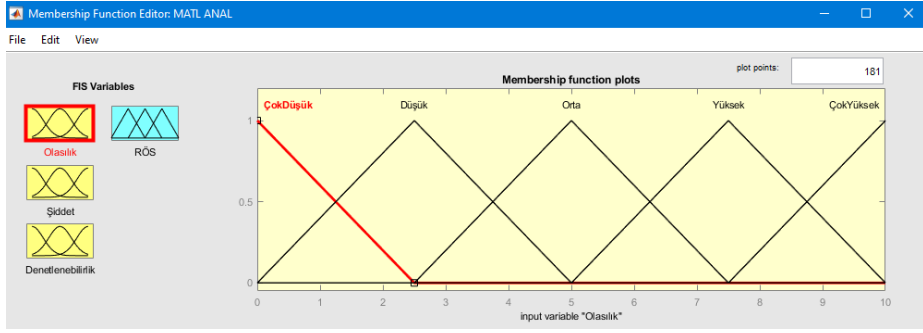
1. Bu çalışmada üçgensel üyelik fonksiyonları basit ve kolay olması, esnekliği ve uyarlanabilirliği, belirsizlikleri iyi derecede yönetebilmesi, uzman görüşüne uygun olması ile görsel olarak anlaşılabilir ve yorumlanmasının kolay olması nedeniyle tercih edilmiştir. Sözel ifadelerle karşılık olasılık, şiddet ve denetlenebilirlik skorları Tablo 2’de verilmiş olup buna göre oluşturulan üyelik fonksiyonları Şekil 3’te gösterilmiştir.

Giriş Değişkenleri: Olasılık (O): 1 – 10 aralığında, Şiddet (Ş): 1 – 10 aralığında, Denetlenebilirlik (D): 1 – 10 aralığında belirlenmiştir.

Çıkış Değişkeni: Risk Öncelik Sayısı (RÖS): 1 – 1000 aralığında belirlenmiştir.

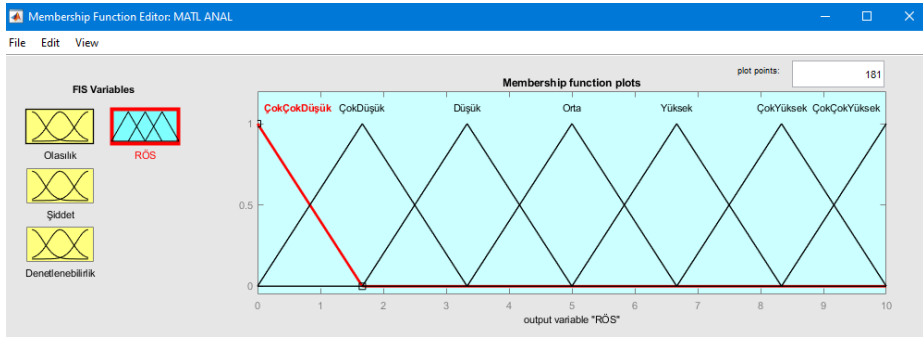
Tablo 2. Sözel İfadelerle Karşılık Olasılık, Şiddet ve Denetlenebilirlik Skorları

Sözel İfadeler	Olasılık (O)	Şiddet (Ş)	Denetlenebilirlik (D)
Çok Yüksek	10	10	10
Yüksek	8 - 9	8 - 9	8 - 9
Orta	5 - 7	5 - 7	5 - 7
Düşük	2 - 4	2 - 4	2 - 4
Çok Düşük	1	1	1



Şekil 1. Olasılık, Şiddet ve Denetlenebilirlik Girdi Üyelik Fonksiyonları

2. Hesaplanan sözel ifadelerle karşılık gelen RÖS değerlerini sınıflandırmak için 7 adet bulanık küme seçilmiştir. Bu kümeler; Çok Çok Düşük, Çok Düşük, Düşük, Orta, Yüksek, Çok Yüksek, Çok Çok Yüksek şeklinde belirlenmiştir. Bu kümeler, üçgensel üyelik fonksiyonları kullanılarak modellenmiştir. Bu yaklaşımın, belirsizlikleri yöneterek daha gerçekçi ve kapsamlı sonuçlar üreteceği düşünülmüştür. MATLAB Fuzzy Logic Toolbox, bu kümelerin tanımlanması ve görselleştirilmesi için kullanılmıştır. RÖS çıktı üyelik fonksiyonları Şekil 4'te gösterildiği gibidir.



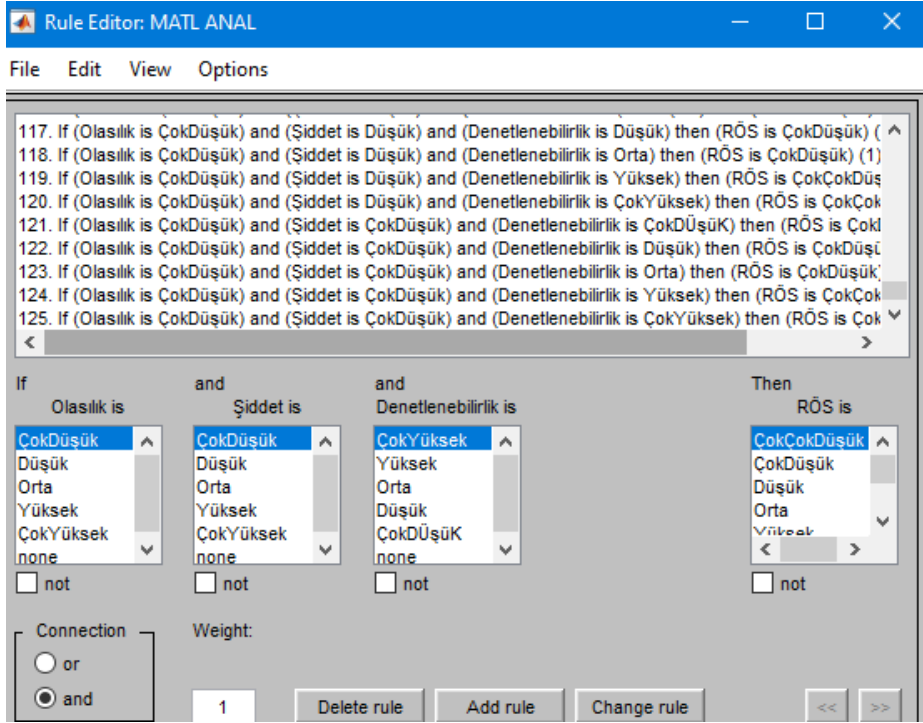
Şekil 2. RÖS Çıktı Üyelik Fonksiyonları

3. Üyelik fonksiyonlarının oluşturulmasından sonra kural tabanı oluşturma adımına geçilmiş ve uzman deneyimi ve tecrübesine göre Şekil 5'teki görüldüğü üzere toplam 125 kural oluşturulmuştur. Örneğin;

Kural 1: EĞER Olasılık Çok Yüksek ve Şiddet Çok Yüksek ve Denetlenebilirlik Çok Düşük ise RÖS Çok Çok Yüksek.

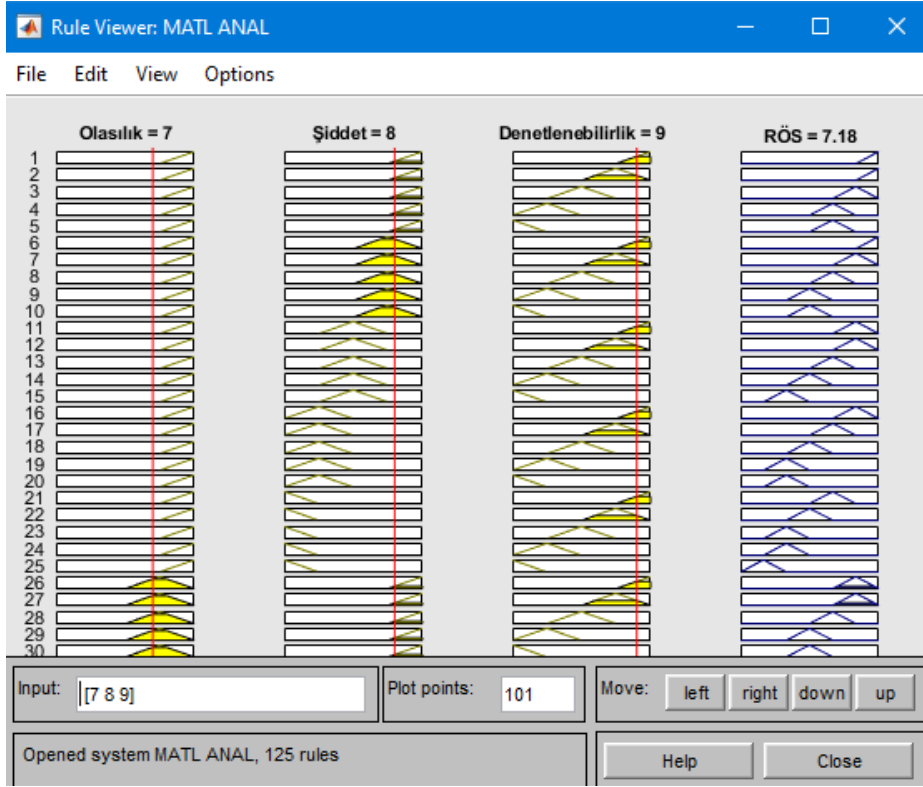
Kural 2: EĞER Olasılık Yüksek ve Şiddet Yüksek ve Denetlenebilirlik Düşük ise RÖS Çok Yüksek.

Kural 3: EĞER Olasılık Orta ve Şiddet Orta ve Denetlenebilirlik Orta ise RÖS Orta.



Şekil 5. Kural Tabanı

4. Şekil 6’da görüldüğü üzere FMEA analizinde belirlenen olasılık, şiddet ve denetlenebilirlik skorları teker teker girilerek risk öncelik sayıları belirlenmiştir.



Şekil 6. Örnek RÖS Sayısı

5. Hesaplanan RÖS sayıları karşılaştırılarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

3. SONUÇ VE ÖNERİLER

Vana üretim süreci ele alınarak yapılan risk değerlendirmesinde toplam 44 adet hata modu tanımlanmıştır. Bu hata modlarının risk öncelik sayıları, bulanık mantık ile ele alındıktan sonraki durumu karşılaştırılmış ve 14 hata modunun öncelik sıralamasının değiştiği belirlenmiştir. Bunların 5 tanesi daha düşük önceliğe gerilerken 9 tanesi daha yüksek önceliğe yükselmiştir.

Örnek: Kumlama Makinesi (1. Satır)

Olasılık (O): 7

Şiddet (Ş): 9

Denetlenebilirlik (D): 7

Geleneksel RÖS: $7 \times 9 \times 7 = 441$

Bulanık RÖS: 7,18

Geleneksel FMEA, kesin sayısal değerlere dayanır ve bu riski yüksek öncelikli olarak değerlendirir. Bulanık FMEA, belirsizlikleri ve uzman görüşünü daha iyi yansıtarak

daha düşük bir RÖS değeri (7,18) üretir. Bu, riskin gerçek etkisinin daha düşük olduğunu göstermektedir.

Tablo 3’de bulanık FMEA uygulaması sonrası risk öncelik sıralamasının değişimi görülmektedir.

Tablo 3. Bulanık FMEA Uygulaması Sonrası Risk Öncelik Sıralaması Değişimi

SN	ALT SİSTEM	HATA MODU	HATA ETKİLERİ	HATA NEDENLERİ	O	Ş	D	G RÖS	G RÖS SIRA	F RÖS	F RÖS SIRA	RÖS SIRA DEĞİŞİMİ
1	Kumlama	Kumlama makinesinin çalışması	Ağır yaralanma	Makine çalışırken kabine girilmesi	7	9	7	441	1	7,18	1	0
2	Hammadd e	Hammadd e çubukların forklift ile sevki	Forkliftin kazaya neden olması	Forklifti belgeli ve yetkili kişiler kullanılmaması	8	8	6	384	2	7,11	2	0
3	Hammadd e	Sevk edilen balyanın vinç ile çapına uygun yerlere yüklenmesi	Vincin kazaya neden olması	Vinci belgeli ve yetkili kişiler kullanmaması	7	8	6	336	3	6,66	3	0
4	Presleme	Preslenen sıcak malzemenin soğutmak için diledirilmesi	Sıcak malzemeyle temas sonucu yaralanma	Tehlikeli sıcaklık uyarı işareti olmaması	9	8	4	288	4	6,39	4	0
5	Kaplama	Malzemelerin kaplanması	Solunum sistemi hastalıkları	Banyodan çıkan gazların teneffüsü	6	8	6	288	5	6,16	6	-1
6	Montaj	Montajlanan ürünlerin toplandığı sepetin taşınması	Ayak yaralanması	Ürünün düşmesi	8	7	5	280	6	6,26	5	1
7	Montaj	Malzemelerin elle beslenmesi	El – parmak sıkışması	Işık perdesinin çalışmaması / bypass edilmesi	6	7	6	252	7	5,7	7	0
8	Montaj	Malzemelerin elle beslenmesi	El – parmak sıkışması	Çift el butonu olmaması / bypass edilmesi	6	7	6	252	8	5,7	8	0
9	Paketleme	Kolileme	Sıcak malzemeyle temas	Ambalajlanan ürünlerin toplanması	6	6	7	252	9	5,7	9	0

SN	ALT SİSTEM	HATA MODU	HATA ETKİLERİ	HATA NEDENLERİ	O	Ş	D	G RÖS	G RÖS SIRA	F RÖS	F RÖS SIRA	RÖS SIRA DEĞİŞİMİ
10	Presleme	Malzemenin makinede preslenmesi	Çalışma sırasında kabine girilmesi	Emniyet sensörleri arızası – by pass edilmesi	6	10	4	240	10	5	10	0
11	Kumlama	Kumlama makinesinin çalışması	Makine çalışırken kabine girilmesi	Emniyet tellerinin arızası – işlevsiz bırakılması	5	8	6	240	11	5	11	0
12	Paketleme	Kolileme	El yanıklar oluşması	Sıcak malzemeyle temas	5	8	6	240	12	5	12	0
13	Kesme	İşlenecek hammaddenin vinç ile kesme makinesine yüklenmesi	Hamaddenin çalışanın ayağını ezmesi	Bağın patlaması	6	10	4	240	13	5	13	0
14	Kesme	İşlenecek hammaddenin vinç ile kesme makinesine yüklenmesi	Sapanın kopması	Taşıma işleminden önce sapan kontrol edilmemekteydi	5	7	5	175	14	5	14	0
15	Kesme	İşlenecek hammaddenin vinç ile kesme makinesine yüklenmesi	Bağın patlaması	Taşıma işleminden önce bağ kontrol edilmemekteydi	5	7	5	175	15	5	15	0
16	Kaplama	Banyoların kurulması	Göz ve cilt yanığı	Kimyasalın sıçraması	5	6	5	150	16	5	16	0
17	Presleme	Preslenen malzemenin operatör tarafından ölçüsel ve görsel kontrol yapması	İşitme kaybı	Kulaklık kullanılmaması	6	8	3	144	17	5	17	0
18	Montaj	Malzemelerin elle beslenmesi	Bel ve eklem ağrıları	Aynı pozisyonda çalışma ve statik duruş	6	6	4	144	18	5	18	0
19	Kumlama	Kumlama makinesinin çalışması	Pnömonik oz hastalığı	FFP2 türü toz maskesi kullanılmaması	6	8	3	144	19	5	19	0
20	Paketleme	Kolileme	Bel ve eklem ağrıları	Kolinin elle palete dizilmesi	6	6	4	144	20	5	20	0

SN	ALT SİSTEM	HATA MODU	HATA ETKİLERİ	HATA NEDEMLERİ	O	Ş	D	G RÖS	G RÖS SIRA	F RÖS	F RÖS SIRA	RÖS SIRA DEĞİŞİMİ
21	Paketleme	Kolileme	Tekrarlı hareketlerin çok sık yapılması	Ambalajlanan ürünlerin kutulanması	6	6	4	144	21	5	21	0
22	Kaplama	Malzemelerin kaplanması	Kayma, düşme	Islak zemin	6	7	3	126	22	5	22	0
23	Grafitleme	Grafit makinesinin çalıştırılması (yükleme + karıştırma + boşaltma)	Kas iskelet sistemi rahatsızlıkları	Sepetin aşırı yüklenmesi	6	7	3	126	23	5	23	0
24	Yıkama	Tezgah temizliği ve imalata hazırlık	Göze çapak – yağ kaçması	Basınçlı hava kullanılması	6	7	3	126	24	5	24	0
25	Talaşlı İşlem	Malzemenin elle beslenmesi ve boşaltılması	Göze çapak kaçması	Çapak fırlaması	6	7	3	126	25	5	25	0
26	Kumlama	Kumlanan ürünlerin boşaltılması	İşitme kaybı	Kulaklık kullanılmaması	6	7	3	126	26	5	26	0
27	Kaplama	Banyoların kurulması	Göz yanığı	İş Gözlüğü kullanılmaması	6	7	3	126	27	5	27	0
28	Kumlama	Ürünlerin kumlama makinesi yükleyicisine konulması	İşitme kaybı	Kulaklık kullanılmaması	7	6	3	126	28	5	28	0
29	Kumlama	Tezgah temizliği ve imalata hazırlık	Gözün yaralanması	İş Gözlüğü kullanılmaması	9	7	2	126	29	5	29	0
30	Kumlama	Kumlama makinesinin çalışması	Ortama toz yayılımı	Filtrelerin düzenli temizlenmemesi	5	6	4	120	30	4,3	35	-5
31	Kaplama	Banyoların kurulması	Kas ve iskelet sisteminde ağrı ve rahatsızlık	Kimyasal madde bidonlarının elle kaldırılması	6	5	4	120	31	4,3	36	-5
32	Çapak Alma	Kazan dolduktan sonra transpalet ile kumlama makinesine	Kas iskelet sistemi rahatsızlıkları	Transpaletin itilip çekilmesi	6	6	3	108	32	4,49	34	-2

SN	ALT SİSTEM	HATA MODU	HATA ETKİLERİ	HATA NEDENLERİ	O	Ş	D	G RÖS	G RÖS SIRA	F RÖS	F RÖS SIRA	RÖS SIRA DEĞİŞİMİ
		sevk edilmesi										
33	Kaplama	Malzemelerin kaplanması	Cilt yanığı	İş kıyafeti giyilmemesi	5	7	3	105	33	4,6	33	0
34	Talaşlı İşlem	Malzemenin elle beslenmesi ve boşaltılması	Çapak fırlaması	Siperlik bulunmaması / bypass edilmesi	5	7	3	105	34	4,6	31	3
35	Presleme	Tezgah temizliği ve imalat hazırlık	Göze çapak kaçması	Basınçlı hava kullanılması	5	7	3	105	35	4,6	32	3
36	Presleme	Yükleyicinin çalıştırılarak preslenecek malzemenin fırın içerisine boşaltılması	Düşen cisme bağlı yaralanma	Yükleme sırasında malzeme düşmesi	5	7	3	105	36	4,6	30	6
37	Presleme	Yükleyicinin çalıştırılarak preslenecek malzemenin fırın içerisine boşaltılması	Yükleme sırasında malzeme düşmesi	Yükleyicinin yan kısımlarının açık olması	4	6	4	96	37	3,54	42	-5
38	Presleme	Preslenen malzemenin operatör tarafından ölçüsel ve görsel kontrol yapması	Solunum sistemi hastalıkları	FFP2 türtü maske kullanılmaması	5	6	3	90	38	4,03	37	1
39	Paketleme	Kolileme	Kas ve iskelet sisteminde ağrı ve rahatsızlık	Tekrarlı hareketleri sık yapılması	5	6	3	90	39	4,03	38	1
40	Hammade	Hammade çubukların forklift ile sevk	Forkliftin zeminde kayması	Zeminin kirli olması	5	6	3	90	40	4,03	39	1
41	Hammade	Sevk edilen balyanın vinç ile çapına uygun	Vinç çalışma alanında bulunan kişilere çarpması	Vinç çalışma alanında uyarı – ikaz işareti bulunmaması	3	9	3	81	41	3,55	40	1

SN	ALT SİSTEM	HATA MODU	HATA ETKİLERİ	HATA NEDENLERİ	O	Ş	D	G RÖS	G RÖS SIRA	F RÖS	F RÖS SIRA	RÖS SIRA DEĞİŞİMİ
		yerlere yüklenmesi										
42	Hammadd e	Hammadde çubukların forklift ile sevki	Forkliftin alandan bulunan kişilere çarpması	Forklift çalışma alanında uyarı – ikaz işareti bulunmaması	3	9	3	81	42	3,55	41	1
43	Hammadd e	Sevk edilen balyanın vinç ile çapına uygun yerlere yüklenmesi	Vinç ya da taşıyan malzemenin çalışanın başına çarpması	Baret takılmaması	4	9	2	72	43	3,34	43	0
44	Grafitleme	Grafitlenece k malzemeye grafitleme jeli dökülmesi	Ele temas sonucu tahriş	Eldiven giyilmektedir	4	6	3	72	44	3,34	44	0

Tanımlanan hata modlarının geleneksel hata türü ve etkileri analizi sonuçları ile bulanık hata türleri ve etkileri analizi sonuçları karşılaştırıldığında öncelik sıralamasının %31,82 oranında değiştiği; genel olarak %11,36'sının daha sonraki öncelik sırasına gerilerken %20,45'inin öncelik sıralamasının yükseldiği ortaya konulmuştur. 4. ve 5. sıradaki FMEA RÖS sayısının aynı olmasına karşın Bulanık RÖS sayısının farklı olduğu ve sıralamada birbiriyle yer değiştirdiği tespit edilmiştir. Buradan hareketle O,Ş ve D değerlerinin çarpanlarının farklı ancak RÖS değeri aynı olduğu durumda Bulanık FMEA değerlendirmesinde sıralamanın değişebileceği tespit edilmiştir. Ancak diğer sonuçlar incelendiğinde genel bir ifadeyle bunun gerçekleşeceğini söylemek mümkün değildir. Bunun yanında 37. ve 38 satırdaki hata modunun FMEA RÖS sayısının sırasıyla 96 ve 90 olmasına karşın Bulanık RÖS sayıları sırasıyla 3,54 ve 4,03 olarak belirlenmiş olup FMEA RÖS sayısı yüksek olan hata modunun Bulanık FMEA'ya göre daha sonraki RÖS sıralamasına gerilediği görülmektedir. Benzer şekilde 6. sıradaki daha düşük FMEA RÖS sayısına karşılık belirlenen Bulanık RÖS sayısının 5. Sıradaki RÖS sayısından daha yüksek olduğu ve sıralamada 1 satır yukarıya çıktığı belirlenmiştir.

Tablodaki örneklerde görüldüğü gibi, geleneksel FMEA ve Bulanık FMEA sonuçları arasında sıralama farklılıkları olmaktadır. Bu farklılıkların temel nedenleri şunlardır:

a. Belirsizliklerin Yönetimi:

Geleneksel FMEA, belirsizlikleri tam olarak yansıtamamaktadır. Örneğin, "orta şiddette bir risk" gibi niteliksel ifadeler, kesin sayısal değerlere dönüştürülürken gerçekliğini kaybedebilir. Bulanık FMEA, belirsizlikleri üyelik fonksiyonları ve

kural tabanı ile daha iyi yönetmektedir. Bu, risklerin daha gerçekçi bir şekilde değerlendirilmesini sağlamaktadır.

b. Özneliğin Azaltılması:

Geleneksel FMEA, öznel değerlendirmelere dayanmaktadır. Farklı uzmanlar, aynı risk için farklı değerler verebilmektedir. Bulanık FMEA, özneliği azaltmaktadır. Örneğin, birden fazla uzmanın değerlendirmeleri bulanık kümelerle birleştirilerek daha tutarlı sonuçlar elde edilir.

c. Aynı RÖS Değerlerinin Farklı Yorumlanması:

Geleneksel FMEA'da farklı riskler aynı RÖS değerine sahip olabilir, ancak bu risklerin gerçek etkileri farklı olabilir. Bulanık FMEA, bu riskleri daha detaylı bir şekilde değerlendirerek farklı RÖS değerleri üretmektedir.

Geleneksel FMEA ile bulanık FMEA değerlendirmesinin sonuçları karşılaştırıldığında, risklerin önceliklendirilmesinde ve değerlendirilmesinde önemli değişimler yaşanmıştır. Bulanık FMEA, belirsizliklerin daha iyi modellenmesi, özneliğin azaltılması, RÖS hesaplamalarının daha gerçekçi olması, karmaşık ve dinamik sistemlerde daha etkili analizler yapılması gibi avantajları sayesinde, risklerin daha doğru ve kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesini sağladığı bu nedenle bulanık FMEA'nın geleneksel FMEA'ya kıyasla daha dengeli ve güvenilir sonuçlar verdiği değerlendirilmiştir.

Genel olarak diğer risk analizi yöntemlerine kıyasla FMEA'nın bulanıklaştırılmış olarak hesaplanmasında RÖS sayıları değişebilmekte ve eylem sıralamasının yeniden belirlenmesine neden olmaktadır. Sonuç olarak hata türü ve etkileri analizi ile diğer risk analizi yöntemlerinin risk önceliklerini belirleme ve analiz etmede kendilerine özgü dezavantajları var olup hata türü ve etkileri analizinin bulanık mantık ile çözümü yapıldığında risk öncelik sıralamasında değişimler gerçekleşmekte, geleneksel hata türü ve etkileri analizi yönteminde daha düşük öneme sahip olan hata modlarının bulanık yöntemde ön sıralara gelebilmekte veya gerileyebilmektedir. Bulanık hata türü ve etkileri analizinin benimsenmesindeki temel argüman risk öncelik sayısının belirlenmesi aşamasında hata türü, hata etkileri ve hata nedenlerinin çarpanlarının aynı sonucu verdiği durumda risk önceliklerinin de aynı olması fakat farklı etkilere sahip olmasıdır.

Bulanık FMEA yöntemi, vana üretimi gibi belirli bir süreçle sınırlı olmayan ve geliştirilebilir bir yaklaşımdır. Bu yöntem, belirsizlikleri ve özneliği yönetme konusundaki esnekliği sayesinde otomotiv, havacılık, sağlık, enerji, gıda, kimya ve inşaat gibi farklı endüstrilerde başarıyla uygulanabilir. Örneğin, otomotiv endüstrisinde üretim hattındaki karmaşık süreçlerdeki riskleri analiz ederken, sağlık sektöründe tıbbi cihazlardaki hata modlarını değerlendirmede kullanılabilir. Bulanık FMEA, veriye dayalı analizler ve uzman görüşlerini entegre ederek, hem küçük ölçekli üretim süreçlerinde hem de büyük ölçekli endüstriyel sistemlerde riskleri daha etkili bir şekilde değerlendirir. Bu, süreçlerin güvenilirliğini ve verimliliğini artırarak, işletmelerin daha proaktif bir risk yönetimi stratejisi benimsemesini sağlar.

Sektör çalışanları, Bulanık FMEA'yı etkili bir şekilde uygulamak için eğitim, veri toplama, uzman görüşü entegrasyonu ve yazılım kullanımı gibi adımları takip edebilir.

Özellikle MATLAB Fuzzy Logic Toolbox gibi araçlar, bulanık mantık sistemlerinin kolayca modellenmesini ve görselleştirilmesini sağlar. Çalışanların bu yöntemi benimsemesi, süreçlerdeki riskleri daha iyi anlamalarına ve önlem almalarına yardımcı olur. Ayrıca, sürekli iyileştirme yaklaşımıyla Bulanık FMEA sonuçları düzenli olarak gözden geçirilerek, süreçlerin sürekli optimize edilmesi mümkün hale gelebilir. Bu, hem iş güvenliğini artırabilir hem de operasyonel verimliliği maksimize edebilir.

Yazarların Katkısı

Öztürk çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, Tak veri toplama ve veri analizi, Öztürk ve Tak veri analizi ve yorumlama konusunda katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

KAYNAKÇA

- Ak, Ş. & Zorluer, İ. (2022). Evaluation of Occupational Accidents in the Construction Industry with Fault Tree Analysis, *Teknik Dergi/Technical Journal of Turkish Chamber of Civil Engineers*, 33(6), 12817–12846. <https://doi.org/10.18400/tekderg.858275>.
- Akpınar, T. & Çakmakaya, B.Y. (2014). İş Sağlığı ve Güvenliği Açısından İşverenlerin Risk Değerlendirme Yükümlülüğü, *Çalışma ve Toplum*, 1(40), pp. 273–304.
- Ayvaz, B. et al. (2018). Biyozdizel Tedarik Zinciri Ağ Tasarımı İçin Çok Amaçlı Karma Tam Sayılı Doğrusal Programlama Modeli Önerisi, *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 23(4), 55–70. <https://doi.org/10.17482/uumfd.455307>.
- Beylihan, E. & Eevli, S. (2023). Hata Türü ve Etkileri Analizinde Bulanık Swar Yönteminin Kullanımı: Otomotiv Sektörü Örneği, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 11(1), 212–224. <https://doi.org/10.21923/jesd.1085124>.
- Çelik N., Öztürk, F. (2017). The Upcoming issues of industry 4.0 on occupational health & safety specialized on Turkey example, *International Journal of Economics, Business and Management Research*, 1(5), 236–256.
- Görgülü, Ö. & Şahinler, S. (2016). Bulanık Mantık Uygulamalarının MATLAB Aracılığıyla Çözümlemesi, in IX. Ulusal Biyoistatistik Kongresi.
- Gul, M. et al. (2021). A Fuzzy FMEA Approach to Prioritize Risks in Production Processes: A Case Study in the Automotive Industry, *International Journal of Production Research*.

- Halfarová, P., Ustyugova, T. & Vykydal, D. (2013). The Application Of Fuzzy FMEA, in 22nd International Conference on Metallurgy and Materials (METAL), 1–5.
- Ivanova, M., Tsenev, V. & Dimitrov, B. (2021). Manufacturing Process Improvement through FMEA Analysis and Fuzzy Logic, 2021 30th International Scientific Conference Electronics, ET 2021-Proceedings, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ET52713.2021.9579721>.
- Kabakulak, T. (2019). Bir Tekstil İşletmesinde Risk Değerlendirme Uygulaması : 5x5 Matris ve HAZOP, Karaelmas İş Sağlığı ve Güvenliği Dergisi, 3(2), 97–111. <https://doi.org/10.33720/kisgd.581677>.
- Kahraman, A. et al. (2020). A Hybrid MCDM Approach for Risk Assessment in Renewable Energy Projects: A Case Study of Wind Farms, Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- Karsak, E. E. et al. (2019). Risk Assessment in Construction Projects Using Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS, Journal of Civil Engineering and Management.
- Li, H. et al. (2022). A Hybrid Approach Integrating FMEA, Fuzzy AHP, and Machine Learning for Risk Assessment in Smart Manufacturing, Expert Systems with Applications.
- Liu, S. et al. (2020). An Integrated Fuzzy FMEA and Fuzzy AHP Approach for Risk Assessment in Healthcare Systems, Journal of Intelligent & Fuzzy Systems.
- Mohammed, A., Ghaithan, A. & Al-Yami, F. (2023). An integrated fuzzy-FMEA risk assessment approach for reinforced concrete structures in oil and gas industry, Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, 44(1), 1129–1151. <https://doi.org/10.3233/JIFS-221328>.
- Özfırat, M.P. (2014). Bulanık Önceliklendirme Metodu Ve Hata Türü ve Etkileri Analizini Birleştiren Yeni Bir Risk Analizi Yöntemi, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 29(4), 755–768. <https://doi.org/10.17341/gummfd.04423>.
- Öztürk, F., (2014). Qualität, Effizienzsteigerung und integrierte Managementsystemen im türkischen Eisenbahnsektor, Social and Natural Sciences Journal, 8(2), 14-19.
- Öztürk, F. et al. (2022). Tenerife Accident Analysis: a comparison of Fault Tree Analysis, Failure Mode and Effects Analysis and Causal Analysis based on System Theory, Gazi University Journal of Science, 36(2), 773–790. <https://doi.org/10.35378/gujs.1014604>.
- Smith, K. Smith et al. (2021). Risk Assessment in Healthcare Using a Hybrid FMEA and Machine Learning Approach, Healthcare Management Science.

- Tak, G. & Öztürk, F. (2024). Supporting Occupational Health and Safety with Lean 5s System. Ankara. <https://www.icenss.org/wp-content/uploads/2024/07/icenss-2024-tam-metinler-kitapcigi-8.pdf> adresinden 20 Ocak 2025 tarihinde alınmıştır.
- Tarakci, E., (2020). The ergonomic risk analysis with REBA method in production line, *Ergonomi Dergisi*, 3(2), 96-107.
- Taş, Y. & Koç, K.H. (2013). Hata Türü ve Etkileri Analizi (Fmea) Tekniğinin Mobilya Endüstrisine Yönelik Uygulaması, *İstanbul Aydın Üniversitesi Dergisi*, 150–178.
- Testik, O.M. & Unlu, E.T. (2023). Fuzzy FMEA in risk assessment for test and calibration laboratories, *Quality and Reliability Engineering International*, 39(2), 575–589. <https://doi.org/10.1002/qre.3198>.
- Turan, M. & Gönen, O.D. (2019). Transformator üreten bir firmada risk analizinde bulanık HTEA kullanımı ve uygulama yazılımı geliştirme, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(1), 474–487. <https://doi.org/10.25092/baunfbed.549171>.
- Wang, J. et al. (2021). Predictive Maintenance Using Machine Learning: A Case Study in the Manufacturing Industry, *Journal of Manufacturing Systems*.
- Yeh, R.H. & Hsieh, M.H. (2007). Fuzzy assessment of FMEA for a sewage plant, *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, 24(6), 505–512. <https://doi.org/10.1080/10170660709509064>.
- Zhang, R. et al. (2022). Machine Learning-Based Risk Assessment in Supply Chain Management: A Case Study, *Computers & Industrial Engineering*.