



Tehlikeli madde taşımacılığı için ağırlıklı bulanık aksiyomatik tasarım yöntemi ile nakliye modu seçimi

Transportation mode selection for hazardous materials transportation using weighted fuzzy axiomatic design method

Merve CENGİZ TOKLU^{1*} , Beyzanur DOĞAN¹ 

¹Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye.
mervetoklu@sakarya.edu.tr, bbeyzanurdogan@gmail.com

Geliş Tarihi/Received: 08.07.2021

Düzeltilme Tarihi/Revision: 30.10.2021

doi: 10.5505/pajes.2021.27547

Kabul Tarihi/Accepted: 28.11.2021

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Tehlikeli madde sınıfına giren ürünler çeşitli sektörlerde yoğun olarak kullanılmakta olup, üretildikleri lokasyondan hedef noktalarına farklı yöntemlerle taşınabilmektedir. Tehlikeli madde taşımacılığı, ürünlerin içeriğinde yer alan kimyasallar ya da yanıcı ve patlayıcı maddeler sebebiyle diğer taşımacılık türlerinden farklılaşır. Bu nedenle, tehlikeli maddelerin taşınmasında en düşük maliyeti ya da en hızlı teslimatı sağlayan alternatif en iyi çözüm olmayabilir. Tehlikeli madde sınıfında yer alan petrol, yaygın olarak tüketilmesi sebebiyle diğer tehlikeli maddelere göre daha yüksek miktarda taşınmaktadır. Bu çalışmada, petrol taşımacılığında en uygun nakliye modunun belirlenmesine yönelik bir model önerilmiştir. Önerilen modelde, taşıma maliyeti, kaza riski, ulaşım hızı, kapasite, esneklik, hizmet alanı ve hasar maliyeti olmak üzere yedi ölçüt belirlenmiştir. Ölçütlerin önem ağırlıkları bulanık AHP metodu ile hesaplanmış ve bu ölçütler dikkate alınarak alternatif taşıma modları ağırlıklı bulanık aksiyomatik tasarım yöntemi ile değerlendirilmiştir. Ayrıca ölçüt ağırlıklarının sonuçlara olan etkisini değerlendirmek üzere duyarlılık analizi yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, petrolün nakliyesi için en uygun mod olarak denizyolu taşımacılığı belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Tehlikeli madde taşımacılığı, Petrol, Nakliye modu, Bulanık AHP, Ağırlıklı bulanık aksiyomatik tasarım.

Abstract

Products classified as hazardous materials are used extensively in various sectors and can be transported from the location where they are produced to their destinations by different methods. Hazardous materials transportation differs from other transportation types due to the chemicals in the content of the products or flammable and explosive materials. For this reason, the alternative that provides the lowest cost or the fastest delivery may not be the best solution for the transport of hazardous materials. Petrol, which is in the hazardous materials class, is transported in higher amounts than other hazardous materials due to it is widely consumed. In this study, a model is proposed to determine the most suitable transportation mode for petroleum. In the proposed model, seven criteria are determined as transportation cost, accident risk, transportation speed, capacity, flexibility, service area and damage cost. The importance weights of the criteria are calculated by the fuzzy AHP method, and alternative transportation modes are evaluated with the weighted fuzzy axiomatic design method considering the criteria. In addition, sensitivity analysis is performed to evaluate the effect of criterion weights on the results. As a result of the study, maritime transport is determined as the most suitable transportation mode for petroleum.

Keywords: Hazardous materials transportation, Petroleum, Transportation mode, Fuzzy AHP, Weighted fuzzy axiomatic design.

1 Giriş

Taşımacılık faaliyetleri hem imalat hem de hizmet sektöründe önemli bir yere sahiptir. Tedarik zinciri yönetiminin temel faaliyetlerinden birisi de ürünlerin son kullanıcıya zamanında ve güvenilir bir şekilde ulaştırılmasıdır. Teknolojinin gelişmesi ile taşımacılık faaliyetlerindeki çeşitlilik artarken aynı zamanda mevcut taşımacılık faaliyetlerinin konforu da artmıştır. Maliyetler açısından incelendiğinde de, lojistik faaliyetlerin işletmeler açısından önemi daha net görülmektedir. Çünkü lojistik maliyetleri toplam maliyetlerin içinde önemli bir ağırlığa sahiptir. Taşımacılık faaliyetlerinin en önemli konularından birisi tehlikeli madde taşımacılığıdır. Tehlikeli maddenin tanımı, yönetmelikte [1] "Teknik talimatların tehlikeli maddeler listesinde gösterilmiş veya teknik talimatlara göre sınıflandırılmış olan can ve mal emniyeti ile çevreye yönelik risk oluşturabilecek mal, eşya veya maddeleri" şeklinde yapılmıştır. Tehlikeli maddelerin sebep olabileceği yangın, patlama veya toksik yayılım gibi can ve mal kaybı oluşturacak kazalar uygun nakliye modunun seçimi ile en aza

indirilebilir. Tehlikeli madde taşımacılığında ürünün doğru zamanda ve doğru yerde olması önemli olmakla birlikte bu ürünlerin can ve mal güvenliğini tehlikeye atmadan taşınması temel amaçtır. Tehlikeli maddeler çoğu zaman üretildikleri alanlarda depolanmazlar ve teslimat noktalarına ulaştırılırken uzun mesafeli taşıma işlemine maruz kalabilirler. Bununla birlikte tehlikeli maddelerin taşınması, doğal yapıları veya taşıma sırasında canlılara ve çevreye zarar verme ihtimali sebebiyle yüksek riskli bir faaliyettir.

Tehlikeli madde taşımacılığında en sık karşılaşılan ürünlerden birisi petroldür. Ham petrol ve petrol ürünleri, endüstriyel üretimin kritik girdilerinden olup, lojistik ve taşımacılıkta önemli bir rol oynar [2]. Petrol, çeşitli nakliye modları ile taşınabilir. Bu nakliye modları aşağıda kısaca açıklanmıştır:

Boru hattı taşımacılığı: Petrolün boru hattı ile taşınması diğer modlara göre ekonomik olarak değerlendirilebilir. Aynı zamanda boru hattı, yapısı sayesinde güvenilir bir taşıma modudur. Çevresel faktörlerden etkilenmez. Boru hattının yayılma yönü ise diğer taşıma modlarına kıyasla ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olmasıdır. Ayrıca boru hattının taşıma

*Yazışılan yazar/Corresponding author

kapasitesi kurulum aşamasında verilmesi gereken stratejik bir karardır. Boru hattı kurulduktan sonra kapasitenin değiştirilmesi yüksek maliyetlerle sonuçlanacaktır.

Karayolu taşımacılığı: Uluslararası taşınan tüm ürünlerin nakliyesinde ilk tercih edilen mod karayoludur. Bunun sebebi karayolu taşımacılığının ihtiyaç duyulan hemen her bölgeye ulaşım sağlama ve farklı rotalar tercih edebilmekle esnekliğine sahip olmasıdır. Bu taşıma modu ile mevcut karayolları kullanılacağı için boru hattı taşımacılığı gibi yüksek alt yapı yatırım maliyetleri içermez. Ancak karayolu taşımacılığındaki mevcut kaza riski ve kaza maliyetleri bu modun olumsuz özelliklerindedir.

Havayolu taşımacılığı: Havayolu ile tehlikeli madde taşımacılığı belirli riskler içerir. Her ne kadar havayolu taşımacılığında kaza riski düşük olsa da tehlikeli maddeler doğal özelliklerinden dolayı taşıma esnasında insanın ve diğer gönderilerin güvenliği için risk oluşturur. Ayrıca taşıma kapasitesinin diğer modlara göre düşüklüğü, her hizmet bölgesinde uygun iniş alanının olmaması ve taşıma maliyetinin yüksek olması havayolu taşımacılığının zayıf yönleri arasındadır.

Denizyolu taşımacılığı: Denizyolu taşımacılığında taşınan yükün hacmi büyük olduğundan dolayı birim taşıma maliyeti diğer modlara göre daha düşüktür. Kazalar açısından da diğer modlara göre daha güvenli bir taşımacılık türüdür. Hızın önemli olmadığı durumlarda tercih edilebilir. Bununla birlikte, denizyolu taşımacılığında yaşanabilecek herhangi bir kaza sonucunda insanlar ve doğa üzerinde telafisi mümkün olmayan zararlar meydana gelebilir.

Demiryolu taşımacılığı: Demiryolu, büyük yükler için düşük maliyetli bir taşıma türüdür. Demiryolları göz önüne alındığında karayolu ve havayolu taşıma moduna göre hizmet alanı sınırlıdır.

Tehlikeli maddelerin taşınması esnasında gerçekleşen kazaların sayısı tehlikeli olmayan maddelerin taşınması esnasında gerçekleşen kazaların sayısı ile karşılaştırıldığında oldukça az olmasına rağmen, tehlikeli maddelerin taşınması esnasında gerçekleşen bir kazanın sonuçları büyük felaketlere yol açabilir [3]. Tehlikeli maddenin taşınmasında önemli ekonomik ve sosyal sonuçlar vardır. Nakliye maliyetlerini en aza indirmenin yanı sıra, riskin azaltılması ve dağıtılması hükümet ve lojistik firmaları tarafından dikkate alınması gereken temel endişelerdir [4]. Tehlikeli madde taşımacılığında birbiri ile çelişen iki amaç mevcuttur. Bu amaçlar, taşımacılıkta risklerin en aza ve maliyetlerin en aza indirilmesidir [5].

Bu çalışmada, tehlikeli madde sınıfına dahil olan petrolün taşınmasında en uygun nakliye modunun seçimine yönelik bir model önerilmiştir. Önerilen modelin ilk adımı olarak risk ve maliyet ölçütleri ile birlikte diğer etkili ölçütler belirlenmiş ve önem ağırlıkları hesaplanmıştır. Sonraki adımda alternatif taşıma modları ağırlıklandırılmış ölçütler dikkate alınarak ağırlıklı bulanık aksiyomatik tasarım yöntemi ile değerlendirilmiş ve en uygun taşıma modu seçilmiştir.

Çalışmanın bundan sonraki kısmı genel olarak şu bölümlerden oluşmaktadır: Bölüm 2'de çözümünde aksiyomatik tasarım yönteminin kullanıldığı problemler incelenmiştir. Bununla birlikte, tehlikeli madde taşımacılığı ile ilgili yapılmış çalışmalar da aynı bölümde incelenmiştir. Bölüm 3'te ise önerilen modelde kullanılan tekniklerden bahsedilmiştir. Bu kapsamda öncelikle ölçüt ağırlıklarını belirlemek üzere kullanılan bulanık AHP yöntemi anlatılmıştır. Bir sonraki aşamada klasik aksiyomatik tasarım yöntemi anlatılmış olup daha sonra ağırlıklı bulanık

aksiyomatik tasarım yöntemi detaylandırılmıştır. Bölüm 4'te petrol için en uygun nakliye modunun seçimi gerçekleştirilmiş ve duyarlılık analizi yapılmıştır. Son bölümde ise uygulamanın sonuçları tartışılarak gelecek çalışmalardan bahsedilmiştir.

2 Literatür taraması

Aksiyomatik tasarım yöntemi, Suh [6],[7] tarafından geliştirilmiş olup daha sonra Kulak ve Kahraman [8],[9] tarafından bulanık mantık yaklaşımıyla genişletilmiştir. Aksiyomatik tasarım yöntemi farklı alanlara uygulanabilme esnekliğine sahiptir. Özellikle bulanık aksiyomatik tasarım yöntemi literatürde farklı karar problemlerinde kullanılmıştır. Özel ve Özyörük [10] beyaz eşya üretimi yapan bir işletmede tedarikçi seçim problemini ele almış ve problemin çözümünde aksiyomatik tasarım, ağırlıklandırılmış aksiyomatik tasarım ve bulanık aksiyomatik tasarım yöntemlerini kullanmıştır. Murat ve Kulak [11] bulanık aksiyomatik tasarım yöntemi ile rota seçimi üzerinde çalışmıştır. Çelik ve diğ. [12] bulanık aksiyomatik tasarım yaklaşımını gemi işletmeciliği şirketlerinde tersane seçimi probleminde uygulamışlardır. Kahraman ve diğ. [13] bulanık AHP ve bulanık aksiyomatik tasarım yöntemlerini kullanarak yenilenebilir enerji kaynaklarının arasından seçim yapmışlardır. Her iki yöntemin sonuçlarını karşılaştırmış ve her iki yöntemle de aynı sıralamaya ulaşmışlardır. Kahraman ve Çebi [14] hiyerarşik bulanık aksiyomatik tasarım yöntemini geliştirerek yöntemin uygulanabilirliğini öğretim görevlisi seçimi üzerinde göstermişlerdir. Büyüközkan ve diğ. [15] bulanık aksiyomatik tasarım tabanlı yaklaşım kullanarak e-öğrenme web sitelerini değerlendirmişlerdir. Maldonado ve diğ. [16] gelişmiş üretim teknolojisinin ergonomik uyumluluğunun değerlendirilmesi için hiyerarşik bulanık aksiyomatik tasarım yaklaşımını sunmuşlardır. Kannan ve diğ. [17] bir plastik üretim şirketinde en uygun yeşil tedarikçiyi seçmek için bulanık aksiyomatik tasarım yöntemini kullanmışlardır. Akman ve Alkan [18] aksiyomatik tasarım yöntemi ile kent içi ulaşımında alternatif toplu taşıma sistemlerini değerlendirmiştir. Chen ve diğ. [19] bilgi hizmetlerinde müşteriler ile tedarikçilerin arasındaki eşleşme derecesini belirlemek için bulanık aksiyomatik tasarıma dayalı bir yöntem geliştirmişlerdir. Khandekar ve Chakraborty [20] modern imalat yöntemleri arasından seçim yaparken bulanık aksiyomatik tasarım yöntemini kullanmışlardır. Güngör [21] uygun conta malzemesi seçimi ile ilgili problemi aksiyomatik tasarım yöntemi ile ele almıştır. Zheng ve diğ. [22] eklemeli üretim sürecinin seçiminde bulanık aksiyomatik tasarım yöntemini kullanmışlardır. Batur ve Özyörük [23] bebek maması sektörü için tedarikçi seçiminde bulanık aksiyomatik tasarım metodunu kullanmışlardır. Çalışmalarında yer alan bazı ölçütlerde dilsel, bazılarında ise sayısal değişkenler olduğundan hem aksiyomatik tasarım yöntemi hem de bulanık aksiyomatik tasarım yöntemini kullanmışlardır. Kahraman ve diğ. [24] aksiyomatik tasarım yöntemi ile tereddütlü bulanık mantık yaklaşımını entegre ederek yeni bir yöntem önermişlerdir. Önerilen yöntemi depolama sahası seçimi probleminde uygulamışlardır. Awasthi ve Omrani [25] çalışmalarında sürdürülebilir kentsel hareketlilik projeleri için bulanık aksiyomatik tasarıma dayalı hedef odaklı bir yaklaşım önermişlerdir. Çelik ve diğ. [26] dış cephe yalıtım malzemesinde kullanılan bir hammaddeye ait satın alma sürecinde aksiyomatik tasarım yönteminden faydalanmışlardır. Daha sonra AHP yöntemi ile ölçüt ağırlıklarını belirleyerek alternatifleri yeniden sıralamışlardır. Demirci [27] aksiyomatik tasarım yöntemi ile lojistik tedarikçi seçimi üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Karataş [28]

ağırlıklı bulanık aksiyomatik tasarım yaklaşımını ve bulanık AHP yöntemini kullanarak en uygun hidrojen enerjisi depolama yöntemini belirlemiştir. Kır ve diğ. [29] çalışmalarında ele alınan içecek şişesinin tasarımı için bulanık aksiyomatik tasarım yöntemi ve hedef programlama yaklaşımlarını birlikte kullanmışlardır. Palabiyik ve diğerleri [30] üniversite seçimi probleminde bulanık aksiyomatik tasarım yöntemini uygulamışlardır. Ulutürk ve diğ. [31] aksiyomatik tasarım yöntemi ile silah sistemlerinde kullanılan bir dipçik modeli geliştirmişlerdir. Literatürde karşılaşılan bu çalışmalar aksiyomatik tasarım yönteminin farklı uygulama alanlarında kullanıldığını göstermektedir.

Tehlikeli madde taşımacılığında mod seçimi açısından yapılan çalışmalar incelendiğinde, kısıtlı tarama alanında bu çalışmaya benzer bir çalışmayla karşılaşılmamıştır. Ancak, tehlikeli madde taşımacılığındaki riskleri araştıran çalışmalar mevcuttur [32]-[37]. Aynı zamanda tehlikeli madde taşımacılığında rota seçimi ile ilgili çalışmalar da dikkat çekmektedir [4],[38-43]. Bu çalışmanın, tehlikeli maddelerin taşınmasında nakliye modu seçimi konusunda literatüre katkı sağlaması amaçlanmaktadır. Bununla birlikte bulanık aksiyomatik tasarım yönteminin, tehlikeli madde taşımacılığında mod seçimi probleminin çözümünde de kullanılabileceği gösterilmiştir.

3 Materyal ve metot

Bu bölümde tehlikeli madde taşımacılığında uygun mod seçimi için önerilen modelde kullanılan yöntemlerden bahsedilmiştir.

3.1 Bulanık AHP yöntemi

AHP yöntemi Saaty [44] tarafından önerilmiş olup farklı araştırmacılar tarafından genişletilmiştir. AHP yöntemi ile karar vermede bir amaç belirlenir. Daha sonra bu amacı sağlayacak ölçütler ve varsa alt ölçütler belirlenir. Önce ölçütler ikili mukayeseye değerlendirilir daha sonra alternatifler belirlenen ölçütlere göre ikili mukayese edilir. Yöntemin adımları uygulanarak amacı sağlayacak en uygun alternatif belirlenir. Bu çalışmada, değerlendirmeler dilsel ifadeler içerdiğinden dolayı bulanık AHP yöntemi kullanılmıştır. Bu çalışmada, yöntem adımları diğer bulanık AHP yaklaşımlarına göre nispeten daha kolay ve klasik AHP aşamalarına uygunluğu sebebiyle Chang [45] tarafından geliştirilen bulanık AHP yöntemi tercih edilmiştir. Chang'ın genişletilmiş analiz yönteminde diğer yöntemlere göre sayısal hesaplama ihtiyacı görece olarak düşüktür ayrıca klasik AHP yönteminin aşamalarına izin verir ve ek işlemler gerektirmez [46]. Chang tarafından geliştirilen bulanık AHP yönteminin adımları aşağıda verilmiştir [45]:

$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ nesnel kümesi, ve $G = \{g_1, g_2, \dots, g_m\}$ amaç kümesi olsun. Chang'ın yöntemine göre, her bir ölçüt alınır ve her bir amaç için genişletilmiş analiz uygulanır. Böylece her bir ölçüt için m tane genişletilmiş analiz değerleri elde edilir ve şu şekilde gösterilir:

$$M_{g_i}^1, M_{g_i}^2, \dots, M_{g_i}^m, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

Burada tüm $M_{g_i}^j$ ($j = 1, 2, \dots, m$) değerleri parametleri l, m ve u olan üçgensel bulanık sayılardır. Bunlar sırasıyla mümkün olan en düşük değer, en olası değer ve mümkün olan en büyük değerdir. Bir üçgensel bulanık sayı (l, m, u) şeklinde temsil edilir.

Adım 1: Bulanık yapay büyüklük değeri, i . nesneye göre Denklem (2) ile tanımlanır.

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j \otimes \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j \right]^{-1} \quad (2)$$

$S_i = i$. ölçütün sentez değeri

$M_{g_i}^j =$ her bir ölçüte yönelik genişletilmiş değeri.

$\sum_{j=1}^m M_{g_i}^j$ değerini elde etmek için, belirli bir matris için m genişletilmiş analiz değerlerinin bulanık toplama işlemi aşağıdaki gibi gerçekleştirilir:

$$\sum_{j=1}^m M_{g_i}^j = \left(\sum_{j=1}^m l_j, \sum_{j=1}^m m_j, \sum_{j=1}^m u_j \right) \quad (3)$$

$i = 1, 2, \dots, n$

$\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j \right]^{-1}$ değerini elde etmek için $M_{g_i}^j$ ($j = 1, 2, \dots, m$) değerlerinin bulanık toplama işlemi aşağıdaki gibi gerçekleştirilir:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j = \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m l_{ij}, \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m m_{ij}, \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m u_{ij} \right) \quad (4)$$

Daha sonra vektörün tersi Denklem (5) ile hesaplanır:

$$\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j \right]^{-1} = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n u_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n m_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n l_i} \right) \quad (5)$$

Adım 2: $M_2 = (l_2, m_2, u_2)$ ve $M_1 = (l_1, m_1, u_1)$ iki üçgensel bulanık sayı olmak üzere $M_2 > M_1$ eşitliğinin olabilirlik derecesi aşağıda gösterilmiştir:

$$V(M_2 \geq M_1) = \sup_{y \geq x} \left[\min(\mu_{M_1}(x), \mu_{M_2}(y)) \right] \quad (6)$$

ve eşdeğer olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$V(M_2 \geq M_1) = \text{hgt}(M_1 \cap M_2) = \mu_{M_2}(d) = \begin{cases} 1, & \text{eğer } m_2 \geq m_1, \\ 0, & \text{eğer } l_1 \geq u_2, \\ \frac{l_1 - u_2}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)}, & \text{diğer,} \end{cases} \quad (7)$$

Buradaki, d değeri M_1 ve M_2 üçgensel bulanık sayılarının kesişim noktasının ordinatıdır. M_1 ve M_2 'yi karşılaştırabilmek için hem $V(M_1 \geq M_2)$ hem de $V(M_2 \geq M_1)$ değerlerinin hesaplanması gerekmektedir.

Adım 3: Bir konveks bulanık sayı M için k konveks bulanık sayıdan $M_i = (i = 1, 2, \dots, k)$ büyük olma derecesi olasılığı şu şekilde tanımlanabilir:

$$V(M \geq M_1, M_2, \dots, M_k) = V[(M \geq M_1), (M \geq M_2), \dots, (M \geq M_k)] = \min_i V(M \geq M_i), \quad i = 1, 2, 3, \dots, k. \quad (8)$$

Varsayalım ki:

$$d'(A_i) = \min_i V(S_i \geq S_k) \quad (9)$$

$$k = 1, 2, \dots, n; k \neq i$$

Daha sonra ağırlık vektörü şu şekilde belirlenir:

$$W' = (d'(A_1), d'(A_2), \dots, d'(A_n))^T \quad (10)$$

$$A_i (i = 1, 2, \dots, n)$$

olan n tane elemandır.

Adım 4: Son olarak, normalizasyon işlemi ile normalize edilmiş vektör W'nin bulanık bir sayı olmadığı Denklem (11) ile gösterilir.

$$W = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n))^T \quad (11)$$

3.2 Aksiyomatik tasarım prensipleri

Aksiyomatik tasarım yöntemi, Suh [6],[7] tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntem ile tasarımda bilimsel bir temel oluşturarak tasarım sürecinin yapısına katkıda bulunulması amaçlanmıştır. Aksiyomatik tasarım yöntemi, sadece ürün tasarımında değil yapısında değerlendirme ölçütleri ve alternatiflerin yer aldığı çok ölçütlü karar verme (ÇÖKV) problemlerinde de bir çözüm aracı olarak kullanılmaktadır. Aksiyomatik tasarım yönteminin amacı tasarımcının sayısal verileri kullanarak amaca en uygun tasarımı gerçekleştirmesini sağlamaktır. Yöntemin prensiplerini oluşturan iki tasarım aksiyomu mevcuttur. Bunlar "Bağımsızlık Aksiyomu" ve "Bilgi Aksiyomu" olup aşağıda açıklanmıştır [6],[7].

Aksiyom 1. Bağımsızlık Aksiyomu): Fonksiyonel ihtiyaçların (Fİ) bağımsızlığını sağlama,

Aksiyom 2. (Bilgi Aksiyomu): Bilgi içeriğini (I) en aza indirme. Bilgi Aksiyomu, Bağımsızlık Aksiyomunu sağlayan alternatifler arasında en düşük bilgi içeriğine sahip alternatifin en uygun alternatif olduğunu belirtir [7]. Tasarım seçiminde, tasarım aralığı ve sistem aralığının kesiştikleri ortak aralığın fazla olması bilgi içeriğini küçültecek ve bu da en iyi sonucu verecektir. Bilgi içeriği birçok farklı problemde karar vermek için kullanılmıştır [47]. P, verilen bir fonksiyonel ihtiyacı karşılama olasılığı olmak üzere, bilgi içeriği (I) aşağıdaki şekilde tanımlanır [8]:

$$I_i = \log_2 \left(\frac{1}{P_i} \right) \quad (12)$$

Tasarımda başarı olasılığı, tasarımcının neyi başarmak istediği (tasarım aralığı) ve sistemin neler sunabileceği (sistem aralığı) ile tanımlanır. "Tasarım aralığı" (tasarımcı tarafından belirlenir) ile sistem yetenek aralığı yani "sistem aralığı" arasındaki ortak bölge, çözümün bulunduğu bölgedir [48]. Şekil 1'de tasarım aralığı, sistem aralığı, ortak aralık ve Fİ'nin sistem olasılık dağılım fonksiyonu (ODF) gösterilmiştir.

Sistem ODF'nu düzgün (uniform) olduğunda durumunda P_i şu şekilde yazılabilir:

$$P_i = \left(\frac{\text{Ortak aralık}}{\text{sistem aralığı}} \right) \quad (13)$$

Böylece Denklem (12) ve Denklem (13) dikkate alındığında Bilgi İçeriği (I) aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

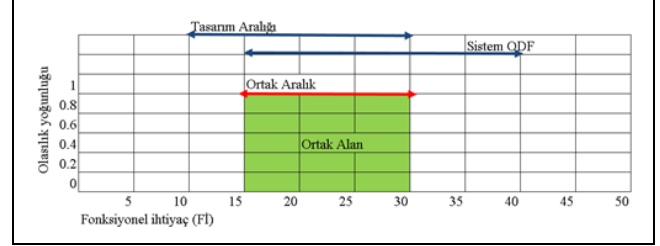
$$I_i = \log_2 \left(\frac{\text{sistem aralığı}}{\text{Ortak aralık}} \right) \quad (14)$$

Şekil 1'de verilen örnekte ortak alan şu şekilde hesaplanır:

Sistem Aralığı: 40-15=25,

Ortak Aralık:30-15=15 olarak belirlendikten sonra Bilgi içeriği:

$$(I) = \log_2 \left(\frac{\text{sistem aralığı}}{\text{Ortak aralık}} \right) = \log_2 \left(\frac{25}{15} \right) = 0,74$$

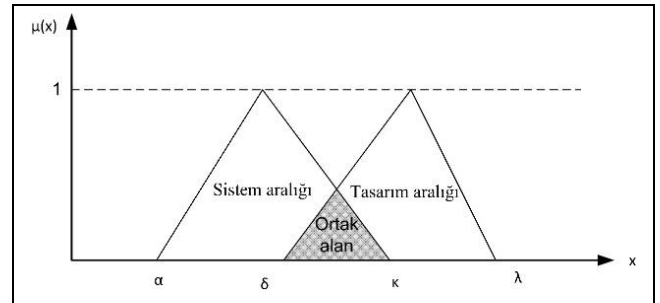


Şekil 1. Tasarım aralığı, sistem aralığı, ortak aralık ve Fİ'nin sistem ODF.

Figure 1. Design range, system range, common range and PDF of an FR.

3.3 Bulanık aksiyomatik tasarım yöntemi

Aksiyomatik tasarım yöntemi, bilginin kesin olduğu karar verme problemlerinin çözümünde kullanılabilir. Eksik bilginin olduğu problemlerde ise karar değişkenleri kesin sayılarla ifade edilemeyeceğinden dolayı bu yaklaşım kullanılamaz [48]. Kulak ve Kahraman [8],[9] yaptıkları çalışmalarda aksiyomatik tasarım yöntemini bulanık mantık yaklaşımıyla genişleterek, tasarım hedeflerini ve alternatiflerin özelliklerini üçgen bulanık sayılar kullanarak tanımlamışlardır (Şekil 2).



Şekil 2. Sistem aralığı, tasarım aralığı ve ortak alan [8],[9].

Figure 2. System range, design range, and common range [8],[9].

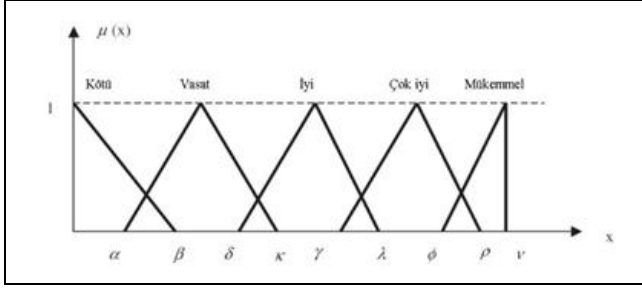
Bulanık veriler; dilsel terimler, bulanık kümeler veya bulanık sayılardan oluşabilir. Eğer bulanık veriler dilsel terimleri içeriyorsa öncelikle bulanık sayılara dönüştürülür. Daha sonra bulanık sayılara puanlar atanır. Şekil 3 ve Şekil 4'te gösterildiği gibi beş ölçek içeren sayısal yaklaşım sistemleri ile dilsel terimler sistematik olarak bulanık sayılara dönüştürülür [8].

Böylece yöntem dilsel ifadelerin kullanıldığı, verilerin net olmadığı problemlerde de kullanılabilir hale getirilmiş olup bu yaklaşım ile bilgi içeriği denklemi aşağıda şekilde hesaplanır [8],[9].

$$I = \log_2 \left(\frac{\text{Sistem tasarımının üçgensel bulanık alanı}}{\text{Ortak alan}} \right) \quad (15)$$

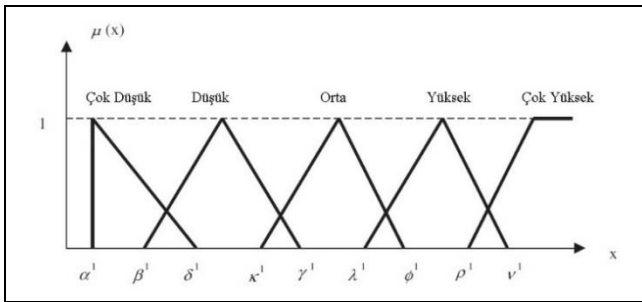
Aynı anda hem net hem de bulanık ölçütleri içeren bir problemde, klasik aksiyomatik tasarım ve bulanık aksiyomatik tasarım yaklaşımları entegre edilerek çözülebilir. Bu özellik,

ilgili yöntemin diğer çok ölçütlü karar verme yöntemlerinden üstün özelliğidir [48].



Şekil 3. Sayısal olmayan faktörler için üçgensel bulanık sayılar [8]

Figure 3. Triangular fuzzy numbers for intangible factors [8].



Şekil 4. Sayısal faktörler için üçgensel bulanık sayılar [8].

Figure 4. Triangular fuzzy numbers for tangible factors [8].

3.4 Ağırlıklı bulanık aksiyomatik tasarım

Bu kısma kadar bulanık aksiyomatik tasarımdaki ölçüt ağırlıkları eşit varsayılmıştır. Ancak bazı durumlarda ölçüt ağırlıkları ya da önem ağırlıkları farklılık gösterebilir. Örneğin bir problemde ürüne ait kalite ölçütü maliyet ölçütünden daha üstün olabilir. Her bir ölçüt için farklı ağırlık (w_j) olduğu durumlarda Kulak ve Kahraman [8] tarafından geliştirilen ve Denklem (16)'da verilen ağırlıklı bulanık aksiyomatik tasarım yöntemi kullanılabilir. Bu yaklaşım ile ölçüt ağırlıkları doğrudan karar vericiler tarafından belirlenebileceği gibi bulanık AHP gibi ÇÖKV yaklaşımları kullanılarak da elde edilebilir.

$$I_{ij} = \begin{cases} \left[\log_2 \left(\frac{1}{P_{ij}} \right) \right]^{1/w_j}, & 0 \leq I_{ij} < 1 \\ \left[\log_2 \left(\frac{1}{P_{ij}} \right) \right]^{w_j}, & I_{ij} > 1 \\ w_j, & I_{ij} = 1 \end{cases} \quad (16)$$

- I_{ij} : Ölçüt j için alternatif i'nin bilgi içeriği,
 w_j : Ölçüt j'nin ağırlığı,
 P_{ij} : Alternatif i için ölçüt j'ye ait fonksiyonel ihtiyacı (F_i) karşılama olasılığı.

4 Uygulama

Bu bölümde tehlikeli madde sınıfına dahil olan petrolün taşınmasında uygun nakliye modunun seçimi için önerilen model uygulanmıştır.

4.1 Değerlendirme ölçütlerinin belirlenmesi

Bir ÇÖKV probleminin temel yapısı amaç, ölçütler ve alternatiflerden oluşmaktadır. Ölçütler amaca en uygun

alternatifin seçilmesinde yardımcı olan elemanlardır. Ele alınan problem aşağıdaki şekilde bir ÇÖKV problemi yapısına uyarlanmıştır.

- Amaç : Petrol taşımacılığında en uygun nakliye modunun seçimi,
Ölçütler : Taşıma maliyeti, kaza riski, ulaştırma hızı, kapasite, esneklik, hizmet alanı, hasar maliyeti,
Alternatifler : Karayolu, Denizyolu, Demiryolu, Boru hattı, Havayolu.

Çalışmada kullanılan değerlendirme ölçütleri aşağıda kısaca açıklanmıştır.

Taşıma maliyeti (TM): Taşınan malzemenin farklı nakliye modlarına göre taşıma maliyetini belirtir.

Kaza riski (KR): Taşıma sırasında meydana gelebilecek tehlikelerin nedenleri insan faktörü olabileceği gibi insan kontrolünün dışındaki faktörler (çevre, teçhizat, yol durumu, hava durumu vb.) de olabilmektedir. Ayrıca petrolün dolum şekli, veya araca yükleme şekli de kaza riskini arttırabilmektedir.

Ulaştırma Hızı (UH) : Petrolün teslim süresini belirtir. Teslim süresi; yol durumu, terminallerdeki bekleme süresi, gümrük geçişleri ve hava durumu gibi durumlardan etkilenebilir,

Kapasite (K) : Petrolü taşıyacak olan aracın taşıyabileceği maksimum varil miktarıdır

Esneklik (E) : Taşıma modunun; talep miktarı, teslim zamanı ve teknik problemler gibi nedenlerden dolayı oluşabilecek ani değişikliklere cevap verebilme yeteneğini ifade eder.

Hizmet Alanı (HA) : Petrolü taşıyacak olan aracın ulaşabileceği alanı ifade eder. Örneğin boru hattı taşımacılığında boru hattının olmadığı alanlara ulaşımın mümkün olmaması ya da yatırım maliyetinin çok yüksek olması durumunda hizmet alanı düşük olarak ifade edilebilir.

Hasar Maliyeti (HM) : Tehlikeli madde taşımacılığında taşıma esnasında meydana gelebilecek herhangi bir kaza, can ve mal kaybına sebep olan patlamalara ya da tehlikeli maddenin yayılarak canlılara kısa ve uzun vadede zarar vermesine yol açabilir.

Bu ölçütler dikkate alınarak petrol taşımacılığında en uygun nakliye modu seçimi için bulanık aksiyomatik tasarım metodu kullanılmıştır. Ölçüt ağırlıkları farklılık gösterdiği için ağırlıklı bulanık aksiyomatik tasarım metodu tercih edilmiştir.

4.2 Değerlendirme ölçütlerinin ağırlıklandırılması

ÇÖKV yaklaşımının kullanıcıya sunmuş olduğu esnekliklerden birisi de değerlendirme ölçütlerinin önem ağırlıklarına göre sıralanabilmesi yani ağırlıklandırılabilmesidir. Ölçütlerin ağırlıklandırılmasında farklı ÇÖKV teknikleri kullanılabilir. Bu çalışmada yöntemin yaygın kullanımı ve hesaplama kolaylığı sağlaması dikkate alınarak bulanık AHP yöntemi tercih edilmiştir. AHP metodu ile sadece ölçütlerin önem sırası

belirlenebileceği gibi alternatiflerin sıralaması da gerçekleştirilebilir. Ancak bu çalışmada ölçüt ağırlıkları bulanık AHP metodu ile hesaplanmış, alternatiflerin sıralaması ise ağırlıklı bulanık aksiyomatik tasarım metodu ile gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada yer alan ölçütler, ölçüt ağırlıkları, tasarım ve sistem aralıkları 3 şekilde belirlenmiştir. Öncelikle karar verici olarak "Afet Yönetimi" ve "Lojistik" alanında uzmanlığa sahip 3 akademisyenin görüşleri alınmıştır. Ayrıca ABD Ulaştırma Bakanlığı, Boru Hattı ve Tehlikeli Maddeler Güvenliği İdaresi Başkanlığı (PHMSA) [49]'nın ilgili web sayfasında verilen istatistik bilgileri ve Özat [50]'ın çalışmasında yer alan istatistik bilgileri dikkate alınmıştır. Ölçütler, karar vericiler tarafından değerlendirilmiştir. Karar vericiler, ölçütleri birbiri ile karşılaştırırken "eşit önemli", "biraz daha fazla önemli" gibi dilsel ifadeler kullanmışlardır. Bu ifadeler Tablo 1 kullanılarak bulanık üçgensel sayılara dönüştürülmüş ve Tablo 2 elde edilmiştir.

Tablo 1. Ölçüt ağırlıklandırma için kullanılan dilsel ifadeler ve karşılık gelen üçgensel bulanık sayılar [51]

Table 1. Linguistic expressions and corresponding triangular fuzzy numbers used in criterion weighting [51].

Dilsel İfadeler	Bulanık Üçgensel Sayılar	Bulanık Üçgensel Sayıların Tersi
Eşit önemli	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
Biraz daha fazla önemli	(1, 3, 5)	(1/5, 1/3, 1)
Kuvvetli derecede önemli	(3, 5, 7)	(1/7, 1/5, 1/3)
Çok kuvvetli derecede önemli	(5, 7, 9)	(1/9, 1/7, 1/5)
Tamamıyla önemli	(7, 9, 9)	(1/9, 1/9, 1/7)

Tablo 2'de karar vericilerin ortak görüşü ile belirlediği ölçütlerin ikili karşılaştırma matrisi verilmiştir.

Değerlendirme ölçütlerine ait önem ağırlıkları bulanık AHP yöntemi ile Denklem (1-11) kullanılarak Tablo 3'te verildiği gibi belirlenmiştir.

Tablo 3 incelendiğinde "Hasar Maliyeti" en yüksek ağırlığa sahip ölçüt olarak belirlenmiştir. Tehlikeli madde

Tablo 2. Ölçütlere ait ikili karşılaştırma matrisi.

Table 2. Pairwise comparison matrix of criteria.

Ölçüt	TM	KR	UH	K	E	HA	HM
TM	(1;1;1)	(0,2;0,33;1)	(3;5;7)	(1;1;1)	(0,14;0,2;0,33)	(0,2;0,33;1)	(0,2;0,33;1)
KR	(1;3;5)	(1;1;1)	(3;5;7)	(5;7;9)	(3;5;7)	(3;5;7)	(0,2;0,33;1)
UH	(0,14;0,2;0,33)	(0,14;0,2;0,33)	(1;1;1)	(1;3;5)	(1;1;1)	(0,2;0,33;1)	(1;1;1)
K	(1;1;1)	(0,11;0,14;0,2)	(0,2;0,33;1)	(1;1;1)	(3;5;7)	(1;3;5)	(0,111;0,14;0,2)
E	(3;5;7)	(0,14;0,2;0,33)	(1;1;1)	(0,14;0,2;0,33)	(1;1;1)	(0,2;0,33;1)	(0,11;0,11;0,14)
HA	(1;3;5)	(0,14;0,2;0,33)	(1;3;5)	(0,2;0,33;1)	(1;3;5)	(1;1;1)	(0,11;0,14;0,2)
HM	(1;3;5)	(1;3;5)	(1;1;1)	(5;7;9)	(7;9;9)	(5;7;9)	(1;1;1)

Tablo 3. Ölçütlere ait önem ağırlıkları.

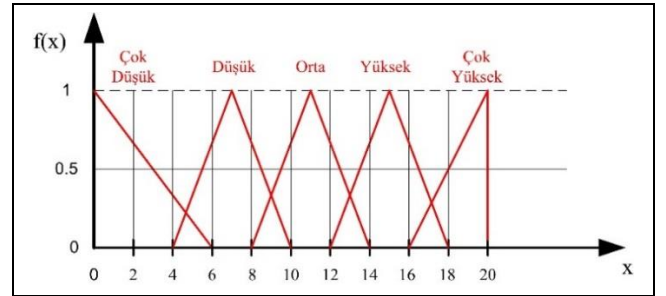
Table 3. Importance weights of the criteria.

Ölçüt	Ağırlık
Taşıma Maliyeti (TM)	0,058
Kaza Riski (KR)	0,315
Ulaştırma Hızı (UH)	0,004
Kapasite (K)	0,110
Esneklik (E)	0,029
Hizmet Alanı (HA)	0,135
Hasar Maliyeti (HM)	0,349

taşımacılığında kaza sonucu oluşacak zarar can ve mal kaybına sebep olarak telafisi olmayacak sonuçlar doğurabilir. Patlamalar ya da tehlikeli maddenin kontrolsüz yayılması canlılara kısa ve uzun vadede zarar verebilmektedir. Bu nedenle en yüksek ağırlığa sahip ölçüt olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde "Kaza Riski" ölçütü de yüksek ağırlığa sahiptir. Mod seçiminde düşük kaza riski olan alternatifin seçilmesi tehlikeli madde taşımacılığında kaza sayısını düşürmek adına önem arz etmektedir.

4.3 Ağırlıklı bulanık aksiyomatik tasarım yönteminin uygulaması

Ağırlıklı bulanık aksiyomatik tasarım yönteminin uygulanabilmesi için öncelikle sistem aralığı ve tasarım aralığı belirlenmelidir. Bulanık AHP yönteminde olduğu gibi bulanık aksiyomatik tasarım yönteminde de karar vericilerin değerlendirme esnasında kullandığı dilsel ifadeler bulanık sayılara dönüştürülmüştür. Bu dönüşüm için Şekil 5'te gösterilen üyelik fonksiyonları kullanılmıştır.



Şekil 5. Sayısal olmayan faktörler için üçgensel bulanık sayılar [8].

Figure 5. Triangular fuzzy numbers for intangible factors [8].

Bir alternatifin ilgili ölçüte göre uygunluğunu "çok düşük" olarak değerlendiren bir karar vericinin dilsel ifadesi (0,0,6) olarak bulanık üçgensel sayılara dönüştürülecektir (Şekil 5). Benzer şekilde tüm dilsel ifadelerin bulanık üçgensel sayılara dönüşümleri için Tablo 4 kullanılır.

Tablo 4. Dilsel ifadeler ve karşılık gelen üçgensel bulanık sayılar[8].

Table 4. Linguistic expressions and corresponding triangular fuzzy numbers [8].

Dilsel İfade	Bulanık Üçgensel Sayılar
Çok düşük (ÇD)	(0;0;6)
Düşük (D)	(4;7;10)
Orta (O)	(8;11;14)
Yüksek (Y)	(12;15;18)
Çok yüksek (ÇY)	(16;20;20)

Petrolün nakliyesi için tasarım aralığı ve alternatif taşıma modlarına ait sistem aralıkları Tablo 5'te gösterildiği gibi belirlenmiştir. Alternatif taşıma modları için tasarım aralığı ve ölçüt bazlı sistem aralığının ortak alanı dikkate alınarak bilgi içeriği (I) hesaplanmıştır. Alan kısıtı sebebiyle sadece en yüksek ağırlığa sahip "Hasar Maliyeti (HM)" ölçütüne ait işlemler detaylandırılmıştır.

Tablo 5. Uygulamadaki sistem aralığı ve tasarım aralığı verileri.

Table 5. System range and design range data in application.

Ölçüt	Tasarım Aralığı	Kara Yolu	Deniz Yolu	Demir Yolu	Boru Hattı	Hava Yolu
TM	(0 0 14)	Y	ÇD	D	D	ÇY
KR	(0 0 10)	Y	ÇD	O	D	D
UH	(8 20 20)	O	D	D	D	ÇY
K	(4 20 20)	D	Y	O	ÇY	D
E	(4 20 20)	Y	O	O	ÇD	D
HA	(8 20 20)	ÇY	D	O	ÇD	Y
HM	(0 0 14)	Y	ÇD	Y	O	D

Tablo 5'te gösterildiği gibi karayolu ve demiryolu "Hasar Maliyeti" açısından "yüksek" olarak değerlendirilmiş olup tasarım aralığı ve sistem aralığının ortak alanı Şekil 6'da gösterilmiştir.

Karayolu ve demiryoluna ait Bilgi içeriğini (I) hesaplamak için öncelikle Şekil 6'da gösterilen "ortak alan" olarak ifade edilen bölgenin alanı hesaplanmalıdır. Bu alan Şekil 7'de büyütülerek gösterilmiştir.

Şekil 7'de verilen üçgenin alanı aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\text{Ortak alan} = \frac{0,1176x(14-12)}{2} = 0,1176$$

Daha sonraki aşamada sistem tasarımının üçgensel bulanık alanı aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\text{Sistem tasarımının alanı} = \frac{(18-12) \times 1}{2} = 3$$

Son olarak, karayolu ve demiryolu alternatiflerine ait Bilgi içeriği (I) Denklem (15) kullanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanır:

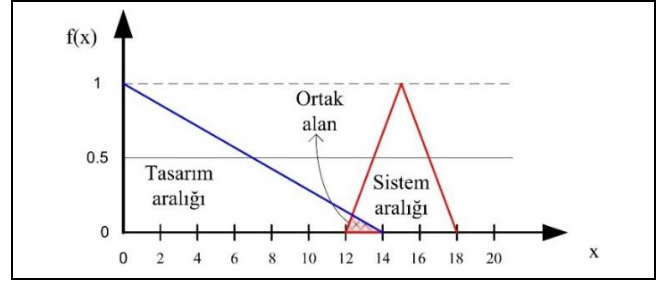
$$I_{HM} = \log_2 \left(\frac{3}{0,1176} \right) = 4,670$$

Denizyolu alternatifi "Hasar Maliyeti" ölçütü açısından "çok düşük" olarak değerlendirilmiş olup tasarım aralığı ve sistem aralığının ortak alanı Şekil 8'de gösterilmiştir.

Denizyolu alternatifine ait Bilgi içeriği (I) şu şekilde hesaplanır:

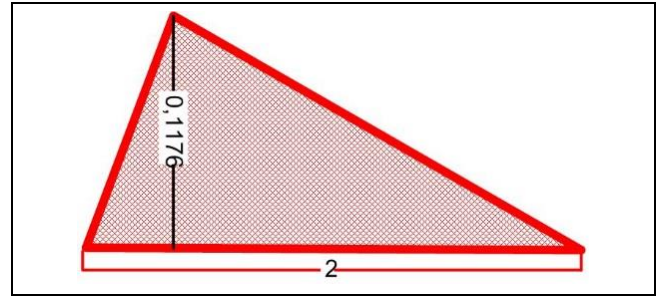
$$I_{HM} = \log_2 \left(\frac{3}{3} \right) = 0$$

Boru hattı alternatifi hasar maliyeti ölçütü açısından "orta" olarak değerlendirilmiş olup tasarım aralığı ve sistem aralığının ortak alanı Şekil 9'da gösterilmiştir.



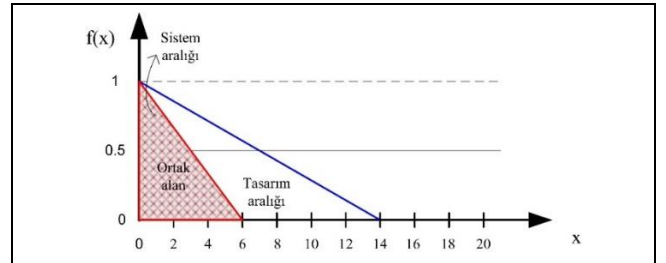
Şekil 6. Karayolu ve demiryolu alternatiflerinin hasar maliyeti ölçütü için tasarım aralığı ve sistem aralığı.

Figure 6. Design range and system range for the damage cost criterion of the road and rail alternatives.



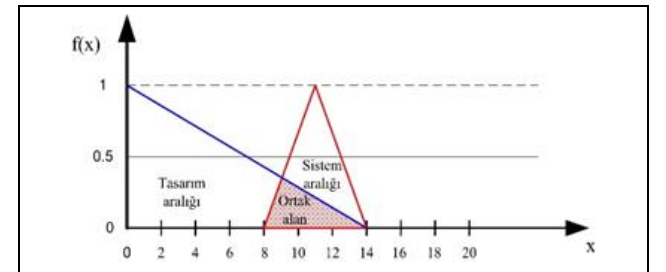
Şekil 7. Karayolu ve demiryolu alternatiflerinin hasar maliyeti ölçütü için ortak alan.

Figure 7. Common area for the damage cost measure of the road and rail alternatives.



Şekil 8. Denizyolu alternatifinin hasar maliyeti ölçütü için tasarım aralığı ve sistem aralığı

Figure 8. Design range and system range for the damage cost criterion of the maritime line alternative.



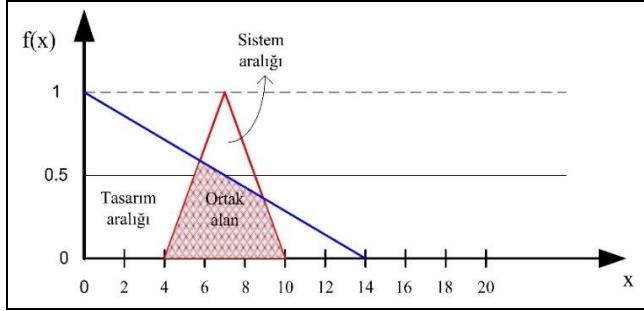
Şekil 9. Boru hattı alternatifinin hasar maliyeti ölçütü için tasarım aralığı ve sistem aralığı

Figure 9. Design range and system range for the damage cost criterion of the pipeline alternative.

Boru hattı alternatifine ait Bilgi içeriği (I) şu şekilde hesaplanır:

$$I_{HM} = \log_2 \left(\frac{3}{1,0588} \right) = 1,502$$

Havayolu alternatifi hasar maliyeti ölçütü açısından “düşük” olarak değerlendirilmiş olup tasarım aralığı ve sistem aralığının ortak alanı Şekil 10’da gösterilmiştir.



Şekil 10. Havayolu alternatifinin hasar maliyeti ölçütü için tasarım aralığı ve sistem aralığı

Figure 10. Design range and system range for the for the damage cost criterion of the airline alternative.

Havayolu alternatifine ait Bilgi içeriği (I) şu şekilde hesaplanır:

$$I_{HM} = \log_2 \left(\frac{3}{2,214} \right) = 0,438$$

Tüm alternatifler belirlenen yedi ölçüt kapsamında ayrı ayrı değerlendirilmiş olup elde edilen bilgi içerikleri Tablo 6’da

gösterilmiştir. Bulanık AHP metodu ile belirlenen ve Tablo 3’te verilen ölçüt ağırlıkları ve bilgi içerikleri Denklem (16) ile ağırlıklı bilgi içeriklerine dönüştürülmüştür. Elde edilen sonuçlar Tablo 7’de verilmiş olup Bilgi içerikleri toplamı en küçük olan alternatif en uygun alternatif olarak belirlenmiştir. Tablo 7 incelendiğinde en uygun alternatifin denizyolu taşımacılığı olduğu görülmektedir. Boru hattı taşımacılığı “hizmet alanı” ölçütünü sağlayamadığı için elenmiştir. Benzer şekilde havayolu alternatifi “taşıma maliyeti” ölçütünü sağlayamadığı için elenmiştir.

4.4 Duyarlılık analizi

Uygulama Bölümü’nün son adımında, ölçüt ağırlıklarındaki değişikliğin model sonuçlarına etkisini belirlemek amacıyla duyarlılık analizi yapılmış ve çözümler farklı senaryolar altında incelenmiştir. Bu çalışmada yapılan duyarlılık analizi ile “ölçütlerin önem ağırlıklarındaki değişikliğin tehlikeli madde taşımacılığında mod seçimine etkisi var mıdır?” sorusuna cevap aranmıştır. Duyarlılık analizini gerçekleştirmek amacıyla Awasthi ve Omrani [25]’nin çalışmalarında gerçekleştirmiş oldukları gibi ölçüt ağırlıkları değiştirilmiş ve bu değişikliğin mod seçimi üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir. Bunun için farklı ölçüt ağırlıkları içeren 8 farklı senaryo belirlenmiş olup senaryolar ve sonuçları Tablo 8’de gösterilmiştir.

Tablo 6. Tüm alternatiflere ait bilgi içerikleri.

Table 6. Information contents of all alternatives.

		Ölçütler						
		ITM	IKR	IUH	IK	IE	IHA	IHM
Ölçüt Ağırlıkları		0,058	0,315	0,004	0,110	0,029	0,135	0,349
Alternatifler	Karayolu	4,670	2,832	1,321	1,662	0,152	0	4,670
	Denizyolu	0	0	4,491	0,152	0,573	4,491	0
	Demiryolu	0,438	0,971	4,491	0,573	0,573	0,295	4,670
	Boru Hattı	0,438	0,319	4,491	0	1,722	Sonsuz	1,502
	Havayolu	Sonsuz	0,319	0	1,662	1,662	1,321	0,438

Tablo 7. Ağırlıklı bulanık aksiyomatik tasarım metodu ile elde edilen sonuçlar.

Table 7. Results obtained by weighted fuzzy axiomatic design method.

		Ölçütler							$\sum I$
		ITM	IKR	IUH	IK	IE	IHA	IHM	
Alternatifler	Karayolu	1,093	1,388	1,001	1,058	$1,35 \times 10^{-28}$	0	1,711	6,250
	Denizyolu	0	0	1,007	$3,71 \times 10^{-8}$	$5,78 \times 10^{-9}$	1,224	0	2,230*
	Demiryolu	$6,5 \times 10^{-7}$	0,911	1,007	0,006	$5,78 \times 10^{-9}$	$1,16 \times 10^{-4}$	1,711	3,640
	Boru Hattı	$6,5 \times 10^{-7}$	0,027	1,007	0	1,016	Sonsuz	1,152	Sonsuz
	Havayolu	Sonsuz	0,027	0	1,058	1,015	1,038	0,094	Sonsuz

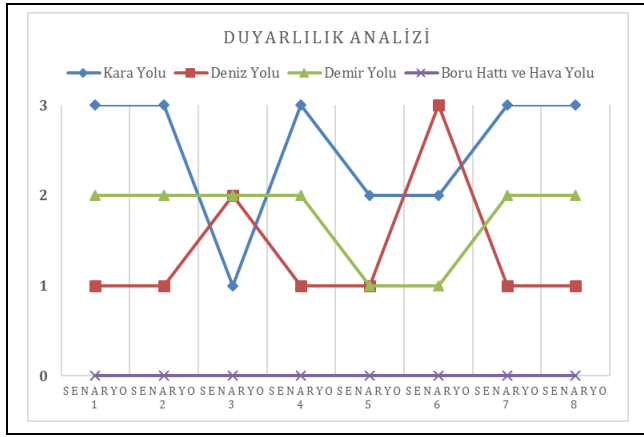
Tablo 8. Duyarlılık analizi senaryo verileri ve sonuçlar.

Table 8. Sensitivity analysis scenario data and results.

		Ölçüt Ağırlıkları						$\sum I$					
		TM	KR	UH	K	E	HA	HM	Karayolu	Denizyolu	Demiryolu	Boru Hattı	Havayolu
Senaryo 1	0,994	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	8,63	2	2,44	Sonsuz	Sonsuz
Senaryo 2	0,001	0,994	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	6,82	2	2,97	Sonsuz	Sonsuz
Senaryo 3	0,001	0,001	0,994	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	5,32	5,45	5,45	Sonsuz	Sonsuz
Senaryo 4	0,001	0,001	0,001	0,994	0,001	0,001	0,001	0,001	5,66	2,15	2,57	Sonsuz	Sonsuz
Senaryo 5	0,001	0,001	0,001	0,001	0,994	0,001	0,001	0,001	5,16	2,57	2,57	Sonsuz	Sonsuz
Senaryo 6	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,994	0,001	0,001	5	5,45	2,3	Sonsuz	Sonsuz
Senaryo 7	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,994	0,994	8,63	2	5,63	Sonsuz	Sonsuz
Senaryo 8	0,143	0,143	0,143	0,143	0,143	0,143	0,143	0,143	5,77	2,5	3,34	Sonsuz	Sonsuz

Örneğin 1. senaryoda “Taşıma Maliyeti” ölçütüne alabileceği en yüksek ağırlık verilerek diğer ölçütlerin ağırlıkları en küçüklenmiştir. Benzer şekilde 2. senaryoda “Kaza Riski” ölçütüne alabileceği en yüksek ağırlık verilerek diğer ölçütlerin ağırlıkları en küçüklenmiştir. İlk 7 senaryo aynı mantık çerçevesinde oluşturulmuştur. 8. senaryoda ise tüm ölçütlerin ağırlıkları eşit varsayılmıştır. Bu çalışma, sekiz senaryo ile sınırlı olup farklı çalışmalarda farklı ağırlık kombinasyonları göz önünde bulundurularak daha birçok senaryo tasarlanabilir. Şekil 11, her bir alternatifin duyarlılık analizi ile elde edilen performans grafiğini göstermektedir.

Duyarlılık analizine göre, “Denizyolu” alternatifi 1., 2., 4., 5., 7. ve 8. senaryolarda en iyi mod olarak belirlenmiştir. Buna karşılık olarak, “Karayolu” alternatifi 3. senaryo için en uygun alternatiftir. “Demiryolu” alternatifi ise 5. ve 6. senaryolarda en iyi mod olarak belirlenmiştir. 5. senaryoda “Denizyolu” ve “Demiryolu” alternatifleri aynı değere sahip oldukları için ikisi de en iyi mod olarak belirlenmiştir. Şekil 11’de görüldüğü gibi, alternatif modlar arasındaki sıralama, ölçütlerin farklı önem ağırlıklarına göre değişebilmektedir. Bu nedenle duyarlılık analizi, ölçütlerin önem ağırlıklarının mod seçimine etkisi olduğunu göstermektedir.



Şekil 11. Duyarlılık analizi sonuçları.

Figure 11. Sensitivity analysis results.

5 Sonuçlar

Tehlikeli madde taşımacılığında insan sağlığına ve çevreye zarar vermeden lojistik faaliyetlerin gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır. Bununla birlikte tehlikeli madde taşıma sürecinde birbiri ile çelişen farklı ölçütler ile karşılaşılmaktadır. Bu açıdan bakıldığında ilgili problem bir ÇÖKV problemi olarak yorumlanabilir. ÇÖKV, birden fazla değerlendirme ölçütü dikkate alınarak en uygun alternatifin seçimini sağlayan bir yaklaşımdır. Bu çalışmada petrol taşımacılığında alternatif taşıma modları; taşıma maliyeti, kaza riski, ulaştırma hızı, kapasite, esneklik, hizmet alanı ve hasar maliyeti ölçütleri açısından ağırlıklı bulanık aksiyomatik tasarım yöntemi ile değerlendirilmiştir. Ağırlıklı bulanık aksiyomatik tasarım yöntemi ile belirlenen bilgi içerikleri incelendiğinde en düşük bilgi içeriğine sahip alternatifin “Denizyolu” olduğu görülmektedir. Dolayısıyla petrol taşımacılığında en uygun nakliye modu olarak denizyolu taşımacılığı belirlenmiştir. ABD Enerji Bilgi Yönetimi (EIA)’nin 2017 yılında yayınladığı rapora [52] göre 2015 yılında dünya petrol ve diğer sıvı üretiminin yaklaşık %61’i denizyolu taşımacılığı ile taşınmıştır. Çalışma sonuçları bu raporda verilen bilgi ile uyumludur.

Gelecek çalışmalarda ölçütler farklı ÇÖKV teknikleri ile ağırlıklandırılarak sonuçlar karşılaştırılabilir. Böylece ölçüt ağırlıklandırma kullanılan yöntemin etkisi tartışılabilir.

6 Conclusions

It is aimed to carry out logistics activities without harming human health and the environment in hazardous materials transportation. However, in the process of transporting hazardous materials, different criteria are encountered that contradict each other. From this point of view, the related problem can be interpreted as a MCDM problem. MCDM is an approach that enables the selection of the most suitable alternative by considering multiple evaluation criteria. In this study, alternative transportation modes in petroleum transportation are evaluated in terms of transportation cost, accident risk, transportation speed, capacity, flexibility, service area, and damage cost criteria with weighted fuzzy axiomatic design method. When the information content obtained by the weighted fuzzy axiomatic design method is examined, it is seen that the alternative with the lowest information content is the “Maritime Line”. Therefore, maritime transportation is determined as the most suitable mode of transportation in petroleum transportation. According to the report published by the US Energy Information Administration (EIA) in 2017 [52], approximately 61% of the world’s petroleum and other liquids production was transported by maritime transportation in 2015. The results of the study are consistent with the information given in the report.

In future studies, the results can be compared by weighting the criteria with different MCDM techniques. Thus, the effect of the method used in criterion weighting can be discussed.

7 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Merve CENGİZ TOKLU fikrin oluşması, modelin tasarlanması, uygulamanın gerçekleştirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi, yazım ve eleştirel inceleme başlıklarında; Beyzanur DOĞAN fikrin oluşması, literatür taraması, uygulamanın gerçekleştirilmesi ve sonuçların incelenmesi başlıklarında katkı sunmuşlardır.

8 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

9 Kaynaklar

- [1] T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı. “Tehlikeli Maddelerin Havayoluyla Taşınması Hakkında Yönetmelik”. <https://www.mevzuat.gov.tr/File/GeneratePdf?mevzuatNo=24512&mevzuatTur=KurumVeKurulYonetmeligi&mevzuatTertip=5> (26.06.2020).
- [2] Güteryüz D, Özden E. “The prediction of Brent crude oil trend using LSTM and Facebook Prophet”. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 201(9), 1-9, 2020.
- [3] Ke GY, Zhang H, Bookbinder JH. “A dual toll policy for maintaining risk equity in hazardous materials transportation with fuzzy incident rate”. *International Journal of Production Economics*, 227, 107650, 2020.

- [4] Ghaderi A, Burdett RL. "An integrated location and routing approach for transporting hazardous materials in a bi-modal transportation network". *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 127, 49-65, 2019.
- [5] Küçük Ö, Bali Ö. "Tehlikeli maddelerin çok modlu taşınması için bir model önerisi". *Savunma Bilimleri Dergisi*, 15(2), 73-105, 2016.
- [6] Suh NP. *The Principles of Design*. 1st ed. New York, USA, Oxford University Press, 1990.
- [7] Suh NP. *Axiomatic Design Advances and Applications*. 1st ed. New York, USA, Oxford University Press, 2001.
- [8] Kulak O, Kahraman C. "Fuzzy multi-attribute selection among transportation companies using axiomatic design and analytic hierarchy process". *Information Sciences*, 170(2-4), 191-210, 2005.
- [9] Kulak O, Kahraman C. "Multi-attribute comparison of advanced manufacturing systems using fuzzy vs. crisp axiomatic design approach". *International Journal of Production Economics*, 95(3), 415-424, 2005.
- [10] Özel B, Özyörük B. "Bulanık aksiyomatik tasarım ile tedarikçi firma seçimi". *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22(3), 415-423, 2007.
- [11] Murat YŞ, Kulak O. "Ulaşım ağlarında bilgi aksiyomu kullanılarak güzergah (rota) seçimi". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(3), 425-435, 2005.
- [12] Celik M, Kahraman C, Cebi S, Er ID. "Fuzzy axiomatic design-based performance evaluation model for docking facilities in shipbuilding industry: The case of Turkish shipyards". *Expert Systems with Applications*, 36(1), 599-615, 2009.
- [13] Kahraman C, Kaya I, Cebi S. "A comparative analysis for multiattribute selection among renewable energy alternatives using fuzzy axiomatic design and fuzzy analytic hierarchy process". *Energy*, 34(10), 1603-1616, 2009.
- [14] Kahraman C, Cebi S. "A new multi-attribute decision making method: Hierarchical fuzzy axiomatic design". *Expert Systems with Applications*, 36(3), 4848-4861, 2009.
- [15] Büyüközkan G, Arsenyan J, Ertek G. "Evaluation of e-learning web sites using fuzzy axiomatic design based approach". *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 3(1), 28-42, 2010.
- [16] Maldonado A, García JL, Alvarado A, Balderrama CO. "A hierarchical fuzzy axiomatic design methodology for ergonomic compatibility evaluation of advanced manufacturing technology". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66(1-4), 171-186, 2013.
- [17] Kannan D, Govindan K, Rajendran S. "Fuzzy axiomatic design approach based green supplier selection: A case study from Singapore". *Journal of Cleaner Production*, 96, 194-208, 2015.
- [18] Akman G, Alkan A. "İzmit kent içi ulaşımda alternatif toplu taşıma sistemlerinin aksiyomlarla tasarım yöntemi ile değerlendirilmesi". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(1), 54-63, 2016.
- [19] Chen X, Li Z, Fan ZP, Zhou X, Zhang X. "Matching demanders and suppliers in knowledge service: A method based on fuzzy axiomatic design". *Information Sciences*, 346-347, 130-145, 2016.
- [20] Khandekar AV, Chakraborty S. "Application of fuzzy axiomatic design principles for selection of non-traditional machining processes". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83(1-4), 529-543, 2016.
- [21] Güngör F. "Sızdırmaz conta malzemesinin aksiyomatik tasarım medoduyla seçilmesi". *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 4(1), 1-10, 2017.
- [22] Zheng P, Wang Y, Xu X, Xie SQ. "A weighted rough set based fuzzy axiomatic design approach for the selection of AM processes". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91(5-8), 1977-1990, 2017.
- [23] Batur GD, Özyörük B. "Aksiyomatik tasarım ile tedarikçi seçimi: Bebek maması üretimi". *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 11(2), 195-201, 2018.
- [24] Kahraman C, Cebi S, Cevik S, Oztaysi B. "A novel trapezoidal intuitionistic fuzzy information axiom approach: An application to multicriteria landfill site selection". *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 67, 157-172, 2018.
- [25] Awasthi A, Omrani H. "A goal-oriented approach based on fuzzy axiomatic design for sustainable mobility project selection". *International Journal of Systems Science: Operations and Logistics*, 6(1), 86-98, 2019.
- [26] Çelik K, Pehlivanoglu HE, Avcı S, Aladağ Z. "Aksiyomlarla tasarım yöntemi ile geliştirilmiş polistiren sert köpük boncuk hammaddesi seçimi". *Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 31, 32-43, 2020.
- [27] Demirci A. "Lojistik tedarikçi seçiminde aksiyomatik tasarım tekniği uygulaması". *International Journal of Economics, Politics, Humanities & Social Sciences*, 3(2), 90-105, 2020.
- [28] Karatas M. "Hydrogen energy storage method selection using fuzzy axiomatic design and analytic hierarchy process". *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(32), 16227-16238, 2020.
- [29] Kır M, Uygun Ö, Kır S. "Bulanık aksiyomatik tasarım ve hedef programlama yaklaşımlarıyla bir ürün tasarımı". *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(2), 375-387, 2020.
- [30] Palabıyık H, Bayındır S, Uygun Ö. "Üniversite tercihinin bulanık aksiyomatik tasarım ile değerlendirilmesi". *Bahcesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(1), 20-33, 2020.
- [31] Ulutürk İ, Yurdakul M, İç YT. "Aksiyomatik tasarım yöntemi ile yenilikçi ürün geliştirilmesi". *Politeknik Dergisi*, 23(4), 987-1002, 2020.
- [32] Erkut E, Verter V. "Modeling of transport risk for hazardous materials". *Operations Research*, 46(5), 625-642, 1998.
- [33] Hwang ST, Brown DF, O'Steen JK, Policastro AJ, Dunn WE. "Risk assessment for national transportation of selected hazardous materials". *Transportation Research Record*, 1763(1), 114-124, 2001.
- [34] Kazantzi V, Kazantzis N, Gerogiannis VC. "Risk informed optimization of a hazardous material multi-periodic transportation model". *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 24(6), 767-773, 2011.
- [35] Saat MR, Werth CJ, Schaeffer D, Yoon H, Barkan CPL. "Environmental risk analysis of hazardous material rail transportation". *Journal of Hazardous Materials*, 264, 560-569, 2014.

- [36] Yang Q, Chin KS, Li YL. "A quality function deployment-based framework for the risk management of hazardous material transportation process". *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 52, 81-92, 2018.
- [37] Huang X, Wang X, Pei J, Xu M, Huang X, Luo Y. "Risk assessment of the areas along the highway due to hazardous material transportation accidents". *Natural Hazards*, 93(3), 1181-1202, 2018.
- [38] Huang B. "GIS-based route planning for hazardous material transportation". *Journal of Environmental Informatics*, 8(1), 49-57, 2006.
- [39] Jassbi J, Makvandi P. "Route selection based on soft MODM framework in transportation of hazardous materials". *Applied Mathematical Sciences*, 4(61-64), 3121-3132, 2010.
- [40] Kwon C. "Conditional value-at-risk model for hazardous materials transportation". *IEEE 2011 Winter Simulation Conference*, Phoenix, Arizona, 11-14 December 2011.
- [41] Kang Y, Batta R, Kwon C. "Generalized route planning model for hazardous material transportation with VaR and equity considerations". *Computers and Operations Research*, 43, 237-247, 2014.
- [42] Hu H, Li X, Zhang Y, Shang C, Zhang S. "Multi-objective location-routing model for hazardous material logistics with traffic restriction constraint in inter-city roads". *Computers and Industrial Engineering*, 128, 861-876, 2019.
- [43] Noureddine M, Ristic M. "Route planning for hazardous materials transportation: Multi-criteria decision-making approach". *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, 2(1), 66-85, 2019.
- [44] Saaty TL. *The Analytic Hierarchy Process*. 1st ed. New York, USA, McGraw-Hill, 1980.
- [45] Chang D-Y. "Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP". *European Journal of Operational Research*, 95(3), 649-655, 1996.
- [46] Büyüközkan G, Kahraman C, Ruan D. "A fuzzy multi-criteria decision approach for software development strategy selection". *International Journal of General Systems ISSN:*, 33(2-3), 259-280, 2004.
- [47] Kahraman C, Cebi S, Kaya İ. "Selection among renewable energy alternatives using fuzzy axiomatic design: The case of Turkey". *Journal of Universal Computer Science*, 16(1), 82-102, 2010.
- [48] Kulak O, Durmuşoğlu MB, Kahraman C. "Fuzzy multi-attribute equipment selection based on information axiom". *Journal of Materials Processing Technology*, 169(3), 337-345, 2005.
- [49] Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration (PHMSA). "PHMSA Data and Statistics". <https://www.phmsa.dot.gov/data-and-statistics/phmsa-data-and-statistics> (08.07.2021).
- [50] Özat Y. Tehlikeli Madde Taşımacılığında Alınacak Önlemler. Yüksek Lisans Tezi, Çankaya Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2018.
- [51] Kaptanoğlu D, Özok AF. "Akademik performans değerlendirmesi için bir bulanık model". *İTÜDERGİSİ/d*, 5(1), 193-204, 2006.
- [52] US Energy Information Administration. "World Oil Transit Chokepoints". https://www.eia.gov/international/content/analysis/special_topics/World_Oil_Transit_Chokepoints/wotc.pdf (26.01.2022).