

Endüstriyel Kazalar Sonucu Oluşan Hava Kirliliği Riskinin Tahmini: Sistemik Literatür İncelemesi*

Prediction of Air Pollution Risk Resulting from Industrial Accidents: A Systematic Literature Review

Mehmet Fatih ŞEN¹, Saliha ÇETİNYOKUŞ²

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Bilimleri ABD, Ankara
ORCID: 0000-0002-4777-3938

²Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği, Ankara
ORCID: 0000-0001-9955-6428

Özet: Bu çalışma, endüstriyel kaza sonrası hava kirliliği riskinin tahmininde kullanılan metodolojileri sistemik olarak incelemektedir. Scopus, TRDizin, Ulusal Tez Merkezi, ResearchGate ve PubMed veri tabanlarında 2000-2025 (Haziran) aralığında gerçekleştirilen taramada, 94 yayın değerlendirilmiş ve spesifik kapsam nedeniyle 22 çalışma detaylı analize alınmıştır. Tarihsel kazaların derlenmesinde ARIA ve CSB kaza veri tabanlarından indirilen 271 kaza raporu, yapay zekâ modeli (Anthropic Claude 3.5 Sonnet) ile analiz edilmiş ve manuel olarak doğrulanmıştır. Çalışmalar üç kategoride sınıflandırılmıştır: hava kirliliğinden bağımsız endüstriyel kuruluşların çevresel risk değerlendirmeleri, endüstriyel kaza kaynaklı hava kirliliği risk değerlendirmeleri, makine öğrenmesi ile kaza sonuç tahmini. Bulgular, alanın standart yaklaşımdan yoksun olduğunu ve yöntem seçimi, belirteç sistematiği ile ağırlıklandırma yaklaşımlarında ciddi farklılıklar bulunduğunu göstermektedir. İndeks tabanlı yöntemler matematiksel basitlik sunarken, olasılıksal yöntemler belirsizlik analizinde üstündür. Makine öğrenmesi uygulamaları, Rastgele Ormanlar ve XGBoost algoritmaları ile %80-96 başarı oranları göstermektedir. Gelecek araştırmalar için kaza veritabanları arasında standardizasyonun sağlanması, makine öğrenmesinin olasılıksal yöntemlerle entegrasyonu ve disiplinler arası iş birliğinin güçlendirilmesi önerilmektedir.

Anahtar kelimeler: Endüstriyel Kaza, Hava Kirliliği, Endüstriyel Kaza Riski, Teknolojik Afetler, Hava Kalitesi

Abstract: This study systematically examines the methodologies used in predicting air pollution risk following industrial accidents. In the search conducted across Scopus, TRDizin, National Thesis Center, ResearchGate, and PubMed databases covering the period 2000-2025 (June), 94 publications were evaluated, and 22 studies were selected for detailed analysis due to specific scope considerations. For the compilation of historical accidents, 271 accident reports downloaded from ARIA and CSB accident databases were analyzed using an artificial intelligence model (Anthropic Claude 3.5 Sonnet) and manually validated. The studies were classified into three categories: environmental risk assessment of industrial facilities independent of air pollution, air pollution risk assessment following industrial accidents, and accident consequence prediction using machine learning. The findings indicate that the field lacks a standardized approach, with significant differences in method selection, indicator systematization, and weighting approaches. While index-based methods offer mathematical simplicity, probabilistic methods are superior in uncertainty analysis. Machine learning applications demonstrate success rates of 80-96% using Random Forest and XGBoost algorithms. For future research, standardization among accident databases, integration of machine learning with probabilistic methods, and strengthening interdisciplinary collaboration are recommended.

Keywords: Industrial Accident, Air Pollution, Industrial Accident Risk, Technological Disaster, Air Quality

1. Giriş

Dünyadaki çoğu insan sağlıklı ve kaliteli hava kalitesi seviyelerine maruz kalmaktadır. Dünya Sağlık Örgütü'ne (WHO) göre, küresel nüfusun %99'u önerilen hava kalitesi seviyelerini karşılamayan bölgelerde yaşamaktadır (Anonim, 2025). Hava kirliliği, insan sağlığı üzerinde giderek artan bir etkiye sahip olup, her yıl milyonlarca kişinin erken ölümüne neden olmakta ve daha fazla sayıda

biyeyin kronik hastalıklarla yaşamak zorunda kalmasına yol açmaktadır (Huang vd., 2024; Romanello vd., 2024). Küresel Hava Durum Raporu'na göre, 2021 yılında atmosferik kirlilik kaynaklı mortalitenin 8,1 milyon vaka ile küresel ölüm istatistiklerinin yaklaşık %12,5'ini oluşturduğu tespit edilmiştir. Bu epidemiyolojik veriler, hava kirliliğini 5 yaş altı pediatrik popülasyon dahil olmak üzere, küresel mortalite risk faktörleri arasında ikinci sıraya yerleştirmektedir (State of Global Air, 2024).

Partikül madde (PM), karbon monoksit (CO), ozon (O₃), azot dioksit (NO₂) ve kükürt dioksit (SO₂) gibi kirlleticiler, astım, kronik obstrüktif akciğer hastalığı (KOAH), akciğer kanseri ve kardiyovasküler hastalıklarla ilişkilendirilmektedir (Effatpanah vd., 2020; Dominski vd., 2021; Nazar ve Niekoszko, 2022). PM_{2.5} kirliliğine uzun süreli maruz kalmanın kalp hastalığı, KOAH, felç, tip 2 diyabet ve erken ölümle ilişkili olduğu belirtilmektedir (Landrigan vd., 2018; Romanello vd., 2024; Zhou vd., 2025). Hamile kadınlar, yenidoğanlar ve çocuklar bu kirleticilere karşı daha hassas popülasyonlar arasında yer almaktadır (Nyadanu vd., 2022; Martens vd., 2017; Zhang vd., 2024). Ayrıca, uçucu organik bileşikler (VOC'ler), polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH'lar) ve kurşun gibi ağır metaller de insan sağlığı açısından zararlı kirleticiler olarak kabul edilmektedir (Manisalidis vd., 2020).

Endüstriyel kazalar da, sürekli emisyonlardan farklı olarak ani ve kontrolsüz karakteristiklere sahip olup, göreceli olarak kısa periyotlarda atmosfere yüksek konsantrasyonlarda kirlitici salınımına sebebiyet vermektedir. Kazalara bağlı olarak atmosfere salınan yanma ürünleri ve toksik gaz bulutları, hem endüstriyel tesis çalışanları hem de komşu yerleşim birimlerindeki nüfus için ciddi sağlık riskleri teşkil etmektedir. Endüstriyel kazaların etki alanı genellikle lokal düzeyde kalmakla birlikte, salınan maddenin fizikokimyasal özellikleri ve mevcut meteorolojik parametrelere bağlı olarak geniş coğrafi alanlara yayılabilmektedir. Atmosferik kirliliğe yol açan endüstriyel kazalar, çevresel afetler taksonomisinde sucül ortamı kirlüten olayların ardından ikinci sırada yer almaktadır (Liu, 2018).

Literatürde salt endüstriyel kaza riski ve salt hava kirliliği/hava kalitesi çalışmaları bulunmakla birlikte, endüstriyel kazalar sonrasında ortaya çıkan akut hava kirliliği riskinin tahmin edilmesine yönelik kayda değer bir bilgi açığı mevcuttur. Bu çalışma, endüstriyel kaza sonrası atmosferik kirlilik riskinin tahmininde kullanılan metodolojilerin değerlendirilmesini, metodolojik açıkların tespit edilmesi ve gelecek araştırmalar için yol gösterici öneriler sunulmasını amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında şu araştırma sorularına yanıt aranmaktadır: (1) Hangi metodolojiler kullanılmakta olup güçlü ve zayıf yönleri nelerdir? (2) Hangi belirteçler tercih edilmektedir? (3) Makine öğrenmesi yaklaşımlarının performansı ve potansiyeli nedir? (4) Gelecek araştırmalar için hangi alanların geliştirilmesi gerekmektedir? Çalışmanın temel katkıları; risk metodolojilerinin karşılaştırmalı analizi, belirteç sistematığının değerlendirilmesi ve metodolojik eksikliklere yönelik öneriler sunulmasıdır.

2. Yöntem

Endüstriyel kaza riskinin değerlendirmesi ile hava kirliliği/hava kalitesi çalışmalarının kesişim alanını ele alan bu araştırma, literatürde nispeten sınırlı sayıda çalışma içeren spesifik bir alanı kapsamaktadır. Çalışmanın ilk aşamasında, endüstriyel kazaların insan sağlığı ve hava kalitesi üzerindeki yıkıcı etkilerinin örneklendirilmesi ve küresel mevcut durumun değerlendirilmesi amacıyla, 2025 Haziran ayına kadar meydana gelmiş ve atmosferik kirlilik verisi içeren endüstriyel kazalar sistematik olarak derlenmiştir. Çalışmada üç ana veri kaynağı kullanılmıştır: (1) Fransız Çevre Bakanlığı ARIA endüstriyel kaza veri tabanı (Anonim, 2025), (2) ABD Kimyasal Güvenlik ve Tehlike Araştırma Kurulu (CSB) kaza raporları (Anonim, 2017; Anonim 2018), ve (3) akademik literatür (Scopus ve ResearchGate). Dahil etme kriteri olarak, kaza raporunda/yayınında nicel ve/veya nitel hava kirliliği verilerinin bulunması esas alınmıştır.

ARIA veri tabanı, endüstriyel kaza kaynaklı hava kirliliğine yönelik özel filtreleme seçenekleri sunmamakta ve Boolean operatörü kullanımına izin vermemektedir. Bu nedenle, veri

tabanında kayıtlı kazalar arasından "sabit tesiste gerçekleşen", "kaza raporu bulunan" kriterleri uygulanarak ön filtreleme yapılmış ve 271 kaza tespit edilmiştir. Bu kazalara ait raporlar PDF formatında indirilmiş ve Anthropic Claude 3.5 Sonnet yapay zeka modeli kullanılarak sistematik olarak analiz edilmiştir. Her kaza raporu için, kaza adı, tarihi, türü, yeri, endüstri tipi, kazaya karışan kimyasal maddeler ve miktarları, salınan maddeler, fiziksel etki alanları (tesis içi/dışı), Avrupa endüstriyel kaza ölçeği sınıflandırması, etkilenen/ölen/yaralanan/tahliye edilen insan sayıları, tahliye edilen alan, meteorolojik koşullar (rüzgar hızı/yönü, sıcaklık), gözlemsel hava kirliliği belirtileri ve hava kalitesi parametre değişimleri (yanma gazları, PM10, PAH, dioksinler/furanlar, ağır metaller vb.) çıkarılmıştır. Yapay zeka modeli tarafından çıkarılan tüm veriler, manuel olarak doğrulanmıştır. ARIA veri tabanının ağırlıklı olarak Avrupa kazalarını kapsamaması nedeniyle, küresel kapsamın sağlanması amacıyla Asya ve Amerika kıtalarındaki önemli endüstriyel kazalar akademik literatür üzerinden ayrıca incelenmiştir. CSB veri tabanı da benzer şekilde endüstriyel kaza kaynaklı hava kirliliğine yönelik özel filtreleme sunmadığından ve Boolean operatörü kullanımına izin vermediğinden, literatürde elde edilen kazalara ait detaylı araştırma raporları doğrudan CSB sitesinden (<https://www.csb.gov/investigations/>) indirilerek aynı metodoloji ile analiz edilmiştir.

İkinci aşamada, endüstriyel kaza sonrası hava kirliliği riskinin tahminine yönelik literatür araştırması yapılmıştır. Araştırma, Scopus, TRdizin, Ulusal Tez Merkezi, ResearchGate ve PubMed veri tabanlarında yürütülmüştür. İngilizce veritabanlarında arama stratejisi, endüstriyel kazalar, hava kirliliği ve risk değerlendirmesi kavramlarının (industrial accident, technological disaster, chemical accident, chemical release, toxic release, air pollution, air quality, risk assessment, risk analysis, risk modelling, consequence analysis, machine learning, prediction) kesişimini yakalamak üzere Boolean operatörleri kullanılması ve yayın başlığında aranması şeklinde yapılmıştır. Türkçe veritabanlarında sınırlı yayın olduğu için daha genel bir yaklaşım sergilenerek; endüstriyel kaza, hava kalitesi, hava kirliliği, teknolojik afet anahtar kelimeleri yayın başlığında aranmıştır. 2000-2025 (Haziran) yılları arasında yayınlanmış, İngilizce veya Türkçe dilinde, endüstriyel kazalar ve hava kirliliği risk değerlendirmesini metodolojik açıdan ele alan, tam metnine erişilebilen hakemli makaleler, kitaplar ve teknik raporlar çalışmaya dahil edilmiştir. Başlık ve özet değerlendirmesi sonucunda 94 yayın tam metin incelemesi için seçilmiştir. Tam metin incelemesinde, araştırma konusunun odak noktası olan endüstriyel kaza-hava kirliliğini doğrudan ve metodolojik derinlikle ele alan 22 çalışma nihai analize dahil edilmiştir. Seçilen çalışmalardan metodoloji türü, kullanılan belirteçler ve parametreler, ağırlıklandırma yaklaşımları, risk karakterizasyonu yöntemleri, ve makine öğrenmesi algoritmaları (varsa) çıkarılmıştır. Çalışmalar, metodolojik yaklaşımlarına göre üç kategoride sınıflandırılmıştır: (1) hava kirliliğinden bağımsız endüstriyel kuruluşların çevresel risk değerlendirme çalışmaları (n=6), (2) endüstriyel kaza kaynaklı kazaen hava kirliliği risk değerlendirme çalışmaları (n=12), (3) makine öğrenmesi ile kaza sonuç tahmini modelleri (n=4).

3. Literatür Araştırması

Literatür araştırması, endüstriyel kazalar ve hava kirliliği konularının belirgin disiplinler arası doğasını ortaya koymaktadır. Ancak bu disiplinler arası potansiyele rağmen, mevcut araştırma yapısı önemli bir bilimsel ayrışma sergilemektedir. Endüstriyel kaza risk değerlendirmesi çalışmaları ağırlıklı olarak kimya mühendisliği disiplininde yoğunlaşırken, hava kirliliği araştırmaları çevre mühendisliği ve halk sağlığı alanlarında konsantre olmaktadır. Bu disiplinler ayrışması, endüstriyel kaza kaynaklı hava kirliliği risk değerlendirmesinde bütünlük yaklaşımlarının sınırlı kalmasına neden olmakta, dolayısıyla kaza-kirlilik-sağlık etkileşiminin kapsamlı değerlendirilmesini nispeten engellemektedir.

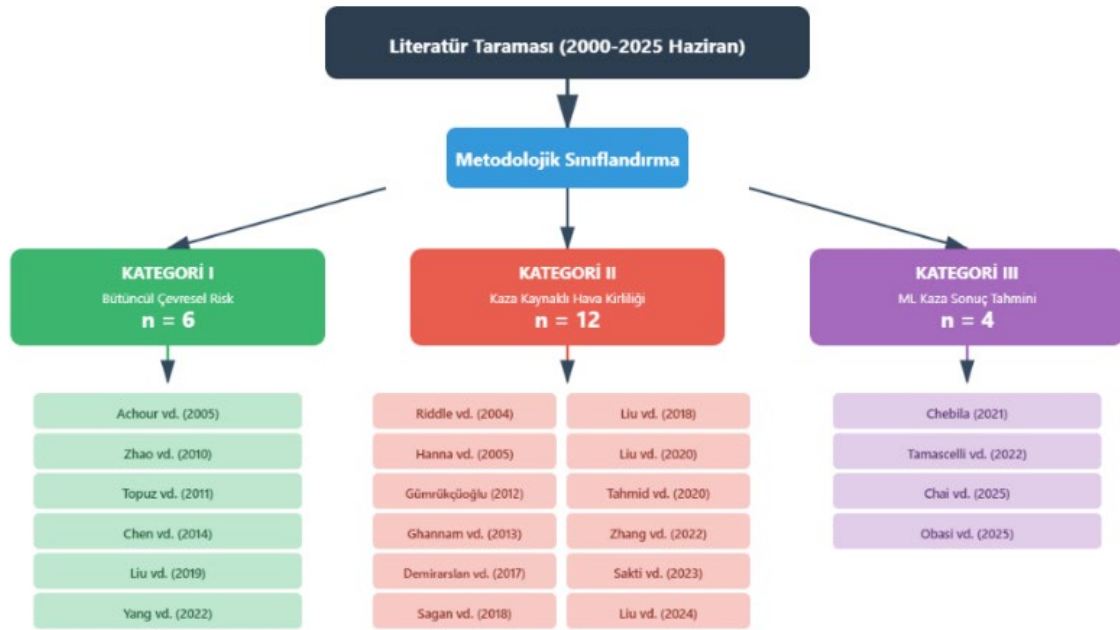
Son yıllarda afet risk yönetimi, iş güvenliği ve endüstriyel kazalar alanında yapay zeka ve makine öğrenmesi uygulamalarında kayda değer gelişmeler gözlemlenmektedir. Bu metodolojik evrim, geleneksel deterministik ve olasılıksal risk değerlendirme yaklaşımlarına alternatif olarak veri odaklı, esnek bir modelleme kapasitesi sunmaktadır. Ancak bu metodolojik gelişmelere rağmen, endüstriyel kaza kaynaklı hava kirliliği risk değerlendirmesine yönelik spesifik uygulamalar hâlâ

gelişme aşamasında kalmakta ve literatürde önemli bir boşluk oluşturmaktadır. Bu bilimsel ve metodolojik tespitten hareketle, literatürde incelenen çalışmalar analitik yaklaşımlarına, odak alanlarına ve kullanılan metodolojilere göre üç temel kategoride (Bkz Şekil 1) sistematik olarak sınıflandırılmıştır:

Kategori I (Hava Kirliliğinden Bağımsız Endüstriyel Kuruluşların Çevresel Risk Değerlendirmesi) çalışmaları, endüstriyel kuruluşların çevresel risklerini, salt hava kirliliğine bağlı olmadan bütüncül bir yaklaşımla değerlendirmektedir.

Kategori II (Endüstriyel Kaza Kaynaklı Hava Kirliliği Risk Değerlendirmesi) çalışmaları, kaza sonrası hava kirliliğine spesifik çalışmaları değerlendirmektedir.

Kategori III (Makine Öğrenmesi ile Kaza Sonuç Tahmini) çalışmaları, hava kirliliğinden bağımsız makine öğrenmesi ile kaza/olay sonuçlarının tahmin edilmesine yönelik çalışmaları değerlendirmektedir. Literatür incelemesi bu üç kategori altında sistematik ve karşılaştırmalı bir perspektifle gerçekleştirilmiş; çalışmaların metodolojik özellikleri, kullanılan belirteçler, ağırlıklandırma yaklaşımları ve başlıca bulgular detaylı olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 1. Literatür Araştırmasına İlişkin Metodolojik Sınıflandırma

3.1. Hava Kirliliği ile İlişkili Tarihsel Endüstriyel Kazalar ve Sonuçları

Çalışmanın yöntemi kapsamında gerçekleştirilen derleme sonucunda, hava kirliliği verisi içeren 34 önemli endüstriyel kaza belirlenmiş ve Çizelge 1'de sunulmuştur. Literatür taramasında, endüstriyel kaza kaynaklı hava kirliliğini bu kapsamda ve detayda derleyen bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu derleme, endüstriyel kaza-hava kirliliği etkileşiminin küresel boyutunu ve farklı özelliklerini görünür kılmakta, aynı zamanda risk değerlendirme çalışmaları için somut bir referans oluşturmaktadır.

Çizelge 1. Tarihsel Endüstriyel Kazalar ve Hava Kirliliği Sonuçları*

Kaza Tarihi, Adı ve Yeri	Kazaya Karışan Kimyasal Maddeler ve Belirtilmişse Miktarı	Avrupa Endüstriyel Kaza Ölçeği**	Fiziksel Sonuçlar			Hava Kirliliği Verileri
			Toplan Etkilenen İnsan	Ölü	Yaralı	
1921 Oppau Kazası, Almanya	4500 ton Amonyum sülfonitratlı gübre karışım	Toplumsal:6 Çevresel:0 Maddi: 6	En az 10.013 kişi	561	1952	Koyu yeşil bir bulut oluştu. Bölge kalın dumanla kaplandı. Havada yoğun amonyak buharları vardı.
1966 Feyzin LPG Patlaması, Fransa	1.012 ton propan, 2.027 ton butan, 2.000 m ³ jet yakıtı	Toplumsal:5 Çevresel:0 Maddi: 0	1.475 ev ve yapı	18	84	3,8 hektarlık bir alan kaplayan propan gaz bulutu oluştu. Bulut kalınlığı yaklaşık 1-1.5 metre idi. Bulutu oluşturan gaz karışımı tahminen 68 ton olarak hesaplandı.
1974 Flixborough Kazası, İngiltere	40-60 ton sikloheksan	Toplumsal:6 Çevresel:1 Maddi: 5	3.000 kişi tahliye edildi	28	89	Alevler 70-100 metre yüksekliğe ulaştı. Hava kirliliği ile ilgili veri tutulmamıştır.
1976 Seveso Kazası, İtalya	0.2 ile 40 kg arası dioksin atmosfere salındı	Toplumsal:6 Çevresel:6 Maddi: 6	220.000	0	250	Kırmızımsı zehirli bulut güneybatıya doğru yayıldı A Bölgesi: dioksin konsantrasyonu > 50 µg/m ² B Bölgesi: dioksin konsantrasyonu 5-50 µg/m ²
1983 Milford Haven Kazası, İngiltere	Petrol ve türevleri, 47.000 ton	Toplumsal:2 Çevresel:0 Maddi: 4	Tahliye planı uygulanmı adı.	0	6	Yoğun siyah duman sütunu rafinerinin üzerinde birkaç yüz metre yükseldi. "Kurum yağmurları" köylere ve çevre bölgelere düştü.
1984 Bhopal Kazası, Hindistan	63 ton Metil izosiyanat	Toplumsal:6 Çevresel:4 Maddi: 6	500.000-800.000	22.000-25.000	200.000	23 ila 42 ton MIC atmosfere salındı.Havadaki toksin konsantrasyonu sebebiyle 170.000-200.000 kişi zehirlendi. 3.000 kişi kalıcı kör oldu. Bu, tarihin en büyük endüstriyel hava kirliliği kazasıdır
1987 Herriot Limanı Yangını, Fransa	3700 ton petrol ve türevleri	Toplumsal:3 Çevresel:0 Maddi:4	En yakın konutlar 750 m uzaktaydı.	2	14	Kalın siyah duman bulutu Lyon üzerinde dikey olarak yükseldi. Atmosferik emisyonlar şunları içeriyordu: Yanmamış ürünler şeklinde toz, Kükürt dioksit, Kurşun bileşikler.
1988 Touraine Patlaması, Fransa	500 ton çeşitli kimyasal	Toplumsal:6 Çevresel:4 Maddi: 5	200.000	0	18	Kalın toksik duman bulutu, hava kalitesi parametreleri sınır değerlerini aştı.
1989 Rosteig Patlaması, Fransa	220 m ³ (150 ton) nafta	Toplumsal:4 Çevresel:0 Maddi: 0	-	3	0	Kalın sarımtırak sis ve kötü kokulu gaz bulutu oluştu. Birkaç dakika içinde çok kötü kokulu bir tabaka birkaç hektarlık alana yayıldı.
1991 Chalon-Saone Kazası, Fransa	267 litre Fosfor triklorür (PCl ₃)	Toplumsal:3 Çevresel:0 Maddi: 0	-	0	19	Hidroklorik asit (HCl) içeren toksik bulut oluştu. Bulut, sis ve elverişsiz meteorolojik koşullar nedeniyle şehir merkezine doğru ilerledi. 1.500 metre yarıçapında etkiler gözlemlendi.

Endüstriyel Kazalar Sonucu Oluşan Hava Kirliliği Riskinin Tahmini: Sistemik Literatür İncelemesi

1992 La Mede Rafinerisi Patlaması, Fransa	12 ton LPG (Propan + Bütan) Karışımı),	Toplumsal:4 Çevresel:0 Maddi: 6	44	6	38	Oluşan yanıcı gaz bulutu, yaklaşık 14.000 m ² alana yayılım gösterdi. Hava kalitesi izleme ağı kontrollü kirleticilerde önemli ve sürekli artış kaydetmedi.
1998 Petit COURONNE Kazası, Fransa	Hidrodesülfürizasyon maddeleri	Toplumsal:0 Çevresel:0 Maddi: 0	0	0	0	Salınan maddeler: H ₂ S: 100 litre SO ₂ :148 ton. Siyah duman bulutları oluştu. Hava kalitesi kontrol ağı sensörleri anormal okuma tespit etmedi.
1999 TÜPRAŞ Yangını, Kocaeli	Yaklaşık 30.000 ton petrol ürünü	-	5 km çevresinde ki yaklaşık 200.000 kişi	0	0	Yaklaşık 30.000 ton petrol ürünü yandı. Zehirli gazlar atmosfere salındı. Kurum parçacıklarında polisiklik hidrokarbonlar tespit edildi.
1999 AKSA Sızıntısı, Yalova	6.500 ton akrilonitril	-	8 köy tamamen boşaltıldı.	0	0	Yaklaşık 2 gün boyunca 6.500 ton akrilonitril toprağa ve denize akmıştır. Ayrıca buharlaşan akrilonitril, havaya da karışmıştır
2000 Enschede Kazası, Hollanda	Yaklaşık 180 ton havai fişek	Toplumsal:5 Çevresel:0 Maddi: 6	150.000 kişi, 400 aile evlerini kaybetti.	22	974	Büyük duman bulutu oluştu. Kaza günü ve sonrasında duman bulutunda yüksek partikül madde konsantrasyonu, CO ve ağır metaller (özellikle kurşun, bakır ve çinko) ve VOCler tespit edildi. Dioksinlerde hafif artış yaşandı. 936 kan ve idrar örneğinde ağır metal artışı tespit edilmedi.
2001 Toulouse Kazası, Fransa	20-120 ton amonyum nitrat atığı	Toplumsal:6 Çevresel:1 Maddi: 6	Binlerce kişi hastaneye başvurdu. 36.000 öğrenci etkilendi.	31	244 2	Oluşan kırmızı duman kuzeybatıya doğru yayıldı. Bulut içeriği: Amonyak, azot oksitler, nitrik asit, toz partikülleri. Tesise en yakın mahallelerde ve bulut güzergahında NO ₂ seviyeleri WHO tarafından önerilen 1 saatlik kılavuz değerin (200 µg/m ³) altında kaldı. Tesise yakın yaşayan nüfusta geçici göz ve solunum tahriş (trakeobronşit) bildirildi.
2002 Arleux LPG Tanker Kazası, Fransa	7.5 ton Sıvılaştırılmış propan	Toplumsal:3 Çevresel:0 Maddi: 0	0	0	0	4 ton propan atmosfere salındı. Propan yakılarak kontrolsüz atmosferik yayılma önleni ve hava kirliliği sınırlı kaldı. Hiçbir insan yaralanması veya çevresel hasar rapor edilmedi.
2003 Kaixian Sondaj Kazası, Çin	Gaz içeriği: Metan: %82.14, Hidrojen sülfür: %9.02, Karbon dioksit %6.79	-	65.000 kişi tahliye edildi.	243	124 2	Yarım saat içinde 1 km uzaklıktaki Gaoqiao kasabası hidrojen sülfürle doldu. Sonrasında 5,7 km uzaklıktaki H ₂ S konsantrasyonu: 11,4-34,2 mg/m ³ olarak ölçüldü. Bu değer güvenlik alarım eşik değerini (20 mg/m ³) ve yerleşim yeri eşik değerinin (10 mg/m ³) üzerindeydi.
2003 Rotterdam Orto-Krezol Tankı Kazası, Hollanda	1.700 ton Orto-krezol	Toplumsal:2 Çevresel:1 Maddi: 0	-	0	0	Tankın patlamasıyla birlikte bir buhar bulutu oluşmuş ve yakındaki Vlaardingen kentsel alanına doğru yükselmiştir. 1.700 ton Orto-krezol salınmıştır. Orto-krezol aşındırıcı ve toksiktir. Koku

M.F. Şen ve S. Çetinyokuş

						kirliliği nedeniyle çevrede büyük rahatsızlık yaşanmıştır.
2005 Buncefield Kazası, İngiltere	Petrol ve türevleri, 150.000 ton	Toplumsal:6 Çevresel:0 Maddi: 6	2.000 kişi tahliye edildi.	0	43	300 m yüksekliğe ulaşan siyah duman oluştu. Duman bileşimi: CO, CO ₂ , NO ₂ , VOC, Polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH)
2008 Köln Etilen Boru Hattı ve Akrilonitril Tankı Kazası, Almanya	300 ton etilen, 1200 ton akrilonitril	Toplumsal:5 Çevresel:0 Maddi: 0	En yakın yerleşime uzaklık yaklaşık 600 metredir.	0	0	Hava kirliliği önemli olsa da tespit edilen konsantrasyonlar acil müdahale limitlerinin altında kalmış ve ciddi sağlık sorunu yaşanmamıştır. Nitrik oksitler (NOx): 2-5 ppm konsantrasyonda tespit edildi. Bu değer ERPG-2 limiti (15 ppm) altındadır. Hidrojen siyanür (HCN): 2 ppm konsantrasyonda tespit edildi. Bu değeri ERPG-2 limiti (10 ppm) altındadır. Akrilonitril: Ana maruz kalma alanında en yüksek 1 saatlik ortalama: 10 ppm (ERPG-1 değerine eşit).
2009 Sitapura Kazası, Hindistan	Yaklaşık 60 milyon litre Motor Spirit (MS) - Benzin/Petrol,	-	500.000 kişi tahliye edildi	12	300 den fazla	Kalın siyah duman günlerce devam etti. Jaipur genelinde hava kirliliği (PM, NOx, SO ₂) maksimum izin verilen limitlerin çok üzerindeydi. Karbon kurum partikülleri atmosfere yayıldı.
2010 Wingles Sızıntısı, Fransa	10 ton polistiren 3 ton stiren	Toplumsal:1 Çevresel:0 Maddi: 0	0	0	0	13 ton reaksiyon karışımı (10 ton polistiren + 3 ton stiren) atmosfere salındı. Ciddi çevresel etki veya sağlık sorunu bildirilmemiştir.
2011 Loon-Plage Patlaması, Fransa	Etilen, bütün, vinil asetat, solventler	Toplumsal:1 Çevresel:0 Maddi: 3	Yerleşime uzaklık: 500 m	0	5	Atmofere 0,05 - 0,5 ton vinil asetat salınımı gerçekleşti. Uzak mesafeden görülebilen yoğun siyah duman oluştu.
2012 Hube Kazası, Güney Kore	20 ton Hidroflorik asit	Toplumsal:6 Çevresel:3 Maddi: 4	1,5 km yarıçapınd aki nüfus tahliye edildi..	5	18	8 ton hidroflorik asit (HF) buhar olarak atmosfere salındı. Zehirli bulut yayıldı.
2015 Hidrokarbın Tank Yangını, Fransa	11.300 m ³ piroliz benzini, 48.000 m ³ naftalin	Toplumsal:3 Çevresel:2 Maddi: 3	-	0	0	Kalın siyah duman oluştu. Yaklaşık 10 gün boyunca VOC ve BTEX bileşikler kirliliği yaşanmış, yerel halkta sağlık şikayetleri (Baş ağrısı, göz kaşıntısı, boğaz ağrısı, burun akıntısı) görülmüştür.
2016 MGPI Kazası, ABD	Yaklaşık 4,000 galon Sülfürik Asit (%30), Yaklaşık 5,850 galon Sodyum Hipoklorit (%12.5)	-	11,000 vatandaş evlerinde kalma emri aldı Okullar ve bazı bölgeler tahliye edildi.	0	6	Sülfürik Asit ve Sodyum Hipokloritin kazara karışması sonucu, sarı-yeşil renkli toksik gaz bulutu oluştu. Toksik gazın içeriği: Klor gazı (Cl ₂), Klor dioksit (ClO ₂), Hidrojen klorür/Hidroflorik asit (HCl), Sodyum sülfat (Na ₂ SO ₄). Teorik olarak, reaksiyon maksimum 1.583 kg klor gazı üretmiş olabilir.
2018 Husky Superior Rafineri	Petrol ve türevleri	-	2,507 vatandaş tahliye edildi.	0	36	Salınan hidrokarbon buhar karışımı (Metan, etan, etilen, propan, propilen, bütan, izobütan, 1-buten, 2-buten-cis, 2-buten-

Kazası, ABD						trans, pentan ve izopentan) : Yaklaşık 17,690 kg. Olay sonrası kapsamlı hava kalitesi izlemesi yapıldı. Tüm sonuçlar düzenleyici yönergelere uygundu.
2019 Gonfreville Rafinerisi Kazası, Fransa	300-600 m ³ petrol ve türevleri	Toplumsal:0 Çevresel:0 Maddi: 5	57	0	0	Dağınık duman bulutu oluştu, 8 km mesafeye kadar hidrokarbon kokusu yayıldı.
2020 Dahej Patlaması, Hindistan	Pestisit	-	4800 kişi tahliye edildi.	5	57	Yoğun duman bulutları oluştu. Yoğun duman nedeniyle uçucu organik karbon emisyonu eşik değere ulaştı.
2020 Visakhapatn am Sızıntısı, Hindistan	1830 ton stiren	Toplumsal:6 Çevresel:1 Maddi: 0	Tesis çevresinde 200-250 aile tahliye edildi.	13	100 0den fazla	Tahmini 800 ton stiren atmosfere salındı. Buhar bulutu, 3 km yarıçapında yayılım gösterdi. Aynı gün tesisten 600 m kuzeyde 461 ppm stiren ölçüldü. Bir gün sonra aynı konumda 374 ppm ölçüldü. Ölçülen 461 ppm seviyesi, AEGL-2'yi (130 ppm) 3,5 kat aşırıyordu
2020 Beyrut Patlaması, Lübnan	Yaklaşık 2.750 ton amonyum nitrat	-	300.000	218	750 0	Amonyum nitrat ayrışması sonucu büyük miktarda kirlilik yükü atmosfere salındı. Atmosfere Salınan Maddeler: Nitrat, nitrit, CO ₂ ve CO, NH ₃ .
2022 Akabe Kazası, Ürdün	25 ton klor	-	-	13	260 dan fazla	Zehirli klor gazı salınımı gerçekleşti. Hava kirliliği ile ilgili detaylı bilgi yok.
2025 İran Liman Patlaması, İran	Amonyumperklor at	-	Binlerce	110	13	Şehir, zehirli duman altında kaldı ve iç mekanlara bile nüfuz etti. Liman yakınlarındaki yerleşim yerleri tahliye edildi.

*Homerger vd., 1979; Eckerman, 2005; Varma ve Varma, 2005; Jianfeng vd., 2009; Manish ve Sunil, 2013; Trivedi, 2014; Truong vd., 2016; Anonim, 2017; Anonim, 2018; Sivaraman ve Varadharajan, 2021; Anonim, 2022; Lamba,2022; Türkcan, 2024; Anonim,2025; Ma vd., 2025; Merson vd., 2025

** Avrupa endüstriyel kaza ölçeği (European scale of industrial accidents), 1994 yılında AB Üye Devletleri Yetkili Makamlar Komitesi tarafından SEVESO Direktifi kapsamında kabul edilmiş standart bir değerlendirme sistemidir. Ölçek, kazaların etkilerini ve sonuçlarını objektif olarak karakterize etmek için tasarlanmış 18 teknik parametreye dayanır. Fransa 2003'ten itibaren bu ölçeği 4 indeks üzerinden kullanmaktadır: (1) salınan tehlikeli madde, (2) insan ve toplumsal sonuçlar, (3) çevresel sonuçlar, ve (4) ekonomik sonuçlar. Her parametre 6 seviye içerir ve kazanın genel endeksi, bu parametreler arasındaki en yüksek seviye ile belirlenir (0: önemsiz olay - 6: büyük felaket).

Çizelge 1'de sunulan kazaların analizi, endüstriyel kaza kaynaklı hava kirliliğinin küresel ölçekte yaygın ve ciddi bir risk oluşturduğunu göstermektedir. Petrol bazlı kazalarda ağırlıklı olarak siyah duman bulutları, PM, NO_x, SO₂, CO, PAH ve BTEX bileşiklerinin salınımı gözlenirken; kimyasal sızıntılarda spesifik toksik gaz bulutlarının lokal yüksek konsantrasyonlarda atmosfere karışması söz konusudur. Önemli bir tespit, kazaların %32'sinde (n=11) sistematik hava kalitesi ölçümlerinin yapılmamış veya raporlanmamış olmasıdır. Mevcut veriler çoğunlukla olay sonrası kısa süreli ve sınırlı parametrelerle gerçekleştirilmiş nokta ölçümlerden oluşmaktadır. Uzun vadeli çevresel etkiler ve kronik maruziyet sonuçları hakkında veri eksikliği belirgindir. Bu tarihsel analiz, endüstriyel kaza kaynaklı hava kirliliği riskinin tahmin edilmesinde standartlaştırılmış izleme protokollerinin ve sistematik risk değerlendirme metodolojilerinin gerekliliğini vurgulamaktadır.

3.2. Hava Kirliliğinden Bağımsız Endüstriyel Kuruluşların Çevresel Risk Değerlendirme Çalışmaları

Hunsaker vd. (1990) büyük coğrafi alanları etkileyen çevresel problemlerin etkisini tahmin etmek için bölgesel çevresel risk değerlendirmesini kantitatif ve sistematik yöntem olarak tanımladı.

Achour vd. (2005) tarafından; endüstriyel kuruluşların çevresel riskini belirlemek için geliştirilen “GERA endeks modeli”, erken dönem çalışmalarının en kapsamlılarından birini oluşturmaktadır. Bu yöntem, yeni veya mevcut bir proses için küresel çevresel risk değerlendirmesi (GERA) endeksi tanımlamaktadır. Bu endeks, giriş ve çıkış süreç akımlarında bulunan kimyasal bileşenler ve belirli prosesi oluşturan farklı birim operasyonlar için tanımlanmıştır (1 nolu formül).

$$GERA = \left(a \sum_{k=1}^{n_s} y_k \beta_k \right) + \left(b \sum_{m=1}^{n_u} \theta_m^{w_m} \right) \quad (1)$$

Parametre açıklamaları:

- a, b: Tüm bileşenlerin GERA indeksine göreceli katkısını yansıtan oransal faktörler (0-1 arası)
- n_s : Dış çevreyle direk etkileşim içinde olan proses giriş ve çıkış akımlarının toplam sayısı
- y_k : k akımının akış hızının toplam giriş akım hızına bölümü
- β_k : Bir prosesteki bileşenlerin kümülatif riski
- n_u : Prosesi oluşturan birim operasyonlarının toplam sayısı
- θ_m : m birimi için birim operasyon risk indisi (operatör, teftiş, bakım, patlama, sızıntı indisleri ile karakterize)
- w_m : m birim operasyonu için ağırlık faktörü (0-1 arası)

Achour vd.(2005) sodyum karbonat ve hidrojenklorür üreten tipik proses için GERA indeksini 2.5, metiltersiyerbutileteer üreten proses için ise 1.7 olarak hesaplanmıştır. Analiz, önerilen yöntemin bir proses simülatörüne kolayca entegre edilebileceğini, böylece tasarım aşamasında prosesin çevresel etkisini hesaba katılabileceğini göstermektedir.

Zhao vd. (2010) tehlikeli maddenin doğası gereği sahip olduğu içsel özellikler ile tehlikeli maddenin çevresine ait koşullara ait dışsal özellikler gibi bir tanıma gitmiştir.

- İçsel özellikler: Tehlikeli maddelerin nitelik ve nicelik değeri (tür ve miktar)
- Dışsal özellikler: Çevresel koşullar ve belirsizlikler

İçsel özellikler tehlikeli maddelerin doğası gereği bir tehlikeyi barındırmaktadır. Bu içsel özellikler, dışsal çevresel koşullarla birleştiğinde tehlikenin boyutu değişmektedir. Bu yaklaşım, "aynı tehlikeli maddenin farklı çevre koşullarında farklı derecelerde tehlike yaratacağı, aynı çevresel koşullar altında ise benzer davranış sergileyeceği" temel prensibine dayanmaktadır. Aslında burada, kaza sonuçlarından olası kazaların etkilerini tahmin etmeyi de içeren makine öğrenmesi çalışmalarına bir ışık tuttuğunu söylemek abartı olmayacaktır. Dışsal koşullar ise bir belirsizlik içermektedir.

Topuz vd. (2011) çevresel ve insan sağlığı riskinin ana kaynakları olarak Planlı Emisyonlar (PE), Kazara Emisyonlar (AE) ve Kapalı Üretim Sırasındaki Emisyonlar (IAE) olarak belirlemiştir. PE'nin çevreye verdiği risk, PE'nin alt faktörleri olarak kabul edilen “madde ve ekosistem özellikleri”ne bağlıdır. Maddenin özelliklerinde maddenin yanıcılık, reaktivite, korrozivite, toksisite, patlayıcılık, kalıcılık, biyobirikim, yoğunluk, çözünürlük, uçuculuk gibi özellikleri dikkate değerdir. Ekosistem özelliklerinde ise bölgenin konut, endüstriyel, tarımsal, turistik amaçlı kullanımı, çevredeki su havzaları, ormanlar, flora/fauna durumu, insan yoğunluğu ve rüzgar hızı, rüzgar yönü, nem sıcaklık gibi meteorolojik koşullar dikkat çekicidir. Kazara Emisyonlar (AE)'nin çevreye verdiği risk de, AE'nin alt faktörleri olarak kabul edilen “kazanın meydana gelmesi ile ilgili faktörler” ve “kaza sonrası faktörler”e bağlıdır. Kazanın meydana gelmesi ile ilgili faktörler arasında taşımacılık (deniz, hava, karayolu, borualtı) modu, elleçleme ile ilgili olarak elleçleme sıklığı, elleçleme miktarı, depolama süresi, depolama koşulları, proses ile ilgili olarak ekipman, tesis şartları, operatör faktörleri, yönetsel faktörler ve deprem, taşkın, fırtına gibi doğal afetlere yer verilmektedir.

Chen vd. (2014)'e göre risk alıcıların zarar görebilirliği arttıkça kazalar sebebiyle çevresel kirlilik ve ekonomik kayıp da artacaktır. Böylece çevresel risk endeksi, çevresel risk etki faktörlerinin bir fonksiyonudur ve şöyle hesaplanır (2 nolu denklem).

$$R = f(S, P, E, M, L) = \sqrt[3]{S.P.E.M.V} \quad (2)$$

Burada: R= Toplam çevresel risk indeksi, S= Tehlikeli maddeler, P= Üretim prosesi
E= Ekipman durumu, M= Çevresel emniyet ve sağlık, V= Risk alıcıların zarar görebilirliği

Chen vd. (2014) metodolojiyi, 50 kimyasal tesisin yer aldığı Nanjing Chemical Industry Park'ta denemiştir. Bu endüstri parkının etrafında duyarlı alanlar, okullar ve hastaneler yer almaktadır. Öncelikle tesisleri risklerine göre formüllere göre hesaplayıp 3 tanesininin yüksek riskli, 14 tanesinin orta riskli ve 13 tanesinin de düşük riskli olduğu şeklinde sınıflandırma yapmış ve CBS ortamında göstermiştir.

Liu vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada, tesis çevresel kaza risk değerlendirmelerindeki parametre belirsizliklerini değerlendirmek için olasılıksal analiz yöntemi kullanılmıştır. Çalışma üç temel aşamadan oluşmaktadır: Morris yöntemi ile parametre duyarlılık analizi, Latin Hiperküp Örneklem (LHS) yöntemi ile belirsizlik analizi ve risk karakterizasyonu. Etki modellemesi için PHAST yazılımı kullanılmış olup, Çin'in Wuhu şehrindeki bir amonyak deposundaki sızıntı kazası örnek olay olarak ele alınmıştır. Morris yöntemi ile 15 yörünge ve 8 örneklem seviyesinde 120 örnek grubu oluşturularak, model çıktısına en fazla katkıda bulunan 8 parametre belirlenmiştir. Daha sonra bu parametreler üzerinde 1000 kez LHS uygulanarak Monte Carlo simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, sıvı amonyak sızıntısının öldürücü yarıçapının belirsizlik değişkenlerinin birleşik etkisi altında 100-3500 m arasında önemli ölçüde değiştiği tespit edilmiştir. Çalışma, tek ve belirli bir kaza senaryosu için yapılan geleneksel risk değerlendirmelerinin yeterince bilimsel ve güvenilir olmadığı, parametrelerdeki belirsizliklerin olasılıksal yöntemlerle analiz edilmesinin daha gerçekçi sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Yang vd. (2022), farklı ölçeklerdeki çevresel kaza risklerinin etkilerini ve itici faktörlerini değerlendirmek amacıyla AHP ve Geodetector yöntemlerini birleştiren Çevresel Kaza Risk Değerlendirme Modeli (MEARA) geliştirdi. Model iki aşamadan oluşmaktadır: (1) Kuruluş düzeyinde belirteçler kullanarak kuruluş bazında risk değerlendirmesi yapılması, (2) Bölgesel düzeyde Tehlike (H), Zarargörebilirlik (V) ve Direnç (T) indisleri kullanılarak geniş ölçekli risk analizi gerçekleştirilmesi.

Kuruluş düzeyindeki belirteçler; tehlikeli maddenin çevresel kaza riski, tehlikeli madde stoğunun kritik kütleyle oranı, endüstri sınıfı, kaza olasılığı, toksik gaz sızıntı izleme ve erken uyarı sistemleri, atıksu ve yağmur suyu kontrol önlemleri, emniyet koruma düzeyi, kuruluşun 1 km içindeki nüfus yoğunluğu, yerleşim-sanayi karışım derecesi, işletmenin 1 km çevresinde çevresel risk alıcıları, su ortamı kalite zonlaması ve atmosferik çevre kalite zonlamasını içermektedir. Bölgesel düzeyde ise tehlike indisi (kuruluş yoğunlukları, çevresel riske sahip kuruluş yoğunluğu), zarargörebilirlik indisi (nüfus yoğunluğu, ekolojik duyarlılık (eğim, bakı, yükseklik, nehir, göl, yol trafiği ve arazi kullanım tipi) ve ekolojik işlev (su koruma alanı, toprak ve su koruma işlevi, biyoçeşitlilik)) ve direnç indisi (hastane yoğunluğu, GSYİH) kullanılmaktadır. Belirteç ağırlıklarının belirlenmesinde AHP ve entropi ağırlık metodu uygulanmıştır. Çalışmada, 2.460,1 km² alana ve 8,342,500 nüfusa sahip Dongguan şehrindeki 2.283 riskli kuruluşu analiz edilmiştir. Yapılan çalışmada; risk kaynaklarının CBS mekânsal ağırlıklandırma sonuçlarına göre, her bir bölge için zarargörebilirlik, direnç ve çevresel risk değeri hesaplanmıştır. Jenks yöntemi kullanarak sonuçlar, çok yüksek risk, yüksek risk, orta risk, düşük risk ve ihmal edilebilir sınıflarına ayrılmıştır. Sonuçlar, çevresel kaza risklerinin belirgin mekânsal kümelenme gösterdiğini ortaya koymakta olup; yüksek riskli alanlar üç alanda yoğunlaşmaktadır.

3.3 Endüstriyel Kaza Kaynaklı Hava Kirliliği Risk Değerlendirme Çalışmaları

Erken dönem çalışmalar endüstriyel kaza etkisinden bağımsız hava kalitesi çalışmalarıdır. Riddle vd. (2004) nötral koşullarda izole edilmiş bir bacadan dağılımı tahmin etmek üzere FLUENT ve ADMS modelini karşılaştırmıştır. FLUENT modelinin ADMS modeli ile benzer sonuçlar verdiği fakat daha çok işlem süresi gerektiği çalışmada belirlenmiştir. Hanna vd. (2005) tarafından yürütülen çalışmada, ADMS ve AERMOD sonuçları karşılaştırılmış olup; tüm senaryolar için AERMOD modelinin az daha iyi istatistiğiyle beraber iki modelin de benzer performans gösterdiği tespit

edilmiştir. Gümrükçüoğlu (2012) Türkiye'nin Sakarya ilinde gerçekleştirdiği bir çalışmada, endüstriyel tesislerden kaynaklanan kükürtdioksit (SO₂) hava kirleticisi konsantrasyonlarını Gauss Plume Model denklemi ile hesaplamış ve dağılım haritaları oluşturarak hava kalitesinin hangi seviyelerde olduğunu ortaya koymuştur. Ghannam ve El-Fadel (2013) tarafından yapılan bir çalışmada karmaşık arazi koşullarına sahip bir kıyı kenti bölgesindeki hava kalitesi Calpuff yazılımı ile incelenmiş CO, NO_x ve PM₁₀ emisyonlarının tahminleri yapılarak sonuçlar diğer modeller ile kıyaslanmıştır. CALPUFF, CO, NO_x ve PM₁₀ konsantrasyon dağılımlarındaki zamansal dalgalanmaları yakalamada performans değerlendirmesi kabul edilebilir bir yetenek sergilemiştir. Demirarslan vd. (2017) tarafından Kocaeli ili Körfez ilçesi için yapılan çalışmada SO₂ ve PM₁₀ kirleticilerinin dağılımları incelenmiştir. Dağılımlar, kararlı hal Plume modelleri (AERMOD, ISCST-3) ile Langrangian Puff modeli (CALPUFF) kullanılarak yapılmıştır. Araştırma sonuçlarına göre en yüksek konsantrasyon modellere ve zamana göre değişiklik göstermiştir. Fakat en yüksek konsantrasyon ISCST-3 modeli ile hesaplanmıştır. Sagan vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada dünyada en kirli yerlerden biri olan Peru La Oroya şehrindeki SO₂ emisyonları alan gözlem sonuçları ile CALPUFF dağılım model sonuçları karşılaştırılmıştır.

Liu vd. (2018) bölgesel ölçekte akut kazaen hava kirliliği riskini değerlendirmek için Hibrit Mekansal Risk Değerlendirme (HSRA) Metodolojisini geliştirmiştir. Metodoloji, çoklu tehlikeler ve alıcılar arasındaki etkileşimleri kapsamlı şekilde ele alarak birden fazla risk rotasını (kaynak-alıcı-son nokta) birleştirmektedir. HSRA dört temel süreçten oluşmaktadır: (1) Çoklu kriterli tehlike ve zarargörebilirlik analizi, (2) Gauss ve havadan ağır gaz modelleri ile tehlikeli/toksik gazların simülasyonu, (3) CBS araçları ile risk puanlama, (4) Monte Carlo simülasyonu ile belirsizlik analizi. Metodolojide risk puanı (RS), tehlike puanı (H), zarargörebilirlik puanı (V), maruziyet filtresi (Ex) ve etki filtresinin (Ef) birleştirilmesiyle hesaplanmaktadır (3 nolu denklem). Tehlike seviyesi, tehlikeli madde stok miktarının eşik değere oranı (Q) ve yönetim seviyesi (M) ile belirlenmektedir. Yönetim seviyesi (M); üretim teknolojisi, emniyet kontrolü, risk önlemleri ve acil durum planı kriterlerinin doğrusal kombinasyonudur. Zarargörebilirlik analizi ulusal kriterler veya uzman görüşü ile uyum içinde üç alıcı grubu için yapılmaktadır: insan (nüfus yoğunluğu), ekosistem (koruma statüsü) ve tarımsal ekonomi (ekonomik büyüklük). Toksik kirleticilerin taşınımı için Aloha ve Breeze yazılımları kullanılarak atmosferik dağılım modellemesi gerçekleştirilmiştir. Risk puanları eşit aralık sınıflandırma yöntemiyle düşük, orta ve yüksek olmak üzere üç sınıfa ayrılmaktadır.

$$RS_i = \sum_{j=1}^n H_{ij} \times V_{il} \times Ex_{jl} \times Ef_{lm} \quad (3)$$

RS_i= i. alt bölge serilerindeki (alt bölge 1, 2, 3 vb.) risk puanı

H_{ij}= i. alt bölge serilerindeki j. risk kaynağının tehlike seviyesi

V_{il}= i. alt bölge serilerindeki l. risk alıcısının zarargörebilirlik seviyesi

Ex_{jl}= j risk kaynağı ve l alıcısı arasındaki maruziyet katsayısı

Ef_{lm}= l alıcısı ve m son noktası arasındaki etki katsayısı

Metodoloji, çok sayıda kimyasal kuruluş ve maden atık havuzu bulunan Zhangjiakou şehrine uygulanmıştır. Buradaki hava kirleticilerin ani salınımı, Zhangjiakou şehrindeki 4.68 milyon kişiyi ve rüzgarla birlikte Pekin'deki 21 milyon kişiyi tehdit etmektedir. Saha çalışması ile bölgede hava kirliliği kazasına sebep olma potansiyeline sahip 16 kuruluş belirlenmiştir. Vaka çalışması 243 kasabadan 34'ünün havadan risk kaynakları ile tehdit altında olduğunu göstermektedir. Analiz sonuçları, Xuanhua Bölgesi ve Wangquan kentsel alanlarının kimyasal işletmelerin yüksek nüfus yoğunluklu bölgelere yakınlığı nedeniyle en yüksek riski taşıdığını göstermiştir. S1-S3 ve S8 kimyasal işletmeleri, daha yüksek doğal tehlikeleri ve alıcı alt bölge(ler)i üzerindeki nispeten daha büyük etkileri nedeniyle en büyük riski oluşturmaktadır. Ortaya çıkan risk haritası, Zhangjiakou'dan kaynaklanan akut hava kirliliğinin Olimpiyat alanı ve Pekin için tehdit oluşturmadığını ortaya koymuştur.

Liu vd. (2020) Çin şehirlerinde belirli meteorolojik koşullar ve antropojenik prekürsör emisyonların ve bunların birbirleri ile olan etkileşiminin ozon konsantrasyonlarındaki etkisini

Coğrafi dedektör modeli (GeoDetector) ile nicelleştirdi. Sonuçlar, meteorolojik ve antropojenik faktörler ve bunların birbirleriyle olan etkileşiminin ozon konsantrasyonlarını farklı zaman ve mekânsal ölçeklerde önemli ölçüde değiştirdiğini göstermiştir. Meteorolojik ve antropojenik faktörlerin etkisinde Çin genelinde belirgin bölgesel ve mevsimsel farklılıklar tespit edilmiştir.

Tahmid vd. (2020), endüstriyel alanların etrafındaki nüfus gruplarının maruz kaldığı riski değerlendirmek için sonuç ve risk tabanlı yaklaşımları kısmen birleştiren hibrit bir Nüfus Zarargörebilirlik-Risk Modeli geliştirmiştir. Metodoloji üç aşamadan oluşmaktadır: nüfus zarargörebilirliğinin belirlenmesi, tehlikenin belirlenmesi ve birleşik riskin hesaplanması. Birleşik risk puanı (CR), belirli koordinatlardaki tehlike seviyesi (LOC) ve nüfus zarargörebilirlik seviyesinin (PVS) çarpımı ile elde edilmektedir (4 nolu denklem).

$$CR_{(x,y)} = function(LOC_{(x,y)}, PVS_{(x,y)}) \quad (4)$$

$CR_{(x,y)}$ = (x,y) koordinatlarında birleşik risk puanı

$LOC_{(x,y)}$ = (x,y) koordinatlarında tehlike seviyesi

$PVS_{(x,y)}$ = (x,y) koordinatlarında nüfus zarargörebilirlik seviyesi

Nüfus zarargörebilirliği; nüfus yoğunluğu, cinsiyet, engellilik, okur yazar oranı, 65 yaş üstü ve 5 yaş altı nüfus belirteçleri kullanılarak değerlendirilmektedir. Her hücrenin Nüfus Zarargörebilirlik Puanı (PVS), bu göstergelerin ağırlıklı toplamıdır ve çok yüksek, yüksek, orta, düşük ve sıfır olmak üzere beş seviyeye ayrılmaktadır. Tehlike seviyesi, kimya tesislerinde Aloha yazılımı ile modellenerek LOC 3, LOC 2, LOC 1 ve tehlike yok olmak üzere dört kategoride belirlenmektedir. Her hücrenin birleşik risk puanı, LOC ve PVS değerlerinin kombinasyonundan elde edilmektedir. Metodoloji, Bangladeş'teki Meghnaghat Sanayi Bölgesi'ne uygulanmıştır. Çalışma alanında 23 kimyasal tesis tespit edilmiş ve alan 150x150 m hücelere bölünmüştür. Risk matrisi kullanılarak her hücrenin CR puanı hesaplanmış ve bölge için risk haritası oluşturulmuştur (Tahmid vd., 2020).

Belirsizlikler ve nedensellikler, risk değerlendirmesinde göz ardı edilmemesi gereken önemli bileşenlerdir. Geleneksel olasılıksız yöntemlerle karşılaştırıldığında, Bayesian ağları (BN'ler) yüksek karmaşıklık ve belirsizliklere sahip problemleri çözmek için oldukça uygundur. Zhang vd. (2022)'e göre; aynı alt bölgede biten (reseptör odaklı) veya aynı kaynaktan gelen (kaynak odaklı) tüm risk yollarının genel risk puanları toplanabilir. Son olarak, risk karşılaştırmalarını kolaylaştırmak için, alt bölgeler veya risk kaynakları için farklı düşük, orta ve yüksek risk seviyeleri, eşit aralıklı sınıflandırma yöntemi kullanılarak (≤ 5 , düşük; 5-10, orta; ≥ 10 , yüksek) sınıflandırılabilir. Zhang vd. (2022) yayılım simülasyonu ile birleştirilmiş BN tabanlı bir yaklaşımı (Bayes Ağları Tabanlı Hibrit Yaklaşım), yerel ölçekte hava kirliliği kazalarının riskini olasılıksal bir şekilde tahmin etmek için önermiştir. Bu çalışma, endüstriyel kaza sonucu hava kirliliği riskini BN yöntemi ile olasılıksal olarak analiz eden ilk kapsamlı çalışmadır. BN'lerde düğümler risk değişkenleri olarak tanımlanmış ve 10 değişken değerlendirilmiştir. Çalışmadaki risk kaynağı belirteçleri olarak; rüzgar yönü frekansı (Meteorolojik koşulların stokastik etkisi), yayılım kapsamı (BREEZE/AFTOX/SLAB modellerinden çıkan dağılım mesafesi), kontrol mekanizması etkinliği (tesis güvenlik sistemleri performansı), maruziyet kapsamı (etkilenen alan büyüklüğü), akut maruziyet (PAC-1 limitine göre maruziyet seviyesi); risk alıcısı belirteçleri olarak; nüfus yoğunluğu (demografik yoğunluk indeksi), en yakın hastaneye erişilebilirlik (acil sağlık hizmetlerine mesafe), en yakın yola erişilebilirlik (tahliye yollarına erişim durumu), alt bölge zarargörebilirliği (sosyodemografik hassasiyet indeksi) kullanılmıştır. Bu yöntem, Guangdong eyaleti Huizhou'da büyük bir petrokimya endüstrisine sahip ekonomik ve teknolojik gelişme bölgesi olan Daya Körfezi'ndeki 24 risk kaynağının ve 24 risk alt bölgesinin risk seviyelerini analiz etmek için uygulanmıştır. Çalışma ile en riskli yollar ve alanlar tespit edilmiştir. Genel olarak, bu araştırma BN olasılıksal yaklaşımının yerel ölçekli atmosferik çevresel risk değerlendirmesi için bir araç olduğunu göstermiştir.

Sakti vd. (2023) tehlike, zarargörebilirlik ve maruziyet analizlerini içeren bir hava kirliliği risk indisi geliştirmiştir. Çalışmanın temel amacı, 2019-2020 yıllarına ait Sentinel-5P uzaktan algılama verilerine dayalı olarak CO, NO₂ ve SO₂ için çoklu hava kirliliği risk endeksi geliştirmektir.

Risk indisi üç bileşenden oluşmaktadır: Tehlike indisi, uzaktan algılama ile elde edilen hava kirliliği konsantrasyon verileri kullanılarak her kirletici için çok düşükten çok yükseğe beş sınıfa ayrılarak hesaplanmıştır. Zarar-görebilirlik indisi, endüstriyel alanlar, yangına duyarlı alanlar, madencilik alanları, aktif volkanlar, yollar ve enerji santralleri gibi kirlilik kaynaklarına olan mesafe verilerini içermektedir. Maruziyet indisi ise nüfus yoğunluğu verisi ile belirlenmiştir. Risk indisi, bu üç bileşeni entegre eden bir denklem kullanılarak modellenmiştir (5 nolu denklem).

$$R = \sum_{i=1}^n H_i \times V_i \times E \quad (5)$$

Bu çalışmada, Güneydoğu Asya'dan Sentinel-5P CO, NO₂ ve SO₂ verilerine dayalı çoklu risk hava kirliliği haritalandırması yapılmıştır. En yüksek hava kirliliği risk endeksi değerleri, insan faaliyetlerinden kaynaklanan kirlilikten kaynaklanan yüksek maruziyet endeksine sahip kentsel alanlarda gözlenmiştir. Üç hava kirleticisinin çoklu risk analizi, Singapur, Vietnam ve Filipinlerin sırasıyla %21,08 (129 km²), %0,37 (1252 km²) ve %0,31 (912 km²) değerleri ile en yüksek riskli alan yüzdelere sahip olduğunu göstermiştir.

Liu vd. (2024) kimyasal sızıntı kazalarının kent alanlarına yönelik etkilerini değerlendirmek amacıyla entegre bir risk değerlendirme yöntemi (IURA) geliştirdi. Çalışma, Çin'in Hubei eyaletinde 19,700 km² alan ve 5.85 milyon nüfusa sahip bir endüstriyel kentte, 10,000 m³ kapasiteli sıvı amonyak depolama tankından kaynaklanan potansiyel sızıntı senaryosu üzerinden gerçekleştirilmiştir. ALOHA yazılımı kullanılarak Gauss dağılım modeli ile toksik gaz yayılımı modellenmiş, meteorolojik veriler (hava sıcaklığı, rüzgâr hızı ve yönü, atmosferik stabilite) ve rüzgâr gülü kullanılarak farklı senaryolar altında tehdit bölgeleri belirlenmiştir. Nüfus kırılganlığı, "maruziyet-duyarlılık-uyum kapasitesi" çerçevesinde 10 gösterge ile değerlendirilmiştir. Maruziyet göstergeleri (toplam nüfus, kırsal idari birimler ve kentsel idari birimler), duyarlılık göstergeleri (0-14 yaş ve 65+ yaş nüfus oranları) ve uyum kapasitesi göstergeleri (GSYİH, kentsel/kırsal kişi başı gelir, tıbbi personel sayısı, eğitim seviyesi) entropi ağırlıklandırma yöntemiyle ağırlıklandırılmıştır. Farklı bölgelerin kırılganlığını sıralamak için Gri İlişki-TOPSIS (GC-TOPSIS) hibrit yöntemi kullanılmış ve ArcGIS yazılımı ile tehlike haritası ve nüfus kırılganlık haritası $R = H \times V$ formülü ile karşılaştırılarak entegre risk haritası oluşturulmuştur. Geleneksel risk matrisinin ürettiği "risk kümelenmesi" sorununu çözmek için Borda sayım yöntemi uygulanmış, her grid hücresi için tehlike sayımı ve kırılganlık sayımı hesaplanarak Borda indeksi belirlenmiştir. Bu sayede orijinal 3 risk seviyesi 8 alt kategoriye ayrılmış ve 28 grid hücresinin detaylı öncelik sıralaması yapılmıştır. Örnek vaka analizinde, kaza kaynağı çevresindeki yüksek tehlike bölgelerinin düşük nüfus yoğunluğu nedeniyle orta risk seviyesinde kaldığı, ancak yüksek nüfus yoğunluklu bölgelerde orta tehlikenin yüksek riske dönüştüğü tespit edilmiştir.

3.4. Makine Öğrenmesi ile Kaza Sonuç Tahmini Modelleri

Geçmişteki kazalardan ders almak, benzer tehlikeli maddeleri içeren kaza senaryolarını önlemek için oldukça önemlidir. Tarihsel analiz, kazaların meydana gelme sıklığını ve olası sonuçlarını tahmin etmek için kullanılabilir. Casal (2008)'e göre tarihsel analiz, analiz edilen sisteme benzer sistemlerdeki önceki kazaları incelemekten oluşmaktadır; yani benzer bir tesiste (proses tesisi veya depolama alanı gibi), aynı operasyonda veya faaliyette (tanklarda yükleme/boşaltma gibi) ya da aynı malzemeyi içeren kazaları incelemekten oluşur. Bu esasen nitel bir yaklaşımdır, ancak yeterli sayıda kaza verisi bulunduğu anda nicel sonuçlar elde etmek için istatistiksel analiz kullanılabilir. Tarihsel analiz genellikle kaza veritabanları kullanılarak gerçekleştirilir.

Obasi vd. (2025) iş kazalarının analizinde makine öğrenmesi (ML) uygulamalarını kapsamlı bir şekilde ele almaktadır. Çalışmada Scopus veritabanından 2008-2024 yılları arasında 504 makale analiz edilmiş ve ML modelleri karar ağacı tabanlı (Rasgele Orman, XGBoost, GBDT), sinir ağı tabanlı (ANN, DNN, CNN, RNN) ve diğer modeller (SVM, Bayes Ağları, KNN) olmak üzere üç ana kategoride sınıflandırılmıştır. Çalışmada beş ana veri kaynağı türü belirlenmiştir: tarihi veriler (373 makale), anketler (54), sensör/gerçek zamanlı veriler (32), simülasyon verileri (24) ve karma kaynak verileri. Araştırmaların çoğunluğu karayolu ulaşımında (%62.7) yoğunlaşmış olup, bunu inşaat,

denizcilik ve petrokimya sektörleri izlemiştir. Karar ağacı tabanlı topluluk öğrenme modelleri (Rasgele orman, XGBoost) en yüksek tahmin doğruluğunu göstermiştir (bazı çalışmalarda %96-100). Çalışma, dört temel zorluğu vurgulamaktadır: (1) veri kalitesi ve eksikliği, (2) model yorumlanabilirliği eksikliği, (3) dengesiz veri setlerinin işlenmesi ve (4) proaktif veri entegrasyonunda eksiklik.

Chebila (2021) birden fazla makine öğrenimi algoritmasına dayalı olarak tehlikeli kimyasallar içeren kazaların sonuçlarını tahmin etmek için AB Büyük Kaza Raporlama Sistemini (MARS) kullandı. Çalışmada lojistik regresyon, karar ağaçları, sinir ağları, destek vektör makinesi, naive Bayes sınıflandırıcısı ve rastgele ormanlar olmak üzere altı farklı algoritma test edilmiş ve performansları çeşitli metriklerle karşılaştırılmıştır. Çalışmada kullanılan özellikler; Seveso II statüsü, endüstri tipi, yüklenicilerin katılımı, organizasyonel nedenler, tesis/ekipman kusurları, dış faktörler ve diğer nedenlerdir. Çalışma üç ana sonuç kategorisini ele almıştır: İnsan kayıpları için (en az bir yaralanma veya ölüm), rastgele ormanlar algoritması en yüksek performansı göstermiş ve doğruluk, F1 skoru ve AUC değerlerinde yaklaşık %80 skoruna ulaşmıştır. Sinir ağları ikinci en iyi sonucu vermiştir. Çevresel sonuçlar için, 158 olayın çevresel hasar yarattığı dengesiz veri seti nedeniyle Sentetik Azınlık Aşırı Örnekleme Tekniği (SMOTE) uygulanmıştır. Rastgele ormanlar %71 AUC ve %77 doğruluk ile en iyi performansı göstermiş, karar ağaçları ikinci sırada yer almıştır. Maddi sonuçlar için, sinir ağları %73 AUC ve %77 doğruluk ile en üstün çıkmış, rastgele ormanlar ve lojistik regresyon yakın sonuçlar vermiştir. Çalışmanın sonuçları, rastgele ormanlar ve sinir ağlarının endüstriyel kazaların belirli sonuçlarını tahmin etmede ayırt edici yeteneklere sahip olduğunu göstermiştir. Ancak veri setleri yüksek düzeyde dengesiz olduğunda sinir ağlarının performansında belirgin bir düşüş gözlenmiştir.

Tamascelli vd. (2022) tehlikeli maddeleri içeren endüstriyel kazaların ne kadar ciddi sonuçlar doğuracağını önceden tahmin etmek için makine öğrenimi yöntemlerini kullanmıştır. Amaç, geçmiş kaza verilerinden öğrenilen bilgileri kullanarak yeni kazalarda kaç kişinin ölebileceğini veya yaralanabileceğini tahmin etmektir. Çalışmada 8900'den fazla kazayı içeren MHIDAS (Major Hazard Incident Data Service) veritabanı kullanılmıştır. Üç farklı makine öğrenimi modeli test edilmiştir: Wide (basit doğrusal model), Deep Neural Network (derin sinir ağı) ve Wide&Deep (her ikisinin birleşimi). Verinin %80'i modelleri eğitmek, %20'si test etmek için kullanılmıştır. Kazalar şiddetlerine göre kategorilere ayrılmıştır: hiç ölü/yaralı yok, 1-10 arası, 10-100 arası, 100-1000 arası ve 1000'den fazla. Modellerin başarısı AUC, Recall (gerçek vakaları yakalama oranı), Accuracy (genel doğruluk) ve Precision (tahmin doğruluğu) gibi metriklerle ölçülmüştür. Sonuçlar, modellerin çok sayıda ölüm veya yaralanma içeren nadir kazaları tahmin etmede zorlandığını göstermiştir. Bunun nedeni veritabanında bu tür ciddi kazaların az sayıda olmasıdır. Üç model karşılaştırıldığında, hem basit hem karmaşık modelin avantajlarını birleştiren Wide&Deep modeli en iyi performansı göstermiştir. Bu sonuç, hibrit modelin hem ezberlemede hem de genellemede üstün yeteneklere sahip olmasıyla açıklanmaktadır. Araştırma, karar eşiğinin ayarlanmasının performans üzerindeki önemli etkisini ortaya koymuştur. Makine öğrenimi modellerinde varsayılan 0,5 eşik değeri yerine, ciddi kazaları kaçırılmaya öncelik veren bir yaklaşımla eşik değeri düşürüldüğünde (örneğin 0,011) modelin başarısı önemli ölçüde artmıştır. Bu durumda bazı tehlikesiz kazalar yanlışlıkla "ciddi" olarak etiketlense de (Precision düşmüş), gerçekten ciddi olan kazaların çoğu tespit edilebilmiştir (Recall %91'e yükselmiş). Çalışmanın bulguları, makine öğrenimi yaklaşımlarının endüstriyel kazaların şiddetini tahmin etmede etkili bir araç olabileceğini göstermektedir. Ancak model performansı veri kalitesi ve eksiksizliğine bağlıdır; eksik öznitelik sayısının yüksek olduğu olaylar ve nadir olaylar için sınıflandırma başarısı düşmektedir.

Chai vd. (2025) ABD'deki 1971-2023 yılları arasındaki 600.000'den fazla tehlikeli madde taşımacılığı kazasını, Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration (PHMSA) veri tabanından elde ederek analiz etmiş ve makine öğrenmesi tabanlı bir risk erken uyarı sistemi geliştirmiştir. Veriler, kaza zamanı, hava koşulları, araç hızı, paket kapasitesi ve tehlikeli madde sınıfı gibi 201 farklı alan içermekte olup, eksik veriler missForest iteratif interpolasyon yöntemi ve

çok özellikli üretici ağ algoritması ile tamamlanmış, kategorik dengesizlikler ise Sentetik Azınlık Aşırı Örnekleme Tekniği (SMOTE) ile düzeltilmiştir. K-katlı çapraz doğrulama (K=5) ile Karar Ağacı (DT), Rastgele Orman (RF), ExtraTrees (ET), k-En Yakın Komşu (k-NN) ve XGBoost (XGB) modelleri test edilmiş ve bunların Yığınlama algoritması ile birleştirilmesiyle "SF-T0.25" füzyon modeli oluşturulmuştur. Model, RF, ET, XGB ve k-NN'yi temel öğreniciler, DT'yi ise meta-öğrenici olarak kullanarak 0,9628 doğruluk oranı, 0,97'nin üzerinde Jaccard benzerlik katsayısı ve 0.05'in altında Çapraz Entropi Kaybı değerleri elde etmiş; kaza zamanı, hava koşulları ve anlık hız aralığı tahminlerinde tek başına en iyi performans gösteren ET modelini (0,94981) geride bırakarak tehlikeli madde taşımacılığı risk uyarı sistemleri için yüksek güvenilirlikli veri desteği sağlamıştır.

4. Bulgular ve Tartışma

4.1. Kullanılan Metodolojiler ve Araçlar

Endüstriyel kazalardan kaynaklanan hava kirliliğinin risk değerlendirmesinde kullanılan metodolojiler, son çeyrek asırda, basit matematiksel formülasyonlardan karmaşık olasılıksal modellere, oradan da veri odaklı makine öğrenmesi yaklaşımlarına doğru evrilmiştir. İncelenen çalışmalar, bu metodolojik çeşitliliğin yanı sıra disiplinler arası yaklaşımların zenginliğini de ortaya koymaktadır. Kimyasal sızıntıların atmosferik dağılımını modellemek için farklı yazılımlar kullanılmıştır. ALOHA yazılımı Tahmid vd. (2020), Liu vd. (2018) ve Liu vd. (2024) tarafından; BREEZE yazılımı Liu vd. (2018) ve Zhang vd. (2022) tarafından; PHAST yazılımı ise Liu vd. (2019) tarafından tercih edilmiştir. Risk değerlendirme metodolojileri, atmosferik dağılım modellerinden elde edilen tehlike bilgisini zarargörebilirlik ve maruziyet verileri ile entegre ederek nihai risk tahminini üretmektedir.

Achour vd. (2005) tarafından geliştirilen GERA endeksi, proses giriş-çıkış akımları ve birim operasyonlarının risklerini matematiksel olarak birleştirerek çevresel risk değerlendirmesi sağlamaktadır. Chen vd. (2014) ise tehlikeli madde özellikleri, üretim prosesi, ekipman durumu, çevresel emniyet yönetimi ve zarargörebilirlik faktörlerini çarpımsal bir formülasyonla entegre etmiştir. Bu yaklaşımların temel avantajı hesaplama kolaylığı ve sonuçların yorumlanabilirliği olmakla birlikte, belirsizlikleri yeterince dikkate alamamaları önemli bir sınırlılık oluşturmaktadır.

Çok kriterli karar verme yöntemleri, uzman görüşlerini sistematik olarak entegre etme kapasiteleri nedeniyle yaygın kullanım bulmaktadır. Yang vd. (2022) Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ile entropi ağırlık metodunu birleştirerek, belirteç ağırlıklarını hem subjektif (uzman yargısı) hem de objektif (veri yapısı) yaklaşımlarla dengelemiştir. Bu hibrit ağırlıklandırma, tek yönlü yaklaşımların zayıf yönlerini telafi etmektedir. Liu vd. (2024) Gri İlişki-TOPSIS hibrit yöntemini kırılganlık sıralamasında kullanarak, belirsizlik koşullarında karar verme problemlerine çözüm aramıştır. Mekânsal analiz yöntemleri de risk değerlendirmesinin vazgeçilmez bileşenleri haline gelmiştir. Yang vd. (2022) Geodetector metodolojisi ile coğrafi faktörlerin risk üzerindeki etkilerini istatistiksel olarak analiz ederken, Liu vd. (2020) aynı yaklaşımı meteorolojik ve antropojenik faktörlerin ozon konsantrasyonları üzerindeki etkileşimlerini incelemek için kullanmıştır.

Olasılıksal yöntemler, belirsizliklerin sistematik olarak değerlendirilmesi açısından kritik önem taşımaktadır. Liu vd. (2019) Latin Hiperküp Örnekleme ile birleştirilen 1000 iterasyonluk Monte Carlo simülasyonu gerçekleştirerek, amonyak sızıntısının öldürücü yarıçapının 100-3500 m arasında değişebileceğini ve bu geniş aralığın parametre belirsizliklerinden kaynaklandığını göstermiştir. Çalışma ayrıca Morris duyarlılık analizi yöntemi ile 15 yörünge ve 8 örnekleme seviyesinde 120 örnek grubu oluşturarak, model çıktısına en fazla katkıda bulunan 8 parametreyi belirlemiştir. Bu tür duyarlılık analizleri, sınırlı kaynakların en etkili şekilde tahsis edilmesi için hangi parametrelerin daha dikkatli ölçülmesi veya kontrolü gerektiğini göstermektedir. Bayes Ağları, nedensellik ilişkilerini olasılıksal olarak modellemede güçlü bir araç olarak öne çıkmaktadır. Zhang vd. (2022) endüstriyel kaza sonucu hava kirliliği riskini Bayes Ağları ile olasılıksal olarak analiz eden ilk kapsamlı çalışmayı gerçekleştirmiştir.

Hibrit yaklaşımlar, farklı metodolojilerin güçlü yönlerini birleştirerek daha kapsamlı risk değerlendirmesi sağlamaktadır. Liu vd. (2018) tarafından geliştirilen Hibrit Mekansal Risk Değerlendirme (HSRA) metodolojisi, çoklu tehlike-alıcı-son nokta rotalarını entegre etmektedir. Liu vd. (2024) ise tehlike modellemesi, kırılabilirlik değerlendirme ve Borda sayım yöntemini entegre ederek, geleneksel risk matrislerinin "kümelenme" sorununa çözüm aramıştır. Tahmid vd. (2020) sonuç ve risk tabanlı yaklaşımları kısmen birleştiren Nüfus Zarargörebilirlik-Risk Modelini geliştirerek, Bangladeş'teki Meghnaghat Sanayi Bölgesi'nde 23 kimyasal tesisin çevresindeki nüfusun maruz kaldığı riski değerlendirmiştir.

Makine öğrenmesi uygulamaları, son yıllarda risk değerlendirmesinde yeni bir paradigma oluşturmaktadır. Endüstriyel kazalar bağlamında gerçekleştirilen karşılaştırmalı çalışmalar, farklı algoritmaların performans özelliklerini ortaya koymaktadır. Chebila (2021) AB Büyük Kaza Raporlama Sisteminde (eMARS) kayıtlı 1.015 kaza üzerinde altı farklı algoritma test etmiştir. İnsan kayıpları için Rastgele Ormanlar yaklaşık % 80 doğruluk, F1 skoru ve AUC değerleri ile en iyi performansı gösterirken, Sinir Ağları ikinci sırada yer almıştır. Tamascelli vd. (2022) MHIDAS veritabanındaki 8.900'den fazla kaza kaydı üzerinde Wide (basit doğrusal), Deep (derin sinir ağı) ve Wide&Deep (hibrit) modellerini karşılaştırmıştır. Wide&Deep hibrit model hem basit hem karmaşık modelin avantajlarını birleştirerek genel performansta en üstün sonuçları vermiştir. Chai vd. (2025) ABD'deki 1971-2023 yılları arasındaki 600.000'den fazla tehlikeli madde taşımacılığı kazasını PHMSA veritabanından elde ederek analiz etmiştir. Karar Ağacı, Rastgele Orman, ExtraTrees, k-En Yakın Komşu ve XGBoost modellerinin Yığınlama algoritması ile birleştirilmesiyle oluşturulan "SF-T0.25" füzyon modeli, % 96,28 doğruluk oranı elde etmiştir.

4.2. Belirteçler Sistematiği

İncelenen çalışmalarda risk değerlendirmesi için kullanılan belirteçler; tehlike, zarargörebilirlik/maruziyet ve direnç olmak üzere üç ana kategori altında Çizelge 2'de verilmektedir. Tehlike belirteçleri, risk kaynaklarının içsel özelliklerini tanımlamaktadır. Kimyasal madde karakteristikleri tüm çalışmalarda temel gösterge olup, madde türü, miktar ve kritik eşik değerlere göre normalleştirilmiş stok miktarı evrensel parametrelerdir. Topuz vd. (2011) yangınlık, reaktivite, korrozivite, toksisite, patlayıcılık, kalıcılık, biyobirikim, yoğunluk, çözünürlük ve uçuculuk gibi kapsamlı bir liste sunmaktadır. Chen vd. (2014) sıcaklık, basınç ve reaksiyon türünü çarpımsal formülasyonla birleştirerek proses koşullarının sinerjik etkisini modellemektedir. Zarargörebilirlik ve maruziyet belirteçleri, risk alıcıların karakteristiklerini tanımlamaktadır. Nüfus yoğunluğu evrensel bir gösterge olmakla birlikte, Tahmid vd. (2020) ve Liu vd. (2024) dikkate alarak 5 yaş altı, 0-14 yaş ve 65 yaş üstü grupları ayrı değerlendirilmektedir. Chen vd. (2014) medikal tesislere olan uzaklığı, Yang vd. (2022) hastane yoğunluğunu zarargörebilirlik belirteci olarak değerlendirmektedir. Arazi kullanımı Topuz vd. (2011) tarafından konut, endüstriyel, tarımsal ve turistik kategorilerde, Yang vd. (2022) tarafından yerleşim-sanayi karışım derecesi olarak ele alınmaktadır. Ekolojik faktörler Yang vd. (2022) tarafından en kapsamlı şekilde değerlendirilmektedir. Direnç belirteçleri, sistemin dayanma ve toparlanma kapasitesini temsil etmektedir. Chen vd. (2014) izleme araçları, yönetim sistemi, acil durum müdahale sistemi ve çalışan becerisini ele almaktadır. Yang vd. (2022) toksik gaz izleme, erken uyarı sistemleri ve emniyet koruma düzeyini öne çıkarmaktadır. Zhang vd. (2022) en yakın hastaneye ve yola erişilebilirlik ile tesis güvenlik sistemleri performansını direnç belirteçleri olarak değerlendirmektedir. Liu vd. (2018) yönetim seviyesini direnç kapasitesi göstergesi olarak kullanmaktadır.

Disiplinler arası perspektif farkları belirgindir. Çevre mühendisliği odaklı çalışmalar ekolojik faktörlere, çevresel kaliteye ve ekosistem koruma statüsüne vurgu yapmaktadır. Kimya ve proses mühendisliği odaklı çalışmalar madde özellikleri, proses koşulları ve ekipman güvenilirliğine odaklanmaktadır. Makine öğrenmesi çalışmaları kaza karakteristiklerine yoğunlaşmaktadır.

Çizelge 2. Literatürde İncelenen Çalışmalarda Kullanılan Belirteçler

Zhao vd.(2010)	Tehlike Belirteçleri: Tehlikeli Madde Türü, Tehlikeli Madde Miktarı Zarar görebilirlik /Maruziyet Belirteçleri: - Direnc Belirteçleri: -
Topuz vd.(2011)	Tehlike Belirteçleri: -Maddenin Özellikleri (maddenin yanıcılığı, reaktivitesi, korrozivitesi, toksisitesi, patlayıcılığı, kalıcılığı, biyobirikimi, yoğunluğu, çözünürlüğü, uçuculuğu), -Meteorolojik koşullar (rüzgâr hızı, rüzgâr yönü, nem, sıcaklık), -Taşımacılık modu (deniz, hava, karayolu, borualtı), - Elleçleme bilgisi (elleçleme sıklığı, elleçleme miktarı, depolama süresi, depolama koşulları, -Proses Koşulları (ekipman durumu, tesis şartları, operatör faktörleri), -Yönetimsel faktörler, -Afetsellik (deprem, taşkın, fırtına) Zarar görebilirlik /Maruziyet Belirteçleri: -Bölgenin konut, endüstriyel, tarımsal, turistik amaçlı kullanımı, -Çevredeki su havzaları, ormanlar, flora/fauna durumu, -Nüfus yoğunluğu Direnc Belirteçleri:-
Chen vd.(2014)	Tehlike Belirteçleri- Maddenin Özellikleri (tehlikeli madde türü, tehlikeli madde miktarı, tehlikeli maddelerin kimyasal ve fiziksel özelliği), -Proses Koşulları (Sıcaklık, basınç, reaksiyon türü (kimyasal/fiziksel reaksiyon), üretim prosesleri sayısı, tank ve depolama ünitelerinin sayısı, ekipman içsel riski, ekipman hata oranı, ekipman yıpranma durumu, ekipman arıza oranı, üretim sonrası geçen yıl) Zarar görebilirlik /Maruziyet Belirteçleri: -Nüfus Yoğunluğu (Tesis yakınındaki nüfus yoğunluğu) , - Çevresel Duyarlılık(Ekolojik hedeflerin sayısı), - Petrokimyasal ve benzer tesislerin sayısı (diğer tesis ve kuruluşlara olan uzaklık-Medikal Tesislere Olan Uzaklık, -Yolların Durumu Direnc Belirteçleri: -İzleme Araçları (kirlilik emisyonları ve üretim prosesleri araç, kontrol ve izleme sistemleri) -Yönetim Sistemi (ISO14000 ve ISO18000), -Acil Durum sistemi (Acil durum eylem ve müdahale planları) -Çalışan Becerisi (Çalışanların deneyim yılı ve eğitim düzeyi)
Liu vd. (2018)	Tehlike Belirteçleri: -Tehlikeli madde stok miktarı, tehlikeli madde eşik değeri, -Üretim seviyesi Zarar görebilirlik /Maruziyet Belirteçleri: -Nüfus yoğunluğu, -Ekosistem koruma statüsü, -Tarımsal ekonomik Büyüklük Direnc Belirteçleri: -Yönetim seviyesi
Tahmid vd.(2020)	Tehlike Belirteçleri: - Modelleme sonuçları Zarar görebilirlik /Maruziyet Belirteçleri: -Nüfus Yoğunluğu, -5 Yaş Altı Nüfus, -65 Yaş Üstü Nüfus, - Cinsiyet, -Engellilik, -Okur-Yazarlık Oranları Direnc Belirteçleri: -
Yang vd.(2022)	Tehlike Belirteçleri: - Endüstri sınıfı, -Tehlikeli maddenin çevresel kaza riski, -Tehlikeli madde stoğunun kritik kütleye oranı, -Kaza olasılığı, -Kuruluş yoğunluğu,-Çevresel riske sahip kuruluş yoğunluğu Zarar görebilirlik /Maruziyet Belirteçleri: -Nüfus yoğunluğu, -GSYİH, -Ekolojik duyarlılık (eğim, bakı, yükseklik, nehir, göl, yol trafiği ve arazi kullanım tipi), -Ekolojik işlev önemi (su koruma alanı, toprak ve su koruma işlevi, biyoçeşitlilik), -İşletmenin 1 km içindeki nüfus yoğunluğu, -Hastane yoğunluğu, - Yerleşim alanı ve sanayi bölgesi karışım derecesi, -Atmosferik çevre kalite zonlaması Direnc Belirteçleri: -Toksik gaz sızıntı izleme ve erken uyarı önlemleri, -Emniyet koruma düzeyi
Zhang vd.(2022)	Tehlike Belirteçleri: -Rüzgâr yönü frekansı, -BREEZE/AFTOX/SLAB modelleri dağılım mesafesi Zarar görebilirlik /Maruziyet Belirteçleri: -Nüfus yoğunluğu, -Etkilenen alan büyüklüğü, -PAC-1 limitine göre maruziyet seviyesi Direnc Belirteçleri: -En yakın hastaneye erişilebilirlik, -En yakın yola erişilebilirlik, -Tesis güvenlik sistemleri performansı
Sakti vd.(2023)	Tehlike Belirteçleri: -Sentinel-5P uzaktan algılama hava kirliliği konsantrasyon verileri Zarar görebilirlik /Maruziyet Belirteçleri: -Nüfus yoğunluğu, -Hava kirliliği kaynakları verisi (endüstriyel alanlar, yanan alanlar, madencilik alanları, aktif volkanlar, yollar ve enerji santralleri gibi çeşitli kirlilik kaynaklarından mesafe) Direnc Belirteçleri:-
Liu vd.(2024)	Tehlike Belirteçleri: -Meteorolojik veriler (hava sıcaklığı, rüzgâr hızı ve yönü, atmosferik stabilite) Zarar görebilirlik /Maruziyet Belirteçleri: -Nüfus (kırsal idari birimler ve kentsel idari birimler, (0-14 yaş ve 65+ yaş nüfus oranları) Direnc Belirteçleri:- GSYİH, -Kentsel/kırsal kişi başı gelir, -Tıbbi personel sayısı, -Eğitim seviyesi

5. Sonuçlar ve Öneriler

Bu araştırma, endüstriyel kaza sonrası hava kirliliği riskinin tahmininde çeşitli metodolojilerin geliştirildiğini göstermekle birlikte, alanın standart bir yaklaşımdan yoksun olduğunu ortaya koymaktadır. İncelenen çalışmalarda yöntem seçimi, belirteç sistematigi ve

ağırlıklandırma yaklaşımları arasında önemli farklılıklar bulunmakta, bu durum sonuçların karşılaştırılabilirliğini sınırlamaktadır.

Metodolojik açıdan, her yaklaşımın belirgin avantaj ve kısıtları bulunmaktadır. İndeks tabanlı yöntemler hesaplama kolaylığı sağlamakla birlikte belirsizlikleri yeterince dikkate alamamaktadır. Çok kriterli karar verme yöntemleri uzman görüşlerini sistemik olarak entegre etmekte, ancak subjektif ağırlıklandırma sorunu taşımaktadır. Olasılıksal yöntemler, özellikle Monte Carlo simülasyonları ve Latin Hiperküp Örnekleme ile birleştirildiklerinde, parametre belirsizliklerini sistemik olarak değerlendirmede araçlar sunmaktadır. Bayes ağları ise nedensellik ilişkilerini olasılıksal olarak modellemede ve değişkenler arası etkileşimleri anlamada etkili sonuçlar vermektedir. Hibrit yaklaşımlar (HSRA, Borda sayım yöntemi), farklı metodolojilerin güçlü yönlerini birleştirerek daha kapsamlı risk değerlendirmesi sağlayabilmektedir.

Belirteç sistemleri açısından değerlendirildiğinde, çalışmaların tehlike, zarargörebilirlik/maruziyet ve direnç olmak üzere üç ana kategori altında farklı gösterge setleri kullandığı görülmektedir. Tehlike belirteçlerinde kimyasal madde özellikleri, proses koşulları ve meteorolojik parametreler; zarargörebilirlik belirteçlerinde nüfus yoğunluğu, yaş grupları, arazi kullanımı ve ekolojik faktörler; direnç belirteçlerinde ise izleme sistemleri, acil müdahale altyapısı ve yönetim kapasitesi öne çıkmaktadır. Ancak belirteç seçimi ve tanımlamalarında standardizasyon eksikliği, çalışmaların karşılaştırılabilirliğini sınırlamaktadır. Disiplinler arası perspektif farkları belirgindir.

Makine öğrenmesi uygulamaları, risk değerlendirmesinde geleneksel yöntemlere alternatif olarak öne çıkmaktadır. Özellikle Rastgele Ormanlar ve XGBoost gibi topluluk öğrenmesi algoritmaları kaza sonuçlarını tahmin etmede %80-96 arasında başarı oranları göstermektedir. Hibrit modeller (Wide&Deep) ise hem ezberlemede hem de genellemede üstün performans sergilemektedir. Ancak bu yaklaşımların etkinliği veri kalitesi, miktarı ve veri setlerindeki dengeye doğrudan bağlıdır. Nadir olayların tahmininde performans düşüşü yaşanmakta, bu durum dengesiz veri setlerinin işlenmesi ve model yorumlanabilirliği konularında ek çalışmalara ihtiyaç olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde, tarihsel kaza verilerine dayalı analizler önemli bilgiler sunmakla birlikte, yetersiz dokümantasyon ve veri standardizasyonu eksikliği nedeniyle sınırlılıklar taşımaktadır.

Önemli bir tespit, mevcut kaza veri tabanlarının (ARIA, CSB vb.) çevresel etkilere yönelik özel filtreleme seçenekleri sunmamasıdır. Bu durum hava, toprak ve su kirliliği gibi spesifik çevresel sonuçların sistemik analizini zorlaştırmaktadır. Bununla birlikte; endüstriyel kaza ölçeği gibi değerlendirme sistemleri bölgesel düzeyde kalmakta, uluslararası standart bir yapı bulunmamaktadır. Türkiye'de ise kamuya açık kapsamlı bir endüstriyel kaza veri tabanı eksikliği önemli bir boşluk oluşturmaktadır.

Bu tespitler, gelecek araştırmalar için birkaç kritik ihtiyacı ortaya koymaktadır: kaza veritabanları arasında standardizasyonun sağlanması (çevresel etkilere yönelik özel filtreleme seçenekleri ve uluslararası kaza ölçeklerinin benimsenmesi dahil) ve ulusal düzeyde kapsamlı endüstriyel kaza veri tabanının oluşturulması, makine öğrenmesi algoritmalarının olasılıksal yöntemlerle entegrasyonu, disiplinler arası iş birliğinin güçlendirilmesi ve gerçek zamanlı veri entegrasyonunun geliştirilmesi.

Kaynaklar

- Achour, M. H. Haroun, A. E. Schult, C. J. And Gasem, K. A M. 2005. A new method to assess the environmental risk of a chemical process. *Chemical Engineering and Processing*, 44: 901-909. doi:10.1016/j.ccep.2004.10.003
- Anonim. 2017. Key Lessons for Preventing Inadvertent Mixing During Chemical Unloading Operations, Chemical Reaction and Release in Atchison, Kansas, No. 2017-01-I-KS. <https://www.csb.gov/file.aspx?DocumentId=6047> (Erişim Tarihi: 10.10.2025).
- Anonim. 2018. FCC Unit Explosion and Asphalt Fire at Husky Superior Refinery Investigation Report, No. 2018-02-I-WI. [https://www.csb.gov/assets/1/6/Husky_Superior_Refinery_Report_2022-12-23_\(1\).pdf](https://www.csb.gov/assets/1/6/Husky_Superior_Refinery_Report_2022-12-23_(1).pdf) (Erişim Tarihi: 10.10.2025).

- Anonim. 2018. The World's Worst Industrial Disaster Is Still Unfolding. <https://www.theatlantic.com/science/archive/2018/07/the-worlds-worst-industrial-disaster-is-still-unfolding/560726/> (Erişim Tarihi: 10.10.2025).
- Anonim. 2022. Announcing the results of the investigation into the Aqaba port accident and referring the investigation file to the Public Prosecution. <https://www.arabiaweather.com/en/content/announcing-the-results-of-the-investigation-into-the-aqaba-port-accident-and-referring-the-investigation-file-to-the-public-prosecution> (Erişim Tarihi: 20.10.2025).
- Anonim. 2022. Chlorine gas leak at Aqaba port causes 13 deaths, 250 injuries. <https://thearabweekly.com/chlorine-gas-leak-aqaba-port-causes-13-deaths-250-injuries> (Erişim Tarihi: 20.10.2025).
- Anonim. 2025. The Aria Industrial Accident Database. <https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/?lang=en> (Erişim Tarihi: 10.10.2025).
- Anonim. 202). [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health) (Erişim tarihi: 01.09.2025)
- Anonim. 2025. Report: Catastrophic Explosions at Bandar Abbas Port Reveal Iran's Regime Negligence and Economic Fragility. <https://www.ncr-iran.org/en/news/economy/report-catastrophic-explosions-at-bandar-abbas-port-reveal-regime-negligence-and-economic-fragility/> (Erişim Tarihi: 20.10.2025).
- Anonim. 2025. Gujarat: 5 dead, 57 injured as explosion rocks Dahej pesticide company in Bharuch district. <https://timesofindia.indiatimes.com/city/surat/ghujarat-5-dead-32-injured-in-dahej-pesticide-company-explosion/articleshow/76175766.cms> (Erişim tarihi: 10.10.2025).
- Casal J. 2008. Evaluation of the Effects and Consequences of Major Accidents in Industrial Plants. *Industrial Safety Series*, 8
- Chebila, M. 2021. Predicting the consequences of accidents involving dangerous substances using machine learning. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 208: 111470. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111470>
- Chai, H., Dong, K., Liang, Y., Han, Z. and He, R. 2025. Machine learning-based accidents analysis and risk early warning of hazardous materials transportation. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 95: 105594. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2025.105594>
- Chen, Q. Jia, Q. Yuan, Z. Huang, L. 2014. Environmental risk source management system for the petrochemical industry. *Process Safety and Environmental Protection*, 9: 251-260. Doi:10.1016/j.psep.2013.01.004
- Demirarslan, K.O. Doğruparmak, Ç ve Karademir, A. 2017. Evaluation of three pollutant dispersion models for the environmental assessment of a district in Kocaeli, Turkey. *Global NEST Journal*, 19, No 1: 37-48
- Dominski, F.H., Branco, J.H.L., Buonanno, G., Stabile, L., Da Silva, M.G. and Andrade, A. 2021. Effects of air pollution on health: a mapping review of systematic reviews and meta-analyses. *Environmental Research*, 201: 11487. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111487>
- Eckerman, I. 2005. The Bhopal Saga – Causes and Consequences of the World's Largest Industrial Disaster. *Universities Press (India) Private Limited*.
- Effatpanah, M., Effatpanah, H., Jalali, S., Parseh, I., Goudarzi, G., Barzegar, G., Geravandi, S., Darabi, F., Ghasemian, N. and Mohammadi, M. 2020. Hospital admission of exposure to air pollution in Ahvaz megacity during 2010–2013. *Clinical Epidemiology and Global Health*, 8: 550-556. <https://doi.org/10.1016/j.cegh.2019.12.001>
- Ghannam, K. and El-Fadel, M. 2013. Emissions Characterization and Regulatory Compliance at An Industrial Complex: An Integrated MM5/Calpuff Approach. *Atmospheric Environment Elsevier Journal*, 69:156-169. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.12.022>
- Gümriükçüoğlu, M. 2012. Determination of Industrial Sulfur Dioxide Emissions and Mapping by Geographic Information System, <https://acikerisim.sakarya.edu.tr/handle/20.500.12619/50115>.
- Hanna, S.R., Egan, B.A., Purdum, J. And Wagler, J. 2005. Comparison of AERMOD, ISC3, and ADMS Model Performance with Five Field Data Sets. *International Journal of Environment and Pollution*, 16: 301-314.
- Homburger, E., Reggiani, G., Sambeth, J. and Wipf, H. 1979. The Seveso Accident: Its Nature, Extent and Consequences. *The Annals of Occupational Hygiene*, 22: 327-330. <https://doi.org/10.1093/annhyg/22.4.327>
- Huang, W., Xu, H., Wu, J., Ren, M., Ke, Y. and Qiao, J. 2024. Toward cleaner air and better health: Current state, challenges, and priorities. *Science Journal*, 385: 386-390. <https://doi.org/10.1126/science.adp7832>
- Hunsaker, C., Graham, R. L., Suter, G.W., O'Neill, R.V., Barnhouse, L.W. and Gardner, R.H. 1990. Assessing Ecological Risk on a Regional Scale. *Environmental Management*, 14: 325-332.
- Jianfeng, L., Bin, Z., Yang, W. and Mao, L. 2009. The unfolding of '12.23' Kaixian blowout accident in China. *Safety Science*, 47: 1107-1117. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2008.12.005>
- Lamba, V. 2022. Sitapura Industrial Disaster in Jaipur and Its Management. *International Journal of Trend in Scientific Research and Development*, 6: 240-249. <https://journals.indexcopernicus.com/api/file/viewByFileId/1567713>
- Landrigan, P., Fuller, R., Acosta, N.J.R., Adeyi, O., Arnold, R., Basu, N., Balde, A.B., Bertollini, R., Bose-O'Reilly, S., Boufford, J.I., Breysse, P.N. and Zhong, M. 2024. The Lancet Commission on pollution and health. *Lancet*, 391: 462-512. [http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)32345-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736(17)32345-0)
- Liu, R., Liu, J., Zhang, Z., Borthwick, A., Cai, Y., Dong, L. and Du, X. 2018. Risks of airborne pollution accidents in a major conurbation: Case study of Zhangjiakou, a host city for the 2022 Winter Olympics. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 32: 3257-3272. Doi: 10.1007/s00477-018-1590-5

- Liu, H.L., Liu, N. and Shen, F. 2019. Parameter uncertainty analysis in environmental risk assessment caused by hazardous chemical accident. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(5): 11851-11867
- Liu, J., Tan, L. and Ma, Y. 2024). An integrated risk assessment method for urban areas due to chemical leakage accidents. *Reliability Engineering and System Safety*, 247: 110091. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.110091>
- Liu, P., Song, H., Wang, T., Wang, F., Li, X., Miao, C. and Zhao, H. 2020. Effects of meteorological conditions and anthropogenic precursors on ground-level ozone concentrations in Chinese cities. *Environmental Pollution*, 262: 114366
- Ma, X., Tsai, Y., Shu, C. and Yang, Y. 2025. Risk evolution analysis of gas leakage accidents based on complex network. *Safety Science*, 182: 106692. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106692>
- Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A. and Bezirtzoglou, E. 2020. Environmental and health impacts of air pollution: a review. *Public Health*, 8: 1-13. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>
- Manish, S. and Sunil, M. 2013. Emission of Atmospheric Pollutants during IOCL-Sitapur, Jaipur fire 2009, India. *Research Journal of Chemical Sciences*, 3: 75-79. <https://www.isca.me/rjcs/Archives/v3/i7/11.ISCA-RJCS-2013-104.pdf>
- Martens, D.S., Cox, B., Janssen, B.G., Clemente, D.B.P., Gasparini, A., Vanpoucke, C., Lefebvre, W., Roels, H.A., Plusquin, M. and Nawrot, T.S. 2017. Prenatal air pollution and newborns' predisposition to accelerated biological aging. *JAMA Pediatrics*, 171: 1160-1167. <https://doi.org/10.1001/jamapediatrics.2017.3024>
- Merson, J. R., Migeon, M., Marn, J. and Showstark, Ma. 2025. Mass Casualty Incidents. *Physician Assistant Clinics*, 10: 771-791. <https://doi.org/10.1016/j.cpha.2025.06.009>
- Nazar, W. and Niedoszytko, M. 2022. Air pollution in Poland: a 2022 narrative review with focus on respiratory diseases. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19: 1-20. <https://doi.org/10.3390/ijerph19020895>
- Nyadanu, S.D., Dunne, J., Tessema, G.A., Mullins, B., Boateng, B.K., Bell, M.L., Duko, B. and Pereira, G. 2022. Prenatal exposure to ambient air pollution and adverse birth outcomes: An umbrella review of 36 systematic reviews and meta-analyses. *Environment International*, 306: 119465. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119465>
- Obasi, I., Cheng, P., Mikellidou, C., Dimopoulos, C. and Boustra, G. 2025. Machine learning for occupational accident analysis: Applications, challenges, and future directions. *Journal of Safety Science and Resilience*, 7: 100250. <https://doi.org/10.1016/j.jnlssr.2025.100250>
- Riddle, A., Carruthers, D., Sharpe, A., McHugh, C. and Stocker, J. 2004. Comparisons between FLUENT and ADMS for atmospheric dispersion modelling. *Atmospheric Environment*, 38 (7), 1029-1038. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2003.10.052>
- Romanello, M., Walawender, M., Hsu, S., Moskeland, A., Silva, R., Scamman, D., Ali, Z., Ameli, N., Angelova, D., Basart, S., Beagley, J. and Beggs, P.J. 2024. The 2024 report of the Lancet Countdown on health and climate change: facing record-breaking threats from delayed action. *Lancet Review*, 404: 1847-1856. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(24\)01822-1](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(24)01822-1)
- Sagan, V., Pasken, R., Zarauz, J. and Krotkov, N. 2018. SO₂ trajectories in a complex terrain environment using CALPUFF dispersion model, OMI and MODIS data. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, 69: 99-109. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.03.003>
- Sakti, A.D., Anggraini, T.S., Ihsan, K.T.N., Misra, P., Trang, N.T.Q., Pradhan, B., Wenten, G., Hadi, P.O. and Wikantika, K. 2023. Multi-air pollution risk assessment in Southeast Asia region using integrated remote sensing and socio-economic data products. *Science of the Total Environment*, 854: 158825. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158825>
- Sivaraman, S. and Varadharajan, S. 2021. Investigative consequence analysis: A case study research of beirut explosion accident. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 69: 104837. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104387>
- State of Global Air. 2024. *A Special Report On Global Exposure To Air Pollution and Its Health Impacts, With A Focus On Children's Health*. <https://www.stateofglobalair.org/resources/report/state-global-air-report-2024>
- Tahmid, M., Dey, S. and Syeda, S. 2020. Mapping Human Vulnerability and Risk due to Chemical Accidents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 68: 104289. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104289>
- Tamascelli, N., Solini, R., Paltrinieri, N. and Cozzani, V. 2022. Learning from major accidents: A machine learning approach. *Computers and Chemical Engineering*, 162: 107786. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107786>
- Topuz, E., Talinli, I. ve Aydin, E. 2011. Integration of environmental and human health risk assessment for industries using hazardous materials: A quantitative multi criteria approach for environmental decision makers. *Environment International*, 37: 393-403
- Trivedi, P., Purohit, D. and Soju, A. 2014. *Major Industrial Disasters in India*. National Institute of Occupational Health, 9: 1-8. <https://www.researchgate.net/publication/316284188>
- Truong, S.C.H., Lee, M., Kim, G., Kim, D., Park, J., Choi, S. and Cho, G. 2016. Accidental benzene release risk assessment in an urban area using an atmospheric dispersion model. *Atmospheric Environment*, 144: 146-159
- Türkcan, B. (2024). Türkiye Afet Yönetiminde Kritik Bileşen Natech: Depremlerin Tetiklediği Endüstriyel Kazalar. *Memleket Siyaset Yönetim*, 43: 463-490. DOI: 10.56524/msydergi.1533555
- Varma, R. and Varma, D.R. 2025. The Bhopal Disaster of 1984. *Bulletin of Science, Technology and Society*, 25: 37-45. <https://doi.org/10.1177/0270467604273822>

- Yang, M., Shi, L. and Liu, B. 2022. Risks assessment and driving forces of urban environmental accident. *Journal of Cleaner Production*, 340:130710. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130710>
- Zhang, H., Liu, R., Liu, J. and Zhang, Z. 2022. Formal Probabilistic Risk Analysis of Accidental Air Pollution in A Development Zone Using Bayesian Networks. *Journal of Cleaner Production*, 372: 133774. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133774>
- Zhang, Y., Hu, Y., Talarico, R., Qiu, X., Schwartz, J., Fell, D.B., Oskoui, M., Lavigne, E. and Messerlian, C. 2024. Prenatal exposure to ambient air pollution and cerebral palsy. *JAMA Netw. Open*, 7: 2420717. <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2024.20717>
- Zhao, K.R., Quan, D.Y., Yang, D.Y., Yang, J. and Lin, K. 2010. A System for Identifying and Analyzing Environmental Accident Risk Sources. *International Society for Environmental Information Sciences 2010 Annual Conference (ISEIS)*, 2010: 1413-1421. doi:10.1016/j.proenv.2010.10.154
- Zhou, D., Yang, Y., Zhao, Z., Zhou, K., Zhang, D., Tang, W. and Zhou, M. 2025. Air pollution-related disease and economic burden in China, 1990–2050: A modelling study based on Global burden of disease. *Environment International*, 196: 109300. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2025.109300>