



Journal of Turkish Operations Management

Yüksek seviyeli radyoaktif maddelerin taşınmasında hata ağacı analizi yönteminin kullanımının incelenmesi

Furkan Erdoğan^{1*}, Ergün Eraslan²

¹İş Sağlığı ve Güvenliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Ankara, Türkiye
e-mail: furkanmavi1990@hotmail.com, ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-0091-5257>

²İş Sağlığı ve Güvenliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Ankara, Türkiye
e-mail: eraslan@ybu.edu.tr, ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-5667-0391>

*Sorumlu yazar

Makale Girişi

Makale Geçmişi:

Geliş: 03.06.2020
Revize: 10.07.2020
Kabul: 27.10.2020

Anahtar Kelimeler

İSG,
Radyoaktif Maddeler,
Yüksek Seviyeli Radyoaktif Maddelerin
Taşınması,
Hata Ağacı Analizi

Özet

Radyoaktif maddeler, sahip oldukları potansiyel risk büyüklüğü göz önüne alındığında, kaza olması durumunda acil müdahale gerektiren tehlikeli maddeler sınıfında yer almaktadır. Kaza sonrasında, dünya genelinde kayda geçen radyoaktif madde taşıma kazası birkaçı geçmese dahi, gerekli tüm taşıma tedbirleri alınmalı, çalışanlar ve toplum bilgilendirilmeli ve acil önem durum planları yapılmalıdır. Radyoaktif maddelerin taşınması, ulusal ve uluslararası otoritelere belirlenen özel kurallar ve koşullar dikkate alınarak, maddelerin sahip olduğu radyolojik riskler göz önünde bulundurularak, her bir madde farklı özelliklerine göre sınıflandırılarak taşınmalıdır. Radyoaktif maddenin taşıma süreci; kaynağın içerisinde taşınacağı kabın tasarımı ve imalatı dahil olmak üzere, hazırlanan paketlerin etiketlenmesi, yüklenmesi, taşınması, indirilmesi, geçici olarak depolanması ve alıcıya teslim edilmesi aşamalarını kapsamaktadır. Çalışmada, karmaşık bir yapıya sahip olan radyoaktif madde taşımacılığı sırasında herhangi bir kazanın gerçekleşmesine neden olacak olaylar hata ağacı analizi ile incelenecektir. Burada amaç, taşıma kazasına neden olacak olay dizileri birbirleriyle ilişkilendirilerek, risk analizini güçlendirmek ve hata risklerini en aza indirmektir. Birinci aşamada, ortaya çıkacak tehlikenin ciddiyetine göre esas olay ve esas olayın ortaya çıkmasını etkileyecek faktörler belirlenmiştir. İkinci aşamada, belirlenen hata faktörleri hata ağacına yerleştirilerek durum incelenmiştir. Sonuç olarak, hata ağacı analizi sonucunda kesin bir sayısal değere ulaşmanın mümkün olmadığı sonucuna ulaşılmış, bunun yanında hata ağacı analizin risk faktörlerini ortadan kaldırmak için uygun bir yöntem olduğu belirlenmiştir.

Article Info

Article History:

Received: 03.06.2020
Revised: 10.07.2020
Accepted: 27.10.2020

Keywords

OSHA,
Radioactive Materials,
Transportation of High-Level
Radioactive Materials,
Fault Tree Analysis

Abstract

Radioactive materials are in the class of dangerous substances that require urgent intervention in case of an accident, given the potential risk size they have. After the accident, even if few of the radioactive material accidents recorded worldwide, all necessary transportation measures should be taken, employees and the society should be informed, and emergency plans should be prepared. The transport of radioactive materials should be carried by classifying each item according to its different characteristics, considering the special rules and conditions set by the national and international authorities, considering the radiological risks of the substances. The transport process of the radioactive material includes the design and manufacture of the container, the labeling, loading, transportation, downloading, temporary storage and delivery of the prepared packages to the receiver. In the study, the events that will cause any accident to occur during radioactive material transportation, which has a complex structure, will be analyzed by fault tree analysis. The aim is to strengthen the risk analysis and minimize the risks of errors by correlating the series of events that will cause a transport accident. In the first stage, the main event and the factors affecting the emergence of the main event have been determined according to the severity of the danger to occur. In the second stage, the determined error factors were placed in the fault tree and the situation was examined. As a result, it was concluded that it is not possible to reach a certain numerical value as a result of the fault tree analysis, besides, it was determined that your fault tree analysis is a suitable method to eliminate the risk factors in the system.

1. Giriş

Bir maddenin atom çekirdeğindeki nötron ve proton sayısı birbirine eşit olmadığı durumlarda, bu tür maddeler kararsız bir çekirdek yapısı göstermekte ve çekirdeğindeki nötronlar alfa, beta, gama gibi çeşitli ışınlar yaymak suretiyle parçalanarak kararlı hale geçmeye çalışmaktadır (Lamarsh, 2001). Bu enerji yayılımı olayında *radyasyon*, çevresine bu şekilde ışın saçarak parçalanmış maddelere ise *radyoaktif madde* denir (USNRC, Definitions).

Radyoaktif malzemeler, elektrik enerjisi üretimi, bilimsel araştırma, üretim, endüstriyel süreçler ve tıbbi teşhis ve tedavi dahil olmak üzere çok çeşitli amaçlar için kullanılır (Lamarsh, 2001). Bu çalışma alanlarında çeşitli büyüklükte ve şiddette radyasyon etkilenimi söz konusudur. Radyasyon kavramı hem elektromanyetik hem de partiküller radyasyon alanlarını kapsar. Bunlardan elektromanyetik radyasyonun bir bölümü ile partiküller radyasyon, ulaştıkları hücrelerde iyonlaşmaya neden olduklarından “iyozan- iyonlaştırıcı” radyasyon olarak adlandırılır. Çalışanlar açısından hem iyonizan hem de iyonizan olmayan radyasyon etkilenimi söz konusudur (OSHA, Radiation). Bu etkileşim sonucunda çeşitli sağlık sorunları ortaya çıkabilir. İş sağlığı ve güvenliğinin sağlanması, radyasyonun neden olabileceği maddi ve manevi her türlü etkinin kontrol altına alınabilmesi için; radyasyonun ve etkilerinin çok iyi bilinmesi, bu alanda çalışan tüm personelin gerekli eğitimleri alarak, olası tüm etkilerin önceden engellenmesine yönelik gerekli tüm önlemlerin alınmasını gerektirir (Health and Safety Executive/ Radiations).

Türkiye’de tıbbi ve araştırma tesisleri dışında radyasyona maruz kalmak yaygın olmasa da kurulacak olan Nükleer Güç Santrali sonrasında, kullanılacak yüksek radyoaktif maddeler ve kullanım sonrası oluşacak atık ve kullanılmış yakıtların neden olabileceği etkiler göz önüne alındığında; İş Sağlığı ve Güvenliği uygulamalarının önemi bir kez daha ortaya çıkmaktadır. Bu uygulamalar çalışanların güvenliklerini sağlamanın yanında, halkın ve çevrenin en az düzeyde radyasyon ile temas etmesine katkıda bulunacaktır.

Çalışmanın ikinci bölümünde yüksek seviyeli radyoaktif madde taşıma güvenliğinden bahsedilmiş, üçüncü bölümünde hata ağacı analiz yöntemine yer verilmiş, dördüncü bölümde hata ağacı analizinin yüksek radyoaktif maddelerin taşınmasında risk analizi için kullanılmasına ilişkin gerçekleştirilen uygulama anlatılmış, beşinci bölümde ise sonuç ve tartışmalara yer verilmiştir.

Bu makale araştırma ve yayın etiğine uygun şekilde hazırlanmıştır. Ayrıca, bu makale yüksek lisans tez çalışmasından türetilmiştir. Açık kaynaklardan yararlanıldığı için yasal/özel izin alınması gerekmemektedir.

2. Yüksek Radyoaktif Madde Taşıma Güvenliği

Bölünebilir (Fisil) Malzeme, önemli büyüklükte radyasyon ve ısı salınımına neden olacak kritik bir olay üretme potansiyeline sahip malzemelerdir (IAEA, 2008). Bu nedenle, bölünebilir malzemeler nakliye sırasında nükleer kritiklik güvenliğini sağlamak için daha özenli ve katı paket tasarımı hususları ve kontrolleri gerektirir. Bölünebilir malzeme plütonyum-239, plütonyum-241, uranyum-233, uranyum-235 veya bu radyonüklitlerin herhangi bir kombinasyonu olarak tanımlanır. Işınlanmamış veya sadece termal reaktörlerde ışınlanmış doğal veya tükenmiş Uranyum, bölünebilir malzeme olarak kabul edilmez (Radyoaktif Maddenin Güvenli Taşınması Yönetmeliği, 2005).

Radyoaktif madde taşımacılığı, olası bir radyasyon salınımında, çalışanların, toplumun ve çevrenin yüksek düzeyde radyasyon ile etkileşim içerisine girmesine neden olabilecek çalışma alanlarından biridir. Dünya genelinde her gün, radyoaktif atık ve kullanılmış nükleer yakıtlar da dahil olmak üzere binlerce radyoaktif madde sevkiyatı gerçekleştirilmektedir (IAEA/ Transporting radioactive materials). Radyoaktif materyallerin taşınması araştırma, tıbbi ve endüstriyel amaçlı kullanılan radyoizotopların taşınmasını ve radyoaktif atıklar ile nükleer yakıt çevrimi malzemelerinin sevkiyatlarını içerir (Er, 2008).

Uluslararası Atom Enerjisi Ajansının verilerine göre şu anda dünya çapında her yıl yaklaşık 20 milyon radyoaktif materyal ve atık sevkiyatı yapılmaktadır ve bunların sadece %5'i nükleer yakıt çevrimi unsurları ile ilgilidir (IAEA/ Transporting radioactive materials). Sivil nükleer güç santrallerinin %20'sini işleten Amerika'da, radyoaktif maddeler yıl içinde gönderilen 300 milyon tehlikeli madde paketinin %1'lik bölümünü oluşturmaktadır (Ratin, Mithel, Rishad ve Nitu, 2014).

Türkiye'de mevcut uygulamada, faal bir nükleer güç santrali bulunmadığından bölünebilir maddelerin taşınması işlemleri yapılmamaktadır (TAEK, 2018). Fakat yapımı devam eden Akkuyu Nükleer Güç Santrali'nin devreye girmesiyle birlikte aktif şekilde bu işlem söz konusu olacaktır.

Önemli miktarda radyoaktif madde içeren gönderilerin, kargoyu tanımlayıcı belge, etiket ve afişlere sahip olması gerekir. Radyoaktif maddeler, olası bir riske karşı dayanıklılığı test edilmiş özel koruma kapları içinde bulundurulmalıdır (IAEA/ Safety Standarts, 2008). Koruma kabı tasarımı, araç seçimi, paketleme, acil durum planlaması, hata analizleri, personel eğitimi ve denetleme işlemleri taşıma işleminde iş sağlığı ve güvenliğinin sağlanması açısından büyük öneme sahiptir.

Radyoaktif maddelerin paketlenmesi, radyasyon emisyonuna veya kazara ya da kasıtlı darbelerden, yangından kaynaklanan radyoaktif maddelerin salınımına karşı yüksek düzeyde koruma sağlayan en önemli koruma unsurlarından biridir (ARPANSA). Yüksek radyoaktif maddelerin taşınmasında genellikle B Tipi Paketler, Bölünebilir Madde Paketleri ve Uranyum Heksaflorür (UF6) için özel tasarlanan paketler kullanılır (REMM).

Etiketler, bir ambalajın içerdiği tehlikeli maddenin türünü ve aktivite seviyesini görsel olarak belirtmek için kullanılan afişlerdir (DOT/ Radioactive Material Regulations Review). Radyoaktif materyalin taşınması için gerekli olan paket (ambalaj), paketin içindeki maddenin aktivitesine göre seçilirken, paket üzerine yerleştirilen etiket, paketin dış yüzeyinde ölçülen radyasyon seviyesine göre seçilir (Cook, Flowers, Maders, Chapman ve McCombie, 2016). Taşıma güvenliği için paket tasarımı, paketleme ve işaretleme işlemleri oldukça önemlidir.

3. Hata Ağacı Analizi

6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu'na göre, *risk değerlendirmesi*, çalışma ortamının yapısı gereği sahip olduğu veya dış ortamdan ya da olaylardan kaynaklanabilecek tehlikelerin belirlenmesini, incelemeye söz konusu tehlikelerin risk oluşturmasına yol açacak faktörler ve bu tehlikelerin taşıdığı birincil risklerin analiz edilerek sınıflandırılmasını ve riskleri ortadan kaldıracak tedbirlerin belirlenmesi amacı ile yapılan tüm çalışmaları ifade eder.

Radyoaktif maddelerin kullanıldığı çalışma alanları taşıdıkları potansiyel tehlikeler, yüksek teknoloji ve karmaşık yapıya sahip olması, bu alanda yürütülen işlerin çok aşamalı ve birbiri ile sıkı sıkıya bağlı olması nedeni ile risk analizi yapmak oldukça önemli ve gereklidir (Shrader-Frechette, 2003).

Risk faktörlerinin incelenmesi aşamalarında birçok farklı yöntem kullanılmaktadır. Ön Tehlike Analizi, Kinney Modeli, Ağırlıklandırılmış Ortalamalardan Sapma Tekniği, Birincil Risk Analizi, Risk Değerlendirme Tablosu, Hata Ağacı Analizi gibi farklı teknikler ile risk faktörleri belirlenerek, arıza durumları en aza indirilmeye çalışılmaktadır. Bu çalışmada hata ağacı analizi yöntemi benimsenmiştir. 1960'lı yıllardan günümüze kadar yaygın kullanılan bu tekniğin diğer tekniklere nazaran en etkili risk analizi yöntemi olduğu söylenebilir. İstenmeyen ciddi sonuçlara neden olabilecek fonksiyonel hataların belirlenmesinde oldukça etkin bir yöntemdir (Özkılıç, 2005; Kim vd., 2020).

Hata Ağacı Analizi, bir sistemdeki olası olayların kombinasyonları ile hatalar ve sistem arasındaki ilişkilerin anlaşılmasını sağlayan ve istenmeyen durumlar arasındaki bağlantıları ifade eden sistematik ve grafiksel bir risk analizi yöntemidir. Bu analiz yöntemi genellikle mevcut sistemin güvenilirliğini ve güvenliğini artırmak ve kaza olasılıklarını araştırmak için kullanılır (NASA, 2002). En ciddi etki (toksik salınım, patlama, radyasyon salınımı gibi) ana etken olarak belirlenir. Bu yaklaşım ile insan hataları ile donanım hataları ilişkilendirilebilir. Hata ağacı ana olaya yol açacak etkenlerin tek tek sıralanması ve birbirleri ile ilişkileri dikkate alınarak oluşturulur. Olayın sonuçları, her bir etkenin gerçekleşme olasılığı, ayrı ayrı veya birlikte gerçekleşme ihtimalleri dikkate alınarak hesaplanabilir (IET, 2010).

Hata Ağacı Analizi ilk olarak 1962 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde bulunan Bell Laboratuvarlarında füze fırlatma sitemlerinin güvenlik kontrolünü geliştirmek üzere kullanılmaya başlanmıştır (Ericson, Clifton, 1999). 1975 yılında Amerika'da Nükleer Güvenlik analizlerinde kullanılmaya başlandı. 1979 yılında gerçekleşen Three Mile Island Nükleer Güç Santrali kazasının ardından önemi giderek artmaya başladı (USNRC/ Severe Accident Risks, 1990). Günümüzde birçok farklı mühendislik alanında sitem güvenliği analizlerinde kullanılmaktadır.

Tehlikeli madde taşımacılığı ortaya çıkarabilecekleri sonuçlar göz önüne alındığında risk ve güvenlik analizlerinin yapılması hayati önem taşıyan bir alandır. Tehlikeli maddelerin karayolu ile taşınması sürecinde ortaya çıkan çevresel risklerin değerlendirilmesinde hata ağacı analizi ile çeşitli çözümler önerilebilir ve arızalar gözlenebilir (Yalçınkaya, Demire ve Say, 2020). Kimyasal maddelerin taşınması sırasında oluşabilecek kontaminasyon riskine karşı Şenol, Aydoğdu, Şahin ve Kılıç tarafından Hata Ağacı Analizi (2015) yaklaşımı kullanılarak risk analizi çalışması ve olasılık analizi yapılmış ve bu tekniğin önemi vurgulanmıştır. Çin'de, 2017 yılında tehlikeli madde taşımacılığının yüzde 36'lık kısmı tren yolu ile gerçekleştirilmiştir. Tehlikeli madde taşımacılığındaki payı dikkate alındığında, Huang, Liu, Zhang, Xu ve Dieu (2020) demiryolu tehlikeli madde taşıma sisteminin başarısının tam olarak sağlanabilmesi için kaza analizi ve kaza kontrol yaklaşımın belirlenmesinde Hata Ağacı Analizi kullanılmıştır.

Nükleer santrallerde, reaktör koruma sistemleri geliştirilirken bu yazılımların sıkı güvenlik önlemlerinden geçmesi gereklidir. Sistemde oluşabilecek arızalar hata ağacı yöntemi incelenmiş ve Güney Kore'de çalışmakta olan bir nükleer santralin verileri referans alınarak vaka çalışması ve önerilen tekniğin etkinliği incelenmiştir. (Jung, Yoo, ve Lee, 2020). Nükleer güç santrallerinde güvenliği ve radyasyonun çalışanlar üzerinde neden olabileceği istenmeyen durumları en aza indirilmesi açısından robot sistemleri büyük öneme sahiptir. Bu robotların çalışma güvenliği Ferguson ve Lu (2000) tarafından, hata ağacı analizi kullanılarak test edilmiştir. Radyoaktif atıkların geri dönüşüm tesislerinde nicel ve nitel hata ağacı yöntemleri kullanılarak robotik manipülatörlerin tasarımında güvenlik sistemlerinin artırılmasında fayda sağlanmıştır (Walker ve Cavallaro, 1996).





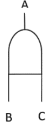

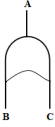
Yukarıda bahsedilen tüm çalışmalar Hata Ağacı Analizi yönteminin uzun yıllardır birçok mühendislik alanında risk ve güvenlik analizi amacıyla kullanıldığını göstermektedir. Buna karşın yüksek radyoaktif maddelerin taşınmasında

Hata Ağacı Analizi kullanılarak radyasyon salınımına karşı risk analizi çalışması üzerinde pek çalışılma yapılmamıştır. Özellikle yüksek radyoaktif atıkların olduğu bir nükleer güç santralının ülkemizde inşa edilmesi durumu göz önüne alındığında, risk analizi aşamasında bu yöntemin kullanılması ve risk faktörlerinin incelenmesi kaçınılmazdır.

3.1. Hata Ağacında Kullanılan Semboller

Bu çalışmada kullanılan hata ağacı analizi sembolleri ve tanımları Tablo 3.1 de verilmiştir.

Tablo 3.1: Hata Ağacı Analizinde Kullanılan Semboller (Roberts ve Haasl, 1981).

Sembol	Tanım		
	Esas olay		
	Koşula bağlı olay		
	Belirli unsurların ortaya çıkması sonucu gerçekleşen olay		
	VE kapısı		$A = B.C$
	VEYA kapısı		$A = B+C$

3.2. Hata Ağacı Analizi Adımlar

Hata ağacı analizi yöntemi ile yapılan çalışmalarda genel olarak dört ana aşama takip edilmektedir. Bunlar; sistemin tanımlanması, hata ağacının oluşturulması, nitel ve nicel değerlendirme aşamalarıdır (Roberts ve Haasl, 1981).

Çalışmada önerilen Hata Ağacı Analizi beş aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada ortaya çıktığında en büyük tehlikeye neden olacak istenmeyen esas olay belirlenir. Burada amaç, bu olaya neden olacak faktörleri belirleyerek istenmeyen durumun ortaya çıkmasını engellemektir. İkinci aşamada ise, esas olayın ortaya çıkmasına neden olacak hatalı durumlar ve faktörler belirlenir. Üçüncü aşamada hata ağacı sembolleri kullanılarak bu durum ve faktörler hata ağacına alt alta ilişkilendirilerek yerleştirilir. Dördüncü aşamada Boolean Matematiği kullanılarak olasılık hesabı mevcut istatistiklere göre hesaplanır. Son aşamada ise elde edilen sonuçlar değerlendirilir. Buna göre, inşa edilen hata ağacında yer alan hatalı durum ve faktörler göz önünde bulundurularak, sistemin eniyilemesi yapılır. Hangi alanlarda güvenlik tedbirleri alınması gerektiği, zayıf ve eksik noktalar ve potansiyel hatalar saptanır. Önerilen algoritma aşağıda verilmiştir.

Aşama 1: İstenilmeyen esas olayı belirle

Adım 1: Ne tür aksilikler meydana gelebilir?

Mevcut sistemde ortaya çıkması halinde en büyük aksiliklere neden olacak olay seçilir.

Adım 2: Gerçekleşme olasılığı nedir?

Gerçekleşme sıklığı esas olayın belirlenmesinde etkilidir.

Adım 3: Bir şeyler ters giderse sonuç ne olur?

Herhangi bir kaza ya da hata sonucu ortaya çıkması halinde neden olacağı sonuçlar açısından en tehlikeli olay seçilir.

Aşama 2: Esas olayın ortaya çıkmasına neden olan durum ve faktörlerin belirlenmesi

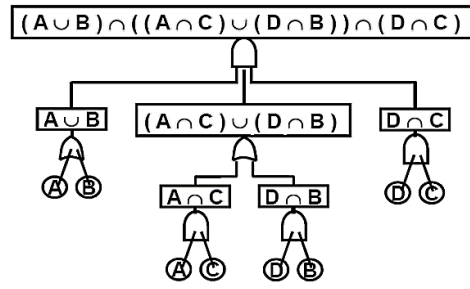
İstenmeyen olayın ortaya çıkmasını etkileyen hatalar ve kaza nedenleri araştırılır. Mevcut kazalardan elde edilen bilgilerden faydalanılır. Potansiyel faktörler değerlendirilir.

Aşama 3: Hata ağacı sembolleri kullanılarak hata ağacını inşa edilmesi

Elde edilen hatalı durum ve faktörler Tablo 'de verilen semboller kullanılarak hata ağacı inşa edilir.

Aşama 4: Boolean Matematiği ile olasılık hesabı

Risk faktörlerinin sebeplerini öğrenebilmek için bu faktörler Boolean Cebir'i (Şekil 3.1) giriş kapıları "VE" ve "VEYA" ile birbirine bağlanır Uygulanan matematiksel hesaplama Eşitlik (a) ve (b) kullanılarak yapılır. "VE" geçidi bağlı risk faktörlerinin hepsinin ortaya çıkması halinde olayın gerçekleşeceği anlamına gelir. "VEYA" geçidi ise bağlı nedenlerden herhangi biri meydana gelirse olayın gerçekleşeceği anlamına gelir. Risk yönetimi yapılarak sistem güçlendirilecek yöntemler bulunmaya çalışılır. Bu aşamada sistemi etkileyen tüm faktörler tanımlanır. Son olarak, sisteme dolaylı veya doğrudan etki eden tehlikeli faktörleri ortadan kaldırmak veya etkilerini azaltabilmek için uygun yöntemler belirlenir (Roberts ve Haasl, 1981).



Şekil 3.1: Boolean Matematiği Çizelgesi

$$\begin{aligned}
 (A \cup B) \cap ((A \cap C) \cup (D \cap B)) \cap (D \cap C) &= (A + B) * (A * C + D * B) * D * C \\
 &= AACDC + ADBDC + BACDC + BDBDC = ACD + ABCD + ABCD + BCD \quad (a) \\
 &= ACD + BCD
 \end{aligned}$$

$$\left[\begin{array}{l} A + A = A, A * A = A \\ (A * B) + A = A, (A + B) * B = B \end{array} \right] \quad (b)$$

Hata ağacı analiz yöntemi olayların, hataların ve olayı etkileyen unsurların sayısal değerleri ele alındığında kantitatif risk çözümlemesi yapabilmeye imkânı da sağlamaktadır. Bu şekilde belirlenen risk ihtimallerini sayısal olarak hesaplanabilmektedir (Görçün, 2018).

Aşama 5: Sonuçların değerlendirilmesi

Elde edilen sonuçlar neticesinde sistem güvenilirliği tanımlanır, istenmeyen esas olaya etki eden karmaşık ve sistematik olumsuzluklar ve birbirleri ile olan ilişkileri değerlendirilir. Sistemi etkileyecek tehlikeler sıralanır ve bunların azaltılmasına yönelik önlemler planlanır. İlerleyen süreçte yapılan iyileştirmeler tekrar aynı yöntem yenilenerek incelenebilir.

4. Yüksek Radyoaktif Maddelerin Taşınmasında Hata Ağacı Analiz Yönteminin Uygulanması

Hata Ağacı Analizi yöntemi ile, karayolu ile gerçekleştirilen yüksek radyoaktif maddelerin taşınması sırasında muhtemel bir kazanın önüne geçilmek ve bu kazadan ötürü radyoaktif salınımı engelleyerek çalışanlar, toplum ve çevrenin radyasyonun zararlı etkilerinden koruyabilmek için kazaya neden olabilecek olasılıkların kombinasyonları belirlenerek risk değerlendirmesinin yapılması amaçlanmıştır. Gerekli literatür çalışması yapıldıktan sonra, dünya genelinde uygulanan taşıma standartları ve kuralları göz önünde bulundurularak, uluslararası ve ulusal yönetmelikler ve tavsiyeler ışığında, olası bir taşıma kazasına neden olabilecek faktörler belirlenerek hata ağacı şeması oluşturulmuştur. Birbiri ile ilişkili ya da zincirleme olarak gerçekleşecek durumlar ağaç dallarını oluşturacak şekilde sıralanmıştır. Yapılan uygulamanın aşamaları aşağıda verilmiştir.

Aşama 1

Yüksek radyoaktif maddelerin taşınması sırasında, sahip olduğu potansiyel riskler düşünüldüğünde, radyasyon salınımı istenmeyen olaydır. Bu nedenle radyasyon salınımı esas olay olarak seçilmiştir.

Aşama 2

Türkiye’de, bu çalışmanın yapıldığı tarihte, faal bir Nükleer Güç Santrali bulunmadığından, yüksek radyoaktif madde taşımacılığı henüz yapılmamaktadır ve yüksek radyoaktif madde içeren taşıma kazası gerçekleşmemiştir. Bu nedenle, taşıma işlemi sırasında esas olayın ortaya çıkmasına neden olacak faktörlerin belirlenmesinde, OSHA

tehlike kökü tanımlamalarından faydalanılmıştır (OSHA/ Hazard Identification and Assessment). Ek olarak Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığı (DOE) tarafından 2016 yılında hazırlanan A Historical Review of the Safe Transport of Spent Nuclear Fuel raporunda dünya genelinde yer alan taşıma kaza örneklerindeki kaza sebepleri referans alınmıştır (Connolly ve Pope, 2016). Yapılan bu detaylı araştırmanın ardından, radyasyon salınımına sebep olabilecek iki ana başlık ve bunların ortaya çıkmasına neden olacak alt başlıklar seçilmiştir. Burada seçilen ana başlıklar trafik kazası ve taşıma kaplarıdır. Bu çalışmada kazaya sebep olabilecek belirgin olaylar seçilmiştir, fakat sistemde olumsuzluk yaratabilecek tehlike çok daha fazladır. Radyoaktif salınımına neden olacak ana başlıklar ve bunları etkileyen alt faktörler Tablo 4.1 ve Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.1: Hata ağacı analizinde trafik kazasına neden olan ana ve ara faktörler

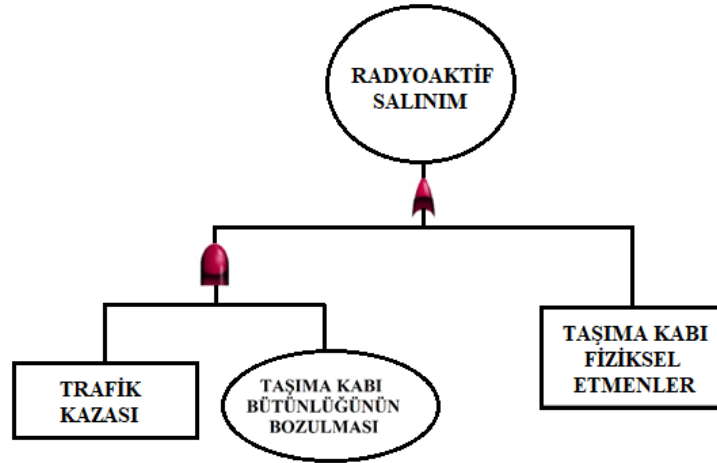
Ana Faktör	Ara Faktör
Dış Etkenler	Tehlikeli çalışma alanı
	Altyapı yetersizliği
	Yangın, Patlama
	Çarpışma
	Doğal Afet
Sistemsal Etkenler	Araç sistem yangınları
	Araç lastiklerinin zarar görmesi
	Araçın arızalanması
	Güvenlik takip, alarm ve ikaz cihazlarının eksikliği
Personel Faktörü	Uyumsuz pozisyon
	Prosedürlere uyulmaması, Sorumsuzluk
	Kontrol Hataları
	Hız
	İletişimsizlik
	Ani gelişen sağlık problemleri
	Yanlış karar alma
Yönetsel Etkenler	Yetersiz sayıda personel
	Donanımsız personel
	Hatalı yol haritası
	Koordinasyon eksikliği
	Kişisel koruyucu ekipman
	Hatalı araç seçimi
	Periyodik Kontroller
	Mühendislik kontrol eksikliği
	Hatalı veya eksik risk analizi
Yetersiz denetim	

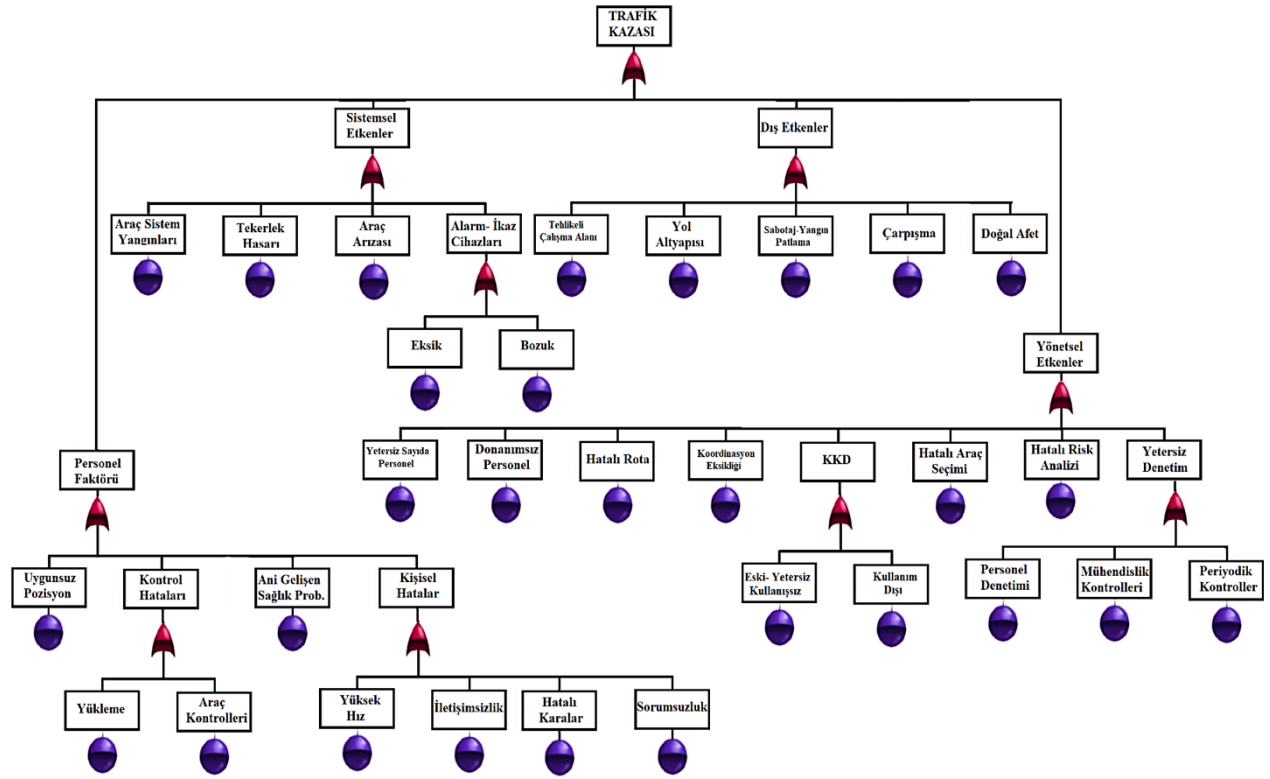
Tablo 4.2: Hata ağacı analizinde taşıma kaplarından kaynaklı radyasyon salınımı etkileyen ana ve ara faktörler

Ana Faktör	Ara Faktör
Termal Değişim	Yangın
	Radyoaktif maddelerden kaynaklanan fiziksel veya kimyasal reaksiyonlar
	Soğutucu
Tasarım	Hatalı Tasarım
	Korozyon
	Zırhlama
Personel Faktörü	Araçlara hatalı yükleme
	Radyasyon Seviyesi Ölçümünün Yapılmaması
	Hatalı paket

Aşama 3

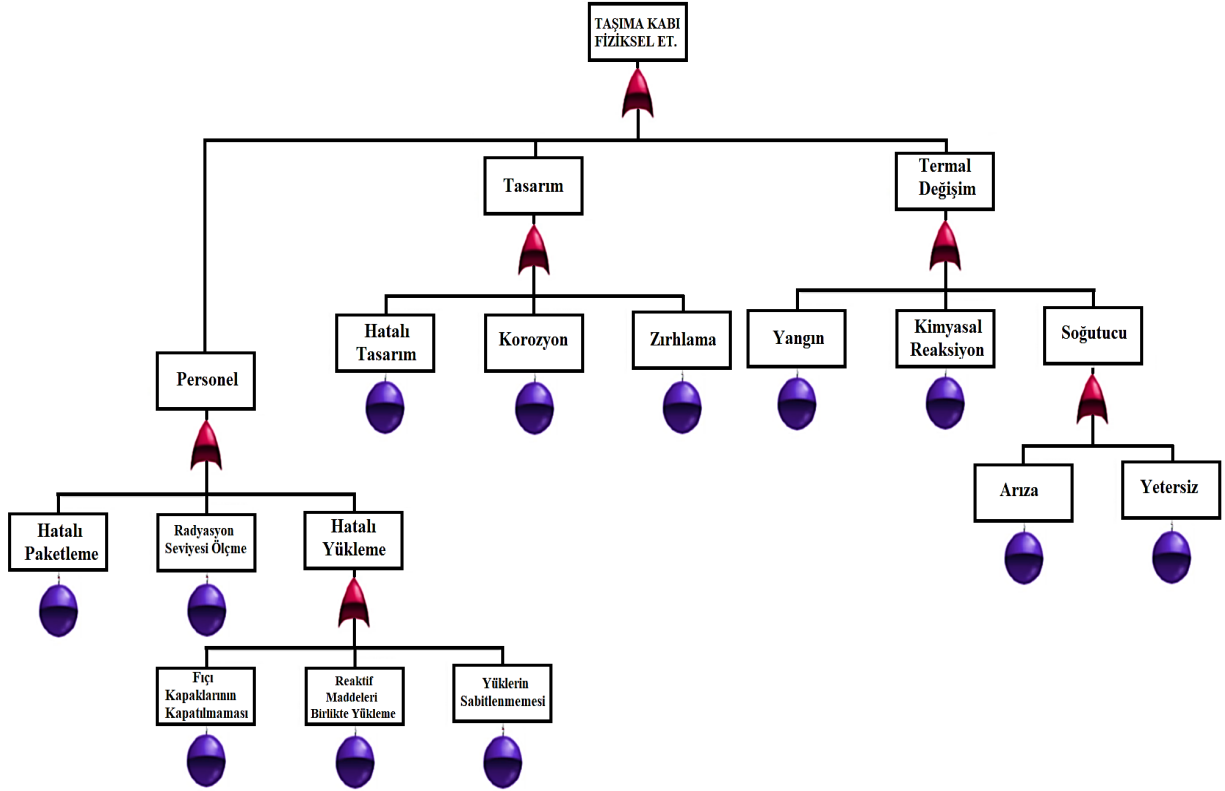
Seçilen hatalı durumlar ve faktörler hata ağacı sembolleri kullanılarak uygun şekilde yerleştirilmiştir. Hata ağacını oluşturan ana başlıklar ara kesitler halinde incelenmiş ardından esas olayla ilişkilendirilmiştir ve Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3 'te gösterilmiştir. Ara kesitlerde yer alan ana başlıkların gerçekleşmemesi durumunda radyasyon salınımı gerçekleşmez. Trafik kazasında radyasyon salınımı, taşıma kaplarının bu kaza nedeni ile bütünlüğünün bozulması koşuluna bağlıdır. Taşıma kaplarında meydana gelecek herhangi bir olumsuzluk radyasyon salınımını direkt etkileyecektir.

**Şekil 4.1:** Radyoaktif taşıma kazası hata ağacı



Şekil 4.2: Hata ağacı trafik kazası ara kesit

Trafik kazası, taşımada kullanılan fiçilerin ve zırhlarının direkt darbe olarak kırılması veya çatlamasına veya bir yangına sebebiyet vererek termal değişime neden olup taşıma kaplarının bütünlüğünü bozulmasına yol açabilir. Bütünlüğü bozulan fiçilerden da radyasyon salınımı gerçekleşebilir. Fiçi tasarımı ve alınan diğer önlemler de göz önüne alındığında, fiçilerin trafik kazasından alacağı darbe sonucu bütünlüğünün bozularak radyasyon yayılması ihtimali, trafik kazası gerçekleşme ihtimalinden çok daha düşüktür. Trafik kazası radyasyon salınımı tetikleyebilecek en büyük etken olduğu için ana faktör olarak kabul edilebilir.



Şekil 4.3: Hata ağacı taşıma kapları- fiziksel etmenler ara kesit

Taşıma kapları olası bir trafik kazasında, radyoaktif maddenin dağılmasını engellemede kalkan görevi görür. Taşıma kapları ağır darbelere ve şiddetli trafik kazalarına karşı dayanıklı olacak şekilde tasarlanırlar. Böylelikle şiddetli trafik kazalarında dahi radyasyon salınımı ihtimalini düşürür. Taşıma kaplarında ortaya çıkan herhangi bir problem direkt radyoaktif madde salınımına neden olacaktır.

Aşama 4

Hata ağacında her bir ara faktörün ortaya çıkma ihtimali bir üste yer alan olayın gerçekleşme ihtimaline etken olur. Olayların gerçekleşme sıklığı gerçekleşme ihtimalini belirler. Hata ağacının dallarını oluşturan her bir vakanın gerçekleşme olasılığı çok daha düşük olabileceğinden ve söz konusu olayın gerçekleşmesine etki edecek tüm faktörler ele alınamadığından, bir olayın toplam vaka sayısına bölünerek olasılık hesaplaması tercih edilmemiştir. Bu tez çalışmasında sistem güvenilirliği için Dizdar EN. (2003) tarafından hata ağacı analizini uyguladığı çalışmasında Tablo 4.3'de verilen olasılık ölçeği kullanılmıştır. Aynı zamanda Türkiye İstatistik Kurumu'nun yayınladığı 2018 trafik kazası verilerinden faydalanılmıştır.

Tablo 4.3: Olasılık Ölçeği

Olasılığı	Gerçekleşme Frekansı
Her 10 olayda 1	Çok sık
Her 100 olayda 1	Sık
Her 1000 olayda 1	Seyrek
Her 10000 olayda 1	Çok az
Her 100000 olayda 1	Nadiren
Her 1 milyon olayda 1	Oldukça nadiren

Trafik kazasına neden olan dış etkenler, karşılaşma sıklığına göre nadiren olarak seçilmiştir. Hata ağacında yer alan diğer unsurlarda eniyileme yapıldığı düşünülerek oldukça nadir olarak seçilmiştir.

TÜİK 2018 verilerine göre, Türkiye’de mevcut kayıtlı araç sayısı yaklaşık olarak 23 milyondur. Aynı yıl yaklaşık olarak 1,23 milyon kaza meydana gelmiştir. Günlük ortalama 3370 civarında kaza gerçekleşmiştir. Bu kazalar genel olarak sürücü, yaya, taşıt ve yol kaynaklı gerçekleşmiştir. Büyük çoğunluğu araca yandan çarpma, aracın yoldan çıkması, sabit cisme çarpma, karşılıklı çarpışma, duraç araca çarpma, insan ya da hayvana çarpma gibi olaylardır (Özen ve Zorlu, 2018). Kayıtlı araçların aktif olarak aynı gün trafiğe çıktığını düşünürsek herhangi bir trafik kazasının gerçekleşme olasılığı 0.00014’tür. Bu değer bir aracın çarpışma nedeni ile trafik kazasına dahil olabilmesinin en yüksek ihtimali olarak belirlenmiştir.

2018 yılında gerçekleşen kazaların %75’i yerleşim bölgelerinde gerçekleşmiştir (Yaprak ve Akbulut, 2019). Yüksek radyoaktif maddelerin taşınması işlemleri nükleer tesisler ve depolama merkezleri arasında gerçekleştirildiğinden, taşıma işlemi genellikle yerleşim alanlarına uzak bölgelerde yapılmaktadır. Buna göre mevcut kaza ihtimalinin %25’i yüksek radyoaktif madde lojistik faaliyetinde bulunan bir aracın kazaya karışma olasılığı verir ve bu değer 0,000035’tir.

Aşama 5

Yüksek radyoaktif maddelerin taşınması sırasında meydana gelebilecek radyasyon salınımı; çarpışma, doğal afet gibi etkenlerden kaynaklanan trafik kazası sonucu veya taşıma kaplarının tasarım veya yükleme aşamalarındaki hatalar, ya da termal değişim gibi faktörlerden kaynaklı gerçekleşebilir. Boolean Matematiği kullanılarak yapılan olasılık hesabı sonu elde edilen sonuçlar Tablo 4.4’te verilmiştir.

Tablo 4.4: Hata Ağacı Analizi sonucu elde edilen olasılık değerleri

Olay	Olasılık
Trafik Kazası	0.000099
Taşıma Kabı	0.000012
Radyasyon Salınımı	0.000024

Her trafik kazası radyasyon salınımına sebebiyet vermez. Herhangi bir trafik kazasında radyoaktif madde salınımı olabilmesi taşıma kaplarının bütünlüğünün bozulması koşuluna bağlıdır. Radyasyon salınımı olabilmesi için taşıma fiçileri ve zırh malzemelerinin de zarar görmesi gerekir. Trafik kazası için belirlenen olasılık, radyasyon salınımının gerçekleşme ihtimalini artıran bir değerdir.

Trafik kazası, taşımada kullanılan fiçilerin ve zırhlarının direkt darbe alarak kırılması veya çatlamasına veya bir yangına sebebiyet vererek termal değişime neden olup taşıma kaplarının bütünlüğünü bozulmasına yol açabilir. Bütünlüğü bozulan fiçilerden da radyasyon salınımı gerçekleşebilir. Fıçı tasarımı ve alınan diğer önlemler de göz önüne alındığında, fiçilerin trafik kazasından alacağı darbe sonucu bütünlüğünün bozularak radyasyon yayılması ihtimali, trafik kazası gerçekleşme ihtimalinden çok daha düşüktür.

Hata ağacında taşıma kazasında insan faktörü, diğer araç ve gereçler ya da doğal koşulların ortaya çıkaracağı etkilerden daha geniş yer kaplamaktadır. Yönetsel etkenlerde, tasarım lojistik faaliyetleri aşamalarında insan kaynaklı ortaya çıkan en küçük hata direkt olarak tüm lojistik faaliyetlerini ve olayın kaza ile sonuçlanmasını etkiler. Çalışanların yaş ve deneyim süreleri de bu süreçte değişikliğe neden olabilir (Alizadeh, Mortazavi, Sepehri, 2015).

5. Sonuçlar ve Tartışma

Hata ağacı analizi yüksek radyoaktif madde taşınması gibi karmaşık sistemlerde risklerin belirlenmesinde birçok farklı faktörün sisteme nasıl etki edeceğini göstermek için kullanılacak etkili, etkileşimli ve çok yönlü bir risk değerlendirme yöntemidir. Hata ağacını oluşturan dallar ile sisteme etki eden faktörler genelden detaya rahatlıkla görülebilir. Böylelikle karmaşık bağlantılar sisteme dahil edilerek hataların ne oranda ve büyüklükte sonuçlara yol

açacağı görmemizi sağlayabilir. Birbiri ile yakınlığı ve ilişkisi bulunan hatalar bu şekilde tespit edilerek sistemin eniyilemesi için çözüme odaklanma sürecini hızlandırabilir.

Hata ağacı analizi, ayrıntılı bir çalışma gerektirdiğinden oldukça zaman alıcı ve uzman bir ekip gerektiren bir süreci kapsar. Ara faktörlerin gerçekleşme olasılığının hesaplanmasında yaşanan belirsizlikler, ana faktörün gerçekleşme ihtimalinin hesaplanmasında da belirsizliklere neden olur. Bu nedenle matematiksel olarak olasılık hesabı yapıldığında hata payı mutlaka olacaktır. Çünkü sisteme etki edecek tüm faktörleri ele almak, bunların gerçekleşme ihtimallerini net olarak hesaplamak ve sonuçlandırmak neredeyse imkansızdır. Bu çalışmada hata ağacı analizinin kullanılmasının amacı yüksek radyoaktif maddelerin taşınmasında meydana gelebilecek bir kazanın olasılığını yaklaşık olarak hesaplamak değil sisteme etki edecek faktörleri detaylı bir şekilde birbiri ile olan ilişkilerini ve risklerin hangi faktörlerden kaynaklanabileceğini göstermektir. Hata ağacı yöntemini diğer risk analizi yöntemlerinden ayıran en büyük özelliği sisteme etki eden tüm faktörleri ayrıntılı bir şekilde sergilemesidir. Bu şekilde birbirini etkileyen her bir etmene sebep olan olaylar rahatlıkla gözlemlenebilir ve risk faktörleri minimize edilebilir.

İnsan hataları sisteme dahil edildiğinde, matematiksel olarak yapılacak olasılık hesabı tahminlerin ötesine geçmeyecektir. İnsan kaynaklı hatalar sistemin ilerleyişini çok hızlı bir şekilde etkileyerek tümü ile değiştirebilir. Aynı zamanda bu analiz yöntemi durağan bir yapıya sahiptir. Zaman ile olan ilişkisini kestirmek mümkün değildir.

Sisteme etki etme potansiyeli olan olayların, geçmiş kazalardan elde edilen deneyimler aracılığı ile sisteme etki eden ana faktörlerin ve bu kök nedenlere etki edecek ara faktörlerin zincirleme bağlantılarını görebilmek adına nükleer teknolojilerde risk değerlendirilmesi yaparken ve sistemlerin eniyilemesinde hata ağacı analizi etkili bir yöntem olarak varlığını sürdürecektir. Ulaştırma rotasının seçimi, paketleme, yükleme, tasarım ve taşıma aşamalarında güvenlik sistemlerinin belirlenmesinde ve kalitesinin artırılmasında, böylelikle çalışanların ve toplumun sağlığının korunmasında hata ağacının sonuçları kullanılabilir. Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada; Furkan Erdoğan, problem analizinin yapılması, bilimsel yayın araştırması ve makalenin oluşturulması; Ergün Eraslan, makalenin hazırlanması ve kontrolü konularında katkı sağlamışlardır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

Alizadeh, SS., Mortazavi, SB. & Sepehri, MM. (2015). Analysis of Occupational Accident Fatalities and Injuries Among Male Group in Iran Between 2008 and 2012. *Iran Red Crescent Medical Journey*. 17/10: e18976. doi: [10.5812/ircmj.18976](https://doi.org/10.5812/ircmj.18976)

ARPANSA (Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency). Transport of radioactive material Erişim adresi: <https://www.arpansa.gov.au/regulation-and-licensing/safety-security-transport/transport-of-radioactivematerials> s.e.t. 10 Nisan 2020.

Connolly KJ & Pope RB. (2016). A Historical Review of the Safe Transport of Spent Nuclear Fuel. Prepared for US Department of Energy Nuclear Fuels Storage and Transportation Planning Project. Erişim adresi: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/03/f34/Enhanced%20safety%20record%20report%20%20final%20public%20release_0.pdf

Cook D, Flowers Q, Maders S, Chapman N & McCombie C. (2016). *Safety and Risks in the Transportation of Radioactive Materials to and in Australia*. Australia, Jacobs Group Pty Limited.

Dizdar EN. (2003). Sistem Güvenirliği için Hata Ağacı Analizi. *Teknoloji*. 3(4), 35-40.

Er, Z. (2008). Safety and security aspects for the effective shipment of radioactive materials with maritime transportation. *International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 2(3):303-309. Retrieved from http://www.transnav.eu/Article_Safety_and_Security_Aspects_for_Er,7,109.html

Ericson, A. & Clifton, II. (1999). Fault tree analysis. A History. Proceedings of the 17th International Systems Safety Conference. Seattle, Washington.

Ferguson TA & Lu L. (2003). Fault Tree Analysis for an Inspection Robot in a Nuclear Power Plant. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 235: (2017) 012003 doi:10.1088/1757-899X/235/1/012003

Görçün, ÖF. (2018). Tehlikeleri Maddelerin Sınıflandırılması ve Paketlenmesi. İçinde: Koparal AS. Tehlikeli Madde Lojistiği ve İş Güvenliği. Eskişehir, 1.Baskı. Anadolu Üniversitesi Yayınları.

Health and Safety Executive. Radiations. Erişim adresi: <https://www.hse.gov.uk/toolbox/radiations.htm> s.e.t. 22.11.2019.

Huang, W., Liu, Y., Zhang, Y., Zhang, R, Xu, M., Dieu, GJ., Antwi, E. & Shuai, B. (2020). Fault Tree and Fuzzy D-S Evidential Reasoning combined approach: An application in railway dangerous goods transportation system accident analysis. *Information Sciences*. 520: 117–129

IAEA Safety Standards. (2008). Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, No. TS-G-1.1. 63-194. Erişim adresi: <https://www.iaea.org/publications/12288/regulations-for-the-safe-transport-of-radioactive-material>

IET(2010). Quantified Risk Assessment Techniques - Part 2 Event Tree Analysis . ETA, The Institution of Engineering and Technology, Health and Safety Briefing No. 26b.

International Atomic Energy Agency (IAEA). Transporting radioactive materials. Erişim adresi: <https://www.iaea.org/topics/transporting-radioactive-materials> s.e.t. 01.03.2020.

İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu. (2012, 20 Haziran). Resmî Gazete. (Sayı: 6331). Erişim adresi: <https://www.mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/1.5.6331.pdf>

Jung, S. Yoo, J., & Lee, YL. (2020). A Software Fault Tree Analysis Technique for Formal Requirement Specifications of Nuclear Reactor Protection Systems. *Reliability Engineering & System Safety* Volume 203: 107064

Kim, DH., Cho, WI. & Seung, JL. (2020). Fault Tree Analysis as a Quantitative Hazard Analysis with a Novel Method for Estimating the Fault Probability of Microbial Contamination: A Model Food Case Study. *Food Control*, Volume 110: 107019

Lamarsh, J. (2001). *Introduction to Nuclear Engineering* (3rd Edition). Prentice Hall.

NASA, (2002), National Aeronautics and Space Administration. "Fault Tree Handbook with Aerospace Applications. NASA Office of Safety and Mission Assurance, NASA Headquarters, Washington, DC.

Occupational Safety and Health Administration (OSHA). Hazard Identification and Assessment. Erişim adresi: <https://www.osha.gov/shpguidelines/hazard-identification.html> s.e.t. 17.03.2020.

OSHA. Radiation. Erişim adresi: <https://www.osha.gov/SLTC/radiation/> s.e.t. 22.11.2019.

Özen, M ve Zorlu, F. (2018). Türkiye’de Devlet Karayollarında Kaza Oranlarının ve Kaza Örüntüsünün Analizi. *Teknik Dergi*, 29 (5), 8589-8604. doi: 10.18400/tekderg.308318

Özkılıç, Ö., (2005). *İş Sağlığı ve Güvenliği, Yönetim Sistemleri ve Risk Değerlendirme Metodolojileri*. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, Türkiye İşveren Sendikaları Konfederasyonu, 27-140.

Radyoaktif Maddenin Güvenli Taşınması Yönetmeliği. (2005, 8 Temmuz). Resmî Gazete. (Sayı: 25869). Erişim adresi: <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=9020&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>

Ratin ASR, Mithel MFH, Rishad ASR, Nitu TAK. (2014). Radioactive waste management of nuclear power plant. *International Journal of Renewable Energy Technology Research*, 3(7): 1-10. Retrieved from <http://ijretr.org>

Roberts, NH & Haasl, DF. (1981). Fault Tree Handbook (pdf). Erişim adresi: <https://www.nrc.gov/docs/ML1007/ML100780465.pdf>

Shrader-Frechette K. (2003). Risk and uncertainty in nuclear waste management. Erişim adresi: https://www.nwmo.ca/~media/Site/Files/PDFs/2015/11/04/17/31/607_1-5Riskand_UncertaintyinNuclearWaste_Management.ashx s.e.t. 21.04.2020.

Şenol, Y., Aydoğdu YV., Şahin B. ve Kılıç İ. (2015). Fault Tree Analysis of chemical cargo contamination by using fuzzy approach. *Expert Systems with Applications*, Elsevier Ltd. 42: 5232–5244 3.1.1.1.

TAEK. (2018). Radyoaktif Maddelerin Güvenli Taşınmasına İlişkin Kılavuz (pdf), RSGD-KLV-035. Erişim adresi: https://www.taek.gov.tr/index.php?option=com_content&view=article&id=614&Itemid=429&lang=tr

TÜİK Karayolu Trafik Kaza İstatistikleri. (2018). Erişim adresi: <http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=27668> s.e.t. 16.03.2020.

Radiation Emergency Medical Management (REMM). Understanding Shipping Labels and Placards for Radioactive Materials. Erişim adresi: https://www.remm.nlm.gov/transportation_hazard_id.htm , s.e.t. 15 Nisan 2020.

US Department of Transportation (DOT). Radioactive Material Regulations Review. Erişim adresi: <https://rampac.energy.gov/docs/default-source/dotinfo/dotramreg.pdf?sfvrsn=2> s.e.t. 10 Nisan 2020.

USNRC. Definitions. Erişim adresi: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part020/part020-1003.html> s.e.t. 13.12.2019.

USNRC. (1990). Severe Accident Risks: An Assessment for Five U.S. Nuclear Power Plants (pdf). Erişim adresi: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr1150/v2/sr1150v2appa.pdf>

Yalçınkaya, NM., Demirel E. ve Say, N. (2020). Tehlikeli Maddelerin Karayolu ile Taşınması Sürecinde Ortaya Çıkan Çevresel Risklerin Hata Ağacı Analizi ile Değerlendirilmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* 8(4): 973 – 984 e-ISSN: 1308-6693.

Yaprak, Ş ve Akbulut, AM. (2019). Trafik Kaza ve Denetim İstatistikleri. *Polis Akademisi Yayınları*. 75: 8-13.

Yüksek Aktiviteli Kapalı Radyoaktif Kaynakların ve Sahipsiz Kaynakların Kontrolü Yönetmeliği. (2009, 21 Mart). Resmî Gazete. (Sayı: 27176). Erişim adresi: <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=12938&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>

Walker, ID., & Cavallaro, J. R. (1996). Failure mode analysis for a hazardous waste clean-up manipulator. *Reliability Engineering and System Safety*, 53(3), 277-290.