

Kömür Madeni Güvenliğinin Anlaşılması ve Geliştirilmesinde Kömür Madeni Risk Ağının Kullanılması

Yazarlar: Yongliang Deng^{1,2}, Liangliang Song³, Zhipeng Zhou⁴, Ping Liu⁵, Hindawi Special Issue-Volume 2018

Akademik Editör: Gerard Olivar

Çeviren: Ercan Caner, Sun Savunma Net, 19 Ekim 2022



Özet

Kömür madenciliği güvenliğini iyice anlamak ve teşvik etmek için mevcut riskler arasındaki karşılıklı ilişkileri anlamak esastır. Bu açıdan bakılarak; aynı zamanda Kömür Madeni Risk Ağı'nın⁶ (Coal Mine Risk Network) kurulmasının da temelini

¹ State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 22116, China

² School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 22116, China

³ School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China

⁴ College of Economic and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

⁵ School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

⁶ Ağlar, düğümler ve bunların arasındaki bağlantılardan oluşur. Bir ağın büyüklüğü ağdaki düğüm sayısı ile anlatılır. Ağdaki düğüm sayısını N ve ağdaki toplam etkileşim ile toplam bağlantı sayısı ise L ile gösterilir. Düğümler işletme, birey, protein, ülke olabilir. Düğümlerin arasındaki bağlantılar ise, gönderilen ürün veya bilgi gibi şeyler varsa ağlar yönlendirilmiş; akrabalık, arkadaşlık gibi ortak özellikler bulunduğu ise yönlendirilmemiş adını alırlar. Çizge, bir ağın görselleştirilmesidir ve ağın iskeleti olarak adlandırılabilir. Sosyal Ağ Analizi-Anadolu Üniversitesi.

oluşturan, 126 adet tipik maden kazasındaki 105 adet risk ve riskler arasındaki 135 adet karşılıklı ilişki tespit edilmiştir.

Karmaşık ağ teorisi ve Pajek'e dayanarak; Kömür Madeni Risk Ağı (KMRA)'nın topolojik özelliklerinin ortaya çıkarmak maksadıyla; ağ çapı, ağ yoğunluğu, ortalama yol uzunluğu, derecesi, arasındalık ve kümeleme katsayısı gibi altı parametre kullanılmıştır. Sonuçların gösterdiği gibi, KMRA, kümülatif derece dağılımı kuvvet yasası, ölçeksiz bir ağ özelliğine sahiptir. Bu, KMRA'nın rastgele tehlikelere karşı dayanıklı ve kasıtlı saldırılara karşı savunmasız olduğu anlamına gelmektedir. KMRA aynı zamanda nispeten küçük ortalama yol uzunluğu⁷ ve yüksek kümelenme katsayısı⁸ nedeniyle küçük bir dünya ağıdır, bu da KMRA'daki kaza yayılımının normal ağdan daha hızlı olduğu anlamına gelmektedir.

Ayrıca, risk kontrolünün etkileri de ortaya çıkarılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, tavan çökmesi, yangın ve limiti aşan gaz yoğunluğu, bütün riskler arasında, risk kontrolü için odaklanılması gereken en değerli üç hedefdir. Bu çalışma, orijinal riskleri sınırlandırabilecek ve kazaları azaltabilecek stratejilerin belirlenmesi için öneriler ve tavsiyeleri sunmaya yardımcı olmak maksadıyla yapılmıştır.

1. Giriş

Çin, son 60 yılda, enerjisinin yaklaşık olarak %65'ini elde ettiği, dünyanın en büyük kömür üreticisi ve tüketicisidirⁱ. Çin'de fosil enerji rezervlerinin %90'ından fazlası kömürdür. Yani enerjinin ağırlıklı olarak kömüre dayalı enerji tüketim yapısının, oldukça uzun bir süre değiştirilmesi mümkün değildir. Bu bakış açısı, Çin'in Ulusal Enerji Geliştirme Stratejisi Planı (2014 - 2020) ve 13'üncü Beş Yıllık Plan (2016 - 2021) tarafından da doğrulanabilir. Çin'in 2015 yılı kömür üretiminin 3.747 milyar ton olduğu tahmin edilmektedir ve bu da dünyadaki toplam kömür üretiminin %47'sini oluşturmaktadır (The State Administration of Coal Mine Safety, 2015). British Petroleum (BP) 2016 Dünya Enerji İstatiksel İncelemesine göre, kömür üretimi 40 milyon tonun üzerinde olan ülkeler Şekil- 1'de gösterilmektedir.

⁷ Ortalama yol uzunluğu veya ortalama en kısa yol uzunluğu, ağ topolojisinde, olası tüm ağ düğümü çiftleri için en kısa yollar boyunca ortalama adım sayısı olarak tanımlanan bir kavramdır. Bir ağ üzerinde bilgi veya toplu taşımanın etkinliğinin bir ölçüsüdür. Wikipedia.

⁸ Çizge teorisinde, kümelenme katsayısı (İng: Clustering Coefficient) bir çizgenin kümelenme eğilimi derecesinin ölçülmesidir. Birçok, gerçek dünyadaki ağ ve bazı sosyal ağlar, sıkı örülmüş grupların düğümlerin oluşma eğiliminin yüksek bir yoğunluk bağları ile karakterize olduğunu kanıtlamaktadır: rastgele iki düğüm arasında kurulan bağın olasılığı, ortalama olasılıktan daha yüksek olma eğilimindedir. (Holland and Leinhardt, 1971; Watts and Strogatz, 1998). VİKİPEDİ

Kömür madenciliği, dünya çapındaki en tehlikeli endüstrilerden bir tanesidir. (ii- iii- iv). Bunun da ötesinde kömür madeni işletmeleri, özel jeolojik koşullara bağlı olarak çeşitli tehlikelerle de karşı karşıya kalmaktadır. Kömür madenciliği sürecinde, kaya gerilmeleri, zararlı gazlar, nem, yüksek sıcaklıklar, kömür ve slika tozu ile özel ekipman gibi çok sayıda tehlike sıklıkla kazaları tetikleme potansiyeline sahiptir^v.

Daha da kötüsü, bu tehlikelerin yoğunluğu ve sıklığının, insan sağlığı ve yaşamı için son derece ciddi sonuçlara yol açabilmesidir^{vi}. Kömür madeni kazaları, önemli yaralanmalara, insan kayıplarına ve işletmenin önemli varlıklarının kaybına neden olmaktadır. Çin'de meydana gelen kömür madeni kazaları her yıl ağır kayıplara neden olmaktadır. İstatiklere göre, dünya genelindeki kömür madeni kazalarının yaklaşık olarak %70'inin Çin'de meydana geldiği tahmin edilmektedir^{vii}.

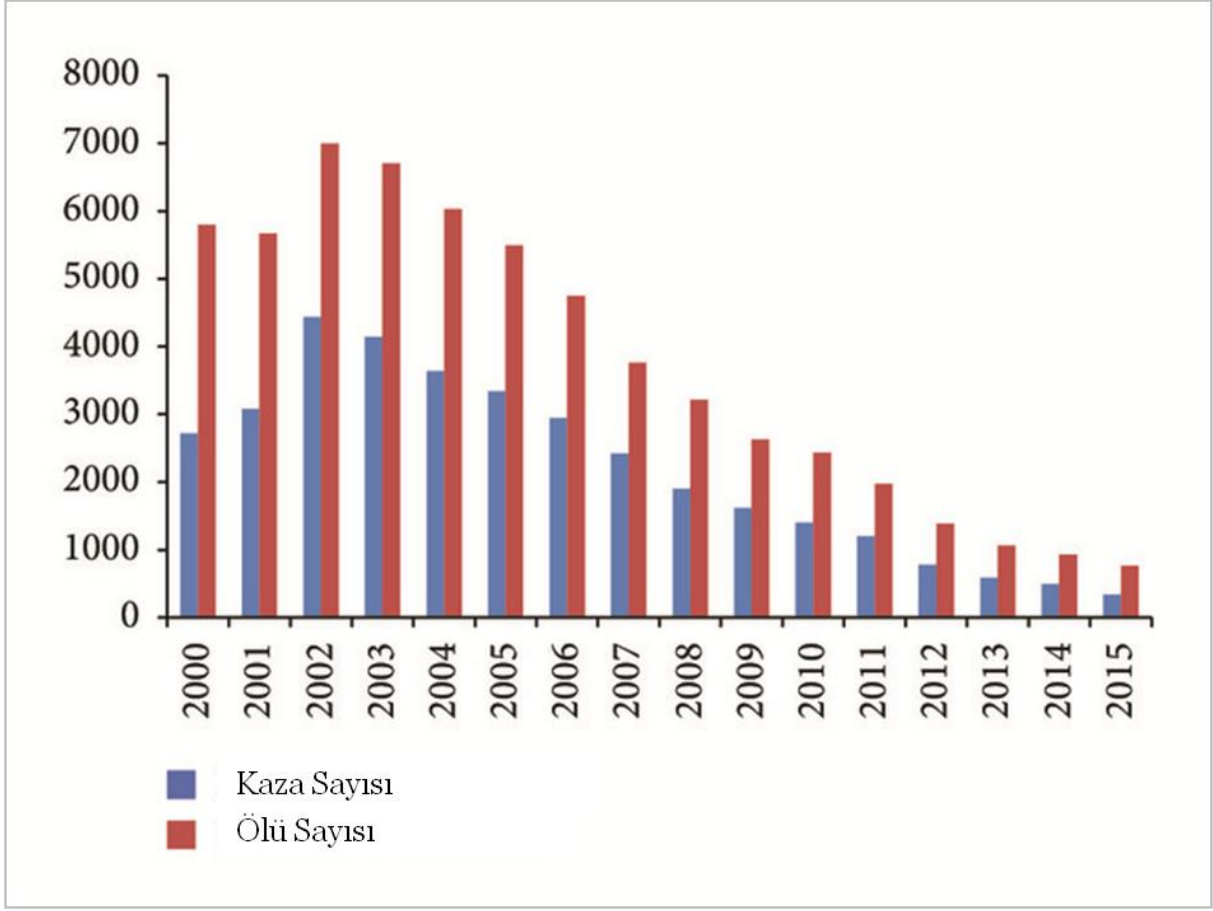


Şekil-1 Kömür üretimi 40 milyon ton üzerinde olan ülkeler. Kaynak: British Petroleum

2002 yılında Çin'de meydana gelen çeşitli kazalarda 6.995 kömür işçisi hayatını kaybetmiştir ve bu rakam bir yılda görülen en yüksek kayıp miktarıdır. Sonrasında, Şekil- 2'de de görüldüğü gibi kayıplar her geçen yıl azalmıştır (Veri kaynağı: Kömür Madeni Güvenliği Devlet İdaresi). Pratik açıdan durum giderek daha iyiye gidiyor gibi görünse de Çin'de her yıl çok sayıda kömür madeni kazası meydana gelmektedir. Sonuç olarak; kömür üretiminde güvenlik yönetimi, zorlu üretim koşullarının yanı sıra karmaşık üretim süreçleri nedeniyle de hâlâ oldukça kritik ve ciddi bir iştir.

Güvenlik performansını iyileştirmek için daha değerli bir süreç ise, geçmişte yaşanan kazaların başarısızlık deneyimlerinden ders almaktır^{viii}. Kaza analizi, benzer tehlikeleri, riskleri ve kazaları önlemek veya ortadan kaldırmak amacıyla yapılması gereken çok güçlü bir yaklaşımdır^(ix- x). Aslında, mevcut çalışmalar genellikle bir tür kömür madenciliği kazasına veya bir bölge veya ülkedeki kazanın istatistiksel analizine odaklanırken, doğrulanmış kazalar arasındaki çoklu ilişkiler genellikle ihmal

edilmektedir. Endüstriyel güvenlik araştırmalarında, kazanın tek bir hata veya kusurdan ziyade, bir dizi tehlike, risk ve kazanın birleşiminden kaynaklandığı genel kabul gören bir yaklaşımdır^{xi}.



Şekil-2 Çin kömür madeni kazaları ve insan kayıpları (2000- 2015).

Ayrıca, meydana gelen bir kaza muhtemelen sonraki kazalar dizisinde de yer alacaktır^{xii}. Kömür madeni kazalarının çoğunda bir kaza zinciri bulunmaktadır ve bu da bir risk ağının fiilen olduğunun en büyük göstergesidir. Riskler arasındaki bu karşılıklı etkileşimler, kömür madeni güvenliği açısından büyük bir sorun olarak ortaya çıkan Kömür Madeni Risk Ağı'nı (KMRA) oluşturmaktadır. Bu nedenle, KMRA'nın karmaşıklığını anlamak, kömür madenciliğinde güvenlik performansını artırmak için hem gerekli hem de faydalıdır.

Bu çalışmanın yapısı altı bölümdür. İkinci bölümde kömür madeni güvenliğine ait bir literatür taraması yapılmıştır. Üçüncü bölümde; analitik bir çerçeve, veri toplama ve analizi ile ağ modellemesi dâhil olmak üzere bir metodoloji detaylandırılmıştır. Dördüncü bölümde, ağ temel miktarları metriği ve ağ özelliği dâhil, KMRA'yı keşfetmek ve risk kontrolünün etkisini ölçmeye yardımcı olmak için Pajek yazılımı kullanılmıştır. Beşinci bölümde potansiyel katkılar, sınırlamalar ve risk kontrol yöntemleri incelenmiştir. Altıncı ve son bölümde ise çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

2. Literatür Taraması

Kömür madenleri, Çin ekonomisi ve halkının yüksek hızlı gelişimini desteklemek için gerekli enerjiyi sağlamaktadır. Güvenlik performansını iyileştirmek için dünya çapında araştırmacılar tarafından birçok araştırma yapılmıştır. Araştırma konuları temel olarak aşağıdaki Tablo- 1’de gösterilmiştir.

TABLO - 1 KÖMÜR MADENCİLİĞİ ÜZERİNE GEÇMİŞTE YAPILAN ARAŞTIRMALAR

Konu	Hedef
Denetim & Yönetmelikler	Düzenlemelerin karmaşıklığı ve etkisizliğini incelemek; rant arama mekanizmasını, davranışını, politikasını ve vergileri analiz etmek; Kömür madeni kazalarındaki trendler ve insan faktörlerinin karakteristiklerini belirlemek.
Risk Yönetimi	Zaman serileri analizinde ayrıştırma tekniği kullanılarak beklenen risk düzeylerinin tahmin edilmesi; risk yönetim sisteminin analiz edilmesi ve optimize edilmesi; güvenli olmayan davranışları gerçek zamanlı olarak izlemek için kamu iletişim sistemini kullanmak; kömür madenciliğinin sosyal ve ekolojik sömürü üzerindeki etkilerini azaltmak; bir yeraltı madeninde potansiyel tehlikeler veri tabanının oluşturulması; kömür madeni acil tahliyesinde insan güvenlik bariyerinin güvenilirliğinin değerlendirilmesi; risk faktörlerinin belirlenmesi ve emniyet kontrol kapasitesinin değerlendirilmesi.
Risk Değerlendirmesi	Oda ve sütun sistemli eski kömür madenlerinde geri çekilme madenciliği sırasında tavan çökme riskinin değerlendirilmesi; yeraltı kömür madenlerinde patlama riskinin değerlendirilmesi; kömür madeni güvenliği için kapsamlı bir model geliştirmek; madencilik donanımı arızası riskini değerlendirmek için bulanık küme teorisini kullanmak; kömür madeninde çukur çökme riskinin değerlendirilmesi; kömür madeni kazalarını analiz etmek için risk performans göstergelerini kullanmak.
İzleme & Kontrol Teknolojileri	Ön alarm sistemine dayalı olarak maden güvenliğini izlemek için nesnelerin interneti (IOT) ve bulut bilişim (CC) kullanılması; yeraltı madenindeki sıcaklık, nem, gaz ve duman durumunu izlemek için kablosuz sensör ağı (WSN) kullanmak; kömür madeni güvenliği için bir Web of Things tabanlı uzaktan izleme sistemi kurmak; yeraltı kömür madeni için entegre bir çevre izleme sistemi oluşturmak için kablo izleme sistemi (CMS) ve WSN'yi kullanmak; güvenlik yönetim sistemini iyileştirmek için iris tanımlama ve radyo frekansı tanımlama (RFID) tekniğini kullanmak.

Denetim ve yönetmelikler, kömür madenciliğinde iki önemli etki faktörüdür. 2000 yılından önce, yasa ve yönetmeliklerin etkin bir şekilde uygulanamaması, Çin hükümetinin kömür madeni güvenliğinin fiili durumunu denetlemesini zorlaştırmıştır^{xiii}.

Kömür madeni güvenliğini artırmak amacıyla, güvenlik mevzuatının iyileştirilmesi ve bağımsız bir kömür madeni izleme sisteminin kurulması gibi çeşitli etkili karşı önlemler hayata geçirilmiştir. Düzenleyici rejimdeki bu iyileştirmeler kömür madenciliği güvenliğine büyük katkılar sağlamaktadır^{xiv}.

Ancak, kömür madeni işletmeleri ile denetim bölümleri arasındaki ilişkiler karmaşık ve hilelere açıktır. Çin'in kömür madenlerinin denetlenmesinde yaygın bir rant peşinde koşma yaklaşımı vardır, bu da kömür madenciliği endüstrisi ve güvenliğinin daha da gelişmesinin önündeki en büyük engellerden bir tanesidir.

Rant arayışı alanında yapılan mevcut araştırmalar, esas olarak rant peşinde koşma davranışı, rant politikası ve vergiler üzerine odaklanmaktadır^(xv- xvi- xvii). Rant peşinde koşma senaryosunda Chen ve diğerleri ^(xviii) denetim departmanının her seviyesinin, üzerinde kömür madeni kazalarının meydana geldiği bir yoğunluk eşğine sahip olduğunu belirtmektedir.



(a)



(b)

“Hindistan kömür madenlerinde çukur çökme riskinin değerlendirilmesi” başlıklı makaleden alıntıdır. Kaynak: Science Direct

Etkin bir risk yönetimi, çeşitli teori ve yöntemlere dayalı olarak kömür madeni güvenliğinin temel garantisidir. Sari ve diğerleri ^(xix) kazaların meydana gelmesindeki rastlantısallığa göre kaza sayısını tahmin etmek amacıyla stokastik (olasılıksal) bir model geliştirmiştir.

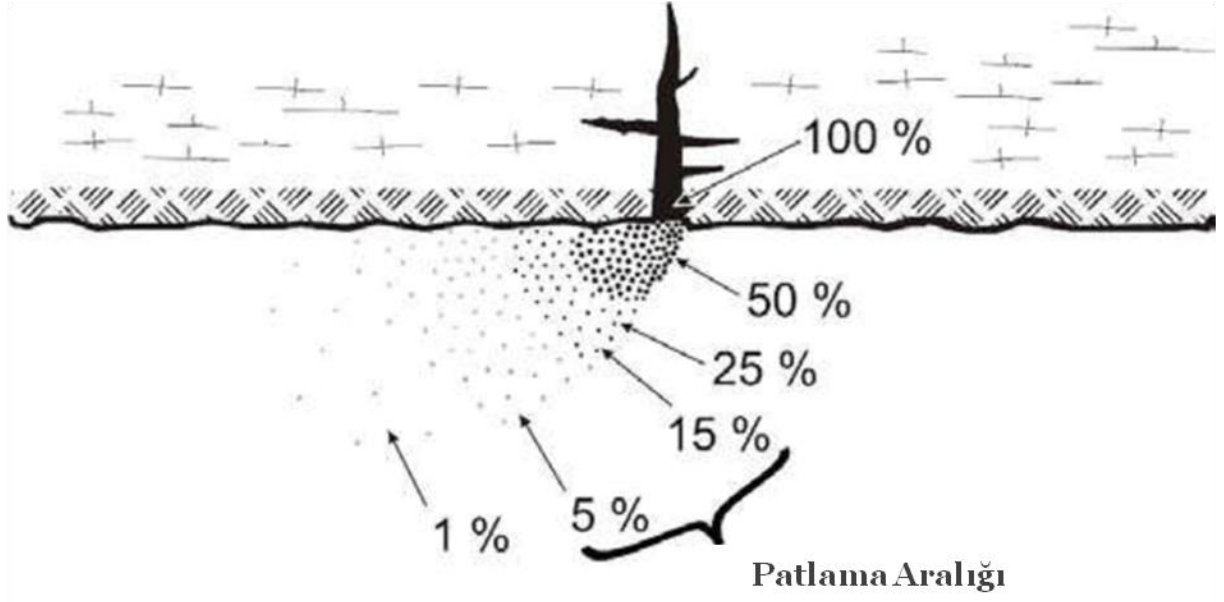
Qing-gui ve diğerleri ^(xx), güvenli olmayan davranışları denetlemek, erken uyarı bilgilerini yayınlamak ve kömür madenlerindeki kontrol önlemlerini iyileştirmek için bir sistem kurmuşlardır. Vaka çalışmalarına dayanarak, Kowalska ^(xxi) çeşitli risk kaynaklarını belirlemiş ve değerlendirmiştir. Sonuçlardan da anlaşılacağı üzere, maden ocağı tasfiyesi sırasında çevresel ve sosyal risklerin azaltılmasına yönelik ileriye dönük faaliyetler yapılması gerekmektedir.

Badri ve diğerleri (xxii) analitik hiyerarşi süreç yönetimine dayalı madencilik projelerinde risk yönetimi üzerine çalışmıştır ve elde ettikleri sonuçlar kömür madenciliği sürecinde iş sağlığı ve güvenliğinin dikkate alınmasının önemini ortaya koymuştur.

Wang ve diğerleri (xxiii) acil durum tahliyelerinde, insan hatası risklerini; organizasyon, grup ve bireysel seviye dâhil olmak üzere üç perspektiften analiz etmek maksadıyla, analitik bir çerçeve ortaya koymuşlardır. Ayrıca, Liu ve diğerleri (xxiv), kömür madenciliği güvenliğindeki etki faktörlerini araştırmak maksadıyla bir geri yayılım (BP - Back Propagation) sinir ağı kurmuşlardır.

Tehlikelerin ve risklerin değerlendirilmesi, ağır sonuçları nedeniyle çok sayıda uygulayıcı ve araştırmacının büyük ilgisini çekmiştir. Bu tehlikeler ve riskler; “doğal, teknik ve beşeri” olmak üzere üç türe ayrılabilir.

Ghasemi ve diğerleri (xxv) bir risk değerlendirme modeli geliştirmiş ve İran Tabas merkez madenindeki çeşitli olası riskleri değerlendirmiştir.



Genellikle kömürdeki çatlaklardan yoğun halde yayılan metan gazı hareketli havalandırma hava akımı ile seyreltilmektedir (Kissell, 2006). Oldukça yanıcı ve hava ile karıştırıldığında kolayca tutuşabilen metanın (CH_4) alt patlayıcı sınırı yaklaşık olarak %5, üst alev alma sınırı ise %15'tir.

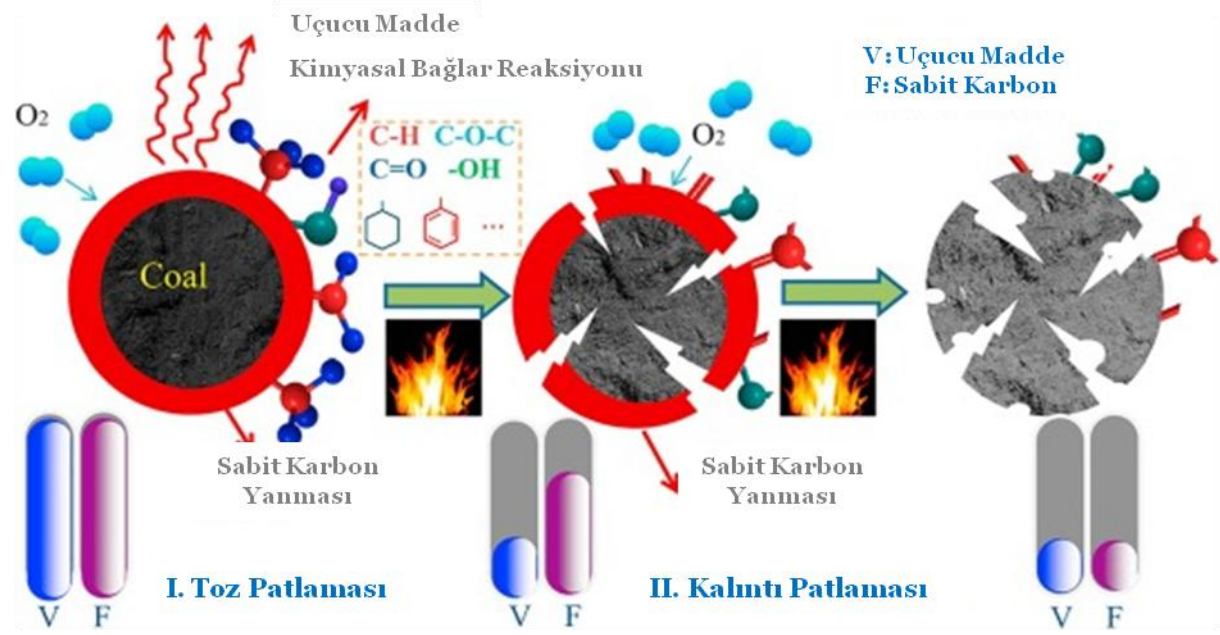
Pejic ve diğerleri (xxvi) de yer altı kömür madenlerindeki herhangi bir iş süreci veya faaliyetin patlama riskini belirlemek için bir risk değerlendirme programı önermiştir. Ayrıca, önerdikleri metodoloji, önerilen yatırımların güvenliği artırmak için doğru olup olmadığına da karar verebilmektedir.

Bahri Najafi ve diğerleri ise (xxvii) damar dışı seyrelmenin belirlenmesinde kullanılan bir yapay sinir ağı modeli önermişlerdir. Belirsiz rastgele değişkenlere dayalı olarak, Chen ve diğerleri de (xxviii) kömür madenciliği güvenliği için belirsiz rastgele değişkenlere dayalı pratik bir değerlendirme modeli geliştirmişlerdir.

Bulanık küme teorisine göre Petrović ve diğerleri (xxix) elektromekanik donanım arızalarını değerlendiren bir risk değerlendirme modeli sunmuşlardır.

Lokhande ve diğerleri (xxx), derinlik-yükseklik oranı, kaya-toprak oranı, kaya kırılabilirlik indeksi ve kaya yoğunluğu dâhil olmak üzere tanımlanan kritik parametrelere dayalı bir risk değerlendirme yaklaşımı geliştirmişlerdir.

Spada ve Burgherr (xxxi), enerji ile ilgili ciddi kaza veri tabanındaki kaza verilerini analiz etmişler ve Türkiye için anlamı olmayan, ancak ABD için anlamlı bir azalma eğilimi önermişlerdir.



KÖMÜR TOZU PATLAMASI - Kömür madenlerinde; kömür tozu yerde hareketsiz/çökmüş ve havada düşük veya yüksek yoğunlukta asılı olarak bulunur. Kömür tozunun patlamasına karşı alınacak önlemler arasında; toz oluşumu, havaya karışması ve birikmesini önlemek, ateşlenmesini önlemek, patlama gerçekleşikten sonra ise madenin diğer kısımlarına yayılmasını önlemek sayılabilir. İllüstrasyon: Science Direct

Kömür madenlerinde güvenlik performansını artırmak amacıyla etkili ve güçlü bazı yeni teknolojiler de kullanılmaktadır. Sun ve diğerleri (xxxii) bulut bilişim (Cloud Computing) ve nesnelerin interneti (IoT – Internet of Things) tabanlı bir izleme ve ön alarm sistemi geliştirmişlerdir.

Dahası, Dange ve Patil (xxxiii), kömür madenlerinde duman, gaz, sıcaklık ve nemi izlemek için MSP430 denetleyicisine dayalı bir kablosuz sensör ağı (WSN – Wireless Sensor Network) tasarlamışlardır. Kablosuz sensör ve denetleyici alan ağına (CAN – Controller Area Network) dayalı olarak, Bo ve diğerleri (xxxiv) farklı uzaktan izleme senaryolarında test edilen bir uzaktan izleme sistemi önermişlerdir.

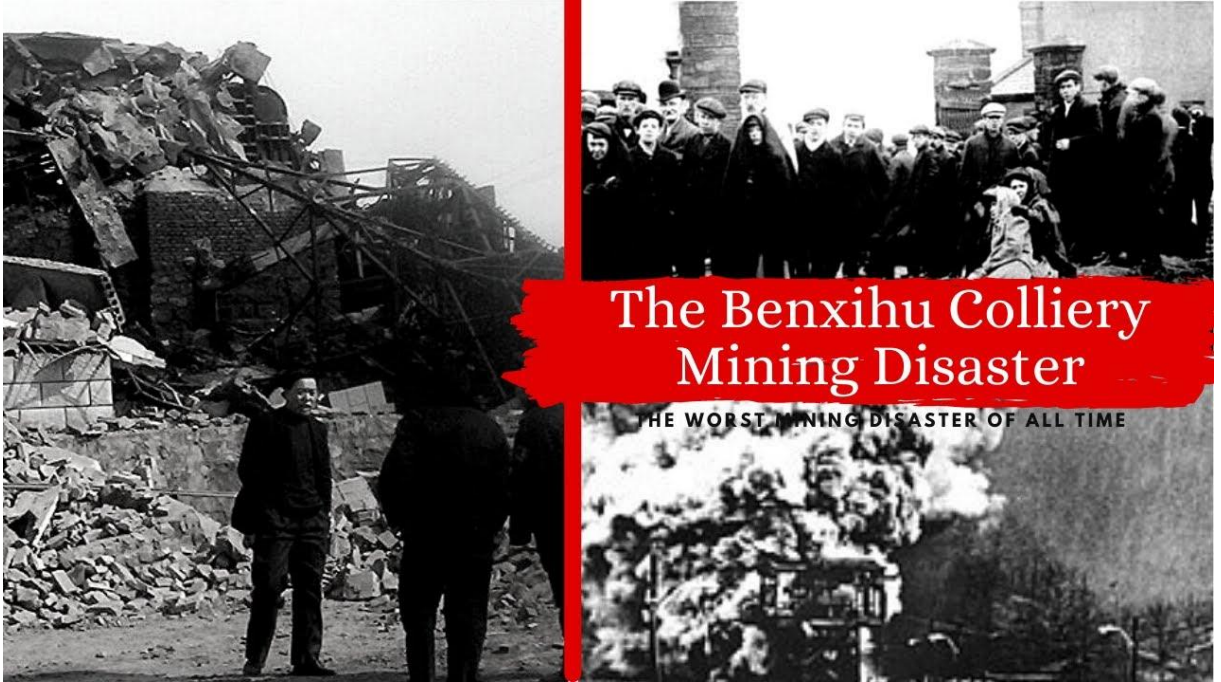
Zhang ve diğeri (xxxv), kablosuz sensör ağı (WSN) ile birlikte kablo izleme sisteminden (CMS – Cable Monitoring System) tam olarak yararlanan entegre bir ortam izleme sistemi önermişlerdir.

Xu ve diğeri ise (xxxvi) iris tanımlaması, radyo frekansı tanımlaması (RFID – Radio Frequency Identification), bilgisayar ağı ve veri tabanı tekniği dâhil olmak üzere çeşitli modern tanımlama ve iletişim tekniklerine dayanan gelişmiş bir güvenlik sistemi ortaya koymuşlardır.

3. Metodoloji

3.1. Analitik Çerçeve

Kömür madeni kazalarının derinlemesine analizini yürütmek üzere Şekil-3'te gösterilen analitik çerçeve önerilmiştir. Üç ana modülden oluşan kademeli bir prosedürdür. İlk olarak kömür madeni kazaları, Devlet Kömür Madeni Güvenliği İdaresi web sitesi gibi literatür taraması ve medyadan toplanmıştır. Ardından kaza zincirlerini analiz etmek için veri olarak tipik kazalar seçilmiştir. Gelecekte, kaza zincirlerinin küresel bir ağ olarak entegre edilmesi de planlanmıştır.

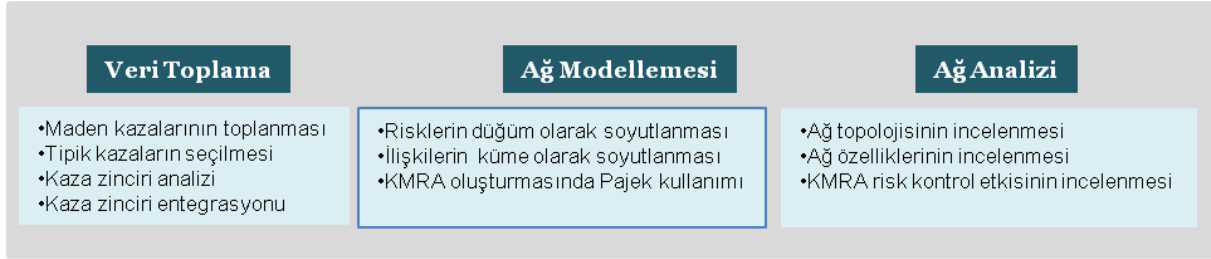


Dünyanın en büyük kömür madeni faciası Benxihu Kömür Madeni Patlaması⁹, 26 Nisan 1942, Grizu ve kömür tozu patlamasının ardından çoğu karbon monoksit zehirlenmesinden olmak üzere 1,549 madenci hayatını kaybetmiştir.

⁹ Önce kömür tozu patlaması meydana gelmiş ve ardından madende yangın başlamıştır. Kömür tozu veya herhangi bir yanıcı madde patlaması ölümcül bir fenomendir. Hava ince parçacıklarla doymuş hale geldiğinde, aşırı ses veya alev kaynağı kapalı alanda hızla hareket eden bir patlamaya neden olabilir ve hızla büyük

İkinci aşamada riskler düğüm¹⁰ (aktör/nokta) ve karşılıklı ilişkiler de bağ¹¹ (ayrıt) olarak soyutlanmıştır. Bunun yanı sıra kömür madeni risk ağını oluşturmak maksadıyla da Pajek yazılımı kullanılmıştır.

Üçüncü aşamada ise KMRA topolojisi analiz edilmiş ve ağ özellikleri teorisine göre tanımlanmıştır. Ardından da, KMRA'daki risk kontrolünün etkisi hesaplanmıştır. Araştırma sonucuna göre, kömür madeni üretiminde güvenlik yönetimini teşvik etmek maksadıyla tartışmalar ve öneriler sunulmuştur.



Şekil - 3 Analitik Çerçeve

3.2. Veri Toplama ve Analiz

Risk analizinde tarihsel kömür madenciliği kazalarına ait veriler kullanılmıştır. Kaza verilerini; devlet, işletme, literatür taraması ve medyadan toplamanın birkaç yolu bulunmaktadır. Bu çalışmadaki kaza vakaları literatür taraması ve medyadan derlenmiştir. Microsoft Access 2010'a dayalı olarak, kazaların ayrıntılı bilgileri (zaman, konum, tür, süreç, ölüm ve kayıplar dâhil) kaydeden bir kömür madeni kazaları veri tabanı (CMAD – Coal Mine Accident Database) oluşturulmuştur.

Çin Halk Cumhuriyeti'nde son birkaç yılda yüzlerce kömür madeni kazası meydana gelmesine rağmen, kaza süreci başta olmak üzere birçok kazaya ait bilgiler net değildir. Sonuç olarak, ayrıntılı bilgiler içeren toplam 176 kömür madeni kazasına ait veriler toplanmıştır. Bu detaylı kazalar arasında bazı kaza zincirleri belirgin değildir, bazıları ise herhangi bir kaza zinciri olmaksızın aniden ve beklenmedik bir şekilde meydana gelmiştir.

basınçlar meydana gelebilir, yapıya zarar verebilir, şarapnel parçaları oluşturabilir ve toz parçacıklarının bulunduğu ortamdaki her canlıyı öldürebilir. Japon maden işletmecilerinin önceliği kesinlikle maden işçilerinin hayat kurtarmak değildir, patlama ve yangın sonrası hızlı bir karar vermeleri gerekmektedir. Ve en iyi hareket tarzının madeni tamamen kapatmak olduğunu düşünürler, oksijen eksikliği nedeniyle yangının söneceğini umut etmektedirler. Temizleme ve kurtarma 10 gün sürmüş ve kömürleşmiş cesetler art arda madenden çıkarılmıştır. Hayatlarını kaybeden maden işçilerinin cansız bedenleri toplu bir mezara gömülmüştür.

¹⁰ Düğüm bir ağdaki en küçük birimdir, aynı anlama gelmek üzere literatürde nokta olarak da anılmaktadır.

¹¹ İki düğüm (nokta) arasındaki bağlantıyı temsil etmektedir, literatürde aynı anlama gelmek üzere çoğu zaman bağlantı, çizgi veya kenar olarak da adlandırılmaktadır.

Bu tür kömür madeni kazaları araştırma kapsamına dâhil edilmemiştir. Ayrıca bazı kazalar da diğer kazalara birebir benzediğinden analiz edilmemiştir. Sonunda, her türlü kömür madenciliği kazası dâhil olmak üzere 126 adet tipik kaza, Kömür Madenciliği Kaza veri tabanına kaydedilmiş ve risk ağı modelinin oluşturulması için kaza zinciri analizi yapmak üzere seçilmiştir. Veri tabanına kaydedilen kazaların iki örneği Tablo-2’de görülmektedir.

TABLO - 2 İKİ KAZA ÖRNEĞİ

SAYI	TARİH	KENT	TİP	TANIM	ÖLÜ	KAYIP (USD)
28	21.10.2003	Wuhai	Kömür Tozu Patlaması	Üç patlatıcı iş yönetmeliğini ihlal etmiş ve herhangi bir güvenlik önlemi almadan patlatma yapmıştır. Ne yazık ki, patlama çıplak ışığa yol açtı ve ardından gaz alev alarak yanmaya başlamıştır. Sonuç olarak, kömür tozu patlaması meydana geldi.	6	120.000
92	23.02.2004	Jixi	Grizu Patlaması	Yetersiz havalandırma nedeniyle gaz konsantrasyonu eşiği aşmıştır. Bu sırada bir madenci lambasını sökerek elektrik kıvılcımını tetiklemiş ve çıkan kıvılcım gaz patlamasına neden olmuştur.	37	370.000

Veri tabanına kaydedilen kömür madenciliği kazaları her ne kadar seçilmiş olsalar da, neredeyse her türden kaza dâhil edilmiştir. Bu nedenle, seçim sürecinde herhangi bir ön yargı kesinlikle yoktur. Şahıs, makine, çevre/ortam, idare/yönetim ve teknoloji açılarından veri tabanına kaydedilen kömür madenciliği kazalarındaki bütün kaza zincirleri Tablo-3’te gösterilmiş ve detaylandırılmıştır.

Kazaların çoğunda sadece bir kaza zinciri varken, bazılarında 41 ve 75’inci satırlardaki kazalarda olduğu gibi iki adet kaza zinciri bulunmaktadır. Sonuç olarak; toplam 126 adet kaza vakasında toplam 135 adet kaza zinciri elde edilmiştir.

TABLO - 3 KAZA ZİNCİRİ ANALİZİ

SIRA	KAZA ZİNCİRİ
1	Sigara İçme → Açık Ateş → Yangın → Boğulma
2	Beklenmedik Patlama → Gaz Yoğunluğu Limit Aşımı → Gazın Alev Alması → Yangın
3	Fan Arızası → Yetersiz Havalandırma → Gaz Limit Aşımı → Gazın Alev Alması → Yangın → Grizu Patlaması
4	Elektrik Kaçağı → Gazın Alev Alması → Grizu Patlaması
5	Kömür ve Grizu Patlaması → Boğulma
6	Elektrik Arızaları → Hava Fan Arızası → Yetersiz Havalandırma → Gaz Yoğunluğu Limit Aşımı → Yangın
7	İhlal İşlemi → Yetersiz Havalandırma → Gaz Yoğunluğu Limit Aşımı → Grizu Patlaması
8	Yetersiz Havalandırma → Gaz Yoğunluğu Limit Aşımı → Boğulma
9	İşlem İhlali → Boğulma
10	İdari İhmal → Kaynak Operasyon İhlali → Grizu Patlaması
11	İdari İhmal → Yetersiz Havalandırma → Boğulma
12	İdari İhmal → Beklenmedik Patlama → Tavan Çökmesi → Grizu Patlaması
13	Mekanik Sürtünme → Kıvılcım → Grizu Patlaması
14	Havalandırma Fanı Arızası → Yetersiz Havalandırma → Gaz Yoğunluğu Limit Aşımı → Grizu Patlaması
15	Elektrik Kıvılcımı → Gazın Alev Alması → Yangın → Grizu Patlaması
16	İdari İhmal → İşlem İhlali → → Boğulma
17	Tavan Çökmesi → Mekanik Sürtünme → Kıvılcım → Grizu Patlaması
18	Yetersiz Havalandırma → Gaz Yoğunluğu Limit Aşımı → Grizu Patlaması
19	Mantıksız Teknik Şema → Jeostres Yoğunlaşması → Kömür ve Grizu Patlaması → Boğulma
20	Hatalı Yönetmelik → İdari İhmal → Beklenmedik Patlama → Kömür ve Grizu Patlaması → Boğulma

SIRA	KAZA ZİNCİRİ
21	İdari İhmal→Yanlış Bakım→Cihaz Arızası→Yetersiz Havalandırma→Gaz Limit Aşımı→Grizu Patlaması
22	Beklenmedik Patlama→ Kömür Tozu Patlaması→ Karbon Monoksit Zehirlenmesi
23	Hatalı Yönetmelik→ İdari İhmal→ Beklenmedik Patlama→ Kömür ve Grizu Patlaması→ Boğulma
24	İdari İhmal→ Kopan Çelik Halat→ Mekanik Sürtünme→ Kıvılcım→ Patlaması
25	Kopan Çelik Halat→ Mekanik Sürtünme→ Kıvılcım→ Kömür Tozu Patlaması
26	Beklenmedik patlama→ Tavan Çökmesi→ Havalandırma Arızası→ Kömür Tozu Patlaması→ Çarpma
27	Çelik Halat Kopması→ Vagonun Raydan Çıkması→ Çarpışma→ Kıvılcım→ Kömür Tozu Patlaması
28	İşlem İhlali→ Beklenmedik patlama→ Açık Ateş→ Gazın Alev Alması→ Kömür Tozu Patlaması
29	Elektrik Kıvılcımı→ Açık Ateş→ Gazın Alev Alması→ Yangın→ Karbon Monoksit Zehirlenmesi
30	Elektrik arızaları→ Açık Ateş→ Yangın→ Tavan Çökmesi
31	Kablo Kısa Devre→ Elektrik Kıvılcımı→ Yangın→ Karbon Monoksit Zehirlenmesi
32	Elektrik Arızaları→ Kablo Kısa Devre→ Elektrik Kıvılcımı→ Yangın→ Karbon Monoksit Zehirlenmesi
33	İşlem İhlali→ Basınç Fan Arızası→ Aşırı Basınç→ Kıvılcım→ Yangın→ Karbon Monoksit Zehirlenmesi
34	Yetersiz Eğitim→ Kaynak Operasyon İhlali→ Açık Ateş→ Yangın→ Karbon Monoksit Zehirlenmesi
35	İdari İhmal→ Elektrik Kaçağı→ Açık Ateş→ Yangın→ Tavan Çökmesi
36	İdari İhmal→ Taşıyıcı Arızası→ Aşırı Sıcaklık→ Açık Ateş→ Yangın→ Boğulma
37	İdari İhmal→ Elektrik Arızaları→ Fan Arızası→ Gaz Yoğunluk Limit Aşımı→ Metan Gazı Zehirlenmesi
38	Yetersiz Eğitim→ Beklenmedik Patlama→ Terk Edilmiş Yere Girme→ Su Sızıntısı
39	İşlem İhlali→ Terk Edilmiş Yere Girme→ Su Sızıntısı
40	İdari İhmal→Nedensiz Patlama→Terk Edilen Yere Giriş→Su Sızıntısı→Patlama→Gaz Limit Aşımı
41	Nedensiz Patlama→ Açık Ateş→ Gazın Alev Alması→ Grizu Patlaması
42	Yetersiz Jeolojik Araştırma→ Nedensiz Patlama→ Terk Edilmiş Yere Giriş→ Su Sızıntısı
43	Yetersiz Jeolojik Araştırma→ Terk Edilmiş Yere Giriş→ Su Sızıntısı
44	Terk Edilmiş Yere Giriş→ Su Sızıntısı
45	İdari İhmal→ İşlem İhlali→ Su Sızıntısı
46	İdari İhmal→ Durgun Su→ Boğulma
47	İdari İhmal→ İşlem İhlali→ Terk Edilmiş Yere Girme→ Su Sızıntısı
48	Yetersiz Eğitim→ Taşıyıcı Bant Üzerinde Durma→ Düşme→ Mekanik Yaralanma
49	İdari İhmal→ Çelik Halat Kopması→ Asansör Kabininin Düşmesi
50	Çelik Halat Kopması→ Vagonun Kayması→ Vagonun Raydan Çıkması→ Çarpışma
51	Yetersiz Eğitim→ Çelik Halat Kopması→ Mekanik Yaralanma
52	Bilimsel Olmayan Tasarım→ Hatalı Ray→ Vagonun Raydan Çıkması→ Çarpışma
53	Vagonun Aşırı Yüklenmesi→Fren Arızası→Vagonun Kayması→ Vagonun Raydan Çıkması→ Çarpışma
54	İdari İhmal→ Yanlış bakım→ Mekanik Yaralanma
55	İdari İhmal→ Hatalı Bakım→ Mekanik Yaralanma
56	İdari İhmal→ İşlem İhlali→ Elektrik Şoku
57	Kablo Kısa Devre→ Elektrik Şoku
58	İdari İhmal→ Yetersiz Eğitim→ Düşme→ Mekanik Yaralanma
59	Kaçak Akım→ Grizu Patlaması
60	İdari İhmal→ Elektrik Kaçağı→ Beklenmedik Patlama
61	Bilimsel Olmayan Tasarım→ Hatalı Tünel Desteği→ Tavan Çökmesi
62	Gömülü İzole Kömür Birikintisi→ Tünel Destek Arızası→ Tavan Çökmesi
63	Vagonun Yoldan Çıkması→ Çarpışma→ Tünel Destek Arızası→ Tavan Çökmesi
64	Sütunun Bilerek Sökülmesi→ Tavan Çökmesi→ Çarpma
65	Yetersiz Jeolojik Araştırma→ Jeostres Yoğunluğunun İhmal Edilmesi→ Tavan Çökmesi
66	Jeostres Yoğunluğunun İhmal Edilmesi→ Tavan Yırtılması→ Tavan Çökmesi
67	Hatalı Tünel Desteği→ Düşen Kaya→ Çarpma
68	Nedensiz patlama→ Tünel Destek Arızası→ Tavan Çökmesi
69	Bilimsel Olmayan Tasarım→ Hatalı Tünel Desteği→ Tavan Çökmesi→ Düşen Kaya
70	İşlem İhlali→ Tavan Çökmesi
71	Mantıksız Teknik Tasarım→ Tünel Destek Arızası→ Tavan Yırtılması→ Tavan Çökmesi→ Çarpma
72	Mantıksız Teknik Tasarım→ Nedensiz Patlama→ Tavan Yırtılması→ Tavan Çökmesi
73	Hatalı Tünel Desteği→ Tavan Çökmesi→ Düşen Kaya
74	Zayıf Güvenlik Bilinci→ Taşıma Bandı Üzerinde Durma→ Düşme→ Mekanik Yaralanma
75	Tavan Çökmesi→ Terk Edilmiş Yere Girme→ Karbon Monoksit Zehirlenmesi
76	Fan Arızası→Yetersiz Havalandırma→Gaz Limit Aşımı→Elektirik Arızalar→Kablo Kısa Devre
77	Yetersiz Jeolojik Araştırma→ Jeostres Yoğunluğunun İhmal Edilmesi→ Su Sızıntısı
78	Zayıf Güvenlik Bilinci→ Nedensiz Patlama→ Su Sızıntısı
79	İdari İhmal→ Dinamitin Kendiliğinden Alev Alması→ Dinamit Patlaması→ Tavan Çökmesi
80	Trafo Aşırı Yükleme→ Kablo Kısa Devre→ Elektrik Kıvılcımı→ Yangın
81	Ani Sağanak Yağmur Fırtınası→ Su Sızıntısı
82	Kömür Damarının Kendiliğinden Yanması→ Yangın
83	Nedensiz Patlama→ Açık Ateş→ Yangın

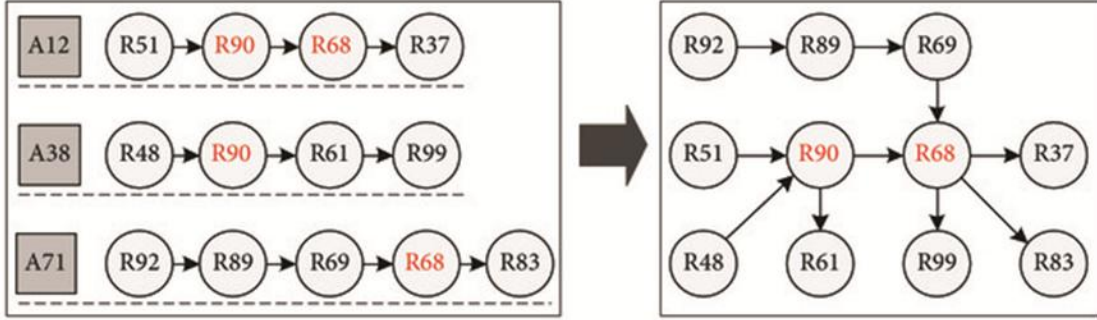
SIRA	KAZA ZİNCİRİ
84	İşlem İhlali→ Elektrik Şoku
85	Yetersiz Eğitim→ İşlem İhlali→ Mekanik Yaralanma
86	Nedensiz Patlama→ Kömür Tozu ve Gaz Patlaması→ Grizu Patlaması
87	Patlatma Deliği Delme→ Kıvılcım→ Grizu Patlaması
88	Patlatma Prosedür İhlali→ Açık Ateş→ Grizu Patlaması→ Çarpma
89	Madenci Lambası Arızası→ Elektrik Kıvılcımı→ Grizu Patlaması
90	Kablo Yalıtımı Hatası→ Kablo Kısa Devre→ Elektrik Kıvılcımı→ Grizu Patlaması
91	Sigara İçmek→ Açık Ateş→ Grizu Patlaması
92	Yetersiz Havalandırma→Gaz Limit Aşımı→Madenci Lambasının Gereksiz Sökümü→Kıvılcım→ Patlama
93	Hatalı Jeolojik Durum→ Kömür Tozu ve Grizu Patlaması
94	Gaz İzleme Sistem Arızası→ Gaz Yoğunluğu Limit Aşımı→ Grizu Patlaması
95	Tozsuzlaştırma Cihazı Eksikliği→ Kömür Tozu Yoğunluğu Limit Aşımı→ Kömür Tozu Patlaması
96	Patlatma İhlali→Kömür Bunker Çökmesi→Kömür Tozu Yoğunluk Aşımı→Kömür Tozu Patlaması
97	Kaynak Prosedür İhlali→ Taşıyıcı Bantın Alev Alması→ Yangın→ Boğulma
98	Ani Sağanak Yağmur Fırtınası→ Elektrik Kesilmesi→ Su Pompası Arızası→ Madeni Su Basması
99	Elektrik Kesilmesi→ Havalandırma Arızası→ Gaz Yoğunluğu Limit Aşımı
100	Patlatma Prosedürü İhlali→ Zehirli Gaz Sızıntısı→ Zehirlenme
101	Kömür Kesiminde Şiddetli Sarsıntı→ Kömür Tozu ve Grizu Patlaması
102	Elektrik anahtarının Patlaması→ Kıvılcım→ Grizu Patlaması
103	Tavan Çökmesi→ Havalandırma Fanı Arızası→ Yetersiz Havalandırma→ Gaz Yoğunluğu Limit Aşımı
104	Kablo Kısa Devre→ Kıvılcım→ Yangın→ Metal Çarpması→ Kıvılcım→ Grizu Patlaması
105	Gereksiz Yeniden Çalıştırma→ Elektrik Kıvılcımı→ Grizu Patlaması
106	Madenci Lambasının Kurallara Aykırı Sökülmesi→ Elektrik Kıvılcımı→ Grizu Patlaması
107	Ankraj Yapısında Şiddetli Sarsıntı→ Kömür Tozu ve Grizu Patlaması
108	Çelik Halat Kopması→Vagonun Yoldan Çıkması→Kısa Devre→Kıvılcım→Kömür Tozu Patlaması
109	Mekanik Sürtünme→ Kıvılcım→ Kömür Tozu Patlaması
110	İdari İhmal→ Elektrik Kaçağı→ Kablonun Alev Alması→ Yangın→ Zehirli Gaz Sızıntısı→ Zehirlenme
111	Taşıyıcı Aşırı Isınması→ Motor Yağının Alev Alması→ Kıvılcım→ Yangın
112	İşlem İhlali→ Su Sızıntısı
113	Yanlış Jeolojik Araştırma→ Yanlış Delik Açılması→ Su Sızıntısı
114	Destek Problemi→ Tavan Ayrılması→ Tavan Çökmesi
115	Basınç Fan Arızası→ Motor Yağının Alev Alması→ Kıvılcım→ Yangın
116	Dayanaksız Sütun→ Tavan Yırılması→ Tavan Çökmesi
117	Vinç Fren Arızası→ Düşen Objeye→ Çarpma→ Mekanik Yaralanma
118	Tökezleyerek Düşme→ Düşme→ Çarpma
119	Tökezleyerek Düşme→ Mekanik Yaralanma
120	Destek Yapısının Çökmesi→ Tavan Çökmesi→ Çarpma
121	Alkollü İçki İçmek→ Düşmek→ Mekanik Yaralanma
122	İşlem İhlali→ Çelik Halat Kopması→ Mekanik Yaralanma
123	İdari İhmal→ Uyarı İşareti Olmaması→ Düşen Kaya→ Çarpma
124	İdari İhmal→ Uyarı İşareti Olmaması→ Tehlikeli Bölgeye Giriş→ Boğulma
125	Tehlikeli Bölgeye Giriş→ Düşen Kaya Parçası→ Çarpma
126	Asansörün Sökülmesi→ Düşen Objeye→ Çarpma

3.3. Ağ Modellemesi

Farklı kazalarda aynı anda birden fazla risk mevcuttur ve bu, riskin diğerleriyle ilişkili olduğunu göstermektedir. KMRA'nın oluşturulması için riskler ve aralarındaki ilişkilerin belirlenmesi esastır. İstatistikler aracılığı ile 135 adet kaza zincirinden toplam 105 adet risk ve 194 adet ilişki elde edilmiştir. Ayrıca düğüm numarası ve türü de Tablo-4'te ayrıntılı olarak verilmiştir.

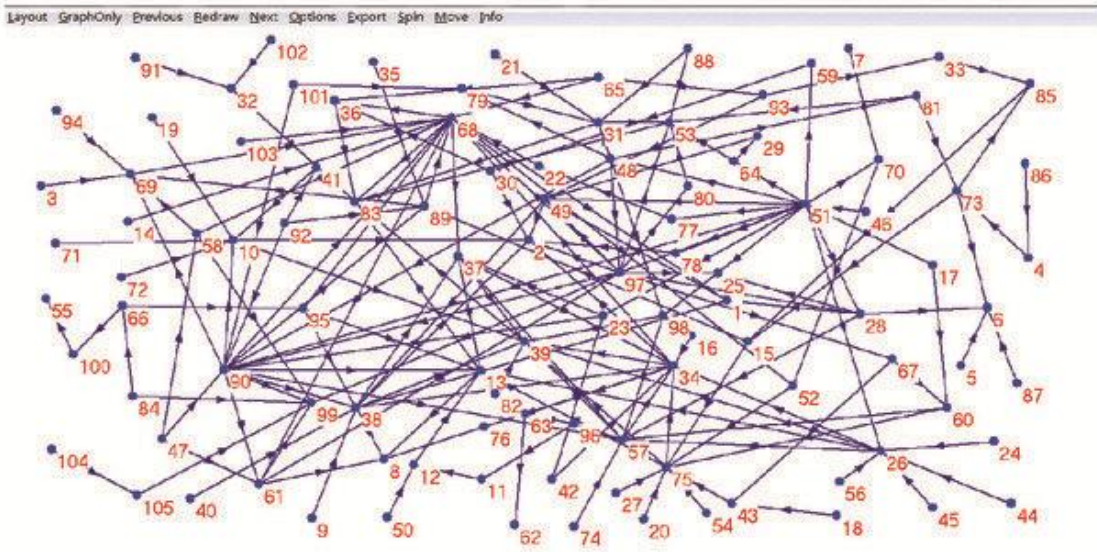
Bu çalışmada riskler düğüm (aktör) olarak ve karşılıklı ilişkiler bağ (ayrıt) olarak soyutlandıktan sonra farklı riskler ortak düğümler vasıtasıyla küresel bir ağa bağlanabilir. Daha iyi bir açıklama maksadıyla, Şekil-4'te gösterilen 12, 38 ve 71 numaralı kazalar ağ modelleme sürecini göstermek için örnek olarak alınmıştır. 12,

38 ve 71 numaralı kazalardaki risk tanımlamalarından, R90 ve R68 dâhil olmak üzere kırmızı renkle gösterilen iki ayrı düğüm olduğu görülebilir.



Şekil - 4 Analitik Çerçeve

Bu yöntemle ağ, ortak risklere dayalı olarak oluşturulabilir. Ayrıca Şekil-5'te de görüldüğü gibi, kömür madeni risk ağı oluşturmak için Pajek yazılımı kullanılmaktadır.



Şekil – 5 Kömür Madeni Risk Ağı Modeli-Pajek

TABLO-4 RİSKLER VE NEDENLERİ

SIRA	RİSK	NEDEN
1	Havalandırma Fanı Arızası	Makine
2	Boğulma	Ortam/Çevre
3	Destek Gecikmesi	İşletme/Yönetim
4	Fren Arızası	Makine/Donanım
5	Kablo Yalıtım Arızası	Makine/Donanım
6	Kablo Kısa Devre	Makine/Donanım

SIRA	RİSK	NEDEN
7	Asansör Kabinin Düşmesi	Makine/Donanım
8	Karbon Monoksit Zehirlenmesi	Ortam/Çevre
9	Havalandırma Sisteminin Gereksiz Kapatılması	İşletme/Yönetim
10	Kömür Tozu ve Grizu Patlaması	Ortam/Çevre
11	Kömür Bunker Çökmesi	Ortam/Çevre
12	Kömür Tozu Yoğunluğu Limit Aşımı	Ortam/Çevre
13	Kömür Tozu Patlaması	Ortam/Çevre
14	Destek Yapısının Çökmesi	Teknoloji
15	Çarpışma	Makine/Donanım
16	Taşıyıcı Bant Alev Alması	Makine/Donanım
17	Taşıyıcı Bant Arızası	Makine/Donanım
18	Taşıyıcı Bant Aşırı Isınması	Makine/Donanım
19	Hatalı Jeolojik Durum	Ortam/Çevre
20	Patlatma Deliği Sondajı	Teknoloji
21	Alkollü İçki İçilmesi/Alımı	Personel Hatası
22	Dinamit Patlaması	İşletme/Yönetim
23	Elektrik Kaçağı	Makine/Donanım
24	Elektrikli Lokomotif Arızası	Makine/Donanım
25	Elektrik Şoku	Makine/Donanım
26	Elektrik Kıvılcımı	Makine/Donanım
27	Elektrik Anahtarı Patlaması	Makine/Donanım
28	Elektrik Arızası	Makine/Donanım
29	Elektrikli Cihaz Arızası	Makine/Donanım
30	Tehlikeli Bölgeye Giriş	Personel Hatası
31	Düşme	Personel Hatası
32	Düşen Obje	Ortam/Çevre
33	Hatalı Ray Hattı	Makine/Donanım
34	Yangın	Ortam/Çevre
35	Gömülü İzole Kömür Birikintisi	Ortam/Çevre
36	Düşen Kömür/Kaya Parçası	Ortam/Çevre
37	Gaz Alev Alması	Ortam/Çevre
38	Gaz Yoğunluğu Limit Aşımı	Ortam/Çevre
39	Grizu Patlaması	Ortam/Çevre
40	Gaz İzleme Sistem Arızası	Makine/Donanım
41	Jeostres Yoğunluğunun Artması	Ortam/Çevre
42	Kablo Alev Alması	Makine/Donanım
43	Motor Yağının Alev Alması	Makine/Donanım
44	Madenci Lambasının Yetkisiz Sökümü	Personel Hatası
45	Gereksiz Yeniden çalıştırma/Başlatma	Personel Hatası
46	Hatalı Düzenleme/Yönetmelik	İşletme/Yönetim
47	Yetersiz Jeolojik Araştırma	İşletme/Yönetim
48	Yetersiz Eğitim	İşletme/Yönetim
49	Yetersiz Havalandırma	İşletme/Yönetim
50	Ortam Tozsuzlaştırma Cihazı Eksikliği	İşletme/Yönetim
51	İdari İhmal	İşletme/Yönetim
52	Mekanik Sürtünme	Makine/Donanım
53	Mekanik Hasar	Makine/Donanım
54	Metal Çarpışması	Makine/Donanım
55	Madeni Su basması	Ortam/Çevre
56	Madenci Lambası Arızası	Makine/Donanım
57	Açık Ateş	Makine/Donanım
58	Jeostres Yoğunluğunun Dikkate Alınmaması	İşletme/Yönetim

SIRA	RİSK	NEDEN
59	İkaz İşareti Yokluğu	İşletme/Yönetim
60	Aşırı Isınma	Ortam/Çevre
61	Terk Edilmiş Yere Giriş	Teknoloji
62	Zehirlenme	Ortam/Çevre
63	Zehirli Gaz Sızıntısı	Ortam/Çevre
64	Hatalı/Yanlış Bakım	İşletme/Yönetim
65	Hatalı/Eksik Tünel Desteği	Teknoloji
66	Elektrik Kesilmesi	Makine/Donanım
67	Basınç Fanı Arızası	Makine/Donanım
68	Tavan Çökmesi	Ortam/Çevre
69	Tavan Yırılması/Ayrılması	Ortam/Çevre
70	Çelik Halat Kopması	Makine/Donanım
71	Ankraj Yapısında Şiddetli Sarsıntı	Teknoloji
72	Kömür Kesiminde Şiddetli Titreşim	Teknoloji
73	Kayan Vagon	Makine/Donanım
74	Tütün/Sigara İçmek	Personel Hatası
75	Kıvılcım	Makine/Donanım
76	Kömür Damarının Kendiliğinden Yanması	Ortam/Çevre
77	Dinamitin Kendiliğinden Patlaması	İşletme/Yönetim
78	Durgun Su	Ortam/Çevre
79	Taşıyıcı Bant Üzerinde Durma	Personel Hatası
80	Çelik Halat Kopması/Çarpması	Makine/Donanım
81	Çelik Halat Kopması	Makine/Donanım
82	Kaçak Akım	Makine/Donanım
83	Çarpma	Personel Hatası
84	Ani Sağanak Yağmur Fırtınası	Ortam/Çevre
85	Vagonun Raydan Çıkması	Makine/Donanım
86	Vagonun Aşırı Yüklenmesi	Makine/Donanım
87	Trafo Aşırı Yükleme	Makine/Donanım
88	Takılarak/Tökezleyerek Düşme	Personel Hatası
89	Tünel Destek Arızası	Teknoloji
90	Nedeni Belli Olmayan Patlama	Teknoloji
91	Asansörün Nedensiz Parçalara Ayrılması	Teknoloji
92	Mantıksız Teknik Şema	Teknoloji
93	Bilimsel Olmayan Tasarım	Teknoloji
94	Dayanıksız Sütun	Teknoloji
95	Havalandırma Sistem Arızası	Makine/Donanım
96	Patlatma Prosedür İhlali	İşletme/Yönetim
97	Operasyon Prosedür İhlali	İşletme/Yönetim
98	Kaynak Prosedür İhlali	İşletme/Yönetim
99	Su Sızıntısı	Ortam/Çevre
100	Su Pompası Arızası	Makine/Donanım
101	Zayıf Güvenlik Bilinci	Personel Hatası
102	Vinç Fren Arızası	Makine/Donanım
103	Planlı/Hatalı Sütun Yıkılması	İşletme/Yönetim
104	Yanlış Jeolojik Araştırma	Teknoloji
105	Yanlış Sondaj/Delik Açma	Teknoloji

4. Sonuçlar

4.1. Ağ Temel Miktarları Metriği

Karmaşık ağ teorisinin sürekli gelişimi ile ağ yapısının istatistiksel indeksleri, aynı zamanda çeşitli topolojik özelliklerin istatistiksel tanımlarının temeli olan birçok başarılar elde etmiştir. Görsel bölümle karşılaştırıldığında, hesaplama; ağı keşfetmekte çok daha hassas ve kestirmedir^{xxxvii}. Bu çalışmada; ağ çapı, ağ yoğunluğu, ortalama yol uzunluğu, derece, arasındalık ve kümelenme katsayısı dâhil olmak üzere KMRA'nın özelliklerini ortaya çıkarmak için birkaç tipik indeks kullanılmaktadır. Bu topolojik indeksler Pajek yazılımı¹² tarafından hesaplanmaktadır.

4.1.1. Ağ Çapı

Ağ çapı, bir ağın boyutunu yansıtabilen, ağdaki azami yol uzunluğu olarak tanımlanmaktadır. KMRA'nın ağ çapı; hatalı/yanlış bakım (Düğüm 64) ile su sızıntısı (Düğüm 99) arasında olmak üzere 7 (yedi)'dir. Bu yol şu şekildedir; Hatalı/yanlış bakım (**Düğüm 64**) elektrikli cihaz arızasına (**Düğüm 29**) neden olur, elektrikli cihaz arızası yetersiz havalandırmayı (**Düğüm 49**) tetikler, yetersiz havalandırma (**Düğüm 49**) gaz yoğunluğunun limiti aşmasına neden olur, bu da gazın alev almasına (**Düğüm 37**) neden olur. Gazın alev alması yangın çıkmasına (**Düğüm 34**) neden olur, çıkan yangın da tavan çökmesine (**Düğüm 68**) neden olur. Tavam çökmesi terk edilen yere girişe (**Düğüm 61**) bu da su sızıntısına (**Düğüm 99**) neden olur. Bu riskler tek bir kazada aynı anda oluşmasa da riskin yayılma sürecini derinden yansıtmaktadır. Riskin yayılma kuralı, risk kontrolü için önleme ve kontrol stratejileri geliştirilmesini sağlar.

4.1.2. Ağ Yoğunluğu

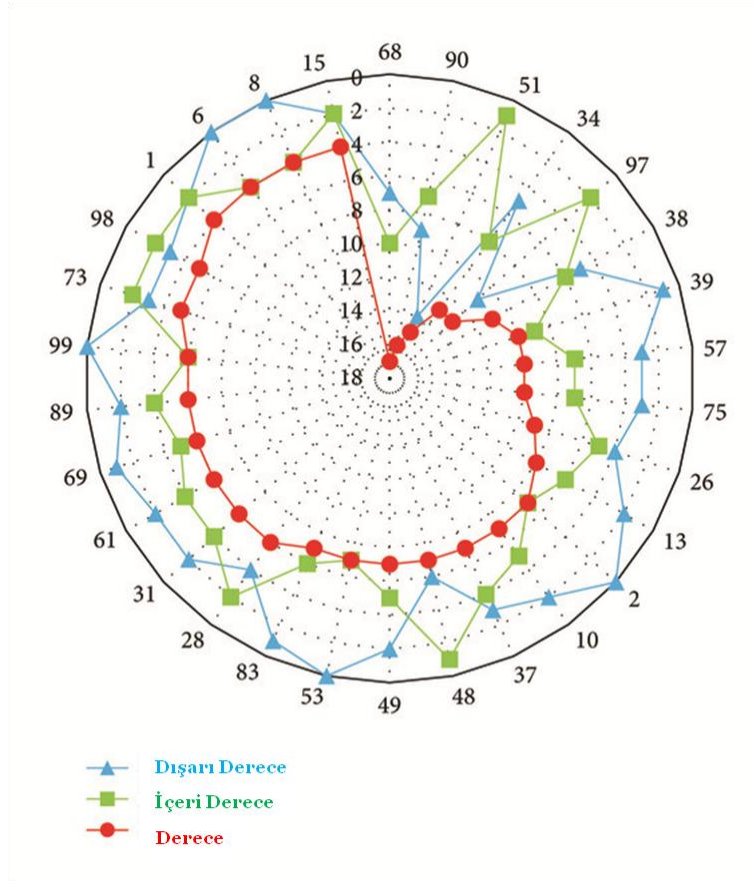
Ağ yoğunluğu, bir ağdaki düğümler arasındaki yakınlık derecesini tanımlamak için kullanılır. Ağdaki mevcut bağlantı sayısının olası bağlantı sayısına oranıdır. Daha genel anlamda, nicel verilerin ölçüldüğü ilişkilerde, yoğunluk bir bağın ortalama gücü olarak ta tanımlanmaktadır. Özellikle bir ağdaki gerçek bağların potansiyel bağlara oranını ifade etmektedir. 105 adet düğümden oluşan KMRA'da azami bağ sayısı $105 \times 104 = 10.920$ 'dir. KMRA'daki gerçek bağ miktarı 194 olduğundan; KMRA ağ yoğunluğu $194 / 10.920 = 0.178$ 'dir. Genel olarak düğümler ne kadar fazlaysa ağ

¹² Pajek eskiden beri yaygın kullanılan ağ görselleştirme ve analiz programlarından bir tanesidir. Daha çok matematik (rastlantısal ağlar) ve fizik alanlarından katkı aldığı için programın sunumu bu oryantasyonu yansıtır. Özellikle çok büyük ağların analizi için verimli çalışan bir sistemdir, ve pek çok metriği ölçebilmektedir. Yazılımı ücretsiz olarak <http://pajek.imfm.si/doku.php> sitesinden edinebilir ve kullanım kılavuzuna ulaşabilirsiniz.

yoğunluğu o kadar küçük olmaktadır. Düşük yoğunluk, KMRA'nın nispeten seyrek bir ağ olduğu anlamına gelmektedir. Ayrıca KMRA'daki düğümler diğerleriyle daha az bağlantılıdır. Başka bir ifadeyle; KMRA'da diğerlerinden doğrudan etkilenen düğüm derecesi nispeten düşüktür.

4.1.3. Ortalama Patika Uzunluğu

Bilgi veya enerjinin iletim verimliliği, ortalama yol uzunluğu ile önemli ölçüde ilişkilidir. Daha kısa bir ortalama yol uzunluğu, daha yüksek verimlilik anlamına gelmektedir. Ortalama yol uzunluğu, bir ağdaki bütün olası düğüm çiftleri arasındaki ortalama adım sayısı olarak tanımlanabilir. KMRA'daki ortalama yol uzunluğu değeri 3,0841'dir, bu da bir riskin diğerine ortalama olarak sadece üç adımda iletebileceğini göstermektedir. Örneğin; kablo kısa devresi (**Düğüm 6**) ve karbon monoksit zehirlenmesi (**Düğüm 8**), Tablo-3'te gösterilen 31 numaralı kazada gösterildiği gibi elektrik kıvılcımı (**Düğüm 26**) ve yangın (**Düğüm 34**) ile üç adımda bağlanabilen iki bağlantılı riski ifade etmektedir.



Şekil – 6 İçeri, Dışarı ve Toplam Derece Değerleri

4.1.4. Derece

Bir düğümün en basit ve üzerinde en çok çalışılan özelliği olan derecesi, o düğüme bağlı toplam bağlantı sayısı olarak tanımlanmaktadır. Yönlendirilmiş bir ağda derece;

gelen bağların sayısı (içeri) veya giden bağların sayısı (dışarı) olabilir ve toplam derece de ikisinin toplamıdır. KMRA'da 105 adet düğüm olduğundan, bir radar grafiğinde bütün düğümleri göstermek imkânsızdır. Sonuç olarak, düğüm derecesini göstermek için en yüksek dereceye sahip 30 bağ örnek olarak seçilmiştir. Bu 30 adet bağın içeri derece, dışarı derece ve toplam derece değerleri Şekil-6'da verilmiştir. Tavan çökmesi (**Düğüm 68**), içeri derece=10 ve dışarı derece=7 olmak üzere en yüksek 17 derecesine sahiptir.



Kaynak: INDEPENDENT

Bu, tavan çökmesinin nispeten merkezi bir konumda olduğunu ve kaza zincirinde kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Düğüm 68'in içeri derecesi bunun yanı sıra ağdaki en yüksek derecedir, bu da KMRA'daki en büyük risk alıcısı anlamına gelmektedir ve zayıf tünel desteği gibi birçok riskin tavan çökmesine yol açabileceğini ima etmektedir. Birden fazla yol/patika, düşük dereceli diğer düğümlere kıyasla tavan çökmesini kontrol etmeyi zorlaştırmaktadır. Tavan çökmesinin ardından; ağdaki nedensiz patlama (**Düğüm 90**) ikinci, idari ihmal (**Düğüm 51**) ise üçüncü sıradadır.

Nedensiz patlamanın içeri derecesi 7 ve dışarı derecesi 9'dur. Bunun anlamı ise 7 adet riskin nedensiz patlamalara yol açabileceği ve bu arada nedensiz patlamaların üretimde 9 adet riske neden olabileceğidir. İlave olarak; idari ihmal (**Düğüm 51**) en yüksek dışarı dereceye sahiptir, bu da idari ihmalin en ciddi risk kaynağı olduğunu göstermektedir. Güvenlik yönetiminde bir hata olduğunda, gaz yoğunluğunun limiti aşması gibi birçok risk her an tetiklenebilir. Bu kilit düğümlerin kontrol edilmesi, sınırlı güvenlik kaynakları altında, kaynak dağıtımında da referans olan kömür madeninin güvenliğini olumlu yönde etkileyebilir. Ayrıca, risklerin KMRA'da yayılmasını ve yayılmasını önlemek için riskler arasındaki bağlantıyı kesmeye/bozmaya da büyük ölçüde yardımcı olur.

4.1.5. Arasındalık

Arasındalık, bir düğümün ağda diğer düğümler arasında bulunma derecesidir, yani bir ağdaki bütün olası düğümler arasındaki etkileşimde bir düğümün ne ölçüde aracı bir rol oynadığını tanımlamakta kullanılır^{xxxviii}. Ağ analizinde; düğüm arasındalık ve bağ arasındalık olmak üzere iki tür arasındalık yaygın olarak kullanılmaktadır (^{xxxix-xl}). Bu araştırmada, sadece düğüm arasındalık kullanılmıştır. Yüksek arasındalık, bütün ağda, aracılık yapma ve ilişkileri kontrol etmekte daha fazla öneme sahip olduğunu göstermektedir.

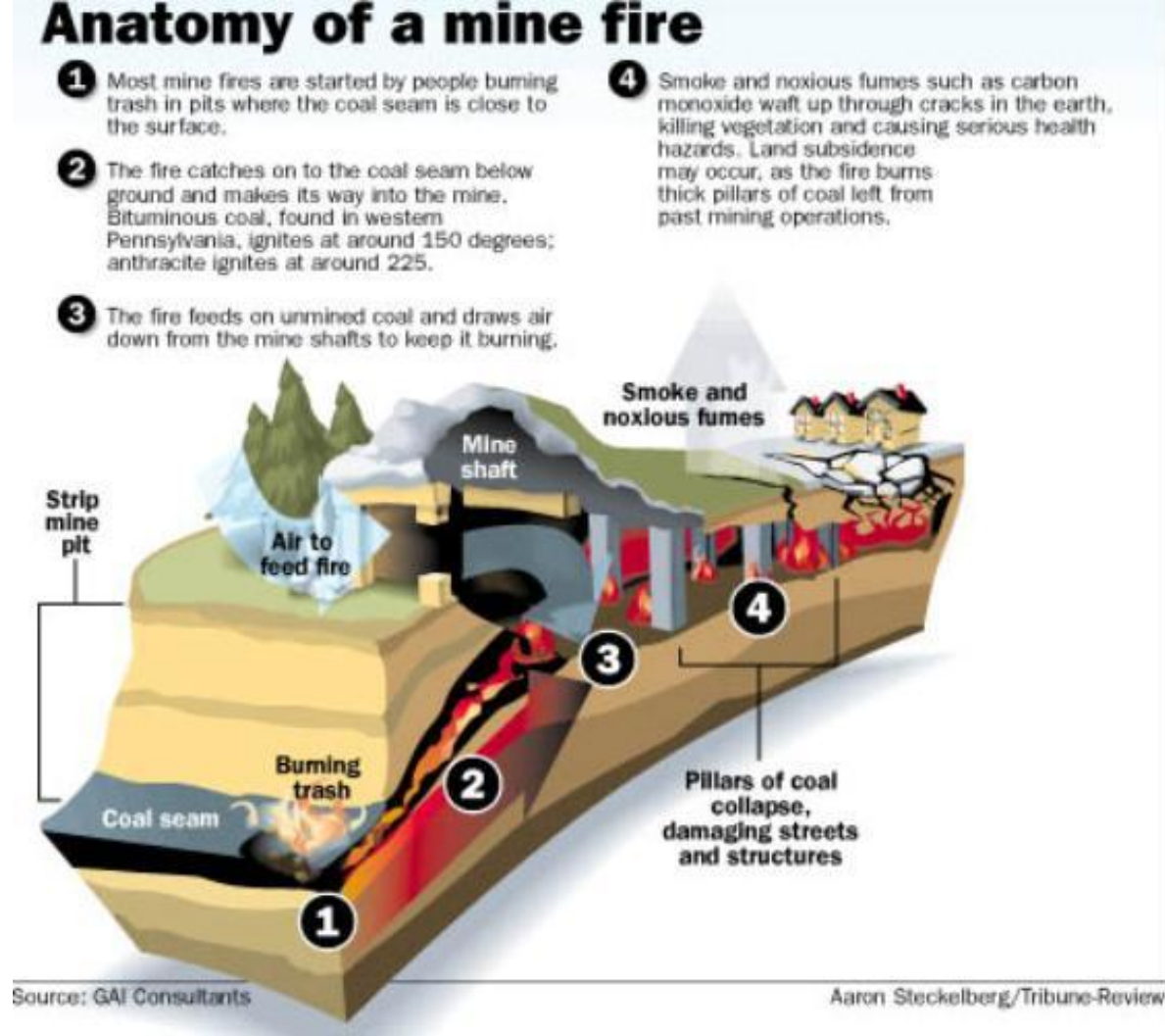
TABLO-5 KÖMÜR MADENİ RİSK AĞINDA ARASINDALIK

DÜĞÜM	ARASINDALIK	DÜĞÜM	ARASINDALIK
68	0.059852	22	0.001867
34	0.048486	29	0.001774
75	0.020668	48	0.001147
38	0.016303	65	0.000996
15	0.012481	81	0.000937
89	0.010105	28	0.000850
90	0.009873	12	0.000794
57	0.009704	16	0.000770
26	0.008742	98	0.000745
1	0.008044	31	0.000742
73	0.007534	67	0.000660
37	0.007143	36	0.000560
83	0.007001	58	0.000490
61	0.006588	70	0.000467
95	0.006566	30	0.000436
63	0.006068	33	0.000420
52	0.005903	23	0.000373
39	0.005813	32	0.000373
51	0.005134	17	0.000280
13	0.005128	64	0.000280
49	0.004844	59	0.000249
69	0.003734	79	0.000218
60	0.003423	77	0.000187
97	0.002563	100	0.000187
43	0.002558	42	0.000179
85	0.002474	11	0.000140
4	0.002427	41	0.000101
66	0.001960	105	0.000093
10	0.001875	78	0.000062
			0

Kömür Madeni Risk Ağında düğüm arasındalık değeri, Tablo-5'te gösterildiği gibi 0 ile 0.059852 arasındadır. Sadece 47 adet düğüm; düğüm arasındalıkları sıfır değerinde olduğundan görünmezdir. Bu da diğer düğümler arasındaki etkileşimler arasında aracı rolü oynamadıklarının bir göstergesidir. Tavan çökmesi (**Düğüm 68**),

en yüksek düğüm arasındalık değerine sahiptir, yani azami en kısa yollar tavan çökmesinden geçmektedir.

Tavan çökmesi riskin yayılması sürecinde önemli bir bağlantıdır. Durgun su (**Düğüm 78**) ise en düşük düğüm arasındalık değerine sahiptir, yani asgari en kısa yol durgun su düğümünden geçmektedir. Durgun su, riskin yayılması sürecinde önemli bir bağlantı değildir. Arasındalık değerine göre; risk yayılma sürecinde tavan çökmesinin (**Düğüm 68**) etkisi, durgun suyun (**Düğüm 78**) etkisinden çok daha büyüktür.



Ayrıca yangın (**Düğüm 34**) ve kıvılcım (**Düğüm 75**) arasındalık değerleri sırasıyla 0,048486 ve 0,020668'dir. En yüksek beş düğüm arasındalık kümülâtif değeri 0.542701'e eşittir, bunun anlamı; en kısa yolların yaklaşık %55'inin bu beş düğümünden geçtiğidir. Bu düğümler güvenlik yönetiminde üzerlerine odaklanması gereken düğümlerdir. Bu birkaç kilit noktayı etkin bir şekilde izleme ve kontrol etmenin KMRA'daki risk dağılımını yavaşlatabileceği ve zincirleme reaksiyonları azaltabileceği anlamına gelmektedir.

4.1.6. Kümelenme Katsayısı

Kümelenme katsayısı, bir ağdaki hangi düğümlerin lokal bir perspektiften birlikte kümelenme eğiliminde olduklarını tanımlamak maksadıyla kullanılmaktadır^{xli}. Bütün birimlerin birbirine bağlı olduğu tam bağlantılı bir ağda kümelenme katsayısı birdir. Bir düğümün kümelenme katsayısı, düğümün rastgele seçilen iki komşusunun birbirine bağlanma olasılığı olarak tanımlanır. 33 adet düğümün dereceleri 1'e eşit olduğundan 999.999.998 kayıp değeri aldıkları bulunabilir ve 34 adet düğüm de "0" derecesine sahiptir.

TABLO-6 KÖMÜR MADENİ RİSK AĞINDA KÜMELENME KATSAYISI

DÜĞÜM	KÜMELEME KATSAYISI	DÜĞÜM	KÜMELEME KATSAYISI
25	0.5000	8	0.0833
80	0.5000	15	0.0833
88	0.5000	23	0.0833
61	0.2000	58	0.0833
36	0.1667	97	0.0833
47	0.1667	2	0.0714
65	0.1667	53	0.0714
79	0.1667	34	0.0705
85	0.1667	28	0.0667
37	0.1429	57	0.0667
69	0.1333	38	0.0636
89	0.1333	90	0.0583
48	0.1190	73	0.0500
31	0.1000	83	0.0476
39	0.1000	26	0.0417
98	0.1000	68	0.0368
99	0.1000	51	0.0333
49	0.0952	75	0.0111
1	0.0833		0

Geri kalan 38 adet düğümün kümelenme katsayıları Tablo-6'da yüksekten düşüğe doğru sıralanarak verilmiştir. KMRA'da düğüm kümelenme katsayısı Tablo-6'da görüldüğü gibi "0" ile "0,5" arasında değişmektedir. En yüksek kümelenme katsayısına sahip düğümler **Düğüm 25** ve **Düğüm 80**'dir. Ağ kümelenme katsayısı, ağdaki bütün düğümlerin ortalama değeri olarak tanımlanabilir ve aynı ağ ölçeğine sahip rastlantısal bir ağdan daha büyük KMRA'da ağ kümelenme değeri 0,0623'tür. Büyük kümelenme katsayısı, KMRA'nın yüksek derecede kişeliğe sahip olduğunu göstermektedir.

4.2. Ağ Özelliği

Ağ teorisinin gelişmesine paralel olarak, gerçek ağ ile rastgele ağlar arasındaki en belirgin ayrımın küçük dünya özelliği ve ölçeksiz olma özelliği olduğu bulunabilir. KMRA'nın doğası hakkında daha fazla bilgi edinmek için bu bölümde, bu iki özellik incelenecektir.

4.2.1. Küçük-Dünya Özelliği

Küçük dünya ağı, çoğu düğüme diğer her bir düğümden kısa bir yoldan ulaşılabilen özel bir grafik türüdür. Genel olarak, küçük dünya ağı, nispeten yüksek kümelenme katsayısı değerine ve küçük ortalama yol uzunluğuna sahiptir (xlii-xliii). Karşılaştırma için, KMRA ile aynı ölçekte olan Pajek yazılımı tarafından 105 adet düğüm ve 194 adet bağdan oluşan üç adet rastgele ağ oluşturulmuştur. KMRA ve rastgele ağların kümelenme katsayısı ve ortalama yol uzunlukları Tablo-7’de sunulmuştur.

Açıktır ki, KMRA; kümelenme katsayısına ve ortalama yol uzunluğuna göre nispeten küçük bir dünya ağıdır, bu da KMRA’daki risk yayılımının rastgele bir ağdan çok daha hızlı olduğunu göstermektedir. Kömür madeninde bir kazanın meydana gelmesi durumunda, daha kötü bir sonucu önlemek amacıyla, kazalar arasındaki zincir şeklinde bağlantıyı kontrol etmek çok büyük bir önem taşımaktadır.

TABLO -7 KMRA VE RASTGELE AĞLAR ARASINDAKİ KARŞILAŞTIRMA

AĞ MODELİ	KÜMELENME KATSAYISI	ORTALAMA PATİKA UZUNLUĞU
KMRA	0.0623	3.0841
Rassal Ağ-1	0.0156	5.6134
Rassal Ağ-2	0.0189	5.8130
Rassal Ağ-3	0.0152	5.4532

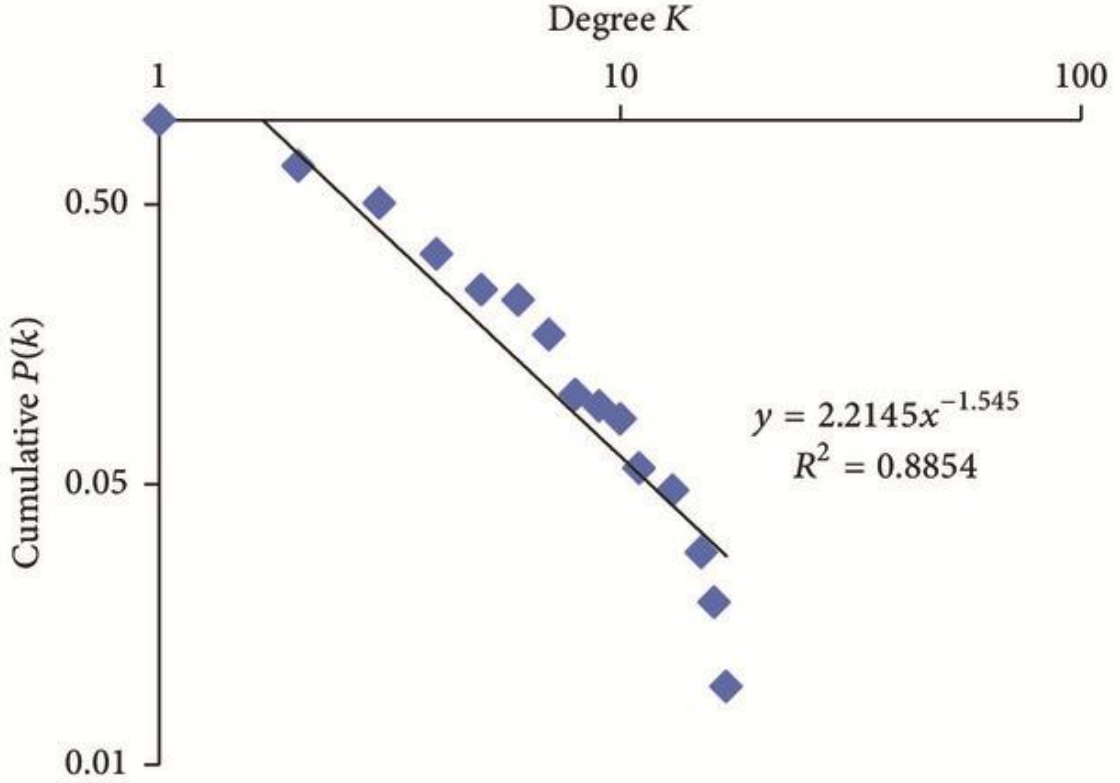
4.2.2. Ölçeksiz Ağ Özelliği

Ölçeksiz bir ağ, derece dağılımı kuvvet yasası bozulmasını sağlayan bir ağdır. Böyle bir ağda, çok sayıda düğüm zayıf bir şekilde bağlantılıdır ve nispeten az sayıda düğüm diğer birçok düğüme bağlıdır^{xliv}.

Yüksek dereceli nadir düğümler nedeniyle, derece dağılımının ucundaki istatistiksel verileri analiz etmek anlamsızdır. Derece dağılımı $P(k)$, “k” dereceli düğümlerin oranı olarak tanımlanırken, kümülatif $P(k)$ ise, k’ye eşit veya daha büyük düğümlerin oranı olarak tanımlanmaktadır^{xlv}.

Pratikte, sonlu ağ boyutunun neden olduğu istatistiksel hataları azaltmak amacıyla, ikili logaritmik koordinat sistemi kullanan istatistiksel analizde kümülatif $P(k)$ tercih edilmektedir^{xlvi}. KMRA’nın kümülatif $P(k)$ ’si, temel olarak kuvvet yasasını izleyen yaklaşık $P(k)=2.1217X k^{(2-1.545)}$ uyum değeri Şekil-7’de gösterilmektedir. Bu değer, KMRA’nın karmaşık ağ teorisine göre ölçeksiz ağ özelliğine sahip olduğunu göstermektedir.

Bu özellik, KMRA'nın bir dereceye kadar rastgele risklere karşı dayanıklı olduğu anlamına gelmektedir. Derecesi 4'e eşit veya daha az olan düğüm sayısı %75'e karşılık gelmektedir ve bu düğümlerin ağ üzerindeki etkileri nispeten daha küçüktür. Bununla birlikte, KMRA, yüksek dereceli düğümlere eş zamanlı saldırılara karşı savunmasızdır. Diğer bir ifadeyle, yalnızca hedeflenen eylemler KMRA'daki ardışık etkileri büyük ölçüde önleyebilir.



Şekil – 7 KMRA Kümülatif Dağılımı

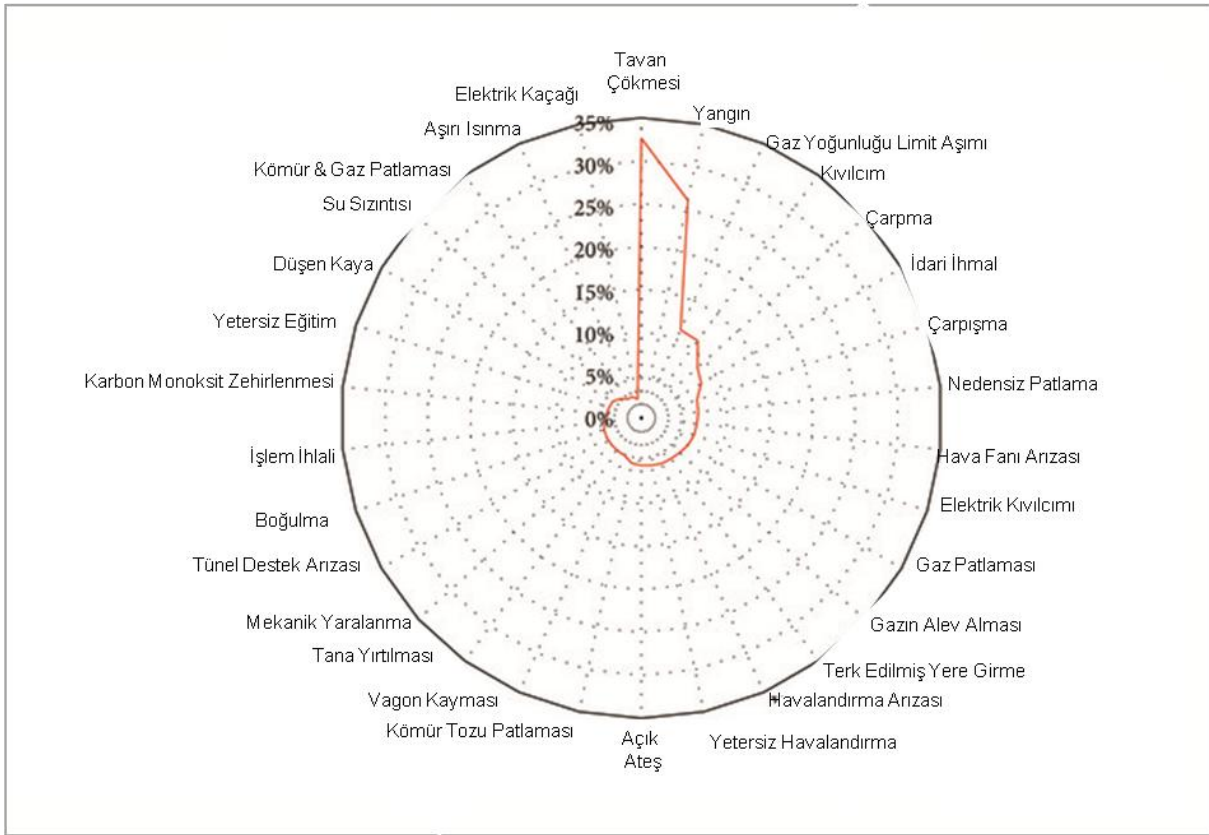
4.3. Risk Kontrol Etkisinin Ölçülmesi

Risk kontrolünün etkisine ilişkin analiz, kömür madenlerinde güvenlik yönetimi için öneriler ve tekliflerin oluşturulması için gereklidir. Risk kontrolünün etkisini ölçebilmek için bir varsayımda bulunulur. Yani kömür madeni üretiminde her şeyin tamamen kontrol altında tutulduğunda herhangi bir riskin oluşmaması beklenir. Ayrıca bir risk oluşturmayanlar KMRA'dan çıkarılabilir. Ardından da risk kontrolünün etkisi, ağ küresel verimliliği ile ölçülebilir.

Ağ küresel verimliliğine ilişkin birçok tanım hâlihazırda oluşturulmuş ve çalışılmış olsa da, hepsinin farklı sınırlamaları bulunmaktadır. Genel olarak kabul gören ölçüm yöntemi; bir ağın küresel verimliliğini gösteren düğüm ve düğümler arası mesafeleri gösteren, aşağıdaki denklemle (xlvi-xlviii) hesaplanan ağların ortalama karşılıklı en kısa yol uzunluklarıdır.

$$E(G) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{\forall i,j,i \neq j} \frac{1}{d_{ij}}$$

KMRA'daki her riskin risk kontrolünün sağlayacağı etki, ağ küresel verimliliğinin düşüş derecesine göre ölçülebilir. Örneğin, ağın küresel verimliliğinin **Düğüm 8**'in silinmesinden sonra 0,1 azalması, **Düğüm 8**'in risk kontrol etkisinin 0,1 olduğu anlamına gelmektedir. Etki ne kadar iyi olursa, risk o kadar büyüktür. KMRA'daki en ciddi 30 adet risk hesaplama yoluyla belirlenmiş ve Şekil-8'de gösterilmiştir. Tavan çökmesinin en ciddi risk olduğu ve tava çökmesinin kontrol edilmesinin KMRA'daki küresel verimliliğin %32,63 oranında azalmasına yardımcı olabileceği, bunu yangın (%25,96) ve gaz yoğunluğu limit aşımının (%11,22) izlediği Şekil-8'de görülmektedir.



Şekil – 8 En Ciddi 30 Riskin Risk Kontrol Etkileri

Ancak, tavan çökmesi ve gaz yoğunluğu limit aşımı arasındaki karşılıklı etkileşim nedeniyle, “tavan çökmesi” ve “gaz yoğunluğu limit aşımı” kontrolünün etkisi hesaplama ile %32,63 ile %25,96'nın toplamına değil de %44,03'e eşit olacaktır. Açık ki, risk kontrolünün etkisinin ölçülmesi, daha fazla güvenlik yönetimine yönelik düzenlemeler ile kilit noktaları önerebilir ve belirleyebilir. Her halükârda, en ciddi riskleri kontrol etmek, kazaları önlemek ve kömür madeni üretiminde güvenlik yönetimi düzeyini daha da artırmak için en uygun ve en etkili yaklaşımdır.

5. Tartışma

Bu çalışmada; ağ teorisine dayalı olarak, kömür madeni üretim güvenliğine katkı sağlamak amacıyla; uygulanabilir ve etkili olduğu belirlenen analitik bir çerçeve ortaya koyulmuştur. Önerilen ağ modelleme yöntemi, çeşitli disiplinlerdeki riski analiz etmek amacıyla güçlü ve gelecek vaat eden bir araçtır. Bu çalışmanın, özellikle acil durumlarda, dinamik bir çalışma ortamında güvenlik yönetimini iyileştirebilecek gerekli stratejilerin geliştirilmesi adına, yöneticilerin kömür madenlerindeki riskleri derinlemesine anlamalarına yardımcı olabileceği öngörülmektedir.

Bu çalışmanın potansiyel katkıları dört yönlüdür. İlk olarak, kömür madenlerindeki risklerin karmaşıklığı ve birbirleri arasındaki geçişliliğin anlaşılması açısından faydalıdır. KMRA'nın ana topolojik özellikleri ve ağ özelliklerinin belirlenmesi ve analiz edilmesini de sağlamaktadır. İkinci olarak, orijinal riskleri kontrol ederek ve türev kazalardan kaçınmayı sağlayarak güvenlik performansını artırmaktadır. Üçüncüsü ise, bu çalışmanın, zayıflar ve kayıpları hafifletmek için yöneticilerin, meydana gelebilecek acil durumlarda, acil kurtarma kararları vermelerine yardımcı olabilecek potansiyel faydalar sağlamasıdır. İlave olarak, bu çalışmada kullanılan ağ modelleme tekniği, kazaların analizi için umut verici bir yaklaşım olabilecektir. Ayrıca ağ teorisinin uygulama alanı da genişleyecektir.

Bu araştırmanın temel sınırlılığı, kurulan ağ modelinin düğüm ağırlıklarını dikkate almamasıdır. Ayrıca, Tablo-3'teki risklerin sıklığı, mevcut çalışmadaki düğüm ağırlığını yansıtmamakta ve farklı riskler için farklı önemleri anlamak ve ayırt etmek çok zordur. Bu nedenle risklere ağırlık atanması oldukça zordur. Bu husus, bu çalışmadaki ağ modelinin neden ağırlıksız olduğunu da açıklayabilir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda, kömür madenlerindeki risklerin daha kesin olarak anlaşılmasına dayalı bir ağ modelinin geliştirilmesine daha fazla dikkat edilmelidir. Ayrıca, kömür madenlerindeki risklerin nasıl azaltılacağı da çok daha fazla araştırmayı hak eden ve gerektiren önemli bir husustur.

Bu arada kömür madeni kazalarının incelenmesi ve araştırılmasında, tehlike ve riskleri analiz etmek için vaka esaslı muhakemenin (CBR – Case Based Reasoning) temeli olan, belirli bir arıza bilgi veri tabanı (FKD - Failure Knowledge Database) oluşturulması çok önemlidir.

Dahası, tanımlanmış birkaç risk spesifik olmaktan ziyade genel risk olarak görünmektedir. Bu sonucun iki nedeni bulunmaktadır. İlk olarak, risk tanımlaması, literatür taraması ve medyadan toplanan kaza verileri temelinde gerçekleştirilmiştir. Bu kazaların araştırılması esnasında bazı ayrıntılı bilgiler göz ardı edilirse ve kaydedilmezse, mevcut olmayan bilgiler risk tanımlamasının doğruluğunu olumsuz yönde etkileyebilir. İkincisi ise, bu araştırmanın bütüncül bir bakış açısıyla yapılmış olmasıdır. Tanımlanan riskler çok spesifik ise, ortak noktaları bulmak ve kömür madeni risk ağını oluşturmak zor olacaktır. Bu nedenle, kolaylık olması açısından benzer riskler aynı kategori içinde değerlendirilmiştir.

Güvenlik araştırmacıları kaza yaygınlığını azaltmak ve güvenlik seviyesini yükseltmek için büyük bir titizlikle durmak bilmeden çalışmaktadırlar. Kaza işaret ve emareleri

üzerine çeşitli endüstrilerde çalışılmaktadır ve birçok çalışma, bir dizi kaza habercisinin her zaman kazalardan önce meydana geldiğini göstermektedir^{xlix}. Bu nedenle, kaza haberci frekansının düşürülmesi, kaza olasılığının azaltılmasında etkili bir yaklaşımdır^l. “Kaza Öncüsü”, Ulusal Mühendislik Akademisi tarafından geniş anlamda “bir kazadan önce vuku bulan ve kazaya yol açan koşullar, olaylar ve ardışık diziler” olarak tanımlanmaktadır^{li}.

Kömür madeni kazalarını tamamen önlemek mümkün olmasa da, ön bilgileri izlemek ve kontrol etmek, güvenlik yöneticilerinin tehlikeleri veya riskleri önceden belirlemesi için faydalı ve etkili bir yaklaşımdır. Ayrıca bu yaklaşım, kaza olasılığını azaltabilir veya sonuçlarını hafifletebilir. Bu nedenle, öncül analizi, kömür madeni üretiminin güvenlik yönetimini teşvik etmekte büyük bir potansiyele sahiptir.



Şekil – 9 Önerilen Organizasyon Yapısı

Ağ analiz sonuçları dikkate alınarak, bazı kilit noktaların kazaların önlenmesinde önemli roller oynadığı fark edilebilir. Uygulamada, bu kilit risklerin sıklığı ve olasılığını azaltmak amacıyla kaza öncüleri kullanılabilir. Örneğin, su sızıntısının habercisi esas olarak; hava soğur, dehlizde sis belirir ve kömür duvarlarında su sızıntısı gözlemlenir. Madenciler bu kaza öncülerine daha fazla dikkat edebilirler ise felaketlere neden olan su sızıntıları büyük ölçüde azalacaktır. Bu nedenle, Şekil-9’da gösterildiği gibi kaza öncülerini yönetmek ve kontrol etmek amacıyla bir organizasyon teşkil edilmelidir. Kaza öncü yönetiminin gerçek uygulayıcıları; bütün personel, güvenlik yöneticisi ve güvenlik uzmanıdır. Bütün personel kaza öncü ve habercilerini güvenlik görevlisine rapor etmeli ve ardından da güvenlik görevlisi tarafından güvenlik yöneticisine sunulmalıdır. Güvenlik uzmanının görevleri arasında risklerin yanı sıra kaza faktörlerini analiz etmek ve güvenlik yöneticisine süreç tedbirlerinin alınmasında yardımcı olmak ta vardır.

Önerilen tedbirler ve çözümler bütün yönetim kademesi ve güvenlik görevlisi tarafından uygulanır ve bu arada değerlendirmeleri de güvenlik yöneticisi ve uzmanı tarafından gerçekleştirilir. Kömür madeni işletmecisi, öncül kaza yönetimiyle ilgilenmek üzere, esas olarak güvenlik yöneticisi ve güvenlik uzmanından oluşan bir komite de kurabilir.

6. Sonuç

Kömür endüstrisindeki kazalar, güvenli üretimi teşvik etmek için geniş çaplı bir analize tabi tutulmuştur. Bu araştırma, tek bir kazayı analiz etmenin orijinal yöntemini değiştirerek, ağ teorisine dayalı olarak KMRA'nın bütün karmaşıklığını ortaya çıkarabilecek çeşitli riskleri bir araya getiren yenilikçi bir yaklaşım geliştirmeyi amaçlamaktadır.

Kömür Madeni Risk Ağı (KMRA), kömür madeni kaza veri tabanından (CMAD – Coal Mine Accident Database) alınan 126 adet tipik kazadan elde edilen ve 135 adet tipik kaza zincirine dayanan Pajek yazılımı tarafından oluşturulmuştur.

Ağırlıksız yönlendirilmiş bir ağ modeli olarak KMRA; 105 adet düğüm ve 194 adet bağ içermektedir. KMRA'nın ağ çapı 7 ve ağ yoğunluğu 0.178'dir. Bu değerler, KMRA'nın nispeten seyrek bir ağ olduğunu göstermektedir. KMRA'daki ortalama yol uzunluğunun değeri 3,0841'dir, bu da bir riskin diğerine ortalama olarak yalnızca üç adımda iletilebileceğini göstermektedir. Tavan çökmesi (**Düğüm 68**), 17 ile en yüksek yol uzunluğu değerine sahiptir, bu da tavan çökmesinin kömür madeni kaza zincirinde kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Genel olarak bu tür bir düğüm kilit nokta olarak kabul edilmektedir.

KMRA düğüm arasındalık değerleri 0 ile 0,059852 arasında değişmektedir. İlave olarak tavan çökmesi (**Düğüm 68**), en yüksek düğüm arasındalık değerine sahiptir, bu da en fazla sayıdaki kısa yolun tavan çökmesinden (Düğüm 68) geçtiği anlamına gelmektedir. Tavan çökmesi, riskin yayılması sürecinde önemli bir bağlantıdır. Ardından gelen, yangın (**Düğüm 34**) ve kıvılcım (**Düğüm 75**) arasındalık değerleri ise sırasıyla 0,048486 ve 0,020668'dir.

En kısa yolların yaklaşık olarak %55'i en yüksek beş arasındalık düğümünden geçmektedir. Tavan çökmesi, yangın, kıvılcım, limiti aşan gaz yoğunluğu ve çarpışmayı etkin bir şekilde kontrol etmek, yalnızca ağ çapını ve ortalama yol uzunluğunu artırmakla kalmayacak, aynı zamanda kazanın yayılmasının etkinliğini yavaşlatacak ve zincirleme reaksiyon süresini zayıflatacaktır. KMRA'daki düğüm kümelenme katsayısı "0" ile "0,5" arasında değişmektedir. Ayrıca, KMRA'nın kümülâtif kümelenme katsayısı 0,0623'tür ve bu kümelenme katsayısı da KMRA'nın yüksek derecede klişeleşmiş özelliğe sahip olduğunu göstermektedir.

Ayrıca, KMRA, kümelenme katsayısı ve ortalama yol uzunluğu dikkate alındığında, nispeten küçük bir dünya ağıdır ve KMRA'daki risk yayılımı, rastgele bir ağdan çok daha hızlıdır. KMRA, kümülâtif kuvvet yasasını takip ettiğinden ölçeksiz bir özelliğe sahiptir. Bu özellik, KMRA'nın bir dereceye kadar rastgele risklere karşı dayanıklı olduğunu göstermektedir. Ayrıca, risk kontrolünün etkileri de hassas bir şekilde hesaplanmıştır. Genel olarak; tavan çökmesi, yangın, limiti aşan gaz yoğunluğu, güvenlik yönetiminde yöneticiler tarafında üzerine gidilmesi gereken üç hedefi göstermekle beraber, aynı zamanda kömür madeni üretimindeki en tehlikeli üç riski de göstermektedir.

Bu altı parametrenin hassas hesaplanması ve etkin risk kontrolü, kömür madeni kazalarının karmaşıklığı ve niteliğini kavramak ve risk kontrolü için hedefleri belirlemek için faydalıdır. Ayrıca elde edilen sonuçlar, orijinal risklerin kontrol edilmesinde ve türev kazaların önlenmesinde kömür madeni güvenlik yönetiminin desteklenmesine yardımcı olabilir. KMRA'daki kazalar arasındaki ardışık karşılıklı ilişkiler göz önüne alındığında, bu araştırma aynı zamanda kazalar hakkında erkenden uyarılmalarını da olumlu yönde etkileyebilir. Uygulamada, güvenlik yöneticileri risk kontrolünün belirlenmiş ve değerli hedeflerine daha fazla odaklanmalı ve kömür madeni üretiminde güvenlik performansının geliştirilmesine yardımcı olmak için daha fazla kaynak ayırmalıdır.

Copyright © 2017 Yongliang Deng et al. Bu, Creative Commons Attribution Lisansı altında dağıtılan ve orijinal esere uygun şekilde atıfta bulunulması koşuluyla herhangi bir ortamda sınırsız kullanım, dağıtım ve çoğaltmaya izin veren açık erişimli bir makaledir.

Referanslar

ⁱS. Niu, “Coal mine safety production situation and management strategy,” *Management and Engineering*, vol. 14, 78 pages, 2014.

View at: [Google Scholar](#)

ⁱⁱ P. S. Paul, “Predictors of work injury in underground mines - an application of a logistic regression model,” *Mining Science and Technology*, vol. 19, no. 3, pp. 282–289, 2009.

View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)

ⁱⁱⁱ V. V. Khanzode, J. Maiti, and P. K. Ray, “A methodology for evaluation and monitoring of recurring hazards in underground coal mining,” *Safety Science*, vol. 49, no. 8, pp. 1172–1179, 2011.

View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)

^{iv} A. Nieto, Y. Gao, L. Grayson, and G. Fu, “A comparative study of coal mine safety performance indicators in China and the USA,” *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, vol. 5, no. 4, pp. 299–314, 2014.

View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)

^v Q. Liu, X. Meng, M. Hassall, and X. Li, “Accident-causing mechanism in coal mines based on hazards and polarized management,” *Safety Science*, vol. 85, pp. 276–281, 2016.

View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)

^{vi} S. Mahdevari, K. Shahriar, and A. Esfahanipour, “Human health and safety risks management in underground coal mines using fuzzy TOPSIS,” *Science of the Total Environment*, vol. 488-489, no. 1, pp. 85–99, 2014.

View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)

^{vii} H. Chen, Q. Feng, R. Long, and H. Qi, “Focusing on coal miners' occupational disease issues: A comparative analysis between China and the United States,” *Safety Science*, vol. 51, no. 1, pp. 217–222, 2013.

View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)

^{viii} Z. Zhou, Q. Li, and W. Wu, “Developing a versatile subway construction incident database for safety management,” *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 138, no. 10, pp. 1169–1180, 2011.

View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)

^{ix} J. Santos-Reyes and A. N. Beard, “A systemic analysis of the Edge Hill railway accident,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 41, no. 6, pp. 1133–1144, 2009.

View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)

^x J. K. Wachter and P. L. Yorio, “A system of safety management practices and worker engagement for reducing and preventing accidents: an empirical and theoretical investigation,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 68, pp. 117–130, 2014.

View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)

^{xi} A. Al-shanini, A. Ahmad, and F. Khan, “Accident modelling and analysis in process industries,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 32, pp. 319–334, 2014.

View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)

^{xii} Z. Zhou, J. Irizarry, and Q. Li, “Using network theory to explore the complexit of subway construction accident network (SCAN) for promoting safety management,” *Safety Science*, vol. 64, pp. 127–136, 2014.

View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)

^{xiii} P. Andrews-Speed, M. Yang, L. Shen, and S. Cao, “The regulation of China's township and village coal mines: A study of complexity and ineffectiveness,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 11, no. 2, pp. 185–196, 2003.

View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)

^{xiv} H. Chen, H. Qi, R. Long, and M. Zhang, “Research on 10-year tendency of China coal mine accidents and the characteristics of human factors,” *Safety Science*, vol. 50, no. 4, pp. 745–750, 2012.

View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)

^{xv} H. Chen, Q. Feng, and J. Cao, “Rent-seeking mechanism for safety supervision in the Chinese coal industry based on a tripartite game model,” *Energy Policy*, vol. 72, pp. 140–145, 2014.

View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)

^{xvi} N. A. Grazhevskaya, A. Virchenko, and A. Grazhevskaya, “The effects of rent-seeking behavior on the efficiency of fiscal policy in Ukraine,” *Procedia Economics and Finance*, vol. 27, pp. 274–287, 2015.

View at: [Google Scholar](#)

^{xvii} T.-H. Kwon, “Rent and rent-seeking in renewable energy support policies: feed-in tariff vs. renewable portfolio standard,” *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 44, pp. 676–681, 2015.

View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)

^{xviii} H. Chen, Q. Feng, D. Zhu, S. Han, and R. Long, “Impact of rent-seeking on productivity in Chinese coal mine safety supervision: a simulation study,” *Energy Policy*, vol. 93, pp. 315–329, 2016.

View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)

^{xix} M. Sari, A. S. Selcuk, C. Karpuz, and H. S. B. Duzgun, “Stochastic modeling of accident risks associated with an underground coal mine in Turkey,” *Safety Science*, vol. 47, no. 1, pp. 78–87, 2009.

View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)

^{xx} C. Qing-gui, L. Kai, L. Ye-jiao, S. Qi-hua, and Z. Jian, “Risk management and workers' safety behavior control in coal mine,” *Safety Science*, vol. 50, no. 4, pp. 909–913, 2012.

View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)

^{xxi} I. J. Kowalska, “Risk management in the hard coal mining industry: social and environmental aspects of collieries' liquidation,” *Resources Policy*, vol. 41, no. 1, pp. 124–134, 2014.

View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)

^{xxii} A. Badri, S. Nadeau, and A. Gbodossou, “A new practical approach to risk management for underground mining project in Quebec,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 26, no. 6, pp. 1145–1158, 2013.

View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)

^{xxiii} L. Wang, Y. Wang, Q. Cao, X. Li, J. Li, and X. Wu, “A framework for human error risk analysis of coal mine emergency evacuation in China,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 30, no. 1, pp. 113–123, 2014.

View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)

^{xxiv} Q.-L. Liu and X.-C. Li, “Modeling and evaluation of the safety control capability of coal mine based on system safety,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 84, no. 1, pp. 797–802, 2014.

View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)

^{xxv} E. Ghasemi, M. Ataei, K. Shahriar, F. Sereshki, S. E. Jalali, and A. Ramazanzadeh, “Assessment of roof fall risk during retreat mining in room and pillar coal mines,” *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 54, pp. 80–89, 2012.

View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)

^{xxvi} L. M. Pejic, J. G. Torrent, E. Querol, and K. Lebecki, “A new simple methodology for evaluation of explosion risk in underground coal mines,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 26, no. 6, pp. 1524–1529, 2013.

View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)

^{xxvii} A. Bahri Najafi, G. R. Saeedi, and M. A. Ebrahimi Farsangi, “Risk analysis and prediction of out-of-seam dilution in longwall mining,” *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 70, pp. 115–122, 2014.

View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)

^{xxviii} J. Chen, L. Ma, C. Wang, H. Zhang, and M. Ha, “Comprehensive evaluation model for coal mine safety based on uncertain random variables,” *Safety Science*, vol. 68, pp. 146–152, 2014.

View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)

^{xxix} D. V. Petrović, M. Tanasijević, V. Milić, N. Lilić, S. Stojadinović, and I. Svrkota, “Risk assessment model of mining equipment failure based on fuzzy logic,” *Expert Systems with Applications*, vol. 41, no. 18, pp. 8157–8164, 2014.

View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)

^{xxx} D. R. Lokhande, V. M. S. R. Murthy, V. Vellanky, and B. K. Singh, “Assessment of pot-hole subsidence risk for Indian coal mines,” *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 25, no. 2, article no. 467, pp. 185–192, 2015.

View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)

^{xxxi} M. Spada and P. Burgherr, “An aftermath analysis of the 2014 coal mine accident in Soma, Turkey: Use of risk performance indicators based on historical experience,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 87, pp. 134–140, 2016.

View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)

^{xxxii} E. Sun, X. Zhang, and Z. Li, “The internet of things (IOT) and cloud computing (CC) based tailings dam monitoring and pre→ alarm system in mines,” *Safety Science*, vol. 50, no. 4, pp. 811–815, 2012.

View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)

^{xxxiii} K. M. Dange and R. T. Patil, “Design of monitoring system for coal mine safety based on MSP430,” *International Journal of Engineering Science Invention*, vol. 2, no. 7, pp. 14–19, 2013.

View at: [Google Scholar](#)

^{xxxiv} C. Bo, C. Xin, Z. Zhongyi, Z. Chengwen, and C. Junliang, “Web of things→ based remote monitoring system for coal mine safety using wireless sensor network,” *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 2014, Article ID 323127, 14 pages, 2014.

View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)

^{xxxv} Y. Zhang, W. Yang, D. Han, and Y.→ I. Kim, “An integrated environment monitoring system for underground coal mines→ Wireless Sensor Network subsystem with multi→ parameter monitoring,” *Sensors*, vol. 14, no. 7, pp. 13149–13170, 2014.

View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)

^{xxxvi} J. Xu, H. Gao, J. Wu, and Y. Zhang, “Improved safety management system of coal mine based on iris identification and RFID technique,” in *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer and Communications, ICC 2015*, pp. 260–264, China, October 2015.

View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)

^{xxxvii} W. De Nooy, A. Mrvar, and V. Batagelj, *Exploratory Social Network Analysis with Pajek*, vol. 27, Cambridge University Press, 2011.

^{xxxviii} B. W. Wambeke, M. Liu, and S. M. Hsiang, “Using Pajek and centrality analysis to identify a social network of construction trades,” *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 138, no. 10, pp. 1192–1201, 2011.

View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)

^{xxxix} A. Abbasi, L. Hossain, and L. Leydesdorff, “Betweenness centrality as a driver of preferential attachment in the evolution of research collaboration networks,” *Journal of Informetrics*, vol. 6, no. 3, pp. 403–412, 2012.

View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)

^{xl} A. M. M. González, B. Dalsgaard, and J. M. Olesen, “Centrality measures and the importance of generalist species in pollination networks,” *Ecological Complexity*, vol. 7, no. 1, pp. 36–43, 2010.

View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)

^{xli} Almaas, E., Kulkarni, R. V., & Stroud, D. (2002). Characterizing the structure of small→ world networks. *Physical review letters*, 88(9), 098101.

^{xlii} S. V. Buldyrev, R. Parshani, G. Paul, H. E. Stanley, and S. Havlin, “Catastrophic cascade of failures in interdependent networks,” *Nature*, vol. 464, no. 7291, pp. 1025–1028, 2010.

View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)

^{xliii} D. J. Watts and S. H. Strogatz, “Collective dynamics of ‘small→ world’ networks,” *Nature*, vol. 393, no. 6684, pp. 440–442, 1998.

View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)

^{xliv} A. Barabasi and R. Albert, “Emergence of scaling in random networks,” *Science*, vol. 286, no. 5439, pp. 509–512, 1999.

View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#) | [MathSciNet](#)

^{xlv} S. Ghosh, A. Banerjee, N. Sharma et al., “Statistical analysis of the Indian railway network: a complex network approach,” *Acta Physica Polonica B*, vol. 4, no. 2, pp. 123–137, 2011.

View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)

^{xlvi} M. E. Newman, “Assortative mixing in networks,” *Physical Review Letters*, vol. 89, no. 20, Article ID 208701, 2002.

View at: [Google Scholar](#)

^{xlvii} P. Crucittia, V. Latorab, M. Marchioric, and A. Rapisarda, “Efficiency of scale→ free networks: error and attack tolerance,” *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 320, pp. 622–642, 2003.

View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)

^{xlviii} R. Criado, A. García del Amo, B. Hernández→ Bermejo, and M. Romance, “New results on computable efficiency and its stability for complex networks,” *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 192, no. 1, pp. 59–74, 2006.

View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)

^{xlix} N. Khakzad, F. Khan, and P. Amyotte, “Major accidents (gray swans) likelihood modeling using accident precursors and approximate reasoning,” *Risk Analysis*, vol. 35, no. 7, pp. 1336–1347, 2015.

View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)

^l M. Kyriakidis, R. Hirsch, and A. Majumdar, “Metro railway safety: an analysis of accident precursors,” *Safety Science*, vol. 50, no. 7, pp. 1535–1548, 2012.

View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)

^{li} J. H. Saleh, E. A. Saltmarsh, F. M. Favarò, and L. Brevault, “Accident precursors, near misses, and warning signs: critical review and formal definitions within the framework of Discrete Event Systems,” *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 114, no. 1, pp. 148–154, 2013.

View at: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)