

Bir Akünün Yaşam Döngüsündeki Yolculuğu; Akü Taşımacılığında Tersine Lojistik Alanında Riskler

The Journey of a Battery in Its Life Cycle; Risks in The Field of Reverse Logistics in Battery Transportation

Evren ÇAĞLARER¹

ÖZ

Pillerin kimyasal yapıları, yangın, patlama ve çevre kirliliği gibi önemli riskler taşır. Bu süreçte güvenli taşıma yöntemlerinin belirlenmesi ve uygulanması kritik öneme sahiptir. Atık akülerin doğru bir şekilde bertaraf tesislerine ulaştırılması, yalnızca çevre koruma açısından değil, aynı zamanda ekonomik sürdürülebilirlik ve yasal yükümlülüklerin yerine getirilmesi açısından da büyük bir öneme sahiptir. Bu, toplum sağlığı, çalışan sağlığı, yol güvenliği, çalışan güvenliği konularına kadar uzanan çok geniş bir perspektifi ifade etmektedir. Çalışma kapsamında, taşıma süreçlerinde karşılaşılan risklerin detaylı analizi yapılmış ve Hata Ağacı Analizi (FTA) yöntemi kullanılarak bu risklerin kaynağı sistematik bir şekilde incelenmiştir. Bulgular, taşıma sırasında meydana gelen kazaların, lastik patlaması, sabitleme eksiklikleri, sürücü hataları ve olumsuz yol koşulları gibi faktörlerden kaynaklandığını göstermektedir. Ayrıca, taşıma sırasında alınması gereken önlemler (örneğin, ambalajlama standartlarının uygulanması, sürücülerin eğitimi ve taşıma araçlarının düzenli bakımı) belirlenmiştir. Bu çalışma, tersine lojistik süreçlerinde risk yönetimi alanına önemli katkı sağlamaktadır. Atık akü taşımacılığı sırasında meydana gelen risklerin Hata Ağacı Analizi (FTA) yöntemiyle sistematik bir şekilde incelenmesi, bu alanda sınırlı olan uygulamalı çalışmalara yeni bir perspektif sunmaktadır. Türkiye bağlamında yürütülen bu çalışma, yerel düzenlemelere ve uygulamalara dayalı olarak küresel standartlarla uyumlu bir lojistik stratejisi geliştirilmesi için örnek teşkil etmektedir. Atık akülerin taşınma süreçlerindeki çevresel ve operasyonel tehditleri ele alan bu çalışma, sürdürülebilir lojistik uygulamalarının çevresel koruma ve ekonomik faydalar açısından önemini vurgulamaktadır. Bu yönleriyle çalışma, atık akü lojistiğinde güvenlik ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada bir çerçeve sunarak, ilgili literatüre hem teorik hem de uygulamalı katkılar sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Akü Geri Dönüşümü, Hata Ağacı Analizi (FTA), İş Sağlığı ve Güvenliği, Tehlikeli Madde Karayolu Taşımacılığı, Yeşil Lojistik

ABSTRACT

The chemical structures of batteries carry significant risks such as fire, explosion and environmental pollution. In this process, determining and implementing safe transportation methods are of critical importance. Proper transportation of used batteries to disposal facilities is of great importance not only in terms of environmental protection but also in terms of economic sustainability and fulfillment of legal obligations. This situation expresses a very broad perspective extending to public health, employee health, road safety and employee security. Within the scope of the study, a detailed analysis of the risks encountered in transportation processes was made and the source of these risks was systematically examined using the Fault Tree Analysis (FTA) method. The findings show that accidents occurring during transportation are caused by factors such as tire bursts, lack of fastening, driver errors and adverse road conditions. In addition, the precautions to be taken during transportation (e.g. implementation of packaging standards, training of drivers and regular maintenance of transportation vehicles) were determined. This study makes a significant contribution to the field of risk management in reverse logistics processes. Systematic examination of the risks occurring during waste battery transportation using the Fault Tree Analysis (FTA) method offers a new perspective to the limited studies applied in this field. This study, conducted in the context of Turkey, sets an example for developing a logistics strategy compatible with global standards based on local regulations and practices. Addressing environmental and operational threats in the transportation processes of waste batteries, this study emphasizes the importance of sustainable logistics practices in terms of environmental protection and economic benefits. In these respects, the study provides a framework for achieving safety and sustainability goals in waste battery logistics and provides both theoretical and practical contributions to the relevant literature.

Keywords: Battery Recycling, Fault Tree Analysis (FTA), Occupational Health and Safety Dangerous Goods Road Transportation, Green Logistic

Bu çalışma için etik kurul iznine ihtiyaç duyulmamaktadır.

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Evren ÇAĞLARER, Kırklareli Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, evren@klu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-1343-4751

İletişim / Corresponding Author:
e-posta/e-mail: evren@klu.edu.tr

Evren ÇAĞLARER
ecaglarer@gmail.com

Geliş Tarihi / Received: 26.03.2025
Kabul Tarihi/Accepted: 11.06.2025

GİRİŞ

Tersine lojistik ve yeşil lojistik, sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimi ve çevresel koruma açısından önemli kavramlardır. Tersine lojistik, ürünlerin yaşam döngüsünün sonunda geri kazanımını ve yeniden kullanımını hedeflerken, yeşil lojistik çevresel etkileri en aza indirmeyi amaçlar.

Tersine lojistik, ürünlerin tüketiciye ulaştıktan sonra geri dönüşümü, yeniden kullanımı veya bertarafı gibi süreçleri kapsayan bir lojistik yönetim şeklidir. Yani, ürünlerin tüketici tarafından kullanımı sonrasında geri alınması ve bu ürünlerin tekrar kullanılabilir hale getirilmesi veya doğru şekilde imha edilmesi anlamına gelmektedir. Kısaca bu süreç, atık yönetimi, geri dönüşüm ve yeniden üretim gibi faaliyetleri kapsar.¹⁻⁴ Tersine lojistik, operasyonel maliyetleri ve çevresel etkileri azaltmayı hedefler. Bu, geri dönüşüm ve yeniden üretim süreçlerinin optimize edilmesiyle sağlanır.⁴⁻⁶ Tersine lojistik, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada kritik bir rol oynar. Bu da çevresel sorunların çözülmesine ve kaynakların daha verimli kullanılmasına katkıda bulunur.⁷⁻⁸

Yeşil lojistik, geleneksel lojistik uygulamalarının çevresel sürdürülebilirlik ilkeleriyle entegre edilmesi ve çevresel etkilerin azaltılması amacıyla geliştirilen bir yaklaşımdır. Bu yaklaşım, lojistik süreçlerinin çevresel etkilerini minimize etmeye odaklanarak kaynak kullanımını optimize etmeyi amaçlar. Yeşil lojistik, taşıma, depolama, paketleme, dağıtım ve tedarik zinciri yönetimi gibi lojistik faaliyetlerini ele alarak çevresel etkileri azaltmak için stratejiler ve pratikler geliştirir. Yeşil lojistik, çevresel koruma ve doğal kaynakların verimli kullanımını hedefler. Bu, atık yönetimi, enerji tüketiminin azaltılması ve hava kirliliğinin önlenmesi gibi faaliyetleri içerir.^{2,7,9} Yeşil lojistik, sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimi için kritik bir bileşendir. Bu, tedarik zinciri operasyonlarının çevresel etkilerini en aza indirmeyi amaçlar.^{1,5,6} Yeşil lojistik, teknolojik yenilikler ve optimizasyon teknikleri kullanılarak daha verimli hale getirilebilir. Örneğin, blok zinciri teknolojisi

ve genetik algoritmalar, yeşil lojistik süreçlerinin etkinliğini artırabilir.^{3,4}

Tehlikeli maddeler, kimyasal, fiziksel ve biyolojik özellikleri nedeniyle canlılar, cansız varlıklar ve çevre için risk oluşturan maddelerdir. Bu maddeler endüstri ve ticaret için büyük önem taşımakta olup, küresel ekonominin bir gereği olarak ulusal ve uluslararası düzeyde taşınmaları zorunludur. Tehlikeli madde taşımacılığında kaza oranları düşük olsa da meydana gelen kazalar felaket boyutlarında sonuçlara yol açabilir; yangın ve patlama gibi olaylar yerleşim alanları ve doğal kaynaklar için büyük tehdit oluşturur.¹⁰

Tehlikeli maddelerin doğru tanımlanması ve sınıflandırılması, lojistik süreçlerin emniyetli ve verimli bir şekilde yönetilmesi için temel gerekliliktir. Bu kapsamda, aküler de tehlikeli maddeler sınıfına girer ve çeşitli kriterlere göre sınıflandırılır. Kimyasal yapısına göre aküler; kurşun-asit, lityum iyon ve diğer nikel bazlı türlere ayrılır. Kurşun-asit aküler, sulu ve kuru (VRLA) olmak üzere ikiye ayrılır. Sulu aküler sıvı elektrolit içerir ve bakım gerektirirken, kuru aküler (AGM ve jel aküler) sızdırmaz ve bakım gerektirmez. Lityum iyon aküler ise hafif ve yüksek enerji yoğunluğuna sahip olup, elektrikli araçlar ve taşınabilir cihazlarda kullanılır.

Bu çalışmada, Türkiye’de üretim faaliyeti gösteren bir akü firmasının tersine lojistiğini gerçekleştiren firmanın atık akülerin toplanması, taşınması ve bertaraf tesisine ulaştırılması yolculuğundaki tehlikeler, risk analiz metodları ve risk yönetim biçimleri örnek alınarak ayrıntılı bir inceleme yapılmış, değerlendirme sonuçları paylaşılmıştır.

Lojistikte Tehlikeli Madde Taşımacılığı ve Uluslararası Taşımacılık Standartları

Uluslararası ulaşım standartları, küresel ticaretin düzgün işlemlerini sağlamak için hayati öneme sahiptir. Bu standartlar, taraflar arasındaki anlaşmazlıkları azaltır, güvenliği artırır ve ticaretin sürekliliğini sağlar. Taşımacılık sektöründeki oyuncuların bu devamlılığa uymaması, hem kendi iş süreçlerini optimize etmesini hem de

uluslararası pazarda olanaklılıklarını arttırmaları açısından önemlidir. Tablo 1’de

uluslararası ve Tablo 2’ de bölgesel ve ulusal standartlar açıklamalarıyla yer almaktadır.

Tablo 1. Uluslararası Standartlar Tablosu

Standart	Açıklama	Kaynak
UN Model Regulations	Birleşmiş Milletler tarafından hazırlanan, tehlikeli malların güvenli taşınması ve çevre korumasını içeren düzenlemeler.	United Nations, 2019 ¹²
IATA Dangerous Goods Regulations (DGR)	Havayolu taşımacılığı için IATA tarafından yayımlanan, tehlikeli malların sınıflandırılmasını ve taşınmasını düzenleyen protokoller.	IATA, 2023 ¹³
IMDG Code	Denizyolu taşımacılığında tehlikeli malların güvenli taşınması için IMO tarafından hazırlanan düzenlemeler.	IMO, 2022 ¹⁴

Tablo 2. Bölgesel ve Ulusal Standartlar Tablosu

Standart	Bölge/ Ülke	Açıklama	Kaynak
U.S. Department of Transportation (DOT)	Amerika Birleşik Devletleri	Tehlikeli maddelerin taşınmasına ilişkin düzenlemeleri denetler. FMCSA ve PHMSA önemli rol oynar.	U.S. DOT, 2023 ¹⁵
ADR (European Agreement Concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road)	Avrupa Birliği	Karayolu taşımacılığında tehlikeli malların güvenli taşınmasını sağlayan Avrupa düzenlemesi.	UNECE, 2023 ¹⁶
IMDG Code (EU Adaptation)	Avrupa Birliği	IMDG Kodunun Avrupa Birliği’ne uyarlanmış versiyonu.	UNECE, 2023 ¹⁶
IATA Dangerous Goods Regulations (EU Adaptation)	Avrupa Birliği	IATA DGR’nin Avrupa Birliği’ne adapte edilmiş versiyonu.	UNECE, 2023 ¹⁶

Avrupa Karayoluyla Tehlikeli Maddelerin Uluslararası Taşınması Anlaşması (European Agreement Concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road-ADR), tehlikeli maddelerin karayolu ile taşınmasına yönelik Avrupa’da belirlenen standartları içeren bir düzenlemeler bütünüdür.¹⁷ Bu düzenleme, akü taşımacılığı gibi özel alanlarda, sürücü ve taşıma ekibinin güvenliğini sağlamak ve çevresel riskleri en aza indirmek için büyük önem taşır.¹⁸ Akü taşımacılığı, yerel ve ulusal düzenlemelerle birlikte ADR kurallarına da uyum sağlamayı gerektirir.¹⁹ Bu bağlamda, akü taşımacılığında uygulanması gereken temel kurallar şöyle sıralanabilir;

Sınıflandırma: Aküler, tehlikeli madde sınıflarına (örneğin; yanıcı, toksik) göre doğru bir şekilde sınıflandırılmalıdır. Lityum bataryalar gibi belirli türler, özel yönetmeliklere tabi olabilir (UN3480, UN3481 gibi).¹⁹⁻²⁰

Ambalajlama, Etiketleme ve İşaretleme: Aküler, taşımacılık sırasında zarar görmesini engellemek amacıyla uygun ambalajlama ve

paketlemeye tabi tutulmalıdır.²¹ Ambalajlama, akülerin dış etkilere karşı korunmasını sağlamakla birlikte, ambalajın patlama ve sızıntı gibi risklere karşı dayanıklı olması da zorunludur. Ambalajlar, elektriksel bileşenlerin hasar görmesini önleyecek şekilde tasarlanmalıdır.^{17,21} Taşıma aracının üzerinde ve ambalajlarda, ilgili tehlike etiketleri bulunmalıdır (örneğin, lityum batarya sembolü veya tehlikeli madde sembolleri). Bu, acil durumlarda müdahale ekiplerine rehberlik eder.¹⁷

Taşıma Araçları ve Ekipmanı: Akü taşımacılığında kullanılacak taşıma araçları ve ekipmanı, tehlikeli madde taşımacılığı standartlarına uygun olmalıdır. Özellikle akülerin sabitlenmesi, devrilmesi veya çarpışmaya karşı korunması gerekmektedir. Araçların düzenli bakımının yapılması, güvenli taşımayı sağlamak açısından önemlidir.¹⁷

Belgeler ve Bildirimler: Akü taşımacılığı sırasında, taşıma belgeleri (örneğin, tehlikeli madde taşıma belgesi) ve bildirimlerin eksiksiz düzenlenmesi gerekmektedir. Bu

belgeler, taşınan akülerin özelliklerini, miktarını ve taşıma şartlarını içermelidir.^{17,22,23}

Sürücü Eğitimi ve Bilgilendirilmesi: Akü taşımacılığını gerçekleştirecek olan sürücü ve taşıma ekibi, tehlikeli maddelerle çalışmanın riskleri ve güvenlik önlemleri ile tehlikeli madde taşımacılığı konusunda eğitim almış olmaları şarttır. Bu eğitim, acil durum prosedürleri, güvenlik kuralları ve taşıma esnasında yapılması gerekenler hakkında bilgi sağlamalıdır.^{17, 23, 24}

Acil Durum Prosedürleri: Taşıma sırasında herhangi bir acil durumda (yangın, sızıntı vb.) geldiğinde izlenecek acil durum planları oluşturulmalı ve ekip tarafından bilinmelidir. Bu hem insan sağlığı hem de çevre açısından büyük önem taşımaktadır.¹⁹

Bu kurallar hem yasal zorunlulukları yerine getirmek hem de taşınan akülerin güvenliği ve çevredeki olası riskleri en aza indirmek için kritik öneme sahiptir.

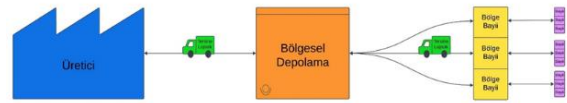
Çok tehlikeli sınıfa giren maddelerin taşınması hem güvenlik hem de çevresel riskler açısından büyük önem taşımaktadır.²² Bu tür maddeler, insan sağlığı ve çevreye ciddi zararlar verebilecek potansiyele sahiptir. Akü taşımacılığı da bu tür tehlikeli maddeler arasında yer alır, özellikle pil tipine ve içeriğine bağlı olarak farklı kimyasal maddeler içerir. Aküler, içerdikleri kimyasallar nedeniyle yangın ve patlama riski taşımaktadır. Özellikle günümüzde elektrikli araçlarla sıkça gündeme gelen lityum-iyon piller, hızlı bir şekilde yanabilir veya patlayabilirken, bu durum taşımacılık süreçlerinde özel önlemler alınmasını zorunlu kılmaktadır.²⁰

Akülerin hasar görmesi durumunda içerdikleri kimyasalların sızması veya yayılması, ciddi çevresel zararlara yol açabilir.²² Bu durum, toprak, su ve hava kalitesinin bozulmasına sebep olabilir. Bu nedenle, taşımacılık sırasında çevresel koruma tedbirlerinin alınması gerekmektedir. Akülerin içerdikleri kimyasallar, insan sağlığını tehdit edebilir. Bu nedenle, akü taşımacılığı sırasında işçilerin ve diğer

paydaşların güvenliği büyük önem taşımaktadır.

Türkiye’de Atık Akülerin Tersine Lojistiği

Türkiye’de atık akülerin tersine lojistiği, “Atık Yönetimi Yönetmeliği”²⁵, “Atık Pil ve Akümülatörlerin Kontrolü Yönetmeliği (APAK Yönetmeliği)”²⁶ ve “Atıkların Karayolunda Taşınmasına İlişkin Tebliğ”²¹ gibi yasal düzenlemeler çerçevesinde yürütülmektedir. Bu düzenlemeler, atıkların çevreye zarar vermeden taşınması, depolanması ve geri dönüşümünü hedefleyen temel ilkeleri belirler



Şekil 1. Akülerin Dağıtım ve Geri Toplama Süreçleri

Özellikle 16061 kodu, kurşunlu pillerin (kurşun-asit aküler) tehlike sınıfını tanımlamak için kullanılır. Bu tür aküler, içeriklerindeki kurşun ve sülfürik asit nedeniyle sağlık ve çevre açısından ciddi riskler taşır. Kurşun-asit aküler, kullanıldıktan sonra uygun şekilde bertaraf edilmediğinde toprağı, yeraltı sularını ve ekosistemi kirletebilir. Bu nedenle, Türkiye’de tersine lojistik süreçleri hem çevresel riskleri azaltmak hem de bu akülerin geri dönüşümünden ekonomik fayda sağlamak amacıyla dikkatle yönetilmektedir.²⁷

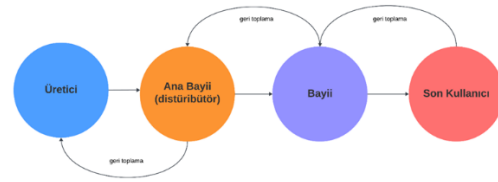
Atık Pil Akümülatör Katılım Payı (APAK), Türkiye’de atık pillerin ve akümülatörlerin çevreye zarar vermeden toplanması, taşınması, geri dönüştürülmesi ve bertaraf edilmesi amacıyla oluşturulmuş bir finansman mekanizmasıdır. Bu sistem, 2004 yılında yayımlanan “Atık Pil ve Akümülatörlerin Kontrolü Yönetmeliği” ile yürürlüğe girmiştir.²⁶ APAK kapsamında, tüketiciler, satın aldıkları her pil ve akümülatör için belirli bir katılım payı öder. Bu gelirler, atık yönetim süreçlerini finanse etmekte ve çevre koruma çalışmalarını desteklemektedir. APAK sistemi aynı zamanda, atık pillerin geri dönüşüm teknolojilerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Örneğin, Dönmez ve Türkay

(2013), Türkiye'deki atık piller için tersine lojistik ağlarının tasarımı ele aldıkları çalışmada, APAK sisteminin çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki olumlu etkilerini vurgulamışlardır.²⁷ APAK çerçevesinde, atık pillerin toplama ve bertaraf maliyetlerinin azaltılması hedeflenmiş, bu da kaynakların daha etkin bir şekilde kullanılmasına olanak tanımıştır.

Geri Kazanım Katılım Payı (GEKAP), çevre dostu atık yönetim uygulamalarını teşvik etmek amacıyla atık üreticilerinden alınan bir başka finansman mekanizmasıdır. GEKAP, atıkların toplanması ve geri dönüşümü için kaynak sağlamanın yanı sıra çevresel farkındalığı artırmaya yönelik önemli bir araçtır. APAK ve GEKAP gibi sistemler, Türkiye'nin çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasında kritik bir rol oynar.

Buna ek olarak, Mobil Atık Takip (MoTAT) Sistemi, "Atıkların Karayolunda Taşınmasına İlişkin Tebliğ" kapsamında geliştirilmiş bir çevrimiçi izleme sistemidir. MoTAT, atık taşıma süreçlerinin şeffaf ve etkin bir şekilde denetlenmesini sağlamak üzere tasarlanmıştır. Bu sistem, atık taşıma firma ve araç lisanslarının verilmesi, atık taşıma araçlarının güzergahlarının anlık izlenmesi ve tüm taşıma verilerinin raporlanması gibi fonksiyonları yerine getirir.²⁸ MoTAT, atık yönetiminde şeffaflık ve denetim sağlarken, aynı zamanda çevre ve toplum sağlığını koruma noktasında önemli katkılarda bulunur. Bu tür yenilikçi uygulamalar, Türkiye'nin uluslararası çevre standartlarına uyum sağlamasına olanak tanımaktadır.

Kurşun-asit aküler, çevresel açıdan en fazla dikkat edilmesi gereken atık türlerinden biridir. Bu aküler, yüksek miktarda kurşun ve sülfürik asit içermeleri nedeniyle yanlış şekilde bertaraf edildiklerinde toprağa, su kaynaklarına ve çevreye ciddi zararlar verebilirler. Paylaşılan Şekil 1 ve 2'de, bir akü firmasının, dağıtım ve geri toplama süreçlerini içeren bir tersine lojistik ağı resmedilmektedir. Bu süreç, akünün üretiminden, ömrünün sonuna geldiği noktaya, oradan kaynağa yani geri dönüşüm aşamasına kadar uzanır.



Şekil 2. Akülerin Yolculuğu

Üretilen aküler, üreticiden başlayarak, ana distribütör, bayi ve son kullanıcıya kadar bir dağıtım zinciri üzerinden taşınır. Bu tür çok katmanlı bir tedarik zinciri, ürünlerin geniş bir coğrafi alanında etkin bir şekilde ulaşmasını sağlar. Tedarik zincirlerinin bu aşaması, işletmelerin talep ve lojistik yönetimi üzerinde kritik bir rol oynar.²⁹

Aküler kullanım ömrünü tamamladıktan sonra, tersine lojistik ağı devreye girer. Bu süreçte, son kullanıcı tarafından kullanılan aküler, bayi ve ana distribütör aracılığıyla üreticiye geri gönderilir. Burada amaç, akülerin içerdikleri tehlikeli maddelerin çevreye zarar vermeden geri dönüşüme kazandırılmasını sağlamaktır. Örneğin, Silva ve arkadaşları (2024), Brezilya'da tersine lojistik sistemlerinin kurşun-asit akülerin geri dönüşümünde nasıl daha dayanıklı hale getirilebileceğini analiz etmiş ve bu tür süreçlerin çevresel sürdürülebilirliğe katkısını vurgulamıştır.³⁰

Üreticiye geri dönen aküler, geri dönüşüm merkezlerinde işlenir. Geri kazanılan kurşun gibi metaller, yeni akü üretiminde kullanılmak üzere ayrıştırılırken, sülfürik asit gibi tehlikeli bileşenler uygun yöntemlerle bertaraf edilir. Bu süreç, doğal kaynakların korunmasına katkıda bulunurken enerji ve maliyet tasarrufu da sağlar. Shi (2024) tarafından yapılan bir çalışmada, genetik algoritmalar kullanılarak tersine lojistik süreçlerinin optimize edilmesi ve bu süreçlerin lojistik maliyetlerini nasıl düşürebileceği incelenmiştir.³¹

Tersine lojistik, yalnızca çevresel etkileri azaltmakla kalmaz, aynı zamanda işletmelerin ekonomik performansını da artırır. Tedarik zinciri süreçlerinin geri dönüşüm aşamasıyla entegre edilmesi hem kaynakların yeniden kazanılmasını sağlar hem de karbon ayak izini düşürür.

Kimyasal Pillerin Depolama, Taşıma ve Geri Dönüşüm Süreçlerindeki Tehlikeler

Kimyasal pillerin depolanması, taşınması ve geri dönüşüm süreçleri hem çevresel hem de insan sağlığı açısından ciddi tehlikeler içerir. Bu tehlikeler, pillerin türüne ve bu süreçlerdeki uygulamalara bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Güvenli bir şekilde yönetilmeyen kimyasal piller, yangın, patlama, toksik gaz salınımı gibi durumlara neden olarak çevreye ve insan sağlığına zarar verebilir.³² Ayrıca, çevresel sürdürülebilirliği sağlamak adına, sıfır atık politikalarına ve minimum enerji tüketimine odaklanan geri dönüşüm yaklaşımları benimsenmelidir.

Depolama ve Taşıma Süreçleri

Kimyasal pillerin taşınması ve depolanması sırasında meydana gelebilecek başlıca tehlikeler arasında yangın ve patlama riskleri öne çıkar. Yanlış koşullarda depolanan piller, içerdikleri kimyasallar nedeniyle aşırı ısınmaya, sızıntılara veya

toksik gaz salınımına yol açabilir. Özellikle taşıma sırasında uygun olmayan paketleme veya mekanik hasarlar, bu tür olayları tetikleyebilir.³³ Ayrıca, bu süreçlerde toksik kimyasalların çevreye yayılma riski bulunmaktadır. Schismenos ve arkadaşları (2021), kimyasal pillerin bu tür riskleri en aza indirmek için sıkı güvenlik önlemleri altında yönetilmesi gerektiğini vurgulamıştır.³²

Geri Dönüşüm Süreçleri

Kimyasal pillerin geri dönüşümü, sürdürülebilir bir çevre politikası için kritik öneme sahiptir, ancak bu süreçler de tehlikelerden tamamen arınmış değildir. Geri dönüşüm sırasında, pil içerisindeki kimyasalların açığa çıkması ve bunların çevreye zarar verme riski bulunmaktadır. Özellikle geri dönüşüm tesislerinde çalışan işçiler, toksik maddelere doğrudan maruz kalma tehlikesiyle karşı karşıyadır.³⁴ Ayrıca, geri dönüşüm işlemleri sırasında kullanılan kimyasal süreçler, çevre kirliliğine ve enerji tüketimine neden olabilmektedir.³⁵

MATERYAL VE METOT

Tehlikeli madde taşımacılığı ve özellikle tersine lojistik süreçlerinde risk yönetimi hem çevresel sürdürülebilirlik hem de güvenlik açısından kritik bir öneme sahiptir. Risk analiz yöntemleri arasında, Hata Ağacı Analizi (Fault Tree Analysis, FTA), bu alanda diğer yöntemlere kıyasla öne çıkmaktadır. FTA'nın tehlikeli madde taşımacılığı ve tersine lojistikteki diğer risk analiz yöntemlerinden farklı olarak öne çıkmasının temel nedenleri, hiyerarşik yapısı, belirsizlikleri yönetme yeteneği, kritik riskleri önceliklendirme kabiliyeti, çoklu olay analizi imkânı ve çevresel etkilerle entegrasyonudur. Bu özellikler, FTA'nın tersine lojistik süreçlerindeki karmaşıklık ve risk çeşitliliğini yönetmek için etkili bir araç olmasını sağlamaktadır.

FTA, karmaşık sistemlerde tehlikeleri belirlemek ve analiz etmek için hiyerarşik bir yapı sunar. Bu özellik, tehlikeli madde taşımacılığında, tersine lojistik süreçlerindeki çok sayıda aktör ve aşama göz önüne alındığında, büyük bir avantaj

sağlamaktadır.³⁶ FTA, hataların olası nedenlerini ve etkilerini sistematik olarak inceleyerek, bu süreçlerde güvenlik açıklarının belirlenmesini kolaylaştırır. FTA, birden fazla olayın neden-sonuç ilişkilerini aynı anda analiz etme yeteneğine sahiptir. Örneğin, tehlikeli maddelerin taşınması sırasında domino etkisi yaratan zincirleme olaylar, FTA'nın sağladığı kapsamlı analiz sayesinde daha etkin bir şekilde ele alınabilir.³⁷

FTA, hata ağacındaki olaylar arasında nedensel ilişkiler kurarak bu belirsizlikleri sayısal hale getirir ve olasılık hesaplamalarına olanak tanır. Bu özellik, diğer yöntemler (ör. HAZOP veya FMEA) ile kıyaslandığında, FTA'yı belirsizliklerin yönetiminde daha derinlemesine analiz için uygun kılar.³⁸ Bu, özellikle tersine lojistikte maliyet etkin çözümler geliştirmek için de önemlidir. Örneğin, tehlikeli madde taşımacılığında geri dönüşüm merkezlerine yönelik ağ tasarımı çalışmaları, en yüksek riskli faktörlere odaklanılarak optimize edilebilir.²⁷ Tersine

lojistik süreçlerinde çevresel risklerin değerlendirilmesi önemlidir. FTA, çevresel etkilerin sistematik bir şekilde modellenmesine olanak tanır ve geri dönüşüm sürecinde meydana gelebilecek potansiyel tehlikelerin çevresel sonuçlarıyla ilişkilendirilmesini sağlar.³⁹

Örnek FTA Risk Analizi

Bu çalışmada Türkiye’de akü lojistiği ve tersine lojistiğini gerçekleştirilen bir karayolu taşımacılık firmasının filosuna ait bir kamyonun, “atık akülerin dönüş yolculuğunda kaza yapması ve kabin içindeki akülerin devrilmesiyle, kimyasal madde ve

asit dökülmesi sonucu insan ve çevre sağlığına zarar vermesi” senaryosuna uygun bir FTA yapılmıştır.

Analiz yapılırken öncelikle sistemin tanımlanması gerekmektedir. Analiz edilecek sistem veya süreç belirlenir. Örneğin, LPG taşıyan bir tanker gemisinin risk faktörleri analiz edilecekse, tüm taşıma süreci detaylı şekilde ele alınır.⁴⁰ Çalışmamızda, bir akünün fabrika çıkışından tüketiciye ulaşımı, oradan da geri dönüş yolculuğu boyunca uyulması gereken kurallar, tehlikeler gibi tüm süreçler dikkatle sıralanmıştır.

Tablo 3. Akülerin Devrilmesiyle Kimyasal Madde ve Asit Dökülmesi Tepe Olaya Göre Seviyelerin Belirlenmesi

1. Seviye Olaylar	2. Seviye Olaylar	3. Seviye Olaylar	4. Seviye Olaylar
Temel Tehdit	Olası Risk Sebebi	Nedenler	Alt nedenler
Araçın kazası	Lastik patlaması	Lastik basıncının kontrol edilmemesi	
		Aşırı yükleme	
		Dış etkenler (keskin cisim, çukur vb.)	
	Sürücü hatası	Yorgunluk veya dikkat dağınıklığı	
		Hız sınırının aşılması	
		Yetersiz eğitim	
Hava şartları			
Araç arızası			
Akülerin araç içinde devrilmesi	Araçta şiddetli sarsıntı	Araç kazası	
		Bozuk zemin koşulları	Yol bakımının yetersizliği
			Yolda tehlikeli cisimlerin bulunması
	Akülerin taşıma ve yükleme sırasında sabitlenmemesi	Olumsuz hava şartları	
		Yetersiz sabit ekipman	
		Düşük kaliteli malzeme kullanımı	

Ardından ana olayın belirlenerek, hata ağacının tepesinde yer alacak ana olay tanımlanır. Çalışmamızda bu olay, “atık akülerin dönüş yolculuğunda kaza yapması ve kabin içindeki akülerin devrilmesiyle, kimyasal madde ve asit dökülmesi sonucu insan ve çevre sağlığına zarar vermesi” olarak belirlenmiştir.

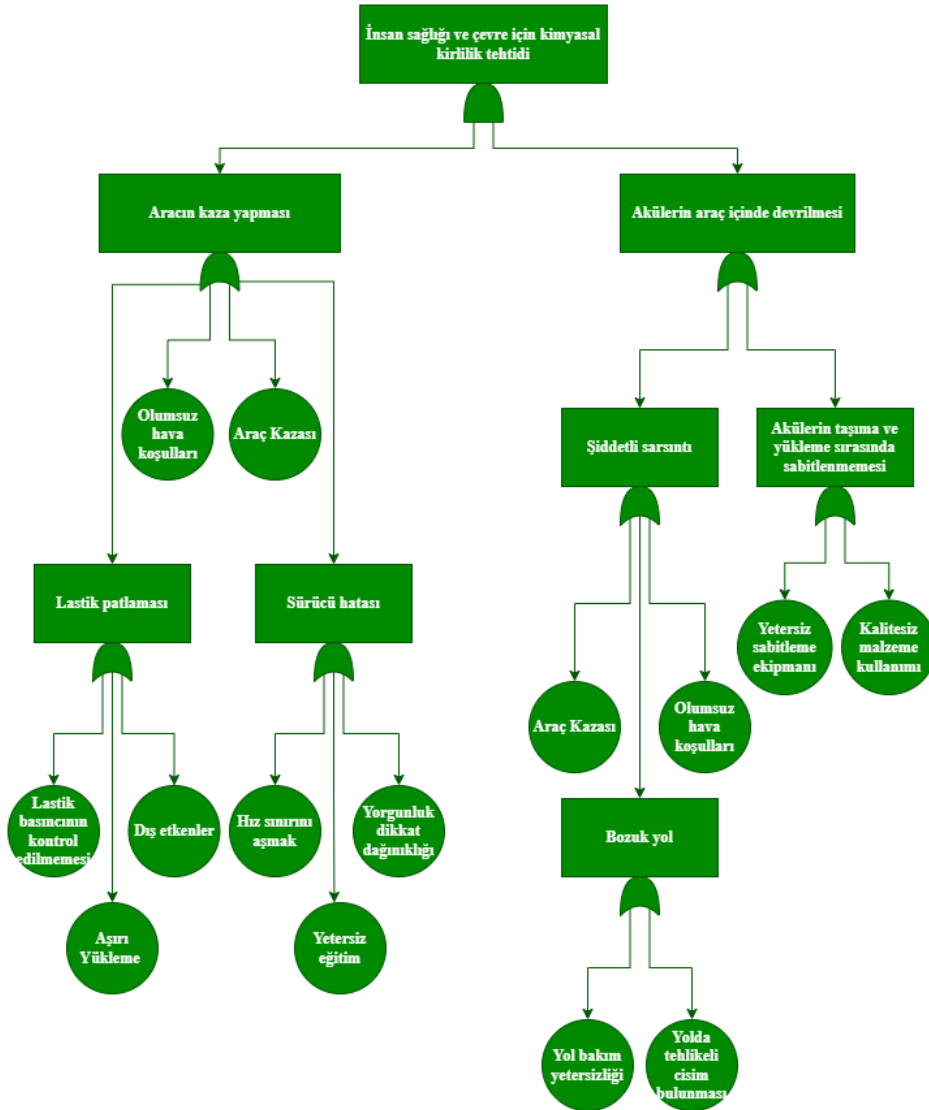
Alt olayların tanımlanmasıyla FTA analizine devam edilir. Ana olaya neden olabilecek tüm alt olaylar hiyerarşik bir yapı ile modellenir. Çalışmamızda tüm olay ve alt olaylar Tablo 3’de belirtilmiştir. FTA analizinde 4. seviye olaylar alt riskler olarak tanımlanır. 3. seviye olaylar riskin nedenlerini oluşturur. 2. seviye olası sebepler nedenlerin sonucunda ortaya çıkar. Olası sebeplerin tetiklemesiyle temel tehdit adı verilen

durumlar oluşur. Temel tehditlerden biri ya da hepsi tepe olayı, yani ana olayın gerçekleşmesine neden olur.

Hata ağacı analizi hazırlanırken Tablo 4’te verilen işlemlere uygun semboller kullanılır. Burada en önemli semboller ve/veya kapılarını gösteren işaretlerdir. VE kapıları, alt olayların tümünün gerçekleşmesi durumunda üst olayın gerçekleşeceğini VEYA kapıları, alt olaylardan herhangi birinin gerçekleşmesi durumunda üst olayın gerçekleşeceğini ifade eder. Tablo 3’te verilen olaylar dizisi ve Tablo 4’te verilen semboller kullanılarak hazırlanan olay ağacı analizi Şekil 3’teki gibi hazırlanmıştır.

Tablo 4. FTA Analizinde Kullanılan Temel Semboller ve Anlamları

Sembol	İşaret edilen	İşlev
○	Temel olay	Temel olay veya hata
◇	Gelişmemiş olay	Gelişmemiş durum
□	Olay	Temel olaylardan oluşan olay
▭	Durumsal olay	Normal şekilde oluşabilecek olay
⌋	VE kapısı	C çıktı olayı, eğer bütün girdi olayları(A ve B) aynı anda oluşuyorsa kullanılır.
⌋	VEYA kapısı	C çıktı olayı eğer herhangi bir girdi olayı oluşursa meydana gelir.
△	Transfer sembolü	Ağacın başka bir yerde daha ileri noktaya gelişimini gösterir



Şekil 3. “Atık akülerin dönüş yolculuğunda kaza yapması ve kabin içindeki akülerin devrilmesiyle, kimyasal madde ve asit dökülmesi sonucu insan ve çevre sağlığına zarar vermesi” senaryosuna uygun bir FTA (Hata Ağacı Analizi)

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, insan sağlığı ve çevre için kimyasal kirlilik tehdidine yol açabilecek risk faktörlerini Hata Ağacı Analizi (FTA) yöntemiyle incelemiştir. Analize göre iki temel tehdit unsuru olan aracın kaza yapması ve akülerin kabin içerisinde devrilmesidir.

Aracın kaza yapmasına yol açan olası sebepler, lastik patlaması, araç arızası, olumsuz hava koşulları ve sürücü hatasıdır. Lastik patlaması, aşırı yükleme, lastik basıncının kontrol edilmemesi ya da yol kaplamasında keskin cisim, çukur gibi dış etkenlere bağlı olarak gerçekleşmiş olabilir. Sürücü hatası; yorgunluk ve dikkat dağınıklığı, hız sınırının aşılması veya yetersiz eğitimden kaynaklanabilir. Literatürde, sürücü hataları trafik kazalarının yaklaşık %90'ından sorumlu tutulmaktadır. Özellikle yorgunluk ve dikkat eksikliği, uzun mesafeli taşıma yapan sürücülerde sık karşılaşılan sorunlardır.⁴¹ Ayrıca, olumsuz hava koşullarında araç bakımı ve lastik kontrollerinin aksaması kazaları artırmaktadır.

Araç içinde akülerin devrilmesi aracın kaza yapmasından kaynaklanmış olsa da bunu tetikleyen olası sebepler, araçta şiddetli sarsıntı olması veya akülerin taşınma ve yükleme sırasında sabitlenmemesidir. Araçta şiddetli sarsıntının alt nedenleri araç kazası, bozuk zemin koşulları veya olumsuz hava koşulları olabilir. Akülerin taşınma ve yükleme sırasında sabitlenmemesinin alt nedenleri; yetersiz sabitleme elemanı kullanımı veya kalitesiz sabitleme elemanları seçimi olabilir. Akü devrilmelerinin kimyasal

sızıntı gibi sonuçları vardır. Şiddetli sarsıntı ve bozuk yol, taşıma sırasında güvenlik önlemlerinin alınmaması halinde kimyasal kirlenme riskini artırabilir.⁴² Özellikle taşımacılıkta kullanılan ekipmanların kalitesizliği, bu riskin artmasına neden olmaktadır.

Bu senaryoda kritik faktörler, Yetersiz lastik bakımı, olumsuz yol koşulları, yetersiz sabitleme ekipmanları ve eğitim eksikliği olarak tanımlanabilir. Olası zincirleme riskler ise, olası kazada hem aracın devrilmesi hem de kabin içindeki akülerin düşmesiyle çift yönlü bir tehdittir. Bu nedenle analizin odak alanları, akülerin sabitlenmesi ve taşıma güvenliği, senaryodaki temel odak noktaları olarak tanımlanabilir. Özellikle sabitleme ekipmanlarının kalitesi, düzenli bakım ve hız kontrolü önemli faktörlerdir. Zincirleme riskler, her bir alt olay, bir üst olayın tetikleyicisi durumundadır. Örneğin, yolda tehlikeli cisim bulunması, araçta şiddetli sarsıntıya, şiddetli sarsıntı ise akülerin kabin içinde devrilmesine yol açar.

Önleyici Tedbirler, akülerin sabitlenmesinde yüksek kaliteli malzeme kullanılması, düzenli araç bakımının yapılması, özellikle fren sisteminin kontrolü, sürüş güvenliği, Hız limitlerine uyulması ve hava/zemin koşullarına uygun sürüş gerçekleştirilmesidir. Risk Yönetimi bağlamında, hata ağacında, her seviyede yer alan risk faktörlerine yönelik tedbirler alınarak tepe olayın oluşma olasılığı minimize edilebilir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, atık akülerin bertaraf tesislerine ulaştırılması sürecinde karşılaşılan tehlikeler ve risklerin, tersine lojistik bağlamında değerlendirilmesini amaçlamıştır. Özellikle taşıma sürecinde ortaya çıkabilecek kimyasal sızıntılar, yangın, patlama ve çevresel kirlilik gibi risklerin yanı sıra, lojistik süreçlerin güvenliğinin artırılmasına yönelik

öneriler ele alınmıştır. Elde edilen bulgular, aşağıdaki temel sonuçlara işaret etmektedir:

Atık akülerin taşınmasında karşılaşılan en önemli sorunlardan biri kimyasal sızıntı ve çevresel kirlilik riskidir. Özellikle lityum iyon ve kurşun-asit aküler, yangın ve patlama gibi ciddi tehlikeler barındırmaktadır.³² Bu riskler, uygun olmayan ambalajlama ve sabitleme ekipmanlarının kullanımı ile daha da

artmaktadır. Araç kazalarının ve bozuk yol koşullarının bu süreçteki etkisi, çevresel ve insan sağlığı risklerini ciddi şekilde artırmaktadır.⁴¹

Hata Ağacı Analizi (FTA), taşıma sürecinde meydana gelebilecek riskleri sistematik bir şekilde ele alarak, kritik müdahale alanlarının belirlenmesini sağlamıştır. FTA'nın hiyerarşik yapısı, taşıma sırasında karşılaşılan risklerin zincirleme etkilerle nasıl büyüyebileceğini açıkça göstermiştir. Örneğin, lastik patlaması gibi bir olayın domino etkisiyle kazalara ve kimyasal sızıntılara yol açabileceği tespit edilmiştir.³⁸ Bu analiz, taşıma sürecindeki zincirleme risklerin anlaşılmasına ve bu risklere yönelik stratejik önlemlerin geliştirilmesine katkıda bulunmuştur.

Kimyasal pillerin depolama, taşıma ve geri dönüşüm süreçlerinde karşılaşılan bu tehlikeler, yalnızca güvenlik açısından değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik açısından da ele alınmalıdır. Atık akülerin tersine lojistik süreçlerinde geri dönüşümü, çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik bir öneme sahiptir. Geri kazanılan kurşun ve diğer malzemelerin yeni akü üretiminde kullanımı, doğal kaynakların korunmasına ve enerji tasarrufuna katkı sağlamaktadır.²⁷ Güvenlik önlemlerinin yanı sıra, geri dönüşüm süreçlerinin daha az toksik ve enerji verimli hale getirilmesi, bu sorunların çözülmesine katkı sağlayabilir. Türkiye'de uygulanan GEKAP ve APAK gibi finansal mekanizmalar, atık akülerin toplanması ve geri dönüşüm süreçlerinin etkinliğini artırmakta, aynı zamanda çevresel zararları azaltmaktadır.³⁰

Çalışmanın bulguları hem lojistik firmalara hem de politika yapıcılara yönelik önemli çıkarımlar sunmaktadır. Öncelikli olarak, taşıma sırasında kullanılan ambalajlama ve sabitleme ekipmanlarının kalitesinin artırılması ve bu ekipmanların düzenli kontrolünün sağlanması

gerekmektedir.¹⁸ Ayrıca, sürücü ve lojistik personeline yönelik eğitim programlarının genişletilmesi, taşımacılık süreçlerindeki insan kaynaklı hataların azaltılmasında etkili olacaktır.⁴² Yol altyapısının iyileştirilmesi, bozuk yol koşullarının düzenlenmesi, taşımacılık ekipmanlarının düzenli bakımının yapılması, taşımacılıkta teknolojik yeniliklerin kullanımı gibi operasyonel geliştirmeler ve taşınan akülerin özelliklerine uygun güzergâh planlamasının yapılması önemlidir.³²

Bu çalışmanın sonuçları, atık akülerin bertaraf tesislerine taşınması sırasında karşılaşılan risklerin belirlenmesi ve bu risklerin azaltılması için uygulamaya yönelik bir çerçeve sunmaktadır. Ancak, bu sürecin daha geniş bir perspektiften ele alınarak, farklı taşıma modlarının (örneğin deniz yolu veya demir yolu) risk analizine dahil edilmesi, gelecekteki araştırmalar için faydalı olacaktır. Blok zinciri, genetik algoritmalar, dinamik risk analiz yöntemleriyle acil müdahale sistemleri gibi yenilikçi teknolojilerin tersine lojistik süreçlerine entegrasyonu, operasyonların şeffaflığını ve verimliliğini artırabilir.³¹

Araştırmanın Kısıtlılıkları

Çalışmada planlanan akıştan herhangi bir sapma yoktur.

Teşekkür/Destekleyen Kuruluş

Alan araştırması sürecinde sektörel bilgi ve deneyimleriyle makalenin oluşumundaki destekleri için lojistik profesyoneli Kaan Özdeş'e teşekkür ederim.

Çıkar Çatışmaları

Yazar bu makalenin yayınlanmasıyla ilgili herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Yazarların katkıları

Çalışma %100 yazara aittir. Katkı veren başka yazar bulunmamaktadır.

KAYNAKLAR

1. Marić J, Opazo-Basáez M. Green Servitization for Flexible and Sustainable Supply Chain Operations: A Review of Reverse Logistics Services in Manufacturing. *Glob J Flex Syst Manag.* 2019;20:65–80. doi:10.1007/s40171-019-00225-6.
2. Richnák P, Gubová K. Green and Reverse Logistics in Conditions of Sustainable Development in Enterprises in Slovakia. *Sustainability.* 2021. doi:10.3390/SU13020581.
3. Wu Z, Zhao Z. Sustainable Development of Green Reverse Logistics Based on Blockchain. *J Environ Public Health.* 2022. doi:10.1155/2022/3797765.
4. Kumar M, Kumar D. Green logistics optimization model for forward and reverse logistics using genetic algorithm. 2015 IEEE Int Conf Ind Eng Eng Manag (IEEM). 2015:717–20. doi:10.1109/IEEM.2015.7385741.
5. Zarbakhshnia N, Soleimani H, Goh M, Razavi S. A novel multi-objective model for green forward and reverse logistics network design. *J Clean Prod.* 2019. doi:10.1016/J.JCLEPRO.2018.10.138.
6. Plaza-Úbeda J, Abad-Segura E, Burgos-Jiménez J, Boteva-Asenova A, Belmonte-Ureña L. Trends and New Challenges in the Green Supply Chain: The Reverse Logistics. *Sustainability.* 2020. doi:10.3390/su13010331.
7. Sbihi A, Eglese R. Combinatorial optimization and Green Logistics. *Ann Oper Res.* 2010;175:159–75. doi:10.1007/s10479-009-0651-z.
8. Arroyo L, Barreto C, Vasquez O, Nicola R. The importance of Reverse Logistics and Green Logistics for Sustainability in Supply Chains. *J Bus Entrep Stud.* 2023. doi:10.37956/jbes.v7i4.351.
9. van Hoek RI. From reversed logistics to green supply chains. *Supply Chain Manag.* 1999;4:129–35. doi:10.1108/13598549910279576.
10. Şengür F. Lojistik İlkeleri. Eskişehir: T.C. Anadolu Üniversitesi Yayını No: 3508; 2018.
11. Bukhari SMAS, Maqsood J, Baig MQ, Ashraf S, Khan TA. Comparison of characteristics—lead acid, nickel-based, lead crystal and lithium-based batteries. In: 2015 17th UKSim-AMSS Int Conf Model Simul (UKSim). IEEE; 2015. p. 444–50. doi:10.1109/UKSim.2015.69.
12. United Nations Economic and Social Council (UNESCO). UN Recommendations on the Transport of Dangerous Goods – Model Regulations. United Nations; 2019.
13. International Air Transport Association (IATA). Dangerous Goods Regulations (DGR). International Air Transport Association; 2023.
14. International Maritime Organization (IMO). International Maritime Dangerous Goods (IMDG) Code. International Maritime Organization; 2022.
15. U.S. Department of Transportation (DOT), Bureau of Transportation Statistics. Transportation statistics annual report 2023. doi:10.21949/1529944.
16. 16. United Nations Economic Commission for Europe. (2024). UNECE annual report 2023. <https://unece.org/info/publications/pub/389191>
17. United Nations. Recommendations on the Transport of Dangerous Goods: Model Regulations. 2021. Available from: <https://unece.org/transport/publications/agreement-concerning-international-carriage-dangerous-goods-road-adr-2021>.
18. European Commission. Guidelines on the transport of dangerous goods by road. 2020. Available from: <https://ec.europa.eu/>.
19. International Road Transport Union. ADR and its implications for the transport industry. 2022. Available from: <https://iru.org/>.
20. Huo H, Xing Y, Pecht M, Züger BJ, Khare N, Vezzini A. Safety requirements for transportation of lithium batteries. *Energies.* 2017;10(6):793.
21. Tehlikeli Maddelerin Karayoluyla Taşınması Hakkında Yönetmelik. Resmi Gazete. 24/10/2014;29153.
22. Yalçınkaya N, Demirel E, Say N. Tehlikeli Maddelerin Karayolu ile Taşınması Sürecinde Ortaya Çıkan Çevresel Risklerin Hata Ağacı Analizi (HAA) ile Değerlendirilmesi. *SDÜ Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi.* 2020;8(4).
23. Fornalchik Y, Afonin M, Postransky T, Boikiv M. Risk assessment during the transportation of dangerous goods considering the functional state of the driver. *Transport Problems.* 2021;16.
24. Magnusson CN. Transportation of dangerous goods: A multiple stakeholder analysis for improved efficiency and safety through information sharing. In: NOFOMA 2015; 2015.
25. Atık Yönetimi Yönetmeliği. Resmi Gazete. 23/3/2017;30016.
26. Atık Pil ve Akümülatörlerin Kontrolü Yönetmeliği. RG-5/11/2013;28812.
27. Donmez I, Turkay M. Design of reverse logistics network for waste batteries with an application in Turkey. *Chem Eng Trans.* 2013;35:1393–8. doi:10.3303/cet133523228.
28. Atıkların Karayolunda Taşınmasına İlişkin Tebliğ. Resmi Gazete. 20/03/2015;29301.
29. Chopra S, Meindl P. Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation. Pearson Education; 2021.
30. Silva WD, Fontana ME, Belarmino HL, Levino N, Marques PC. Resilience optimization in disruption-prone sustainable reverse supply chains for lead-acid battery waste management in Brazil: A stochastic model for public and private policy formulation. *Socio-Econ Plan Sci.* 2024;95:102027.
31. Shi Y. Lead Battery Reverse Logistics Center Location Model and Simulation Analysis Based on Genetic Algorithm and Greedy Algorithm. *Informatica.* 2024;48(14).
32. Schismenos S, Chalaris M, Stevens G. Battery hazards and safety: A scoping review for lead acid and silver-zinc batteries. *Safety Sci.* 2021;140:105290.
33. Haque A. An Exclusive Handbook of Flexible Packaging Materials: Equipped With Raw Materials, Manufacturing & Quality Machineries & Procedures, Case Studies and Troubleshooting's. 2024.
34. Antonietti M, Pelicano CM. Translating laboratory success into the large-scale implementation of photocatalytic overall water splitting. *Front Sci.* 2024;2:1507745.
35. Vitkov N. Environmental and health challenges in battery recycling in Bulgaria. In: 2022 14th Electrical Engineering Faculty Conf (BulEF); 2022. p. 1–5. IEEE.
36. Wang H, Boulougouris E, Theotokatos G, Priftis A, Shi G, Dahle M, et al. Risk assessment of a battery-powered high-speed ferry using formal safety assessment. *Safety.* 2020;6(3):39.
37. Gao X, Zhou Y, Fan M, Jiang M, Zhang M, Cai H, et al. Environmental risk assessment near a typical spent lead-acid battery recycling factory in China. *Environ Res.* 2023;233:116417.
38. Meng, Y., Lai, J., Fan, L., Mo, S., Gou, C., Zhang, C. Recycling of the waste battery: Effect of waste battery on property of asphalt and environmental impact evaluation. *Science of The Total Environment*, 2023;904, 166983. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166983>
39. Moa, E. H. Y., Go, Y. I. Large-scale energy storage system: safety and risk assessment. *Sustainable Energy Research*, 2023;10(1), 13. <https://doi.org/10.1186/s40807-023-00082-z>

40. Durmuş, A., Çetinyokuş, S. Diyarbakır Lise'de meydana gelen LPG tankeri kazasının fiziksel etkilerinin modellenmesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 2022;10(4), 748-764. <https://doi.org/10.29109/gujsc.1147339>
41. Yılmaz, Ş., Öz, B. ve Özkan, T. Profesyonel sürüşte sürüş performansına yönelik kaliteli bir çalışma. Trafik ve Ulaşım Araştırmaları Dergisi, 2019;2 (1), 51-65.
42. Gültaç, A. S. Türkiye’de Taşımacılık Sektöründe İş Kazalarının Analizi. Gümüşhane Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi, 2023;12(2), 727-736. <https://doi.org/10.37989/gumussagbil.1137013>