

Belirsizlik Ortamında Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri ve Tam Sayılı Programlama ile Risk Analizi

Özge Doğa ASILSOY ^{1,a}, Nurhayat ÇALU ^{1,b}, Ayça ALKIŞ ^{1,c}, Ertuğrul GÜNTAY ^{1,d},
Büşra YILMAZ ^{1,e}, Murat OTURAKÇI ^{1,f}

¹İzmir Bakırçay Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

^aORCID: 0009-0008-3103-7531; ^bORCID: 0009-0007-2883-4698; ^cORCID: 0009-0007-2112-5215;
^dORCID: 0009-0003-0326-8846; ^eORCID: 0009-0003-8050-8073; ^fORCID: 0000-0001-5946-3964

Makale Bilgileri

Geliş : 10.02.2025

Kabul : 19.03.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1636819

Sorumlu Yazar

Büşra YILMAZ

busra.yilmaz@bakircay.edu.tr

Anahtar Kelimeler

FMEA

AHP

Bulanık AHP

Tam sayılı programlama

Atıf şekli: ASILSOY, Ö.D., ÇALU, N., ALKIŞ, A., GÜNTAY, E., YILMAZ, B., OTURAKÇI, M., (2026). Belirsizlik Ortamında Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri ve Tam Sayılı Programlama ile Risk Analizi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(2), 341-357.

ÖZ

Bu çalışma, yalıtım ürünleri üreten bir işletmede faaliyetlerden kaynaklanan tehlike ve riskleri belirlemek, önceliklendirmek ve sınırlı kaynaklarla uygun aksiyon planları geliştirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda Hata Türü ve Etkileri Analizi (FMEA), bulanık FMEA, Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) ile ağırlıklandırılmış İdeal Çözüme Yakınlık Yöntemi (TOPSIS) ve Adım Adım Ağırlık Değerlendirme Oranı Analizi (SWARA) yöntemleri birlikte kullanılmıştır. Elde edilen risk skorları, tam sayılı programlama modeliyle analiz edilerek kaynakların öncelikli risklere göre tahsis edilmesi hedeflenmiştir. Çalışma, üretim süreci risklerinin sistematik değerlendirilmesi ve stratejik karar alma süreçlerinin desteklenmesi için bütünlük bir çerçeve sunmaktadır.

Multi-Criteria Decision Making Techniques Under Uncertainty and Risk Analysis with Integer Programming

Article Info

Received : 10.02.2025

Accepted : 19.03.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1636819

Corresponding Author

Büşra YILMAZ

busra.yilmaz@bakircay.edu.tr

Keywords

FMEA

AHP

Fuzzy AHP

Integer programming

How to cite: ASILSOY, Ö.D., ÇALU, N., ALKIŞ, A., GÜNTAY, E., YILMAZ, B., OTURAKÇI, M., (2026). Multi-Criteria Decision Making Techniques Under Uncertainty and Risk Analysis with Integer Programming. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(2), 341-357.

ABSTRACT

This study was conducted to identify and prioritize the hazards and risks arising from the activities of a company producing insulation products and to develop appropriate action plans under limited resources. In this context, Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), fuzzy FMEA, the Analytic Hierarchy Process (AHP)-weighted Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS), and the Stepwise Weight Assessment Ratio Analysis (SWARA) methods were used in an integrated manner. The obtained risk scores were analyzed through an integer programming model to allocate resources according to priority risks. The study presents an integrated framework for the systematic evaluation of production process risks and the support of strategic decision-making processes.

1. GİRİŞ

Yalıtım ürünleri üretim endüstrisi; kimyasal bileşenlerin kullanıldığı prosesler, yüksek sıcaklık uygulamaları, yoğun toz oluşumu, basınçlı sistemler ve yangın/patlama riski gibi birden fazla tehlike kaynağının aynı üretim hattı içinde bir arada bulunduğu, iş sağlığı ve güvenliği açısından yüksek hassasiyet gerektiren sektörlerden biridir [1]. Bu tür işletmelerde proses sürekliliği, ürün kalitesi ve üretim verimliliği hedefleri ile çalışan güvenliğini aynı anda koruma zorunluluğu, risk yönetimini yalnızca yasal bir gereklilik olmaktan çıkarıp stratejik bir karar problemine dönüştürmektedir. Nitekim sektörde yaşanan iş kazalarının önemli bir kısmının, tehlikelerin doğru tanımlanamaması kadar, tanımlanan risklerin doğru önceliklendirilememesine ve buna bağlı olarak sınırlı kaynakların etkisiz biçimde kullanılmasına dayandığı rapor edilmektedir. Özellikle orta ölçekli işletmelerde bütçe, zaman, bakım-onarım kapasitesi ve iş gücü kısıtları nedeniyle tüm risklerin aynı anda azaltılması çoğu zaman mümkün değildir. Bu nedenle, risk azaltma faaliyetlerinde “hangi risklerin önce ele alınması gerektiği” sorusu hem maliyet etkinliği hem de çalışan güvenliği açısından kritik öneme sahiptir [2].

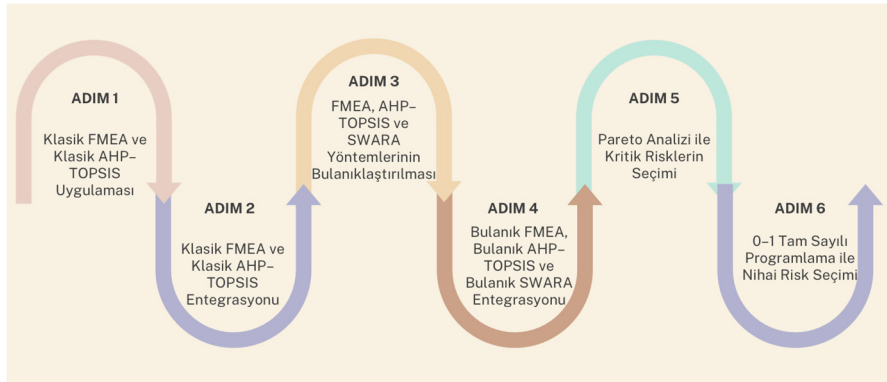
Risklerin önceliklendirilmesi literatürde farklı yöntemlerle ele alınmakla birlikte, gerçek dünya koşullarında karar vericiler çoğu zaman tam bilgiye sahip değildir ve risk değerlendirmeleri uzman yargılarına dayalıdır. Bu durum, değerlendirmelerde kaçınılmaz bir sübjektiflik ve belirsizlik oluşturur. Klasik risk değerlendirme yöntemleri ise çoğunlukla net (kesin) sayısal girdilerle çalıştığından, belirsizlik ve kararsızlık durumlarını yeterince temsil edememektedir. Örneğin klasik FMEA (Hata Türü ve Etkileri Analizi) yönteminde Risk Öncelik Puanı (RÖP) hesabı deterministik bir mantıkla yapılır ve olasılık, şiddet ve tespit edilebilirlik gibi bileşenler çoğu zaman tek bir değere indirgenerek değerlendirilir. Bu yaklaşım, saha koşullarındaki bulanıklığı ve uzmanların “yaklaşık” ya da “aralık” şeklindeki ifadelerini yansıtmadığı için risklerin birbirine çok yakın puanlarla değerlendirilmesine ve dolayısıyla hatalı önceliklendirmeye yol açabilmektedir [3-4]. Benzer şekilde, Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) ve TOPSIS gibi çok kriterli karar verme yöntemleri de klasik biçimleriyle kesin değerlendirmelerle çalışır; karar vericilerin “tam emin olmama”, “iki seçenek arasında kalma” veya “yakın önem düzeyleri” gibi belirsizlik içeren yargıları bu yapılarda sınırlı düzeyde temsil edilebilir. Bu bağlamda, literatürde söz konusu yöntemlerin bulanık uzantıları önerilmiş olsa da riskin büyüklüğünü ve kriter temelli görelî önemi (AHP-TOPSIS) birlikte ele alan, ayrıca yöntem tutarlılığını test eden ve nihayetinde kaynak kısıtı altında uygulanabilir kararlar üreten bütüncül çerçevelerin sınırlı kaldığı görülmektedir.

Bu çalışmanın temel amacı, yalıtım ürünleri üreten bir işletmede iş sağlığı ve güvenliği kapsamında belirlenen tehlikelerin daha hassas ve güvenilir biçimde önceliklendirilmesini sağlamak ve sınırlı kaynak koşullarında uygulanacak aksiyonların optimum biçimde seçilmesine yönelik bütünlük bir karar desteği yaklaşımı geliştirmektir. Çalışma, Türkiye’de faaliyet gösteren bir yalıtım tesisinden elde edilen gerçek saha verileri üzerinden yürütülmüştür. İlk aşamada riskler FMEA yaklaşımı ile değerlendirilmiş; daha sonra riskleri etkileyen kriterlerin görelî önemleri çok kriterli karar verme yapısı içinde ele alınmıştır. Bu noktada çalışma yalnızca tek bir yönetime dayanmamış; belirsizliklerin karar sürecine sistematik biçimde entegre edilebilmesi için yöntemlerin bulanık sürümleri kullanılmıştır. Bu doğrultuda, risk skorları Bulanık FMEA ile hesaplanmış, kriter öncelikleri Bulanık AHP-TOPSIS ile elde edilmiş ve kriter ağırlıkları ayrıca Bulanık SWARA (Adım Adım Ağırlık Değerlendirme Oranı Analizi) yöntemiyle yeniden değerlendirilerek normalize edilmiştir. Bulanık SWARA’nın sürece dahil edilmesi, yalnızca alternatif bir ağırlık seti üretmekten öte, farklı ağırlıklandırma yaklaşımlarının sonuçları üzerindeki etkisinin karşılaştırılmalı olarak incelenmesine olanak sağlamaktadır. Elde edilen Bulanık SWARA ağırlıkları, Bulanık AHP-TOPSIS sonuçlarıyla karşılaştırmalı olarak incelendiğinde bazı kriterler açısından benzer eğilimler göstermekle birlikte, sıralamaların kullanılan ağırlıklandırma yaklaşımına duyarlı olabildiğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle SWARA tabanlı sonuçlar, AHP-TOPSIS çıktılarının doğrudan doğrulanması yerine, sonuçların yöntem seçimine bağlı değişkenliğini değerlendirmeye yönelik tamamlayıcı bir analiz olarak ele alınmıştır.

Çalışmanın bir sonraki aşamasında, risklerin önceliklendirilmesi yalnızca sıralama üretmekle sınırlı tutulmamış; hangi risklerin kritik olduğunun belirlenmesi için Pareto analizi uygulanmıştır. Pareto yaklaşımı, toplam riskin büyük bir bölümünü oluşturan “kritik azınlığın” belirlenmesine dayanır ve işletmeler açısından hangi risklerin ilk etapta ele alınması gerektiğini pratik bir biçimde ortaya koyar. Bu çalışmada Pareto analizinde kullanılan risk değerleri ile matematiksel optimizasyon modelinde kullanılan risk girdileri aynı tanım ve aynı ölçek temelinde seçilmiştir. Bu kapsamda, Pareto analizinde ve matematiksel modelde risk girdisi olarak Bulanık AHP-FMEA entegre değerleri tercih edilmiştir. Bunun temel gerekçesi, matematiksel modelin tekil bir risk katsayısı üzerinden çalışması ve bu katsayının hem

Bulanık FMEA ile elde edilen risk büyüklüğünü hem de Bulanık AHP–TOPSIS ile hesaplanan göreceli önem yapısını aynı anda temsil etmesi gerekliliğidir. Başka bir ifadeyle Bulanık AHP–FMEA değeri, riskin şiddeti/olasılığı/belirlenimi gibi bileşenlerden türeyen toplam risk seviyesini, kriter öncelikleriyle bütünleştirerek tek bir entegre göstergede toplamakta ve böylece Pareto seçimi ile optimizasyon modelinin aynı risk anlayışı üzerinden tutarlı karar üretmesini sağlamaktadır. Buna karşılık, Bulanık SWARA–FMEA entegre değeri çalışmada esasen karşılaştırmalı değerlendirme ve sonuçların ağırlıklandırma yaklaşımına duyarlılığını inceleme amacıyla ele alınmıştır; ana karar hattının Bulanık AHP–TOPSIS tabanlı entegrasyonla kurulması ise hem literatürdeki yaygın kullanım hem de TOPSIS yönteminin alternatiflerin göreceli yakınlıklarına dayalı sistematik bir sıralama sunması nedeniyle tercih edilmiştir.

Son aşamada, Pareto analizi ile kritik olarak belirlenen riskler, sınırlı kaynak koşullarında uygulanacak aksiyonların seçimi amacıyla 0–1 tam sayılı programlama modeli ile optimize edilmiştir. Bu sayede çalışma, yalnızca “hangi risk daha önemlidir?” sorusuna cevap vermekle kalmamakta; aynı zamanda “mevcut kaynak kısıtı altında hangi risklere müdahale edilirse toplam risk en fazla azaltılır?” sorusuna da nicel ve uygulanabilir bir çözüm üretmektedir. Bu yönüyle çalışma, bulanık mantık tabanlı çok kriterli karar verme yöntemleri ile matematiksel optimizasyonu tek bir çerçevede birleştirerek, belirsizlik altında daha doğru risk önceliklendirme ve kaynak tahsisi sağlaması bakımından literatürde özgün bir katkı sunmaktadır. Çalışmada izlenen metodolojik adımlar ve bütünlük yaklaşımının genel akışı Şekil 1’de sunulmuştur.



Şekil 1. Çalışmanın adımları

2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu çalışmada kullanılan yöntemlerin temelleri, literatürde geniş bir şekilde ele alınmış ve farklı uygulama alanlarında etkinliğini kanıtlamış yöntemlere dayanmaktadır. Çok kriterli karar verme, bulanık mantık, optimizasyon ve risk değerlendirme gibi konular üzerine yapılan araştırmalar, bu çalışmanın yöntemsel çerçevesinin oluşturulmasında önemli bir yol göstermiştir. Özellikle işletmelerin risk yönetimi süreçlerinde kullanılan klasik ve bulanık yaklaşımlar, karar alma süreçlerinin daha sistematik ve verimli hale gelmesine katkıda bulunmuştur. Aşağıda, bu çalışmanın temelini oluşturan literatür incelemelerine yer verilmiştir.

2.1. Bulanık AHP Uygulamaları

Bu bölümde, Bulanık AHP yönteminin farklı karar verme problemlerine nasıl uygulandığını gösteren çalışmalar özetlenmiştir. Bulanık AHP, özellikle belirsizliklerin ve subjektif değerlendirmelerin yoğun olduğu durumlarda daha güvenilir sonuçlar elde etmek için kullanılır.

Akman ve Alkan [5], otomotiv yan sanayinde tedarikçi performansını değerlendirmek amacıyla Bulanık AHP yöntemini kullanmışlardır. Çalışmada, tedarikçi performansını etkileyen kriterler bulanık mantık yaklaşımıyla ele alınmış ve Kocaeli’de otomotiv yan sanayinde faaliyet gösteren bir işletmenin üç tedarikçisinin performansı değerlendirilmiştir. Bu çalışma, tedarikçi performansının çok kriterli karar verme problemi olarak ele alınabileceğini ve Bulanık AHP yönteminin belirsizlik içeren değerlendirme süreçlerinde kullanılabilirliğini göstermektedir.

Şengül ve arkadaşları [6], çalışmalarında, belediyelerin toplu taşıma aracı seçim problemi çok kriterli karar verme yaklaşımıyla ele alınmış ve Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi (BAHP) yöntemi uygulanmıştır.

Karar verme sürecinde alternatiflerin birden fazla kriter açısından değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmış; belirsizlik içeren uzman değerlendirmelerini daha gerçekçi biçimde yansıtmak amacıyla AHP yöntemi bulanık mantık ile bütünleştirilmiştir. Uygulama kapsamında, belediyeler için en uygun otobüs alternatifinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

Aydın [7], Ankara’da bir hastane için en uygun yerin belirlenmesi amacıyla Bulanık AHP yöntemini kullanmıştır. Çalışma, hastane yer seçimi sürecinde demografik, ekonomik ve çevresel faktörler gibi birçok kriteri dikkate almıştır. Bulanık AHP yöntemi, bu kriterler arasındaki öncelikleri belirleyerek en uygun yer seçimini sağlamıştır. Bu yaklaşım, sağlık tesislerinin planlanmasında önemli bir örnek teşkil etmektedir.

2.2. Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinin Entegrasyonu (AHP-TOPSIS)

Bu kısım, farklı çok kriterli karar verme yöntemlerinin birleştirilerek daha kapsamlı ve güçlü çözümler sunan çalışmalara odaklanmaktadır. Özellikle AHP ve TOPSIS gibi yöntemlerin entegrasyonu, karmaşık karar verme süreçlerinde önemli avantajlar sağlamaktadır.

Şahin ve Supçiller [8], tedarikçi seçimi ve değerlendirme probleminin çözümünde AHP, TOPSIS ve K-ortalamar yöntemlerini birlikte kullanmışlardır. Çalışmada, değerlendirme kriterlerinin ağırlıkları AHP ile belirlenmiş, elde edilen ağırlıklar TOPSIS yönteminde kullanılarak tedarikçiler sıralanmıştır. Ardından K-ortalamar yöntemiyle tedarikçiler benzer özelliklerine göre kümeler ayrışmış ve böylece yalnızca en iyi tedarikçiyi seçmek yerine etkin tedarik planlarının oluşturulması amaçlanmıştır.

Kocakaya ve arkadaşları [9], bölgesel havacılık operasyonlarında kullanılabilecek turbojet motorlu uçak modellerinin seçimi için küresel bulanık AHP ve TOPSIS yöntemlerini birlikte kullanmışlardır. Çalışmada, maliyet, teknik özellikler ve emniyet kriterleri kapsamında 9 alternatif uçak modeli değerlendirilmiş ve farklı ortalama operatörlerine göre en uygun alternatifler belirlenmiştir.

Kalan [10], dolum hattı makineleri için tedarikçi seçim probleminde AHP ve TOPSIS yöntemlerini birlikte kullanmış; kriter ağırlıklarının AHP ile belirlenmesi ve alternatiflerin TOPSIS ile sıralanması sayesinde karar verme sürecinin sistematik biçimde desteklenebileceğini göstermiştir.

2.3. Risk Analizi ve Önceliklendirme Çalışmaları

Bu bölüm, çeşitli sektörlerdeki risklerin belirlenmesi, analiz edilmesi ve önceliklendirilmesi üzerine yapılan çalışmaları içermektedir. Özellikle klasik risk analiz yöntemlerinin (FMEA, HTEA, Fine-Kinney) bulanık mantık ile entegrasyonu, belirsizlik altındaki risk değerlendirmelerinde daha hassas sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır.

Yörükoğlu ve arkadaşları [11], rüzgâr, jeotermal ve güneş enerjisi santrallerine ilişkin riskleri değerlendirmek amacıyla HTEA ve Bulanık HTEA yöntemlerini uygulamışlardır. Çalışmada riskler farklı boyutlar altında sınıflandırılmış, risk öncelik sayıları hesaplanmış ve üç enerji santrali türü risk düzeyleri bakımından karşılaştırılmıştır.

Özfırat [12], iş sağlığı ve güvenliği kapsamında madencilik sektöründe risk analizi gerçekleştirmiştir. Hata türleri ve etkileri analizi (HTEA) yöntemine bulanık AHP entegre edilerek daha objektif ve gerçekçi risk öncelik sayıları elde edilmiştir. Böylece proaktif önlemler için daha güvenilir bir değerlendirme yöntemi sunulmuştur.

Oturakçı ve Dağsuyu [13], Fine-Kinney yöntemini bulanık mantık ile entegre ederek risk değerlendirme süreçlerindeki belirsizliği azaltmayı amaçlamıştır. Bu çalışmada, bulanık mantık yöntemiyle belirsizlikler ele alınmış ve daha hassas ve gerçekçi risk değerlendirmeleri yapılmıştır.

Turan [14], transformatör üreten bir işletmede süreçlerden kaynaklanabilecek hataların belirlenmesi, önceliklendirilmesi ve firma güvenilirliğinin artırılması amacıyla Hata Türü ve Etkileri Analizi (HTEA) ve Bulanık HTEA yöntemlerini kullanmıştır. Çalışmada, klasik HTEA ile risk öncelik değeri yüksek hatalar belirlenmiş; sözel ifadeler ve kişisel değerlendirmelerden kaynaklanan belirsizlikleri azaltmak amacıyla Bulanık HTEA uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, Bulanık HTEA’nın daha gerçekçi risk öncelikleri sunduğunu göstermiş ve çalışmanın sürekliliğini sağlamak için bir HTEA takip sistemi geliştirilmiştir.

Dişkaya ve Emir [15], İstanbul'da deprem riski altındaki ilçe ve mahallelerin kentsel dönüşüm önceliklerini belirlemek amacıyla Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) ve TOPSIS yöntemlerini birlikte kullanmışlardır. Çalışmada, deprem riski temelinde yerleşim birimlerinin öncelik sıralaması yapılmış ve elde edilen sonuçların kentsel dönüşüm projelerinin planlanmasına destek sağlaması amaçlanmıştır.

Poyraz ve Şimşir [16], iklimlendirme ve ısıtma sektöründe faaliyet gösteren bir işletmenin talep planlama sürecinde ortaya çıkan hataları değerlendirmek amacıyla Bulanık SWARA ve Bulanık COPRAS tabanlı bütünlük bir risk analizi modeli önermişlerdir. Çalışmada, Süreç HTEA yönteminin uzman değerlendirmelerini yeterince yansıtamama gibi sınırlılıklarını gidermek hedeflenmiş; kriter ağırlıkları Bulanık SWARA ile belirlenirken hataların öncelik sıralaması Bulanık COPRAS yöntemiyle yapılmıştır. Sonuçlara göre, talep rakamlarının eksik veya yanlış belirlenmesi ile master data eksikliklerinden kaynaklanan hatalar en kritik riskler olarak tespit edilmiştir.

Eş Yürek [17], kumaş boyama sürecinde hata türlerini belirlemek ve risk değerlendirmesi yapmak için çalışmıştır. Çalışma, üretim sürecindeki hataların tanımlanması, bu hataların etkilerinin analiz edilmesi ve önleyici tedbirlerin geliştirilmesini amaçlamıştır.

Yorulmaz ve Sezen [18], denizcilik sektöründe iş sağlığı ve güvenliği kapsamında Fine-Kinney yöntemiyle risk analizi yapmıştır. Uzman görüşüyle belirlenen 10 denizcilik tehlikesi farklı risk türleri açısından değerlendirilmiş, ancak eşit risk skorları nedeniyle yöntemin yetersiz kaldığı görülmüştür. Sonuç olarak, Fine-Kinney'in başka analiz yöntemleriyle birlikte kullanılması önerilmiştir.

Karakuzu ve arkadaşları [19], mobilya sektöründe risk analizi yapmak için hem HTEA hem de Bulanık HTEA yöntemlerini kullanmışlardır. Bulanık HTEA yöntemi, özellikle risk parametrelerindeki belirsizlikleri ele alarak, daha doğru sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır.

Bu çalışmalar, bulanık mantık ve çok kriterli karar verme yöntemlerinin belirsizliklerin giderilmesi ve süreçlerin iyileştirilmesi konularında etkin çözümler sunduğunu göstermektedir. Literatürdeki bu zengin birikim, bu çalışmada kullanılan yöntem ve yaklaşımların dayanaklarını oluşturmuştur. Yapılan literatür taramasında, FMEA'nın klasik haliyle kullanıldığı pek çok çalışmaya rastlanmıştır. Ancak bu çalışmaların birçoğunda kriter ağırlıkları sabit alınmakta ve belirsizlik dikkate alınmamaktadır. Ayrıca risklerin önceliklendirilmesi sonrasında, kaynak kısıtlarını dikkate alan bir optimizasyon modeliyle karar destek sunan çalışma sayısı oldukça sınırlıdır.

Bu çalışmada, FMEA risk ağırlıkları bulanık AHP ile belirlenmiş ve risk önceliklerine göre sınırlı kaynaklarla müdahale edilecek risklerin seçimi için matematiksel bir model geliştirilmiştir. Bu yaklaşım, belirsizlik altında değerlendirme yapılmasına ve uygulama odaklı bir optimizasyon çerçevesi sunulmasına imkân tanımaktadır.

3. YÖNTEM

Bu çalışmada, yalıtım ürünleri üreten bir işletmede karşılaşılabilecek risklerin belirlenmesi, değerlendirilmesi ve uygun aksiyonların alınması amacıyla dört temel yöntem kullanılmaktadır: FMEA, AHP, TOPSIS (İdeal Çözüme Yakınlık Yöntemi) ve Tam sayılı programlama. Yöntemlerin Bulanık Mantık ile genişletilmiş versiyonları risklerin belirsizlik altında daha sistematik bir biçimde değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca çalışma kapsamında tehlike sıralamalarının entegrasyon kontrolü için Bulanık SWARA yöntemiyle kriter ağırlıkları yeniden değerlendirilmiştir. Sonrasında, Pareto Analizi ile risklerin işletmeye olan toplam etkilerine göre önceliklendirilmesi sağlanarak en kritik sorunlara odaklanılmıştır. Son aşamada, önceliklendirilen riskler arasında karar vermek için tam sayılı programlama tabanlı bir çözüm yöntemi kullanılmaktadır. Çalışmada değerlendirilecek tehlikelerin belirlenmesi süreci, sistematik bir metodoloji izlenerek gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, ilgili üretim tesisinde görev yapan iş sağlığı ve güvenliği uzmanı, üretim sorumlusu ve bakım sorumlusundan oluşan üç kişilik bir uzman ekibi oluşturulmuştur. İkinci aşamada, bu uzmanlardan geçmiş kaza kayıtları, ramak kala olay raporları ve tesisin mevcut risk değerlendirme dokümanlarını inceleyerek ön liste halinde potansiyel tehlikeleri belirlemeleri istenmiştir. Üçüncü aşamada, uzmanlar kendi deneyimlerini ve günlük operasyonel gözlemlerini dikkate alarak bu ön listeyi değerlendirmiş, benzer veya tekrarlayan tehlikeleri birleştirerek listeyi sadeleştirmiştir. Bu aşamada oluşturulan ara çıktı, işletmede daha önce raporlanan veya gözlemlenen olayların sistematik biçimde sınıflandırıldığı bir ön tehlike listesidir. Son aşamada ise, uzmanlar arasında yapılan değerlendirme

toplantısı sonucunda ortak görüş birliği sağlanarak çalışmada kullanılacak nihai tehlike listesi oluşturulmuştur. Böylece tehlikeler doğrudan literatürden alınmamış, sahadan elde edilen veriler ve uzman görüşleriyle yapılandırılmıştır. Bu yaklaşım, metodolojinin yalnızca teorik bilgilere değil, işletmenin gerçek risk profiline dayanmasını sağlamış; ortaya çıkan nihai liste, sonraki analiz aşamalarına girdi sağlayacak şekilde doğrulanmış ve çizelgelenmiştir.

3.1. FMEA (Hata Türü ve Etkileri Analizi)

FMEA, Toplam Kalite Yönetimi (TKY) anlayışında yer bulan; “proaktif” nitelikli (hatalar meydana geldikten sonra durumu düzeltmeye çalışmak yerine, onları önlemeyi amaçlayan), uygulanması kolay ve düşük maliyetli bir kalite iyileştirme tekniğidir.

Sürecin yapısal bozukluğu, işleyişindeki düzensizlik, uygulandığındaki kuralızsızlık, çıktısının beklentiyi karşılamaması gibi sürece dair her türlü istenmeyen durum veya verimsizlik “hata” olarak kabul edilir. Bunlar önceden bilinen olaylar olabileceği gibi, henüz hiç karşılaşılmamış fakat gerçekleşmesi olası görülen olaylar da olabilir.

Hata Olasılığı

Hata olasılığı, herhangi bir hatanın ne sıklıkta ortaya çıkabileceğine dair bir sıklık belirtir. Olasılık değerleri “kesin, imkânsız, nadiren, sıkça” gibi sözel ifadelerle ya da “%100, 10.000’de 3” gibi sayısal ifadelerle belirtilebilir.

Hatanın Etki Şiddeti

Etki şiddeti, olası en kötü duruma dayalı risk değerlendirmesine göre, bir anlamda hatanın önemini ifade eder. Belirli bir hata için etki şiddeti, bu hata etkisinin ciddiyeti oranında yüksek olacaktır.

Belirlenim

Belirlenim; herhangi bir hata ya da hataya neden olabilecek aksaklığın belirlenmesi, gözlem, kontrol ve çözümleme ile ya da beyin fırtınası, örnekleme dayalı istatistik, benzetim (simülasyon) ve laboratuvar testleri gibi yöntemler yardımıyla açığa çıkarılmasıdır.

Risk Öncelik Puanı (RÖP)

RÖP, sözü edilen ölçeklerle hata olasılığı, etki şiddeti ve belirlenime atfedilmiş puanların çarpımıyla hesaplanan sayısal bir değerdir. FMEA tekniği RÖP değerini, hata türlerinin taşıdıkları risk bakımından sıralanabilmesi amacıyla, kullanışlı bir araç olarak kullanır. RÖP değerinin yorumu da yine bu çarpanların tanımı ve yararlanılan ölçeklerden yola çıkılarak yapılır. Hata olasılığının ya da etki şiddetinin artması ve belirlenimin zorlaşması genel olarak riskin artması anlamına gelir. İlgili ölçekler de buna göre hazırlanır ise, RÖP değerinin yüksek olması yüksek riske, düşük olması da düşük riske işaret edecektir [20].

Risk faktörleri ve tehlikeler, sahada görev yapan üç uzman (iş sağlığı ve güvenliği uzmanı, bakım mühendisi ve üretim sorumlusu) tarafından tanımlanmıştır. FMEA kapsamında kullanılan olasılık, şiddet ve belirlenim puanları, Xu ve arkadaşları [21] tarafından önerilen ölçütlere dayalı olarak değerlendirilmiştir.

Çalışmada FMEA yaklaşımı bulanık mantık ile entegre edilmiştir. Her bir risk için üç temel parametre olan hata olasılığı, etki şiddeti ve belirlenim değerleri, uzman görüşlerine dayalı olarak üçgen bulanık sayılar biçiminde tanımlanmıştır. Bu değerler bulanık çarpım yöntemi ile birleştirilmiş ve böylece bulanık risk öncelik puanı (Fuzzy RÖP) hesaplanmıştır. Ardından, sıralama yapılabilmesi için her bir bulanık sayı, defuzzification işlemine tabi tutularak tekil (keskin) bir değere dönüştürülmüş ve riskler bu değerlere göre sıralanmıştır. Bu yöntem, klasik FMEA’nın belirsizliğe duyarsız yapısına alternatif olarak daha esnek ve uzman görüşlerini bütünleyen bir yapıda uygulanmıştır.

3.2. AHP (Analitik Hiyerarşi Süreci)

İnsan yargısının karar sürecine dâhil edilmesi, karar verme sürecinin etkinliğini artırabilmektedir. Aynı karar problemi söz konusu olduğunda, bireyler arasında kriterlerin önem düzeyi ve seçeneklerin

değerlendirilmesi açısından farklılıklar görülebilir. Bu tür durumlarda AHP yöntemi, daha etkin kararlar alınmasını sağlayabilmektedir.

AHP yönteminde, karar verme süreci belirli bir hedef doğrultusunda yapılandırılır. Bu hedef, birden fazla alt hedefin gerçekleştirilmesiyle ulaşılmaya çalışılan genel amacı ifade eder. Kriterler ise bu alt amaçları temsil eder. Karar seçenekleri, belirlenen kriterler doğrultusunda ikili karşılaştırmalar ile değerlendirilir.

Eğer karar sürecinde birden fazla kriter söz konusuysa ve bu kriterlerin karar üzerindeki etkileri eşit değilse, AHP yöntemi bu farklılıkları dikkate alarak seçeneklerin karşılaştırılması ve sıralanmasına imkân tanır. Karar verme tekniklerinde temel amaç, belirlenen hedefe ve kriterlere göre seçeneklerin nasıl ölçülüp sıralanacağını belirlemesidir. Öznel yargıların etkili olduğu durumlarda, AHP yöntemi bir problemin kriterlerini hiyerarşik yapı içinde tanımlamayı ve temsil etmeyi mümkün kılar. Bu yöntem, problemi daha küçük parçalara ayırarak, kriterlerin ve seçeneklerin ikili karşılaştırmalar yoluyla analiz edildiği sistematik ve mantıksal bir yaklaşımdır.

AHP yönteminin üç aşaması vardır

- Hiyerarşinin oluşturulması
- İkili karşılaştırmalı değerlendirme
- Önceliklerin (puanların) hesaplanması [22]

Bu çalışmada risk ağırlıklarının belirlenmesinde bulanık AHP yöntemi olarak Chang [23] tarafından önerilen Mertbe Analizi (Extent Analysis) yaklaşımı kullanılmıştır. Üçgen bulanık sayılar (Triangular Fuzzy Numbers – TFN) ile uzman görüşleri değerlendirilmiş ve her bir kriterin göreceli önemi bu yöntemle göre hesaplanmıştır. Üçgen bulanık sayılar için kullanılan üyelik fonksiyonları literatürde yaygın olarak benimsenen $[l, m, u]$ formunda tanımlanmıştır. Burada l en düşük, m en olası ve u en yüksek değeri temsil etmektedir. Karar matrisinde kullanılan ikili karşılaştırmalar, üç uzman tarafından sağlanan görüşlerin bulanıklaştırılmasıyla elde edilmiştir.

3.3. TOPSIS (İdeal Çözüme Yakınlık Yöntemi)

TOPSIS yöntemi Chen ve Hwang (1992) tarafından Hwang ve Yoon'un (1981) çalışmaları referans gösterilerek ortaya konulmuştur. TOPSIS yöntemi çok kriterli karar verme tekniklerinden biridir. Yöntem kullanılarak alternatif seçeneklerin belirli kriterler doğrultusunda ve kriterlerin alabileceği maksimum ve minimum değerler arasında ideal duruma göre karşılaştırılması gerekmektedir. Alternatifi n sayıda, kriterleri m tane olan çok kriterli karar verme problemi m boyutlu uzayda n noktaları ile gösterilebilir. Hwang ve Yoon (1981) TOPSIS yöntemini çözüm alternatifinin, pozitif ideal çözüm noktasına en kısa mesafe ve negatif-ideal çözüm noktasına en uzak mesafede olacağı varsayımına göre oluşturmuşlardır [24].

TOPSIS yönteminin aşamaları aşağıdaki gibidir:

- Yöntemin birinci aşamasında karar matrisi oluşturulmaktadır. Karar matrisi içerisinde alternatifler $(a_1, a_2, \dots, a_n)$ şeklinde alt alta sıralanmakta ve her bir kriterin alternatiflere göre gösterdikleri özellikler $(y_{1k}, \dots, y_{nk})$ olarak listelenmektedir.
- Yöntemin ikinci aşamasında karar matrisindeki kriterlere ait puan veya özelliklerin kareleri toplamının karekökü alınarak matrise ait normalizasyon işleminin gerçekleştirilmesi gerekmektedir.
- Yöntemin üçüncü aşamasında normalize edilmiş karar matrisinin elemanları kriterlere verilen önem doğrultusunda ağırlıklandırılır. Burada ağırlıkların belirlenmesinde karar vericinin subjektif görüşleri yer almaktadır.
- Dördüncü aşamada m^* ve m^- ideal noktaları tanımlanır. Burada ağırlıklandırılmış matriste (D) her bir kolonda maksimum ve minimum değerler tespit edilir.
- İdeal noktaların tanımlanmasının ardından beşinci aşamada maksimum ideal noktaya olan uzaklık hesaplanır.
- Daha sonra altıncı aşamada minimum noktaya olan uzaklık hesaplanmaktadır.
- Son aşama olan yedinci aşamada ise her bir alternatifin göreceli sıralaması ve puanı hesaplanmaktadır [24].

3.4. SWARA (Adım Adım Ağırlık Değerlendirme Oranı Analizi)

Son yıllarda yaygın biçimde kullanılan modern Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yaklaşımlarından biri olan SWARA yöntemi, Keršuliene ve arkadaşları tarafından 2010 yılında geliştirilmiştir [25]. Bu yöntem, karar verme sürecinde kriterlerin göreceli önem derecelerini uzman yargılarına dayalı olarak sistematik biçimde belirlemeyi amaçlar. Yöntemin temel mantığı, karar vericilerin kriterleri önem derecelerine göre sıralaması ve her bir kriterin bir öncekine kıyasla ne kadar daha az önemli olduğunu belirlemesi üzerine kuruludur. Bu adım adım ilerleyen yapı, uzman görüşlerinin tutarlı biçimde sayısal değerlere dönüştürülmesine olanak sağlar ve özellikle belirsizlik içeren karar verme problemlerinde kriterlerin göreceli öneminin esnek ve gerçekçi biçimde belirlenmesini mümkün kılar [26].

SWARA yönteminde ilk olarak uzmanlar, kriterleri tahmini önem derecelerine göre sıralayarak en önemli kriterden en az önemli olana doğru bir dizi oluşturur. Ardından, her bir kriter bir önceki kriterle karşılaştırılarak göreceli önem oranı belirlenir. Bu oran, kriterlerin ağırlık katsayılarının adım adım güncellenmesinde kullanılır. Üçüncü aşamada, elde edilen karşılaştırmalı önem değerlerinden yararlanılarak her bir kriter için düzeltme katsayısı hesaplanır. Dördüncü aşamada, bu katsayılar kullanılarak yeniden hesaplanmış ağırlık değerleri elde edilir. Son aşamada, bulunan ağırlıklar normalize edilerek toplamı bire eşit olacak biçimde nihai kriter ağırlıkları oluşturulur [26].

3.5. Bulanık Mantık

Bulanık mantık, insanlara ait düşünme, öğrenme ve öğrenerek akıl yürütme gibi özelliklerin bilgisayarlar tarafından kullanılmasına olanak sağlayan bir yaklaşımdır. Bu yöntem uygulanırken sayısal ifadeler yerine sözel veriler kullanılır ve makineler bu sözel verileri, belirli sayısal temellere dayandırarak işler. Bulanık mantık, bir gerçekliğin yaklaşık olarak ifade edilmesini sağlar; çünkü bu sistemde klasik mantıkta olduğu gibi kesinlik bulunmaz.

Bulanık mantıkta her şey, sıfır ile bir arasındaki üyelik dereceleriyle temsil edilir. Özellikle modelin oluşturulmadığı veya oluşturulmasının oldukça güç olduğu sistemlerde kullanılır. Sonuçlar, klasik mantıkta olduğu gibi "var" ya da "yok" şeklinde değil; "biraz var", "kısmen yok" gibi daha esnek biçimlerde ifade edilir. Klasik mantıkla tanımlanan tüm kavramlar, bulanık mantıkla da ifade edilebilir.

Bulanık mantığın temel ilkeleri şu şekilde sıralanabilir: verilerin bulanıklaştırılması, bu verilere ait üyelik fonksiyonlarının oluşturulması, bulanık çıkarım yapılması ve sonuçların durulaştırılması [27].

3.6. Pareto Analizi

Normal dağılımda sebeplerin en önemli %20'si, sonuçların %80'ini; ardından gelen %30'u, sonuçların %15'ini ve geri kalan %50'si ise sonuçların yalnızca %5'ini oluşturmaktadır. Maliyetlerin yaklaşık %80'inin, elemanların yalnızca %20'sinden kaynaklandığı veya servetin yaklaşık %80'inin nüfusun %20'si tarafından kontrol edildiği durumlar bu prensibe örnektir. Bu oranlar sebebiyle Pareto prensibi literatürde "80-20", "90-10" veya "70-30" kuralı olarak anılmaktadır. ABC analizi olarak da bilinen Pareto grafiği, yaygın bir ayırım yöntemi veya öncelik belirleme aracı olarak kullanılmaktadır [28].

3.7. 0-1 Tam Sayılı Programlama

Uygulamada birçok doğrusal programlama modelinde bölünebilirlik varsayımının her zaman geçerli olmadığı görülmektedir. Hatta bazı modellerin yalnızca "evet" ya da "hayır" kararlarıyla sınırlandırıldığı durumlar bulunmaktadır. Bu tür modellerde kararlar, yalnızca iki seçenekle ifade edilir. Örneğin, "Bu yatırım yapılmalı mı?", "Fabrika X alanında mı kurulmalı?" gibi kararlar, 0 ve 1 değerleriyle temsil edilen karar değişkenleri ile gösterilir.

Bu tür karar değişkenlerine "0-1 değişkenleri" adı verilir. Tüm karar değişkenlerinin yalnızca 0 veya 1 değerine eşit olması gerektiğinde, bu tür doğrusal programlama modellerine "0-1 tam sayılı programlama" ya da "ikili tam sayılı programlama" denir.

Bazı doğrusal programlama modellerinde ise karar değişkenlerinin bir kısmı tam sayı (örneğin, 0-1), diğer kısmı ise bölünebilirlik varsayımını karşılayarak kesirli değerler alabilir. Bu tür modeller ise “karma tam sayılı programlama” olarak adlandırılmaktadır [29].

$$x_i = \begin{cases} 1, & R_i \text{ eğer seçilirse} \\ 0, & \text{aksi halde} \end{cases},$$

r_i : R_i 'nin risk skoru

l_i : R_i 'nin iş gücü gereksinimi

t_i : R_i 'nin zaman gereksinimi

c_i : R_i 'nin maliyet gereksinimi

L^{max} : Maksimum mevcut iş gücü kapasitesi

T^{max} : Maksimum mevcut zaman

C^{max} : Maksimum mevcut maliyet veya bütçe sınırı

i : Değerlendirmeye alınan alternatif (risk ögesi indeksi) ($i = 1, 2, \dots, n$)

$$MaxZ = \sum_{i=1}^n r_i * x_i \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n l_i * x_i \leq L^{max} \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n t_i * x_i \leq T^{max} \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n c_i * x_i \leq C^{max} \quad (4)$$

$$x_i \in \{0,1\}, i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

Eşitlik (1), amaç fonksiyonunu ifade etmekte olup modelin temel hedefini oluşturarak seçilen risklerin toplam risk skorunu maksimize etmeyi amaçlamaktadır. Bu sayede, eldeki kaynaklar en verimli biçimde kullanılarak en yüksek toplam faydayı sağlayan risk kombinasyonu belirlenmektedir. Eşitlik (2), iş gücü kısıtını ifade etmekte olup seçilen risklerin uygulanması için gereken toplam iş gücü miktarının mevcut personel kapasitesini aşmamasını güvence altına almaktadır. Böylece, model uygulama sürecinde iş gücü yetersizliği nedeniyle ortaya çıkabilecek planlama sorunlarının önüne geçilmektedir. Eşitlik (3), zaman kısıtını ifade etmekte olup seçilen risklerin gerçekleştirilmesi için gerekli toplam sürenin önceden belirlenmiş zaman sınırları içinde kalmasını sağlamaktadır. Bu kısıt sayesinde, uygulama süreci belirlenen takvimle uyumlu hale getirilmekte ve süre aşımından kaynaklanabilecek operasyonel riskler azaltılmaktadır. Eşitlik (4), maliyet kısıtını ifade etmekte olup seçilen risklerin toplam maliyetinin ayrılan bütçeyi geçmemesini garanti etmektedir. Bu koşul, modelin finansal sürdürülebilirlik ilkesine uygun biçimde çalışmasını sağlamakta ve kaynak kullanımında ekonomik dengeyi korumaktadır. Eşitlik (5), karar değişkenlerinin ikili (0–1) biçiminde tanımlandığını göstermekte olup her bir riskin seçilip seçilmediğini açık biçimde ifade etmektedir. Bu tanımlama, modelin sonuçlarını yorumlamayı kolaylaştırmakta ve seçilen risklerin net bir biçimde ortaya konulmasına olanak tanımaktadır.

4. BULGULAR

Bu çalışmada kullanılan risk verileri, Türkiye’de faaliyet gösteren orta ölçekli bir yalıtım ürünleri üretim tesisinde, üretim, bakım ve iş sağlığı güvenliği birimlerinden elde edilmiştir. Gerçek saha verilerine dayanan bu veri seti, işletmede gerçekleştirilen gözlemler ve iş güvenliği kayıtları temel alınarak oluşturulmuştur. FMEA analizinde kullanılan üç temel kriter olan hata olasılığı, etki şiddeti ve belirlenim

değerleri, işletme içindeki iş güvenliği uzmanları, bakım mühendisleri ve üretim sorumlularından oluşan üç kişilik bir uzman grubunun görüşleri doğrultusunda belirlenmiştir.

Çalışmada ilk olarak her bir tehlike için bu üç parametre 1 ile 10 arasında puanlanmış ve klasik FMEA yöntemi çerçevesinde bu puanların çarpımıyla RÖP hesaplanmıştır. Kullanılan ölçek, klasik FMEA literatüründe sıkça başvuru alan “1: düşük – 10: yüksek” aralıklı üçlü değerlendirme sistemine dayanmaktadır.

Ayrıca, AHP yöntemi kapsamında kullanılan karar matrisi de aynı uzman grubunun ikili karşılaştırma yöntemiyle oluşturulmuştur. Uzmanlar, FMEA kriterleri (olasılık, şiddet ve saptanabilirlik) arasında göreceli öncelikleri değerlendirmiş ve bu değerlendirmelere dayanarak AHP ağırlıkları elde edilmiştir. Her bir uzmanın verdiği karşılaştırmalar, tutarlılık oranı ($CR < 0,1$) sağlanacak şekilde analiz edilmiş ve nihai ağırlık vektörü oluşturulmuştur.

Elde edilen puanlar ve ağırlıklar TOPSIS yöntemiyle entegre edilmiş ve hem klasik yaklaşımın hem de bulanık mantıkla genişletilen modelleme sürecinin temel bileşenlerini oluşturmuştur. Ayrıca, bulanık temelli SWARA yöntemiyle kriter ağırlıkları yeniden değerlendirilmiş ve sonuçların farklı ağırlıklandırma yaklaşımlarına bağlı değişkenliği karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu yönüyle çalışma, gerçek saha verilerine dayalı uygulamalı bir modelleme çerçevesi sunmaktadır.

Bu çalışma, belirsizlik ortamında risklerin değerlendirilmesi için çok kriterli karar verme tekniklerini ve bulanık mantık temelli yaklaşımları entegre etmeyi hedeflemektedir. Bu tür yöntemler, özellikle işletmelerin sınırlı kaynaklarını en etkili şekilde kullanarak öncelikli risklere yönelik eylem planları oluşturmaya olanak tanımaktadır. Ayrıca, belirsizlik ve eksik bilgi içeren durumlarda bulanık mantık tekniklerinin esneklik sağlaması, bu yaklaşımları geleneksel yöntemlere göre daha avantajlı hale getirmektedir.

Bu bağlamda, çalışmanın temel amacı, bir yalıtım ürünleri üreten işletmede karşılaşılabilecek potansiyel risklerin, çok kriterli karar verme teknikleri, bulanık mantık tabanlı metodolojiler, Pareto analizi ve tam sayılı programlama yöntemleri ile değerlendirilmesi ve önceliklendirilmesidir. Bu süreçte, FMEA yöntemine ek olarak, AHP ve TOPSIS yöntemleri birleştirilmiş ve bulanıklaştırılmıştır. Bulanık SWARA yöntemiyle kriter ağırlıkları yeniden değerlendirilmiş ve sonuçların ağırlıklandırma yaklaşımına duyarlılığı analiz edilmiştir. Elde edilen risk skorları, Pareto analizi ile önceliklendirilmiş, ardından tam sayılı programlama yöntemi kullanılarak sınırlı kaynaklar doğrultusunda optimal eylem planları oluşturulmuştur. Böylece, risk yönetiminde hem teorik hem de uygulamalı olarak kapsamlı bir model geliştirilmiştir.

Veri Setindeki Tehlikeler:

- | | |
|---|---|
| 1. Kesici Aletler ve Ekipman Kullanımı | 12. Makine ve Ekipman Bakım Sorunları |
| 2. Yüksek ve Düşük Sıcaklık Riski | 13. Forklift ve Diğer Taşıma Araçları |
| 3. Kimyasal Maddeler ve Sızıntılar | 14. Yangın Güvenliği Eksiklikleri |
| 4. Gürültü Seviyesi ve Koruyucu Ekipman Eksikliği | 15. Yangın Çıkış Yollarının Engellenmesi |
| 5. Elektriksel Riskler | 16. Uygunsuz Kişisel Koruyucu Ekipman Kullanımı |
| 6. Ağır Yük Kaldırma ve Düşme Tehlikeleri | 17. Uygun Olmayan Malzeme Kullanımı |
| 7. Düşme ve Kayma Tehlikeleri | 18. Zemin Güvenliği ve Kayganlık |
| 8. Hızla Hareket Eden ve Tehlikeli Makineler | 19. Depolama ve Düzenleme Eksiklikleri |
| 9. Patlayıcı ve Yanıcı Maddelerin Varlığı | 20. Dış Ortam Şartlarının Olumsuz Etkileri |
| 10. Havalandırma ve Aydınlatma Eksiklikleri | 21. Bakım ve Onarım Eksiklikleri |
| 11. Yüksek Basınç Altında Çalışma | 22. Kullanılmayan Ekipmanların Kötü Durumu |

Ele alınan çalışmaya ilk olarak literatür taraması ile başlanılmış, gerekli tehlike veri seti edinilmiş ve bu veriler üzerinden hata olasılığı, etki şiddeti ve belirlenim değerlerinin çarpımı ile FMEA değerleri bulunmuştur daha sonra AHP tabanlı TOPSIS uygulanarak entegrasyonu sağlanmıştır.

Çalışmada gerçekleştirilen FMEA ve AHP-TOPSIS entegrasyonu Çizelge 1’de görüldüğü gibidir.

Çizelge 1. FMEA ve AHP-TOPSIS entegrasyonu

Tehlikeler	FMEA	AHP-TOPSIS	Entegre değerler
Tehlike1	210	0.477	100.208
Tehlike 2	108	0.564	60.990
Tehlike 3	378	0.275	104.112
Tehlike 4	280	0.451	126.427
Tehlike 5	120	0.485	58.217
Tehlike 6	210	0.530	111.444
Tehlike 7	108	0.592	63.943
Tehlike 8	324	0.365	118.382
Tehlike 9	288	0.461	132.915
Tehlike 10	336	0.460	154.739
Tehlike 11	128	0.419	53.751
Tehlike 12	84	0.439	36.917
Tehlike 13	90	0.553	49.812
Tehlike 14	280	0.582	162.985
Tehlike 15	420	0.373	156.641
Tehlike 16	80	0.537	42.972
Tehlike 17	210	0.387	81.277
Tehlike 18	56	0.526	29.495
Tehlike 19	96	0.490	47.039
Tehlike 20	36	0.506	18.237
Tehlike 21	144	0.596	85.867
Tehlike 22	126	0.387	48.819

Yapılan entegrasyon, belirsizliklerin daha etkin yönetilmesi ve değerlendirme sürecinin daha hassas sonuçlar üretebilmesi amacıyla bulanık ortamda gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, Bulanık FMEA, Bulanık AHP-TOPSIS ve Bulanık SWARA yöntemleri birlikte kullanılmıştır. İlk olarak Bulanık FMEA yöntemiyle tehlikelerin risk puanları hesaplanmış; ardından Bulanık AHP-TOPSIS ile kriterlerin göreceli önemleri belirlenmiştir. Sürece eklenen Bulanık SWARA yöntemiyle kriter ağırlıkları yeniden değerlendirilmiş ve normalize edilmiştir. Elde edilen Bulanık SWARA sonuçları, Bulanık AHP-TOPSIS ağırlıklarıyla karşılaştırmalı olarak incelendiğinde bazı kriterler açısından benzer eğilimler göstermekle birlikte, sıralamaların kullanılan ağırlıklandırma yaklaşımına duyarlı olabildiğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle SWARA tabanlı sonuçlar, AHP-TOPSIS çıktılarının doğrudan doğrulanması yerine sonuçların yöntem seçimine bağlı değişkenliğini değerlendirmeye yönelik tamamlayıcı bir analiz olarak ele alınmıştır. Son olarak, Bulanık SWARA ağırlıkları Bulanık FMEA skorlarıyla birleştirilerek alternatif bir Bulanık SWARA-FMEA entegrasyon değeri elde edilmiştir. Çalışmada gerçekleştirilen tüm entegrasyon adımlarının sonuçları Çizelge 2’de sunulmaktadır.

Çizelge 2. Bulanık FMEA- bulanık AHP-TOPSIS- bulanık SWARA entegrasyonu

Tehlikeler	Bulanık FMEA	Bulanık AHP-TOPSIS	Bulanık SWARA	Entegre değerler (Bulanık AHP-FMEA)	Entegre değerler (Bulanık SWARA-FMEA)
Tehlike1	899	0,619	0,038	556.414	34.122
Tehlike 2	899	0,555	0,0345	499.277	31.015
Tehlike 3	899	0,553	0,0496	497.476	44.600
Tehlike 4	700	0,67	0,0434	469.270	30.380
Tehlike 5	899	0,516	0,0371	464.640	33.373
Tehlike 6	776	0,57	0,0442	442.381	34.299
Tehlike 7	776	0,539	0,0327	418.852	25.375
Tehlike 8	899	0,422	0,046	379.514	41.344
Tehlike 9	675	0,56	0,0407	378.143	27.473
Tehlike 10	675	0,554	0,0487	374.601	32.872
Tehlike 11	776	0,471	0,0398	365.938	30.845
Tehlike 12	675	0,54	0,0354	364.735	23.895
Tehlike 13	563	0,646	0,0469	363.742	26.381
Tehlike 14	776	0,447	0,0451	347.123	35.038
Tehlike 15	600	0,572	0,0478	343.212	28.680
Tehlike 16	776	0,4	0,0389	310.527	30.146
Tehlike 17	500	0,618	0,0363	309.251	18.150
Tehlike 18	600	0,4	0,0309	240.361	18.540
Tehlike 19	600	0,388	0,0336	233.185	20.160
Tehlike 20	700	0,297	0,0318	208.064	22.260
Tehlike 21	400	0,485	0,0416	194.156	16.640
Tehlike 22	363	0,512	0,0425	185.862	15.398

Çizelge 1 ve Çizelge 2 birlikte değerlendirildiğinde, tehlikelerin önceliklendirilmesinde kullanılan entegrasyon yaklaşımının sonuçları belirgin biçimde etkilediği görülmektedir. Çizelge 1’de klasik FMEA skorları ile AHP–TOPSIS katsayıları çarpılarak tek bir “entegre değer” elde edilmiş ve tehlikeler bu birleşik gösterge üzerinden sıralanmıştır. Bu çizelgede yüksek FMEA skoruna sahip tehlikeler, AHP–TOPSIS katsayısı orta düzeyde olsa dahi üst sıralarda yer alabilmekte; dolayısıyla riskin büyüklüğü (FMEA) ile göreceli önem (AHP–TOPSIS) birlikte ancak FMEA’nın daha baskın olduğu bir yapı oluşmaktadır.

Çizelge 2’de ise aynı problem bulanık ortamda ele alınmış; Bulanık FMEA ile risk skorları hesaplanmış, Bulanık AHP–TOPSIS ile göreceli önemler belirlenmiş ve ayrıca Bulanık SWARA ile kriter ağırlıkları yeniden değerlendirilerek normalize edilmiştir. Bu yapı sonucunda iki farklı entegrasyon çıktısı üretilmiştir: Bulanık AHP–FMEA entegre değerleri ve Bulanık SWARA–FMEA entegre değerleri. Çizelge 2’nin en önemli katkısı, yalnızca “tek bir” entegrasyon değerine bağlı kalmak yerine, aynı risk yapısının iki ayrı ağırlıklandırma mantığıyla (AHP–TOPSIS ve SWARA) çapraz incelenmesine imkân vermesidir. Nitekim Bulanık SWARA sonuçları Bulanık AHP–TOPSIS ağırlıklarıyla birlikte incelendiğinde bazı kriterler açısından benzer eğilimler görülmekle birlikte, sıralamaların kullanılan ağırlıklandırma yöntemine bağlı olarak değişebildiği de gözlemlenmektedir. Bu durum, kriter önemlerinin farklı ağırlıklandırma yaklaşımları altında nasıl şekillendiğinin değerlendirilmesine olanak sağlayarak önceliklendirme sürecinin daha kapsamlı biçimde analiz edilmesine katkı sunmaktadır.

Sonuçlar karşılaştırıldığında, Çizelge 1’deki sıralama ile Çizelge 2’deki sıralamanın tamamen aynı kalmadığı, bazı tehlikelerin konum değiştirdiği görülmektedir. Bu farklılaşmanın temel nedeni, bulanık yaklaşımda risk skorlarının (Bulanık FMEA) daha sınırlı bir aralıkta gruplanması ve dolayısıyla ağırlıklandırma bileşeninin (Bulanık AHP–TOPSIS / Bulanık SWARA) tehlikeler arasındaki ayrımı daha belirleyici hale getirmesidir. Başka bir ifadeyle, Çizelge 1’de risk büyüklüğü daha baskın bir ayırt edici iken, Çizelge 2’de belirsizliklerin modele dahil edilmesiyle birlikte tehlikelerin göreceli önemi ve kriter ağırlık yapısı sıralamayı daha güçlü biçimde yönlendirmektedir. Bu durum, özellikle FMEA skorlarının birbirine yaklaştığı veya aynı seviyede kümelendiği durumlarda, yalnızca risk puanına dayalı önceliklendirme yerine kriter-temelli ağırlıklandırmanın daha hassas bir ayrıştırma sunduğunu göstermektedir.

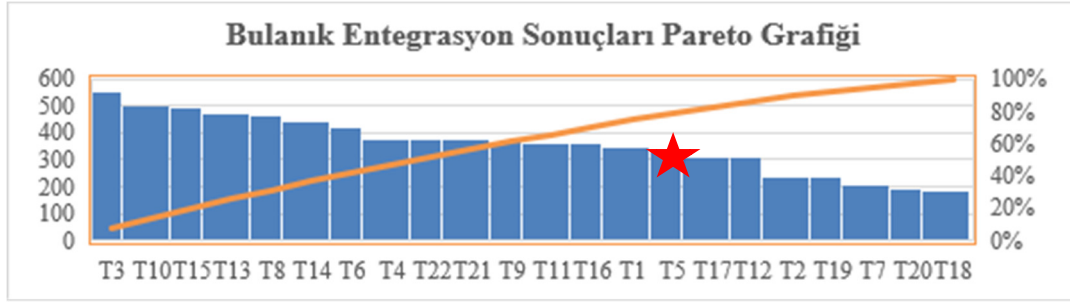
Genel olarak Çizelge 1, deterministik bir yaklaşımla “tek hat” üzerinden önceliklendirme sunarken; Çizelge 2, bulanık ortamda hem risk skorlarının hem de ağırlıkların belirsizliğini dikkate alarak iki farklı entegrasyon senaryosu üretmekte ve sonuçların tutarlılığını güçlendirmektedir. Bu nedenle Çizelge 2’de elde edilen bulgular, Çizelge 1’deki önceliklendirmeyi destekleyen ancak belirsizlik altında daha duyarlı ve yöntemler arası doğrulanmış bir risk değerlendirme çerçevesi ortaya koymaktadır.

Çizelge 2’de yer alan iki bulanık entegrasyon çıktısı (Bulanık AHP–FMEA ve Bulanık SWARA–FMEA) birlikte incelendiğinde, risk önceliklendirme sonuçlarının ağırlıklandırma mantığına karşı duyarlılığı daha net şekilde gözlemlenmektedir. Bulanık AHP–FMEA entegrasyonu, Bulanık AHP–TOPSIS ile elde edilen göreceli önem katsayılarını Bulanık FMEA risk skorlarıyla birleştirirken; Bulanık SWARA–FMEA entegrasyonu, kriter ağırlıklarını SWARA’nın ardışık karşılaştırma mantığıyla yeniden türeterek aynı risk skorları üzerine yansıtmaktadır. Bu nedenle iki entegrasyon çıktısı, aynı tehlike setini değerlendirmesine rağmen sıralamada özellikle üst ve orta gruplarda farklılaşmalar üretebilmektedir.

Nitekim Çizelge 2’de Bulanık AHP–FMEA entegre değerlerine göre en yüksek risk katkısı gösteren tehlikeler sırasıyla Tehlike 1 (556,414), Tehlike 2 (499,277) ve Tehlike 3 (497,476) olarak öne çıkarken; Bulanık SWARA–FMEA entegre değerleri dikkate alındığında en yüksek risk değerlerinin Tehlike 3 (44,600) ve Tehlike 8 (41,344) üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Bu durum, SWARA’nın ağırlık üretme yaklaşımının bazı kriterleri daha belirgin biçimde öne çıkarması nedeniyle, özellikle birbirine yakın risk düzeyine sahip tehlikelerin sıralamasında pozisyon değişimlerine yol açabildiğini göstermektedir. Bununla birlikte her iki entegrasyonda da üst grupta benzer tehlikelerin tekrar görülmesi (ör. Tehlike 1, Tehlike 3, Tehlike 6, Tehlike 8, Tehlike 14 gibi) sonuçların tamamen rastlantısal olmadığını, aksine kritik risk havuzunun genel olarak korunduğunu; farkın daha çok bu kritik kümenin kendi iç sıralamasında oluştuğunu işaret etmektedir.

Pareto analizinde ve matematiksel modelde risk girdisi olarak Bulanık AHP–FMEA entegre değerlerinin seçilmesinin nedeni, modelin tekil bir risk parametresiyle çalışması ve bu parametrenin hem Bulanık FMEA ile hesaplanan risk büyüklüğünü hem de Bulanık AHP–TOPSIS ile belirlenen göreceli önem yapısını aynı

anda yansıtmasıdır. Ayrıca Pareto analizi toplam risk katkısına dayalı olduğundan, Pareto’da kullanılan değerlerin model girdileriyle aynı ölçekte tanımlanması gerekmektedir; bu sayede kritik tehlike seçimi ile modelin optimize ettiği risk yapısı tutarlı hale gelmektedir. Bulanık SWARA ise çalışmada ana girdi üretmekten çok yöntemler arası ağırlık tutarlılığını doğrulamak amacıyla uygulanmış; SWARA sonuçlarının AHP–TOPSIS ile örtüşmesi Bulanık AHP–FMEA temelli risk değerlerinin güvenilirliğini desteklemiştir. Bulunan bulanık risk skorları ne kadar büyükse tehlikenin önemi o kadar büyüdüğü için büyükten küçüğe sıralanarak bir önem sıralaması yapılmıştır. Yapılan bu sıralamaya Pareto analizi uygulanarak toplam risklerin %70’ini oluşturan riskler seçilmiştir. Toplam risklerin %70’ini oluşturan riskler T16’ya kadardır. Bulanık entegrasyon değerlerinin pareto analizi grafiği Şekil 2’de görüldüğü gibidir.



Şekil 1. Bulanık entegrasyon değerlerinin pareto analizi

Firmanın kaynakları sınırlı ve seçilen tüm riskleri ortadan kaldırmaya yeterli olmadığından dolayı pareto analizi ile seçilen riskler üzerinden iş gücü, zaman, maliyet kısıtları çerçevesinde IBM CPLEX üzerinde 0-1 tam sayılı programlama yapılmıştır.

Firmanın kısıtları aşağıda Çizelge 3’te görüldüğü gibidir.

Çizelge 3. Firmanın kısıt çizelgesi

Tehlikeler	Tehlike adları	Kısıtlar		
		Maliyet (TL)	Zaman (Gün)	İş gücü (İşçi sayısı)
T3	Kimyasal maddeler ve sızıntılar	25000	6	4
T10	Havalandırma ve aydınlatma eksiklikleri	12000	4	3
T15	Yangın çıkış yollarının engellenmesi	10000	3	3
T13	Forklift ve diğer taşıma araçları	15000	5	4
T8	Hızla hareket eden ve tehlikeli makineler	20000	7	5
T14	Yangın güvenliği eksiklikleri	25000	6	4
T6	Ağır yük kaldırma ve düşme tehlikeleri	12000	5	3
T4	Gürültü seviyesi ve koruyucu ekipman eksikliği	8000	3	3
T22	Kullanılmayan ekipmanların kötü durumu	10000	4	3
T21	Bakım ve onarım eksiklikleri	15000	5	4
T9	Patlayıcı ve yanıcı maddelerin varlığı	30000	8	6
T11	Yüksek basınç altında çalışma	20000	7	5
T16	Uygunsuz kişisel koruyucu ekipman kullanımı	6000	2	2
İSG ye ayrılan bütçe		120000		
İSG ye ayrılacak ortalama süre		30		
İSG ye ayrılacak işçi sayısı		21		

Firmanın kısıt çizelgesinden yola çıkılarak hazırlanan matematiksel model aşağıdaki gibidir:

Problemin matematiksel modeli:

Karar Değişkenleri

$x_i \in \{0,1\}$ (binary karar değişkenleri)

$i=1,2,3, \dots, 13$ $x_i=1$ ise R_i riski seçilir, aksi takdirde $x_i=0$.

Parametreler

- Risk değerleri (r_i):
 $r = [556.41, 499.28, 497.48, 469.27, 464.64, 442.38, 418.85, 379.51, 378.14, 374.60, 365.94, 364.74, 363.74]$
- İş gücü gereksinimleri (l_i):
 $l = [4, 3, 3, 4, 5, 4, 3, 3, 3, 4, 6, 5, 2]$
- Zaman gereksinimleri (t_i):
 $t = [6, 4, 3, 5, 7, 6, 5, 3, 4, 5, 8, 7, 2]$
- Maliyet gereksinimleri (c_i):
 $c_i = [25000, 12000, 10000, 15000, 20000, 25000, 12000, 8000, 10000, 15000, 30000, 20000, 6000]$
- Limitler:
 Maksimum iş gücü: $\text{mak_işgücü} = 21$,
 Maksimum zaman : $\text{mak_zaman} = 30$,
 Maksimum maliyet: $\text{mak_maliyet} = 120000$.

Amaç Fonksiyonu

$$\text{Maksimize } Z = \sum_{i=1}^{13} r_i \cdot x_i \quad (6)$$

Kısıtlar

- İş gücü kısıtı

$$\sum_{i=1}^{13} l_i \cdot x_i \leq \text{mak_işgücü} \quad (7)$$

- Zaman kısıtı

$$\sum_{i=1}^{13} t_i \cdot x_i \leq \text{mak_zaman} \quad (8)$$

- Maliyet kısıtı

$$\sum_{i=1}^{13} c_i \cdot x_i \leq \text{mak_maliyet} \quad (9)$$

Sonuç

$$x_{15} = 1, \quad x_{16} = 1, \quad x_{22} = 1, \quad x_3 = 1, \quad x_4 = 1, \quad x_6 = 1, \quad x_{10} = 1$$

Eşitlik (6), Eşitlik (7), Eşitlik (8) ve Eşitlik (9) modelin amaç fonksiyonunu ve kısıtlarını göstermektedir. Modelin çözümü sonucunda seçilen değişkenler ve atanan değerler, karar süreçlerinde en etkili risklerin yönetilmesine olanak sağlamıştır. Bu çalışmada geliştirilen 0-1 tam sayılı programlama modeli, sınırlı kaynaklar altında en kritik risklerin hangilerine öncelik verilmesi gerektiğini belirlemeye yönelik olarak tasarlanmıştır. Modelin amacı; işletmenin sahip olduğu maliyet, iş gücü ve zaman gibi kaynak kısıtları doğrultusunda, Pareto analiziyle belirlenen öncelikli riskler arasından maksimum toplam risk azaltımını sağlamaktır.

Modelin çözümü sonucunda seçilen riskler, yalnızca risk skorlarına göre değil, aynı zamanda kaynak tüketimi-fayda dengesi açısından da en verimli müdahale noktaları olarak öne çıkmıştır. Örneğin, “Yangın çıkış yollarının engellenmesi” ve “Kimyasal maddeler ve sızıntılar” gibi tehlikeler, yüksek risk değerlerinin yanı sıra sınırlı kaynaklarla ortadan kaldırılabılır olmaları nedeniyle seçilmiştir. Bu sonuçlar, karar vericilere en az kaynakla en yüksek güvenlik artışı sağlayacak aksiyonları önererek operasyonel verimliliği artırmaktadır.

Geliştirilen modelin uygulamadaki katkısı; karar vericilere yalnızca risk düzeyine göre değil, aynı zamanda uygulama maliyetlerini ve kaynak kullanımını dikkate alarak stratejik kararlar alma imkânı sunmasıdır. Özellikle kaynakların kıt olduğu küçük ve orta ölçekli işletmelerde, bu tür bir optimizasyon modeli, iş sağlığı ve güvenliği yatırımlarının daha hedefli, ölçülebilir ve etkili bir şekilde planlanmasını sağlamaktadır. Model, benzer üretim sektörlerinde karar verme süreçlerine kolaylıkla entegre edilebilecek esnek ve pratik bir araç sunmaktadır.

Özellikle, seçilen x_{15} (Yangın Çıkış Yollarının Engellenmesi), x_{16} (Uygunsuz Kişisel Koruyucu Ekipman Kullanımı), x_{22} (Kullanılmayan Ekipmanların Kötü Durumu), x_3 (Kimyasal addeler ve Sızıntılar), x_6 (Ağır Yük Kaldırma ve Düşme Tehlikeleri), x_4 (Gürültü Seviyesi ve Koruyucu Ekipman Eksikliği), x_{10} (Havalandırma ve Aydınlatma Eksiklikleri) gibi değişkenler, kritik öneme sahip risklerin kontrol altına alınması gerektiğini göstermektedir. Bu sonuçlar, firmanın kaynaklarını verimli bir şekilde kullandığını ve stratejik kararlar almasına yardımcı olabileceğini ortaya koymaktadır.

5. SONUÇ

Bu çalışmada, yalıtım sektöründe faaliyet gösteren bir işletmede karşılaşılan risklerin değerlendirilmesi, önceliklendirilmesi ve sınırlı kaynaklar çerçevesinde yönetimi için klasik ve bulanık mantık tabanlı yöntemler entegre bir şekilde ele alınmıştır. Çalışmanın temel amacı, belirsizliklerin etkisini dikkate alan bütünsel bir risk yönetim modeli geliştirmektir.

Klasik FMEA, AHP ve TOPSIS yöntemlerinin bir araya getirilmesi, risk değerlendirme süreçlerinde karar alma doğruluğunu artırmıştır. Bu yöntemlerin bulanık mantık ile genişletilmesi ise özellikle belirsizlik ve subjektif değerlendirmelerin olduğu durumlarda karar süreçlerini daha esnek ve hassas hale getirmiştir. Risk skorlarının Pareto analizi ile incelenmesi, kritik risklerin belirlenmesine olanak tanıırken, sınırlı kaynakların yönetimi için geliştirilen 0-1 tam sayılı programlama modeli, işletmenin operasyonel verimliliğine doğrudan katkıda bulunmuştur.

Çalışmanın bulguları, entegre klasik ve bulanık yöntemlerin birlikte kullanımının risk yönetimi süreçlerinde uygulanabilir bir çerçeve sunduğunu göstermektedir. Bu yaklaşım, işletmelerin güvenlik seviyesini artırmanın yanı sıra, kaynaklarını daha verimli bir şekilde kullanmalarına olanak tanımıştır. Özellikle belirsizliklerin yoğun olduğu sektörlerde, bulanık mantık temelli metodolojilerin uygulanabilirliği ve avantajları vurgulanmıştır.

Elde edilen sonuçlar, yalnızca yalıtım sektörü için değil, benzer operasyonel risklerle karşı karşıya kalan farklı sektörler için de önemli bir referans niteliği taşımaktadır. Önerilen model, işletmelerde risk yönetimi kararlarının desteklenmesi amacıyla uygulanabilir bir karar destek çerçevesi sunmaktadır.

Bu araştırma, literatüre önemli bir katkı sağlamış ve işletmelerin risk yönetimi stratejilerinde yeni bir perspektif sunmuştur. Gelecekte yapılacak çalışmalarda, farklı sektörlerde daha geniş ölçekli uygulamalar ile modelin etkinliğinin incelenmesi, yöntemin geliştirilmesi açısından faydalı olacaktır. Bu sayede, belirsizlik ortamında karar alma süreçlerine daha güçlü ve yenilikçi çözümler kazandırılması mümkün olacaktır. Ayrıca, tehlikelerin ağırlıklandırılmasında daha güncel ÇKKV yöntemlerinin uygulanmasının, değerlendirmelerin daha objektif olmasına katkı sağlayacağı öngörülmekte olup, bu husus gelecek çalışmalar için planlama dahilinde ele alınmıştır.

Elde edilen bulgular, literatürde daha önce sunulmuş klasik FMEA yaklaşımlarına kıyasla, bulanık mantık ile desteklenen yöntemlerin risk önceliklendirme sürecinde belirsizliklerin dikkate alınmasına imkân tanıyarak daha duyarlı değerlendirmeler yapılmasına katkı sağlayabileceğini göstermektedir. Benzer şekilde, klasik AHP yöntemi yerine bulanık AHP kullanılması, uzman görüşlerindeki belirsizliğin daha uygun biçimde modellenmesine olanak sağlamıştır. Bu durum, Xu et al. (2002) gibi çalışmalarda da vurgulandığı üzere, karar vericilerin subjektif değerlendirmelerinin bulanık ortamda temsil edilmesine katkı sunmaktadır. Ek olarak, çalışma kapsamında uygulanan Bulanık SWARA yöntemi, kriter ağırlıklarının güncel bir yaklaşımla yeniden değerlendirilmesine imkân tanımış ve elde edilen sonuçların Bulanık AHP–TOPSIS tabanlı sıralamalarla karşılaştırmalı olarak incelenmesine olanak sağlamıştır. Ayrıca, TOPSIS yöntemi ile elde edilen sıralamaların Pareto analizine entegre edilmesi, karar vericilere yalnızca öncelikli riskleri değil, aynı zamanda bu risklerin toplam etki üzerindeki göreceli ağırlığını da göstererek stratejik önceliklendirme sürecinin daha sistematik biçimde değerlendirilmesine katkı sunmuştur. Bu bağlamda çalışma, yalnızca metodolojik bir yaklaşım önermekle kalmamış, aynı zamanda pratik uygulamalarda kullanılabilecek bir karar destek çerçevesi sunmaktadır. Literatürde bu yöntemlerin bir arada kullanıldığı çalışmaların sınırlı olması nedeniyle, sunulan entegre modelin hem akademik hem de uygulamaya yönelik katkı sağlayabileceği değerlendirilmektedir.

6. KAYNAKLAR

1. NUTEC, (2025). *Industrial safety measures in the use of thermal insulating products*. <https://www.nutec.com/newsroom/articles/industrial-safety-measures-insulating-products>, Erişim tarihi: 16.06.2026.
2. Ahn, S. (2022). Derivation of risk factors to quantify the risk of safety accidents for small and medium-sized enterprises in construction industry. *Sustainability*, 14(12), 7306.
3. Liu, Y. & Tang, Y. (2022). Managing uncertainty of expert's assessment in FMEA with the belief divergence measure. *Scientific Reports*, 12(1), 6812.
4. Wu, X. & Wu, J. (2021). The risk priority number evaluation of FMEA analysis based on random uncertainty and fuzzy uncertainty. *Complexity*, 2021(1), 8817667.
5. Akman, G. ve Alkan, A. (2006). Tedarik zinciri yönetiminde bulanık AHP yöntemi kullanılarak tedarikçilerin performansının ölçülmesi: Otomotiv yan sanayiinde bir uygulama. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5(9), 23-46.
6. Şengül, Ü., Eren, M. ve Eslamian Shiraz, S. (2015). Bulanık AHP ile belediyelerin toplu taşıma araç seçimi. *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 40, 143-165.
7. Aydın, Ö. (2016). Bulanık AHP ile Ankara için hastane yer seçimi. *Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 24(2), 87-104.
8. Şahin, Y. ve Supçiller, A. (2015). Tedarikçi seçimi için bir karar destek sistemi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 3(2), 91-104.
9. Kocakaya, K., Engin, T., Tektaş, M. ve Aydın, U. (2021). Türkiye’de bölgesel havayolları için uçak tipi seçimi: Küresel bulanık AHP-TOPSIS yöntemlerinin entegrasyonu. *Akıllı Ulaşım Sistemleri Ve Uygulamaları Dergisi*, 4(1), 27-58.
10. Kalan, O. (2023). Dolum hattı makineleri için AHP ve TOPSIS yöntemine dayalı tedarikçi seçimi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 38(4), 967-980.
11. Yörükoğlu, H., Özcan, B., Özkale, C. ve Çelik, C. (2013). The Analysis of the risks of renewable energy resources by using fuzzy FMEA technique. *Dumlupınar University Journal of Social Science*, 2013(Özel Sayısı), 227-242.
12. Özfirat, P.M. (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.
13. Oturakçı, M. ve Dağsuyu, C. (2017). Risk değerlendirmesinde bulanık fine-kinney yöntemi ve uygulaması. *Karaelmas İş Sağlığı ve Güvenliği Dergisi*, 1(1), 17-25.
14. Turan, M. ve Ocaktan, D.G. (2019). Transformatör üreten bir firmada risk analizinde bulanık HTEA kullanımı ve uygulama yazılımı geliştirme. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(1), 474-487.
15. Dişkaya, F. ve Emir, Ş. (2021). AHP-TOPSIS bütünleşik yaklaşımıyla deprem riski tabanlı İstanbul ili kentsel dönüşüm öncelik sıralaması. *Afet ve Risk Dergisi*, 4(2), 203-223.
16. Poyraz, P. ve Şimşir, F. (2022). Tedarik zinciri risk yönetiminde bulanık çok kriterli karar verme yöntemleri ile süreç bazlı hata türleri analizi. *Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences*, 8(1), 86-104.
17. Eş Yürek, E. (2023). Kumaş boyama sürecinde bulanık TOPSIS ile hata türü ve etkileri analizi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 28(3), 915-926.
18. Yorulmaz, M. ve Sezen, K. (2023). Denizcilik alanında kullanılan risk analizi yöntemleri ve Fine Kinney yöntemiyle bir uygulama. *Afet ve Risk Dergisi*, 6(3), 622-637.
19. Karakuzu, N., Karadağ, S. ve İnce, N. (2024). Hata türü ve etkileri analizi (HTEA), bulanık hata türü ve etkileri analizi (Bulanık HTEA): Mobilya sektöründe bir uygulama. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 36(2), 581-591.
20. Aydan, M. ve Kaya, S. (2017). Hata türü ve etkileri analizi (HTEA): üniversite hastanesinde bir uygulama. *Hacettepe Sağlık İdaresi Dergisi*, 20(4), 475-502.
21. Xu, K., Tang, L., Xie, M., Ho, S. & Zhu, M. (2002). Fuzzy assessment of FMEA for engine systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 75(1), 17-29.
22. Dündar, S. ve Ecer, F. (2008). Öğrencilerin GSM operatörü tercihinin analitik hiyerarşi süreci yöntemiyle belirlenmesi. *Yönetim ve Ekonomi Dergisi*, 15(1), 145-987.
23. Chang, D.Y., (1996), Applications of the extent analysis method of fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, 95, 649-655.
24. Demireli, E. (2010). TOPSIS çok kriterli karar verme sistemi: Türkiye’deki kamu bankaları üzerine bir uygulama. *Girişimcilik ve Kalkınma Dergisi*, 5(1), 101-112.

25. Keršuliene, V., Zavadskas, E.K. & Turskis, Z. (2010). Selection of rational dispute resolution method by applying new step-wise weight assessment ratio analysis (SWARA). *Journal of Business Economics and Management*, 11(2), 243-258.
26. Stanujkic, D., Karabasevic, D. & Zavadskas, E.K. (2015). A framework for the selection of a packaging design based on the SWARA method. *Engineering Economics*, 26(2), 181-187.
27. Tabar, M.E. ve Şişman, Y. (2020). Bulanık mantık ile arsa değerlendirme modelinin oluşturulması. *Türkiye Arazi Yönetimi Dergisi*, 2(1), 18-24.
28. Özcan, S. (2001). İstatistiksel proses kontrol tekniklerinden pareto analizi ve çimento sanayiinde bir uygulama. *CÜ İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 2(2), 151-174.
29. Oruç, Y.O. ve Yılmaz, G. (2013). Bulanık 0-1 tamsayılı programlama ve bir hazır beton tesisinde uygulama. *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 18(3), 245-262.

