

Journal of Transportation and Logistics

Araştırma Makalesi | Research Article

🔓 Açık Erişim | Open Access

Tehlikeli Madde Lojistiğinde Güzergahların Bulanık Çok Ölçütlü Karar Verme Yöntemleri ile Belirlenmesi: Adıyaman-Ankara Örneği

Determination of Routes in Hazardous Material Logistics Using Fuzzy Multi-Criteria Decision-Making Methods: The Case of Adıyaman-Ankara



Yusuf Bera Sanlı¹ , Emel Güven¹ , Lütfü Tokuştepe¹ , Kaan Osman Özbek¹ , Berkay Arslan¹  & Tamer Eren¹ 

¹ Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale, Türkiye

Öz

Tehlikeli maddeler, insan sağlığına ve çevreye zarar verme potansiyeli taşıyan riskli malzemelerdir. Bu maddelerin yanlış güzergahlarda taşınması, ciddi kazalara ve çevresel tahribatlara neden olabilirken yanlış kararların alınması, yalnızca insan sağlığı ve çevreyi değil, ekonomik sürdürülebilirliği de olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, çalışma bulguları hem lojistik süreçlerin iyileştirilmesine hem de ulusal ve bölgesel düzeyde yol göstermeye katkı sunmaktadır. Bu çalışmada, Adıyaman-Ankara güzergahı özelinde tehlikeli madde lojistiği için uygun güzergah seçimini etkileyen kriterlerin belirlenmesi ve ağırlıklandırılması ele alınmıştır. Literatür taraması ve uzman görüşlerine dayanarak belirlenen 17 kriter, belirsizlik ve uzman görüşlerindeki farklılıkları inceleyen Pisagor Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemiyle değerlendirilmiştir. Bu yöntem, belirsizliğin yüksek olduğu durumlarda karar alma süreçlerini daha hassas hale getirmeyi amaçlar. Kriterlerin ağırlıklandırılmasının ardından, alternatif güzergahlar Çok Kriterli Karar Verme yöntemlerinden biri olan TOPSIS ile sıralanmıştır. Bu teknik, alternatifleri ideal ve anti-ideal çözümlere olan uzaklıkları temel alarak değerlendirir ve en uygun çözümü belirler. Yapılan analizler sonucunda, Gökşun-Elbistan-Ankara-Niğde Otoyolu güzergahı, güvenlik, çevresel etkiler ve operasyonel uygunluk açısından en uygun seçenek olarak belirlenmiştir. Bu çalışma, tehlikeli madde taşımacılığında risklerin minimize edilmesi, sürdürülebilir güzergahların belirlenmesi ve karar destek proseslerinin iyileştirilmesi için kapsamlı bir yöntem sunmaktadır. Çalışma, karar vericilere güvenli ve çevre dostu taşımacılık için rehberlik etmeyi hedeflemektedir.

Abstract

Hazardous materials are risky substances with the potential to harm human health and the environment. Transporting these materials on unsuitable routes can result in severe accidents and environmental damage. This study focuses on identifying and weighting the criteria that influence the selection of appropriate routes for hazardous material logistics, specifically on the Adıyaman-Ankara route. Seventeen criteria, determined through a literature review and expert opinions, were evaluated using the Pythagorean Fuzzy Analytic Hierarchy Process (AHP). This method accounts for uncertainty and variations in expert opinions, aiming to enhance decision-making accuracy in situations with high uncertainty. After weighting the criteria, alternative routes were ranked using the Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS), one of the Multi-Criteria Decision-Making methods. TOPSIS evaluates alternatives based on their distances from ideal and anti-ideal solutions to identify the best option. The analysis results indicated that the Gökşun-Elbistan-Ankara-Niğde Highway is the most suitable route in terms of safety, environmental impact, and operational feasibility. This study provides a comprehensive methodology to minimize risks in hazardous material transportation, supports sustainable route selection, and



Atıf | Citation: Sanlı, Y. B., Güven, E., Tokuştepe, L., Özbek, K. O., Arslan, B. & Eren, T. (2025). Determination of routes in hazardous material logistics using fuzzy multi-criteria decision-making methods: The case of Adıyaman-Ankara. *Journal of Transportation and Logistics*, 10(2), 296-326. <https://doi.org/10.26650/JTL.2025.1602446>

© This work is licensed under Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License. 

© 2025. Sanlı, Y. B., Güven, E., Tokuştepe, L., Özbek, K. O., Arslan, B. & Eren, T.

✉ Sorumlu Yazar | Corresponding author: Tamer Eren tamereren@gmail.com



improves decision-support processes. It guides decision-makers toward safer and more environmentally friendly transportation solutions.

Anahtar Kelimeler Tehlikeli Madde Lojistiği • Güzergah Seçimi • Çok Kriterli Karar Verme

Keywords Hazardous Materials • Route Selection • Multi Criteria Decision Making

Extended Summary

The transportation of hazardous materials is a critical concern for logistics management due to the significant risks posed to human health and the environment. Materials such as explosives, flammable substances, radioactive elements, and corrosive chemicals are inherently dangerous and require meticulous planning during their movement. If these materials are not transported via carefully selected routes, the consequences can include severe accidents, environmental degradation, and public health crises. This study explores a structured and data-driven approach to selecting the optimal routes for hazardous material transportation, focusing on the journey from Adıyaman to Ankara.

The research employs the Pythagorean Fuzzy Analytic Hierarchy Process (PFAHP) to prioritize criteria impacting route selection and the Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) to evaluate alternative routes. Together, these multi-criteria decision-making (MCDM) methods provide a comprehensive framework for addressing the inherent uncertainties in subjective human judgment while ensuring a robust evaluation process. The study begins by identifying 17 critical criteria through an extensive literature review and expert consultations. These criteria include population density, risk of accidents, proximity to emergency response infrastructure, and traffic intensity. The selection process accounts for both static and dynamic factors that influence the safety and efficiency of hazardous material transportation. Static factors such as road quality and environmental sensitivity are complemented by dynamic considerations like traffic patterns and weather conditions.

The methodology follows a systematic approach:

Data Collection: Criteria relevant to hazardous material logistics were gathered from academic studies and insights from professionals in the field. **Criteria Weighting:** The Pisagor Fuzzy AHP method was employed to assign weights to each criterion, reflecting their relative importance. This approach allows the use of linguistic variables to handle the vagueness and subjectivity inherent in human decision-making. **Route Evaluation:** Using the TOPSIS method, the weighted criteria were applied to assess seven alternative routes between Adıyaman and Ankara. This method calculates the geometric distance of each route to an ideal solution, ranking them in order of suitability. The results indicate that the "Göksun-Elbistan-Ankara-Niğde Otoyolu" route is the most optimal choice for transporting hazardous materials. This route achieves a favorable balance across key factors such as safety, efficiency and environmental considerations. Specifically, it ranks highest in proximity to emergency response facilities, minimal exposure to populated areas, and manageable traffic conditions.

The key findings from the analysis include the following:

- Dynamic factors such as traffic fluctuations and weather conditions must be integrated into route planning to adapt to real-time changes effectively.
- Routes that minimize human exposure and environmental impact should be prioritized, even if they require longer travel distances or higher costs.
- The combination of Pisagor Fuzzy AHP and TOPSIS offers a robust framework for evaluating complex logistics decisions, making it applicable to other hazardous material transportation scenarios.

This study emphasizes the critical need for data-driven, structured methodologies in hazardous material logistics. Because these materials carry unique risks, ensuring their safe and efficient transportation is paramount to protecting public safety and preserving environmental integrity. The integration of MCDM techniques enables logistics planners and policymakers to make informed decisions based on a holistic view of the factors at play. To enhance the applicability of these findings, the study recommends the integration of real-time data sources, such as GPS tracking and live traffic updates, into the decision-making process. In addition, continuous monitoring and re-evaluation of the identified criteria are essential to account for the evolving conditions and technological advancements in the

logistics sector. This research contributes valuable insights for improving hazardous material transportation, offering a replicable model that can be adapted to various regional contexts and types of dangerous goods. The findings support the development of safer, more efficient, and environmentally responsible logistics strategies, ultimately aiding policymakers and industry stakeholders in mitigating the risks associated with hazardous material movement.

Tehlikeli Madde Lojistiğinde Güzergahların Bulanık Çok Ölçütlü Karar Verme Yöntemleri ile Belirlenmesi: Adıyaman-Ankara Örneği

Lojistik faaliyetlerin sistemselsel olarak uygulanması askeri alanda vuku bulduğu için kavrama yönelik ilk tanımlamalar askeri bakış açısıyla yapılmıştır. Napolyon Savaşları'nı takip eden ve aynı zamanda bir strateji uzmanı olan İsviçreli Jomini, yazmış olduğu “Savaş Sanatı” kitabında lojistikten “orduların hareketinin pratik sanatı” olarak bahsetmiştir. Jomini bu kitabında strateji, taktik, lojistik kavramları arasındaki bağlantıyı incelemiş ve bu üç mefhumdan herhangi birindeki meydana gelen başarı veya başarısızlığın savaşın genel seyrini iyi ya da kötü yönde etkileyebileceğini belirtmiştir (Kaya ve Senem, 2022). Tehlikeli madde lojistiğinin tarihçesi, insanlık tarihi boyunca tehlikeli öldürücüler, kullanımı ve bu sınıfların güvenli bir şekilde davranışlarına yönelik düzenlemelerin gelişimiyle ayrıntılı olarak ilişkilidir. İnsanlık tarihinin başından itibaren, insanlar tehlikeli maddeleri taşımışlardır.

19. yüzyılda kimya endüstrisinin gelişmesiyle birlikte asitler, bazlar ve diğer tehlikeli kimyasallar daha yaygın olarak üretilmeye ve taşınmaya başlanmıştır. Tehlikeli maddeler, fiziksel, kimyasal veya biyolojik özellikleri nedeniyle insan sağlığı ve çevre üzerinde, uzun veya kısa süre içerisinde ciddi zararlar oluşturabilirler. Tehlikeli etkiler, maruz kalma süresi ve maruz kalma şekline bağlı olarak değişir. Oluşacak kontrolsüz bir patlama, insan sağlığını bozabilecek zehirlenme, canlı doku ile teması halinde dokuyu tahrip edecek aşındırıcı maddeler, solunumu engelleyecek şekilde havadaki oksijeni azaltan veya yok eden zehirlilik özelliği az olan veya zehirsiz gazların yarattığı boğuculuk etkisi, can ve çevre üzerine ciddi boyutlarda olumsuz sonuçlar ortaya çıkaran reaktivite ve radyasyon etkileri insanlar üzerinde oluşabilecek zararlardır (Toklu ve Doğan, 2022). Tehlikeli maddeler insanlara, hayvanlara ve çevreye zarar verebilecek özelliklere sahip olmasına rağmen kullanılması gereken maddelerdir. Bu maddeler kimyasallar, yanıcı sıvılar, gazlar ve radyoaktif materyaller olabilir.

Bu maddeleri sınıflara ayırarak kendi içlerinde önlemler almak taşımacılık ve planlama çalışmalarında fayda sağlar. Tehlikeli maddeler bu yüzden 9 çeşide ayrılmıştır. Tehlikeli madde türü sınıflandırması Tablo 1’de tehlikeli madde türleri ve alt sınıfları verilmiştir (Resmi Gazete, 2008).

Tablo 1

Tehlikeli Madde Türü Sınıflandırması

UNF SINIFI	Tehlikeli Madde Türü	Alt Sınıf	Sınıf İsmi
1	Mühimmat ve Patlayıcı Maddeler	1.1-1.6 arasında alt sınıfa ayrılmıştır	1.1 kütle halinde patlama özellikli maddeler 1.2 parça tesirli patlama özellikli maddeler 1.3 yangın çıkarma riski olan maddeler 1.4 belli bir karakteristiği olmayan maddeler 1.5 kütle halinde patlama riski olan çok duyarsız maddeler 1.6 kütle halinde patlamayan duyarsız maddeler
2	Gazlar		2.1 yanıcı gazlar

UNF SINIFI	Tehlikeli Madde Türü	Alt Sınıf	Sınıf İsmi
3	Yanıcı Sıvılar	2.1-2.3 arasında alt sınıfa ayrılmıştır	2.2 yanıcı ve zehirli olmayan gazlar
		3.1-3.3 arasında alt sınıfa ayrılmıştır	2.3 zehirli gazlar
			3.1 zehirli yanıcı sıvılar
4	Katılar	4.1-4.3 arasında alt sınıfa ayrılmıştır	3.2 aşındırıcı yanıcı sıvılar
			3.3 patlayıcı yanıcı sıvılar
			4.1 yanıcı katı maddeler
5	Oksitleyiciler	5.1-5.2 arasında alt sınıfa ayrılmıştır	4.2 kendiliğinden tepkimeye giren yanıcı katı maddeler
			4.3 ısılandığında yanıcı gaz üreten katı maddeler
6	Zehirli ve Bulaşıcı Maddeler	6.1-6.2 arasında alt sınıfa ayrılmıştır	5.1 oksitleyici maddeler
			5.2 organik peroksitler
7	Radyoaktif Maddeler	Alt sınıfa ayrılmamıştır	6.1 zehirli maddeler
			6.2 bulaşıcı maddeler
8	Aşındırıcı Maddeler	Alt sınıfa ayrılmamıştır	
9	Diğer Tehlikeli Maddeler	Alt sınıfa ayrılmamıştır	

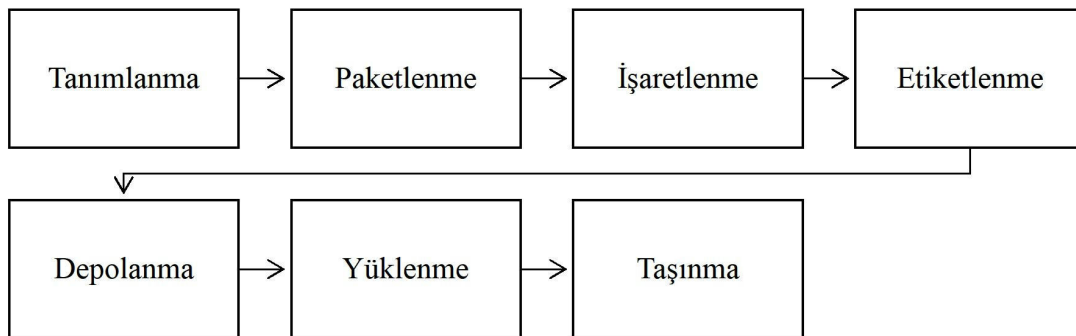
Tehlikeli madde taşımacılığında dikkat edilmesi gerekenler ve riskler için uygulanması gereken kurallar vardır. Tehlikeli madde taşınması esnasında oluşabilecek herhangi bir olumsuz durum, insan sağlığı ve çevre üzerinde ciddi riskler oluşturabilmektedir. Taşıma sırasında kural ve prosedürlere dikkat edilmelidir. Daha önceden risk faktörleri belirlenerek bu tür olumsuz sonuçların önüne geçmek gerekmektedir. Lojistik, mal ve hizmetlerin tedarik zinciri boyunca en etkin şekilde taşınması, depolanması ve dağıtılması sürecini kapsayan, organizasyonel ve yönetsel bir faaliyetler bütünü olarak tanımlanabilir ancak birçok tanımı mevcuttur (Keskin, 2006). Lojistik kelimesi askerlik terimi olarak kullanılmıştır. Bunun nedeni lojistik faaliyetlerinin ilk olarak askeri alanda ortaya çıkmasıdır. Türk Dil Kurumu, lojistik kavramını "geri hizmet" olarak tanımlamakta ve kişilerin ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla ürün ve hizmetlerin çıkış noktasından varış noktasına kadar etkili ve verimli bir şekilde taşınması, planlanması ve uygulanması süreci olarak açıklamaktadır (Türk Dil Kurumu, t.y.). Tehlikeli maddeler insan, hayvan ve çevreye zarar verebilecek özelliklere sahip olan maddelerdir. Bu maddelerin taşınması belirli standartlar ve kurallar içerisinde gerçekleşmektedir. Birçok alanda hammadde ya da son ürün olarak kullanılan tehlikeli maddelerin taşınması çok fazla özen ve dikkat istemektedir. Tehlikeli madde lojistiği, doğası gereği çok sayıda hedefe ulaşmayı amaçlar. Bu hedeflerin en belirginleri; maliyetin en aza indirilmesi, riskin en aza indirilmesi ve riskin eşit şekilde dağıtılmasıdır. Tehlikeli madde lojistiği, sadece söz konusu maddelerin bir yerden bir yere taşınması anlamına gelmemektedir. Taşıma işlemi tehlikeli madde lojistiğinde bir aşamayı belirtmektedir. Genel olarak tehlikeli madde lojistiği, söz konusu tehlikeli malın depolanması, elleçlenmesi, paketlenmesi ve taşınması proseslerinin tamamından oluşmaktadır (Erdal, 2018). Yani tehlikeli madde lojistiği; depolama, elleçleme, paketlenme ve taşıma aşamalarının bir arada yürütüldüğü bir bütünsel prosestir. Tehlikeli maddelerin hareketleri tehlike boyutunu ve alanını artırma potansiyeline sahiptir. Tehlikeli madde lojistiğinde karşılaşılan tehditler, lojistik proseslerdeki aksaklıklar, dikkatsizlikler ve bilgi eksiklikleri nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Bu bağlamda, tehlikeli madde lojistiğinde meydana gelen herhangi bir kusur, birçok kesimi olumsuz etkileyebilir ve

yaralanma ya da ölümle sonuçlanan olaylara yol açabilir. Dolayısıyla, tehlikeli madde lojistiği son derece kritik bir alan olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle, bu alanda görev alan tüm tarafların uzman, dikkatli ve özenli bireylerden oluşması büyük önem taşımaktadır (Uzel ve Durdağ, 2014). Tehlikeli madde lojistiği, çeşitli risklerle dolu bir prosestir. Bu riskler hem insan sağlığını hem de çevreyi tehdit edebilir. Kaza riski, taşıma veya depolama aşamaları sırasında meydana gelebilir, tehlikeli maddenin sızmasına, delinmesine ya da patlamasına yol açar. Bu tür olaylar, yaralanmalara veya ölümle sonuçlanabilir. Sızıntı riski, uygun paketleme veya taşıma yöntemlerinin eksikliği, maddelerin sızıntı yapmasına ve çevresel kontaminasyona yol açma riskini artırır. İnsan riski, dikkatsizlik, yetersiz eğitim veya deneyimsizlik, kazaların meydana gelmesine neden olabilir. İnsan hatası, tehlikeli madde lojistiğinde en önemli risk faktörlerinden biridir (Uzundağ, 2020). Kullanılan ekipman veya alınan önlemler ne olursa olsun, kazaların meydana gelip gelmemesinde en belirleyici unsur insan faktörüdür. Yetersiz altyapı riski, lojistik proseslerin yürütülmesinde kullanılan altyapının yetersiz olması, tehlikeli maddelerin güvenli bir şekilde taşınmasını zorlaştırır. Bu risklerin yönetimi, tehlikeli madde lojistiğinde güvenliğin sağlanması açısından kritik öneme sahiptir. Tehlikeli maddelerin taşınmasında oldukça dikkat edilmelidir. Üretimden başlayıp tüketim yerine ulaştırılmasına kadar ki gerçekleşen aşamalar titizlikle yürütülmelidir. Bu aşamalarda çalışanların uzman kişiler tarafından eğitim almaları büyük önem taşımaktadır. Tehlikeli maddelerin taşıma işlemleri öncesinde, uluslararası anlaşmalar ve mevzuatlar gözden geçirilmeli, örnek taşıma faaliyetleri dikkate alınarak prosesler planlanmalıdır (Mert ve Çetinyokuş, 2020). Tehlikeli maddeler ile ilgili olarak Tehlikeli Malların Karayolu ile Uluslararası Taşımacılığına İlişkin Avrupa Anlaşmasıdır (ADR) yönergesi vardır. Bu yönerge tehlikeli maddelerin, insan sağlığına ve çevreye zarar vermeden, güvenli ve düzenli şekilde kamuya açık karayolu ile taşımamasını sağlayan bir yönergedir. Taşıma faaliyetinde yer alan gönderenlerin, alıcıların, dolduranların, yükleyenlerin, boşaltanların, ambalajlayanların, taşımacıların ve tehlikeli madde taşıyan her türlü aracın operatör ve sürücülerinin sorumluluk, yükümlülük ve çalışma koşullarını da belirler. Bu yönetmelik kapsamında alınan belgelere ve sertifikalara ADR belgesi denir. Güzergah seçimi yapılırken bu hususlara dikkat edilmelidir. Bu çalışmada bu hususlara dikkat edilmiştir.

Tehlikeli madde lojistiğinde mutlaka dikkat edilmesi gereken prosesler bulunmaktadır. Bu prosesler aşağıdaki Şekil 1’de gösterilmiştir. Bu proseslerden herhangi birinde bile sıkıntı olması durumunda tehlikeli madde gönderilemez. İşletmeler bu proseslere dikkat ederek lojistik faaliyetlerini gerçekleştirmek zorundadırlar (Nalçakan ve Er, 2012).

Şekil 1

Lojistik prosesleri



Bu çalışmanın ileri bölümlerinde tehlikeli madde kriterleri belirlendikten sonra Pisagor Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ile kriterler ağırlıklandırılacaktır. Ardından alternatif güzergahlar belirlenip TOPSIS İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Sıralama Tekniği (TOPSIS) yöntemi ile Adıyaman-Ankara güzergahları arasından seçim yapılacaktır.

Metodoloji

Tehlikeli madde lojistiğinde güzergah belirleme kriterlerinin ağırlıklandırılması için Pisagor Bulanık AHP yöntemi, güzergah seçimi için ise TOPSIS tercih edilmiştir. Bu yöntemlerin seçilmesinin temel nedeni, kriterlerin birbirinden bağımsız olması ve çok sayıda kriterin değerlendirilmesi gerekliliğidir.

Pisagor Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi

Saaty'nin (1977) çalışması, AHP yönteminin temelini oluşturur. AHP karmaşık karar verme süreçlerinde alternatiflerin hiyerarşik bir yapıda değerlendirilmesini sağlayan çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemidir. Bu yöntem, çift karşılaştırmalar ve özdeğer hesaplamaları ile kriterler ve alternatifler arasındaki göreceli öncelikleri belirler. Sonuç olarak, sayısal bir öncelik ağırlığı elde edilir ve en uygun seçenek belirlenir. Saaty'nin ölçekleme yöntemi, bu sürecin temelini oluşturur. AHP, karmaşık kararları daha sistematik ve yapısal bir şekilde çözmeye yardımcı olur. AHP, karar verme sürecinde, farklı alternatifler arasındaki karşılaştırmaları ve önceliklendirmeleri yapılandırmak için hiyerarşik bir yapı kullanır. İlk olarak Zadeh tarafından ortaya atılan bulanık kümeler yöntemi, bulanık mantığın temelini oluşturmuş ve bu yapı her nesnenin bir üyelik derecesine sahip olduğunu ifade etmiştir (Zadeh, 2023). Ancak üyelik derecelerinin 1'i aşabilmesi olasılığı nedeniyle Yager (2013), Pisagor bulanık yöntemini geliştirmiştir. Pisagor Bulanık AHP'nin geliştirilmesi, AHP'nin geleneksel yapısının, Pisagor teoremi ve bulanık mantık ile birleştirilmesiyle ortaya çıkmıştır. Ancak, bu özel birleşimin tam olarak kim tarafından ilk kez geliştirildiğine dair belirgin bir tek yazar veya araştırmacı bulunmamaktadır. Bunun yerine, Pisagor Bulanık AHP, AHP ve bulanık mantık teorilerinin birleşimi olarak literatüre katkı sağlamış ve farklı araştırma grupları tarafından bu alanda geliştirmeler yapılmıştır (Yager, 2013). AHP, birden fazla kriterin değerlendirildiği karar verme proseslerinde kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, karar verici tarafından belirlenen kriterler alternatiflerle karşılaştırılır ve ikili kıyaslamalar üzerinden karar alınır (Çavdur vd., 2019). Pisagor bulanık kümeler ve AHP birleştirilerek, karşılaştırma oranlarının değerleri belirlenmekte ve karar vericinin daha hızlı ve belirsizlikten arındırılmış şekilde karar almasına olanak tanınmaktadır. AHP yöntemi, ikili karşılaştırma esasına dayanarak kriterler arasındaki tutarlılığı ölçen bir yaklaşım sunar (Bedir ve Eren, 2015). Bununla birlikte, dilsel ifadeleri ve öznel düşünceleri tam olarak yansıtamaması nedeniyle bulanık mantık ile birleştirilmiş ve Bulanık AHP yöntemi geliştirilmiştir (Erol vd., 2021). Bu yöntem, objektif ve sübjektif kriterlerin kıyaslanmasına olanak tanıyarak alternatifler arasında karar alınmasını kolaylaştırır (Yerlikaya ve Arıkan, 2016). Geleneksel AHP yönteminden farklı olarak, Bulanık AHP yönteminde net değerlerin yerine bir dizi bulanık değer kullanılır (Yager, 2013). Pisagor bulanık kümeler yöntemi, karar vericilerin daha tutarlı değerlendirmeler yapmasını sağlarken, aynı zamanda belirsizliği ortadan kaldırarak karar proseslerini kolaylaştırır. Bu yöntemde kullanılan dilsel değişken ölçeği, karar vericilerin kriterler ve ağırlıklar üzerindeki değerlendirmelerini daha esnek bir şekilde yapmalarına olanak tanır.

Pisagor Bulanık Sayılar, bulanık mantık teorisinin bir uzantısı olup, karar vericilerin belirsiz ve eksik bilgiye dayalı değerlendirmeler yapmasını sağlar. Klasik bulanık kümelerden farklı olarak, Pisagor Bulanık Sayılar hem üye olma derecesi hem de üye olmama derecesi değerlerinin toplamının 1'den küçük veya eşit olması şartını taşır. Buna ilişkin dilsel değişkenler Tablo 2'de verilmiştir (Kara ve Eren, 2023)

Tablo 2

Pisagor Bulanık Sayılarda Karar Vericilerin Kriter veya Ağırlıkları Değerlendirdiği Dilsel Değişken Ölçeği

Dilsel Değişkenler	Pisagor Bulanık Sayılar			
	En Düşük Üye Olma Derecesi (uL)	En Yüksek Üye Olma Derecesi (uU)	En Düşük Üye Olmama Derecesi (vL)	En Yüksek Üye Olmama Derecesi (vU)

Dilsel Değişkenler		Pisagor Bulanık Sayılar			
Kesinlikle Düşük (KD)	KD	0,00	0,00	0,90	1,00
Çok Düşük (ÇD)	ÇD	0,10	0,20	0,80	0,90
Düşük (D)	D	0,20	0,35	0,65	0,80
Ortalamanın Altı (OA)	OA	0,35	0,45	0,55	0,65
Eşit (E)	E	0,19	0,19	0,19	0,19
Ortalama (O)	O	0,45	0,55	0,45	0,55
Ortalamanın Üstü (OÜ)	OÜ	0,55	0,65	0,35	0,45
Yüksek (Y)	Y	0,65	0,80	0,20	0,35
Çok Yüksek (ÇY)	ÇY	0,80	0,90	0,10	0,20
Kesinlikle Yüksek (KY)	KY	0,90	1,00	0,00	0,00

Pisagor Bulanık AHP yönteminin adımları aşağıdaki gibidir (Erol vd., 2021):

Adım 1: Dilsel değişkenlere bağlı ikili karşılaştırma matrisi $A = (r_{ik})_{m \times m}$ oluşturulur.

Adım 2: Denklem (1) ve denklem (2) kullanılarak farklar matrisi $D = (d_{ik})_{m \times m}$ oluşturulur.

$$d_{ik_L} = M_{ik_L}^2 - V_{ik_u}^2 \quad (1)$$

$$d_{ik_u} = M_{ik_u}^2 - V_{ik_L}^2 \quad (2)$$

Adım 3: $S = (s_{ik})_{m \times m}$ matrisi eşitlik (3) ve (4) kullanılarak hesaplanır.

$$s_{ik_L} = \sqrt{1000^{d_L}} \quad (3)$$

$$s_{ik_u} = \sqrt{1000^{d_u}} \quad (4)$$

Adım 4: Tereddüt dereceleri $H = (h_{ik})_{m \times m}$ eşitlik 5 kullanılarak belirlenir.

$$h_{ik} = 1 - (M_{ik_u}^2 - M_{ik_L}^2) - (V_{ik_u}^2 - V_{ik_L}^2) \quad (5)$$

Adım 5: Eşitlik 6 ile normalize edilmemiş ağırlıklar $T = (t_{ik})_{m \times m}$ hesaplanır.

$$t_{ik} = \left(\frac{s_{ik_L} + s_{ik_u}}{2} \right) h_{ik} \quad (6)$$

Adım 6: Kriter ağırlıkları w_i eşitlik 7 kullanılarak elde edilir.

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^m w_i}{\sum_{i=1}^m \cdot \sum_{j=1}^m w_i} \quad (7)$$

2.2. TOPSIS

TOPSIS yöntemi Yoon ve Hwang tarafından 1980 yılında geliştirilmiştir (Dumanoğlu, 2010). Bu yöntem her bir alternatif güzergahı, en ideal ve en kötü çözümlere olan benzerliklerine göre sıralayarak, en uygun güzergahı seçmeye olanak tanır. Bu yöntem, her güzergah alternatifinin kriterlere göre ne kadar yakın olduğunu analiz eder ve en ideal çözümü en yüksek benzerlik ile seçer.

TOPSIS yönteminde ilk adım, alternatif güzergahların belirlenen kriterlere göre değerlendirildiği bir karar matrisinin oluşturulmasıdır. Ardından, farklı kriterler arasında tutarlılık sağlamak amacıyla karar matrisindeki değerler normalize edilir (Güven, 2024).

Bu normalizasyon işlemi, kriterlerin ölçüm birimlerinden kaynaklı farkların giderilmesini sağlar. Normalizasyon sonrasında, kriterlerin önem derecelerini temsil eden ağırlıklar kullanılarak, normalize edilmiş değerlere ağırlıklar uygulanır ve ağırlıklı bir karar matrisi elde edilir.

TOPSIS adımlarının ayrıntılı hali aşağıdaki gibidir (Danışan vd., 2022):

Adım 1: Karar matrisi, satırlarda değerlendirilen alternatifleri, sütunlarda ise karar sürecini etkileyen kriterleri içerecek şekilde düzenlenir. Burada Matrisin satırlarında üstünlük noktaları bulunurken sütunlarında ise değerlendirme faktörleri bulunur. Bu matris, başlangıç noktası olarak da kabul edilir.

Adım 2: Standart Karar Matrisi Oluşturma: Alternatifler ve kriterler arasındaki değerler, denklem (8) yardımıyla standartlaştırılarak, karşılaştırmaların daha tutarlı bir şekilde yapılmasını sağlayan standart karar matrisi oluşturulur.

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m a_{kj}^2}} \quad (8)$$

Adım 3: Öncelikle, tehlikeli madde taşımacılığında güzergah seçiminde dikkate alınan değerlendirme faktörlerine ilişkin ağırlık değerleri belirlenir (w_j). Daha sonra, standart karar matrisinin (r_{ij}) her bir sütundaki elemanlar ilgili ağırlık değeri (w_j) ile çarpılarak ağırlıklı standart karar matrisi elde edilir.

Adım 4: İdeal (A^*) ve Negatif İdeal (A^-) Çözümlerin Belirlenmesi: İdeal ve negatif ideal çözüm setlerinin belirlenmesi için, ağırlıklı standart karar matrisinde bulunan değerlendirme faktörlerinin (sütun değerlerinin) yönelimine göre seçim yapılır. İdeal çözüm seti (A^*) her bir kriterin en iyi değerlerini içerir. Maksimizasyon yönlü kriterler için sütundaki en büyük değer, minimizasyon yönlü kriterler için ise en küçük değer seçilir. Negatif ideal çözüm seti (A^-) her bir kriterin en kötü değerlerini içerir. İdeal çözüm setinin oluşturulabilmesi için matrisindeki ağırlıklandırılmış değerlendirme faktörlerinin yani sütun değerlerinin en büyükleri (ilgili değerlendirme faktörü minimizasyon yönlü ise en küçüğü) seçilir.

Adım 5: Ayrım Ölçütlerinin Hesaplanması: Belirlenen formüller yardımıyla, matristeki her karar noktasının kriter değerlerinin ideal ve negatif ideal çözümlere olan uzaklıkları hesaplanır. Bu adım, alternatiflerin birbirine göre ne kadar yakın veya uzak olduğunu belirlemek için denklem (9) ve (10) yardımıyla gerçekleştirilir.

$$S_{IJ}^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^*)^2} \quad (9)$$

$$S_I^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (10)$$

Adım 6: İdeal Çözüme Göreli Yakınlığın Hesaplanması: Ayrım ölçütlerinden yararlanılarak, her alternatifin ideal çözüme olan göreli yakınlığı denklem (11) kullanılarak hesaplanır. Bu hesaplama, alternatiflerin tercih sırasını belirlemek için kritik bir adımdır.

$$C_i^* = \frac{s_i^-}{s_i^- + s_i^*} \quad (11)$$

Pozitif ve Negatif İdeal Çözüm Belirleme: TOPSIS yönteminde pozitif ideal çözüm (PIS) ve negatif ideal çözüm (NIS) kritik bir rol oynar. Pozitif ideal çözüm, her bir kriterde en yüksek performans temsil eden alternatifin değerlerini içerir ve ulaşılması gereken ideal durumu ifade eder. Negatif ideal çözüm ise her bir kriterde en düşük performans temsil eden alternatifin değerlerinden oluşur ve en kötü durumu yansıtır.

Bu çözümler, alternatiflerin sıralanmasında temel oluşturur. Pozitif ideal çözüm, her kriterde mümkün olan en yüksek değerlere sahipken, negatif ideal çözüm, her kriterde mümkün olan en düşük değerlere sahip olarak tanımlanır. Bu sayede alternatiflerin pozitif ideal çözüme olan yakınlıkları ve negatif ideal çözüme olan uzaklıkları hesaplanarak en uygun alternatif belirlenir. Bu yöntem, karar verme proseslerinde daha güvenilir ve tutarlı sonuçlar elde edilmesine olanak tanır (Erol vd., 2021).

Literatür Taraması

Literatür çalışmaları incelendiğinde, tehlikeli madde taşımacılığı ve güzergah seçimi ile ilgili oldukça fazla çalışma olduğu görülmektedir. Bu çalışmalar, taşımacılık sürecinde karşılaşılan çeşitli risklerin ve zorlukların üstesinden gelmek amacıyla farklı yöntemlerin ve yaklaşımların kullanıldığını ortaya koymaktadır. Özellikle, güzergah seçimi ve taşımacılığa yönelik kriterlerin belirlenmesi, bu alandaki çalışmalarda en sık ele alınan konular arasında yer almaktadır. Hemen hemen her türde modelleme ve analiz yöntemi ile hem tehlikeli madde taşımacılığına yönelik kriterler detaylı şekilde değerlendirilmiş hem de güzergah seçimi problemleri üzerinde kapsamlı incelemeler gerçekleştirilmiştir (Huang, 2006). Yapılan bu çalışmalar, taşımacılık sürecinde güvenlik, maliyet etkinliği, çevresel etkiler ve operasyonel performans gibi faktörlerin birbirleriyle dengelenmesi gerektiğini göstermektedir (Das vd., 2012). Ayrıca, çok kriterli karar verme yöntemlerinin güzergah seçimi ve taşımacılık problemlerinde yaygın olarak kullanıldığı dikkat çekmektedir. Farklı yöntemler arasında, AHP, Analitik Ağ Prosesi (ANP), TOPSIS, Bulanık Mantık ve diğer matematiksel modelleme teknikleri, güzergah seçiminde karar vericilere önemli ölçüde rehberlik etmiştir. Bunun yanı sıra, literatürde bazı çalışmaların yalnızca taşımacılık sürecine odaklanmadığı, aynı zamanda taşıma sürecinde yer alan lojistik altyapının geliştirilmesi, risk analizleri ve taşıma türlerinin değerlendirilmesi gibi konulara da odaklandığı görülmüştür. Tablo 3'te literatür araştırmasının özeti verilmiştir.

Tablo 3

Tehlikeli Madde Literatür Özeti

YAZAR	YÖNTEM	KRİTERLER	TEHLİKELİ MADDE TÜRÜ
Huang (2006)	AHP, CBS	Etkilenecek insan sayısı, Terör Riski, trafik yoğunluğu, acil müdahale edilebilirlik	Genel
Hatipoğlu vd. (2007)	Risk Analizi	Acil duruma müdahale edebilme, Yol durumu, Trafik, Araç durumu	Genel
Erkut vd. (2007)	Dinamik programlama modeli	Kaza olma olasılığı, etkilenecek insan sayısı	Genel
Topuz (2009)	Bulanık (Fuzzy)AHP	Çevresel Risk, Nüfus Yoğunluğu, Yol özellikleri	Endüstriyel Tehlikeli maddeler
Acer (2009)	Bulanık AHP	Güzergah Uzunluğu, Planlama	Genel
Li ve Leung (2011)	Çok amaçlı uzlaşık programlama modeli-Coğrafi bilgi sistemleri	Güzergah süresi, kaza olma olasılığı, etkilenecek kişiler, nüfus yoğunluğu	LPG
Das vd. (2012)	Çok Amaçlı Optimizasyon ve Risk Analizi	Kaza olma olasılığı, Etkilenecek insan sayısı	Tehlikeli Atık
Mahmoudabadi ve Seyedhosseini (2014)	Bulanık AHP ve Kaos Teorisi	Kaza riski, etkilenecek insan sayısı, çevresel riskler, altyapısal riskler	Dinamik Tehlikeli Madde
Ballı vd. (2014)	AHP, SMMA-TRI	Zaman, Nüfus Yoğunluğu, Yolun Karakteristik Özellikleri	Genel
Eroğlu vd. (2014)	DELPHİ, AHP	Çevresel Faktörler	Genel
Karabulut ve Öcalır (2015)	CBS, AHP	Nüfusa Etki, Kaza Olma Olasılığı, Çevresel faktörler	Genel
Yılmaz ve Erol (2015)	Risk Analizi	Terör Riski, Yolun özellikleri, nüfusa etki	Genel
Küçük ve Bali (2016)	Bulanık AHP ve GAMS	Hız, Zaman, Trafik Yoğunluğu, Nüfus Yoğunluğu	Genel
Teke (2019)	AHP	Trafik, Güzergah Süresi, Nüfus Yoğunluğu	Genel

YAZAR	YÖNTEM	KRİTERLER	TEHLİKELİ MADDE TÜRÜ
Uzundağ (2020)	Risk Analizi, CBS, AHP, VİKOR, MOORA.	Nüfus yoğunluğu, kaza olma olasılığı, yol kriterleri, zaman	Genel
Geyik ve Çetinyokuş (2020)	Bulanık AHP, OECD/PIARC QRAM	Trafik, hava durumu, kaza oranı, yol kriterleri	Genel
Görçün (2020)	Pisagor Bulanık AHP, GİA	Hız, Güvenlik, Çevresel Faktörler	Genel
Gür vd. (2020)	AHP	Trafik Yoğunluğu, Nüfus, Etkilenecek Alan	Akaryakıt
Oral vd. (2021)	AHP	Çevresel Faktörler, Nüfus Yoğunluğu	Genel
Kaya ve Senem (2022)	AHP, MAXQDA	Nüfus yoğunluğu, araç durumu, trafik koşulları, yol şartları	CNG
Toklu ve Doğan (2022)	Bulanık AHP, Aksiyomatik	Çevresel Faktörler	Genel
Altın vd. (2024)	Bulanık AHP	Trafik yoğunluğu, Çevresel Faktörler	Genel
Tatar ve Özer (2024)	AHP	Hız, Trafik Yoğunluğu, Çevresel Faktörler	Genel
Yıkın ve Özcan (2024)	Pisagor Bulanık AHP	Çevresel Faktörler, Yol Özellikleri, Hava Durumu Şartları	Genel

Tablo 3'te yer alan çalışmalar, tehlikeli madde kriter ağırlıklandırma ve alternatif güzergah seçimi üzerine yapılan araştırmaların bir kısmını özetlemektedir. Bu çalışmalar, her madde türü için farklı kriterlerin dikkate alındığı tehlikeli madde güzergah problemlerini ele almaktadır.

Örneğin, Uzundağ (2020), risk analizi, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), AHP, VİKOR ve MOORA yöntemlerini kullanarak nüfus yoğunluğu, kaza olma olasılığı, yol kriterleri ve zaman gibi faktörleri değerlendirmiştir. Geyik ve Çetinyokuş (2020) ise, bulanık AHP ve OECD/PIARC QRAM yöntemlerinden yararlanarak trafik, hava durumu, kaza oranı ve yol kriterlerine odaklanmıştır. Karabulut ve Öcalır (2015), akaryakıt taşımacılığı sırasında çevresel risklerin değerlendirilmesi için CBS ve AHP yöntemlerini kullanmıştır. Yılmaz ve Erol (2015), risk analizi yöntemleriyle terör riski, yol özellikleri ve nüfusa etki gibi kriterleri incelemiştir. Kaya vd. (2022) ise AHP ve MAXQDA yöntemlerini kullanarak CNG taşımacılığı üzerine nüfus yoğunluğu, araç durumu, trafik koşulları ve yol şartları gibi kriterler altında bir çalışma yapmıştır. Hatipoğlu (2007), risk analizi yöntemlerinden yararlanarak farklı kriterler üzerine çalışmış, Topuz (2009) ise çevresel risk, nüfus yoğunluğu ve yol özellikleri üzerine endüstriyel tehlikeli madde taşımacılığı çalışması gerçekleştirmiştir.

Mahmoudabadi ve Seyedhosseini (2014), doğal afetler durumunda güvenli taşımacılığı sağlamak için bulanık AHP ve kaos teorisi yöntemlerini kullanmışlardır. Das vd. (2012), çok amaçlı optimizasyon ve risk analizi yöntemleriyle tehlikeli atık taşımacılığı üzerine bir çalışma yapmıştır. Li ve Leung (2011), çok amaçlı uzlaşık programlama modelini ve coğrafi bilgi sistemlerini kullanarak LPG taşımacılığıyla ilgili güzergah süresi, kaza olma olasılığı, etkilenecek kişiler ve nüfus yoğunluğu gibi kriterleri incelemiştir. Erkut vd. (2007), dinamik programlama modelini kullanarak kaza olma olasılığı ve etkilenecek insan sayısı kriterlerine odaklanmıştır. Huang (2006), AHP ve CBS yöntemleriyle etkilenecek insan sayısı, terör riski, trafik yoğunluğu ve acil müdahale edilebilirlik gibi kriterler üzerinde çalışma yapmıştır. Görçün (2020), Pisagor bulanık AHP ve GİA yöntemlerini kullanarak hız, güvenlik ve çevresel faktörler gibi kriterler üzerinde bir çalışma gerçekleştirmiştir.

Toklu ve Doğan (2022), petrol taşımacılığında en uygun nakliye modunun belirlenmesi amacıyla yedi ölçüt belirlemiş ve bu ölçütlerin önem ağırlıkları bulanık AHP yöntemi ile hesaplanmış, alternatif taşıma modları ağırlıklı bulanık aksiyomatik tasarım yöntemi ile değerlendirilmiş ve duyarlılık analizi yapılmıştır.

Altın vd. (2024), AHP yöntemini kullanarak hız, trafik yoğunluğu ve çevresel faktörler gibi kriterler altında çalışmalar yapmış, Yıkın ve Özcan (2024) ise Pisagor bulanık AHP yöntemleriyle çevresel faktörler, yol özellikleri ve hava durumu şartları gibi kriterleri incelemişlerdir. Literatürdeki bu çalışmalar, tehlikeli madde taşımacılığı ve güzergah seçimi konusunda kullanılan farklı yöntemler ve kriterler hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Yapılan araştırmalar, bu alandaki karar verme proseslerinde genellikle AHP, bulanık AHP ve diğer ÇKKV yöntemlerinin kullanıldığını ortaya koymaktadır. Bu yöntemler, karar vericilere çok sayıda faktörü dikkate alarak en uygun güzergahı seçme konusunda önemli avantajlar sağlamaktadır. Çevresel faktörler, trafik yoğunluğu, yol şartları ve güvenlik gibi kriterler ise literatürde en sık karşılaşılan başlıca parametreler arasında yer almaktadır. Bununla birlikte, Pisagor Bulanık AHP, geleneksel bulanık AHP tekniklerine kıyasla daha geniş bir dilsel değişken setine sahip olup, dilsel ifadelerle çalışılsa bile gerçek hayatla daha uyumlu ve kapsamlı sonuçlar sunabilmektedir (Kara ve Eren, 2023). Bu durum, tehlikeli madde taşımacılığı gibi yüksek riskli ve dinamik ortamlarda karar vermeyi daha etkin bir şekilde sağlayabilir. Özellikle belirsizliklerin ve uzman görüşlerinin dikkate alınmasında Pisagor Bulanık AHP'nin sunduğu avantajlar, karar vericilerin daha güvenli ve verimli güzergah seçimleri yapabilmelerini mümkün kılmaktadır. Bu çalışma, kriter ağırlıklarının hesaplanmasında Pisagor Bulanık AHP yönteminin kullanılmasını hedefleyerek, literatüre katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Bunun yanı sıra, bu yaklaşımın tehlikeli madde taşımacılığı gibi kritik operasyonlarda daha güvenli ve verimli kararlar alınmasına olanak tanıyacağı düşünülmektedir. Çalışmalar incelendiğinde, çoğu araştırmada çevresel faktörlerin, trafik yoğunluğunun, yol şartlarının ve güvenliğin ön plana çıktığı görülmektedir. Ancak, bu tür tekdüze kriterler bazında yapılan analizler, zaman zaman gerçek hayat koşullarına tam anlamıyla uyumlu olmayabilmektedir. Pisagor Bulanık AHP, belirsizlikleri ve dilsel ifadeleri daha kapsamlı bir şekilde değerlendirebilmesiyle, bu tür eksiklikleri giderebilecek bir çözüm sunmaktadır. Tehlikeli madde taşımacılığı üzerine yapılan bu çalışma, literatüre sadece yeni bir yöntem sunmakla kalmamakta, aynı zamanda karar destek proseslerini geliştirmek adına sağlam bir temel oluşturmaktadır. Çalışma, karar vericilerin karşılaştığı belirsizlikleri daha etkin bir şekilde yönetmelerine yardımcı olacak şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca, bu araştırma, dinamik faktörlerin de göz önünde bulundurulması gerektiğini vurgulamaktadır. Örneğin, hava durumu ve anlık trafik yoğunluğu gibi değişkenler, taşımacılık güzergahlarının seçiminde önemli bir rol oynamaktadır. Gelecekteki çalışmaların bu tür dinamik verileri de analizlerine dâhil etmesi, taşımacılık proseslerini daha esnek ve uyarlanabilir hale getirebilir. Bunların yanı sıra, TOPSIS yönteminin kullanımı da bu alanda önemli bir katkı sağlamaktadır. TOPSIS, bir dizi alternatifin, ideal çözüme olan uzaklıklarına göre sıralanmasını sağlayan birçok kriterli karar verme yöntemidir. TOPSIS yönteminde, alternatiflerin her bir kriterdeki değerleri kullanılarak, ideal (pozitif) ve negatif (negatif) çözümler belirlenir. Bu çözümler, alternatiflerin performanslarını değerlendirmek için bir referans noktası oluşturur. Bu çalışma, Pisagor Bulanık AHP ile birlikte TOPSIS yönteminin de kullanılmasıyla, alternatif güzergahların sıralanmasında daha doğru ve verimli sonuçlar elde edilmesini amaçlamaktadır. TOPSIS'in avantajı, her bir alternatifin ideal çözüme olan yakınlığını hesaplayarak karar vericilerin en uygun seçeneği belirlemelerine yardımcı olmasıdır.

Bu çalışma, tehlikeli madde taşımacılığında güzergah seçiminde belirsizlikleri daha etkin bir şekilde ele almak amacıyla Pisagor Bulanık AHP ve TOPSIS yöntemlerini bir arada kullanarak literatüre yenilikçi bir katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Geleneksel bulanık AHP yöntemlerine kıyasla daha geniş bir dilsel değişken seti sunan Pisagor Bulanık AHP, karar vericilere daha gerçekçi ve kapsamlı değerlendirmeler yapma imkanı tanımaktadır. Bunun yanı sıra, çalışmada hava durumu, trafik yoğunluğu gibi dinamik faktörlerin de analizlere dahil edilmesiyle, taşımacılık süreçlerinde daha güvenli, esnek ve maliyet-etkin güzergah seçimleri yapılmasına olanak sağlanmaktadır. Bu yönüyle, çalışma hem metodolojik açıdan yeni bir yaklaşım sunmakta hem de karar destek mekanizmalarını güçlendirerek uygulamaya dönük önemli faydalar sağlamayı amaçlar.

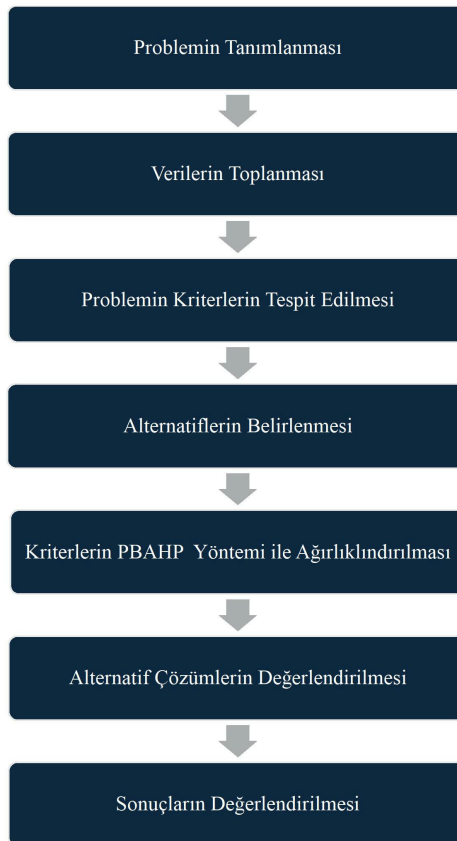
Sonuç olarak, bu çalışma sadece literatüre değerli bir katkı sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda pratikte de taşımacılık sektörüne yönelik önemli bir rehberlik sunmaktadır. Pisagor Bulanık AHP yöntemi ve TOPSIS birlikte kullanılarak, özellikle yüksek riskli ve belirsiz ortamlarda karar verme proseslerinin iyileştirilmesinde etkili bir araç olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışma, gelecekteki uygulamalara ışık tutacak nitelikte olup, tehlikeli madde taşımacılığı ve güzergah seçimi konularında karar destek sistemlerinin geliştirilmesine katkı sağlamayı hedeflemektedir. Ayrıca, dinamik faktörlerin ve çok kriterli karar verme yöntemlerinin kullanılması, taşımacılık sürecini daha esnek, güvenli ve verimli hale getirebilir.

Uygulama

Bu çalışmada tehlikeli madde lojistiğinde dikkat edilmesi gereken kriterlerin ağırlıklandırılması ve Adıyaman-Ankara arası alternatif güzergah seçim problemi ele alınmıştır. Çalışma sonucunda tehlikeli madde lojistiği kriter ağırlıklandırma için gerekli olan kriterler incelenmiş ve Pisagor Bulanık AHP yöntemi ile kriterler ağırlıklandırılmıştır. Probleme örnek olarak Adıyaman-Ankara illeri arası seçilmiştir. Pisagor Bulanık AHP, bulanık mantık sistemine dayalı bir yaklaşımdır ve karar vericilerin belirsiz, subjektif ve kesin olmayan verilerle karşılaştıkları durumlar için oldukça uygundur. İnsanlar çoğu zaman tam sayı veya kesin değerlerle karar vermezler; bunun yerine "yaklaşık olarak 7" gibi belirsiz ifadeler kullanabilirler. Pisagor Bulanık AHP, bu tür belirsizlikleri modellenmesine olanak tanır.

Adıyaman'dan Ankara'ya söz konusu olan tehlikeli maddenin ulaştırılması için literatür taraması ve uzman görüşleri sonucu 17 kriter belirlenmiş ve bu kriterler Pisagor Bulanık AHP yöntemi kullanılarak ağırlıklandırılmıştır. Ardından 7 alternatif güzergah belirlenmiş ve bu güzergahlar TOPSIS yöntemi kullanılarak sıralanmıştır. Aşağıdaki Şekil 2'de uygulama aşamaları verilmiştir.

Şekil 2
Uygulama Akış Şeması



Problemin Tanımlanması

Tehlikeli maddelerin taşınması, lojistik prosesler açısından yüksek risk içeren bir faaliyet olup, insan sağlığı, çevre güvenliği ve operasyonel verimlilik gibi kritik unsurlar göz önünde bulundurularak planlanmalıdır. Adıyaman-Ankara güzergahında gerçekleştirilecek tehlikeli madde taşımacılığı, coğrafi koşullar, altyapı durumu, trafik yoğunluğu ve nüfus dağılımı gibi birçok faktör nedeniyle dikkatle değerlendirilmesi gereken bir konudur.

Bu çalışmada ele alınan problem, tehlikeli madde taşımacılığında güzergah belirleme sürecinin çok sayıda risk faktörüne bağlı olması ve mevcut yöntemlerin bu faktörleri yeterince optimize edememesidir. Geleneksel güzergah belirleme yaklaşımları genellikle yalnızca mesafe veya seyahat süresi gibi kriterlere odaklanırken, bu çalışmada risk faktörleri çok yönlü olarak ele alınarak daha güvenli ve sürdürülebilir bir taşıma planı oluşturulması amaçlanmaktadır.

Tehlikeli maddeler, kimyasal yapıları gereği patlama, yangın, sızıntı, toksik yayılım ve radyasyon gibi çeşitli riskler taşımaktadır. Yanlış güzergah seçimi, bu maddelerin taşınması sırasında meydana gelebilecek kazaların yol açabileceği zararı katbekat artırabilir. Özellikle nüfus yoğunluğunun yüksek olduğu alanlarda veya çevresel hassasiyetin bulunduğu bölgelerde yaşanabilecek bir kaza, ciddi can kayıplarına, ekolojik felaketlere ve ekonomik kayıplara neden olabilir. Bu nedenle, güzergah belirleme sürecinin daha bilimsel, sistematik ve çok kriterli bir karar verme modeli ile ele alınması gerekmektedir.

Bu çalışmanın amacı, mevcut riskleri en aza indirerek tehlikeli madde lojistiği için en uygun güzergahın belirlenmesini sağlamaktır. Çalışma, sahada karşılaşılan gerçek ihtiyaçlardan doğmuş olup, karar vericilerin daha güvenli ve verimli bir taşıma planlaması yapmasına katkıda bulunmayı hedeflemektedir. Özellikle mevcut altyapının yetersizliği, güvenlik tehditleri ve operasyonel kısıtlamalar göz önüne alındığında, belirlenen kriterlerin ağırlıklandırılması ve en uygun güzergahın seçilmesi büyük önem arz etmektedir.

Verilerin Toplanması

Çalışmada veriler toplanırken literatür çalışmasına ve uzman görüşlerine ağırlık verilmiştir. İncelenen akademik yayınlar doğrultusunda belirlenen kriterler, saha uzmanlarıyla yapılan görüşmelerle desteklenmiştir. Uzman görüşleri, tehlikeli madde taşımacılığında sahada görev yapan deneyimli personelin bilgi ve tecrübeleri doğrultusunda elde edilmiştir. Bu kapsamda, verilerin doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmak amacıyla, AFAD (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı) personelleri ile birebir görüşmeler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca alanlarında uzman olan akademisyenler ile de görüşme gerçekleştirilmiştir. Bu uzmanlara dair bilgiler Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4

Uzman Listesi

Uzman No	Uzman Türü	Deneyim (Yıl)
U1	Akademisyen 1	14
U2	Akademisyen 2	7
U3	AFAD Personeli 1	11
U4	AFAD Personeli 2	9
U5	AFAD Personeli 3	8

İncelenen yayınlar sonrasında ve uzmanlara sorulan sorular ile 17 kriter belirlenmiştir. Yöntem belirlenirken tehlikeli madde çalışmalarına bakılmış ve genellikle AHP yöntemi ile çözümlerin yapıldığı tespit edilmiştir ancak bu çalışmada 17 tane kriter olduğundan ve bulanık ortam tercih edildiğinden Pisagor

Bulanık AHP yöntemi seçilmiştir. TOPSIS ise sıralama için kullanılacaktır. Alternatif seçim için 7 farklı güzergah belirlenmiştir.

Problemin Kriterlerinin ve Alternatif Güzergahların Tespit Edilmesi

Literatür taraması sonucunda ve uzman görüşleri sonucunda 17 kriter belirlenmiştir. Bu kriterler Pisagor Bulanık AHP yöntemi ile ağırlıklandırılacaktır. Ardından güzergah seçimi için 7 farklı Adıyaman-Ankara güzergahı belirlenmiştir. Bu kriterler ve açıklamaları Tablo 4'te, Güzergah alternatifleri ise Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5

Tehlikeli Madde Taşımacılığı Kriterleri

Kriter	Gösterim	Açıklama
Etkilenecek İnsan Sayısı (Mahmouddi ve Seyedhossei, 2014)	K1	Taşımacılık güzergahında veya çevresinde bulunan insan sayısına göre belirlenen bir kriterdir. Tehlikeli madde kazaları meydana geldiğinde, yayılabilecek gazlar veya dökülme sonrası bulaşma riskleri insanları etkileyebilir. Bu nedenle, yoğun nüfuslu alanlardan geçmek yerine, daha az nüfuslu bölgeler tercih edilmeli ya da bu bölgelerde güvenlik tedbirleri sıkılaştırılmalıdır. Bu kriter oluşabilecek tehlike durumlarındaki anında etkilenen sayıyı belirtmektedir.
Terör Riski (Yılmaz ve Erol, 2015)	K2	Tehlikeli maddeler, stratejik hedef olduklarından, özellikle terör riskinin yüksek olduğu bölgelerden taşınırken risk analizine tabi tutulmalıdır. Terör riski bulunan güzergahlarda güvenlik artırılmalı veya alternatif güzergahlar kullanılmalıdır. Ayrıca, izleme ve güvenlik önlemleri gibi ek tedbirler gerektirir.
Kaza Olma Olasılığı (Erkut vd., 2007)	K3	Güzergahın geçmiş kaza istatistikleri göz önünde bulundurularak belirlenir. Kaza olasılığı yüksek bölgelerde güvenlik önlemlerini artırmak veya bu güzergahlardan kaçınmak önemlidir. Özellikle dönemeçli veya dar yollar, kaza riskini artıran etkenler arasında sayılır.
Güzergah Uzunluğu (Acer, 2009)	K4	Taşınacak malzemenin kat edeceği toplam mesafeyi ifade eder. Mesafe arttıkça taşıma maliyetleri, enerji tüketimi ve kaza olasılığı da artar. En kısa güzergah hem maliyet hem de güvenlik açısından avantaj sağlar; ancak güvenlik açısından risk taşıyan kısa yollar yerine daha güvenli ancak uzun rotalar tercih edilebilir.
Nüfus Yoğunluğu (Uzundağ, 2020)	K5	Güzergahın geçtiği alanlarda kilometrekare başına düşen nüfus yoğunluğunu ifade eder. Bir kaza durumunda, yüksek nüfus yoğunluğuna sahip bölgelerdeki potansiyel tehlike artar. Özellikle büyük şehirlerin çevresinde yapılan taşımacılık, daha yüksek bir hassasiyetle planlanmalıdır. K1 kriterinden farklı olarak tehlike durumlarında anında olmayan ama radyasyon vb. gibi durumlarda dolaylı olarak yakın çevredeki yoğunluğu belirtmektedir.
Acil Müdahale Yakınlığı (Huang, 2006)	K6	Güzergah boyunca acil müdahale birimlerine (itfaiye, sağlık ekipleri vb.) olan yakınlık önemlidir. Acil durumlarda müdahalenin hızlı yapılabilmesi, hasarı ve etki alanını azaltır. Bu nedenle, acil müdahale merkezlerinin uzak olduğu alanlarda taşımacılık süreci daha riskli hale gelir.
Karayolu Yoğunluğu (Altın vd., 2024)	K7	Trafik yoğunluğu, taşımacılığın güvenliğini doğrudan etkiler. Trafığın yoğun olduğu bölgelerde seyahat etmek, çarpışma ve kazalara sebep olabilir. Bu durumda güzergahın trafiği izlenmeli ve yoğun saatler dışında taşımacılık yapılması planlanmalıdır.

Kriter	Gösterim	Açıklama
Güzergah Süresi (Li ve Leung, 2011)	K8	Yolculuk süresi, aracın güzergah boyunca seyahat ettiği süreyi ifade eder. Uzun süren yolculuklar, sürücü yorgunluğunu ve kaza riskini artırır. Kısa süreli taşımalar tercih edilmeli, uzun sürecek taşımacılıkta ise yedek sürücü veya dinlenme molaları gibi önlemler alınmalıdır.
Etkilenecek Alan (Gür vd., 2020)	K9	Kaza durumunda, sızıntının veya tehlikeli maddenin yayılacağı alanın büyüklüğünü ifade eder. Özellikle kimyasal maddeler çevreye yayıldığında geniş alanları etkileyebilir. Bu nedenle, çevresel etkilerin minimum seviyede tutulması için daha geniş açık alanlardan geçiş yapılması tavsiye edilir.
Güzergah Yer Şekilleri (Uzman Görüşü)	K10	Dağlık veya engebeli araziler, araçların kayma veya devrilme olasılığını artırır. Yokuşlar, keskin virajlar ve dik eğimler gibi coğrafi özellikler, taşımanın güvenliğini olumsuz etkileyebilir. Bu tür bölgelerde hız sınırları düşürülmeli ve dikkatli bir sürüş yapılmalıdır.
Araç Hızı (Küçük ve Bali, 2016)	K11	Tehlikeli madde taşıyan araçların belirli hız limitleri içinde hareket etmesi önerilir. Hız, kaza olasılığını doğrudan etkilediği gibi, kaza durumunda hasarın büyüklüğünü de etkiler. Güzergahın özelliklerine uygun bir hızda taşımacılık yapılması güvenlik açısından önemlidir.
Hava Şartları (Geyik ve Çetinyokuş, 2020)	K12	Özellikle yağmur, kar veya sis gibi olumsuz hava koşulları, sürüş güvenliğini etkileyerek kazaları artırabilir. Hava durumu göz önüne alınarak güzergah seçilmeli veya olumsuz hava koşullarında taşımacılıktan kaçınılmalıdır.
Karayolunun Yapısı (Uzman Görüşü)	K13	Karayolunun genişliği, eğimi, asfalt kalitesi ve yol kenarındaki bariyerler gibi yapısal özellikleri, tehlikeli madde taşımacılığı için önemlidir. Zayıf altyapıya sahip yollar, kazaları artırabilir, bu yüzden dayanıklı ve güvenli yollar tercih edilmelidir.
Araç Durumu (Hatipoğlu, 2007)	K14	Taşıma aracının mekanik durumu, bakımları, yaşına göre yapılan kontroller ve güvenlik donanımları, taşımacılık sürecinin güvenliğini etkiler. Düzenli bakım yapılmayan eski araçlar, güvenlik açısından risk taşır.
Güvenlik Tedbirleri (Görçün, 2020)	K15	Yangın söndürücüler, sızdırmaz kaplar, taşımacılık sırasında araçta bulunması gereken acil durum ekipmanları gibi güvenlik tedbirleri, olası bir kaza veya sızıntı durumunda müdahale sürecini hızlandırır ve tehlikeyi minimize eder.
Yük Hareketi (Uzman Görüşü)	K16	Tehlikeli maddenin taşınırken aracın içinde sabitlenmesi gereklidir. Yükün aracın içinde hareket etmesi, dengesizliğe ve kazalara neden olabilir. Bu yüzden taşıma araçlarında, yüklere uygun sabitleme sistemleri olmalıdır.
Planlama (Uzman Görüşü)	K17	Rotanın, taşınacak maddenin özelliklerine uygun şekilde planlanması, taşımacılık sürecini daha güvenli hale getirir. Özellikle güzergah seçimi, hız limitleri, mola yerleri ve acil müdahale noktalarının planlanması, taşımacılığın tüm aşamalarında risklerin azaltılmasını sağlar.

Güzergah alternatifleri, ulaşım planlamasında en verimli ve güvenli seçeneği belirlemek amacıyla çeşitli faktörler göz önünde bulundurularak Google Maps yardımıyla kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Yapılan detaylı incelemeler sonucunda, belirlenen kriterler doğrultusunda Adıyaman ile Ankara arasındaki yolculuk için toplamda 7 farklı rota tespit edilmiştir. Her bir güzergah, mesafe, tahmini yolculuk süresi, yol durumu,



trafik yoğunluğu ve yolculuk sırasında geçilecek yerleşim yerleri gibi birçok önemli unsur dikkate alınarak detaylıca değerlendirilmiştir.

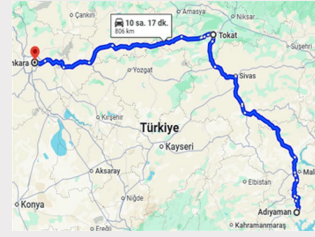
Tablo 6

Tehlikeli Madde Taşımacılığı Kriterleri

Tarsus Otoyolu Üzerinden	
Göksun-Elbistan Yolu ve Ankara - Niğde Otoyolu/Ankara - Tarsus Otoyolu/O-21 üzerinden	
Kırıkkale Kırşehir Yolu/D765 üzerinden	
Kayseri-Harmandalı-Ankara Üzerinden	
Adana-Haymana Rotalı	
Malatya-Sivas-Yozgat-Kırıkkale Rotalı	



Tokat-Çorum Rotalı



A1 güzergahı Ankara-Tarsus otoyolundan geçen bir alternatiftir. A2 güzergahı Kahramanmaraş ve Niğde otoyolu bağlantılarını kullanarak Ankara'ya giden bir alternatiftir. A3 güzergahı Kırıkkale-Kırşehir yolunda D765 tarafını kullanarak hedefe giden bir alternatiftir. A4 güzergahı Kayseri Aksaray tarafını kullanan bir alternatiftir. A5 güzergahı Adana tarafından giden ve haymanadan geçen bir alternatiftir. A6 güzergahı Malatya Sivas hattından geçmekte ve Yozgat tarafından Ankara güzergahına giden bir alternatiftir. A7 güzergahı Tokat'tan geçmekte ve Çorum tarafından Ankara'ya ilerleyen alternatif bir güzergahtır. Alternatif gösterimleri ve alternatiflerin uzunlukları Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7*Alternatif Güzergahlar ve Uzunlukları*

Alternatif No	Alternatif	Uzunluk
A1	Ankara - Tarsus Otoyolu/O-21 üzerinden	814 km
A2	Göksun-Elbistan Yolu ve Ankara-Niğde Otoyolu/Ankara - Tarsus Otoyolu/O-21 üzerinden	745 km
A3	Kırıkkale Kırşehir Yolu/D765 üzerinden	686 km
A4	Kayseri-Harmandalı-Ankara Üzerinden	726 km
A5	Adana-Haymana Rotalı	995 km
A6	Malatya-Sivas-Yozgat-Kırıkkale Rotalı	777 km
A7	Tokat-Çorum Rotalı	806 km

A1: Ankara-Tarsus Otoyolu/O-21 (814 km)

Bu güzergah, uzun mesafeli bir rota olmasına rağmen otoyol avantajı sayesinde kesintisiz ve hızlı bir ulaşım sağlar. Ancak, büyük şehirlerden geçmesi nedeniyle etkilenecek insan sayısı fazladır. Terör riski açısından düşük seviyede değerlendirilse de trafik yoğunluğu ve kaza olasılığı daha yüksek olabilir. Yolu büyük kısmı otoyol olduğu için acil müdahale imkanları geniştir. Ancak, yol boyunca bazı bölgelerde hava koşulları sürüş güvenliğini olumsuz etkileyebilir.

A2: Göksun-Elbistan Yolu ve Ankara-Niğde Otoyolu/O-21 (745 km)

Bu güzergah, nispeten daha kısa olmasıyla avantaj sağlarken, güzergahın bir kısmı otoyol ve ana karayolu kombinasyonundan oluştuğu için trafik yoğunluğu farklılık gösterebilir. Etkilenecek insan sayısı orta seviyede olup, bazı kırsal bölgelerden geçmektedir. Terör riski açısından güvenli sayılabilecek bir güzergah olup, özellikle acil müdahale açısından kritik noktalara yakın konumdadır. Hava koşulları açısından bazı yüksek rakımlı bölgelerde olumsuzluklar yaşanabilir.

A3: Kırıkkale-Kırşehir Yolu/D765 (686 km)

Alternatifler arasında en kısa rotalardan biri olup, taşıma süresini optimize etmek açısından avantajlıdır. Ancak, otoyol bağlantısının olmaması, trafik akışını etkileyerek zaman zaman yoğunluğa sebep olabilir. Etkilenecek insan sayısı açısından daha az risk taşır, çünkü yoğun nüfuslu bölgelerden nispeten uzaktır. Terör riski düşük olup, acil müdahale açısından ana karayolu üzerinde bulunması avantaj sağlar. Yol yapısı bazı bölgelerde sınırlı olabilir ve hava koşulları özellikle kış aylarında taşımacılığı zorlaştırabilir.

A4: Kayseri-Harmandalı-Ankara (726 km)

Bu güzergah orta uzunlukta bir seçenek olup, büyük şehirler yerine daha çok kırsal alanlardan geçmektedir. Bu nedenle, etkilenecek insan sayısı düşük seviyededir. Ancak, güzergahın bazı bölümlerinde yol yapısı ve güvenlik tedbirleri yeterli olmayabilir. Trafik yoğunluğu görece az olsada, özellikle kış aylarında olumsuz hava koşulları taşımacılığı etkileyebilir. Acil müdahale açısından büyükşehir bağlantıları avantaj sağlasada, güzergahın bazı noktalarında ulaşım süresi uzayabilir.

A5: Adana-Haymana Rotalı (995 km)

En uzun güzergah olup, mesafenin fazla olması taşımacılık süresini artırmaktadır. Etkilenecek insan sayısı oldukça yüksek olup, özellikle Adana ve Ankara çevresinde yoğun trafikle karşılaşılabilir. Terör riski düşük olsada, uzun güzergah nedeniyle çeşitli risk faktörleri artmaktadır. Acil müdahale açısından büyük şehir bağlantıları avantaj sağlarken, bazı kırsal alanlarda bu imkân sınırlı olabilir. Yakıt tüketimi ve lojistik maliyetler açısından en maliyetli güzergahlardan biridir.

A6: Malatya-Sivas-Yozgat-Kırıkkale (777 km)

Bu güzergah orta uzunlukta olup, büyük şehirlerden uzak bir rota izlemektedir. Nüfus yoğunluğunun düşük olması, olası bir kaza durumunda etkilenecek insan sayısını azaltmaktadır. Terör riski açısından düşük seviyededir, ancak yol yapısı bazı bölgelerde sınırlı olabilir. Trafik yoğunluğu genellikle düşük olup, acil müdahale noktalarına ulaşım kırsal bölgelerde daha uzun sürebilir. Kış aylarında ağır hava koşulları bu güzergahı daha riskli hale getirebilir.

A7: Tokat-Çorum Rotalı (806 km)

Bu güzergah, kırsal alanlardan geçmesi nedeniyle etkilenecek insan sayısının düşük olduğu bir seçenektir. Ancak, güzergahın bir kısmı dağlık bölgelerden geçtiği için kış aylarında ulaşım zorlukları yaşanabilir. Terör riski açısından güvenli olup, trafik yoğunluğu düşük seviyededir. Yol yapısının bazı bölümlerinde genişletme ve bakım çalışmaları gerekebilir. Acil müdahale açısından bazı bölgelerde sınırlı imkanlar olabilir, bu da taşımacılık güvenliği açısından dikkate alınması gereken bir faktördür.

Kriterlerin Pisagor Bulanık AHP Yöntemi ile Ağırlıklandırılması

Dilsel değişkenler, sayısal değerler yerine "düşük," "ortalama" ve "yüksek" gibi terimlerle ifade edilen kavramlardır ve genellikle bulanık modellerde tercih edilir. Pisagor Bulanık AHP yöntemi, belirsizlik ve karar vericilerin yargılarındaki bulanıklığı modellemek için dilsel değişkenleri temel alır (Kara ve Eren, 2023). Bu çalışmada, Tablo 8'de sunulan dilsel değişkenler, belirlenen kriterlerin değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Pisagor Bulanık AHP yönteminin bu özelliği, uzman görüşleri arasındaki farklılıkları daha esnek bir şekilde ele almayı sağlamaktadır. (Güven, 2024). Pisagor bulanık sayıları, bir çeşit bulanık sayıdır ve Pisagor teoremi ile bağlantılıdır. Pisagor teoremi, dik üçgenlerde hipotenüsün uzunluğunun, diğer iki kenarın karelerinin toplamına eşit olduğunu belirtir. Bu kuram bulanık sayılarla birleştirildiğinde, hipotenüsün değerini bulanık bir sayıya dönüştürmek mümkün olabilir. Yani, Pisagor teoreminde yer alan sayılar, belirli bir aralıkta kesin olmayan değerler olabilir (Kara ve Eren, 2023). Bu çalışmada kriter ağırlıklandırması ve TOPSIS aşamasında karar verici rolünü, belirlenen uzmanlar üstlenmiştir. Akademisyenler (U1, U2) ve AFAD personelleri (U3, U4, U5), kendi uzmanlık alanları çerçevesinde görüşlerini sunarak sürece katkı sağlamışlardır. Pisagor Bulanık AHP yöntemi kapsamında, kriterlerin belirlenmesi ve ağırlıklandırılmasında grup karar verme yaklaşımı benimsenmiştir. Uzmanlar bir araya gelerek her bir kriteri ve alternatifleri ortak olarak değerlendirmiş, bu doğrultuda oluşturulan karar matrisleri üzerinden analizler gerçekleştirilmiştir. Ortaya çıkan nihai karar değerleri, uzman görüşlerinin konsensüs (uzlaş) sağlanarak belirlenmesiyle karar matrisine eklenmiş ve süreç başlatılmıştır. Böylelikle, farklı uzman görüşleri arasındaki belirsizlikler, Pisagor Bulanık AHP yöntemi sayesinde modellenmiş ve nesnel bir değerlendirme süreci sağlanmıştır.

Tablo 8**Dilsel Değişkenler**

Dilsel Değişkenler		Pisagor Bulanık Sayılar			
		En Düşük Üye Olma Derecesi (uL)	En Yüksek Üye Olma Derecesi (uU)	En Düşük Üye Olmama Derecesi (vL)	En Yüksek Üye Olmama Derecesi (vU)
Kesinlikle Düşük (KD)	KD	0,00	0,00	0,90	1,00
Çok Düşük (ÇD)	ÇD	0,10	0,20	0,8	0,90
Düşük (D)	D	0,20	0,35	0,65	0,80
Ortalamanın Altı (OA)	OA	0,35	0,45	0,55	0,65
Eşit (E)	E	0,19	0,19	0,19	0,19
Ortalama (O)	O	0,45	0,55	0,45	0,55
Ortalamanın Üstü (OÜ)	OÜ	0,55	0,65	0,35	0,45
Yüksek (Y)	Y	0,65	0,80	0,20	0,35
Çok Yüksek (ÇY)	ÇY	0,80	0,90	0,10	0,20
Kesinlikle Yüksek (KY)	KY	0,90	1,00	0,00	0,00

Bulanık AHP modellerinde dilsel değişkenler ikili karşılaştırma metoduna göre çözümlenir. Tablo 9'da ikili karşılaştırmalar verilmiştir (Sanlı vd., 2024).

Tablo 9**İkili Karşılaştırma**

İkili Karşılaştırma																	
KRİTER	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12	K13	K14	K15	K16	K17
K1	E	OÜ	Y	Y	O	Y	O	ÇY	O	ÇY	KY	KY	ÇY	ÇY	O	O	OA
K2	OA	E	ÇY	KY	Y	O	Y	KY	Y	ÇY	KY	KY	ÇY	ÇY	O	O	O
K3	D	ÇD	E	Y	Y	OÜ	O	Y	D	ÇY	ÇY	KY	Y	ÇY	OÜ	OÜ	O
K4	D	KD	D	E	OA	OA	D	O	ÇD	D	O	O	D	O	ÇD	ÇD	KD
K5	O	D	D	OÜ	E	ÇY	Y	Y	O	KY	KY	KY	ÇY	KY	OÜ	Y	O
K6	D	OÜ	OA	OÜ	ÇD	E	D	ÇD	KD	Y	ÇY	ÇY	Y	Y	Y	Y	ÇY
K7	O	D	O	Y	D	Y	E	Y	ÇD	Y	OÜ	OÜ	O	OÜ	OA	O	D
K8	ÇD	KD	D	OÜ	D	ÇY	D	E	KD	O	OA	OA	O	O	ÇD	ÇD	ÇD
K9	O	D	Y	ÇY	O	KY	ÇY	ÇY	E	ÇY	KY	KY	ÇY	KY	OÜ	OÜ	O
K10	ÇD	ÇD	ÇD	Y	KD	D	D	O	ÇD	E	OÜ	OÜ	O	O	D	D	ÇD
K11	KD	KD	ÇD	O	KD	ÇD	OA	OÜ	KD	OA	E	O	OA	O	KD	KD	ÇD
K12	KD	KD	KD	O	KD	ÇD	OA	OÜ	KD	OA	O	E	OA	O	KD	KD	ÇD
K13	ÇD	ÇD	D	Y	ÇD	D	O	O	ÇD	O	OÜ	OÜ	E	OÜ	ÇD	ÇD	D
K14	ÇD	ÇD	ÇD	O	KD	D	OA	O	KD	OA	O	OA	OA	E	ÇD	ÇD	D
K15	O	O	OA	ÇY	OA	D	OÜ	ÇY	OA	Y	KY	KY	ÇY	ÇY	E	OÜ	O
K16	O	O	OA	ÇY	D	D	O	ÇY	OA	Y	KY	KY	ÇY	ÇY	OA	E	OA
K17	OÜ	O	O	KY	O	ÇD	Y	ÇY	O	ÇY	ÇY	ÇY	Y	Y	O	OÜ	E

Kriterlerin çözüm yöntemine göre sonuç ağırlıkları hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 10*Sonuç Ağırlıkları*

Sonuç Ağırlıkları			
Kriterler	Ağırlık	Kriterler	Ağırlık
K1	0,10069677	K9	0,143475800
K2	0,13898646	K10	0,012408864
K3	0,07503027	K11	0,007333060
K4	0,00672441	K12	0,007292939
K5	0,12152166	K13	0,014053877
K6	0,05551239	K14	0,006354245
K7	0,02689522	K15	0,093832584
K8	0,01735983	K16	0,090893270
K9	0,14347580	K17	0,081628352

Bu tablo, tehlikeli madde taşımacılığı için güzergah seçimini etkileyen 17 kriterin ağırlıklarını ve önem derecelerini göstermektedir. Pisagor Bulanık AHP yöntemi ile hesaplanan bu ağırlıklar, her bir kriterin güzergah seçimindeki göreceli önemini yansıtmaktadır. En yüksek ağırlığa sahip kriterler arasında K9 (etkilenecek alan) ve K2 (terör riski) yer almaktadır, sırasıyla 0,1435 ve 0,1390 ile en kritik faktörler olarak belirlenmiştir. Bu, güzergah seçiminde güvenlik ve çevresel etkilerin en önemli rolü oynadığını göstermektedir. Özellikle tehlikeli maddelerin taşınmasında, insan sağlığı ve çevre üzerindeki potansiyel riskler göz önünde bulundurulmalıdır. Diğer önemli kriterler arasında K5 (nüfus yoğunluğu), K15 (güvenlik tedbirleri) ve K16 (yük hareketi) de yer almaktadır. Bu kriterler, taşımacılık operasyonlarının verimliliği ve güvenliği ile ilgili kritik unsurları yansıtır. Yük hareketinin düzenlenmesi, güvenlik önlemlerinin etkinliği ve güzergahın nüfus yoğunluğu gibi faktörler, risklerin azaltılması ve taşıma sürecinin etkinliği açısından belirleyicidir. Bununla birlikte, K4 (güzergah uzunluğu), K10 (güzergah yer şekilleri) ve K14 (araç durumu) gibi kriterler daha düşük ağırlıklara sahip olmasına rağmen, taşıma sürecinin başarısı için göz ardı edilmemesi gereken unsurlardır. Özellikle güzergah uzunluğu ve yer şekilleri gibi faktörler, taşımacılığın verimliliği ve maliyetleri üzerinde etkili olabilir.

TOPSIS Yöntemi ile Güzergah Alternatiflerinin Değerlendirilmesi

Adıyaman-Ankara güzergahında tehlikeli madde taşımacılığı için en uygun rotanın belirlenmesi amacıyla bir karar matrisi oluşturulmuştur. Bu çalışma, TOPSIS yöntemi kullanılarak alternatif güzergahların belirli kriterlere göre değerlendirilmesini kapsamaktadır. Karar matrisinde yer alan kriterler, tehlikeli madde taşımacılığı proseslerinde güvenlik, etkinlik ve çevresel etkiler açısından önemli olan faktörleri içermektedir. Öne çıkan kriterler arasında etkilenecek alan, terör riski, nüfus yoğunluğu, kaza olma olasılığı, acil müdahale yakınlığı, güzergahın uzunluğu, hava şartları ve araç türleri gibi unsurlar bulunmaktadır. Her bir kriter, taşımacılık sürecine etkisi ve önemi dikkate alınarak ağırlıklandırılmıştır. Alternatif güzergahlar, bu kriterler doğrultusunda değerlendirilmiş ve karar matrisi oluşturulmuştur. Matris oluşturulurken kriterler 1-10 skalası (1 en kötü, 10 en iyi) ile puanlandırılmıştır. Çalışmanın amacı, bu matrisi kullanarak en güvenli, ekonomik ve çevresel açıdan uygun güzergahın belirlenmesidir. Elde edilen sonuçlar, tehlikeli madde taşımacılığı planlamasında karar vericilere yol gösterici olacaktır.

Bu çalışmada, TOPSIS yöntemi kullanılarak karar matrisinin oluşturulması süreci gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, belirlenen kriterlerin normalize edilmiş ağırlıkları hesaplanmıştır. Ardından, alternatif güzergahlar için her bir kriterin performansı değerlendirilmiş ve karar matrisine yansıtılmıştır. Normalizasyon işlemi, kriterlerin farklı birimlerinden kaynaklanan farkları ortadan kaldırmak için uygulanmıştır. Son olarak,

normalize karar matrisi, her bir alternatifin kriterlere olan uzaklıklarına dayalı olarak ağırlıklandırılmış ve sıralama yapılmıştır. Bu proses, karar vericilere en uygun güzergah seçimini sağlamak için gerekli verileri sunmaktadır.

K1, K4, K5, K6, K8 ve K11 kriterlerinde gerçek değerlendirme kullanılmıştır ancak diğer kriterlerde uzmanlar tarafından ölçekli değerlendirme yapılmıştır. K1 kriterinin değeri etkilenecek insan sayısını temsil ettiğinden dolayı “kişi sayısı” olarak, K4 kriterinin verisi güzergah uzunluğunu temsil ettiğinden dolayı “km” olarak, K5 kriteri nüfus yoğunluğunu temsil ettiğinden dolayı “kişi/km²” olarak, K6 kriterinin değeri acil müdahale yakınlığını temsil ettiğinden dolayı “saat” olarak, K8 kriteri güzergahların kaç saatte gideceğini belirttiğinden “saat” olarak ve K11 kriteri hızı temsil ettiğinden dolayı “km” olarak alınmıştır. Bu veriler ortalama değer olarak alınmıştır (Karayolları Genel Müdürlüğü, t.y.-a, t.y.-b). Diğer kriterler ise 5 uzman tarafından ortak değerlendirilip karar matrisi oluşturulmuştur. Tablodaki veriler, karar matrisinin nasıl oluşturulduğu ve alternatiflerin sıralanmasında kullanılacak olan verileri temsil etmektedir. Bu matris, belirli kriterlere dayalı olarak alternatif güzergahların performanslarını değerlendirmeyi sağlar. Bu matris Tablo 11’de verilmiştir.

Tablo 11

Kriterler ve Güzergah Alternatifleri Karar Matrisi

Kriterler	Alternatifler						
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
K1 (kişi)	120	95	70	150	70	110	105
K2	4	6	8	7	5	7	7
K3	6	6	7	6	7	7	6
K4 (km)	814	745	686	726	995	777	806
K5 (kişi/km ²)	86,5	106,2	65,5	96,5	113,8	77,4	84,67
K6 (dk)	5	12	7	12	20	8	12
K7	4	9	3	8	6	7	9
K8 (saat)	8,36	9,15	8,47	9,3	11,36	9,58	10,17
K9	5	6	6	3	2	4	5
K10	8	6	7	6	7	6	5
K11 (km/saat)	110	95	85	90	75	95	80
K12	8	5	7	6	6	5	6
K13	8	7	6	7	6	7	6
K14	9	8	7	8	8	6	7
K15	8	7	6	7	8	6	7
K16	9	8	7	7	6	6	7
K17	8	8	7	8	7	6	7

Ardından, ideal ve negatif ideal çözüm kümeleri oluşturulmuş ve bu kümelere olan uzaklıklar (ayrım ölçütleri) hesaplanmıştır. Bu işlemi K1 için Tablo 12’de gösterelim:

Tablo 12

K1 İçin Örnek İşlem Tablosu

	K1
A1	120
A2	95
A3	70
A4	150

	K1
A5	70
A6	110
A7	105

$$\frac{120}{\sqrt{120^2 + 95^2 + 70^2 + 150^2 + 70^2 + 110^2 + 105^2}} \quad (12)$$

Yukarıdaki işlem sırasıyla tüm alternatifler için yapılır ardından aşağıdaki Tablo 13 oluşur.

Tablo 13

K1 İçin 2. Örnek İşlem Tablosu

	K1
A1	0,427346742
A2	0,338316171
A3	0,249285599
A4	0,534183427
A5	0,249285599
A6	0,391734513
A7	0,373928399

Ardından bu tablodaki değerler ile kriterin ağırlığı çarpılarak aşağıdaki tablo oluşturulur.

Tablo 14

K1 İçin 3. Örnek İşlem Tablosu

	K1
A1	0,043032437
A2	0,034067346
A3	0,025102255
A4	0,053790546
A5	0,025102255
A6	0,039446401
A7	0,037653382

Sonra bu değerler için max value ve min value belirlenir. Bu değerler Tablo 15'te verilmiştir.

Tablo 15

K1 İçin 4. Örnek İşlem Tablosu

(MAX value)	0,053790546
(MIN value)	0,025102255

Bu hesaplamalar tüm kriterler için yapılır ve işlemlerin sonucunda, ideal ve negatif ideal çözümlere yakınlık dereceleri belirlenmiş ve alternatif güzergahlar için sıralamalar elde edilmiştir. Böylece Adıyaman-Ankara arasında tehlikeli madde taşımacılığı için en uygun güzergahın seçilmesi sağlanmıştır. Bu proses, karar vericilere hem güvenlik hem de operasyonel verimlilik açısından en iyi seçeneği sunmayı amaçlamaktadır. Küme uzaklıklarını gösteren ideal çözüm tablosu Tablo 16'da verilmiştir.

Tablo 16

K1 İçin 4. Örnek İşlem Tablosu

Güzergah Alternatifleri	S_i^*	S_i^-	C_i^*
A1	0,042381	0,045276	0,516512
A2	0,028686	0,056951	0,665027
A3	0,047389	0,053105	0,528438
A4	0,041054	0,043011	0,511639
A5	0,059729	0,038795	0,393765
A6	0,044444	0,034473	0,437068
A7	0,031829	0,045773	0,589845

Yukarıdaki tablo, Adıyaman-Ankara arası tehlikeli madde taşımacılığı güzergah alternatiflerinin TOPSIS yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda elde edilen sonuçları göstermektedir. Tablo, her bir alternatif güzergah için ideal çözüme olan uzaklık (S_i^*), negatif ideal çözüme olan uzaklık (S_i^-), ve bu değerlere göre hesaplanan yakınlık katsayısını (C_i^*) içermektedir. C_i^* değerleri, güzergahların ideal çözüme olan yakınlığını ifade etmektedir ve bu doğrultuda güzergahlar sıralanmıştır. Tablo 17’de alternatifler TOPSIS yöntemine göre sıralamasının sonucu verilmiştir.

Tablo 17

Alternatiflerin Sıralanması

Alternatifler	Öncelik Değeri	Öncelik Sırası
A2	0,665027	1
A7	0,589845	2
A3	0,528438	3
A1	0,516512	4
A4	0,511639	5
A6	0,437068	6
A5	0,393765	7

Tabloda yer alan öncelik sırası ise, alternatiflerin sıralamasını belirtmektedir. Bu sıralama, en yüksek öncelik değerine sahip alternatifin birinci sırada olduğunu ve en düşük öncelik değerine sahip alternatifin yedinci sırada olduğunu göstermektedir.

- A2 alternatifi en yüksek öncelik değerine sahip olup, 0,665027 ile en uygun güzergah olarak seçilmiştir.
- A7 alternatifi ikinci sıradadır (0,589845), bu da onu oldukça uygun bir seçenek yapmaktadır.
- A3 alternatifi üçüncü sıradadır, ancak 0,528438 değeri ile A2 ve A7’nin gerisindedir.
- Diğer alternatifler sırasıyla, A1, A4, A6 ve A5, daha düşük öncelik değerlerine sahip ve bu da onların daha az uygun seçenekler olarak değerlendirilmesine neden olmuştur.

Sonuç olarak, bu tablo, güzergahların TOPSIS yöntemiyle değerlendirildiği ve sıralandığı bir karar destek aracıdır. Alternatiflerin öncelik değerleri, karar vericilere her bir güzergahın taşıma süreci için uygunluğunu gösteren bir rehber sunmaktadır. En yüksek öncelik değerine sahip olan güzergah, taşıma operasyonları için en iyi seçenek olarak belirlenmiştir.

Duyarlılık Analizi

Modelin tutarlılığını incelemek amacıyla duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analiz kapsamında, girilen verilerde küçük değişiklikler yapıldığında çok kriterli karar verme yöntemleri ile elde edilen

sıralamaların nasıl değiştiği değerlendirilmiştir. Duyarlılık analizi çerçevesinde 17 kriterin ağırlıkları ikili kombinasyonlar halinde birbirleriyle değiştirilmiş ve toplam 136 adet senaryo oluşturulmuştur.

Örneğin; ilk olarak K1 kriterinin ağırlığı, K2 kriterinin ağırlığı ile değiştirilmiştir. Daha sonra K1 kriterinin ağırlığı, sırasıyla K3, K4, K5 ... K17 ile değiştirilerek yeni sıralamalar oluşturulmuştur. K1 kriterinden sonra K2 kriterinin ağırlıkları, sırasıyla K3, K4, K5 ... K17 ile değiştirilerek sıralamalar elde edilmiştir. Bu süreç, tüm kriterler için aynı şekilde uygulanmıştır.

Yapılan değişiklikler sonrasında Pisagor Bulanık TOPSIS yöntemi kullanılarak kriterlerin duyarlılıkları analiz edilmiştir (Güven vd., 2024). Duyarlılık analizi sonuçları Tablo 18'te sunulmuştur.

Tablo 18
Duyarlılık Analizi Sonuçları

Sıralama								
Sütun1	Sütun2	1	2	3	4	5	6	7
Senaryo No	Mevcut	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
1	K1-K2	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
2	K1-K3	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
3	K1-K4	A2	A7	A3	A1	A5	A4	A6
4	K1-K5	A2	A7	A4	A1	A3	A6	A5
5	K1-K6	A2	A7	A5	A3	A4	A1	A6
6	K1-K7	A2	A7	A3	A4	A6	A1	A5
7	K1-K8	A2	A7	A3	A1	A4	A5	A6
8	K1-K9	A4	A2	A7	A1	A6	A3	A5
9	K1-K10	A2	A3	A7	A1	A4	A5	A6
10	K1-K11	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
11	K1-K12	A2	A7	A3	A1	A4	A5	A6
12	K1-K13	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
13	K1-K14	A2	A7	A3	A1	A4	A5	A6
14	K1-K15	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
15	K1-K16	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
16	K1-K17	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
17	K2-K3	A2	A7	A1	A3	A4	A6	A5
18	K2-K4	A2	A7	A1	A3	A4	A5	A6
19	K2-K5	A2	A7	A3	A4	A1	A6	A5
20	K2-K6	A2	A7	A4	A5	A3	A1	A6
21	K2-K7	A2	A7	A4	A1	A3	A6	A5
22	K2-K8	A2	A7	A1	A3	A4	A5	A6
23	K2-K9	A2	A4	A7	A3	A6	A1	A5
24	K2-K10	A2	A1	A7	A3	A4	A5	A6
25	K2-K11	A2	A1	A7	A3	A4	A5	A6
26	K2-K12	A2	A1	A7	A3	A4	A5	A6
27	K2-K13	A2	A7	A1	A3	A4	A6	A5
28	K2-K14	A2	A1	A7	A4	A3	A5	A6
29	K2-K15	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5

Sıralama								
Sütun1	Sütun2	1	2	3	4	5	6	7
30	K2-K16	A2	A7	A1	A3	A4	A6	A5
31	K2-K17	A2	A7	A1	A3	A4	A6	A5
32	K3-K4	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
33	k3-K5	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
34	K3-K6	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
35	K3-K7	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
36	K3-K8	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
37	K3-K9	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
38	K3-K10	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
39	K3-K11	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
40	K3-K12	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
41	K3-K13	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
42	K3-K14	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
43	K3-K15	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
44	K3-K16	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
45	K3-K17	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
46	K4-K5	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
47	K4-K6	A2	A7	A1	A3	A4	A6	A5
48	K4-K7	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
49	K4-K8	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
50	K4-K9	A2	A5	A4	A7	A1	A6	A3
51	K4-K10	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
52	K4-K11	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
53	K4-K12	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
54	K4-K13	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
55	K4-K14	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
56	K4-K15	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
57	K4-K16	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
58	K4-K17	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
59	K5-K6	A2	A7	A5	A4	A3	A1	A6
60	K5-K7	A2	A7	A4	A6	A3	A1	A5
61	K5-K8	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
62	K5-K9	A2	A7	A4	A1	A3	A5	A6
63	K5-K10	A2	A3	A7	A1	A4	A6	A5
64	K5-K11	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
65	K5-K12	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
66	K5-K13	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
67	K5-K14	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
68	K5-K15	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
69	K5-K16	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
70	K5-K17	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5

Sıralama								
Sütun1	Sütun2	1	2	3	4	5	6	7
71	K6-K7	A2	A7	A1	A3	A4	A6	A5
72	K6-K8	A2	A7	A1	A3	A4	A6	A5
73	K6-K9	A2	A4	A5	A7	A6	A3	A1
74	K6-K10	A2	A7	A1	A3	A4	A6	A5
75	K6-K11	A2	A7	A4	A3	A1	A5	A6
76	K6-K12	A2	A7	A4	A3	A1	A5	A6
77	K6-K13	A2	A7	A4	A3	A1	A5	A6
78	K6-K14	A2	A7	A4	A3	A1	A5	A6
79	K6-K15	A2	A7	A4	A3	A1	A5	A6
80	K6-K16	A2	A7	A4	A3	A1	A5	A6
81	K6-K17	A2	A7	A4	A3	A1	A5	A6
82	K7-K8	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
83	K7-K9	A2	A4	A7	A5	A6	A1	A3
84	K7-K10	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
85	K7-K11	A2	A7	A4	A3	A1	A6	A5
86	K7-K12	A2	A7	A4	A3	A1	A6	A5
87	K7-K13	A2	A7	A4	A3	A1	A6	A5
88	K7-K14	A2	A7	A4	A3	A1	A6	A5
89	K7-K15	A2	A7	A4	A3	A1	A6	A5
90	K7-K16	A2	A7	A4	A3	A1	A6	A5
91	K7-K17	A2	A7	A4	A3	A1	A6	A5
92	K8-K9	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
93	K8-K10	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
94	K8-K11	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
95	K8-K12	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
96	K8-K13	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
97	K8-K14	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
98	K8-K15	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
99	K8-K16	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
100	K8-K17	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
101	K9-K10	A4	A5	A2	A1	A7	A6	A3
102	K9-K11	A4	A2	A5	A1	A7	A6	A3
103	K9-K12	A4	A5	A1	A7	A2	A3	A6
104	K9-K13	A4	A2	A5	A7	A1	A6	A3
105	K9-K14	A4	A2	A5	A7	A1	A6	A3
106	K9-K15	A2	A4	A7	A1	A5	A3	A6
107	K9-K16	A2	A4	A7	A1	A3	A5	A6
108	K9-K17	A2	A4	A7	A1	A5	A3	A6
109	K10-K11	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
110	K10-K12	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
111	K10-K13	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5

Sıralama								
Sütun1	Sütun2	1	2	3	4	5	6	7
112	K10-K14	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
113	K10-K15	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
114	K10-K16	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
115	K10-K17	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
116	K11-K12	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
117	K11-K13	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
118	K11-K14	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
119	K11-K15	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
120	K11-K16	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
121	K11-K17	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
122	K12-K13	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
123	K12-K14	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
124	K12-K15	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
125	K12-K16	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
126	K12-K17	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
127	K13-K14	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
128	K13-K15	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
129	K13-K16	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
130	K13-K17	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
131	K14-K15	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
132	K14-K16	A2	A7	A3	A4	A1	A6	A5
133	K14-K17	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
134	K15-K16	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
135	K15-K17	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5
136	K16-K17	A2	A7	A3	A1	A4	A6	A5

Kombinasyonlar oluşturulduktan sonra, sıralamalarda önemli bir değişiklik olmadığı fark edilmiştir. Senaryolarda 6 kombinasyon dışında A2'nin ilk sırada yer aldığı tespit edilmiştir. Bu 6 kombinasyon 8,101,102,103,104 ve 105. senaryolardır. Bu senaryolarda A4 ilk sırada gelmiştir. Ayrıca A5 ve A6 alternatiflerinin en çok sonda yer aldığı tespit edilmiştir.

Mevcut sıralamanın 96 kez tekrarlandığı gözlemlenmiştir, bu en çok tekrar eden kombinasyondur. Buna karşılık A7 alternatifi 136 senaryo içinden büyük çoğunlukla 2. Sırada yer almıştır.

Duyarlılık analizi sonuçlarına göre, alternatifler arasında değişiklikler genellikle birbirine çok yakın olan alternatiflerin yer değiştirmesi şeklindedir. Bu durum, önerilen yaklaşımın ve elde edilen bulguların güvenilir olduğunu göstermektedir.

Sonuç ve Tartışma

Bu çalışma, tehlikeli madde lojistiğinde güzergah belirleme kararlarının, Pisagor Bulanık AHP ve TOPSIS yöntemleri ile daha etkin bir şekilde yönetilebileceğini göstermiştir. Yapılan analizler sonucunda, Göksun-Elbistan-Ankara-Niğde Otoyolu güzergahı en uygun seçenek olarak belirlenmiş ve bu karar, güvenlik, çevresel etkiler ve operasyonel uygunluk gibi kritik faktörler ışığında desteklenmiştir. Güzergah belirleme sürecinde

kullanılan yöntemlerin doğruluğu ve karar verme sürecine olan katkıları, literatürde yapılan önceki çalışmalarla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Ballı vd. (2014) tarafından yapılan çalışma, güzergah belirleme sürecinde Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ve SMMA-TRI yöntemlerini kullanarak, zaman, nüfus yoğunluğu ve yolun karakteristik özelliklerini temel kriterler olarak ele almıştır. Bu çalışmada nüfus yoğunluğu ve yol durumları gibi 17 parametre üzerinde yoğunlaşarak güzergah seçiminin bu kriterler doğrultusunda nasıl optimize edilebileceğini değerlendirmiştir. Çalışmada, farklı güzergah alternatifleri belirlenmiş ve Pisagor Bulanık AHP yöntemi ile kriter ağırlıkları hesaplanarak en uygun güzergahın belirlenmesi sağlanmıştır. Ancak, Ballı vd. (2014) çalışmasında belirsizlik faktörleri dikkate alınmamış ve uzman görüşlerindeki farklılıkları modele entegre edecek bir yöntem uygulanmamıştır. Mevcut çalışmada ise Pisagor Bulanık AHP yöntemi kullanılarak belirsizlik ve uzman görüşlerindeki farklılıklar dikkate alınmış, ayrıca trafik yoğunluğu, acil müdahale yakınlığı ve hava koşulları gibi daha dinamik kriterler dahil edilmiştir. Bu bağlamda, mevcut çalışmanın Ballı vd. (2014) çalışmasından farklı olarak belirsizliğe daha duyarlı bir karar destek modeli sunduğu söylenebilir. Bununla birlikte, her iki çalışma da güzergah belirleme sürecinde çok kriterli karar verme yaklaşımının kritik rol oynadığını vurgulamaktadır.

Bu çalışmada, veri kaynağı olarak uzman görüşleri ve literatür taramasına dayanılmış olup, sahadan toplanan gerçek zamanlı veriler (trafik akışı, hava durumu değişkenleri vb.) entegrasyonuna yer verilmemiştir. Bunun sonucunda, belirlenen güzergahlar mevcut şartlara göre optimize edilmiş olsa da dinamik faktörlerin etkisi tam anlamıyla modellenememiştir. Ayrıca, analiz sürecinde sadece Pisagor Bulanık AHP ve TOPSIS yöntemleri kullanılmış olup, diğer farklı bulanık setlerin kullanılarak bu çalışma genişletilebilir. Ayrıca, farklı taşımacılık modları ve taşıma süreleri gibi faktörler eklenerek bu çalışma genişletilebilir. Bu tür faktörlerin de değerlendirilmesi, daha geniş kapsamlı ve detaylı bir analiz sağlamaya yardımcı olabilir.

Gelecekte yapılacak çalışmalar gerçek zamanlı veri entegrasyonu ile trafik akışı, hava koşulları ve acil müdahale noktalarının anlık konumlarını içeren dinamik verilerle modelin hassasiyetini artırabilir. Bunun yanı sıra, farklı karar verme yöntemleriyle karşılaştırmalar yapılabilir ve TOPSIS dışında VIKOR, MOORA, ELECTRE gibi yöntemlerle sonuçlar değerlendirilebilir. Alternatif güzergah senaryolarının çoklu optimizasyonu sağlanarak maliyet, zaman ve risk faktörlerini birlikte optimize eden karma modeller geliştirilebilir. Ayrıca, çalışma belirli tehlikeli madde türleri için özel olarak uygulanabilir hale getirilebilir. Örneğin, patlayıcı maddeler, yanıcı sıvılar veya toksik gazlar için farklı güzergah belirleme modelleri geliştirilebilir ve güvenlik açısından farklı senaryolar üzerinde durulabilir. Bu tür genişletilmiş analizler, tehlikeli madde taşımacılığının daha güvenli ve etkin bir şekilde gerçekleştirilmesine katkı sağlayacaktır.

Bu çalışmanın bulguları, lojistik planlamacılar, ulaşım yöneticileri ve kamu otoriteleri için önemli yönetsel çıkarımlar sunmaktadır. Tehlikeli madde taşımacılığında risklerin azaltılması açısından, insan sağlığına ve çevreye en az zarar verecek güzergahların seçilmesine yardımcı olmaktadır. Veriye dayalı karar alma süreçlerinin teşvik edilmesiyle, klasik yaklaşımlar yerine veri tabanlı karar verme modelleri ile lojistik planlamalar daha etkin hale getirilebilir. Bunun yanı sıra, tehlikeli madde taşımacılığı stratejilerinin etkinliğini koruyabilmesi için sürekli olarak izlenmesi ve güncellenmesi gerekmektedir. Lojistik yöneticileri, karar destek sistemlerinden yararlanarak daha güvenli ve çevre dostu güzergahlar oluşturabilir, böylece taşımacılık sektöründe sürdürülebilirlik ve güvenlik standartlarını yükseltebilirler.

Sonuç olarak, bu çalışma tehlikeli madde lojistiğinde bilimsel karar destek sistemlerinin etkinliğini ortaya koymuş ve bu alandaki gelecekteki çalışmalar için önemli bir referans oluşturmuştur. Pisagor Bulanık AHP yöntemi ile belirsizliklerin daha iyi yönetilebileceği, dinamik kriterlerin değerlendirilmesinin karar alma süreçlerini iyileştirebileceği ve yönetsel kararların daha sistematik bir çerçevede alınabileceği gösterilmiştir.

Gelecekte bu yöntemlerin genişletilmiş versiyonları, farklı taşımacılık senaryoları ve daha karmaşık karar verme süreçlerine entegre edilerek, güvenli ve verimli taşımacılığa daha fazla katkı sağlayabilir.



Hakem Değerlendirmesi	Dış bağımsız.
Yazar Katkısı	Çalışmanın Konsepti/Tasarımı: Y.B.S., E.G., L.T., K.O.Ö., B.A., T.E.; Veri Toplama- Y.B.S., E.G., L.T., K.O.Ö., B.A., T.E.; Verilerin Analizi/Yorumlanması- Y.B.S., E.G., L.T., K.O.Ö., B.A., T.E.; Yazı Taslağı: Y.B.S., E.G., L.T., K.O.Ö., B.A., T.E.; İçeriğin Eleştirel İncelemesi – Y.B.S., E.G., L.T., K.O.Ö., B.A., T.E.; Son Onay ve Sorumluluk Y.B.S., E.G., L.T., K.O.Ö., B.A., T.E
Çıkar Çatışması	Yazarlar çıkar çatışması beyan etmemiştir.
Finansal Destek	Bu çalışma TÜBİTAK 2209-A - Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri tarafından desteklenmektedir.
Peer Review	Externally peer-reviewed.
Author Contributions	Conception/Design of Study- Y.B.S., E.G., L.T., K.O.Ö., B.A., T.E.; Data Acquisition- Y.B.S., E.G., L.T., K.O.Ö., B.A., T.E.; Data Analysis/ Interpretation- Y.B.S., E.G., L.T., K.O.Ö., B.A., T.E.; Drafting Manuscript- Y.B.S., E.G., L.T., K.O.Ö., B.A., T.E.; Critical Revision of Manuscript - Y.B.S., E.G., L.T., K.O.Ö., B.A., T.E.; Final Approval and Accountability- Y.B.S., E.G., L.T., K.O.Ö., B.A., T.E.
Conflict of Interest	Authors declared no conflict of interest.
Grant Support	This study is supported by TÜBİTAK 2209-A - University Students Research Projects.
Yazar Bilgileri	Yusuf Bera Sanlı
Author Details	¹ Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale, Türkiye 0009-0003-7577-6671 ✉ beraasanli@gmail.com
	Emel Güven
	¹ Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale, Türkiye 0000-0001-6106-9720 ✉ emel-gvn@hotmail.com
	Lütfü Tokuştepe
	¹ Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale, Türkiye 0009-0006-1446-7949 ✉ lutfu_tokus@hotmail.com
	Kaan Osman Özbek
	¹ Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale, Türkiye 0009-0004-7615-656X ✉ kaanozbek06gs@gmail.com
	Berkay Arslan
	¹ Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale, Türkiye 0009-0009-4766-9784 ✉ berkayarsln06@gmail.com
	Tamer Eren (Prof Dr.)
	¹ Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale, Türkiye 0000-0001-5282-3138 ✉ tamereren@gmail.com

Kaynakça | References

- Acer, A. (2009). *Bulanık AHP yöntemi ile lojistik yönetimine çözüm yaklaşımı ve bir uygulama*. (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Marmara Üniversitesi, Türkiye.
- Altın, B., Özer, B., Güven, E., & Eren, T. (2024). Acil durum ve afetler için destek il atanması ve alternatif güzergah seçimi: Kocaeli ilinde bir uygulama. *Türk Deprem Araştırma Dergisi*, 6(1), 215-235. <https://doi.org/10.46464/tdad.1441663>



- Ballı, H., Bali, Ö., & Ağdaş, M. (2014). Alternatif yolların SMMA-TRI yöntemi kullanılarak risk kategorilerine ayrılmasına yönelik bir model önerisi. *III. Ulusal Lojistik ve Tedarik Zinciri Yönetimi Kongresi Bildiriler Kitabı, Trabzon*, 66-76.
- Bedir, N., & Eren, T. (2015). AHP-PROMETHEE yöntemleri entegrasyonu ile personel seçim problemi: perakende sektöründe bir uygulama. *Sosyal Bilimler Araştırma Dergisi*, 4(4), 46-58.
- Çavdur, F., Sebatlı, A., & Küçük, M. K. (2019). Öğrenci proje takımı oluşturma problemi için grup-karar verme ve hedef programlama temelli çözüm yaklaşımı. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(1), 505-522. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.416511>
- Danışan, T., Gümüş, G., Ercan, Z., Güven, E., & Eren, T. (2022). Türkiye’de aşı taşıma sisteminde AHP ve TOPSIS yöntemleri ile taşıma türü seçimi. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, (36), 47-58. <https://doi.org/10.20875/makusobed.1114144>
- Das, A., Mazumder, T. N., & Gupta, A. K. (2012). Pareto frontier analyses based decision making tool for transportation of hazardous waste. *Journal of Hazardous Materials*, 227, 341-352. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.05.068>
- Dumanoglu, S. (2010). İMKB’de işlem gören çimento şirketlerinin mali performansının TOPSIS yöntemi ile değerlendirilmesi. *Marmara Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 29(2), 323-339.
- Erdal, H. (2018). Tehlikeli madde taşımacılığı güzergah seçimi problemi için stokastik bir risk analizi. *Anemon Muş Alparslan Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 6(6), 935-943.
- Erkut, E., & Alp, O. (2007). Integrated routing and scheduling of hazmat trucks with stops en route. *Transportation Science*, 41(1), 107-122. <https://doi.org/10.1287/trsc.1060.0176>
- Erkut, E., Tjandra, S. A., & Verter, V. (2007). Hazardous materials transportation. *Handbooks in Operations Research and Management Science*, 14, 539-621. [https://doi.org/10.1016/S0927-0507\(06\)14009-8](https://doi.org/10.1016/S0927-0507(06)14009-8)
- Eroğlu, Ö., Bali, Ö., & Gencer, C. (2014). DELPHI tekniği ve bulanık ahp ile tehlikeli madde depo yeri seçimi için gerekli niteliklerin belirlenmesi. *III. Ulusal Lojistik ve Tedarik Zinciri Kongresi*, (1), 831-842.
- Erol, E., Özcan, E., & Eren, T. (2021). Elektrik üretim santrallerinde iş güvenliği uzmanı seçiminde hibrit bir karar modeli. *Journal of Turkish Operations Management*, 1(5), 615-629.
- Geyik, A., & Çetinyokuş, S. (2020). Karayolu tehlikeli madde taşımacılığı kapsamında tünel güvenliği ve risk analizi. *Journal of Humanities and Tourism Research*, 10(3), 492-510.
- Görçün, Ö. F. (2020). Verimlilik ve etkinlik çerçevesinde entegre AHP-GİA yöntemleri kullanılarak uluslararası taşımacılıkta alternatif güzergahların değerlendirilmesi. *Verimlilik Dergisi*, (2), 45-72.
- Gür, Ş., Miman, M., & Eren, T. (2020). Analitik ağ süreci yöntemi ile akaryakıt taşımacılığının çevresel etkilerini değerlendirme. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 5(2), 61-70.
- Güven, E., Pınarbaşı, M., Alakaş, H. M., & Eren, T. (2024). Ranking of sectors in organized industrial zones according to Natech risk criteria: An application for Gaziantep province in Türkiye. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 91, 105377. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2024.105377>
- Güven, E., Pınarbaşı, M., Alakaş, H. M., & Eren, T. (2024). Organize sanayi bölgeleri’nin natech riskine göre değerlendirilmesi: Kocaeli ili için bir örnek. *Resilience*, 8(1), 13-30. <https://doi.org/10.32569/resilience.1379980>
- Hatipoğlu, S., Arıkan Öztürk, E., Çubuk, M. K., & Çakır, Ş., (2007). Carriage of dangerous goods in Türkiye. *Ulaşım ve Trafik Güvenliği Dergisi*, vol.1, no.3, 11-17.
- Huang, B. (2006). GIS-based route planning for hazardous material transportation. *Journal of Environmental Informatics*, 8(1), 49-57. <https://doi.org/10.3808/jei.200600076>
- Kara, M., & Eren, T. (2023). Hasar tespit çalışmalarında görevlendirilebilecek dronların bulanık karar verme yöntemleri ile değerlendirilmesi. *Politeknik Dergisi*, 1-1. <https://doi.org/10.2339/politeknik.1238267>
- Karabulut, S., & Öcalır, E. (2015). Karayolu ile tehlikeli madde taşımacılığı için coğrafi bilgi sistemi destekli çevresel risk analizi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30(3), 1-7. <https://doi.org/10.17341/gummd.92491>
- Karayolları Genel Müdürlüğü. (t.y.-a). Hız sınırları. <https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Trafik/HizSinirlari.aspx>
- Karayolları Genel Müdürlüğü. (t.y.-b). Trafik ve ulaşım bilgileri. <https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Trafik/TrafikveUlasimBilgileri.aspx>
- Kaya, S. Ç., & Senem, N. (2022). Tehlikeli madde lojistiğinde risk faktörlerinin değerlendirilmesi: Sıkıştırılmış doğalgaz (CNG) örneği. *Kastamonu Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 8(1), 1-22. <https://doi.org/10.22139/jobs.1522969>
- Keskin, M. H. (2006). *Lojistik tedarik zinciri yönetimi*. Baskı yeri: Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, (s 65).
- Küçük, Ö., & Bali, Ö. (2016). Tehlikeli maddelerin çok modlu taşınması için bir model önerisi. *Journal of Defense Sciences/Savunma Bilimleri Dergisi*, 15(2).
- Li, R., & Leung, Y. (2011). Multi-objective route planning for dangerous goods using compromise programming. *Journal of Geographical Systems*, 13, 249-271. <https://doi.org/10.1007/s10109-010-0124-6>

- Mahmoudabadi, A., & Seyedhosseini, S. M. (2014). Developing a chaotic pattern of dynamic hazmat routing problem. *IATSS Research*, 37(2), 110-118. <https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2013.06.003>
- Mert, A., & Çetinyokuş, S. (2020). Denizyolu tehlikeli madde taşımacılığına yönelik kazaların analizi. *Journal of Humanities and Tourism Research*, 10(1), 41-54.
- Nalçakan, M., & Er, F. (2012). Lojistik ilkeleri. Eskişehir: *TC Anadolu Üniversitesi Yayını*, (2517).
- Oral, N., Yumuşak, R., & Eren, T. (2021). AHP ve ANP yöntemleri kullanılarak tehlikeli madde depo yeri seçimi: Kırıkkale ilinde bir uygulama. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(1), 115-124. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.744734>
- Resmî Gazete. (2008, 26 Aralık). *Tehlikeli madde güvenlik danışmanlığı hakkında tebliğ* (Sayı: 27092). <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2008/12/20081226M1-4.htm>
- Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of mathematical psychology*, 15(3), 234-281. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5)
- Sanlı, Y. B., Güven, E., Tokustepe L., Özbek K. O., Arslan B. & Eren T. (2024). Tehlikeli madde lojistiğinde güzergah belirleme kriterlerinin bulanık mantık ile ağırlıklandırılması. III. Uluslararası KBRN Kongresi, 20-22 Kasım 2024.
- Tatar, V., & Özer, M. B. (2024). Kıyı tesislerinde depolanan ve elleçlenen tehlikeli maddelerin yangın güvenliği açısından değerlendirilmesi: Hopa limanı tank terminali örneği. *The Journal of Academic Social Science*, 78(78), 372-411.
- Teke, M. B. (2019). Karayollarında tehlikeli yük taşımacılığı ve firmalar için bir model önerisi. *Master's thesis, Dokuz Eylül Üniversitesi*. (1), 1-19.
- Toklu C., M., & Doğan, B. (2022). Tehlikeli madde taşımacılığı için ağırlıklı bulanık aksiyomatik tasarım yöntemi ile nakliye modu seçimi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(4), 577-587.
- Topuz, E. (2009). *Endüstriyel tehlikeli maddeler için çevresel risk değerlendirme yaklaşımı* (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Türk Dil Kurumu. (t.y.). *Lojistik. Türk Dil Kurumu Güncel Türkçe Sözlük*. Erişim tarihi 11 Aralık 2024
- Uzel, E., & Durdağ, C. (2014). *Sürücülerin tehlikeli madde taşımacılığı eğitimine bakış açıları hakkında kalitatif bir çalışma*. *Beykoz Akademi Dergisi*, 2(1), 55-73.
- Uzundağ, Ş. (2020). *Tehlikeli madde taşımacılığında risk analizi yapılarak coğrafi bilgi sistemi ile güzergah belirlenmesi* (Yüksek lisans tezi). *Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü*.
- Yager, R. R. (2013). Pythagorean membership rades in multicriteria decision making. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 22(4), 958-965. <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2013.2278989>
- Yerlikaya, M. A., & Arıkan, F. (2016). KOBİ'lere sağlanan desteklerin performans etkinlik sıralarının PROMETHEE ve ORESTE yöntemleri ile belirlenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(4), 1-19. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.278456>
- Yıkın, M. T., & Özcan, E. (2024). Demir ipek yolu güzergahında kuruluş yeri seçimi: Kapıkule-Kars Örneği. *Demiryolu Mühendisliği*, (19), 225-240. <https://doi.org/10.47072/demiryolu.1320992>
- Yılmaz, Z., & Erol, S. (2015). Tehlikeli madde taşımacılığında terör riskini en küçükleyen güzergah seçimi Doğu ve Güneydoğu Anadolu bölgesinde bir uygulama. *Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği (YAEM)* 35. *Ulusal Kongresi* (1), 190-192.
- Zadeh, L. A. (2023). Fuzzy logic. In *Granular, Fuzzy, and Soft Computing* (pp. 19-49). New York, NY: Springer US.