

BULANIK ÖNCELİKLENDİRME METODU VE HATA TÜRÜ VE ETKİLERİ ANALİZİNİ BİRLEŞTİREN YENİ BİR RİSK ANALİZİ YÖNTEMİ

Pınar MIZRAK ÖZFIRAT

Celal Bayar Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Muradiye Kampüsü, Mühendislik Fakültesi, 45140, Muradiye Manisa

pinar.ozfirat@cbu.edu.tr

(Geliş/Received: 26.02.2014; Kabul/Accepted: 17.11.2014)

ÖZET

İş sağlığı ve güvenliği, gelişen teknoloji ile birlikte üretim miktarlarının artması ve üretim hattının kesintiye uğratılmaması açısından ve kazaların olmadan önlenmesi açısından önemli bir hale gelmiştir. Kazaların oluşmaması için önceden alınacak olan proaktif önlemler oldukça önemlidir. Proaktif önlemlerin etkili bir biçimde alınabilmesi için çalışma ortamında tehlikelerin sınıflandırılması ve risk analizlerinin yapılması gereklidir. Bu çalışmada modern risk analizi yöntemlerinden biri olan hata türleri ve etkileri analizi (HTEA) yöntemine bulanık mantık entegre edilerek her ikisinin de olumlu yönlerini bir araya getirmek amaçlanmaktadır. Böylece HTEA uygulaması ile elde edilen sonuçlar daha gerçekçi nitelik kazanacaktır. Geliştirilen yöntemde HTEA’da kullanılan kaza olasılığı, şiddeti ve farkedilebilirliği kriterleri bulanık analitik hiyerarşi süreci (BAHS) yöntemlerinden biri olan bulanık önceliklendirme metodu ile ele alınmaktadır. Tanımlanan riskler her üç kritere göre değerlendirilir, ve önem katsayıları elde edilir. Bu katsayılar HTEA’da tanımlı olan tablolar kullanılarak puanlara çevrilerek riskler için risk öncelik sayıları (RÖS) belirlenmektedir. BAHS ve HTEA yöntemlerinin birleştirilmesiyle RÖS hesaplamalarının daha objektif, kişiden bağımsız ve gerçekçi olması sağlanmıştır. Önerilen yöntem hem Türkiye’de hem de dünyada en riskli sektörlerden kabul edilen madencilik sektörüne uygulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Risk analizi, hata türleri ve etkileri analizi, bulanık analitik hiyerarşi süreci.

A NEW RISK ANALYSIS METHODOLOGY INTEGRATING FUZZY PRIORITIZATION METHOD AND FAILURE MODES AND EFFECTS ANALYSIS

ABSTRACT

As technology develops and production amounts increase, work health and safety is getting more important in order to prevent accidents before happening and to prevent production line from stopping. Proactive measures are quite important in order to prevent accidents. In order to define proactive measures, threats in the work area should be classified and risk analysis should be made. In this study, one of the modern risk analysis methods, Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) is integrated with fuzzy logic. By this way, FMEA would provide more realistic results. In the methodology developed, the three criteria defined in FMEA which are probability, severity and detection are handled with fuzzy prioritization method which is one of fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) techniques. Risks defined are evaluated according to all three criteria and importance coefficients of risks are obtained. Then these coefficients are turned into degrees defined in FMEA and risk priority numbers (RPN) are calculated. By integrating FAHP and FMEA, RPN calculation becomes more objective and independent from the analyst. The methodology developed is applied to mining sector which is one of the most risky sectors both in Turkey and in the world.

Keywords: Risk analysis, failure modes and effects analysis, fuzzy analytic hierarchy process

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünyada ve ülkemizde sanayileşme ile birlikte iş sağlığı ve güvenliğine verilen önem artmış, bu

kapsamda kuruluşlarda iş sağlığı ve güvenliğinin sağlanması ve sürekli iyileştirilmesi için ayrı bir standart oluşturulmuştur; OHSAS 18001 İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetim Sistemi [1]. Bu yönetim sisteminin

en önemli adımı risklerin belirlenmesi ve analiz edilmesidir.

Literatürde ve sanayide incelenmiş ve uygulanmış birçok risk analizi mevcuttur. Risk analizleri sözel ve sayısal yöntemler olarak ikiye ayrılır. Hata Türleri ve Etkileri Analizi (HTEA) sayısal yöntemlerden bir tanesidir. HTEA iş kazalarının önlenmesinde olası hataların bertaraf edilmesinde kullanıldığı gibi endüstride üretim sektörlerinde hatalı ürün sayısını azaltmak için de kullanılmıştır. Birçok risk analizi yöntemi sadece kazanın olasılığı ve şiddeti kriterlerini değerlendirmektedir. HTEA yöntemi diğer risk analizi yöntemlerinden farklı olarak kazaların önceden farkedilebilirlik değerini kullanarak sistemdeki hataların, tehlikelerin kazaya sebebiyet vermeden belirlenmesini ve en öncelikli olandan başlayıp iyileştirilmesini hedefleyen bir yöntemdir.

Ancak HTEA'nın avantajları olduğu gibi bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlardan en önemlisi olasılık, şiddet ve farkedilebilirlik derecelerini belirlerken subjektif olmasıdır. Herhangi bir işletmedeki riskleri değerlendiren iki farklı kişi aynı risk için farklı risk öncelik sayıları bulabilir. Bu da hangisinin doğru olduğu konusunda karışıklığa neden olabilir? Bu ve benzeri karışıklıkları azaltmak ve daha gerçekçi sonuçlar elde etmek için HTEA yöntemine bulanık mantık uygulanabilir. Literatürde de HTEA'nın çeşitli bulanık mantık yöntemleri ile birleştirilerek uygulanması ile ilgili çalışmalar mevcuttur.

Bu çalışmada daha önce literatürde risk analizine hiç uygulanmamış olan, Mikhailov & Tsvetinov [2] tarafından geliştirilmiş bulanık önceliklendirme metodu (BÖM), HTEA ile entegre edilmiştir. BÖM, bulanık analitik hiyerarşi süresi (BAHS) yöntemlerinden biridir. BAHS'de ilk olarak değerlendirme kriterleri belirlenir ve bunların ikili karşılaştırma matrisi oluşturulur. Her karşılaştırma için alt sınır, üst sınır ve yüksek olasılıklı değer belirlenir. BÖMbu matristeki değerleri kullanarak tutarsızlık oranını minimum yapan matematiksel modeli çözer ve kriterlerin önem katsayılarını bulur.

Bu çalışmada bulanık önceliklendirme metodu, HTEA yönteminde belirlenen risklerin olasılık, şiddet ve farkedilebilirlik katsayılarını bulmak için kullanılmaktadır. Daha sonra elde edilen önem katsayıları HTEA tablolarına göre derecelere çevrilerek risk öncelik sayıları (RÖS) hesaplanır. Son aşamada sınırın üstünde çıkan riskler için proaktif ve reaktif önlemler belirlenir ve ikili karşılaştırma matrisleri yenilenerek RÖS değerleri yeniden hesaplanır.

Geliştirilen bulanık hata türleri ve etkileri analizi (BHTEA) yöntemi en riskli kabul edilen sektörlerden biri olan madencilik sektöründe uygulanmıştır. Risklerin belirlenmesi ve ikili karşılaştırma matrislerinin oluşturulması konunun uzmanı sekiz maden mühendisinin görüşleri alınarak yapılmıştır.

Makalenin ikinci ve üçüncü bölümlerinde HTEA ve BÖM ve bu konularda yapılan güncel çalışmalar görülmektedir. Dördüncü bölümde bu iki yöntemi entegre ederek geliştirilen BHTEA metodolojisinin literatürdeki yeri ve önemi açıklanmaktadır. Beşinci bölümde geliştirilen yöntem detaylarıyla anlatılmaktadır. Altıncı bölümde madencilik sektöründe yapılan uygulama bulunmaktadır. Yedinci bölümde ise sonuç ve öneriler sunulmaktadır.

2. HATA TÜRLERİ VE ETKİLERİ ANALİZİ (HTEA) (FAILURE MODES AND EFFECTS ANALYSIS)

HTEA ilk kez Amerikan ordusu tarafından geliştirilmiş ve NASA tarafından sistem ve donanım hatalarının ve bunların etkilerinin belirlenmesi için kullanılmaya başlanmıştır. Sonrasında ise otomotiv sektöründen yazılıma kadar, gıdadan madencilığe kadar pek çok alanda uygulanmıştır ve kullanılmaya devam edilmektedir [3-5]. Literatürde bulunan HTEA çalışmalarıyla ilgili detaylı tarama Liu vd. [6] de bulunabilir.

HTEA'da üç önemli bileşenin çarpımıyla Risk Öncelik Sayısı (RÖS) bulunur (Denklem 1). Bu bileşenler sırasıyla olasılık, şiddet ve farkedilebilirliktir. Olasılık tehlikenin gerçekleşme sıklığını ifade etmektedir. Şiddet faktörü bu tehlikenin gerçekleşmesi durumunda ne kadar etki yaratacağını göstermektedir. Farkedilebilirlik faktörü ise bu tehlikenin gerçekleşmeden önce ne derecede saptanabileceğinin ölçüsüdür. HTEA'da kullanılan olasılık, şiddet ve farkedilebilirlik değerleri sırasıyla Tablo 1, 2 ve 3'te görülmektedir. Tablo 1 ve 2'de riskin gerçekleşme olasılığı ve şiddeti arttıkça derecesinin arttığı görülmektedir. Ancak Tablo 3'te verilen fark edilebilirlik dereceleri için durum farklıdır. Bir riskin fark edilmesi ne kadar zor ise derecesi o kadar yüksek olmaktadır.

$$RÖS = \text{Olasılık (O)} \times \text{Şiddet (S)} \times \text{Farkedilebilirlik (D)} \quad (1)$$

Tablo 1. Hatanın oluşma olasılığı ve derecesi [4,5,7,8] (Occurrence probability and degree of accident)

Hatanın oluşma sıklığı	Hatanın olasılığı (O)	Derece
Çok yüksek:	1/2'den fazla	10
Kaçınılmaz hata	[1/3,1/2)	9
Yüksek: Tekrar	[1/8,1/3)	8
tekrar hata	[1/20,1/8)	7
Orta: Ara sıra olan	[1/80,1/20)	6
hata	[1/400,1/80)	5
Düşük: Nispeten	[1/2000,1/400)	4
az olan hata	[1/15000,1/2000)	3
Pek az: Olası	[1/150000-1/15000)	2
olmayan hata	1/150000'den düşük	1

Tablo 2: Şiddet etkisi dereceleri [4,5,7,8](Degrees of severity)

Etki	Şiddetin etkisi (S)	Derece
Uyarısız gelen yüksek tehlike	Felakete yol açabilecek etkiye sahip ve uyarısız gelen potansiyel hata	10
Uyarısız gelen tehlike	Yüksek hasara ve toplu ölümlere yol açabilecek etkiye sahip ve uyarısız gelen potansiyel hata	9
Çok yüksek	Sistemin tamamen hasar görmesini sağlayan yıkıcı etkiye sahip ağır yaralanmalara, 3. derece yanık, akut ölüm vb. etkiye sahip hata türü	8
Yüksek	Ekipmanın tamamen hasar görmesine neden olan ve ölüme, zehirlenme, 3. derece yanık, akut ölüm vb. etkiye sahip hata türü	7
Orta	Sistemin performansını etkileyen, uzuv ve organ kaybı, ağır yaralanma, kanser vb. yol açan hata	6
Düşük	Kırık, kalıcı küçük iş görmezlik, 2. derece yanık, beyin sarsıntısı vb. etkiye sahip olan hata	5
Çok düşük	İncinme, küçük kesik ve sıyrıklar, ezilmeler vb. hafif yaralanmalar ile kısa süre rahatsızlıklara neden olan hata	4
Küçük	Sistemin çalışmasını yavaşlatan hata	3
Çok küçük	Sistemin çalışmasında kargaşaya yol açan hata	2
Yok	Etki yok	1

Tablo 3: Farkedilebilirlik dereceleri [4,5,7,8](Degrees of detection)

Farkedilebilirlik	Farkedilebilirlik Olasılığı (F)	Derece
Fark edilemez	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın farkedilebilirliği mümkün değil	10
Çok az	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın farkedilebilirliği çok uzak	9
Az	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın farkedilebilirliği uzak	8
Çok düşük	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın farkedilebilirliği çok düşük	7
Düşük	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın farkedilebilirliği düşük	6
Orta	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın farkedilebilirliği orta	5
Yüksek ortalama	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın farkedilebilirliği yüksek ortalama	4
Yüksek	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın farkedilebilirliği yüksek	3
Çok yüksek	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın farkedilebilirliği çok yüksek	2
Hemen hemen kesin	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın farkedilebilirliği hemen hemen kesin	1

HTEA'da bu tabloları ve denklem 1'i kullanarak bir sistemdeki mevcut risklerin RÖS değerleri hesaplanır. RÖS değeri 40'ın altında olan riskler için önlem almaya gerek yoktur. RÖS değeri 40 ile 100 arasında olan riskler için işletmenin kararına bağlı olarak önlem alınabilir. RÖS değeri 100'ü geçen riskler mutlaka gözden geçirilmelidir (Tablo 4). Gerekli proaktif ve reaktif önlemler alınarak olasılık, farkedilebilirlik ve şiddet dereceleri düşürülmelidir. Yeni durum için RÖS değerleri hesaplanmalıdır. Sistemde mevcut riskler gerçekleştiği zaman bu hata yeniden gözden geçirilmeli, gerekli önlemler alınmalıdır.

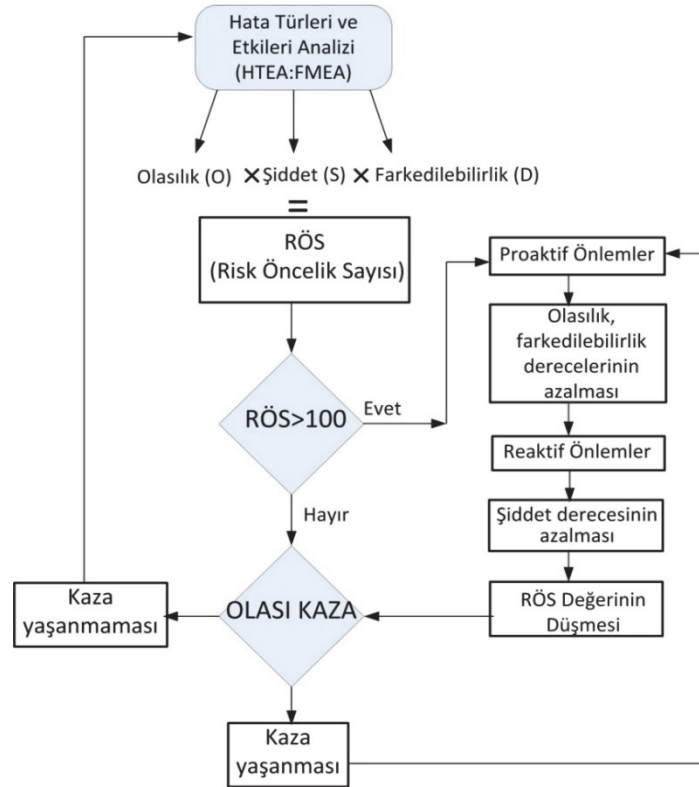
HTEA sonlu bir analiz değildir. Sistemi sürekli kontrol altında tutması, olası bir kaza gerçekleştiğinde gerekli önlemleri alarak analizi tekrarlaması, gelişen teknoloji ve koşullara göre sistemin karşılaştığı yeni riskleri ve hataları tanımlayarak bunlar için de analizi gerçekleştirmesi gerekir. Yöntemin işleyişi Şekil 1'de verilen akış diyagramında görülmektedir.

Tablo 4:RÖS Değerlendirmesi [4,5,7,8](Evaluation of RPN [4,5,7,8])

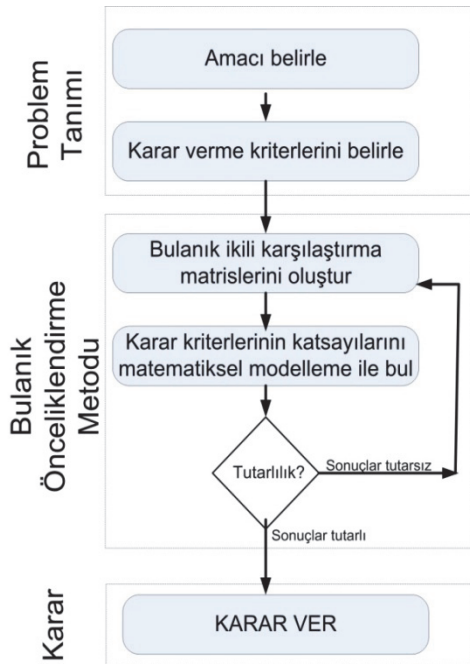
RÖS Değeri	Önlem
$RÖS < 40$	Önlem almaya gerek yok.
$40 \leq RÖS \leq 100$	Önlem alınabilir.
$RÖS > 100$	Önlem alınması gereklidir.

3. BULANIK ÖNCELİKLENDİRME METODU (FUZZY PRIORITIZATION METHOD)

Bulanık önceliklendirme metodu (BÖM) Mikhailov ve Tsvetinov [2] tarafından geliştirilmiş BAHS yöntemlerinden biridir. Bu yöntemi uygulayan çok az sayıda çalışma vardır. Bunlardan biri kömür üretme yöntemi seçiminde kullanan Özfrat [9]'ın çalışmasıdır. Bilindiği kadarıyla BÖM daha önce hiçbir risk analizi ya da risk değerlendirme yönteminde kullanılmamıştır. BÖM akış diyagramı Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 1. Hata Türleri ve Etkileri Analizi akış diyagramı (Flow diagram of failure modes and effects analysis)



Şekil 2. Bulanık önceliklendirme metodu akış diyagramı [13] (Flow diagram of fuzzy prioritization method)

Analitik hiyerarşi süreci temel olarak üç bölümden oluşur. Amacın ve kriterlerin (varsa alternatiflerin) belirlendiği tanımlama aşaması, önem katsayılarının hesaplandığı analiz aşaması ve çıkan sonuçların yorumlandığı karar aşaması (Şekil 2). BÖM bu sürecin katsayı hesaplama aşamasında kullanılmaktadır.

BÖM'de amaç ve karar verme kriterleri belirlendikten sonra ikili karşılaştırma matrisleri bulanık mantık kurallarına göre oluşturulur. İki kriterin birbirlerine göre üstünlüklerini (ya da önem derecelerini) belirlerken tek ve kesin bir değer belirlemek yerine bir alt sınır değeri, bir üst sınır değeri ve bir de gerçekleşme olasılığı yüksek değer belirlenir. Denklem 2'de bulanık ikili karşılaştırma matrisi görülmektedir.

$$A^{Bulanık} = \begin{bmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \dots & \frac{w_2}{w_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & (l_{12}, m_{12}, u_{12}) & \dots & (l_{1n}, m_{1n}, u_{1n}) \\ (l_{21}, m_{21}, u_{21}) & 1 & \dots & (l_{2n}, m_{2n}, u_{2n}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ (l_{n1}, m_{n1}, u_{n1}) & (l_{n2}, m_{n2}, u_{n2}) & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Denklemden kullanılan parametreler aşağıda tanımlanmıştır.

l_{ij} : i ve j kriterlerinin karşılaştırılmasında alt sınır değeri

m_{ij} : i ve j kriterlerinin karşılaştırılmasında en yüksek olasılıklı değer

u_{ij} : i ve j kriterlerinin karşılaştırılmasında üst sınır değeri

w_i : i. kriterin önem katsayısı

Denklemin 2'de görülen bulanık karşılaştırma matrisinde i ve j kriterlerinin karşılaştırılmasındaki alt sınır değeri (l_{ij}), j ve i kriterlerinin karşılaştırılmasındaki üst sınır değerinin tersine eşittir ($1/u_{ji}$). Bu durum tüm karşılaştırmalar için geçerlidir.

ve denklem 3'de ifade edilmektedir. Dolayısıyla ikili karşılaştırma matrisinde sadece köşegenin üstünü oluşturmak yeterlidir. Köşegenin altında kalan değerler denklem 3 kullanılarak bulunacaktır.

$$l_{ij}=1/l_{ji}, m_{ij}=1/m_{ji}, u_{ij}=1/u_{ji} \quad (3)$$

Karşılaştırmalarda Saaty'nin 9'lu ölçeği kullanılır[10]. Denklem 2'de görülen matriste $(l_{12}, m_{12}, u_{12})=(4, 5, 6)$ olduğunu varsayalım. Bunun anlamı, "1. kriter, 2. kritere göre büyük olasılıkla daha önemli ama bu değer 4 ile 6 arasında değişebilir." olacaktır.

Bulanık mantık kurallarını kullanarak yapılan karşılaştırmalar daha gerçekçi ve doğru sonuçlar elde edilmesini sağlayacaktır. Karşılaştırma değerleri aralıklarla verildiği için yanılma payı azalacak hatta 0a inebilecektir.

İkili karşılaştırma matrisi oluşturulduktan sonra, BÖM, karar verme kriterlerinin katsayılarını hesaplar. Denklem 4'te bulanık üyelik fonksiyonları tanımlanmıştır.

$$\mu_{ij}\left(\frac{w_i}{w_j}\right) = \begin{cases} \text{eğer } \frac{w_i}{w_j} \leq m_{ij} \text{ ise } \frac{\left(\frac{w_i}{w_j} - l_{ij}\right)}{m_{ij} - l_{ij}} \\ \text{eğer } \frac{w_i}{w_j} > m_{ij} \text{ ise } \frac{\left(u_{ij} - \frac{w_i}{w_j}\right)}{u_{ij} - m_{ij}} \end{cases} \quad (4)$$

Hesaplanan katsayıların birbiri içinde mümkün olduğunca tutarlı olması gerekir. Dolayısıyla tüm bulanık üyelik fonksiyonlarının değerleri mümkün olduğunca maksimum olmalıdır. Bu durum denklem 5'teki matematiksel modelle ifade edilebilir. Modelde amaç λ 'yı maksimum yapmaktır. Modelin ilk kısıtıyla birlikte düşünüldüğünde bu amaç tüm üyelik fonksiyonlarının değerini mümkün olduğunca büyükmeyi ifade eder. İkinci kısıt ise tüm kriterlerin katsayılarının toplamının 1 olması gerektiğini ifade eder.

en büyük λ

kısıtlar:

$$\lambda \leq \mu_{ij}\left(\frac{w_i}{w_j}\right) \quad \forall i, j \quad (5)$$

$$\sum_i w_i = 1$$

$$w_i > 0$$

Üyelik fonksiyonlarının değerleri, denklem 4'ü kullanarak yerine yazıldığında elde edilen matematiksel model denklem 6'daki gibi olacaktır.

en büyük λ

kısıtlar:

$$\lambda w_j (m_{ij} - l_{ij}) \leq w_i - l_{ij} w_j \quad \forall i, j \quad (6)$$

$$\lambda w_j (u_{ij} - m_{ij}) \leq u_{ij} w_j - w_i \quad \forall i, j$$

$$\sum_i w_i = 1$$

$$w_i > 0$$

Denklem 6'da görülen model doğrusal olmayan bir modeldir. İki reel değişkenin çarpımına olanak veren Lingo 9.0 optimizasyon programı ile çözülmüştür [11]. Bu modelin çözümünde elde edilen λ değeri tutarsızlık oranını verecektir. Bu değer 0,1'in altında olması gerekmektedir.

Bulanık önceliklendirme metodunun diğer BAHS yöntemleri ile karşılaştırıldığında sağladığı çok önemli bir avantaj mevcuttur. Bu yöntemde matematiksel model çözümüyle katsayılar elde edildiği için ikili karşılaştırma matrisinin tümünü doldurmaya gerek yoktur. Birbirine göre önem dereceleri hakkında kesin olarak bilgi olanlar karşılaştırılabilir. Böylece sadece bu karşılaştırmalar için gerekli üyelik fonksiyonları ve kısıtlar yazılarak model çözülebilir. Bu durumda hem tutarsızlık oranının daha düşük çıkmasını sağlayacaktır hem de zorlamayla yapılacak karşılaştırmaları engelleyerek daha doğru ve gerçekçi sonuçlara ulaştıracaktır.

4. GELİŞTİRİLEN BULANIK HATA TÜRLERİ VE ETKİLERİ ANALİZİYÖNTEMİNİN LİTERATÜRDEKİ YERİ (PLACE OF THE PROPOSED ALGORITHM IN THE LITERATURE)

Bu çalışmada HTEA ve BÖM yöntemlerini entegre eden yeni bir bulanık HTEA yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemin literatürdeki yerini konumlandırabilmek için bu bölümde çalışmalar üç gruba ayrılmıştır. İlk grup çalışmalar BAHS yöntemlerini ele alan ve uygulayan çalışmalardır. İkinci grupta HTEA yöntemini iş sağlığı ve güvenliği alanında uygulayan çalışmalar yer alır. Üçüncü grupta ise HTEA yönteminin eksikliklerini gidermek üzere bulanık mantık tekniklerini HTEA ile birleştiren çalışmalar yer almaktadır.

Bulanık analitik hiyerarşi süreci (BAHS), analitik hiyerarşi süreci ile bulanık mantık kurallarını birleştiren bir başlıktır. Literatürde bu başlığın altında çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Bunlardan bazıları Dağdeviren [12], Yılmaz ve Dağdeviren [13], Majumder vd. [14], Abdullah ve Najib [15], İç ve Yurdakul [16]'dır. Dağdeviren [12], AHS'ni bulanıklaştırırken karar faktörlerini dilsel değişkenler kullanarak değerlendirmiş ve yeni bir bulanık ağırlıkları durulaştırma yöntemi geliştirmiştir. Geliştirilen yöntemi personel seçme probleminde uygulamıştır. Yılmaz ve Dağdeviren [13]'de ise ekipman seçimi problemine hem PROMETHEE hem de bulanık PROMETHEE yöntemleri uygulanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Majumder vd. [14]'de inşaat alanlarındaki risk analizi için klasik yamuk bulanık kümeleri kullanarak BAHS uygulamıştır. Abdullah ve Najib [15] ise yamuk bulanık kümeler yerine tip 2 bulanık kümeler kullanarak yeni bir BAHS yöntemi geliştirmiş ve bu yöntemi iş güvenliğinde uygulamıştır. İç ve Yurdakul [16] BAHS ve bulanık TOPSIS kullanarak işleme merkezi

seçimi problemi için bir karar destek sistemi geliştirmişlerdir.

Tüm bu çalışmalardan farklı olarak geliştirilen yöntemde BAHS yöntemlerinden biri olan BÖM kullanılmıştır. Bilindiği kadarıyla bu yöntem daha önce sadece maden makinesi seçiminde [9] ve ekonomik analizde [2] kullanılmıştır. Dolayısıyla bu çalışma bir risk analizi tekniğinde BÖM'ün kullanıldığı ilk çalışmadır.

Bu bölümde yer verilen ikinci grup çalışmalar HTEA yöntemini iş sağlığı ve güvenliği alanında uygulayan çalışmalardır. Bu alanda çalışmalar oldukça kısıtlıdır. Bunlardan son dönemde yapılan bazıları Chen vd. [17], Feili vd. [18], Thivel vd. [19], Hoseynabadi vd. [20] ve Eleren ve Ersoydur [21]. Bu çalışmalarda klasik HTEA yöntemi sırasıyla nükleer reaktör test modülü tasarımında, jeotermal güç santrallerinin risk analizinde, biyolojik yakma işleminin risk analizinde, rüzgar türbinlerinin risk analizinde ve mermer ocaklarında kesme teknolojilerinin karşılaştırılmasında kullanılmıştır.

Bu çalışmaların tümünde ve klasik HTEA yöntemi kullanan diğer çalışmalarda hataların olasılık, şiddet ve farkedilebilirlik derecelerinin belirlenmesi aşaması subjektif bir yapıya sahiptir. Özellikle şiddet ve farkedilebilirlik tablolarında (Tablo 2 ve 3) derecelerin tanımları sözeldir. Bu tanımların algılanması ve risklerin derecelerinin belirlenmesi kişiden kişiye değişebilir. Eğer analiz yapılırken geçmişe ait veriler yoksa aynı durum olasılık faktörü için de geçerli olabilir. Bir işletme için tanımlanmış risklerin RÖS değerleri HTEA'yı gerçekleştiren kişiye göre değişebilir. Ya da risk analizinin gerçekleştirildiği zamana göre, değişen çevre koşullarına göre değişebilir. Bu durumda bazı risklerin önemli olduğu halde sınır değerinin altında kalmasına bazı risklerinde gereğinden fazla önemli çıkmasına neden olabilir. Bu ve benzer dezavantajları çözümlenebilmek ve gerçeğe daha yakın ve doğru sonuçlar elde edebilmek için bu yöntemde bulanık mantık teknikleri uygulanabilir. Bu çalışmada da HTEA yönteminin bileşenleri bulanık değerler belirlenerek yöntemde esneklik katılmış ve hata payı azaltılmıştır.

Literatürde de HTEA yöntemini bulanık mantıkla birleştiren çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalar, mevcut makalede üçüncü grup olarak tanımlanmaktadır. Mevcut çalışmaya benzer yöntemler kullananlar Chang vd. [22], Xu vd. [23], Braglia vd. [24,25], Hu vd. [26] ve Yücel vd. [27] olarak sıralanabilir.

Chang vd. [22]'ne ait çalışmada olasılık, şiddet ve farkedilebilirlik faktörleri çok düşük, düşük, orta, yüksek, çok yüksek gibi bulanık ifadelerle tanımlanmıştır. Xu vd. [23] dizel motorların analizi için bulanık HTEA kullanarak bir uzman sistem

oluşturmuştur. Braglia vd. [24,25] bulanık TOPSIS yaklaşımıyla HTEA yaklaşımını birleştirmiştir.

Hu vd. [26] çalışmasında BAHS ve HTEA birleştirilmiştir ve geliştirilen yöntem bilgisayar üreten bir firmanın malzeme ve parçalarında tehlikeli madde bulunup bulunmadığı ile ilgili risk değerlendirmesinde kullanılmıştır. Bu çalışmanın BAHS adımıyla HTEA'da bulunan olasılık, şiddet ve fark edilebilirlik kriterleri birbirleri ile karşılaştırılmış ve önem katsayıları geometrik ortalama yöntemiyle bulunmuştur. Yücel vd. [27]'de ise bir hastanenin bilgi sistemi için bulanık risk analizi yapılmıştır. Bu çalışmada da önem katsayılarını bulmak için analitik ağ süreci kullanılmıştır.

Adı geçen çalışmaların dışında da HTEA yöntemi ile çok kriterli karar verme tekniklerini birleştiren başka çalışmalar da mevcuttur. Detaylı bir literatür listesi Liu vd. [6]'de bulunabilir. Ancak daha önce de belirtildiği üzere şimdiye kadar hiçbir çalışmada BÖM herhangi bir risk analizi yönteminde kullanılmamıştır.

Dolayısıyla bu çalışma HTEA yöntemi ile BÖM'ü birleştiren yeni bir bulanık HTEA yöntemi geliştiren ilk çalışmadır. Bu çalışmanın literatüre getirdiği yenilikler aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

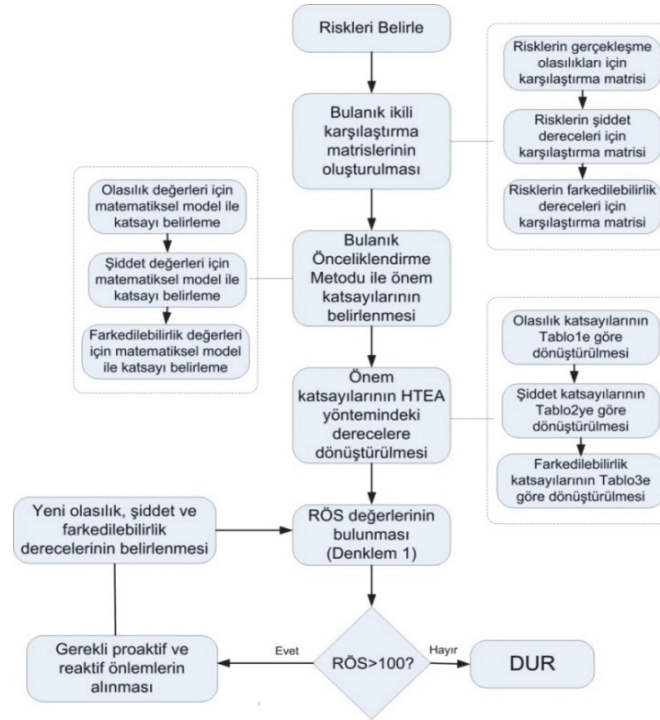
- BÖM'ü ilk defa risk analizinde kullanılmaktadır.
- HTEA ile BÖM birleştirilerek yeni bir risk analizi yöntemi geliştirilmektedir.
- En riskli sektörlerden biri kabul edilen madencilik sektöründe ilk defa BHTEA uygulaması yapılmaktadır.

5. BULANIK HATA TÜRLERİ VE ETKİLERİ ANALİZİ (FUZZY FAILURE MODES AND EFFECTS ANALYSIS)

Geliştirilen yöntemin akış şeması Şekil 3'de görülmektedir.

Risklerin Belirlenmesi ve Bulanık Karşılaştırma Matrisleri

Şekil 3'te görüldüğü üzere ilk adımda incelenen durumdaki olası riskler belirlenir. n adet risk belirlendiğini varsayalım. Daha sonra belirlenen risklerin gerçekleşme olasılıkları, şiddet değerleri ve fark edilebilirlik değerleri ikili olarak karşılaştırılır. Bu karşılaştırmalarda Saaty'nin 9'lu ölçeği [10] kullanılarak bir alt sınır değeri, bir üst sınır değeri ve bir de yüksek olasılıklı değer belirlenir. İkili karşılaştırma matrisleri 2. denklemdeki gibi her üç faktör (olasılık, şiddet, fark edilebilirlik) için de oluşturulur. Oluşturulan matrislere sırasıyla **OLASILIK^{Bulanık}**, **ŞİDDET^{Bulanık}** ve **FARKEDİLEBİLİRLİK^{Bulanık}** diyelim.



Şekil 3. Geliştirilen algoritmanın akış şeması (Flow diagram of the proposed algorithm)

BÖM ile Önem Katsayılarının Belirlenmesi

OLASILIK^{Bulanık}, **ŞİDDET**^{Bulanık}, **FARKEDİLEBİLİRLİK**^{Bulanık} matrisleri

oluşturulduktan sonra BÖM aşamasına geçilir. Bu matrislerin her biri için denklem 6'da verilen matematiksel model çalıştırılarak sırasıyla risklerin olasılık, şiddet ve fark edilebilirlik katsayıları bulunur (Denklem 7, 8, 9). Bu model doğrusal olmayan niteliktedir ve Lingo 9.0 optimizasyon programı [15] ile çözülebilir.

$$W^{OLASILIK} = (w_1^O w_2^O w_3^O \dots w_n^O) \quad (7)$$

$$W^{ŞİDDET} = (w_1^S w_2^S w_3^S \dots w_n^S) \quad (8)$$

$$W^{FARKEDİLEBİLİRLİK} = (w_1^D w_2^D w_3^D \dots w_n^D) \quad (9)$$

Katsayıların HTEA Derecelerine Dönüştürülmesi

Matematiksel modelin çözümüyle denklem 7'de elde edilen katsayılar risklerin birbirlerine göre gerçekleşme olasılıklarının değerleridir. Bu değerleri, Tablo 1'i kullanarak HTEA yönteminde kullanılan

derecelere dönüştürmek gereklidir. Bunun için ilk olarak belirlenen risklerden en yüksek olasılığa sahip olan riskin olasılığı bulunur (ya da sistemin uzmanları tarafından belirlenir). Bu olasılık P_1 olsun (Tablo 5, C). Daha sonra Tablo 5'te görüldüğü gibi tüm risklere karşılık gelen olasılık değerleri bulunur (D). Bu değerler de Tablo 1'e göre karşılık gelen derecelere çevrilir (Tablo 5, E).

Benzer işlem şiddet ve fark edilebilirlik dereceleri için de yapılır. Tablo 6'da, B sütununda matematiksel model çözümüyle elde edilen şiddet katsayıları görülmektedir. Bu katsayıların HTEA yönteminde kullanılan şiddet derecelerine dönüştürülmesi gerekmektedir. Belirlenen risklerden şiddeti en yüksek olanın şiddet derecesi Tablo 2'de verilmiş olan tanımlara uygun olarak sistemin uzmanlarınca belirlenir. Bu değer S_1 olsun (Tablo 6, C). Son olarak diğer tüm risklerin şiddet dereceleri Tablo 6'nın D sütununda görüldüğü gibi dönüştürülür. Aynı işlemler fark edilebilirlik dereceleri için de tekrarlanır (Tablo 7).

Tablo 5: BÖM ile bulunan olasılık katsayılarının HTEA derecelerine dönüştürülmesi.(Converting probability coefficients found by fuzzy prioritization method into FMEA degrees)

Riskler (A)	Olasılık Katsayısı (Denklem 7) (B)	Gerçek Olasılık (En yüksek değer) (C)	Katsayılara Göre Bulunan Olasılık (D)	Tablo 1'e göre Derece (E)
R ₁	w_1^O	P_1	-	O_1
R ₂	w_2^O	-	$P_1 \cdot (w_2^O / w_1^O)$	O_2
...	...	-
R _n	w_n^O	-	$P_1 \cdot (w_n^O / w_1^O)$	O_n

Tablo 6: BÖM ile bulunan şiddet katsayılarının HTEA derecelerine dönüştürülmesi.(Converting severity coefficients found by fuzzy prioritization method into FMEA degrees)

Riskler (A)	Şiddet Katsayısı (Denklem 8) (B)	En yüksek şiddet değeri (Tablo2) (C)	Katsayılara Göre Bulunan Derece (D)
R ₁	w_1^S	S_1	S_1
R ₂	w_2^S	-	$S_1 \cdot (w_2^S / w_1^S)$
...	...	-	
R _n	w_n^S	-	$S_1 \cdot (w_n^S / w_1^S)$

Tablo 7:BÖM ile bulunan farkedilebilirlik katsayılarının HTEA derecelerine dönüştürülmesi.(Converting detection coefficients found by fuzzy prioritization method into FMEA degrees)

Riskler (A)	Farkedilebilirlik Katsayısı (Denklem 9) (B)	En yüksek farkedilebilirlik değeri (Tablo 3) (C)	Katsayılara Göre Bulunan Derece (D)
R ₁	w_1^D	D_1	D_1
R ₂	w_2^D	-	$D_1 \cdot (w_2^D / w_1^D)$
...	...	-	
R _n	w_n^D	-	$D_1 \cdot (w_n^D / w_1^D)$

RÖS Değerlerinin Bulunması

Tüm risklerin RÖS değerleri denklem 1 kullanılarak hesaplanır. RÖS değeri 100'den büyük çıkan riskler için gerekli proaktif ve reaktif önlemler alınır. Proaktif önlemlerle olasılık ve farkedilebilirlik dereceleri düşürülür, reaktif önlemlerle ise şiddet dereceleri düşürülür. Tüm riskler için RÖS değerleri 100'ün altında değer alınca kadar bu şekilde devam edilir. Geliştirilen yöntem en riskli sektörlerden biri olan yeraltı madenciliğinde uygulanmıştır.

6. MADENCİLİK SEKTÖRÜNDEN GERÇEK BİR UYGULAMA (A REAL LIFE CASE STUDY IN MINING SECTOR)

Günümüzde risk analizinin önemi kabul edilmiş ve inşaat sektöründe kıyı yapılarının güvenilirliğinin araştırılmasından [28] denizlerde yaşanacak kazaların risk analizi ve petrol kirliliğinin modellenmesine kadar [29] birçok alanda uygulanmaya başlamıştır. Üretim endüstrisinde çalışma şartları ve ortamı açısından çok tehlikeli sınıfta yer alan sektörlerden biri de madenciliktir. Madencilik sektöründe de son yıllarda yapılan bazı risk analizi çalışmaları Mahdevari vd. [30], Badri vd. [31], Petrovic vd.[32] ve Ersoy[33]'a ait çalışmalardır. Bu çalışmaların tümü de çok kriterli karar verme tekniklerini uygulamaktadır. Dolayısıyla risk analizi ve iş güvenliği çalışmalarında birden çok kriterin olması ve bunların karşılaştırılması gerekliliği önem kazanmaktadır.

Bu çalışmada geliştirilen yöntem, en riskli sektörlerden biri olması ve ülkemizde oldukça yaygın olarak bulunması nedeniyle madencilik sektöründe

bir yeraltı kömür madeninde uygulanmıştır. Yeraltı madenciliğinde üretim kapasitelerinin çok büyük olması, çalışma şartlarının zor ve tehlikeli olması ve üç vardiya ile tüm gün çalışılması birçok hata, tehlike kaynağını ve sonucunda riski oluşturmaktadır.

6.1 Risklerin Belirlenmesi (Identifying Risks)

Bu çalışma Ege Bölgesinde faaliyet gösteren bir yeraltı kömür madeni için yapılmıştır. Kömür madenlerinde birçok tehlike kaynağı mevcuttur. Bu tehlikeleri ve riskleri belirleyebilmek için Özfirat [34]'ın çalışmasından 1992-2000 yılları arasında çalışılan maden ocağında gerçekleşen kaza istatistikleri ile Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği [35] gözden geçirilmiştir. Bu çalışmalardan yararlanarak ve ikisi iş güvenliği uzmanı, altısı yeraltı madenciliği uzmanı olmak üzere sekiz maden mühendisi ile görüşmelerle Tablo 8'de görülen hata türleri ve etkileri belirlenmiştir.

Kömür damarlarında, kömürün jeolojik oluşum süreci sırasında geçirimsiz tabakalar içerisinde Metan gazı (CH₄) birikmesi olmaktadır. Dolayısıyla grizu (metan + hava karışımı) tehlikesi en önemli tehlike kaynağıdır. Yeraltında diğer bir tehlike kaynağı kömür tozlarıdır. Kömür tozları bastırılmayıp havada askıda biriktiğinde hiçbir dış etki olmaksızın çok şiddetli olarak patlamaktadır. Ayrıca kömür tozları antrakoz (kömür tozlarının akciğerde birikmesi) hastalığına yol açmaktadır. Yeraltında sürekli olarak yapılan havalandırma sebebiyle hava kömüre sürtünerek ve eski üretim bölgelerinde kalan kömürü içsel (endojen yangın) olarak yanmasını sağlar.

Tablo 8. Bir yeraltı kömür madeninde oluşabilecek tehlikeler, hatalar ve etkileri(Risks that can take place in an underground coal mine)

Tehlike	Hatalar	Etkileri
Gaz	Exproof (Yanmaz, kıvılcım çıkarmaz) malzeme kullanılmaması Yeterli ölçüm yapılmaması Kontrol sondajlarının yapılmaması Havalandırmanın düzgün yapılmaması	R1: Gaz Patlaması
Gaz	Yeterli ölçüm yapılmaması Havalandırmanın düzgün yapılmaması	R2: Zehirlenme, Boğulma
Kömür tozu	Kömür tozlarının bastırılmaması Havalandırmanın düzgün yapılmaması	R3: Toz Patlaması
Kömür	Eski üretim boşluklarında kalan kömürün hava ile temasının kesilmemesi Eski üretim boşluklarından hava geçişinin önlenmemesi	R4: Yangın
Nakliyat	Hareketli kısımlarda kontrolsüz bakım onarım yapma Sinyalizasyon ve aydınlatmanın yeterli olmaması Taşıma kapasitelerinden fazla yükleme yapılması	R5: Nakliyata bağlı vurma, çarpma, düşme
Üretim	Delme-patlatma yapmadan önce gerekli kontrollerin yapılmaması Makine çalışmaya başlamadan önce uyarı sesinin olmaması	R6: Üretime bağlı vurma, çarpma, sıkışma
Tahkimat	Tahkimatların uygun seçilmemesi Arın (kazı yapılan yüzey) ve tavan bölgesinin yeteri kadar kontrol edilmemesi	R7: Göçük, taş, kömür düşmeleri
Sıcaklık ve nem	Havalandırma yetersizliği	R8: Aşırı terleme, su ve tuz kaybı, konsantrasyon bozukluğu
Gürültü	Makinelerin bakımlarının yapılmaması Makine seçimi yapılırken uygun seçim yapılamaması	R9: İşitme kaybı, dikkat eksikliği
Yeraltı suyu	Su pompalarının yetersizliği Kontrol sondajlarının yetersizliği	R10: Su basması

Dolayısıyla kömür madenlerinde yangın tehlikesi de mevcuttur. Zehirli gazlar CO, H₂S ve SO₂ gibi gazlar zehirlenmelere yol açabilir. Tahkimat (tavan destek üniteleri) çalışmalarında yapılan hatalar ise göçük, taş, kömür düşmesi gibi kazalara yol açmaktadır. Bunun dışında üretim esnasında ve nakliyat çalışmalarında kazalar sıklıkla görülmektedir. Yeraltında su problemi, gürültü, sıcaklık ve nem de diğer tehlike türleridir. Bu tehlikelere bağlı olarak gerçekleşebilecek hatalar ve riskler de Tablo 8'de görüldüğü gibi tanımlanmıştır.

6.2 Bulanık İkili Karşılaştırma Matrislerinin Oluşturulması (Developing Fuzzy Pairwise Comparison Matrices)

Riskler belirlendikten sonra, ikisi madenlerde iş güvenliği uzmanından ve altı yeraltı madencilik uzmanından, birbirlerinden bağımsız olarak ikili karşılaştırma matrisini doldurmaları istenmiştir. Risklerin gerçekleşme olasılıkları, şiddetleri ve fark edilebilirlikleri için her uzman ayrı bir karşılaştırma matrisi doldurmuştur.

Matrisleri doldururken uygulanan yöntem:

- Saaty'nin 9'lu ölçeği açıklanmıştır [10].
- Üç matriste (olasılık, şiddet, fark edilebilirlik karşılaştırma matrisleri) de yalnızca köşegenin üstünün doldurulması istenmiştir.

(Köşegenin altında kalan kısım denklem 3 kullanılarak doldurulmuştur.)

- Tüm uzmanlar birbirlerinden bağımsız olarak matrisleri doldurmuştur.
- İki riski karşılaştırırken yalnızca bir değer belirlenmesi istenmiştir. Alt sınır, üst sınır değerleri ve yüksek olasılıklı değer sekiz uzmanın değerlendirmelerinden çıkarılmıştır. Sekiz kişinin yazdığı sekiz değer en düşüğü alt sınır olarak, en yükseği üst sınır olarak belirlenmiştir. Sekiz değerden en çok yazılan değer ise yüksek olasılıklı değer olarak belirlenmiştir.
- Alt sınır, üst sınır ve yüksek olasılıklı değerleri belirlerken sekiz uzmanın yazdığı değerler birbiriyle çelişiyorsa bu karşılaştırmalar dikkate alınmamıştır. BÖM'de tüm katsayılar matematiksel model ile belirlendiği için karşılaştırma matrislerinin tümü dolu olmasa bile çözüm bulunabilir. Böylece tutarsızlıklar baştan elimine edilmiş olur.

Bu kurallar ışığı altında oluşturulan bulanık ikili karşılaştırma matrisleri (**OLASILIK^{Bulanık}**, **ŞİDDET^{Bulanık}**, **ARKEDİLEBİLİRLİK^{Bulanık}**) Tablo 9, 10 ve 11'de verilmiştir.

Tablo 9: Risklerin gerçekleşme olasılıkları için bulanık ikili karşılaştırma matrisi(Fuzzy pairwise comparison matrix for occurrence probability of risks.)

	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	R ₇	R ₈	R ₉	R ₁₀
R ₁	1	(1/3;1/2;2)	(1;2;3)	(1/4;1/3;1/2)	(1/7;1/5;1/4)	(1/8;1/6;1/5)	(1/7;1/5;1/4)	(1/7;1/6;1/5)	(1/9;1/8;1/5)	(1/7;1/5;1/3)
R ₂	(1/2;2;3)	1	(2;3;4)	(1/3;1/2;1)	(1/8;1/6;1/3)					(1/8;1/6;1/4)
R ₃	(1/3;1/2;1)	(1/4;1/3;1/2)	1	(1/4;1/3;1/2)			(1/8;1/5;1/4)			
R ₄	(2;3;4)	(1;2;3)	(2;3;4)	1	(1/6;1/4;1/3)					(1/8;1/7;1/6)
R ₅	(4;5;7)	(3;6;8)		(3;4;6)	1	(1;2;3)	(1;3;5)	(1/5;1/4;1/3)		(3;4;7)
R ₆	(5;6;8)				(1/3;1/2;1)	1	(3;4;5)		(4;6;9)	(4;6;9)
R ₇	(4;5;7)		(4;5;8)		(1/5;1/3;1)	(1/5;1/4;1/3)	1	(3;4;5)	(1/2;1;2)	
R ₈	(5;6;7)				(3;4;5)		(1/5;1/4;1/3)	1	(1/2;1;2)	(3;4;5)
R ₉	(5;8;9)					(1/9;1/6;1/4)	(1/2;1;2)	(1/2;1;2)	1	(1/2;1;2)
R ₁₀	(3;5;7)	(4;6;8)		(6;7;8)	(1/7;1/4;1/3)	(1/9;1/6;1/4)		(1/5;1/4;1/3)	(1/2;1;2)	1

Tablo 10: Risklerin şiddet değerleri için bulanık ikili karşılaştırma matrisi(Fuzzy pairwise comparison matrix for severity of risks.)

	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	R ₇	R ₈	R ₉	R ₁₀
R ₁	1	(3;5;8)	(1/2;1;2)	(3;5;6)	(4;6;9)	(5;7;8)	(3;5;8)	(6;8;9)	(5;7;9)	(6;7;9)
R ₂	(1/8;1/5;1/3)	1		(2;3;4)	(2;3;6)	(3;5;6)	(3;6;7)		(6;8;9)	(4;6;8)
R ₃	(1/2;1;2)		1	(3;5;6)	(4;6;9)	(5;7;8)	(3;5;8)	(6;8;9)	(5;7;9)	(6;7;9)
R ₄	(1/6;1/5;1/3)	(1/4;1/3;1/2)	(1/6;1/5;1/3)	1	(3;4;5)	(2;4;5)	(2;3;5)		(5;7;9)	
R ₅	(1/9;1/6;1/4)	(1/6;1/3;1/2)	(1/9;1/6;1/4)	(1/5;1/4;1/3)	1	(1/3;1/2;2)	(1/3;1/2;2)			(3;4;7)
R ₆	(1/8;1/7;1/5)	(1/6;1/5;1/3)	(1/8;1/7;1/5)	(1/5;1/4;1/2)	(1/2;2;3)	1	(1/3;2;3)			
R ₇	(1/8;1/5;1/3)	(1/7;1/6;1/3)	(1/8;1/5;1/3)	(1/5;1/3;1/2)	(1/2;2;3)	(1/3;1/2;3)	1	(2;3;5)		
R ₈	(1/9;1/8;1/6)		(1/9;1/8;1/6)				(1/5;1/3;1/2)	1	(1/2;1;2)	(1/3;1/2;1)
R ₉	(1/9;1/7;1/5)	(1/9;1/8;1/6)	(1/9;1/7;1/5)	(1/9;1/7;1/5)				(1/2;1;2)	1	(1/3;1/2;2)
R ₁₀	(1/9;1/7;1/6)	(1/8;1/6;1/4)	(1/9;1/7;1/6)		(1/7;1/4;1/3)			(1;2;3)	(1/2;2;3)	1

Tablo 11: Risklerin fark edilebilirlik değerleri için bulanık ikili karşılaştırma matrisi(Fuzzy pairwise comparison matrix for detection of risks.)

	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	R ₇	R ₈	R ₉	R ₁₀
R ₁	1	(1;2;3)		(3;4;5)			(5;7;8)	(5;7;8)	(5;8;9)	
R ₂	(1/3;1/2;1)	1							(5;8;9)	(5;8;9)
R ₃			1		(3;4;5)	(4;5;6)	(4;5;7)	(5;6;9)	(5;8;9)	(4;7;9)
R ₄	(1/5;1/4;1/3)			1	(2;3;5)	(2;3;6)	(2;3;7)	(5;7;8)		
R ₅			(1/5;1/4;1/3)	(1/5;1/3;1/2)	1				(4;5;9)	
R ₆			(1/6;1/5;1/4)	(1/6;1/3;1/2)		1			(4;6;8)	
R ₇	(1/8;1/7;1/5)		(1/7;1/5;1/4)	(1/7;1/3;1/2)			1			(3;5;7)
R ₈	(1/8;1/7;1/5)		(1/9;1/6;1/5)	(1/8;1/7;1/5)				1	(1;2;3)	(1/4;1/3;1/2)
R ₉	(1/9;1/8;1/5)	(1/9;1/8;1/5)	(1/9;1/8;1/5)		(1/9;1/5;1/4)	(1/8;1/6;1/4)		(1/3;1/2;1)	1	(1/7;1/5;1/3)
R ₁₀		(1/9;1/8;1/5)	(1/9;1/7;1/4)				(1/7;1/5;1/3)	(2;3;4)	(3;5;7)	1

Literatürde AHS'nin 7'den fazla kriterin değerlendirilmesinde sağlıklı olmadığı belirtilmektedir. Ancak önerilen yöntemde karşılaştırılan kriter sayısı 7'den fazla olsa da karşılaştırmalar açısından sorun yaşanmamaktadır. Bunun nedeni 8 farklı uzmanın görüşüne yer verilmiş,

bunların içinden alt sınır ve üst sınır değerleri belirlenmiştir. Birbiriyle çelişen durumlarda bu değerlendirmelere hiç yer verilmemiştir. Önerilen yöntemin uygulanabilmesi için karşılaştırmalar matrisinin tamamen dolu olması gerekli değildir. Tablo 9, 10 ve 11'de görüldüğü üzere boş olan

karşılaştırmalar mevcuttur. Bu yöntemde faktörlerin önem katsayıları, oluşturulan matematiksel modelin çözümüyle bulunmaktadır. Model, mevcut karşılaştırmalar içinde alt sınır ve üst sınır değerleri arasında kalarak her faktör için en uygun önem katsayısını bulmaktadır. Dolayısıyla yöntem bize klasik AHS'de olmayan tüm bu esneklikleri sağlamaktadır.

6.3 BÖM ile Önem Katsayılarının Belirlenmesi (Computing Importance Coefficients with Fuzzy Prioritization Method)

Tablo 9, 10 ve 11'de verilen $OLASILIK^{Bulanık}$, $ŞİDDET^{Bulanık}$, $FARKEDİLEBİLİRLİK^{Bulanık}$ matrislerinin her biri sırasıyla kullanılarak denklem 6'da görülen matematiksel model Lingo 9.0 optimizasyon programında [11] çözülmüş ve risklerin olasılık, şiddet ve fark edilebilirlik katsayıları elde edilmiştir. Bu katsayılar Tablo 12'de görülmektedir. Ayrıca Tablo 12'de görüldüğü üzere her üç modelin de

tutarsızlık oranı 0,1'in altında kabul edilebilir düzeydedir.

6.4 Katsayıların HTEA Derecelerine Dönüştürülmesi (Converting Importance Coefficients into FMEA Degrees)

Tablo 13'te görülen katsayılar HTEA tablolarına göre derecelere dönüştürülmüştür. Olasılık dereceleri için Tablo 5'te verilen, şiddet dereceleri için Tablo 6'da verilen, fark edilebilirlik dereceleri için Tablo 7'de verilen formüller kullanılmıştır. Elde edilen HTEA dereceleri ve RÖS değerleri Tablo 13'te verilmiştir.

6.5 RÖS Değerlerinin Bulunması ve Değerlendirilmesi (Computing and Evaluating RPN Values)

Tablo 13'te bulunan olasılık, şiddet ve fark edilebilirlik dereceleri çarpılarak (Denklem 1) her riskin RÖS değeri bulunmuştur (Tablo 13).

Tablo 12: BÖM ile bulunan olasılık, şiddet, fark edilebilirlik katsayıları.(Importance coefficients computed by fuzzy prioritization method)

	Olasılık $W^{OLASILIK}$	Şiddet $W^{ŞİDDET}$	Farkedilebilirlik $W^{FARKEDİLEBİLİRLİK}$
R₁	0,028	0,333	0,293
R₂	0,028	0,111	0,185
R₃	0,023	0,222	0,185
R₄	0,028	0,121	0,118
R₅	0,169	0,027	0,049
R₆	0,188	0,056	0,049
R₇	0,131	0,086	0,084
R₈	0,197	0,015	0,015
R₉	0,141	0,012	0,011
R₁₀	0,066	0,018	0,012
λ (Tutarsızlık oranı)	0,011	0,013	0,021

Tablo 13: Risklerin olasılık, şiddet, fark edilebilirlik derecelerinin bulunması (Formüller Tablo 5,6,7)(Computing risk probability, severity and detection degrees. (Use formulas from Tables 5,6,7))

Riskler	Olasılık Katsayısı	Katsayılara Göre Olasılık	Olasılık Derecesi O	Şiddet Katsayısı	Şiddet Derecesi S	Farkedilebilirlik Katsayısı	Farkedilebilirlik Derecesi D	RÖS OxD
R₁	0,028	0,086	7	0,333	10	0,293	9	630
R₂	0,028	0,086	7	0,111	3	0,185	6	133
R₃	0,023	0,071	7	0,222	7	0,185	6	266
R₄	0,028	0,086	7	0,121	4	0,118	4	92
R₅	0,169	0,515	10	0,027	1	0,049	2	16
R₆	0,188	0,572	10	0,056	2	0,049	2	33
R₇	0,131	0,400	9	0,086	3	0,084	3	60
R₈	0,197	0,600	10	0,015	1	0,015	1	10
R₉	0,141	0,429	9	0,012	1	0,011	1	9
R₁₀	0,066	0,200	7	0,018	1	0,012	1	4

Tablo 14: Alınan önlemler ve RÖS değerine etkileri(Precautions taken and effect on the RPN value)

Risk	RÖS				Proaktif Önlem	Sonuç		Reaktif Önlem	Sonuç		Yeni RÖS			
	O	S	D	RÖS		O	D		S	O	S	D	RÖS	
R ₁ : Gaz Patlaması	7	10	9	630	Kesintisiz havalandırma Yeryüzüne bağlanan ikinci hava dönüş yolu Yanmaz, kıvılcım çıkarmaz malzemeler Gaz detektörleri ile düzenli ölçüm En az 25mlik kontrol sondajı	1 2 1 1	1 1	Patlamanın olabileceği bölgelere baraj yapılması	1	2	9	7	126	
R ₂ : Zehirlenme, boğulma	7	3	6	126	Kesintisiz havalandırma Yeryüzüne bağlanan ikinci hava dönüş yolu Gaz detektörleri ile düzenli ölçüm	1 2 1	1	CO maskesinin mutlaka işçinin üzerinde bulundurulması	1	3	2	5	30	
R ₃ : Toz Patlaması	7	7	6	294	Kömür tozunun zararsız taş tozu ile bastırılması Kömür tozunun su ile bastırılması	2 2		Taş tozu barajlarının yapılması	1	3	6	6	108	
R ₄ : Yangın	7	4	4	112	Göçük tarafına çimento-kül karışımının doldurulması Kömür damarında yüzey sıcaklığı ve nem kontrolü	1 1	1	Yangın barajlarının yapılması Yangınlı bölgelere azot gazı basılması	1 1	6	2	3	36	
R ₇ : Göçük, taş, kömür düşmeleri	9	3	3	81	Mümkün olduğunca düz yollar Uygun genişlikte yaya yolları Uygun bölgelere cep veya kavşak	1 1 1		-		6	3	3	54	

Tablo 13'de görüldüğü üzere RÖS değeri 100ün üzerinde olan riskler gaz patlaması, toz patlaması, zehirlenme ve yangındır. Bu dört risk için proaktif ve reaktif önlemler belirlenmiştir. Bunlara ek olarak madencilik sektöründe kaza sonrası maliyetleri çok yüksek olabileceği için RÖS değeri 81 olan göçük riski için de proaktif ve reaktif önlemler belirlenmiştir. Tüm önlemler ve bu önlemlerin olasılık, şiddet ve fark edilebilirlik dereceleri üzerindeki etkileri Tablo 14'te görülmektedir.

Tabloda görüldüğü üzere, risklerle ilgili proaktif önlemler sıralanmıştır. Sonuç kısmında ise belirlenen proaktif önlemin olasılık (O) ya da fark edilebilirlik (D) kriterinin derecesinde ne kadar düşme sağlayacağı gösterilmiştir. Benzer şekilde reaktif önlemler sıralanmış ve bu önlemin şiddet derecesinde ne kadar düşme sağlayacağı gösterilmiştir. Tabloda alınan önlemler sonrasında yeni RÖS değerleri de hesaplanmıştır. Alınan önlemler sonrasında tüm risklerin RÖS değerlerinin 80'in altında kalması sağlanmıştır.

7. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada BAHS yöntemlerinden biri olan BÖM, HTEA ile birleştirilerek yeni bir risk analizi yöntemi, BHTEA, geliştirilmiştir. Geliştirilen BHTEA yöntemi, hem klasik AHS yönteminin hem

de klasik HTEA yönteminin zayıf taraflarına çözüm getirmektedir.

Geliştirilen yöntem kriterler arasında kesin değerlendirmeler yapmak yerine bulanık mantığın sınır değerleri belirleme kurallarından yararlanır. Oluşturulan matematiksel model aracılığıyla önem katsayılarını belirler. Böylece klasik AHS yöntemine esneklik kazandırmaktadır. Aynı anda yediden fazla faktör karşılaştırılabilmekte, karşılaştırma matrisinin tümü doldurulmasa da değerlendirme yapılabilmekte ve karşılaştırmalarda alt sınır, üst sınır değerleri kullanılarak optimum tutarsızlık değeri bulunmaktadır.

Aynı zamanda HTEA yönteminin bileşenleri olan olasılık, şiddet ve farkedilebilirlik kriterlerinin değerlendirmeleri için alt sınır ve üst sınırlar belirlemekte ve böylece yöntemin subjektifliğini azaltmaktadır. Hesaplanan RÖS değerlerinin daha doğru ve objektif olması sağlanmaktadır.

Bununla birlikte, bilindiği kadarıyla BÖM daha önce hiçbir risk analizi yönteminde kullanılmamıştır. Geliştirilen yöntem yüksek riskli sektörlerden biri olan madencilik sektöründe uygulanmıştır. Sekiz uzman maden mühendisi ile görüşmelerde bir yeraltı kömür madeninde karşılaşılabilecek on adet risk belirlenmiş, bu risklerin olasılık, şiddet ve fark edilebilirlik açısından ikili

karşılaştırma matrisleri oluşturulmuştur. Daha sonra bu matrisler incelenerek, alt sınır, üst sınır ve yüksek olasılıklı değerler belirlenmiş ve BÖM yöntemi ile risklerin olasılık, şiddet ve fark edilebilirlik katsayıları bulunmuştur. Risklerin RÖS değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlarda gaz ve toz patlamaları, zehirlenme, göçük ve yangın riskleri için proaktif ve reaktif önlemler belirlenmiştir. Alınan önlemlerden sonra tüm risklerin RÖS değerleri kabul edilebilir seviyeye düşmüştür.

Sonuç olarak bu çalışma daha önce literatürde yer almayan yeni bir risk analizi yöntemi geliştirmesi, bu yöntemde bulanık mantık kurallarını uygulayarak daha gerçekçi sonuçlar elde edebilmesi ve geliştirilen yöntemi yüksek riskli yeraltı madencilğinde uygulayarak kullanılabilirliğini göstermesi açısından önem taşımaktadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. OHSAS 18001 “İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetim Sistemi Standardı”, 2007.
2. Mikhailov, L. ve Tsvetinov P., “Evaluation of Services using a Fuzzy Analytic Hierarchy Process”, **Applied Soft Computing**, Cilt 5, No 1, 23-33, 2004.
3. Durhan, D., **Hata Türü Etkileri Analizi (HTEA) ve Bir Uygulama**, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
4. Kahraman, Ö. ve Demirel, A., “OHSAS 18001 Kapsamında FMEA Uygulaması”, **Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi**, Cilt 7, No 1, 53-68, 2010.
5. Özfirat, M.K., Mızrak Özfirat, P., Kahraman, B., Can, Y. ve Öney, Ö., “Yeraltı madeninde nakliyatla oluşan risklerin Hata Türü Etki Analizi (HTEA) yöntemiyle sınıflanması”, **Maden İşletmelerinde İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Sempozyumu**, Adana, 289-295, 21-22 Kasım 2013.
6. Liu, H.C., Liu, L. ve Liu, N., “Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review”, **Expert Systems with Applications**, Cilt 40, 828-838, 2013.
7. Özkılıç, Ö., **İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetim Sistemleri ve Risk Değerlendirme Metodolojileri**, TİSK Yayınları, Ankara, Türkiye, 2005.
8. Wang, Y.M., Chin, K.S., Poon, G.K.K. ve Yang, J.B., “Risk evaluation in failure mode and effects analysis using fuzzy weighted geometric mean”, **Expert Systems with Applications**, Cilt 36, 1195-1207, 2009.
9. Özfirat, M.K., “A Fuzzy Method for Selecting Underground Coal Mining Method Considering Mechanization Criteria”, **Journal of Mining Science**, Cilt 48, No 3, 2012.
10. Winston, W.L., **Operations Research Applications and Algorithms**, International Thomson Publishing, California, A.B.D., 1994.
11. Lindo Systems, **Lingo User's Guide**, Lindo Systems Inc., Chicago, A.B.D., 2004.
12. Dağdeviren, M., “Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi İle Personel Seçimi ve Bir Uygulama”, **Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, Cilt 22, No 4, 2007.
13. Yılmaz, B. ve Dağdeviren, M., “Ekipman Seçimi Probleminde Promethee ve Bulanık Promethee Yöntemlerinin Karşılaştırmalı Analizi”, **Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, Cilt 25, No 4, 2010.
14. Majumder, D., Debnath, J., Biswas, A., “Risk analysis in construction sites using fuzzy reasoning and fuzzy analytic hierarchy process”, **Procedia Technology**, Cilt 10, 604-614, 2013.
15. Abdullah, L. ve Najib, L., “A new type-2 fuzzy set of linguistic variables for the fuzzy analytic hierarchy process”, **Expert Systems with Applications**, Cilt 41, 3297-3305, 2014.
16. İç, Y.T. ve Yurdakul, M., “İşleme Merkezi Seçimine Yönelik Bir Karar Destek Sisteminin Geliştirilmesi”, **Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, Cilt 23, No 1, 85-95, 2008.
17. Chen, Z., Feng, K.M., Zhang, G.S., Yuan, T., Pan, C.H., “Preliminary safety research for CH HCSB TBM based on FMEA method”, **Fusion Engineering and Design**, Cilt 83, 743-746, 2008.
18. Feili, H.R., Akar, N., Lotfizadeh, H., Bairampour, M., Nasiri, S., “Risk analysis of geothermal power plants using Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) technique”, **Energy Conversion and Management**, Cilt 72, 69-76, 2013.
19. Thivel, P.X., Bultel, Y., Delpech, F., “Risk analysis of a biomass combustion process using MOSAR and FMEA methods”, **Journal of Hazardous Materials**, Cilt 151, 221-231, 2008.
20. Hoseynabadi, H.A., Oraee, H., Tavner, P.J., “Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) for wind turbines”, **Electrical Power and Energy Systems**, Cilt 32, 817-824, 2010.
21. Eleren, A. ve Ersoy, M., “Mermer Ocaklarında Elmas Tel Ve Kollu Kesiciyle Kesme Teknolojilerinin İş Güvenliği Bakımından Karşılaştırılmasında Hata Türü Etki Analizi Yönteminin Uygulanması”, **TÜBAV Bilim Dergisi**, Cilt 4, Sayı 1, 9-19, 2011.
22. Chang, C. L., Wei, C.C. ve Lee, Y.H., “Failure mode and effects analysis using fuzzy method and grey theory”, **Kybernetes**, Cilt 28, 1072-1080, 1999.
23. Xu, K., Tang, L.C., Xie, M., Ho, S.L. ve Zhu, M.L., “Fuzzy assessment of FMEA for engine

- systems”, **Reliability Engineering & System Safety**, Cilt 75, 17-29, 2002.
24. Braglia, M., Frosolini, M. ve Montanari, R., “Fuzzy criticality assessment model for failure modes and effects analysis”, **International Journal of Quality & Reliability Management**, Cilt 20, No 4, 503-524, 2003.
 25. Braglia, M., Frosolini, M. ve Montanari, R., “Fuzzy TOPSIS approach for failure mode, effects and criticality analysis”, **Quality and Reliability Engineering International**, Cilt 19, 425-443, 2003.
 26. Hu, A.H., Hsu, A.W., Kuo, T.C. ve Wu, W.C., “Risk evaluation of green components to hazardous substance using FMEA and FAHP”, **Expert Systems with Applications**, Cilt 36, 7142-7147, 2009.
 27. Yücel, G., Çebi, S., Hoege, B. ve Özok, A.F., “A fuzzy risk assessment model for hospital information system implementation”, **Expert Systems with Applications**, Cilt 39, 1211-1218, 2011.
 28. Tür, R. ve Barlas, C.E., “Kıyı Tahkimat Yapılarının Güvenilirliğe Dayalı Risk Modeli”, **Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, Cilt 25, No 3, 2010.
 29. İnan, A., “İskenderun Körfezi’nde Petrol Kirliliğinin Modellenmesi”, **Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, Cilt 26, No 2, 2011.
 30. Mahdevari, S., Shahriar, K., Esfahanipour, A., “Human health and safety risks management in underground coal mines using fuzzy TOPSIS”, **Science of the Total Environment**, Cilt 488-489, 85-89, 2014.
 31. Badri, A., Nadeau, S., Gbodossou, A., “A new practical approach to risk management for underground mining project in Quebec”, **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, Cilt 26, 1145-1158, 2013.
 32. Petrovic, D.V., Tanasijevic, M., Milic, V., Lilic, N., Stojanidovic, S. ve Svrkota, I., “Risk assessment model of mining equipment failure based on fuzzy logic”, **Expert Systems with Applications**, Cilt 41, 8157-8164, 2014.
 33. Ersoy, M., “The role of occupational safety measures on reducing accidents in marble quarries of Iscehisar region”, **Safety Science**, Cilt 57, 293-302, 2013.
 34. Özfirat, M.K., **TKİ-ELİ-Eynez yeraltı linyit Ocağında 1992-2000 yılları arasında manuel ve mekanize üretimde oluşan iş kazalarının etüdü**, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2001.
 35. **Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği**, Resmi Gazete Tarihi: 19.09.2013, Resmi Gazete Sayısı: 28770, 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu, 2013.