

Journal of Transportation and Logistics

Araştırma Makalesi | Research Article

🔓 Açık Erişim | Open Access

Afet Sonrası İnsani Yardım Lojistiğinde Stokastik Talepli Araç Rotalama Problemi için Çözüm Yöntemleri

Solution Methods for Vehicle Routing Problem with Stochastic Demand in Post-Disaster Humanitarian Logistics



Engin Baytürk¹ , Beyzanur Turna¹ , İrem Saka¹  & Aysuma Kaya¹ 

¹ Samsun University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Industrial Engineering, Samsun, Türkiye

Öz

Afet yönetimi, afetlerin verdiği büyük yıkımların önlenbilmesinde önem taşımaktadır. Afet yönetimi, afet gerçekleşmeden önce, afet anında ve afet gerçekleşikten sonra alınan tedbirler olarak ana aşamalara ayrılmaktadır. Özellikle, afet sonrasında yapılan planlamaların en önemlilerinden biri afet sonrası insani yardım lojistiğidir. Bu kapsamda, insani yardım lojistiği, afetten etkilenen insanların gereksinimlerini giderebilmek için, afet gerçekleşikten sonra gerekecek olan doğru bilginin, temel gereksinimlerin, ekipmanların gereken zamanda, gereken yere ve gerekli kişilere temin etme sürecidir. Afet yönetimi lojistik süreçleri afet öncesi gerekli önlemlerin alınması, acil müdahale ve iyileştirme aşamalarından oluşmaktadır. Afet yönetiminde lojistik süreçlerin temelini oluşturmasını sağlayan bu adımlar afetten etkilenenler için gereken ürünlerin lojistiğin bir temeli olarak da bilinen gereken zamanda, gereken yerde, gerekli miktarda, uygun koşullarda, en uygun maliyetle, gereken kişilere temin edilmesinde etkin bir rol almaktadır. Tüm bu önemli etkilerinden dolayı, bu çalışmada afet sonrasında insani yardım lojistiğinin doğru şekilde sağlanabilmesi için araç rotalama problemi ile ilgili karma tam sayılı matematiksel model ve k-ortalamlar ile karınca kolonisi optimizasyonunun kullanıldığı matematiksel modeller oluşturulmuştur. Bu modellerde talepler stokastik olarak gerçekleştirilmektedir ve araçlar tarafından kullanılabilir olan yol durumları senaryo bazlı olarak değişkenlik göstermektedir. Oluşturulan modeller, Hatay ilinin Defne ilçesinde afet sonrası yardım lojistiği alanında uygulamaya konulmuştur.

Abstract

Disaster management plays a critical role in minimizing destruction caused by disasters and is typically divided into three stages: preparedness, response, and recovery. Among these, post-disaster humanitarian aid logistics is essential for effectively addressing the immediate needs of affected populations. This process involves delivering accurate information, basic necessities, and critical equipment to the right people, at the right time and place. The logistics components of disaster management include taking precautions before the disaster, providing rapid emergency response, and ensuring long-term recovery. These phases form the foundation of humanitarian logistics, ensuring the timely, efficient, and cost-effective distribution of aid under varying conditions. In this study, mathematical models were developed to optimize post-disaster humanitarian logistics using a mixed-integer programming model, k-means clustering, and ant colony optimization for solving the vehicle routing problem. The models incorporate stochastic demand and scenario-based road accessibility to reflect realistic post-disaster conditions. The proposed approach was applied to the Defne district of Hatay province, a region affected by a recent disaster. The results aim to improve the delivery of humanitarian aid by enhancing route planning and distribution efficiency under uncertainty, contributing to more effective disaster response and recovery operations.

Anahtar Kelimeler Afet Lojistiği • Araç Rotalama • İnsani Yardım Lojistiği



Atıf | Citation: Baytürk, E., Turna, B., Saka, İ. & Kaya, A. (2025). Solution methods for vehicle routing problem with stochastic demand in post-disaster humanitarian logistics. *Journal of Transportation and Logistics*, 10(2), 222-235. <https://doi.org/10.26650/JTL.2025.1610468>

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

© 2025. Baytürk, E., Turna, B., Saka, İ. & Kaya, A.

✉ Sorumlu Yazar | Corresponding author: Engin Baytürk engin.bayturk@samsun.edu.tr



Keywords

Disaster logistics • Vehicle routing • Humanitarian logistics

Extended Summary

The negative economic, social, cultural, and psychological impacts of disasters occurring globally are on the rise. For this reason, disaster management is important in preventing the great destruction caused by disasters. Disaster management is divided into main stages as measures taken before, during and after the disaster. In particular, a significant plan made after a disaster is post-disaster humanitarian aid logistics. Humanitarian aid logistics is the process of delivering accurate information, essential supplies, and equipment required after a disaster to the appropriate location and people at the right time in order to address the needs of those affected by the disaster. In recent years, the importance of managing these operations effectively has become even more evident, especially considering the increasing number of climate-related and man-made disasters worldwide. In this regard, logistics processes have become more crucial in disaster management. The logistics processes of disaster management include the stages of pre-disaster preparation, immediate response, and recovery. Each stage requires careful coordination among various stakeholders such as government agencies, non-governmental organizations, local authorities, and international aid organizations. Reducing the negative effects caused by disasters can be achieved by carrying out the procedures in disaster management operations in an effective, systematic and coordinated approach. The integration of advanced technologies and data-driven decision-making tools into logistics operations has further improved the speed and accuracy of humanitarian response efforts. In this regard, logistics processes have become more crucial in disaster management. The logistics processes of disaster management include the stages of pre-disaster preparation, immediate response, and recovery. These stages that constitute the logistics processes in disaster management are the provision of medical supplies, equipment, food, clothing, shelter, water, blankets, etc. required for disaster victims. It has an effective role in delivering products such as logistics to the right people at the appropriate moment, in the correct place, proper quantity, under the true conditions and at the correct price, also known as the truths of logistics. Failing to deliver aid effectively not only delays relief efforts but may also lead to an increase in casualties, social unrest, and a decline in public trust in institutions. Due to all these important effects, in this study, mathematical models using a mixed integer mathematical model and k-means and ant-based colony optimization were created for the route optimization problem in order to provide humanitarian aid logistics correctly after a disaster. In these models, demands occur stochastically and the road conditions usable by vehicles vary based on the scenarios. Stochastic demand refers to the unpredictability of the needs that arise after a disaster, making it necessary for models to accommodate a range of possibilities. The created models were put into practice in the field of post-disaster aid logistics in the Defne district of Hatay province. In this study, a solution was proposed using two different mathematical models for the vehicle routing problem with stochastic demands and different road conditions in humanitarian aid logistics application structures. In the solution proposal, first, the coordinates and capacity information of the disaster assembly areas were obtained. Demand distributions under different demands were determined and the highest customer service levels that could be achieved according to vehicle capacities were determined. This step ensured that the supply network was designed to meet as many demands as possible under the constraints of available resources. At this service level, vehicle routes were determined with the mixed integer mathematical model and the total distance value was calculated with 1000 cycles over random requests and the result values were analyzed. In the second model, a capacity constraint was added specifically to the k-means algorithm and vehicle routings were solved with the ant colony algorithm. The k-means clustering algorithm helped group demand points efficiently while taking vehicle load limitations into account. The total distance value was calculated using 1000 cycles over random requests for the results of the model. This simulation-based evaluation approach enabled a comprehensive comparison between the two modeling techniques. The ant colony algorithm is a proposed model because it is known for sure that the solution performance of the mixed integer model will decrease when the information is large. The results of the mixed integer mathematical model suggest appropriate results in the field of application. For determining whether the proposed ant colony algorithm can give appropriate results in the case of a problem with large data, the results were compared in the application field. Consequently, it is anticipated that the ant colony algorithm will give appropriate results. This dual-model approach highlights the potential for combining traditional optimization with modern heuristic methods to create flexible and effective logistics solutions for disaster response.

Afet Sonrası İnsani Yardım Lojistiğinde Stokastik Talepli Araç Rotalama Problemi için Çözüm Yöntemleri

Afetleri önlemeyi, afetlerin neden olduğu zarar ve kayıpları en aza indirmeyi ve afet sonrası normal yaşama dönüş sağlamak için başarılı bir afet yönetim stratejisi uygulamak büyük önem taşımaktadır. Burada en kritik konulardan biri, afet lojistiği birimlerinin sorumluluğunda olan, ihtiyaç duyulan malzemelerin temini ve gerektiği yere ulaştırılmasıdır. Afet lojistiği, afet sonrası zarar gören kişilerin ihtiyaçlarını karşılayabilmek amacıyla, afet öncesinde etkin bir planlama ve bilgi sistemiyle gereken bilginin, temel gereksinimlerin ve ekipmanların gereken kişilere, gereken zamanda ve uygun yerde ulaştırılması sürecidir. (Şen ve Esmer, 2017). Son yıllarda hem Türkiye’de hem de Dünya genelinde oluşan afetlerin ekonomik, sosyal, kültürel ve psikolojik etkilerinin ciddi şekilde artış göstermesi, afet yönetiminin daha planlı ve etkili bir şekilde yürütülmesi gerekliliğini ortaya koymuştur. Bu doğrultuda lojistik süreçler afet yönetiminin vazgeçilmez bir parçası olmuştur. Afet lojistiği, hazırlık aşamasından başlayarak, afet anında müdahale ve afet sonrası iyileştirme süreçlerini kapsamaktadır. Bu süreçlerin amacı tıbbi malzemelerden gıdaya barınma gibi birçok temel gereksinimi doğru yer ve doğru zamanda uygun koşullar altında afetzedelere ulaştırmayı mümkün kılmaktır. Bu bağlamda lojistiğin doğruları olarak bilinen prensipler etkili bir şekilde uygulanarak ihtiyaç sahiplerinin ihtiyaçlarının karşılanmasında önemli bir rol oynar. (Ersoy ve Börühan, 2013). Afet lojistiği faaliyetleri genel olarak, ilk yardım malzemeleri, yiyecek, ekipman ve arama kurtarma ekiplerinin tedarik noktalarından afet bölgesindeki farklı ve geniş bir coğrafyaya yayılan destinasyon noktalarına ulaştırılmasını içermektedir. Bunun yanı sıra, afet zedeler in güvenli bir şekilde afet bölgesinden tahliye edilmesi ve en hızlı biçimde sağlık merkezlerine transferlerinin sağlanmasını da içermektedir. (Barbarosoğlu vd., 2002). Kovacs ve Spens (2012) afet lojistiğinin üç ana aşamadan oluştuğunu belirtmektedir. Afet öncesi hazırlık, afet sırasında müdahale ve afet sonrası iyileştirme. Tüm bu aşamalarda lojistik destek faaliyetlerinin kesintisiz ve sorunsuz olarak sürdürülmesi kritik bir öneme sahiptir. Özellikle afetin hemen sonrasında ve iyileştirme sürecinde insani yardım malzemelerinin hızlı ve doğru bir şekilde ulaştırılması, bu malzemelerin etkin dağıtımının yapılması afetzedelere yanında olduğumuzu hissettirip moral desteği sağlamasında afet lojistiği kapsamında kurulacak dağıtım merkezlerinin doğru lokasyonlarda konumlandırılması faaliyetlerin etkinliği açısından belirleyici rol üstlenmektedir. Afet lojistiğinin veya insani yardım lojistiğinin tüm bu önemli sebepleri dolayısıyla, literatürde bu konuda yapılmış birçok çalışmaya rastlamak mümkündür. Tablo 1, afet sonrası insani yardım lojistiği alanında yapılmış olan çalışmaları içermektedir.

Tablo 1

Afet Sonrası İnsani Yardım Lojistiği Literatür Taraması (Soyöz ve Özyörük, 2021)

Yazar	Yöntem	Amaç	Rassallık
Barbarosoğlu ve Arda (2004)	İki aşamalı stokastik programlama	Toplam maliyetinin en küçükleme	Stokastik
Özdamar ve diğ. (2004)	Lagrange gevşeme tabanlı algoritma, Açgözlü sezgisel	Zaman içinde karşılanamayan talep miktarının en küçükleme	Stokastik
Massaguer ve diğ. (2006)	Çok aşamalı benzetim	Tahliye süresinin en küçükleme	Stokastik
Lee ve diğ. (2009)	Kesikli Olay Benzetimi	Yardım malzemelerinin en uygun şekilde dağıtım	Stokastik
AblanedoRosas ve diğ. (2009)	Küme Örgütlenme Modeli	Belediyeler ve acil durum merkezleri arasındaki seyahat mesafelerinin en küçükleme	Deterministik

Yazar	Yöntem	Amaç	Rassallık
Lu ve diğ. (2009)	Maksimum Kapsama Modeli, Karınca Koloni Algoritması	Farklı kalite seviyelerinde yeterli miktarda tesisin karşıladığı taleplerin en büyükleme	Deterministik
Huang ve diğ. 2010	P-Merkez Modeli	Bir düğüm ve mevcut en yakın tesisi arasındaki maksimum ağırlıklı mesafenin en küçükleme	Stokastik
Günneç ve Salman (2011)	Polinom zaman algoritması, monte-carlo benzetim algoritması.	Afet riski altında bir ağıın beklenen performansı ve güvenilirliğini değerlendirmek	Stokastik
Vitoriano ve diğ. (2011)	Hedef programlama	Nitelik maliyetlerinin en küçükleme	Deterministik
Verma ve Gaukler (2011)	İki aşamalı stokastik programlama	Tesis ve talep noktaları arasında mesafenin en küçükleme	Stokastik
Lu (2013)	P-Merkez Modeli	Maksimum tepki süresinin en küçükleme	Stokastik
Garrido ve diğ. (2015)	Stokastik programlama, Örnek ortalama yaklaşım sezgiseli, karma tam sayılı programlama	Toplam taşıma, ulaştırma maliyetlerinin en küçükleme	Stokastik
Hu ve diğ. (2017)	Stokastik Programlama	Beklenen toplam stok, ulaşım ve tedarik maliyetlerinin en küçükleme	Stokastik
Babaei ve Shahanaghi (2017)	Karma tam sayılı programlama, Duyarlılık analizi, NSGA 2	Maliyet en küçükleme, karşılanan talebin en büyükleme	Stokastik
Manopiniwes ve Irohara (2017)	Karma tam sayılı Programlama	Toplam ağ maliyetinin ve tepki süresinin en küçükleme	Stokastik
Jha ve diğ. (2017)	Karma tam sayılı programlama, NSGA 3	Kampların kurulumu, tedarik, ulaşım ve konaklama maliyetlerinin en küçükleme	Stokastik
Safaei ve diğ. (2018)	Hedef Programlama	Toplam operasyonel maliyetin ve karşılanmamış talep miktarının en küçükleme	Stokastik
Torabi ve diğ (2018)	Stokastik programlama, duyarlılık analizi	Tedarikçilerle yapılan anlaşmalar, stok yönetimi, tedarik ve dağıtım faaliyetleri ile karşılanmayan taleplerin maliyetlerinin en küçükleme	Stokastik
Li ve diğ 2018	Doğrusal olmayan programlama	Beklenen kaplamanın en büyükleme	Stokastik

İnsani yardım lojistiğinde stokastik ve deterministik yaklaşımları ele alan çeşitli çalışmalar, farklı optimizasyon yöntemleri kullanarak afet sonrası yardım süreçlerini iyileştirmeyi amaçlamaktadır. Barbarosoğlu ve Arda (2004), iki aşamalı stokastik programlama yöntemiyle toplam maliyetin en küçüklemesini hedeflemiş, belirsiz talepler karşısında daha esnek bir planlama sağlamıştır. Benzer şekilde, Özdamar ve arkadaşları (2004), Lagrange gevşeme tabanlı algoritma ve ağızlı sezgisel yöntemleri kullanarak, zaman içinde karşılanamayan talep miktarını en aza indirmeye yönelik bir model geliştirmiştir. Garrido ve arkadaşları (2015), stokastik programlama ve örnek ortalama yaklaşımı ile toplam taşıma ve ulaştırma maliyetlerini en aza indirmeyi hedeflemiş, Hu ve arkadaşları (2017) ise stokastik programlama yöntemiyle beklenen toplam stok, ulaşım ve tedarik maliyetlerini en küçükleme odaklanmıştır. Deterministik yaklaşımlar arasında, Ablanado-Rosas ve arkadaşları (2009) Küme Örgütlenme Modeli ile belediyeler ve acil durum

merkezleri arasındaki seyahat mesafelerini en küçükleme çalışırken, Lu ve arkadaşları (2009), Maksimum Kapsama Modeli ve Karınca Koloni Algoritması kullanarak tesislerin farklı kalite seviyelerinde yeterli talepleri karşılamasını amaçlamıştır. Bu çalışmalar, afet sonrası kaynak tahsisi ve lojistik planlamada belirsizliklerin dikkate alınmasının önemini vurgulamaktadır.

6 Şubat 2023'te kaynak noktası Kahramanmaraş'ın Pazarcık ve Elbistan ilçelerinde sırasıyla Mw7.7 ve Mw7.6 büyüklüğünde iki deprem gerçekleşmiştir. Bu depremler 11 ilde oldukça fazla tahribata neden olmuştur. Ayrıca şiddetleri ve etkilediği alanlar açısından değerlendirildiğinde, yakın geçmişte benzeri görülmemiş felaketlerdir. Yaşanan depremler sonucunda 48 binden fazla insan yaşamını yitirmiş, 500 binde yakın bina hasar almış, iletişim ve enerji altyapısı tahrip olmuş ve önemli ekonomi kayıplar meydana gelmiştir. Depremden etkilenen 11 ilin nüfusu, 2022 yılında toplam 14.013.196 kişi olarak kayda alınmıştır. (Kahramanmaraş ve Hatay depremleri raporu, 2023). Ülkemizde yaşanan büyük afetlere en güncel örnek olarak verilebilecek bu deprem felaketlerinde, afet sonrası insani yardım lojistiğinin mutlak önemi bir kez daha anlaşılmıştır. Bu nedenle, bu çalışmada, afet merkezlerinden çadırkentlere taşınacak olan malzemelerin araç rotalama yapılarak, en hızlı şekilde ürünlerin teslim edilmesini sağlayacaktır. Literatürde yapılan çalışmalarda yer seçimi problem çözümleri ve araç rotalama problemlerine çözümler getiren yaklaşımlar olarak ana başlıklar altında toplanabilir. Bu çalışmada, öncelikle araç kapasitelerine göre müşteri hizmet düzeyi hesaplanarak, çadırkentlerde oluşan taleplerin bu hizmet düzeyindeki talep değerleri hesaplanmıştır. Bu hizmet düzeyinde gerçekleşen taleplerin karma tam sayılı matematiksel modele aktarımı sağlanmıştır. Araç rotalama probleminin çözümü için karma tam sayılı matematiksel model, GAMS yazılımında çözülmüştür. Uygulama aşamasında, araçların geçebileceği yollar üzerinde iki adet senaryo üzerinde durulmuştur. İlk senaryoda, tüm yolların araçların kullanımına uygun olduğu durumlar ele alınmıştır. İkinci senaryoda ise, 6 Şubat depreminde etkilenen yolların modelden çıkarıldığı ve yol durumunun kötü olarak etiketlendiği durumda yeni rotalar elde edilerek hesaplamalar yapılmıştır. Karma tam sayılı matematiksel model ile araç rotalarına karar verilmiştir. MATLAB programında ise, stokastik talep altında önerilen araç rotalama modelinin rasgele talepler gerçekleştiğinde ortaya çıkardığı en küçük, ortalama ve en büyük değerler 1000 adet çevrim ile hesaplanmıştır. Ayrıca, verinin büyük olması durumunda, matematiksel modelin performansının düşeceği bilindiğinden, bu durumda k-ortalamlar ve karınca kolonisi algoritmasının kullanıldığı meta-sezgisel yöntem ile benzer hesaplamalar yapılmıştır.

Stokastik taleplerin bulunduğu, yol durumlarının farklı senaryolar altında incelendiği, hem karma tam sayılı matematiksel model hem de meta-sezgisel algoritma ile çözüm önerisinde bulunduğu ve gerçek bir uygulama alanında gerçekleştirilmesi çalışmanın özgün yönünü oluşturmaktadır.

Çalışmanın ikinci kısmında, karma tam sayılı matematiksel modelin ve meta-sezgisel algoritmanın açıklandığı yöntem bölümü, üçüncü kısmında ise yöntem ile elde edilen bulgular yer almaktadır. Dördüncü kısımda ise tartışma ve sonuçlar bölümü yer almaktadır.

Yöntem

Karma tam sayılı matematiksel modeldeki talep değerlerini belirlemek adına öncelikle, taleplerin dağılımı testlerinin yapılması ve dağılım testlerinin uygunluk sonuçlarına göre araç kapasitelerini aşmayan müşteri hizmet düzeyinin hesaplanması sağlanmıştır. Ardından hesaplanan müşteri hizmet düzeyine göre müşteri taleplerinin değerleri karma tam sayılı matematiksel modele aktarılmıştır. Oluşturulan karma tam sayılı matematiksel model GAMS programında uygulanmış ve sonuçlar elde edilmiştir. İlk modelde elde edilen araç rotalama sonuçlarının stokastik taleplerin gerçekleşmesi ile afet durumunda yaşanabilecek belirsizlikleri hesaba katan stokastik bir modelle toplam taşıma mesafesi hesaplanmıştır. Her bir döngüde farklı müşteri talepleri belirli bir olasılık dağılımı ile geleceği ve her bir döngüde farklı bir toplam kat edilen mesafe bulunacağı için MATLAB programını kullanarak rotalar 1000 kez hesaplanarak en küçük, ortalama

ve en büyük değerler bulunmuştur. Sezgisel algoritma, daha geniş bir uygulama alanında çalışılması gerektiğinde ve veri boyutunun büyük olduğu durumlarda karma tam sayılı matematiksel modelin uygun sonuçlar veremediği durumda hızlı ve optimum değere yakın sonuçlar verebilecek bir model olarak oluşturulmuştur. Tüm modeller yol durumlarının iyi ve kötü olduğu senaryolar ile denenmiştir. Yolların iyi olduğu senaryo, tüm yolların araç trafiğine açık olduğu senaryo iken, yolların kapalı olduğu senaryo, 6 Şubat depreminde zarar gören ve araçların geçmesini engelleyen yolların baz alındığı duruma göre oluşturulmuş senaryodur.

Karma Tam Sayılı Matematiksel Model

Kapasite kısıtlı araç rotalama probleminde tüm araçlar için belirlenmiş kapasite vardır. Araç kapasiteleri eşittir. Araçlar hareketlerine depodan başlamaktadır ve depoya dönerek rotalarını sonlandırmaktadır. Amaç, talepleri stokastik olan ürünler için toplam taşıma mesafesinin en aza indirilmesidir. Müşteri taleplerinin stokastik doğası nedeniyle, yalnızca ortalama talep değeri kullanılarak yapılan planlamalar, araç kapasitesinin aşılmasına ve ek geri dönüşlerin gerekliliğine yol açabilir. Ortalama talep durumunda, taleplerin %50 olasılıkla ortalamanın üzerinde gerçekleşmesi mümkündür ve bu, araçların depoya dönerek ek yükleme yapmasını gerektirir, dolayısıyla operasyonel maliyetleri ve toplam seyahat süresini artırır. Bu riski en küçükmek için, matematiksel modelde probleme özgün, her müşteri için %90 birikimli talep değeri (b_i) kullanılarak kapasiteyi aşmayan en yüksek talep seviyesi belirlenmiştir. Böylece, stokastik taleplerin değişkenliği dikkate alınarak daha güvenilir bir rotalama planı oluşturulmuştur. Karma tam sayılı matematiksel model, kapasiteli araç rotalama problemi için Laporte (1992), Toth ve Vigo (2014) çalışmalarındaki gibi klasik bir doğrusal programlama modeli kullanmaktadır. Model, araç kapasite kısıtları altında her müşterinin yalnızca bir kez ziyaret edilmesini sağlarken, alt turların önlenmesi için başlangıçta Gezgin Satıcı Problemi için önerilen Miller-Tucker-Zemlin (MTZ) kısıtlarını (Miller et al., 1960) kapasiteli araç rotalama problemine uyarlayan çalışmaların yaklaşımını takip etmektedir (Desrochers ve diğ., 1992).

Kapasite kısıtlı araç rotalama problemine ait kullanılan indisler Tablo 2’de, parametreler Tablo 3’te yer almaktadır.

Tablo 2

Karma tam sayılı matematiksel modelin indisleri

İndisler	Açıklama
i ve j	Afet bölgesi çiftleri
K	Araç kümesi

Tablo 3

Karma tam sayılı matematiksel modelin parametreleri

Parametreler	Açıklama
a_k	K aracının kapasitesi
w_i	i afet bölgesinin bir yıllık talep miktarı
d_{ij}	i afet bölgesi ile j afet bölgesi arasındaki mesafe
M	Taşıma araçlarının sayısı
b_i	i afet bölgesinin talebinin %90 birikimli değeri

$$X_{i,j,k} = \begin{cases} 1 & k \text{ doğrudan } i \text{ afet bölgesinden } j \text{ afet bölgesine giderse} \\ 0 & \text{diğer durumda} \end{cases}$$

$$Y_{i,k} = \begin{cases} 1 & k \text{ aracının } i \text{ afet bölgesine hizmet vermesi} \\ 0 & \text{diğer durumda} \end{cases}$$

$u_{i,k}$: k aracının i afet bölgesine kadar taşıdığı yük miktarı

$$\min \sum_k \sum_i \sum_j d_{i,j} x_{i,j,k} \quad (1)$$

$$\sum_i \sum_k x_{i,j,k} = 1, \quad \forall_j \quad (2)$$

$$\sum_i x_{i,p,k} - \sum_i x_{p,j,k}, \quad \forall_{k,p} \quad (3)$$

$$\sum_{i,j} b_i x_{i,j,k} \leq a_k, \quad \forall_k \quad (4)$$

$$u_{i,k} - u_{j,k} + a_k x_{i,j,k} \leq a_k - b_j \quad (5)$$

$$\sum_j x_{0,j,k} = 1, \quad \forall_k \quad (6)$$

$$\sum_i x_{i,0,k} = 1, \quad \forall_k \quad (7)$$

$$x_{i,i,k} = 0, \quad \forall_{i,k} \quad (8)$$

$$u_{ik} \geq 0, \quad \forall_{i,k} \quad (9)$$

Eşitlik (1), tüm araçların aldığı yolun toplam mesafeni en küçükleme için kullanılan amaç fonksiyonudur. Eşitlik (2), bir afet toplanma alanının yalnızca bir tesis ve araçtan hizmet almasını sağlamaktadır. Eşitlik (3), bir tesisten çıkan araçların sayısının, o tesise varan araçların sayısına eşit olması gerektiğini ifade etmektedir. Eşitlik (4), her bir aracın toplam taşıma kapasitesinin, belirlenen maksimum taşıma kapasitesini aşmamasını sağlamaktadır. Eşitlik (5), alt tur oluşumunu engellemek için kullanılmaktadır. Alt tur; araçların belirlenmiş rotaları takip etmediği, yani belirli bir dönüş noktasına gelmeden veya belirli bir hedefe ulaşmadan önce döngü oluşturduğu durumlardır. Eşitlik (6), depodan çıkan her bir aracın mutlaka bir afet toplanma alanına gitmesini sağlamaktadır. Eşitlik (7), bir aracın afet toplanma bölgesine hizmet ettikten sonra mutlaka bir başka bölgeye veya depoya dönmesi gerektiğini ifade eder. Eşitlik (8), herhangi bir aracın bir alanı ziyaret ettikten sonra aynı alana bir sonraki adımda dönmesini önlemek için kullanılmaktadır.

K-Ortalamlar Algoritması

K-Ortalamlar algoritması, verilen verileri k sayıda küme altında gruplayan bir kümeleme yöntemidir. Bu algoritma, her veri noktasını en yakın küme merkezine atayarak, her küme için merkezi yeniden hesaplayarak ve bu adımları iteratif şekilde tekrarlayarak çalışır. İlk olarak, k küme merkezi rastgele seçilir ve her veri noktası, Öklid mesafesi gibi bir mesafe ölçütü kullanılarak en yakın merkeze atanır. Ardından, her küme için yeni bir merkez hesaplanır ve bu adımlar, küme merkezleri değişmediği sürece devam eder. Bu yöntem, Öklid mesafesinin en küçüklenmesini hedefleyerek veri kümesindeki yapıyı ortaya çıkarır. Ancak, küme sayısının önceden belirlenmesi ve yerel minimuma takılma gibi zorluklar, algoritmanın performansını etkileyebilir (Lloyd, 1982). Çalışmada kapasitenin eklendiği k-ortalamlar algoritmasının çalışmasına dair örnek aşağıdaki gibi açıklanabilir. 6 müşteri ve 2 kümenin olduğu durumda, toplanma alanlarının X, Y koordinatları ve talepleri aşağıdaki gibi ise;

Tablo 4

K-Ortalamlar örneği toplanma alanı verileri.

Toplanma Alanı	X Koordinatı	Y Koordinatı	Talep Değeri
M1	2	3	4
M2	3	5	5
M3	6	2	6
M4	7	8	7

Toplanma Alanı	X Koordinatı	Y Koordinatı	Talep Değeri
M5	5	6	4
M6	8	4	5

Ayrıca kümelerin kapasiteleri şu şekilde ise;

- Küme 1: Kapasite 16, Küme 2: Kapasite 16

Adımlar:

1. **Başlangıç:** K-Ortalamlar algoritması, rastgele 2 küme merkezi seçer. Örneğin, **Küme 1**'in merkezi **(2, 3)** ve **Küme 2**'nin merkezi **(7, 8)** olabilir.
2. **Atama:** Müşteriler en yakın kümeye atanır. Örneğin, **M1, M2, M3, ve M5** Küme 1'e, **M4 ve M6** Küme 2'ye atanır.
3. **Kapasite Kontrolü:**
 - **Küme 1'in kapasitesi:** M1 (4), M2 (5), M3 (6), M5 (4) → Toplam 19 (Kapasite aşıldı)
 - Küme 1 kapasitesi aşılsa, kalan müşteriler en yakın kümeye atanır. **M5 Küme 2'ye** atanır, çünkü **Küme 2**'nin kapasitesi dolmamış olur.

4. **Yeni Küme Merkezi Hesaplama:** Her küme için ortalama merkez hesaplanır ve yeni merkezler güncellenir.

Bu şekilde, her küme kapasitesine ulaştığında, kalan müşteriler en yakın kümeye atanır. K-Ortalamlar algoritması, kümeleri müşteri talepleriyle eşleştirirken kapasite kısıtlarını göz önünde bulundurur.

Karınca Kolonisi Algoritması

Karıncaların beslenme davranışlarından yola çıkılarak oluşturulan yöntem karınca kolonisi algoritması adı verilir. Karıncalar, feromon adı verilen kimyasal bir madde aracılığıyla iletişim kurar. Karınca, geçtiği yola sabit miktarda feromon bırakarak arkasından gelecek olan diğer karıncaların o feromonu takip etmeleriyle karar verme sürecini kolaylaştırır. Arkadaki karıncalarda önündeki karıncayı takip edip önceki karıncanın bıraktığı feromon etkisiyle, önündeki karıncanın izinden giderek o yolun seçilme ihtimalini güçlendirecek veya farklı bir rotasyon takip edecektir. Bu nedenle, bir yoldan geçen karınca sayısı arttıkça o yol, arkadan gelen karıncalar için daha ilgi çekici olacaktır. Ayrıca, bir karınca yiyeceğe ulaşmak için kısa yolu takip ederse yuvaya diğer karıncalardan erken dönecektir. Bu durum diğer karıncaların yeni yola yönelmesini sağlayarak yoldaki feromon miktarını da arttıracaktır. Zamanla, uzun yoldaki feromon yoğunluğu buharlaşarak azalacak, bu da yolun cazibesini kaybederek daha az tercih edilmesine sebep olacaktır. Karıncaların bu bireysel davranışları sayesinde koloninin daha iyi alternatif keşfetmesini sağlamak ve yol boyunca karşılarına çıkan engelleri başarılı bir şekilde aşip optimum mesafede seyahati tamamlayacaktır (Bell ve McMullen, 2004).

Afet yönetimi kapsamında Defne ilçesine uygulanan karınca kolonisi algoritmasının adımları aşağıdaki gibidir:

Adım 1: Alanların koordinatlarını modele aktar, alanların ortalama taleplerini ve taleplerin dağılımlarını kullanarak müşteri hizmet düzeyinin %90 olduğu durumda elde edilen talepleri hesapla.

Adım 2: Maksimum iterasyon sayısı (100), karınca sayısı (150), başlangıç feromonu, feromon ağırlığı (alfa=1), buharlaşma oranı (ro=0,05) ve üstel ağırlık (beta=1) gibi karınca kolonisi optimizasyonu algoritması için başlangıç parametrelerini tanımla.

Adım 3: Müşterileri araçlara kapasite kısıtlı k-ortalamlar yöntemi kullanarak ata. Bahsi geçen k-ortalamlar modeli şu şekilde açıklanabilir.

Adım 3.1: Başlangıçta, müşteri koordinatlarına göre k-ortalamlar ile kümeleme gerçekleştirilir.

Adım 3.2: Talep noktalarını istenen sayıda kümeye gruplandırır ve merkez noktalarını hesaplar.

Adım 3.3: Ardından, her kümedeki müşterilerin toplam talebinin belirtilen kapasiteyi aşıp aşmadığını kontrol eder. Herhangi bir küme aşırı kapasiteye sahipse, fonksiyon müşterileri bu kümeden, kapasite kısıtlamasını ihlal etmeden ek talebin karşılanabileceği diğerlerine yinelemeli olarak yeniden atar.

Adım 3.4: Bu işlem sırasında, etkilenen kümelerin toplam talebi dinamik olarak güncellenir. Bu yeniden atama, tüm kümeler kapasite kısıtlamasını karşılayana veya sonsuz döngüleri önlemek için maksimum 100 yinelemeye ulaşılan kadar devam eder.

Adım 3.5: Son olarak, yeniden atamadan sonra, kümelerin merkez noktaları revize edilmiş müşteri atamalarına göre güncellenir. Son küme atamalarını ve güncellenmiş merkez noktalarını çıktı olarak verir.

Adım 4: Karıncaların tamamı hedef noktaya ulaşmadığı taktirde aşağıdaki adımı tekrarla.

Adım 4.1: Olasılık dağılımını kullanarak çözüm oluştur.

Adım 4.2: Yerel feromonları en kısa yol doğrultusunda revize et.

Adım 5: Sona erme şartları karşılanmıyorsa Adım 4'e dön.

Adım 6: En uygun yolun uzunluğunu hesapla ve sadece en uygun yolun feromon düzeyini revize et.

Adım 7: En fazla düzeyde feromon içeren çözümü göster.

Araç Rotalama Sonuçlarının Stokastik Taleplerle Hesaplanması

Afet bölgesindeki toplanma alanlarında kalan insanların taleplerinin kesikli olasılık dağılımına uygunluk gösterdiği durumda, her bir toplanma alanı için belirli bir ortalama üzerinden rasgele sayılar talep olarak üretilmiştir. Her bir döngüde bir rasgele talep değerleri dağılıma uygun olarak değişmektedir.

Karma tam sayılı matematiksel modelde ve karınca kolonisi algoritmasında her bir araca ait rotalar %90 müşteri hizmet düzeyi için oluşturulmuştur. Bu müşteri hizmet düzeyinde gerçekleşen talep her bir döngüde bu olasılık dağılımının özellikleri ile değişecektir. Dolayısıyla, bu rotalarda değişken talepler nedeniyle araçların bazı alanlara ulaştığında kapasiteleri aşılmaktadır. Bu durumda, araçlar depoya geri dönerek ikmal yapıp o alana tekrar dönerek rotayı devam ettirmektedir. Bu da kat edilen toplam mesafeyi arttırmaktadır.

Bu modelde her bir döngüde her bir toplanma alanı için rasgele talepler üreterek karma tam sayılı matematiksel modelde ve karınca kolonisi algoritmasında önerilen rotalar üzerinden toplam taşıma mesafesi hesaplanmaktadır. Rotalar, MATLAB programında 1000 kez hesaplanmış ve en küçük, ortalama ve en büyük değerler bulunmuştur. Bu modeldeki adımlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

Adım 1: Müşterilerin koordinatlarını, müşterilerin ortalama taleplerini ve taleplerin dağılımlarını, matematiksel modellerdeki müşteri hizmet düzeyinin %90 olduğu durumda elde edilen; müşterilerin araçlara atanması, her bir aracın ziyaret edeceği müşterilerin sırası bilgilerini modele aktar.

Adım 2: Müşteri taleplerinin dağılımlarını kullanarak her bir müşteri için rasgele bir talep üret.

Adım 3: Her bir araç matematiksel modellerde verilen araç rotaları ve rasgele üretilen talep değerleri ile müşteri hizmetini sağla. Her bir aracın hizmet ettiği her toplanma alanı için araç rotasına, müşterinin talebine ve aracın kapasitesine göre kapasite aşımını kontrol et.

Adım 4: Eğer herhangi bir araç bir toplanma alanı ziyaretinde talep değişkenliği sebebiyle kapasite aşımına uğrarsa, o alandan depoya gitmesini sağla. Depo sonrası aynı alana eksik kalan ürünleri teslim etmesini sağla ve sonrasında rotada kalan alanların tamamlaması ile depoya dönmelerini sağla.

Adım 5: Her bir araç ve onun hizmet ettiği her bir alan için adım 3 ve 4'ü tüm alanlar hizmet alana kadar tekrarla.

Adım 6: Adım 5 tamamlandığında, 1000 adet adım 5 tamamlanana kadar işlemlere devam et.

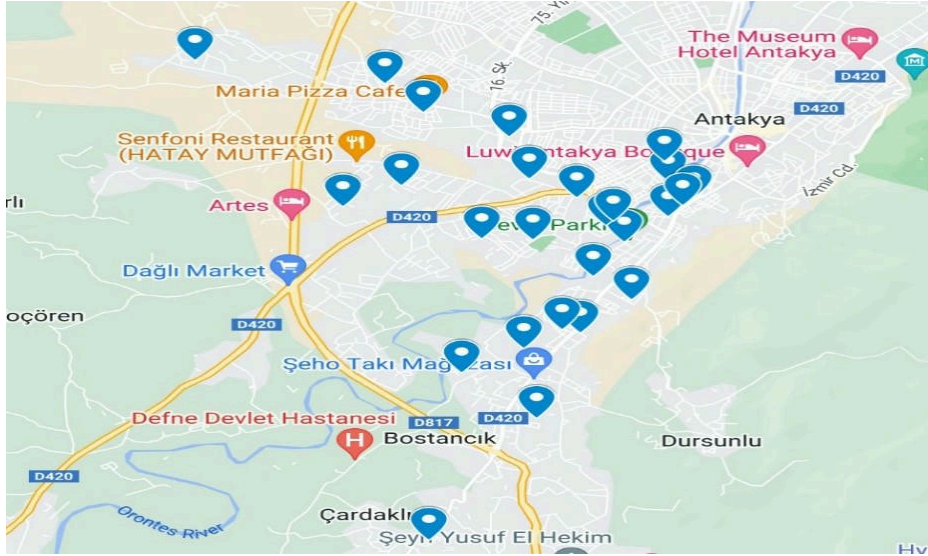
Adım 7: 1000 adet adım 5 tamamlandığında, gerçekleşen en küçük, ortalama ve en büyük kat edilen mesafeleri hesapla.

Bulgular

6 Şubat 2023' te odak noktası Kahramanmaraş olan depremde etkilenen şehirlerden biri olan Hatay ilinin Defne ilçesi bölge seçilerek veriler toplanmıştır.

Şekil 1

Defne ilçesindeki toplanma alanları.



Yol durumunun iyi olduğu koşullarda Model I'in önerdiği araç rotaları Tablo 5'te yer almaktadır.

Tablo 5

Yol durumunun iyi olduğu koşullarda karma tam sayılı matematiksel modelin sonuçları.

Araç 1	Depo	2	4	18	25	24	12	Depo
Araç 2	Depo	13	27	21	15	9	23	Depo
Araç 3	Depo	6	20	1	22	14		Depo
Araç 4	Depo	19	17	11	26	5		Depo
Araç 5	Depo	16	10	7	8	3		Depo

Tablo 6

Yol durumunun iyi olduğu durumda önerilen modellerin toplam taşıma mesafeleri.

	Minimum	Ortalama	Maksimum
Karma Tam Sayılı Matematiksel Model	246,0259	258,9627	307,7964
Karınca Kolonisi Algoritması	247,0599	264,9995	315,3178

Tablo 7

Yol durumunun kötü olduğu karma tam sayılı matematiksel modelin sonuçları.

Araç 1	Depo	22	1	7	15	21	10	Depo
Araç 2	Depo	16	25	24	20	23		Depo
Araç 3	Depo	5	3	6	19	18		Depo
Araç 4	Depo	12	27	9	8	4		Depo
Araç 5	Depo	2	11	17	26	13	14	Depo

Yol durumu kötü olduğu durumda Model II'nin sonuçları Tablo 8'de yer almaktadır.

Tablo 8

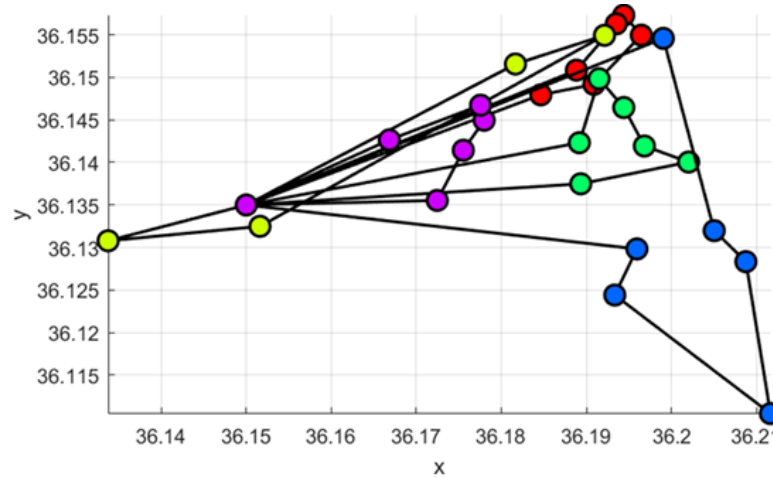
Yol durumunun kötü olduğu koşullarda önerilen modellerin toplam taşıma mesafeleri.

	En küçük	Ortalama	En büyük
Karma Tam Sayılı Matematiksel Model	258,2779	270,0367	318,0956
Karınca Kolonisi Algoritması	264,0640	276.6737	329,1301

Toplanma alanlarının ve bu alanlara hizmet eden araçların rotalarının bulunduğu görsel, Şekil 2'de gösterilmektedir. Buradaki grafikte bulunan x ve y eksenleri toplanma alanlarının koordinatlarını, farklı renkler ise her bir farklı aracın rotalarını simgelemektedir.

Şekil 2

Model III araç rotalama sonuçları MATLAB örneği.



Bu çalışmada, kapasite kısıtlı araç rotalama problemi, ilk yardım lojistiği kapsamında toplanma alanlarında stokastik talep durumları için ele alınmış ve iki farklı model geliştirilmiştir. İlk modelde, karma tam sayılı matematiksel programlama ile araç rotaları belirlenmiş; ikinci modelde ise k-ortalamalar algoritmasına kapasite kısıtı eklenerek karınca kolonisi algoritması kullanılmıştır. Her iki yöntem de benzer sonuçlar üretmiş olup, büyük veri içeren problemlerde karma tam sayılı modelin çözüm süresinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu durumda, karınca kolonisi algoritmasının daha uygun bir alternatif olabileceği değerlendirilmiştir.

Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, stokastik taleplerin ve farklı yol koşullarının olduğu araç rotalama problemine insani yardım lojistiği uygulaması yapılarak iki farklı matematiksel model ile çözüm önerisi geliştirilmiştir. Uygulama alanı olarak Hatay'ın Defne ilçesi seçilmiştir. Çözüm önerisinde, ilk olarak afet toplanma bölgelerinin koordinatları, kapasite bilgileri alınmıştır. Farklı talepler altında talep dağılımları belirlenerek, araç kapasitelerine göre ulaşılabilecek en yüksek müşteri hizmet düzeyleri belirlenmiştir. Bu hizmet düzeyinde, karma tam sayılı matematiksel model ile araç rotaları tespit edilmiş ve rasgele talepler üzerinden toplam mesafe değeri 1000 adet döngü ile hesaplanarak sonuç değerleri analiz edilmiştir. İkinci modelde ise, k-ortalamalar algoritmasına özel olarak kapasite kısıtı eklenmiş ve araç rotalamaları karınca kolonisi algoritması ile çözümlenmiştir. Modelin sonuçlara rasgele talepler üzerinden toplam mesafe değeri 1000 adet döngü ile hesaplanmıştır. Karınca kolonisi algoritması, verilerin büyük olduğu durumda karma tam sayılı modelin çözüm performansının düşeceği kesin olarak bilindiği için önerilmiş bir modeldir. Uygulama yapılan alanda karma tam sayılı matematiksel modelin sonuçları uygun sonuçlar önermektedir. Büyük verilerin

olduğu problemin olduğu durumda önerilen karınca kolonisi algoritması uygun şekilde sonuç verebileceğini tespit edebilmek adına uygulama alanında sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, karınca kolonisi algoritmasının uygun sonuçlar verebileceği ön görülmektedir.

İleriki çalışmalarda, önerilen matematiksel modelin parçacık sürü optimizasyonu, genetik algoritma gibi meta-sezgisel yöntemlerle denenerek karşılaştırmalar yapılabilir. Karınca kolonisi optimizasyonunda kullanılan başlangıç parametrelerinin değiştiği durumlardaki sonuçlar değerlendirilerek parametre analizi yapılabilir. Özel olarak uygulanan kapasite aşımının engelleyen k-ortalamlar algoritması yerine daha uygun sonuçlar verebilecek atama yöntemleri denenebilir.



Hakem Değerlendirmesi	Dış bağımsız.
Yazar Katkısı	Çalışmanın Konsepti/Tasarımı: E.B., B.T., İ.S., A.K.; Veri Toplama- E.B., B.T., İ.S., A.K.; Verilerin Analizi/ Yorumlanması- E.B., B.T., İ.S., A.K.; Yazı Taslağı: E.B., B.T., İ.S., A.K.; İçeriğin Eleştirel İncelemesi – E.B., B.T., İ.S., A.K.; Son Onay ve Sorumluluk E.B., B.T., İ.S., A.K.
Çıkar Çatışması	Yazarlar çıkar çatışması beyan etmemiştir.
Finansal Destek	Yazarlar finansal destek beyan etmemiştir.

Peer Review	Externally peer-reviewed.
Author Contributions	Conception/Design of Study- E.B., B.T., İ.S., A.K.; Data Acquisition- E.B., B.T., İ.S., A.K.; Data Analysis/ Interpretation- E.B., B.T., İ.S., A.K.; Drafting Manuscript- E.B., B.T., İ.S., A.K.; Critical Revision of Manuscript - E.B., B.T., İ.S., A.K.; Final Approval and Accountability- E.B., B.T., İ.S., A.K.
Conflict of Interest	Authors declared no conflict of interest.
Grant Support	Authors declared no financial support.

Yazar Bilgileri	Engin Baytürk (Assist. Prof. Dr.)
Author Details	¹ Samsun University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Industrial Engineering, Samsun, Türkiye  0000-0001-9860-1581  engin.bayturk@samsun.edu.tr

Beyzanur Turna

¹ Samsun University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Industrial Engineering, Samsun, Türkiye
 0009-0000-4943-1854  211104002@samsun.edu.tr

İrem Saka

¹ Samsun University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Industrial Engineering, Samsun, Türkiye
 0009-0006-3145-2626  221104028@samsun.edu.tr

Aysuma Kaya

¹ Samsun University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Industrial Engineering, Samsun, Türkiye
 0009-0003-3396-4156  211104038@samsun.edu.tr

Kaynakça | References

- Ablanedo-Rosas, J. H., Gao, H., Alidaee, B., & Teng, W. Y. (2009). Allocation of emergency and recovery centres in Hidalgo, Mexico. *International Journal of Services Sciences*, 2(2), 206-218. doi:<https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2009.024941>
- Ablanedo-Rosas, J. H., Gao, H., Alidaee, B., & Teng, W. Y. (2009). Allocation of emergency and recovery centres in Hidalgo, Mexico. *International Journal of Services Sciences*, 2(2), 206-218. <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2009.024941>



- Ağdaş, M., Bali, Ö., & Ballı, H. (2014). Afet lojistiği kapsamında dağıtım merkezi için yer seçimi: SMAA-2 tekniği ile bir uygulama. *Beykoz Akademi Dergisi*, 2(1), 75–95.
- Babaei, A., & Shahanaghi, K. (2017). A new model for planning the distributed facility locations under emergency conditions and uncertainty space in relief logistics. *Uncertain Supply Chain Management*, 5, 105–125. <https://doi.org/10.5267/j.uscm.2016.10.004>
- Barbarosoğlu, G., & Arda, Y. (2004). A two-stage stochastic programming framework for transportation planning in disaster response. *Journal of the Operational Research Society*, 55, 43–53. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601652>
- Barbarosoğlu, G., Özdamar, L., & Çevik, A. (2002). An interactive approach for hierarchical analysis of helicopter logistics in disaster relief operations. *European Journal of Operational Research*, 140(1), 118–133.
- Bell, J. E., & McMullen, P. R. (2004). Ant colony optimization techniques for the vehicle routing problem. *Advanced Engineering Informatics*, 18, 41–48.
- Cura, T. (2008). Modern sezgisel teknikler ve uygulamaları (1. Baskı). Papatya Yayıncılık.
- Desrochers, M., Desrosiers, J., & Solomon, M. M. (1992). A new optimization algorithm for the vehicle routing problem with time windows. *Operations Research*, 40(2), 342–354. <https://doi.org/10.1287/opre.40.2.342>
- Ersoy, P. ve Börühan, G. (2013). Lojistik süreçler açısından afet lojistiğinin önemi. *Finans Politik ve Ekonomik Yorumlar*, 50(578), 75–86.
- Garrido, R. A., Lamas, P., & Pino, F. J. (2015). A stochastic programming approach for flood emergency logistics. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 75, 18–31. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2014.12.002>
- Günneç, D., & Salman, F. S. (2011). Assessing the reliability and the expected performance of a network under disaster risk. *OR Spectrum*, 33(3), 499–523. <https://doi.org/10.1007/s00291-011-0250-7>
- Huang, R., Kim, S., & Menezes, M. B. (2010). Facility location for large-scale emergencies. *Annals of Operations Research*, 181(1), 271–286. <https://doi.org/10.1007/s10479-010-0736-8>
- Hu, S. L., Han, C. F. ve Meng, L. P. (2017). Stochastic optimization for joint decision making of inventory and procurement in humanitarian relief. *Computers ve Industrial Engineering*, 111, 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.06.029>
- Jha, A., Acharya, D., & Tiwar, M. K. (2017). Humanitarian relief supply chain: a multi-objective model and solution. *Sadhana*, 42(7), 1167–1174. <https://doi.org/10.1007/s12046-017-0679-8>
- Kovacs, G., & Spens, K. M. (2012). Relief supply chain for disasters, humanitarian aid and emergency logistics. *Business Science*, USA.
- Laporte, G. (1992). The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*, 59(3), 345–358. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(92\)90192-C](https://doi.org/10.1016/0377-2217(92)90192-C)
- Lee, Y. M., Ghosh, S., & Ettli, M. (2009). Simulating the distribution of emergency relief supplies for disaster response operations. *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference*. <https://doi.org/10.1109/WSC.2009.5429246>
- Li, X., Ramshani, M., & Huang, Y. (2018). Cooperative maximal covering models for humanitarian relief chain management. *Computers ve Industrial Engineering*, 119, 301–308. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.04.004>
- Lloyd, S. (1982). Least squares quantization in PCM. *IEEE Transactions on Information Theory*, 28(2), 129–137. <https://doi.org/10.1109/TIT.1982.1056489>
- Lu, C. C. (2013). Robust weighted vertex p-center model considering uncertain data: Application to emergency management. *European Journal of Operational Research*, 230(1), 113–121. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.03.028>
- Lu, X. L., & Hou, Y. X. (2009). Ant colony optimization for facility location for large-scale emergencies. In *Management and Service Science. 2009 International Conference on Management and Service Science*. <https://doi.org/10.1109/ICMSS.2009.5302451>
- Manopiniwes, W., & Irohara, T. (2017). Stochastic optimisation model for integrated decisions on relief supply chains: Preparedness for disaster response. *International Journal of Production Research*, 55(4), 979–996. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1211340>
- Massaguer, D., Balasubramanian, V., Mehrotra, S., & Venkatasubramanian, N. (2006). Multi-agent simulation of disaster response. Erişim adresi: <https://www.researchgate.net/publication/241438415>
- Miller, C. E., Tucker, A. W., & Zemlin, R. A. (1960). Integer programming formulation of the traveling salesman problem. *Journal of the ACM (JACM)*, 7(4), 326–329. <https://doi.org/10.1145/321043.321046>
- Özdamar, L., Ekinci, E., & Küçükyazıcı, B. (2004). Emergency logistics planning in natural disasters. *Annals of Operations Research*, 129(1–4), 217–245. <https://doi.org/10.1023/B:ANOR.0000030690.27939.39>
- Safaei, A. S., Farsad, S., & Paydar, M. M. (2018). Emergency logistics planning under supply risk and demand uncertainty. *Operational Research International Journal*, 1–24.
- Sheu, J. B. (2007). Afetlerde acil yardım talebine hızlı yanıt için acil lojistik dağıtım yaklaşımı. *Ulaştırma Araştırması Bölüm E: Lojistik ve Ulaştırma İncelemesi*, 43(6), 687–709.
- Soyöz, H., & Özyörük, B. (2021). Afet lojistiğinde üç aşamalı karma tamsayılı bir model önerisi. *Journal of Turkish Operations Management*, 5(1), 641–661.

- Şen, G., & Esmer, S. (2017). Afet lojistiği: Bir literatür taraması. *The International New Issues in Social Sciences*, 5, 231–250.
- Torabi, S. A., Shokr, I., Tofighi, S., & Heydari, J. (2018). Integrated relief pre-positioning and procurement planning in humanitarian supply chains. *Transportation Research Part E*, 113, 123–146. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.03.012>
- Toth, P., & Vigo, D. (2014). *Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications* (2nd ed.). Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM). <https://doi.org/10.1137/1.9781611973594>
- Verma, A., & Gaukler, G. M. (2011). A stochastic optimization model for positioning disaster response facilities for large-scale emergencies. *International Conference on Network Optimization*, 547–552.
- Vitoriano, B., Ortuño, M. T., Tirado, G., & Montero, J. (2011). A multi-criteria optimization model for humanitarian aid distribution. *Journal of Global Optimization*, 51, 189–208. <https://doi.org/10.1007/s10898-010-9603-z>
- Yadav, D. K., & Barve, A. (2015). Analysis of Critical Success Factors of Humanitarian Supply Chain: An Application of Interpretive Structural Modeling. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 12, 213–225.