



A new model for the occupational health and safety risk assessment process: Neutrosophic FMEA

Merve Karamustafa^{1*}, Selçuk Çebi²

¹Occupational Health and Safety Coordinatorship, Yıldız Technical University, 34349, Esenler, İstanbul, Türkiye

²Department Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Yıldız Technical University, 34349, Beşiktaş, İstanbul, Türkiye

Highlights:

- Neutrosophic set based FMEA method is introduced for the first time in risk assessment.
- Risk magnitude is obtained by using the neutrosophic mamdani inference instead of multiplication.
- A new neutrosophic score function has been proposed in the literature for cost factors.

Keywords:

- Risk analysis,
- Neutrosophic set theory,
- FMEA,
- Fuzzy inference system,
- Occupational health and safety

Article Info:

Research Article

Received: 29.07.2021

Accepted: 18.01.2022

Graphical/Tabular Abstract

Proposed method includes five steps and Figure A shows that the steps of proposed method; risk identification, risk analysis, risk evaluation, monitoring and review, documentation and continuous improvement.

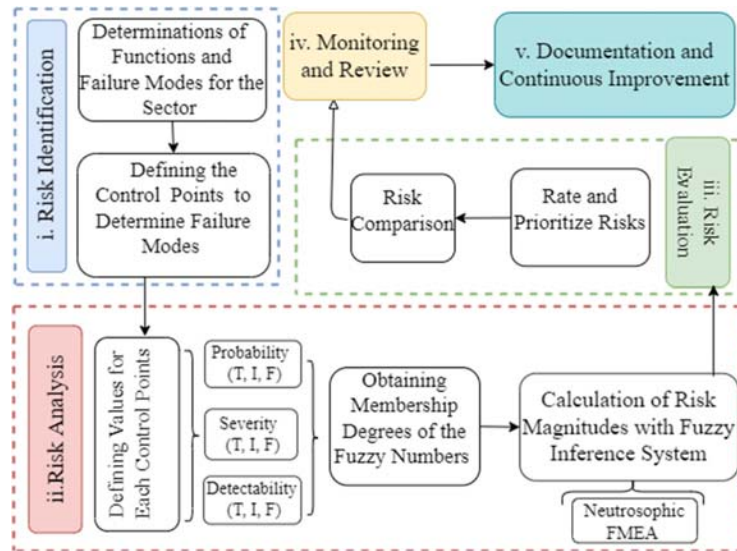


Figure A. Steps of proposed method

DOI:

10.17341/gazimmfd.976297

Correspondence:

Author: Merve Karamustafa
e-mail:
merve.karamustafa@gmail.com
phone: +90 539 316 0687

Purpose: The main objective of this study is to improve the Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) method to consider uncertainties and inconsistencies in the risk assessment phase caused both by evaluations of experts and the complex structure of the handled process.

Theory and Methods: In this study, FMEA, neutrosophic sets and fuzzy inference systems are utilized to evaluate risks in terms of occupational health and safety. According to risk analysis phase, the parameters of FMEA including probability, severity and detectability are defined by using truth, falsity and indeterminacy membership functions in Neutrosophic sets (NSs) to deal with incomplete and inconsistent information existing in the expert preferences and complex structure of the handled process. Risk magnitudes of the potential risks are calculated based on probability, severity and detectability parameters by using fuzzy inference.

Results: The all steps of proposed in Figure A has been applied to the chemical production process. The obtained results are compared with the results of the conventional FMEA and Fuzzy FMEA methods in risk evaluation phase. It is concluded that the performance of the proposed approach is better than other methods in terms of considering inconsistencies in the risk evaluation.

Conclusion: This study proposes a new risk assessment method to cope with these uncertainties and inconsistencies by extending FMEA to the neutrosophic sets. The contributions of this study are listed as follows; A new score function for neutrosophic sets has been proposed, Risk magnitude is obtained by using the neutrosophic mamdani inference instead of multiplication, Fuzzy inference system is recomposed to consider neutrosophic inputs, Neutrosophic cluster parameters (T, I, F) are not directly assigned with a single scale, I value is determined according to T and F values.



İş sağlığı ve güvenliği risk değerlendirme süreci için yeni bir model önerisi: Nötrosifik FMEA

Merve Karamustafa^{1*}, Selçuk Çebi²

¹Yıldız Teknik Üniversitesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Koordinatörlüğü, 34349, Esenler, İstanbul, Türkiye

²Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 34349, Beşiktaş İstanbul, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Risk değerlendirmesinde Nötrosifik küme tabanlı FMEA yöntemi ilk kez tanıtılmaktadır
- Risk büyüklüğünün belirlenmesinde çarpım yerine nötrosifik Mamdani çıkarım sistemi kullanılmaktadır
- Literatüre yeni bir nötrosifik skor fonksiyon formülü önerilmektedir

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 29.07.2021
Kabul: 18.01.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.976297

Anahtar Kelimeler:

Risk analizi,
nötrosifik küme teorisi,
FMEA,
bulanık çıkarım sistemi,
iş sağlığı ve güvenliği

ÖZ

Risk değerlendirmesinde genel olarak en olası duruma göre karar verilmektedir. Oysa nadiren gerçekleşen sonuçların da bulunması ve herhangi bir riske karşı uygulanan önlemin etkinlik derecesinin ölçülmemesi risk değerlendirmesinde karşılaşılan kararsızlık unsurlarıdır. Literatürde uzman değerlendirmelerindeki belirsizlikleri ele almak için önerilen bulanık mantık temelli çeşitli risk analiz teknikleri bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında da, risk değerlendirme sürecindeki tutarsızlıkları, öznellikleri ve kararsızlıkları ele almak için nötrosifik küme tabanlı Hata Türleri ve Etkileri Analizi (FMEA) literatüre ilk kez önerilmektedir. Önerilen modelde, FMEA yönteminde kullanılan olasılık, şiddet ve tespit edilebilirlik parametrelerinin tanımlanmasında nötrosifik küme tanımında kullanılan doğruluk (T), kararsızlık (I) ve yanlışlık (F) parametrelerine ait üyelik dereceleri kullanılarak bir riske ilişkin uzman değerlendirmesinin farklı boyutları ve riske değerlendirmesine yönelik kararsızlıklar dikkate alınmaktadır. Önerilen yaklaşımda potansiyel hata türleri, hatanın etkisi ve hata türlerinin tespiti için kontrol noktaları belirlenerek bu noktaların koşulları doğruluk derecesi, yanlışlık derecesi ve kararsızlık derecesi dikkate alınarak analiz edilmiştir. FMEA parametrelerine bağlı olarak riskin belirlenmesinde çarpma işlemi yerine Mamdani bulanık çıkarım sistemi kullanılmaktadır. Çalışmada geliştirilen risk değerlendirme yöntemi kimya sektöründe uygulanmıştır. Uygulamadan elde edilen sonuçlar klasik ve bulanık FMEA ile kıyaslanmıştır. Sonuçlar, önerilen yöntemin mevcut yöntemlere göre risk değerlendirmedeki kararsızlıkları ve öznelliğe bağlı belirsizlikleri dikkate almadaki başarısını göstermiştir.

A new model for the occupational health and safety risk assessment process: Neutrosophic FMEA

H I G H L I G H T S

- Neutrosophic set based FMEA method is introduced for the first time in risk assessment.
- Risk magnitude is obtained by using the neutrosophic mamdani inference instead of multiplication.
- A new neutrosophic score function formula has been proposed in the literature

Article Info

Research Article
Received: 29.07.2021
Accepted: 18.01.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.976297

Keywords:

Risk analysis,
neutrosophic set theory,
FMEA,
fuzzy inference system,
occupational health and safety

ABSTRACT

In risk assessment, the decision is generally made according to the most probable situation. However, the fact that there are rarely realized outcomes and that the degree of effectiveness of the precaution applied against any risk is not measured are the indeterminacies encountered in risk assessment. In the literature, there are various risk assessment approaches based on fuzzy logic to handle the uncertainties in specialist evaluation. Therefore, in this study, a neutrosophic set based Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) method, includes probability, severity and detectability parameters, is proposed for the first time in the literature to handle inconsistencies, subjectivities and indecisions in the risk assessment process. In the proposed method, membership degrees of truth (T), indeterminacy (I) and falsity (F) used in neutrosophic set definition are preferred in the probability, severity and detectability parameters of FMEA method, while different dimensions of expert assessment of a risk and uncertainties regarding risk assessment is taken into account. Mamdani fuzzy inference system is used instead of multiplication in determining risk depending on FMEA parameters. The risk assessment method developed in the study was applied in the chemical industry. The results obtained from the application were compared with classical and fuzzy FMEA. The results showed the success of the proposed method in considering the instabilities and subjectivity-related uncertainties in risk assessment compared to existing methods.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *merve.karamustafa@gmail.com, scebi@yildiz.edu.tr / Tel: +90 539 316 0687

1. Giriş (Introduction)

Türkiye’de 30.06.2012 tarihinde 28339 sayılı resmi gazetede yayımlanarak yürürlüğe giren 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu’na göre “İşyerinde veya işin yürütümü nedeniyle meydana gelen, ölüme sebebiyet veren veya vücut bütünlüğünü ruhen ya da bedenen engelli hâle getiren olay” iş kazası olarak tanımlanmaktadır. İş kazalarından kurtulmak ise doğru bir risk yönetimi süreci uygulamak ile mümkündür. Bu süreç dört ana alt süreci içerir; (i) çalışma ortamındaki olası tehlikelerin belirlenmesi, (ii) risk değerlendirmesinin yapılması, (iii) kontrol önlemlerinin uygulanması (önleme ve koruma önlemleri) ve (iv) tüm sürecin izlenmesi ve gözden geçirilmesi [1].

Diğer bir ifadeyle, tehlikelerin belirlenmesi ile risk yönetimi sürecinin bir döngüsü başlatılır; tüm sürecin izlenerek gözden geçirilmesi adımları ile tamamlanır. Risk yönetiminin temel katkısı, zarara neden olabilecek olası olay veya durumların önceden belirlenip ortadan kaldırılmasıdır. Ancak ve ancak risk yönetimi sürecinin tüm adımları doğru ve etkin bir şekilde uygulanırsa, belirsizlikler ortadan kalkar ve gelecekteki istenmeyen olayların ve durumların oluşma olasılığının önüne geçilmiş olur.

İşyerinde var olan ya da dışarıdan gelebilecek tehlikelerin belirlenmesi, bu tehlikelerin riske dönüşmesine yol açabilecek olayların belirlenmesi ve kontrol önlemlerine karar verilmesi amacıyla literatüre önerilmiş çeşitli yaklaşımlar mevcuttur. Söz konusu yaklaşımlar incelendiğinde, yöntemlerin uzman yargılarına dayanan ve birçoğu olayın gerçekleşme ihtimali ile olayın sonucunda ortaya çıkan şiddetin büyüklüğünü dikkate alarak risk büyüklüğünü hesaplayan teknikler olduğu görülmektedir. Mesleki risklerin değerlendirilmesinde literatürde yaygın olarak kullanılan tekniklerden biri Hata Türü ve Etkileri Analizi (FMEA) yöntemidir. 1950’lerin sonu literatüre önerilen ve literatüre önerildiği günden beri üzerine sayısız çalışmalar yapılan FMEA, etkin risk değerlendirme tekniklerinden biridir. FMEA genel olarak, risk değerlendirmesinde olasılık, şiddet ve tespit edilebilirlik parametrelerini kullanır ve bu parametrelerin çarpımıyla birlikte risk büyüklüğünü temsil eden risk öncelik katsayısını (RPN) kullanır. Ancak yöntem aşağıdaki hususlarda sıklıkla eleştirilmektedir ve literatürde bu eksikliklerin giderilmesi konusunda çalışmalar bulunmaktadır;

- Yalnızca uzman yargılarına bağlı olarak risk derecesini hesaplaması nedeniyle değerlendirme sürecinde öznellik ve belirsizlik içermesi diğer risk değerlendirme çalışmalarında olduğu gibi FMEA için de önemli bir eksiklik [2, 3]. Uzman görüşlerinin farklı olduğu durumda, sözel ifadelerin sayısallaştırılması ve farklı düşüncelerin ortak bir paydada birleştirilmesi için bulanık küme teorisinden yaygınlıkla faydalanılmaktadır [4]. Bu nedenle bulanık küme ve bulanık küme uzantılarıyla entegre edilmiş FMEA uygulamalarına literatürde sıklıkla karşılaşılmaktadır. Örneğin Mohsen ve Fereshteh [5], AHP, Shannon entropi ve Bulanık VIKOR yöntemlerini içeren bir risk değerlendirmesi çalışması sunmuştur. Geleneksel FMEA’nın belirsizliğini ortadan kaldırmak için Z bulanık sayıları kullanmıştır. AHP ve Shannon entropi yöntemleri risk parametrelerinin ağırlıklandırılması amacıyla kullanılırken bulanık VIKOR tekniği, belirlenen tehlikeleri sıralamak için uygulanmıştır. Wang vd. [6], FMEA, COPRAS ve analitik ağ süreci (ANP) yöntemini kullanarak entegre bir risk değerlendirmesi modeli önermiştir. Önerilen yaklaşımda, belirsizlikle başa çıkmada aralık değerli sezgisel bulanık kümelerin avantajlarını birleştirmiştir. İlbahar vd. [7] ve Karasan vd. [8] ise çalışmalarında belirsizliği değerlendirmek için Pisagor bulanık sayıları kullanırken, Zhu vd. [9] nötrosofik sayıları tercih etmiştir.

- RPN değerinin belirlenmesinde skaler çarpımı kullanıyor olması skaler çarpımla risk büyüklüğünü üreten tekniklerde olduğu gibi, risk derecelerine ait dağılımlarda tutarsız bir değişkenlik göstermesi yönünden FMEA eleştirilmektedir [10]. Risk büyüklükleri hesaplanırken belirsizlik ve öznellikten kurtulmak için bulanık küme teorisinden faydalanılması literatürde önerilmektedir [9-11].
- FMEA, RPN değerinin elde edilmesi için kullandığı (olasılık, şiddet ve tespit edilebilirlik) parametrelerini eşit ağırlıklı olarak ele alır. Bu eksikliğin giderilmesi amacıyla literatürde FMEA yöntemine yönelik çeşitli iyileştirme önerileri getirilmiştir. Örneğin, Wang vd. [6], Zhu vd. [9], Abdelgawad ve Fayek [12], Liu vd. [13], Liu vd. [14], Maheswaran ve Loganathan [15], Liu vd. [16], Mandal ve Maiti [17], Huang vd. [18], Vahdani vd. [19], Dabbagh ve Yousefi [20] çalışmalarında FMEA parametrelerinin ağırlıklandırılmasında ve risk sıralamalarının elde edilmesinde çok kriterli karar verme tekniklerini kullanmıştır. Fattahi ve Khalilzadeh [21], FMEA için yeni bir bulanık hibrit model önermiştir. Yöntemde bulanık ağırlıklı risk öncelikleri dikkate alınmıştır. Fuzzy AHP ve Fuzzy MULTIMOORA yöntemleri ile faktörlerin ağırlıkları ve hata türlerinin ağırlıkları hesaplanmıştır. FMEA’nın olasılık, şiddet ve tespit edilebilirlik parametrelerini ağırlıklandırmak amacıyla Yerlikaya ve Efe [22] üçgensel bulanık sayılarla ifade edilen dilsel değişkenler ve bulanık PROMETHEE yöntemini kullanırken, Efe ve diğerleri [23] bulanık AHP, Mandal ve Maiti [17] ise bulanık ANP yöntemini kullanmıştır. Chen vd. [24], FMEA ve bulanık hata ağacı risk analizi yöntemlerini birleştirerek oksijenle güçlendirilmiş bir yanma hücresinin riskini değerlendirmek için yeni bir metodoloji önermiştir. Zhu vd. [9] risk kriterlerinin göreceli ağırlıklarını ve karar vericilerin psikolojik davranışlarını dikkate almak amacıyla PROMETHEE ve pişmanlık teorisini kullanmıştır.

Yukarıda bahsedilen eksikliklerin giderildiği çalışmalar dışında FMEA risk analizinin etkinliğini arttırmak amacıyla, bazı çalışmalarda yöntemin üç parametresine yeni parametreler ilave edilmiştir. Örneğin, Yousefia vd. [25], FMEA parametrelerine ilave olarak tedavi maliyeti ve tedavi süresini de dikkate alan yeni bir yöntem önermiştir. Gül vd. [26], FMEA’ya Kişisel Koruyucu Donanım (KKD) kullanımına duyarlılık ve bakıma duyarlılık parametrelerini eklemiştir.

Literatürdeki çalışmalardan da anlaşılacağı üzere mesleki risk değerlendirmesinde uzman yargıları önemli bir yer tutmaktadır ve hiçbir yöntem değerlendirme esnasında aşağıda belirtilen eksiklikleri dikkate almamaktadır;

- Riskin gerçekleşme olasılığı değerlendirilirken yalnızca ilgili önlemin alınmadığı durumlarda riskin gerçekleşme durumu ile ilgilenilir. Oysa ilgili kontrol önleminin alınması durumunda halen arta kalan risk söz konusudur ve ilk değerlendirmede risk büyüklüğü hesaplanırken yalnızca mevcut duruma göre hesaplama yapılır.
- Riskin oluşturacağı zarar ise olasılığa benzer olarak sadece ilgili kontrol önleminin alınmaması durumu için tanımlanır ve artakalan riskin oluşturacağı zarar ya da riskin şiddeti, risk büyüklüğü tanımlanırken dikkate alınmaz.
- Tespit edilebilirlik parametresi ise denetim sırasında ilgili riskin ortaya çıkma durumunun önceden tespit edilebilme potansiyelini tanımlamak amacıyla kullanılır. Burada da denetim harici rutin faaliyetler sırasında riskin önceden tespit edilebilme durumu risk büyüklüğü tanımlanırken doğrudan dikkate alınmaz.

Yukarıda tanımlanan farklı senaryolar, risk değerlendirme sürecinde kararsızlığın oluşmasına neden olmaktadır. Literatürde yayımlanan çalışmalardan farklı bir bakış açısı, Zhu vd. [9] tarafından

sunulmuştur. Zhu vd. [9], çalışmasında dilsel nütrosifik sayılar, pişmanlık teorisi ve PROMETHEE yöntemi kullanılarak hibrit bir FMEA modeli önermiştir. Bu modelde, her bir risk kriterindeki başarısızlık modlarının değerlendirme bilgilerini ifade etmek için dilsel nütrosifik sayılar kullanılmıştır. Sunulan model, karar vericilerin psikolojik davranışlarını dikkate almak ve başarısızlık modunun sıralamasını elde etmek için pişmanlık teorisini ve PROMETHEE yöntemini bütünleştirmiştir. Ancak Zhu vd. [9], tarafından önerilen yöntemde, doğruluk (T), belirsizlik (I), yanlışlık (F) değerleri seçilen bir dilsel terimle standart olarak tanımlanmaktadır ve risk büyüklüğünün elde edilmesinde bulanık çıkarım kullanılmamaktadır. Literatüre önerilen risk değerlendirme yöntemlerinden farklı olarak çalışmamızda, hem analiz ortamındaki belirsizliğin ele alınması hem de farklı durum senaryolarından kaynaklanan kararsızlığın ele alınması amacıyla nütrosifik küme tabanlı FMEA yöntemi literatüre ilk kez önerilmektedir. Önerdiğimiz yöntemle birlikte FMEA yönteminde kullanılan parametreler ilk kez, nütrosifik küme tanımında kullanılan doğruluk üyelik derecesi (T), kararsızlık üyelik derecesi (I) ve yanlışlık üyelik derecesi (F) ile üç boyutlu olarak ifade edilmekle birlikte kararsızlık (I) derecesi, doğruluk (T) ve yanlışlık (F) değerlendirmelerine bağlı olarak belirlenmektedir. Çalışmamızda ayrıca nütrosifik kümelerde kullanılan skor fonksiyonu için alternatif bir hesaplama yöntemi önerilmiştir. Mevcut skor fonksiyonu yönteminde belirsizlik (I) ve yanlışlık (F) parametrelerinin risk büyüklüğüne negatif bir etkisi olmaktadır. Bu çalışmada ise bu negatif etkiyi dikkate alacak farklı bir bakış açısı önerilmiştir. Ayrıca önerdiğimiz modelde FMEA parametreleri bulanık çıkarımla birleştirilerek risk büyüklüğü belirlenmektedir. Ancak FMEA parametrelerinin tanımlanmasında nütrosifik küme kullanıldığı için bulanık çıkarım sisteminin girdisi nütrosifik küme formatındadır.

Bu çalışmanın ikinci bölümü, kullanılan metodolojik yöntemleri ve önerilen risk değerlendirmesi yönteminin adımlarını içermektedir. Üçüncü bölümde, önerilen yöntemin uygulama adımlarını örneklemek amacıyla geliştirilen yöntem kimyasal bir süreçteki risklerin analizine uygulanmıştır ve önerilen yöntemden elde edilen sonuçlar Bulanık FMEA ve geleneksel FMEA yönteminden elde edilen sonuçlarla kıyaslanmıştır. Son bölümde ise çalışmadan elde edilen sonuçlar ve gelecek çalışmalar için öneriler yer almaktadır.

2. Yöntem (Method)

Önerilen yaklaşımın temel amacı, iş sağlığı güvenliği açısından risklerin değerlendirilmesi için Nütrosifik tabanlı FMEA yönteminin geliştirilmesidir. Bu nedenle yapılan literatür taraması, konuyla ilgili standart ve yönetmelikler incelenerek yeni bir risk değerlendirme yöntemi önerilmiştir [12, 27, 28]. Bu bölümde, önerilen yaklaşımın aşamalarının ve matematiksel temellerinin açıklaması yapılmıştır. (Şekil 1)

2.1. Risk Belirleme (Risk Identification)

2.1.1. Sektöre yönelik fonksiyonların ve hata türlerinin belirlenmesi (Determination of functions and failure modes for the sector)

Bu adımda, çalışanı veya işyerini etkileyebilecek iş kazası, ramak kala oluşmasına sebep olabilecek iş ekipmanı ya da cihazlar fonksiyon olarak belirlenirken, bu fonksiyonlardaki bir hatadan kaynaklanacak kayıp, yaralanma ve benzeri hata türleri ve sonuçları tanımlanır.

2.1.2. Hata türlerinin tespiti için kontrol noktalarının belirlenmesi (Defining the control points to determine failure modes)

Risk değerlendirme ekibi aşağıda tanımlanan kişileri içerecek şekilde işveren tarafından oluşturulur [1];

- İşveren veya işveren vekili.
- İşyerinde sağlık ve güvenlik hizmetini yürüten iş güvenliği uzmanları ile işyeri hekimleri.
- İşyerindeki çalışan temsilcileri.
- İşyerindeki destek elemanları
- İşyerindeki bütün birimleri temsil edecek şekilde belirlenen ve işyerinde yürütülen çalışmalar, mevcut veya muhtemel tehlike kaynakları ile riskler konusunda bilgi sahibi çalışanlar.

Bu aşamada hata türü olarak iş kazasını tanımlarsak, iş kazalarının ortaya çıkmasına neden olabilecek kök nedenler “neden”, “nasıl”, “olursa ne olur” soru kalıplarıyla belirlenerek iş kazasının önceden tespit edilmesini sağlayacak kontrol noktaları risk değerlendirmesi ekibi tarafından belirlenir.

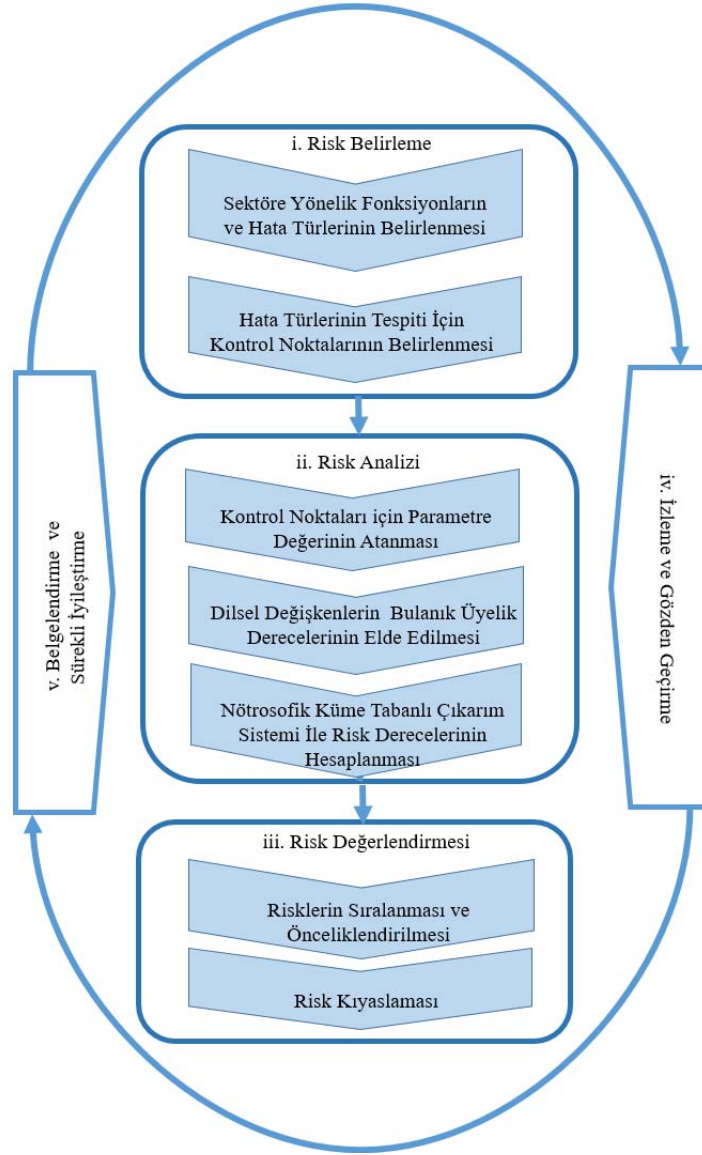
2.2. Risk Analizi (Risk Analysis)

2.2.1. Kontrol noktaları için parametre değerinin atanması (Defining values for each control point)

Tablo 1’de değerlendirme esnasında kullanılan dilsel ölçek ve bu dilsel ölçeğin ilgili parametre için ne anlama geldiği verilmiştir. Değerlendirme aşamasında, eldeki tüm veriler ışığında tespit edilmiş olan hata türlerinin ve kontrol noktalarının her biri ayrı ayrı dikkate alınarak her bir kontrol noktasının kazaya sebebiyet verme durumuna yönelik olasılık, şiddet, tespit edilebilirlik parametre değerleri nütrosifik küme parametreleri (T, I, F) kullanılarak tanımlanır. Yöntemde her bir kontrol noktasına ait olasılık, şiddet ve tespit edilebilirlik parametresi için doğruluk (T) ve yanlışlık (F) değerlerinin belirlenmesi için uzmanlardan Tablo 2’deki soruları cevaplamaları istenir. Her bir parametre için sorgulama aşısında çift yönlü olarak sorgulanarak kontrol noktasının kaza potansiyeli değerlendirilir. Uzmandan alınan yanıtı bağlı olarak kararsızlık (I) değerinin belirlenmesi için Tablo 3 kullanılır. Örneğin bir kontrol noktasındaki önlem alınmadıysa kazanın gerçekleşme ihtimali çok yüksekse önlem alındıktan sonra burada kazanın gerçekleşme ihtimalinin çok düşük olması beklenir. Karar vericinin ilgili kontrol noktası için olasılık üzerine değerlendirmesini “İlgili kontrol önlemi **alınmadıysa**, riskin gerçekleşme olasılığını **VH (Çok Yüksek)**” ve “İlgili kontrol önlemi **alındıysa**, riskin gerçekleşme olasılığını **VL (Çok Düşük)**” şeklinde yaptığını düşünelim. İlgili durumun kararsızlığı için Tablo 3 kullanılarak kararsızlık VL olarak tanımlanır. Dolayısıyla ilgili kontrol noktası için olasılık kazanın gerçekleşme olasılığı (VH, VL, VL) şeklinde tanımlanır. Farz edelim ki karar verici “İlgili kontrol önlemi **alındıysa**, riskin gerçekleşme olasılığını” önlem alındıktan sonra bile H (Yüksek) olarak tanımlasın. Bu durumda kararsızlık Tablo 3’den H olarak okunur ve söz konusu kontrol noktası nedeniyle kazanın gerçekleşme olasılığı (VH, H, H) şeklinde ifade edilir. Burada her kontrol noktası için gerçekleştirilen çift yönlü sorgulama ile kontrol noktasının kazaya sebebiyet verme durumuna ilişkin belirsizlik ve kararsızlık, olasılık, şiddet ve tespit edilebilirlik parametreleri açısından tanımlanmaya çalışılır. Burada sunulan yaklaşım nütrosifik küme uygulamaları için de yeni bir yaklaşımdır. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde doğruluk, belirsizlik ve yanlışlık (T, I, F) değerleri seçilen bir dilsel terimle standart olarak tanımlanmaktadır. Çalışmamızda ise belirsizlik (I) değeri doğruluk (T) ve yanlışlık (F) değerine göre belirlenmektedir.

2.2.2. Dilsel değişkenlerin bulanık üyelik derecelerinin elde edilmesi (Obtaining membership degrees of the fuzzy numbers)

Her kontrol noktasının uzmanlar tarafından değerlendirilmesinden sonra belirlenen kontrol noktaları, doğruluk, kararsızlık ve yanlışlık değerlerini içeren 3 boyutlu (T, I, F) nütrosifik bir yapı ile tanımlanmış olur. Dilsel olarak belirlenen nütrosifik olasılık, nütrosifik şiddet ve nütrosifik tespit edilebilirlik değerleri, Tablo 1’de verilen ölçek kullanılarak bulanık değerlere dönüştürülür.



Şekil 1. Önerilen yaklaşımın aşamaları (Structure of the proposed approach)

Tablo 1. Dilsel değişkenler (Linguistic scale)

Dilsel İfade	Kısaltma	Bulanıklık	Olasılık	Şiddet	Tespit Edilebilirlik
Çok düşük	VL	(0,0,2.5)	Olası değil	İş günü kaybı olmayan ya da üretimin durmasını etkilemeyen çok düşük yaralanma, ucuz atlatma.	Alınan tedbirler ile kaza fark edilemez.
Düşük	L	(0,2.5,5)	Uzak olasılık	Yaralanma, sistemin çalışmasını yavaşlatan ya da kısa süreli durduran küçük hasar	Alınan tedbirler ile kazanın fark edilebilmesi ihtimali düşüktür.
Orta	M	(2.5,5,7.5)	Orta olasılık	Yatarak tedavi/ kırık /önemli yaralanma ve/veya sistem performansını etkileyen hasar	Orta Düzeyde Kontrol Uygulanıyor.
Yüksek	H	(5,7.5,10)	Oldukça mümkün	Kalıcı yaralanma/ uzuv kaybı /ölümcül hastalığa yakalanma ve/veya ekipmanın tamamen hasar görmesi	Kaza oluşmadan önce dikkate değer bir uyarı vardır.
Çok yüksek	VH	(7.5,10,10)	Beklenir	Öldürücü kaza ve/veya çevresel felaket	Alınan tedbirler ile kazanın fark edilebilmesi mümkündür

Tablo 2. Doğruluk ve yanlışlık değerlerinin ölçülmesi (Determination of truth and falsity value)

Parametre	Anlamı	Nötrosofik Değişken	Cevaplanması İstenen Soru
Olasılık (P)	Her bir kontrol noktası için ayrı ayrı belirlenir. Hatanın önlem alınmadan önce ve önlem alındıktan sonra ortaya çıkma olasılığını belirtir.	Doğruluk (T)	İlgili kontrol önlemi <u>alınmadıysa</u> , riskin gerçekleşme olasılığı nedir?
		Yanlışlık (F)	İlgili kontrol önlemi <u>alındıysa</u> , riskin gerçekleşme olasılığı nedir?
Şiddet (S)	Her bir kontrol noktası için ayrı ayrı belirlenir. Hatanın önlem alınmadan önce ve önlem alındıktan sonra şiddetini belirtir.	Doğruluk (T)	İlgili kontrol önlemi <u>almadıysa</u> , zarar görme şiddeti nedir?
		Yanlışlık (F)	İlgili kontrol önlemi <u>alındıysa</u> , zarar görme şiddeti nedir?
Tespit Edilebilirlik (D)	Her bir kontrol noktası için ayrı ayrı belirlenir. Mevcut önlemlerle tehlikenin ne ölçüde önenebileceğini veya tespit edilebileceğini açıklar.	Doğruluk (T)	Kazaya sebebiyet verecek eksikliğin/hatanın <u>kontrol aşamasında</u> tespit edilebilirliği nedir?
		Yanlışlık (F)	Kazaya sebebiyet verecek eksikliğin/hatanın <u>rutin çalışma</u> durumunda tespit edilebilirliği nedir?

Tablo 3. Kararsızlık (I) değeri ölçülmesi (Determination of indeterminacy value)

Olasılık / Şiddet için Değerlendirme		Yanlışlık Değeri Tercihi				
		Çok Düşük(VL)	Düşük(L)	Orta(M)	Yüksek(H)	Çok Yüksek(VH)
Doğruluk Değeri Tercihi	Çok Düşük (VL)	VL	-	-	-	-
	Düşük (L)	VL	VH	-	-	-
	Orta (M)	VL	H	VH	-	-
	Yüksek (H)	VL	M	H	VH	-
	Çok Yüksek (VH)	VL	L	M	H	VH
Tespit Edilebilirlik için Değerlendirme		Yanlışlık Değeri Tercihi				
		Çok Düşük(VL)	Düşük (L)	Orta(M)	Yüksek(H)	Çok Yüksek(VH)
Doğruluk Değeri Tercihi	Çok Düşük (VL)	VL	-	-	-	-
	Düşük (L)	L	VL	-	-	-
	Orta (M)	M	L	VL	-	-
	Yüksek (H)	H	M	L	VL	-
	Çok Yüksek (VH)	VH	H	M	L	VL

Birden fazla uzman görüşü varsa ve uzman görüşlerinde ortak bir karar yoksa $A((T_A(x), I_A(x), F_A(x)))$ ve $B((T_B(x), I_B(x), F_B(x)))$ olarak tanımlanan iki tek değerli nötrosofik kümelerdeki aritmetik işlemler (Eş. 1-Eş. 4) dikkate alınarak [29] önerilen yöntemde ortak karar matrisinin oluşturulması için Eş. 5 ve Eş. 6'da yer alan nötrosofik küme işlemleri kullanılır [30].

$$A + B = \langle T_A(x) + T_B(x) - T_A(x) \cdot T_B(x), I_A(x) \cdot I_B(x), F_A(x) \cdot F_B(x) \rangle \quad (1)$$

$$A - B = \langle (T_A(x) - T_B(x)) / (1 - T_B(x)), I_A(x) / I_B(x), F_A(x) / F_B(x) \rangle \quad (2)$$

$$A / B = \langle T_A(x) / T_B(x), (I_A(x) - I_B(x)) / (1 - I_B(x)), (F_A(x) - F_B(x)) / (1 - F_B(x)) \rangle \quad (3)$$

$$A \cdot B = \langle T_A(x) \cdot T_B(x), I_A(x) + I_B(x) - I_A(x) \cdot I_B(x), F_A(x) + F_B(x) - F_A(x) \cdot F_B(x) \rangle \quad (4)$$

$$A + B = \left\langle \begin{array}{l} T_{A1}(x) + T_{B1}(x) - T_{A1}(x) \cdot T_{B1}(x), T_{A2}(x) + \\ T_{B2}(x) - T_{A2}(x) \cdot T_{B2}(x), T_{A3}(x) + T_{B3}(x) - T_{A3}(x) \cdot T_{B3}(x) \\ (I_{A1}(x) \cdot I_{B1}(x), I_{A2}(x) \cdot I_{B2}(x), I_{A3}(x) \cdot I_{B3}(x)) \\ (F_{A1}(x) \cdot F_{B1}(x), F_{A2}(x) \cdot F_{B2}(x), F_{A3}(x) \cdot F_{B3}(x)) \end{array} \right\rangle \quad (5)$$

$$k \times A = \left\langle \begin{array}{l} (1 - (1 - T_{A1}(x))^k, 1 - (1 - T_{A2}(x))^k, 1 - (1 - T_{A3}(x))^k) \\ ((I_{A1}(x))^k, (I_{A2}(x))^k, (I_{A3}(x))^k) \\ ((F_{A1}(x))^k, (F_{A2}(x))^k, (F_{A3}(x))^k) \end{array} \right\rangle \quad (6)$$

2.2.3. Nötrosofik küme tabanlı çıkarım sistemi ile risk derecelerinin hesaplanması
(Calculation of risk magnitudes with Fuzzy Inference System)

Her bir kontrol noktasına ait olasılık, şiddet ve tespit edilebilirlik parametreleri nötrosofik set olarak tanımlandıktan sonra ilk kez bu çalışmada önerilen nötrosofik çıkarım sistemi kullanılarak risk büyüklüğü elde edilir. Bu çalışmada ilk kez sunulan nötrosofik çıkarım sistemi Mamdani [31] tarafından önerilen bulanık çıkarım sisteminden esinlenerek geliştirilmiştir. Bu adımda, önceki adımda elde edilen parametrelerin üyelik dereceleri, bulanık çıkarım sisteminde girdi olarak kullanılır. Böylece ilgili durumu ifade eden riskin büyüklüğü hesaplanır. Bulanık çıkarım sistemi, girdi değerine göre 3 değişkenin verilerini kullanan ve çıktı değeri olarak risk büyüklüğünü veren EĞER-İSE (IF-THEN) kural tabanlı bir yapıdır. Kural tabanında yer alan herhangi bir kural önerilen FMEA yönteminde aşağıdaki yapıda temsil edilir (Eş. 7).

$$R^k : \text{EĞER } RS(T, I, F) \text{ VE } RP(T, I, F) \text{ VE } RD(T, I, F) \text{ İSE } RM(T, I, F) \quad (7)$$

Burada k kural sayısını, R^k k'ncü kuralı, RS, RP, RD ise sırasıyla riskin gerçekleşmesi durumunda ortaya çıkacak şiddeti, riskin gerçekleşme olasılığını ve riskin gerçekleşmeden önce tespit edilebilirlik derecesini, RM ise risk büyüklüğüne ait üyelik değerini ifade etmektedir. Bulanık risk büyüklüğü (RM) nütrosofik girdi değerlerine bağlıdır ve Eş. 8 kullanılarak hesaplanır:

$$\begin{aligned} T_{RM}^k(x) &= \max \left[\min \left(T_{RS}^k(x), T_{RP}^k(x), T_{RD}^k(x) \right) \right], \\ I_{RM}^k(x) &= \max \left[\min \left(I_{RS}^k(x), I_{RP}^k(x), I_{RD}^k(x) \right) \right], \\ F_{RM}^k(x) &= \min \left[\max \left(F_{RS}^k(x), F_{RP}^k(x), F_{RD}^k(x) \right) \right], \end{aligned} \quad (8)$$

Bulanık çıkarım sisteminden elde edilen çıktı, risk büyüklüğü parametresini karşıladığından riskin büyüklüğü, nütrosofik olasılık, nütrosofik şiddet ve nütrosofik tespit edilebilirlik değerlerine bağlı olarak hesaplanan üyelik dereceleri ile önemsiz (N), düşük (Mi), yüksek (Ma) ve kabul edilemez (C) olarak dört seviyeye ayrılarak hesaplanır. Önerilen yöntemde literatürde yer alan ve daha önce İlbar vd. [7] ve Cebi vd. [32] tarafından kullanılmış olan kural tabanı, tespit edilebilirlik değeri ile risk skoru arasında ters orantı bulunduğu dikkate alınarak Tablo 4'deki gibi düzenlenmiş ve bu çalışmada da kullanılmıştır.

Tablo 4. FMEA kural tabanı
(Fuzzy inference system for FMEA) [10, 33]

Olasılık	Şiddet	Tespit Edilebilirlik				
		VH	H	M	L	VL
VL	VL	N	N	N	N	Mi
	L	N	N	N	Mi	Mi
	M	N	N	Mi	Mi	Mi
	H	Mi	Mi	Mi	Mi	Mi
	VH	Mi	Mi	Mi	Ma	Ma
L	VL	N	N	N	Mi	Mi
	L	N	N	N	Mi	Ma
	M	N	Mi	Mi	Ma	Ma
	H	Mi	Mi	Ma	Ma	Ma
	VH	Mi	Mi	Ma	C	C
M	VL	N	N	Mi	Mi	Ma
	L	N	Mi	Mi	Ma	Ma
	M	Mi	Mi	Ma	Ma	Ma
	H	Mi	Ma	Ma	Ma	C
	VH	Mi	Ma	Ma	C	C
H	VL	N	N	Mi	Ma	Ma
	L	N	Mi	Mi	Ma	Ma
	M	Mi	Mi	Ma	Ma	C
	H	Mi	Ma	Ma	C	C
	VH	Ma	Ma	C	C	C
VH	VL	N	N	Mi	Ma	Ma
	L	N	Mi	Ma	Ma	C
	M	Mi	Ma	Ma	C	C
	H	Ma	Ma	C	C	C
	VH	Ma	C	C	C	C

Bulanık çıkarımın girdi parametrelerine bağlı olarak, çıktı parametresi olan risk büyüklüğü, doğruluk üyelik derecesi ($T_{RM}(x)$), kararsızlık üyelik derecesi ($I_{RM}(x)$) ve yanlışlık üyelik derecesi ($F_{RM}(x)$) dahil olmak üzere nütrosofik küme formatında elde edilir. Bu değerleri tek değere dönüştürmek için literatürdeki mevcut skor yöntemleri değerlendirilmiş ancak söz konusu formüllerin risk büyüklüğüne negatif bir etki yaptığı göz önünde bulundurulmuştur. Bu nedenle doğruluk üyelik derecesi ($T_{RM}(x)$), belirsizlik üyelik derecesi ($I_{RM}(x)$) ve yanlışlık üyelik derecesi ($F_{RM}(x)$) değerlerini tek değere dönüştürmek için Eş. 9'da verilen ve beta dağılımından esinlenerek türetilen yeni skor fonksiyonu formülü ($S(RM)$) kullanılır.

$$S(RM^k) = \frac{4 \cdot T_{RM}^k(x) + I_{RM}^k(x) + F_{RM}^k(x)}{6} \quad (9)$$

Olası riskli olaylar arasında sıralama yapmak için, risk büyüklüğünü keskin bir değere dönüştürmek gerekir. Bu işlem için Eş. 10'da verilen ağırlık merkezi yöntemi (Ross, 2004) ve Şekil 2'de verilen dilsel ölçek kullanılır [5].

$$RM_i = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i \mu_{RM}(y)}{\sum_{i=1}^n \mu_{RM}(y)} \quad (10)$$

2.3. Risk Değerlendirmesi (Risk Evaluation)

2.3.1. Risklerin sıralanması ve önceliklendirilmesi (Rate and prioritize risks)

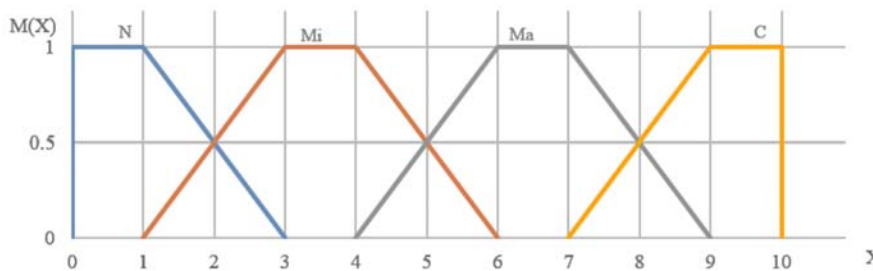
Risk büyüklüğü hesaplandıktan sonra riskler üç kategoriye ayrılarak listelenir:

Kategori 1 ($RM < 3.5$): Bu kategori riskin kabul edilebilir düzeyde olduğu ve herhangi bir işlem gerektirmediği anlamına gelir.

Kategori 2 ($3.5 \leq RM < 7$): Bu kategoride herhangi bir risk varsa bu, olasılığın veya şiddetin yüksek olduğu ve mevcut kontrol önlemlerinin yeterli olmadığı anlamına gelir. Bu durumda riskleri kabul edilebilir bir düzeye indirmek için kontrol önlemleri uygulanmalıdır.

Kategori 3 ($RM \geq 7$): Bu kategori, ciddi bir olayın meydana gelmek üzere olduğu anlamına gelir. Üretim faaliyetleri derhal durdurulmalı ve potansiyel riskler ortadan kaldırılmalı veya kabul edilebilir bir düzeye indirilinceye kadar karşı eylemler doğrudan alınmalıdır. Riskin ortadan kaldırılması, yapılamıyor ise kabul edilebilir seviyeye indirilmesi için öncelikle toplu korunma önlemlerinin uygulanması sağlanır. Bu aşamada aşağıdaki risk kontrol hiyerarşisi uygulanır;

- Tehlike veya tehlike kaynaklarının elimine edilmesi,
- Tehlikelinin, tehlikeli olmayan veya daha az tehlikeli prosesler, operasyonlar, malzemeler veya ekipman ile yer değiştirilmesi,



Şekil 2. Risk Büyüklüğü için üyelik dereceleri (Membership function for the linguistic scale of risk magnitude)

- Tehlike kaynağı ile çalışanın bir araya gelmesinin önlenmesine yönelik mühendislik kontrolleri uygulanması,
- Çalışma biçiminin değiştirilerek maruziyetin azaltılması ya da eğitim gibi idari kontroller alınması,
- Yeterli kişisel koruyucu donanım kullanılması.

2.3.2. Risk kıyaslaması (Risk comparison)

Bu bölüm önerilen yöntemle, mevcut yöntemlerin gerekli durumlarda kıyaslaması aşamasını içerir. Bu sayede analiz doğruluk ve geçerliği sağlanmış olur, herhangi bir tutarsızlık görülürse analiz tekrarlanabilir.

2.4. İzleme ve Gözden Geçirme (Monitoring and Review)

Tanımlanan risklere karşı riski ortadan kaldıran ya da risk büyüklüğünü kabul edilebilir seviyeye indiren kontrol önlemleri çalışma ortamına uygulanır. Belirlenen kontrol tedbirlerinin uygulanması gerçekleştirildikten sonra tekrar risk skoruna bakılır. Risk skoru kabul edilebilir risk seviyesinin üzerine çıktığında ise tüm adımlar tekrarlanır.

2.5. Belgelendirme ve Sürekli İyileştirme (Documentation and Continuous improvement)

Belgelendirme sürecin tüm aşamalarında gerçekleştirilir. Düzenli bir raporlama yapılır ve belirlenmiş olan kontrol önlemlerinin riski kabul edilebilir seviyede tutacak iyileşmeye sahip olup olmadığı ve

kontrollerin etkinliği sürekli izlenir. Gerekli durumlarda ise risk değerlendirilmesi güncellenir.

3. Uygulama (Application)

Sosyal Güvenlik Kurumu 2019 yılı verilerine göre ise “NACE rev.2 sınıflandırmasına göre, 20-Kimyasalların ve kimyasal ürünlerin imalatı” alanında çalışan sayısının, 4/a kapsamındaki iş yerleri ile zorunlu sigortalı olarak çalışan sayısına oranı %0,61 iken iş kazası istatistiklerine bakıldığında kaza geçiren sayısının toplam çalışan sayısına oranının %90 olduğu Tablo 5’de görülmektedir. Bu sektörde yaşanan iş kazalarının toplam iş kazası oranına göre fazla olmasından yola çıkılarak, öncelikli olarak belirlenmiş uygulama ise, plastik imalatında kullanılan stiren ve fenolün sentezinde başlangıç maddesi, ilaç, deri ve boya endüstrisi gibi sanayide geniş bir kullanım alanına sahip bir ürün olarak kullanılan benzen üretim prosesi için gerçekleştirilmiştir. Benzen üretimine ilişkin blok akış diyagramı ve benzen üretim prosesi sırasıyla Şekil 3 ve Şekil 4’de verilmiştir.

3.1. Risk Tanımlanması (Risk Identification)

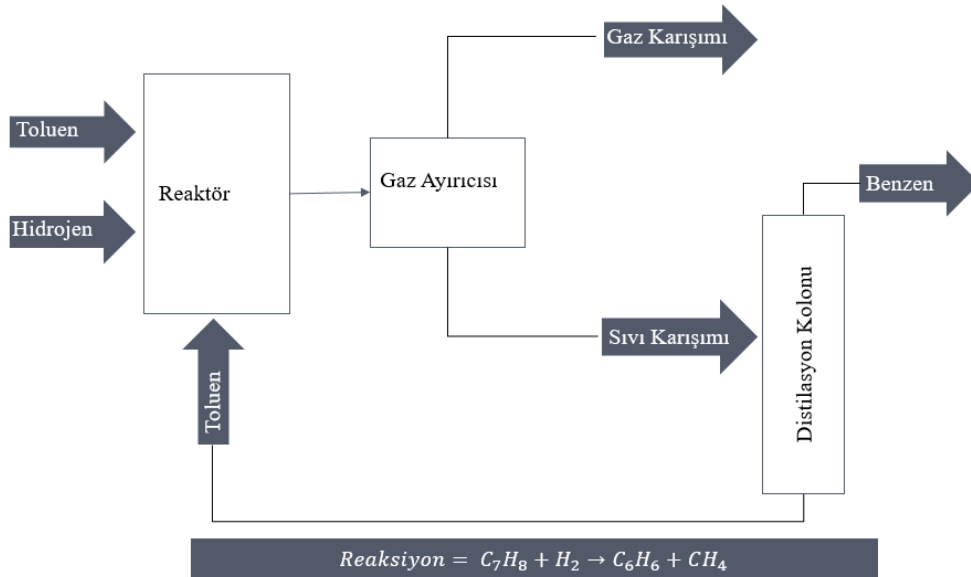
3.1.1. Sektöre yönelik fonksiyonların ve hata türlerinin belirlenmesi (Determination of functions and failure modes for the sector)

Fonksiyon olarak uygulama için Şekil 3’te blok akış diyagramında gösterilen, reaksiyonun gerçekleşmesi için blok akış diyagramında temel olarak gösterilen reaktör (R), gaz ayırıcı (G), distilasyon kolonu (D) seçilmiştir.

Tablo 5. Kimyasalların ve kimyasal ürünlerin imalatında iş kazası dağılımı [33]
(Distribution of occupational accidents at production of chemicals and chemical products)

Faaliyet Grupları (*)	İş Kazası			Toplam Çalışan Sayısı
	Erkek	Kadın	Toplam	
20-Kimyasalların ve kimyasal ürünlerin imalatı	3269	525	3794	88023
Toplam	337108	85355	422463	14314313
Oran	0.97%	0.62%	0.90%	0.61%

* Sosyal Güvenlik Kurumu 2019 yılı NACE rev.2 sınıflandırma verilerinden alınmıştır



Şekil 3. Toluenin hidrodealkilasyonu yoluyla benzen üretimi blok akış diyagramı [34]
(Block flow process diagram for the production of benzene)

Tablo 6. Riskler ve kontrol noktaları (Risks and control points)

Kod	Risk	Kontrol Noktası	R	G	D
R1	Elektrik çarpması sonucu ciddi yaralanma /ölüm	Tüm cihazların periyodik muayeneleri ve bakımları mevzuattaki şartlara uygun şekilde yapılmalı	RC1	GC1	DC1
		Sistem üzerinde kaçak akım rölesi ve gövde topraklaması bulunmalı	RC2	GC2	DC2
		Bakım onarıma başlamadan önce cihazın enerjisi kesilerek etiketleme-kilitleme uygulanmalıdır.	RC3	GC3	DC3
R2	Kimyasal Sızıntı, Sıçramalar sonucu yaralanma /meslek hastalığı	Havalandırma sisteminin çalışıp çalışmadığı kontrol edilmeli	RC4	GC4	
		Operatöre uygun iş kıyafeti (kimyasala dayanıklı eldiven, gözlük, ayakkabı ve önlük) verilmeli	RC6	GC5	DC4
		Çalışanlara kimyasallarla çalışma, depolama, sızıntı ya da dökülme gibi acil durumlarda yapacaklar konusunda eğitim verilmeli	RC5	GC6	DC5
R3	Patlama/ yangın sonucu yaralanma ölüm	Cihaz bağlantılarının düzgün yapılıp yapılmadığı, bağlantılarda bir kaçak olup olmadığı kontrol edilmeli	RC7	GC7	DC6
		Akış, sıcaklık ve basınç değerlerinin ani değişimlerde sistemde acil durdurma yapılacağı konusunda çalışanlara eğitim verilmeli	RC8	GC8	DC7
		Reaksiyonda oluşmuş ürünü diğer kısımlara gönderecek vana ve pompaların ve ham madde besleme pompasının kontrolü reaktörün çalışmasını gözetleme camından (geyç) takip edilmeli	RC9		
		Kontrol vanaları, sıcaklık göstergeleri, seviye ölçer cihazları vb. kontrol edilmeli, sınır değerler üzerinde olup olmadığına bakılmalı	RC10		
		Yangın söndürme sistemi ve malzemelerinin (sıvı hidrokarbon türevli B tipi yangınlara uygun), köpük, sıvı hidrokarbon söndürücüler, kuru kimyevi tozlar, boğucu inert gazlar, yavaşlatıcı bentler vb. bulunup bulunmadığı kontrol edilmeli	RC11	GC9	DC8
		Tesis içerisinde kullanılan tüm cihazlar (alarm, detektör vb.) alev sızdırmaz (exproof) malzemeden olmalı	RC12	GC10	DC9
		Yangın ekipmanı, acil durdurma butonu vb. acil durumlarda kullanılacak olan ekipmanlar çalışır durumda olmalı	RC13	GC11	DC10
Operatörlere taşınabilir gaz detektörleri verilmeli	RC14	GC12	DC11		

3.1.2. Hata türlerinin tespiti için kontrol noktalarının belirlenmesi (Defining the control points to determine failure modes)

Bir önceki adımda belirlenen her fonksiyon için risk değerlendirmesi ekibinde yer alan kişilerin de görüşleri alınarak hata türleri, hata türlerinin sonuçları ve bu hataların önlenmesi için uygulanması gereken kontrol noktaları tanımlanmıştır. Tanımlanan kontrol noktaları Tablo 6'da verilmiştir.

3.2. Risk Analizi (Risk Analysis)

3.2.1. Kontrol noktaları için parametre değerinin atanması (Defining values for each control point)

Her tehlike kaynağına ait risklerin belirlenmesinde FMEA parametreleri kullanılmıştır. Uygulamada kullanılan veri seti, Tablo 2'de verilen soruların her bir kontrol noktası için üç uzmana sorulması sonucunda elde edilen ortak yargıyı temsil etmektedir. Uzman yargılarındaki kararsızlığı tanımlamak için ise Tablo 3 kullanılmıştır. Örneğin, Reaktördeki RC14-operatöre taşınabilir gaz detektörü verilmesi kontrol noktası için olasılık değerlendirmesine bakarsak, ilgili kontrol önlemi alınmadıysa, riskin gerçekleşme olasılığı yani doğruluk değeri (T) yüksek (H); ilgili kontrol önlemi alındıysa, riskin gerçekleşme olasılığı yani yanlışlık (F) değeri ise düşük (L) olarak değerlendirilmiş olup, kararsızlığı (I) Tablo 3'e göre orta (M) olarak hesaplanmıştır. Bu durumda RC14 kontrol noktası için olasılık sütununda $P(T, I, F)$ değerleri sırasıyla $P(H, M, L)$ olarak yazılmıştır. Her bir kontrol noktasının kazaya sebebiyet verme olasılığı

$P(T, I, F)$, olası kaza sonunda ortaya çıkacak şiddet $S(T, I, F)$, ve kazanın önceden tespit edilebilirlik $D(T, I, F)$ derecesine ilişkin uzman görüşlerini yansıtan dilsel ifadeler Tablo 7'de verilmiştir.

3.2.2. Dilsel değişkenlere ait bulanık üyelik derecelerinin elde edilmesi (Obtaining membership degrees of the fuzzy numbers)

Tablo 7'de verilen uzman yargıları Tablo 1 yardımıyla bulanık sayılara dönüştürülerek her bir dilsel ifadeye ait üyelik dereceleri hesaplanır. Tablo 8'de RC14 kontrol noktası için örnek hesaplama verilmiştir. Buna göre doğruluk, kararsızlık ve yanlışlık değerleri için uzman cevaplarının üyelik dereceleri ayrı ayrı hesaplanır. Örneğin, RC14 için olasılık değerleri $P(H, M, L)$ olduğundan H için hesaplanan üyelik derecesi Şekil 5'deki gibi 0,5; 1; 0,5 olarak belirlenmiştir. Tablo 9'de dilsel değerlendirmeye ait üyelik dereceleri verilmiştir.

3.2.3. Nötrosofik küme tabanlı çıkarım sistemi ile risk derecelerinin hesaplanması (Calculation of risk magnitudes with fuzzy inference system)

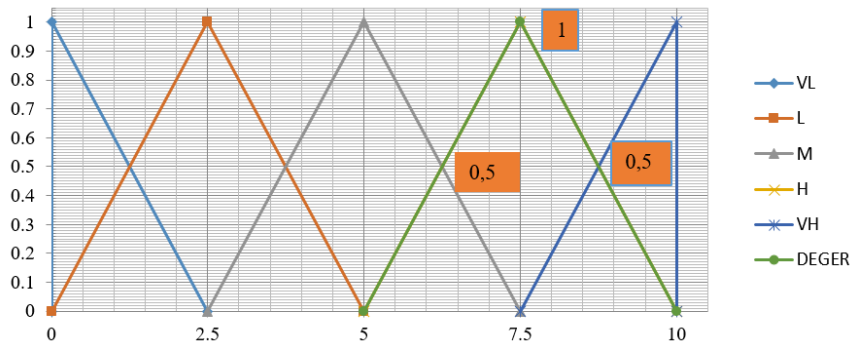
Her bir kontrol noktasına ait riskin büyüklüğü, ayrı ayrı hesaplanan olasılık, şiddet ve tespit edilebilirlik girdi değerleri ve nötrosofik çıkarım sistemi kullanılarak nötrosofik formda elde edilmiştir. Ardından her bir kontrol noktasına ait risk büyüklüğü Eş. 9 ve Eş. 10 yardımıyla netleştirilmiştir. Hesaplama sonuçları Tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 7. Nötrosofik olasılık, nötrosofik şiddet ve nötrosofik tespit edilebilirlik değerleri (Neutrosophic probability, severity and detectability parameters)

Fonksiyon	Hata Türü Kodu	Kontrol Noktası	Olasılık (P)			Şiddet (S)			Tespit edilebilirlik (D)		
			T	I	F	T	I	F	T	I	F
Reaktör	R1	RC1	M	H	L	H	VH	H	VH	M	M
	R1	RC2	M	H	L	H	M	L	VH	M	M
	R1	RC3	M	H	L	M	VH	M	VH	VL	VH
	R2	RC4	H	VH	H	H	M	L	VH	H	L
	R2	RC5	H	VH	H	H	VL	VL	VH	VL	VH
	R2	RC6	H	VH	H	H	H	M	VH	H	L
	R2	RC7	VH	VL	VL	VH	VL	VL	VH	M	M
	R3	RC8	H	H	M	H	H	M	VH	H	L
	R3	RC9	VH	H	H	VH	VH	VH	VH	M	M
	R3	RC10	VH	H	H	VH	VH	VH	VH	H	L
	R3	RC11	H	VH	H	H	H	M	VH	L	H
	R3	RC12	H	H	M	VH	H	H	VH	M	M
	R3	RC13	VH	M	M	VH	M	M	VH	M	M
	R3	RC14	H	M	L	H	VH	H	VH	VL	VH
Gaz Ayırıcı	R1	GC1	M	H	L	H	VH	H	VH	M	M
	R1	GC2	M	VL	VL	H	VL	VL	VH	M	M
	R1	GC3	M	VL	VL	M	VH	M	VH	VL	VH
	R3	GC4	H	M	L	H	M	L	VH	H	L
	R2	GC5	VH	VL	VL	VH	VL	VL	VH	M	M
	R2	GC6	H	VH	H	H	H	M	VH	H	L
	R2	GC7	VH	VH	VH	VH	VL	VL	VH	VL	VH
	R2	GC8	VH	VH	VH	VH	H	H	VH	M	M
	R3	GC9	H	VH	H	H	H	M	VH	L	H
	R3	GC10	H	H	M	H	H	M	VH	M	M
	R3	GC11	H	H	M	H	M	L	VH	M	M
	R3	GC12	H	VL	VL	VH	VH	VH	VH	VL	VH
Distilasyon Kolonu	R1	DC1	M	H	L	H	VH	H	VH	M	M
	R1	DC2	M	VL	VL	H	VL	VL	VH	M	M
	R2	DC3	M	VL	VL	M	VH	M	VH	VL	VH
	R2	DC4	H	VH	H	H	VL	VL	VH	VL	VH
	R2	DC5	M	VH	M	H	H	M	VH	H	L
	R3	DC6	VH	VL	VL	VH	VL	VL	VH	M	M
	R3	DC7	H	VL	VL	H	VL	VL	VH	H	L
	R3	DC8	M	VH	M	H	H	M	VH	L	H
	R3	DC9	M	H	L	H	H	M	VH	M	M
	R3	DC10	H	H	M	H	M	L	VH	M	M
	R3	DC11	M	VL	VL	VH	VH	VH	VH	VL	VH

Tablo 8. RC14 kontrol noktası için örnek risk skoru hesaplaması (Example calculation risk magnitude for checklist RC14)

	Olasılık			Şiddet					Tespit Edilebilirlik					RM					
	VL	L	M	H	VH	VL	L	M	H	VH	VL	L	M	H	VH	N	Mi	M	C
<i>T</i>			0,5	1	0,5			0,5	1	0,5				0,5	1	0	1	0,5	0,5
<i>I</i>		0,5	1	0,5					0,5	1	1	0,5				0	0,5	1	0,5
<i>F</i>	0,5	1	0,5					0,5	1	0,5				0,5	1	0,5	0,5	0,5	0



Şekil 5. RC14 kontrol noktası için üyelik derecesi hesaplama (Example calculation of membership degree for checklist RC14)

Tablo 9. Risk skorunun hesaplanması (Risk magnitude for proposed method)

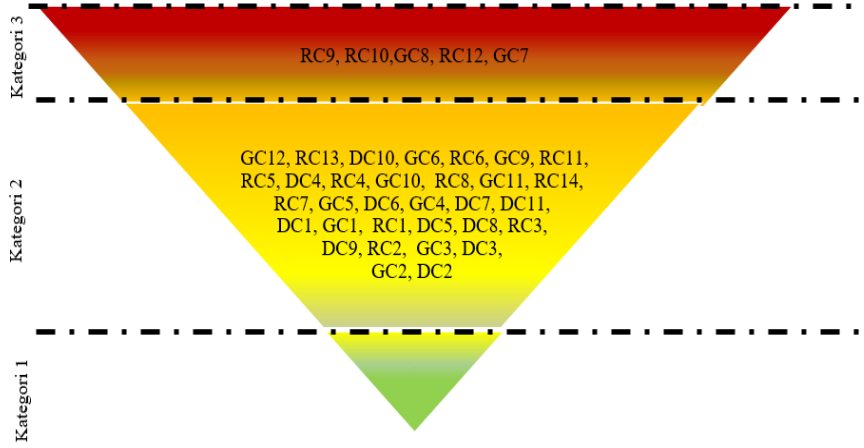
Risk	Kontrol Noktası	N			Mi			Ma			C			Tek Değere Dönüştürme				Risk Skoru
		T	I	F	T	I	F	T	I	F	T	I	F	N	Mi	M	C	
R3	RC9	0	0	0	0,5	0	0	1	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0,000	0,333	0,833	0,583	7,43
R3	RC10	0	0	0	0,5	0,5	0	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,000	0,417	0,917	0,500	7,14
R2	GC8	0	0	0	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0,000	0,500	0,833	0,583	7,13
R3	RC12	0	0	0	0,5	0,5	0,5	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,000	0,500	0,917	0,500	7,00
R2	GC7	0	0	0	0,5	0	0,5	1	1	0	0,5	0,5	0	0,000	0,417	0,833	0,417	7,00
R3	GC12	0	0	0	0,5	0,5	0,5	1	1	0	0,5	0,5	0	0,000	0,500	0,833	0,417	6,86
R3	RC13	0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,167	0,500	0,917	0,500	6,52
R3	DC10	0	0	0	1	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,000	0,833	0,583	0,500	6,48
R2	GC6	0	0	0	1	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,000	0,833	0,583	0,500	6,48
R2	RC6	0	0	0	1	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,000	0,833	0,583	0,500	6,48
R3	GC9	0	0	0,5	1	0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0,083	0,750	0,500	0,583	6,48
R3	RC11	0	0	0,5	1	0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0,083	0,750	0,500	0,583	6,48
R2	RC5	0	0	0	1	0	0,5	0,5	1	0	0,5	0,5	0	0,000	0,750	0,500	0,417	6,40
R2	DC4	0	0	0	1	0,5	0,5	0,5	1	0	0,5	0,5	0	0,000	0,833	0,500	0,417	6,29
R2	RC4	0	0,5	0	1	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,083	0,833	0,583	0,500	6,25
R3	GC10	0	0	0,5	1	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,083	0,833	0,583	0,500	6,25
R3	RC8	0	0	0,5	1	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,083	0,833	0,583	0,500	6,25
R3	GC11	0	0	0,5	1	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0	0,083	0,833	0,583	0,417	6,09
R3	RC14	0	0	0,5	1	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0	0,083	0,833	0,583	0,417	6,09
R2	RC7	0	1	0,5	0,5	0,5	0,5	1	0	0	0,5	0	0	0,250	0,500	0,667	0,333	5,86
R2	GC5	0	1	0,5	0,5	0,5	0,5	1	0	0	0,5	0	0	0,250	0,500	0,667	0,333	5,86
R3	DC6	0	1	0,5	0,5	0,5	0,5	1	0	0	0,5	0	0	0,250	0,500	0,667	0,333	5,86
R3	GC4	0	0,5	0,5	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0	0,167	0,917	0,500	0,333	5,57
R3	DC7	0	1	0,5	1	0	0	0,5	0	0,5	0,5	0	0	0,250	0,667	0,417	0,333	5,50
R3	DC11	0	0	0	1	0,5	0,5	0,5	1	0	0	0,5	0	0,000	0,833	0,500	0,083	5,41
R1	DC1	0,5	0	0,5	1	0	0,5	0,5	0,5	0,5	0	1	0,5	0,417	0,750	0,500	0,250	4,91
R1	GC1	0,5	0	0,5	1	0	0,5	0,5	0,5	0,5	0	1	0,5	0,417	0,750	0,500	0,250	4,91
R1	RC1	0,5	0	0,5	1	0	0,5	0,5	0,5	0,5	0	1	0,5	0,417	0,750	0,500	0,250	4,91
R2	DC5	0,5	0	0,5	1	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0	0,5	0,5	0,417	0,833	0,583	0,167	4,75
R3	DC8	0,5	0	0,5	1	0	0,5	0,5	0,5	0,5	0	1	0	0,417	0,750	0,500	0,167	4,68
R1	RC3	0,5	0	0,5	1	0	0,5	0,5	0,5	0,5	0	1	0	0,417	0,750	0,500	0,167	4,68
R3	DC9	0,5	0	0,5	1	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0	0,5	0	0,417	0,833	0,583	0,083	4,52
R1	RC2	0,5	0	0,5	1	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0	0,5	0	0,417	0,833	0,583	0,083	4,52
R2	DC3	0,5	0	0,5	1	0,5	0,5	0,5	1	0	0	0,5	0	0,417	0,833	0,500	0,083	4,41
R1	GC3	0,5	0	0,5	1	0,5	0,5	0,5	1	0	0	0,5	0	0,417	0,833	0,500	0,083	4,41
R1	DC2	0,5	1	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0	0	0	0	0	0,583	0,833	0,333	0,000	3,57
R1	GC2	0,5	1	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0	0	0	0	0	0,583	0,833	0,333	0,000	3,57

3.3. Risk Değerlendirmesi (Risk evaluation)

3.3.1. Riskli kontrol noktalarının sıralanması ve önceliklendirilmesi (Rate and prioritize risky control points)

Tanımlanan riskler bir önceki adımda hesaplanan risk büyüklüğüne bağlı olarak üç kategoriye ayrılır. Risklere ait kategoriler 2.3.1’de açıklanmış olup, uygulamadaki riskler Şekil 6’daki gibi kategorilere ayrılarak sıralanmıştır. Benzen üretimi işleminde reaktöre gelen ve reaktörden giden akışların basınçları önemlidir. İki akım arasındaki

basınç farkı, reaktör boyunca basınç düşüşünü verir. Bu nedenle en riskli kontrol noktaları arasında RC10 yer almaktadır. Benzen işleminde, reaktöre besleme işleminin geri kalanından önemli ölçüde daha sıcaktır ve yangın patlama riski daha yüksektir. Reaksiyon ekzotermiktir ve reaktör atığı sıcaklık değeri dikkatle izlenmelidir. Risk puanı sıralamasına bakıldığında RC9 kontrol noktasının en yüksek skoru almış olması da bu açıklamayı doğrulamaktadır. Tüm bu sebeplerle benzen üretim tesisinde reaktör, en riskli ekipman olarak yer almaktadır. Yine sistemdeki diğer önemli ekipman gaz ayırıcıdır. Gaz ayırıcı için en önemli kriter basınçtır. Basınç ve sıvı seviyesinin



Şekil 6. Riskli kontrol noktalarının sıralanması (Ranking of risky control points)

Tablo 10. FMEA için dilsel değişkenler [35] (Linguistic variable for FMEA parameters)

Tespit Edilebilirlik		Olasılık		Şiddet	
Değer	Dilsel İfade	Değer	Dilsel İfade	Değer	Dilsel İfade
10	Tespit Edilemez	10	Çok Yüksek	10	Çok Yüksek
9	Çok Düşük	9	Yüksek	9	Yüksek
8	Düşük	8	Orta	8	Orta
7		7	Düşük	7	Düşük
6	Orta	6	Çok Düşük	6	Çok Düşük
5		5		5	
4	Yüksek	4		4	
3		3		3	
2	Çok Yüksek	2		2	
1		1		1	

kesin ölçümü, gaz ayırıcının etkin bir şekilde kullanılmasını ve yangın, patlama, sızıntı gibi risklerin azalmasını sağlar. Bu sebeple uygulamada 3. Kategori riskler arasında GC8 ve GC7 yer almaktadır.

3.3.2. Risk kıyaslama (Risk comparison)

Bu adımda önerilen yöntemden elde edilen sonuçlar hem klasik FMEA hem de Tip 1 Bulanık FMEA yönteminden elde edilen sonuçlarla kıyaslaması verilecektir. Klasik FMEA yöntemi ile hesaplama yapılırken Tablo 7'de verilen uzmanlara ait dilsel değerlendirmeler. Tablo 10'da sunulan klasik FMEA ölçeği kullanılarak sayısallaştırılmıştır. Her üç yöntemden elde edilen sonuçlara ilişkin karşılaştırma Tablo 11'de verilmiştir.

Örneğin, Tablo 11'e göre önerdiğimiz yöntem RC12 kodlu kontrol noktasını 6, RC11 nolu kontrol noktasını ise 12'inci sırada hesaplamıştır. Oysa klasik FMEA hesabında aynı kontrol noktaları sırasıyla 11 ve 22'inci sırada yer almıştır. Bunun sebebi her iki kontrol noktasındaki olasılık ve şiddet değerlerine bakıldığında kararsızlık (I) ve yanlışlık (F) değerlerinin istenen en düşük seviye olan VL'a ulaşamamış olması, tespit edilebilirliğinin ise yüksek olmasıdır. Bu durumda, kararsızlık değeri arttıkça önerilen yöntemin ilgili kontrol noktasını risk sıralamasında öne aldığı söylenebilir. Tam tersi duruma ise RC7, GC5 ve DC6 numaralı kontrol noktaları örnek verilebilir. Bu üç kontrol noktası hem klasik FMEA hem de bulanık FMEA ile yapılan hesaplamalarda önerilen yöntemde göre daha öncelikli risk

olarak değerlendirilmiştir. Bu üç kontrol noktasının ortak özelliği ise önlem alındıktan sonraki olasılık ve şiddet değerlerinin uzmanlar tarafından VL olarak tanımlanmış olmasıdır. Diğer yöntemler, önlem alındıktan sonraki durumu dikkate almadığından adı geçen kontrol noktalarını önerilen yöntemde göre daha öncelikli olarak değerlendirmektedir.

Özetle, önerilen yöntem ile diğer iki yöntem arasında risk sıralamasında farklılıklar oluşmasının sebepleri, önerilen yöntemin kararsızlığa / belirsizliğe neden olan aşağıdaki durumları dikkate almasıdır:

- Bir kontrol noktasındaki hatanın tespit edilebilirliği, makinenin rutin çalışması sırası ile denetim sırası arasında farklılık gösterir.
- Olası bir kazanın şiddeti, ilgili kontrol önlemi alınmış olsa bile tamamen ortadan kaldırılamayabilir.
- Bir kazanın gerçekleşme olasılığı, ilgili kontrol önlemleri alınmış olsa bile tamamen sıfırlanamayabilir.

3.4. İzleme ve Gözden Geçirme (Monitoring and Review)

Bir kimya tesisindeki en tehlikeli olay yangın ve patlamadır. Yangın ortaya çıkmadan güvenlik önlemleri alınmalıdır. Alınan bu önlemler sadece çalışanları tehlikeden uzak tutmaz ayrıca üretimin düşmesi, hizmette aksamalar, ödenecek olan tazminatlar gibi maddi kayıplar;

Tablo 11. Nötrosifik FMEA'nın diğer yöntemler ile karşılaştırılması (Comparison of neutrosophic FMEA with other methods)

Kontrol Noktası	Nötrosifik FMEA Risk Kategorisi	Nötrosifik FMEA Risk Puanı	Nötrosifik FMEA Risk Sıralaması	Fuzzy FMEA Risk Puanı	Fuzzy FMEA Risk Sıralaması	Klasik FMEA Risk Puanı	Klasik FMEA Risk Sıralaması
RC9	Kategori 3	7,43	1	7,00	1	162	3
RC10	Kategori 3	7,14	2	7,00	2	180	1
GC8	Kategori 3	7,13	3	7,00	3	162	4
RC12	Kategori 3	7,00	4	7,00	4	126	11
GC7	Kategori 3	7,00	5	7,00	5	112	12
GC12	Kategori 2	6,86	6	7,00	6	144	7
RC13	Kategori 2	6,52	7	7,00	7	160	6
DC10	Kategori 2	6,48	8	6,25	11	112	13
GC6	Kategori 2	6,48	9	6,25	12	112	14
RC6	Kategori 2	6,48	10	6,25	13	56	24
GC9	Kategori 2	6,48	11	6,25	14	49	27
RC11	Kategori 2	6,48	12	6,25	15	49	28
RC5	Kategori 2	6,40	13	6,25	16	128	9
DC4	Kategori 2	6,29	14	6,25	17	56	25
RC4	Kategori 2	6,25	15	6,25	18	128	10
GC10	Kategori 2	6,25	16	6,25	19	112	15
RC8	Kategori 2	6,25	17	6,25	20	64	23
GC11	Kategori 2	6,09	19	6,25	22	112	16
RC14	Kategori 2	6,09	18	6,25	21	49	29
RC7	Kategori 2	5,86	21	7,00	9	180	2
GC5	Kategori 2	5,86	20	7,00	8	162	5
DC6	Kategori 2	5,86	22	7,00	10	144	8
GC4	Kategori 2	5,57	23	6,25	23	112	17
DC7	Kategori 2	5,50	24	6,25	24	112	18
DC11	Kategori 2	5,41	25	5,00	25	54	26
DC1	Kategori 2	4,91	26	4,00	26	84	19
GC1	Kategori 2	4,91	27	4,00	27	84	20
RC1	Kategori 2	4,91	28	4,00	28	84	21
DC5	Kategori 2	4,75	29	4,00	29	84	22
DC8	Kategori 2	4,68	30	4,00	30	48	30
RC3	Kategori 2	4,68	31	4,00	31	36	36
DC9	Kategori 2	4,52	32	4,00	32	48	31
RC2	Kategori 2	4,52	33	4,00	33	48	32
DC3	Kategori 2	4,41	35	4,00	35	42	35
GC3	Kategori 2	4,41	34	4,00	34	36	37
DC2	Kategori 2	3,57	36	4,00	36	48	33
GC2	Kategori 2	3,57	37	4,00	37	48	34

imaj zedelenmesi, motivasyon düşüklüğü gibi manevi kayıpları da azaltarak paradan ve zamandan tasarruf sağlar. Bu durumda amaç, bir işyerinde kaza meydana gelmeden gerekli tedbirlerin alınması olası kazanın önlenmesi açısından önemlidir. Bu kazaların en aza indirilmesi amacıyla bu çalışmada örnek alınan cihazlardaki olası riskler için öncelikli olan kontrol noktaları belirlenmiştir. Belirlenen kontrol noktalarının güncel mevzuatta belirtilen, işyerinin taşınması ya da kullanılan teknoloji veya ekipmanların değişmesi, işyerinde iş kazası veya ramak kala olay yaşanması, meslek hastalığı meydana gelmesi, çalışma ortamındaki sınır değerlerle ilgili değişiklik olması, çalışma ortamının etkilenebileceği yeni tehlikenin ortaya çıkması ve benzeri durumlarda yenilenmesi gerekmektedir.

3.5. Belgelendirme ve Sürekli İyileştirme (Documentation and Continuous Improvement)

Önlemler alındıktan sonra faaliyetler tekrar kontrol edilmeli, bunun sonucunda mevcut riskin ortadan kaldırılamadığı durumlarda riskin derecesi mümkün olduğunca azaltılmaya çalışılmalıdır. Tüm bunların yanı sıra iş sağlığı ve güvenliği çalışmalarında başarılı olunması için önleyici yaklaşımın tüm personele benimsetilmesi ve bu çalışmalara

herkesin katılımının sağlanması, iş güvenliği eğitimlerinin her kademedede sık sık yapılması gerekmektedir.

4. Sonuçlar (Conclusions)

İş kazalarının önlenmesinde risk analizinin etkin bir şekilde gerçekleştirilmesi önemlidir. Bu nedenle literatürde risk değerlendirme amacıyla kullanılan çeşitli yaklaşımlar mevcuttur. Ancak geleneksel yöntemler yalnızca mevcut duruma yönelik risk değerlendirmesi yapar ve kontrol önleminin alınmasıyla elde edilecek durumu dikkate almazlar. Diğer bir ifadeyle bu yöntemler risk analizinde mevcut durum ve artık riski birlikte eş zamanlı olarak ele almazlar. Bu durum uygulanan kontrol tedbirine ilişkin bir belirsizliğin ve/veya kararsızlığın oluşmasına neden olur. Bu çalışmada uzman değerlendirmelerinden ya da riskin tanımlandığı koşullardan kaynaklanan belirsizlikleri ve/veya kararsız durumları dikkate almak amacıyla nötrosifik küme tabanlı FMEA yöntemi literatüre ilk kez önerilmiştir. Önerilen yöntemle birlikte olasılık, şiddet ve tespit edilebilirlik parametreleri nötrosifik küme tanımında kullanılan doğruluk (T), kararsızlık (I) ve yanlışlık (F) üyelik fonksiyonlarıyla tanımlanmıştır. Olasılık ve şiddet değerlendirmeleri

için T üyelik fonksiyonu mevcut durumda ilgili riskin gerçekleşme olasılığı ve gerçekleştiğinde ortaya çıkacak şiddetin değerlendirilmesinde kullanılırken, F üyelik fonksiyonu gerekli kontrol önleminin alınmasının ardından ilgili riskin ortaya çıkma ihtimali ve ortaya çıktığında oluşacak şiddeti tanımlamak için kullanılmaktadır. Tespit edilebilirlik parametresi için T, denetim faaliyeti sırasında riskin öngörülebilirliğini tanımlamada kullanılırken, F üyelik fonksiyonu riskin rutin çalışma esnasında tespit edilebilme derecesini değerlendirmek için kullanılır. Her üç parametre için I değeri ise T ve F parametreleri arasındaki tutarlılığa bağlı olarak belirlenmektedir. Nötrosifik kümelerin bu çalışmada kullanılması sayesinde hem kontrol noktasındaki mevcut durum hem de önlem alındıktan sonra oluşacak ortamın eş zamanlı olarak değerlendirilmesi sağlanarak risk ortamındaki belirsizlik ve kararsızlıktan kaynaklanan eksikliğin önüne geçilmeye çalışılmıştır. Çalışmamızda ayrıca risk büyüklüğünün elde edilmesinde klasik FMEA daki çarpım işleminin yerine bulanık çıkarım işlemi kullanılmıştır. Eğer- İse (If-Then) kural yapısı kullanılarak Mamdani'nin matematiksel işlemleri nötrosifik kümelerle uyarlanmıştır. Çalışma kapsamında ayrıca alışılmış nötrosifik küme uygulamalarının dışında ilk kez I üyelik fonksiyonu T ve F parametrelerine bağlı olarak tanımlanmıştır. Önerilen yöntem kimya sanayisinde benzen üretim sürecine uygulanmıştır. Uygulamadan elde edilen sonuçlar hem geleneksel FMEA hem de bulanık FMEA yönteminden elde edilen çıktılarla kıyaslanmıştır. Önerilen yöntemde, risk puanı hesaplanırken hem kontrol önlemleri alınmadan hem de alındıktan sonraki olasılık ve şiddet değerinin birlikte analiz edilmesi sayesinde, her yüksek riskli durumun aynı olmadığı sonucuna varılmıştır. Diğer bir ifadeyle, diğer yöntemlerle analiz edildiğinde yüksek riskli seviyede kabul edilen iki durum, önerilen yöntemle analiz edildiğinde, bu iki riskli durum arasında belirgin bir farklılığın olduğunu göstermiştir. Önerilen yöntem, önlem alındıktan sonra bile kabul edilebilir risk düzeyine indirgenemeyecek riskli durumu önlem alındıktan sonra kabul edilebilir risk düzeyine indirgenemeyecek riskli durumdan daha öncelikli olduğunu ortaya koymuştur.

Çalışmada önerilen risk modelinin işletmelere sağlayacağı kazanımlar şunlardır;

- Önerilen yöntemin yapısında kullanılan nötrosifik küme ve bulanık çıkarım sisteminin kullanımı ile risk değerlendirme sürecinde yaşanan belirsizliklerin daha tutarlı bir şekilde analiz edilmesi ve örtülü risklerin açığa çıkması hususlarında karar vericiye destek sağlayacaktır.
- Geliştirilen yöntemle dayalı işletmelerin kuracakları karar destek sistemi, risk değerlendirme sürecine aktif çalışan katılımını sağlayarak iş güvenliği uzmanlarının problemler karşısında çözüm üretme ve süreci takip etme için daha etkin çalışmalarını sağlayacaktır.
- Sürecin etkin takibi ve kontrolü, işletmede yaşanan iş kazalarının ve ramak kala olaylarının sıfırlanmasında işletme yönetimine yardımcı olacaktır. Böylece yaşanan iş kazaları nedeniyle hem çalışanların sağlığı hem de yapılan işin güvenliği korunarak işletmenin iş kazası nedeniyle verimliliğin düşmesi, maliyetlerin artması ve imaj kaybı yaşamaması önenebilecektir.
- İleride yapılacak çalışmalarda, hesaplama sürecini kolaylaştırmak için bilgisayar tabanlı bir karar destek sistemi geliştirilmesi önerilmektedir. Bunun yanı sıra karar destek sistemi veri tabanı oluşturulabilir ve kontrol noktaları belirlenerek kontrol listeleri oluşturulabilir. Oluşturulacak karar destek sistemi, işletmeye profesyonel bir destek hizmeti sağlayarak, bu listelerin periyodik olarak kullanılması, işlerin güvenli bir şekilde yürütülmesinde çalışanlar, yöneticiler ve iş güvenliği uzmanları için bir denetim aracı olarak kullanılabilir. Bu sayede iş güvenliği uzmanlarının iş yükü azalarak zamanlarını daha verimli bir şekilde geçirmesi,

işverenin de zaman ve maliyet tasarrufu yapması yanında işçilerinin daha güvenli bir ortamda çalışması sağlanabilir.

Kaynaklar (References)

1. T.C. Resmi Gazete. İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirmesi Yönetmeliği, 29.12.2012 Sayı: 28512.
2. Bowles J.B., The new SAE FMECA standard, Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium, Anaheim, CA, 19-22 Ocak, 48-53, 1998.
3. Özfirat M.P., A New Risk Analysis Methodology Integrating Fuzzy Prioritization Method And Failure Modes And Effects Analysis, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 29 (4), 755-768, 2014.
4. Şenol M.B., Yılmaz N., A model and application of occupational health and safety risk assessment, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 32 (1), 77-87, 2017.
5. Mohsen O., Fereshteh N., An extended VIKOR method based on entropy measure for the failure modes risk assessment—A case study of the geothermal power plant (GPP), Safety Science., 92, 160-172, 2017.
6. Wang W., Liu X., Qinc Y., A risk evaluation and prioritization method for FMEA with prospect theory and Choquet integral, Safety Science 110, 152–163, 2018.
7. Ilbahar E., Karasan A., Cebi S., Kahraman C., A novel approach to risk assessment for occupational health and safety using Pythagorean fuzzy AHP & fuzzy inference system Safety Science 103, 124–136, 2018.
8. Karasan A., Ilbahar E., Cebi S., Kahraman C., A new risk assessment approach: Safety and Critical Effect Analysis (SCEA) and its extension with Pythagorean fuzzy sets Safety Science 108, 173–187, 2018.
9. Zhu J., Shuai B., Li G., Chin K-S., Wang R., Failure mode and effect analysis using regret theory and PROMETHEE under linguistic neutrosophic context. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 64-104048, 2020.
10. Acuner O., Çebi S., An Effective Risk-Preventive Model Proposal For Occupational Accidents At Shipyards, Brodogradnja/Shipbuilding/Open Access, 67 (1), 2016.
11. Pluess D.N., Grosio, A., Meyer, T., Expert Judgements In Risk Analysis: A Strategy To Overcome Uncertainties, Chemical Engineering Transactions, 31, 307-312, 2013.
12. Abdelgawad M., Fayek A. R., Risk management in the construction industry using combined fuzzy FMEA and fuzzy AHP, Journal of Construction Engineering and Management, 136 (9), 1028–1036. 2010
13. Liu H. C., Li Z., Song, W., Su, Q., Failure mode and effect analysis using cloud model theory and PROMETHEE method, IEEE Transactions on Reliability, 66 (4), 1058-1072, 2017.
14. Liu H.-C., Wang L.-E., You X.-Y., Wu, S.-M., Failure mode and effect analysis with extended grey relational analysis method in cloud setting, Total Quality Management & Business Excellence, 1–23, 2017.
15. Maheswaran K., Loganathan T., A Novel Approach for Prioritization of Failure modes in FMEA using MCDM, SSN: 2248-9622 www.ijera.com, 3 (4), 733-739, 2013.
16. Liu H. C., You J. X., You X. Y. Shan, M. M., A novel approach for failure mode and effects analysis using combination weighting and fuzzy VIKOR method, Applied Soft Computing Journal, 28, 579–588, 2015.
17. Mandal S., Maiti J., Risk Analysis Using FMEA: Fuzzy Similarity Value and Possibility Theory Based Approach, Expert Systems with Applications, 41, 3527-3537, 2014.
18. Huang J., Li Z.S., Liu H.-C., New approach for failure mode and effect analysis using linguistic distribution assessments and TODIM method. Reliability Engineering System Safety, 167, 302–309, 2017.
19. Vahdani B., Salimi, M., Charkhchian, M., A new FMEA method by integrating fuzzy belief structure and TOPSIS to improve risk evaluation process, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 77 (1–4), 357–368, 2015.
20. Dabbagh R., Yousefi S., A hybrid decision-making approach based on FCM and MOORA for occupational health and safety risk analysis. Journal of Safety Research. 2019.
21. Fattahi R., Khalilzadeh M., Risk evaluation using a novel hybrid method based on FMEA, extended MULTIMOORA, and AHP methods under fuzzy environment. Safety Science, 102, 290-300, 2018.
22. Yerlikaya M.A., Efe Ö.F., İş Güvenliğinde Bulanık Promethee Yöntemiyle Hata Türleri ve Etkilerinin Analizi: Bir İnşaat Firmasında Uygulama, Güfbed/Gustj Ankara, 6 (2), 126-137, 2016.

23. Efe B., Kurt M., Efe Ö.F., An integrated intuitionistic fuzzy set and mathematical programming approach for an occupational health and safety policy, *Gazi University Journal of Science*, 30 (2), 73–95, 2017.
24. Chen Z., Wu X., Qin J., Risk assessment of an oxygen-enhanced combustor using a structural model based on the FMEA and fuzzy fault tree. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 32- 349e357, 2014.
25. Yousefia S., Alizadeha A., Hayatia J., Bagheryb M., HSE risk prioritization using robust DEA-FMEA approach with undesirable outputs: A study of automotive parts industry in Iran *Safety Science* 102, 144–158, 2018.
26. Gul M., Ak, M. F., Guneri A. F., Occupational health and safety risk assessment in hospitals: A case study using two-stage fuzzy multi-criteria approach, *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 23 (2), 187–202, 2017.
27. TS ISO 31000, Risk management –Guidelines, 2018.
28. TS EN IEC 31010, Risk management - Risk assessment techniques. 2019.
29. Smarandache F., Subtraction and Division of Neutrosophic Numbers. Creighton University, The Society for Mathematics of Uncertainty (SMU), *Critical Review*, 13, 103-110, 2016.
30. Biswas P., Pramanik S., Aggregation of triangular fuzzy neutrosophic set information and its application to multi-attribute decision making, *Neutrosophic Sets and Systems*, 12, 2016.
31. Mamdani E. H., Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis, *IEEE Transactions on Computers*, C-26.syf, 1182-1191, 1997.
32. Cebi A., Togan V., Cebi S., A fuzzy inference based model for evaluation of occupational risks at construction site. *International Journal of Civil Engineering*. 6 (81), 61–77, 2016.
33. Sosyal Güvenlik Kurumu İstatistik Yıllığı Sigortalı ve İş Yeri İstatistikleri http://www.sgk.gov.tr/wps/portal/sgk/tr/kurumsal/istatistik/sgk_istatistik_yilliklari Yayın Tarihi: 31.05.2020, Erişim tarihi:04.07.2021.
34. Turton R., Bailie R., Whiting W., Shaeiwitz J., Bhattacharyya D., *Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes*, Editor: Bernard Goodwin, Prentice Hall, Chapter 1, 4-48, 2012.
35. Pelaez C.E., Bowles, J.B., Using fuzzy logic for system criticality analysis. In: *Reliability and Maintainability Symposium*, 1994. *Proceedings.*, Annual. IEEE, 449–455, 1994.

