

Bulanık Çok-Amaçlı Doğrusal Programlama ve Aralık Tip-2 Bulanık AHP Yöntemi ile Yeşil Tedarikçi Seçimi

Ahmet ÇALIK*

ÖZ

Yeşil Tedarikçi Seçimi (YTS) son yıllarda şirketler, araştırmacılar ve müşteriler tarafından, yasal düzenlemeler, artan müşteri bilinci, sivil toplum kuruluşları, kamusal ve sosyal sorumluluklar nedeniyle artan bir ilgiyle karşı karşıyadır. Tedarikçi seçimi tedarik zinciri yönetiminde rol oynayan en önemli faktörlerden biridir. Tedarikçilerin çevresel performansının iyileştirilmesi yeşil tedarik zincirlerinin geliştirilmesi için kritik öneme sahiptir. Tedarikçiler, herhangi bir işletmede üretim için gerekli olan hammaddeleri tedarik ettikleri için yeşil tedarik zinciri yönetimi performansını geliştirmede büyük bir öneme sahiptirler. Bu nedenle her geçen gün daha fazla işletme yeşil satın alma, yeşil paketleme ve tersine lojistik gibi iş performansını ve rekabet gücünü artırmaya yönelik çeşitli yeşil girişimlere yatırım yapmaktadırlar. Bununla birlikte, tedarikçi seçiminde fiyat, kalite, teslimat vb. geleneksel kriterler dikkate alınmakta tedarikçilerin yeşil performanslarını ölçmeye yönelik kriterler göz ardı edilmektedir. Firmaların performanslarını ve rekabet gücünü artırıcı amaçlarına ulaşabilmeleri için karar vericiler, YTS problemlerini çözmek için en iyi yöntemi uygulamalı ve en doğru kriterleri seçmelidirler. Genel olarak, yeşil tedarikçi değerlendirme ve seçim problemleri belirsizlik içermekte ve bulanık küme teorisi, çeşitli kriterlere göre tedarikçilerin değerlendirilmesi için dilsel değişkenleri kullanarak karar vericilerin tercihlerini ve görüşlerini anlamlı sonuçlara dönüştürmeye yardımcı olmaktadır. Bilgi eksikliği, sınırlı sayıda niceliksel bilgi, şirketlerin özel bağları ve değişen tedarikçi geçmişleri nedeniyle YTS değerlendirme ve seçim problemleri zorlu bir süreçtir. Bu çalışmada aralık tip-2 Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi (BAHP) yöntemi ve Bulanık Çok-Amaçlı Doğrusal Programlama (BÇADP) modeli kullanılarak yeşil tedarikçilerin performanslarının değerlendirilmesi için entegre bir yöntem önerilmiştir. Aralık tip-2 BAHP yöntemi karar vericilerin görüşlerindeki belirsizliği yansıtmada tip-1 bulanık kümelerle göre daha uygundur ve ilk aşamada aralık tip-2 BAHP yöntemi kullanılarak YTS'nde ele alınan kriterlerin ağırlıkları elde edilmiştir. İkinci aşamada ise Maliyet, geç teslimat, CO₂ salınımı, kirlilik üretimi ve çevre dostu malzeme kullanımı gibi amaçları içeren yeni bir BÇADP modeli önerilmiştir. Daha sonra BAHP yönteminden elde edilen ağırlıklar BÇADP modelinde kullanılarak optimal çözüm elde edilmiş ve tedarikçilerin değerlendirmeleri yapılmıştır. Önerilen yöntemin uygulanabilirliği bir örnek üzerinde gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aralık Tip-2 Bulanık Kümeler, Bulanık Çok-Amaçlı Doğrusal Programlama, Yeşil Tedarikçi Seçimi

Green Supplier Selection with Fuzzy Multi-Objective Linear Programming and Interval Type-2 Fuzzy AHP Method

ABSTRACT

In recent years Green Supplier Selection (GSS) has been confronted increasingly attention by companies, researchers and customers in recent years due to legislations, increased customer awareness, non-governmental organizations, public and social responsibilities. Supplier selection is one of the most important factor playing a role in supply chain management. Improving the environmental performance of suppliers is a critical importance for development of green supply chains. Suppliers have a great importance for improving the performance of green supply chain management as they supply the raw materials required for production in any business. As a result, more and more organizations are investing in various green initiatives such as green purchasing, green packaging and reverse logistics to improve business performance and competitiveness. However, in supplier selection traditional criteria such as price, quality, delivery, etc. are taken into consideration and other criteria for measuring the green performance of suppliers are ignored. In order to achieve higher performance and competitiveness objectives, decision makers should apply the best method to solve the GSS problems and choose the most appropriate criteria. In general, the green supplier evaluation and selection problems are uncertain and the fuzzy set theory helps to convert decision makers' preferences and opinions into meaningful results using linguistic variables for the evaluation of suppliers according to various criteria. Due to lack of information, limited quantitative information, companies' specific contexts, and changing supplier histories, GSS evaluation and selection problems are a challenging process. In this study, an integrated method using interval type-2 Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP) method and Fuzzy Multi-Objective Linear Programming (FMODP) model is proposed for evaluating the performances of green suppliers. The interval type-2 FAHP method is more suitable than the type-1 fuzzy sets to reflect the uncertainty of decision makers' opinions and in the first stage weights of the criteria are obtained by using the interval type-2 FAHP method for the GSS. In the second stage, a new FMODP model is proposed consists of objectives such as cost, late delivery, CO₂ emission, pollution production and usage of environmentally friendly material. Then weights obtained from the FAHP method are used in the FMODP model and the optimal solution is obtained for evaluation of suppliers. The applicability of the proposed method is demonstrated on an example.

Keywords: Fuzzy Multi-Objective Liner Programming, Green Supplier Selection, Interval Type-2 Fuzzy AHP

*Dr. Öğr. Üyesi, KTO Karatay Üniversitesi, orcid no: 0000-0002-6796-0052, ahmetcalik51@gmail.com
Makalenin Gönderim Tarihi: 18.04.2017; Makalenin Kabul Tarihi: 13.10.2017

1. Giriş

Küresel ısınma, iklim değişikliği, hava ve su kirliliği, asit yağmuru ve ormanların hızla yok edilmesi gibi çevresel zorluklar, işletmeleri çevre yönetimi konusuna yöneltmiştir. Çevre konusunda artan hassasiyetlere duyarsız kalmayarak müşteri memnuniyetini artırmayı hedefleyen işletmeler için birçok yasal düzenleme ve yönetmelik mevcuttur. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından Ambalaj Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği, Atık Yönetimi Yönetmeliği ve Sera Gazı Emisyonlarının Takibi Hakkında Yönetmelik gibi birçok genelge ve yönetmelik hazırlanmıştır.

Artan çevresel kaygılar ve yasal düzenlemeler işletmeleri tedarik zinciri operasyonlarında yeşil faktörleri de göz önünde bulundurmaya itmiş ve Yeşil Tedarik Zinciri Yönetimi (YTZY) kavramını ortaya çıkarmıştır. İşletmelerin performansı, tedarikçilerin performansından doğrudan etkilenir ve her iki tarafında hedeflerini karşılaması gerekmektedir. Bu nedenle, işletmeler çevresel standartları yakalamak ve yüksek kalitede üretim yapabilmek amacıyla çeşitli standart ve program uygulayan tedarikçilerle çalışmaktadırlar. Bu noktada karşımıza YTS kavramı çıkmakta ve YTS genellikle çevre performansına dayalı olarak tedarikçileri izleme ve çevresel standartları sağlayan yeşil tedarikçilerle işbirliği yapma olarak kabul edilmektedir (Kannan vd., 2013).

Tedarikçi seçimi ile ilgili birçok çalışma olmasına rağmen YTS günümüzde ilgi çekmeye başlamış konulardan birisidir. Klasik tedarikçi seçiminde ele alınan maliyet, kalite ve teslimat zamanı gibi faktörlerin yanında yeşil faktörlerinde tedarikçi seçiminde ele alınması artık zorunlu hale gelmiştir. Tedarikçi seçimi işletmelerin nakit akışı ve karlılığı üzerinde doğrudan etkisi olması sebebiyle uygun tedarikçinin seçimi, herhangi bir işletme için önemli bir sorumluluktur. İşletmelerin toplam üretim maliyetinin (yaklaşık %70) büyük bir kısmı hammadde ve parça maliyetlerinden oluşmakta ve uygun bir tedarikçinin seçimi maliyet, kalite ve hizmet açısından işletmelerde önemli tasarruf sağlamaktadır (Govindan ve Sivakumar, 2016).

YTS birbiriyle çelişkili faktörler içerdiği için doğası gereği bir Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) problemidir. Karar vericilerin tercihlerine göre birbiri ile çelişkili faktörler altında alternatiflerin sınıflandırılması, sıralanması ve seçilmesi ile ÇKKV yöntemlerinin temelini oluşturur ve karar vericilerin hangi tedarikçi ile çalışacağı bir problem iken, diğer bir problem o tedarikçiden ne kadar sipariş vermelidir. Çünkü tedarikçiler büyük sipariş miktarlarında indirimde gidebilmektedir. Bu durumda karar vericiler sipariş miktarına da karar vermelidir (Amid vd., 2009). Bu nedenle, karar vericiler çelişkili birçok amaç altında karar vermekte ve çok-amaçlı karar verme yöntemlerinin de tedarikçi seçiminde kullanılmasını gerektirmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışmada, uygun yeşil tedarikçilerin belirlenmesi ve tedarikçiler arasında sipariş miktarına karar verebilmek için iki aşamalı entegre bir model önerilmiştir. Bu çalışmanın ilk aşamasında, aralık tip-2 BAHP yöntemi, YTS'nde etkili olan faktörlerin ağırlıklarını belirlemek için kullanılmıştır. İkinci aşamada, BÇADP ile potansiyel yeşil tedarikçiler arasındaki sipariş miktarını belirlemek için, maliyet, kalite ve CO₂ salınımı gibi amaçlar için yeni bir YTS modeli geliştirilmiştir. İlk aşamada elde edilen ağırlıklar BÇADP'ni Tek-Amaçlı Doğrusal Programlama (TADP) modeline dönüştürmek için kullanılmış ve uygun çözümler elde edilmiştir.

2. Literatür Araştırması

İşletmelerin faaliyetlerini sürdürülebilmeleri için tedarikçilerden mal ve hizmet almaları gerekmekte, tedarikçi seçimi işletmelerin maliyetlerini doğrudan ilgilendirmektedir. Literatürde tedarikçi seçimi için birçok yöntem olmakla birlikte, işletmeler çevresel konuları da tedarikçi seçiminde ele almak zorunda kalmıştır. Son yıllarda yeşil ve sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimi için bir dizi literatür araştırması yapılmıştır. Bu araştırmaların bir kısmı bütün alanı kapsayacak şekilde ve genel iken (Seuring ve Müller, 2008; Srivastava, 2007) diğerleri belirli alanlarda odaklanmıştır. Örneğin performans ölçümü (Taticchi vd., 2013), yeşil tedarik zincirlerinde tedarikçi seçimi (Igarashi vd., 2013), Yeşil Tedarikçi Seçimi (YTS)'nde Analitik Hiyerarşi Proses (AHP) ve Analitik Ağ Süreci (ANP) uygulamaları (My Dung vd., 2016), sürdürülebilir tedarikçi yönetimi (Zimmer vd., 2016). Bibliometrik ve ağ analizi yardımıyla etkili yayınları, yazarları ve gelişen araştırma alanlarını analitik ve nesnel bir biçimde belirleyen bir çalışma ise Fahimnia vd. (2015) tarafından yayınlanmıştır. Feyzioğlu ve Büyüközkan (2010) bir Türk beyaz eşya üreticisinin bir ana

tedarikçisi üzerinde 2-katlı Choquet integrali adı verilen toplama operatörü ile yeşil tedarikçi değerlendirme problemini ele almışlardır. Delphi yöntemi yedi karar vericinin değerlendirmesi için kullanılmış ve beş alternatif arasında en iyi tedarikçi seçilmiştir. Büyüközkan ve Çifçi (2012) YTZY girişimlerini geliştirmek için yeşil tedarikçilerin değerlendirmesi ile yeni bir hibrit ÇKKV yaklaşımı önermişlerdir. Birleştirilmiş bulanık ANP ve bulanık DEMATEL yaklaşımları kriterler arasındaki ilişkileri belirlemek için kullanılmış, bulanık TOPSIS yöntemi ideal çözümü elde etmek için uygulanmıştır. Ford Otosan, yeşil tedarikçisi alternatiflerin değerlendirilmesi için bu çalışmada bir örnek şirket olarak seçilmiştir. Verilen örnek olay çalışması ile pratik uygulamalar ve araştırmalar için ek bilgiler sağlanmıştır. Büyüközkan (2012) çeşitli çevresel performans kriterlerini dikkate alarak tedarikçi performans değerlendirmesi için bir karar modeli önermiştir. BAHF değerlendirme kriterlerinin göreceli ağırlıklarını belirlemek için uygulanmış ve bir aksiyomatik tabanlı tasarım (AD) bulanık grup karar verme yaklaşımı yeşil tedarikçileri sıralamak için kullanılmıştır. Önerilen yaklaşım bir Türk firması üzerine uygulanmış ve uygulama aşamaları bir örnek çalışma olarak verilmiştir.

Chung vd. (2016) YTS için ANP ve IPA (Önem Performans Analizi) yöntemlerini, yeşil tedarik zincirlerinde sürdürülebilir yönetime ulaşmak için uygulamışlardır. 11 kriterin ağırlığı ANP yöntemi ile elde edilmiş ve kriterlerin önemi ve tedarikçilerin performansını analiz etmek için IPA yöntemi uygulanmıştır. Shahryari Nia vd. (2016) geleneksel ve çevresel kriterleri içeren tedarikçi seçimi için öncelikle modifiye edilmiş Delphi yöntemi tedarikçi seçim kriterlerini belirlemek için uygulanmıştır. Kararlardaki belirsizlik için sezgisel bulanık değer (IFV) ve aralık değerli sezgisel bulanık (IVIF) kullanılmıştır. Zhang vd. (2016) alternatiflerin her bir kriter ile değerlendirilmesinin kararsız bulanık elemanlar olarak ele alındığı kararsız bulanık programlama yaklaşımını geliştirmişlerdir. Bi-objektif programlama modeli kriterlerin eksik ve tutarsız ağırlıkları sorunlarını çözmek için oluşturularak, gerçek hayattaki YTS problemi yöntemin uygulanabilirliğini göstermek için kullanılmıştır. Fallahpour vd. (2016) VZA modellerindeki zayıflık ile başa çıkmak için sağlam bir VZA modeli olan Kourosh ve Arash (KAM) yöntemini yeni bir yapay zeka modeli ile entegre etmişlerdir. Tedarikçilerin çevresel performansını (girdi ve çıktılar gibi) değerlendirmek için altı kriter seçilmiş ve KAM yöntemi ile teknik etkin ve etkin olmayan tedarikçiler tespit edilmiştir. Govindan ve Sivakumar (2016) YTS ve sipariş dağıtımı için çevresel kriterler olarak sera gazı emisyonu kontrolü ve geri dönüşüm çalışmaları uygulayan kağıt sektöründe bir şirket için karbon emisyonunun azaltılmasını tartışmışlardır. Bulanık TOPSIS yöntemi ile potansiyel tedarikçilerin seçimi ve değerlendirmesi ele alınmış, çok-amaçlı doğrusal programlama kullanılarak sipariş dağıtımı yapılmıştır. Sonuçlar ile üretim sürecinde geri dönüşüm ürünlerinin kullanılması ile karbon emisyonu %26.2 azalma göstermiştir. Hosseini ve Khaled (2016) emici, uyarlanabilir ve güçlendirici kapasiteleri kavramına dayalı olarak potansiyel tedarikçilerin esneklik değerini hesaplamak için hibrit bir yaklaşım önermişlerdir. Topluluk yöntemi kullanılarak tedarikçilerin esnekliği sekiz katkı ile analiz edilmiş ve katkılar sıralanmıştır. AHP yöntemi aday beş tedarikçiyi beş kriter altında değerlendirmiş ve tedarikçilerin sıralanmaları sağlanmıştır. Bhardwaj (2016) TZY'nde sürdürülebilirlik stratejisini geliştirmek için çevre politikalarının rolünü açıklamıştır. Bu amaçla Hindistan'da bulunan imalat ve hizmet firma arasında yer alan 326 firmanın yanıtları incelenmiş ve değişkenler için hipotezler regresyon analizi ile test edilmiştir.

3. Yeşil Tedarikçi Seçimi İçin Önerilen Yöntem

Yeşil tedarikçi değerlendirmesi için iki aşamadan oluşan bir yöntem uygulanmıştır. İlk aşamada doğası gereği bir ÇKKV olan YTS için, ÇKKV yöntemlerinden AHP yöntemi aralık tip-2 bulanık kümeler kullanılarak ele alınmıştır. Tedarikçilerin değerlendirmesinde ele alınan kriterlerin ağırlıkları aralık tip-2 BAHF yöntemi ile elde edilmiştir. Bunun için öncelikle çeşitli uzmanlardan oluşan bir komite oluşturulmuştur. Komitenin görüşleri ve literatür incelemesi ile YTS'nde ele alınacak kriterler belirlenmiştir. Daha sonra belirlenen kriterlerin ağırlıkları aralık tip-2 bulanık kümeler ile Buckley (1985)'in BAHF yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. İkinci aşamada ise tedarikçilerin değerlendirmesini içeren BÇADP modeli oluşturulmuştur. Elde edilen kriter ağırlıkları BÇADP modelini klasik TADP modeli haline getirebilmek için Ağırlıklı Toplamsal Model (ATM) (Tiwari vd., 1987)'de kullanılmıştır. Ayrıca bu çalışmada, aralık tip-2 BAHF yöntemi tip-1 BAHF yöntemi ile karşılaştırılmış ve sonuçlar uygulama bölümünde sunulmuştur.

3.1. Aralık Tip-2 Bulanık Kümeler

Bu bölümde tip-2 bulanık kümeler ve aralık tip-2 bulanık kümelere ilişkin temel kavramlar ve tanımlamalar (Kahraman vd., 2014; Mendel vd., 2006; Zadeh, 1975) kaynaklarından yararlanılarak açıklanmıştır.

Tanım 1: X evrensel kümesine ait bir \tilde{A} tip-2 bulanık küme, $\mu_{\tilde{A}}(x)$ tip-2 bulanık üyelik fonksiyonu ile aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\tilde{A} = \{(x, u), \mu_{\tilde{A}}(x, u) \mid \forall x \in X, \forall u \in J_x \subseteq [0,1], 0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x, u) \leq 1\} \quad (1)$$

burada, $J_x \in [0,1]$ aralığını göstermektedir. Ayrıca, \tilde{A} tip-2 bulanık kümesinin bir başka ifade edilmiş şekli aşağıdaki gibidir:

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \int_{u \in J_x} \mu_{\tilde{A}}(x, u) / (x, u) \quad (2)$$

burada $J_x \subseteq [0,1]$ olmak üzere, \iint tüm makul (kabul edilebilir) x ve u değerlerinin birleşimini ifade etmektedir.

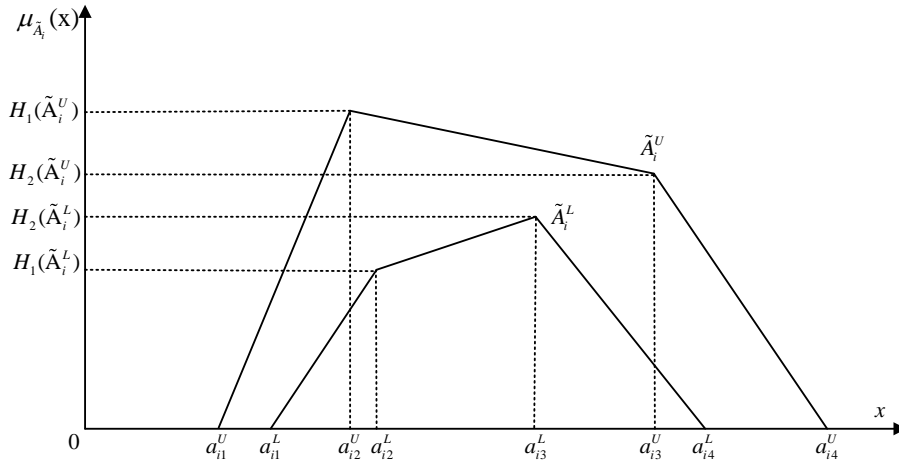
Tanım 2: X evrensel kümesine ait \tilde{A} tip-2 bulanık kümesini tanımlayan tip-2 üyelik fonksiyonunu $\mu_{\tilde{A}}$ olarak gösterilsin. Eğer bütün $\mu_{\tilde{A}}(x, u) = 1$ ise, \tilde{A} kümesine aralık tip-2 bulanık küme adı verilir. Bir aralık tip-2 bulanık küme, \tilde{A} tip-2 bulanık kümenin özel bir durumu olarak kabul edilir ve aşağıdaki şekilde gösterilebilir:

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \int_{u \in J_x} 1 / (x, u) \quad (3)$$

burada $J_x \subseteq [0,1]$ dir.

Tanım 3: Aralık tip-2 bulanık kümesinin alt ve üst üyelik fonksiyonları sırasıyla tip-1 üyelik fonksiyonudur. Chen ve Lee (2010) çalışmalarında bulanık çok kriterli grup karar verme problemlerinin çözümünde aralık tip-2 bulanık kümeleri kullanmak için yeni bir yöntem önermişlerdir. Bu yöntemde göre, aralık tip-2 bulanık kümelerin referans noktaları ve üst ve alt üyelik fonksiyonlarının yükseklikleri, tip-2 bulanık kümelerini karakterize etmek için kullanılmıştır. Şekil 1’de yamuksal bir aralık tip-2 bulanık küme gösterilmektedir. Yamuksal bir aralık tip-2 bulanık kümeler,

$\tilde{A}_i = (\tilde{A}_i^U; \tilde{A}_i^L) = \left((a_{i1}^U, a_{i2}^U, a_{i3}^U, a_{i4}^U; H_1(\tilde{A}_i^U), H_2(\tilde{A}_i^U)), (a_{i1}^L, a_{i2}^L, a_{i3}^L, a_{i4}^L; H_1(\tilde{A}_i^L), H_2(\tilde{A}_i^L)) \right)$ burada \tilde{A}_i^U ve \tilde{A}_i^L tip-1 bulanık kümeleri, $a_{i1}^U, a_{i2}^U, a_{i3}^U, a_{i4}^U, a_{i1}^L, a_{i2}^L, a_{i3}^L$ ve a_{i4}^L yamuksal aralık tip-2 bulanık kümesi \tilde{A}_i kümesinin referans noktalarını, $H_j(\tilde{A}_i^U); 1 \leq j \leq 2$ olmak üzere $a_{i(j+1)}^U$ elemanının \tilde{A}_i^U üst yamuksal üyelik fonksiyonundaki üyelik değerini, $H_j(\tilde{A}_i^L); 1 \leq j \leq 2$ olmak üzere $a_{i(j+1)}^L$ elemanının \tilde{A}_i^L alt yamuksal üyelik fonksiyonundaki üyelik değerini ifade ettiğinde ve $H_1(\tilde{A}_i^U) \in [0,1], H_2(\tilde{A}_i^U) \in [0,1], H_1(\tilde{A}_i^L) \in [0,1], H_2(\tilde{A}_i^L) \in [0,1]$ ve $1 \leq i \leq n$ koşullarını sağladığında Eşitlik (1) ile gösterilir.



Şekil 1. Yamuksal aralık tip-2 bulanık sayının üyelik fonksiyonu

Tanım 4: Yamuksal aralık tip-2 bulanık kümeleri arasındaki toplama işlemi aşağıdaki şekilde gösterilir.

$$\begin{aligned} \tilde{\tilde{A}}_1 &= (\tilde{A}_1^U, \tilde{A}_1^L) = \left((a_{11}^U, a_{12}^U, a_{13}^U, a_{14}^U; H_1(\tilde{A}_1^U), H_2(\tilde{A}_1^U)), (a_{11}^L, a_{12}^L, a_{13}^L, a_{14}^L; H_1(\tilde{A}_1^L), H_2(\tilde{A}_1^L)) \right) \\ \tilde{\tilde{A}}_2 &= (\tilde{A}_2^U, \tilde{A}_2^L) = \left((a_{21}^U, a_{22}^U, a_{23}^U, a_{24}^U; H_1(\tilde{A}_2^U), H_2(\tilde{A}_2^U)), (a_{21}^L, a_{22}^L, a_{23}^L, a_{24}^L; H_1(\tilde{A}_2^L), H_2(\tilde{A}_2^L)) \right) \\ \tilde{\tilde{A}}_1 \oplus \tilde{\tilde{A}}_2 &= (\tilde{A}_1^U, \tilde{A}_1^L) \oplus (\tilde{A}_2^U, \tilde{A}_2^L) \\ &= \left((a_{11}^U + a_{21}^U, a_{12}^U + a_{22}^U, a_{13}^U + a_{23}^U, a_{14}^U + a_{24}^U; \min(H_1(\tilde{A}_1^U), H_1(\tilde{A}_2^U)), \min(H_2(\tilde{A}_1^U), H_2(\tilde{A}_2^U))), \right. \\ &\left. (a_{11}^L + a_{21}^L, a_{12}^L + a_{22}^L, a_{13}^L + a_{23}^L, a_{14}^L + a_{24}^L; \min(H_1(\tilde{A}_1^L), H_1(\tilde{A}_2^L)), \min(H_2(\tilde{A}_1^L), H_2(\tilde{A}_2^L))) \right) \quad (4) \end{aligned}$$

Tanım 5: Yamuksal aralık tip-2 bulanık kümeleri arasındaki çıkarma işlemi aşağıdaki şekilde gösterilir.

$$\begin{aligned} \tilde{\tilde{A}}_1 &= (\tilde{A}_1^U, \tilde{A}_1^L) = \left((a_{11}^U, a_{12}^U, a_{13}^U, a_{14}^U; H_1(\tilde{A}_1^U), H_2(\tilde{A}_1^U)), (a_{11}^L, a_{12}^L, a_{13}^L, a_{14}^L; H_1(\tilde{A}_1^L), H_2(\tilde{A}_1^L)) \right) \\ \tilde{\tilde{A}}_2 &= (\tilde{A}_2^U, \tilde{A}_2^L) = \left((a_{21}^U, a_{22}^U, a_{23}^U, a_{24}^U; H_1(\tilde{A}_2^U), H_2(\tilde{A}_2^U)), (a_{21}^L, a_{22}^L, a_{23}^L, a_{24}^L; H_1(\tilde{A}_2^L), H_2(\tilde{A}_2^L)) \right) \\ \tilde{\tilde{A}}_1 \ominus \tilde{\tilde{A}}_2 &= (\tilde{A}_1^U, \tilde{A}_1^L) \ominus (\tilde{A}_2^U, \tilde{A}_2^L) \\ &= \left((a_{11}^U - a_{21}^U, a_{12}^U - a_{22}^U, a_{13}^U - a_{23}^U, a_{14}^U - a_{24}^U; \min(H_1(\tilde{A}_1^U), H_1(\tilde{A}_2^U)), \min(H_2(\tilde{A}_1^U), H_2(\tilde{A}_2^U))), \right. \\ &\left. (a_{11}^L - a_{21}^L, a_{12}^L - a_{22}^L, a_{13}^L - a_{23}^L, a_{14}^L - a_{24}^L; \min(H_1(\tilde{A}_1^L), H_1(\tilde{A}_2^L)), \min(H_2(\tilde{A}_1^L), H_2(\tilde{A}_2^L))) \right) \quad (5) \end{aligned}$$

Tanım 6: Yamuksal aralık tip-2 bulanık kümeleri arasındaki çarpma işlemi aşağıdaki şekilde gösterilir.

$$\begin{aligned} \tilde{\tilde{A}}_1 &= (\tilde{A}_1^U, \tilde{A}_1^L) = \left((a_{11}^U, a_{12}^U, a_{13}^U, a_{14}^U; H_1(\tilde{A}_1^U), H_2(\tilde{A}_1^U)), (a_{11}^L, a_{12}^L, a_{13}^L, a_{14}^L; H_1(\tilde{A}_1^L), H_2(\tilde{A}_1^L)) \right) \\ \tilde{\tilde{A}}_2 &= (\tilde{A}_2^U, \tilde{A}_2^L) = \left((a_{21}^U, a_{22}^U, a_{23}^U, a_{24}^U; H_1(\tilde{A}_2^U), H_2(\tilde{A}_2^U)), (a_{21}^L, a_{22}^L, a_{23}^L, a_{24}^L; H_1(\tilde{A}_2^L), H_2(\tilde{A}_2^L)) \right) \\ \tilde{\tilde{A}}_1 \otimes \tilde{\tilde{A}}_2 &= (\tilde{A}_1^U, \tilde{A}_1^L) \otimes (\tilde{A}_2^U, \tilde{A}_2^L) \\ &= \left((a_{11}^U \times a_{21}^U, a_{12}^U \times a_{22}^U, a_{13}^U \times a_{23}^U, a_{14}^U \times a_{24}^U; \min(H_1(\tilde{A}_1^U), H_1(\tilde{A}_2^U)), \min(H_2(\tilde{A}_1^U), H_2(\tilde{A}_2^U))), \right. \\ &\left. (a_{11}^L \times a_{21}^L, a_{12}^L \times a_{22}^L, a_{13}^L \times a_{23}^L, a_{14}^L \times a_{24}^L; \min(H_1(\tilde{A}_1^L), H_1(\tilde{A}_2^L)), \min(H_2(\tilde{A}_1^L), H_2(\tilde{A}_2^L))) \right) \quad (6) \end{aligned}$$

Tanım 7: Yamuksal aralık tip-2 bulanık kümeler ve skaler k arasındaki aritmetik işlemler aşağıdaki şekilde gösterilir.

$$\begin{aligned} \tilde{\tilde{A}}_1 &= (\tilde{A}_1^U, \tilde{A}_1^L) = \left((a_{11}^U, a_{12}^U, a_{13}^U, a_{14}^U; H_1(\tilde{A}_1^U), H_2(\tilde{A}_1^U)), (a_{11}^L, a_{12}^L, a_{13}^L, a_{14}^L; H_1(\tilde{A}_1^L), H_2(\tilde{A}_1^L)) \right) \\ k\tilde{\tilde{A}}_1 &= \left((k \times a_{11}^U, k \times a_{12}^U, k \times a_{13}^U, k \times a_{14}^U; H_1(\tilde{A}_1^U), H_2(\tilde{A}_1^U)), (k \times a_{11}^L, k \times a_{12}^L, k \times a_{13}^L, k \times a_{14}^L; H_1(\tilde{A}_1^L), H_2(\tilde{A}_1^L)) \right) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\tilde{\tilde{A}}_1}{k} &= \left(\left(\frac{1}{k} \times a_{11}^U, \frac{1}{k} \times a_{12}^U, \frac{1}{k} \times a_{13}^U, \frac{1}{k} \times a_{14}^U; H_1(\tilde{A}_1^U), H_2(\tilde{A}_1^U) \right), \left(\frac{1}{k} \times a_{11}^L, \frac{1}{k} \times a_{12}^L, \frac{1}{k} \times a_{13}^L, \frac{1}{k} \times a_{14}^L; H_1(\tilde{A}_1^L), H_2(\tilde{A}_1^L) \right) \right) \end{aligned} \quad (8)$$

burada $k > 0$ olmalıdır.

3.2. Aralık Tip-2 Bulanık AHP Yöntemi

Kahraman vd. (2014) çalışmalarında, Buckley (1985)'in tip-1 bulanık kümelere dayalı BAHF yöntemini aralık tip-2 bulanık kümelere göre genişletmişlerdir. Aşağıda bu yöntemin adımları açıklanmıştır:

Adım 1: Problemin tanımı ve probleme uygun olarak amacı belirlenir.

Adım 2: Problemin kriterler, alt kriterler ve alternatiflerde dâhil olmak üzere hiyerarşik yapısı belirlenir.

Adım 3: Bütün kriterler arasındaki bulanık ikili karşılaştırma matrisi oluşturulur. İkili karşılaştırma matrisini oluşturmak için uzmanlar dilsel değişkenleri kullanırlar. Dilsel değişkenler ve bunların aralık tip-2 bulanık ölçekleri Tablo 1'de verilmiştir. Dilsel değişkenlerin kullanılması ile Eşitlik (9)'daki gibi bulanık ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulur.

Tablo 1. Dilsel değişkenlerin aralık tip-2 bulanık ölçekleri

| Dilsel değişkenler | Yamuksal tip-2 bulanık ölçekler |
|---|---|
| Kesinlikle Güçlü (KG) | (7,8,9,9;1,1) (7,2,8,2,8,8,9;0,8,0,8) |
| Çok Güçlü (ÇG) | (5,6,8,9;1,1) (5,2,6,2,7,8,8,8;0,8,0,8) |
| Oldukça Güçlü (OG) | (3,4,6,7;1,1) (3,2,4,2,5,8,6,8;0,8,0,8) |
| Biraz Güçlü (BG) | (1,2,4,5;1,1) (1,2,2,2,3,8,4,8;0,8,0,8) |
| Tamamen Eşit (E) | (1,1,1,1;1,1) (1,1,1,1;1,1) |
| Eğer faktör i faktör j ile karşılaştırıldığında yukarıdaki değişkenlerden birini ahyorsa, j i ile karşılaştığında karşıt (karşılıklı) değeri alır | Yukarıdakilerin karşılığı |

$$\tilde{\tilde{A}} = \begin{bmatrix} 1 & \tilde{\tilde{a}}_{12} & \cdots & \tilde{\tilde{a}}_{1n} \\ \tilde{\tilde{a}}_{21} & 1 & \cdots & \tilde{\tilde{a}}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{\tilde{a}}_{n1} & \tilde{\tilde{a}}_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \tilde{\tilde{a}}_{12} & \cdots & \tilde{\tilde{a}}_{1n} \\ 1/\tilde{\tilde{a}}_{12} & 1 & \cdots & \tilde{\tilde{a}}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/\tilde{\tilde{a}}_{1n} & 1/\tilde{\tilde{a}}_{2n} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\text{burada } 1/\tilde{\tilde{a}}_{ij} = \left(\left(\frac{1}{a_{ij4}^U}, \frac{1}{a_{ij3}^U}, \frac{1}{a_{ij2}^U}, \frac{1}{a_{ij1}^U}; H_1(a_{ij}^U), H_2(a_{ij}^U) \right), \left(\frac{1}{a_{ij4}^L}, \frac{1}{a_{ij3}^L}, \frac{1}{a_{ij2}^L}, \frac{1}{a_{ij1}^L}; H_1(a_{ij}^L), H_2(a_{ij}^L) \right) \right)$$

Adım 4: Bulanık ikili karşılaştırma matrislerinin tutarlılıkları incelenir. Bu amaçla bulanık ikili karşılaştırma matrisleri durulaştırılır ve tutarlılıkları incelenir. Eğer tutarsızlık tespit edilirse uzmanların yeniden değerlendirme yapması istenir. Tutarlılık oranı aşağıdaki formüllerle hesaplanır. Eğer tutarlılık indeksi (CI), 0.1'den daha küçük olursa, karşılaştırma matrisleri tutarsızdır.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1} \quad (10)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (11)$$

n "karşılaştırılan kriter sayısı ve RI kriter sayısına göre rasgele değişen rasgelelik indeksidir.

Adım 5: Her bir kriterin geometrik ortalaması \tilde{r}_i aşağıdaki gibi hesap edilir:

$$\tilde{r}_i = [\tilde{a}_{i1} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{in}]^{1/n} \quad (12)$$

burada

$$\sqrt[n]{\tilde{a}_{ij}} = \left(\left(\sqrt[n]{\tilde{a}_{ij1}^U}, \sqrt[n]{\tilde{a}_{ij2}^U}, \sqrt[n]{\tilde{a}_{ij3}^U}, \sqrt[n]{\tilde{a}_{ij4}^U}; H_1^U(a_{ij}), H_2^U(a_{ij}) \right), \left(\sqrt[n]{\tilde{a}_{ij1}^L}, \sqrt[n]{\tilde{a}_{ij2}^L}, \sqrt[n]{\tilde{a}_{ij3}^L}, \sqrt[n]{\tilde{a}_{ij4}^L}; H_1^L(a_{ij}), H_2^L(a_{ij}) \right) \right) \quad (13)$$

Adım 6: Her bir kriterin bulanık ağırlıkları Eşitlik (14) ile hesap edilir.

$$\tilde{w}_i = \tilde{r}_i \otimes [\tilde{r}_1 \oplus \dots \oplus \tilde{r}_i \oplus \dots \oplus \tilde{r}_n]^{-1} \quad (14)$$

Adım 7: Kriterlerin önem derecesini belirlemek için aralık tip-2 bulanık sayılar durulaştırılır. Durulaştırma için Kahraman vd. (2014) tarafından önerilen durulaştırma yöntemi (DTraT) kullanılmıştır.

$$DTraT = \frac{\frac{(u_U - l_U) + (\beta_U \cdot m_{1U} - l_U) + (\alpha_U \cdot m_{2U} - l_U)}{4} + l_U + \left[\frac{(u_L - l_L) + (\beta_L \cdot m_{1L} - l_L) + (\alpha_L \cdot m_{2L} - l_L)}{4} + l_L \right]}{2} \quad (15)$$

3.3. Önerilen Bulanık Çok-Amaçlı Doğrusal Programlama Modeli

Geliştirilen BÇDAP yeşil tedarikçi seçim probleminin varsayımları, indisleri, karar değişkeni ve parametreleri aşağıda sunulmuştur.

Varsayımlar

- Tedarikçiler tek bir ürün üretmektedir.
- Satın alma sırasında miktara göre indirim yapılmamaktadır.
- Müşteri talepleri tedarikçiler tarafından tümüyle karşılanmaktadır.
- Tedarik zamanı, CO_2 salınımı ve üretimden kaynaklanan kirliliğin sabit olduğu kabul edilmiştir.

İndisler

i Tedarikçiler kümesi, $i = 1, 2, \dots, I$

j Amaçlar kümesi, $j = 1, 2, \dots, J$

k Kısıtlar kümesi, $k = 1, 2, \dots, K$

Karar değişkeni

x_i i . tedarikçiden sipariş edilen miktar (satın alınan birimlerin sayısı)

Parametreler

P_i i . tedarikçiden birim başına satın alma maliyeti (Maliyet)

L_i i . tedarikçi tarafından geç teslim edilen birimlerin yüzdesi (Geç Teslimat)

G_i i . tedarikçi tarafından ürün üretimi sırasında açığa çıkan CO_2 salınımı (CO_2 salınımı)

W_i i . tedarikçi tarafından bir günlük ürün üretimi sırasında açığa çıkan katı atık, sıvı atık ve zararlı maddeler gibi ortalama kirlilik üretimi (Kirlilik üretimi)

F_i i . tedarikçi tarafından ürün üretimi ve paketlenmesi sırasında kullanılan malzemelerin geri dönüştürülebilir seviyesi (Çevre Dostu Malzeme Kullanımı)

D sipariş edilen talep miktarı

Cap_i i . tedarikçinin kapasitesi

B Tedarikçilere ayrılan maksimum ücret (TL)

- L Tedarikçilere izin verilen maksimum geç teslim yüzdesi
 Cap^{CO_2} Malzeme satın alımı için toplam CO_2 salınımı kapasitesi
 P Tedarikçilere izin verilen maksimum ortalama kirlilik üretimi

Model

Geliştirilen YTS problemi aşağıdaki gibi formüle edilebilir (Amid vd., 2006, 2011; Shaw vd., 2012).

$$\text{Min } Z_1 = \sum_{i=1}^I P_i \cdot x_i \quad (16)$$

$$\text{Min } Z_4 = \sum_{i=1}^I W_i \cdot x_i \quad (17)$$

$$\text{Min } Z_3 = \sum_{i=1}^I G_i \cdot x_i \quad (18)$$

$$\text{Min } Z_2 = \sum_{i=1}^I L_i \cdot x_i \quad (19)$$

$$\text{Max } Z_5 = \sum_{i=1}^I F_i \cdot x_i \quad (20)$$

$$\sum_{i=1}^I x_i \geq D \quad (21)$$

$$x_i \leq Cap_i \quad (22)$$

$$\sum_{i=1}^I P_i \cdot x_i \leq B \quad (23)$$

$$\sum_{i=1}^I L_i \cdot x_i \leq L \quad (24)$$

$$\sum_{i=1}^I G_i \cdot x_i \leq Cap^{CO_2} \quad (25)$$

$$\sum_{i=1}^I W_i \cdot x_i \leq P \quad (26)$$

$$x_i \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, I \quad (27)$$

Eşitlik (16) satın alma maliyetini, Eşitlik (17) ortalama kirlilik üretimini, Eşitlik (18) açığa çıkan CO_2 salınımını, Eşitlik (19) geç teslimat yüzdesini minimum yapmayı gösterirken, Eşitlik (20) çevre dostu malzeme kullanımının maksimum yapılmasını ifade etmektedir. Eşitlik (21) taleplerin sağlanması gerektiğini gösterirken, Eşitlik (22) tedarikçilerden gönderilen miktarın ilgili tedarikçinin kapasitesine eşit veya kapasitesinden daha küçük olacağını ifade etmektedir. Eşitlik (23) fabrikanın bütçesine ait üst sınırı, Eşitlik (24) tedarikçilerin geç teslimatına ait üst sınırı, Eşitlik (25) ürün üretimi sırasında oluşan CO_2 salınımının üst sınırını ve Eşitlik (26) kirlilik üretimi için izin verilen üst sınırı ifade etmektedir. Eşitlik (27) karar değişkenine ait işaret kısıtını göstermektedir.

Önerilen BÇADP modelini çözmek için, üyelik fonksiyonları kullanılarak TADP modeli oluşturulabilir. Zimmermann (1978) minimum ve maksimum amaç fonksiyonları için üyelik fonksiyonlarını aşağıdaki gibi tanımlamıştır:

$$\mu_{Z_j}(x) = \begin{cases} 1, & Z_j(x) \leq Z_j^L \\ \frac{Z_j^U - Z_j(x)}{Z_j^U - Z_j^L}, & Z_j^L \leq Z_j(x) \leq Z_j^U, \quad \forall_j \text{ minimizasyon için} \\ 0, & Z_j(x) \geq Z_j^U \end{cases} \quad (28)$$

$$\mu_j(x) = \begin{cases} 1, & Z_j(x) \geq Z_j^U \\ \frac{Z_j(x) - Z_j^L}{Z_j^U - Z_j^L}, & Z_j^L \leq Z_j(x) \leq Z_j^U, \quad \forall_j \text{ maksimizasyon için} \\ 0, & Z_j(x) \leq Z_j^L \end{cases} \quad (29)$$

Eşitlik (28) ve Eşitlik (29)'da Z_j^L ve Z_j^U değerleri ilgili amaç fonksiyonunun alt ve üst sınırlarını göstermektedir. Z_j^L , minimizasyon problemleri için en iyi değeri, Z_j^U ise maksimizasyon problemleri için en iyi değeri göstermektedir. Dolayısıyla her iki problem tipi içinde hedeflenen amaç değeri $Z_j^L \leq Z_j(x) \leq Z_j^U$ aralığında olacaktır.

3.4. Tek-Amaçlı Doğrusal Programlama Modeli

TADP problemleri simetrik ve asimetric çözümler olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir. Simetrik çözümlerde, amaç fonksiyonları ve kısıtların aynı ağırlığa sahip olduğu kabul edilir. Fakat asimetric

çözümlerde, tedarikçi seçimindeki kararsızlıklara bağlı olarak, bulanık amaçlar ve bulanık kısıtlar eşit olmayan öneme sahiptirler. Literatürde çok çeşitli tek-amaçlı asimetrik modeller önerilmiştir ve bu çalışmada ATM, BÇADP modelini çözmek için kullanılmıştır. TADP modelinden elde edilen sonuç, her bir amacın tatmin seviyesine dayanmaktadır. Yani her bir amacın tatmin seviyesi BÇADP modeli için optimal çözüme karar vermektedir (Govindan ve Sivakumar, 2016).

Tiwari vd. (1987) tarafından önerilen ATM aşağıda verilmiştir (Amid vd., 2006; Shaw vd., 2012).

$$\begin{aligned}
 & \text{Maksimum } \sum_{j=1}^J w_j \cdot \lambda_j + \sum_{k=1}^K \beta_k \cdot \gamma_k \\
 & \lambda_j \leq \mu_{Z_j}(x) \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (\text{her amaç fonksiyonu için}) \\
 & \gamma_k \leq \mu_{g_k}(x) \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (\text{her bulanık kısıt için}) \\
 & g_p(x) \leq b_p \quad p = 1, 2, \dots, M \\
 & \lambda_j, \gamma_k \in [0, 1] \quad j = 1, 2, \dots, J \text{ ve } k = 1, 2, \dots, K \\
 & \sum_{j=1}^J w_j + \sum_{k=1}^K \beta_k = 1 \quad w_j, \beta_k \geq 0 \\
 & x_i \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, N
 \end{aligned} \tag{30}$$

4. Uygulama

Önerilen modelin etkinliği bir örnek uygulama üzerinde tartışılmıştır. En iyi yeşil tedarikçinin belirlenebilmesi için bir endüstri mühendisi, bir imalat müdürü ve bir akademisyenden oluşan üç kişilik bir komite oluşturulmuştur. Komite BÇADP modelinin çözümünde kullanılacak beş kriteri belirlemiştir. Bu kriterler: Maliyet, geç teslimat, CO₂ salınımı, kirlilik üretimi ve çevre dostu malzeme kullanımınıdır. Kriterler belirlendikten sonra alternatif beş yeşil tedarikçi belirlenmiş ve alternatif ağırlıklarının belirlenmesine geçilmiştir. Üç farklı uzman Tablo 1’de verilen dilsel değişkenler ölçeğini kullanarak beş kriter için Tablo 2’de verilen ikili karşılaştırma matrisini elde etmişlerdir.

Tablo 2. Kriterlere ait ikili karşılaştırma matrisi

| | Maliyet | Kirlilik üretimi | CO ₂ salınımı | Geç Teslimat | Çevre Dostu Malzeme Kullanımı |
|-------------------------------|------------------|------------------|--------------------------|------------------|-------------------------------|
| Maliyet | E, E, E | AS, VS, VS | E, E, E | SS, FS, FS | AS, VS, VS |
| Kirlilik üretimi | 1/AS, 1/VS, 1/VS | E,E,E | 1/FS,1/FS,1/FS | 1/SS, 1/VS, 1/VS | E, E, E |
| CO ₂ salınımı | E, E, E | FS, FS, FS | E,E,E | SS, SS, SS | SS, FS, FS |
| Geç Teslimat | 1/SS, 1/FS, 1/FS | SS, VS, VS | 1/SS, 1/SS, 1/SS | E, E, E | SS, SS, FS |
| Çevre Dostu Malzeme Kullanımı | 1/AS, 1/VS, 1/VS | E, E, E | 1/SS, 1/FS, 1/FS | 1/SS, 1/SS, 1/FS | E, E, E |

İkili karşılaştırma matrislerinin elde edilmesinden sonraki adımda her bir uzman için tutarlılık oranı Eşitlik (10) kullanılarak hesap edilmiş ve sırasıyla **0.08, 0.09** ve **0.10** hesap edilmiştir. Tutarlılık oranları **0.10**’a eşit ve daha küçük olduğu için karşılaştırma matrisleri tutarlı olarak kabul edilmiştir. Kriter ağırlıklarının elde etmek için uzmanların görüşleri birleştirilerek toplanmış aralık tip-2 bulanık değerlendirme matrisi elde edilmiştir. Daha sonra her bir kriterin bulanık geometrik ortalaması Eşitlik (12) kullanılarak hesap edilmiş ve Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. Kriterlerin bulanık geometrik ortalamaları

| Kriterler | Aralık tip-2 bulanık kümeler |
|-------------------------------|--|
| Maliyet | (2.31,2.68,3.25,3.48; 1,1)(2.39,2.75,3.19,3.43; 0,8,0,8) |
| Kirlilik üretimi | (0.29,0.32,0.39,0.46; 1,1)(0.30,0.32,0.38,0.44; 0,8,0,8) |
| CO ₂ salınımı | (1.44,1.91,2.63,2.94; 1,1)(1.55,1.99,2.56,2.88; 0,8,0,8) |
| Geç Teslimat | (0.65,0.85,1.33,1.79; 1,1)(0.69,0.89,1.27,1.67; 0,8,0,8) |
| Çevre Dostu Malzeme Kullanımı | (0.32,0.35,0.45,0.57; 1,1)(0.32,0.35,0.44,0.54; 0,8,0,8) |

Her bir kriterin bulanık ağırlıkları Eşitlik (14) ile hesap edilmiş ve Tablo 4’de verilmiştir. Eşitlik (15) kullanılarak kriterlerin kesin ağırlıklarının hesaplanması için durulaştırma işlemi gerçekleştirilir. Durulaştırılan kriter ağırlıklarının normalizasyonu ile Tablo 4’de verilen ağırlıklar elde edilir.

Tablo 4. Kriterlerin bulanık ağırlıkları

| Kriterler | Aralık tip-2 bulanık kümeler | Kesin değerler |
|-------------------------------|--|----------------|
| Maliyet | (0.25,0.33,0.53,0.69; 1,1)(0.27,0.35,0.51,0.65; 0,8,0,8) | 0.40 |
| Kirlilik üretimi | (0.03,0.04,0.06,0.09; 1,1)(0.03,0.04,0.06,0.08; 0,8,0,8) | 0.05 |
| CO ₂ salınımı | (0.16,0.24,0.43,0.59; 1,1)(0.17,0.25,0.41,0.55; 0,8,0,8) | 0.31 |
| Geç Teslimat | (0.07,0.11,0.22,0.36; 1,1)(0.08,0.11,0.20,0.32; 0,8,0,8) | 0.16 |
| Çevre Dostu Malzeme Kullanımı | (0.03,0.04,0.07,0.11; 1,1)(0.04,0.05,0.07,0.10; 0,8,0,8) | 0.05 |

Yukarıda belirtilen hesaplamalar sonucunda, beş temel kriter, Maliyet, geç teslimat, CO₂ salınımı, kirlilik üretimi ve çevre dostu malzeme kullanımı için ağırlıklar sırasıyla 0.40, 0.05, 0.31, 0.16 ve 0.05 olarak belirlenmiştir.

Kriterlerin ağırlıklarının belirlenmesinden sonra YTS’nde tedarikçi seçimi ve değerlendirilmesi, BÇADP modeli ile belirlenmiştir. Fabrikanın talebinin 250 ton, bütçesinin 10000 TL, geç teslim için üst sınır %40 (talebin en fazla %10’unun geç gelmesine izin verilmiştir), maksimum CO₂ salınımının 10000 (kg) ve ortalama kirlilik üretiminin 20000 (kg) olduğu varsayımı altında beş tedarikçi değerlendirmeye alınmıştır. Çevre dostu malzeme kullanımının değerleri için (1 – 10) arasında ölçek kullanılmış ve değerler komiteye sorularak elde edilmiştir. Model ile ilgili diğer veriler Tablo 5’de belirtildiği gibidir.

Tablo 5. Tedarikçilere ait veriler

| Tedarikçi | Maliyet | Kirlilik üretimi (kg) | CO ₂ salınımı (kg) | Geç Teslimat (Yüzde) | Çevre Dostu Malzeme Kullanımı | Karbon Kapasitesi | Üretim Kapasitesi (kg) |
|-----------|---------|-----------------------|-------------------------------|----------------------|-------------------------------|-------------------|------------------------|
| 1 | 25 | 103 | 2.757 | 0.09 | 7 | 478.427 | 250 |
| 2 | 19 | 50 | 2.612 | 0.15 | 10 | 158.282 | 400 |
| 3 | 60 | 98 | 1.021 | 0.35 | 4 | 723.025 | 330 |
| 4 | 71 | 79 | 2.558 | 0.05 | 1 | 511.458 | 225 |
| 5 | 61 | 88 | 1.858 | 0.26 | 9 | 1067.937 | 550 |

Bu verilere göre BÇADP modeli aşağıdaki gibi oluşturulmuştur:

$$\text{Min } Z_1 = 25 \cdot x_1 + 19 \cdot x_2 + 60 \cdot x_3 + 71 \cdot x_4 + 61 \cdot x_5$$

$$\text{Min } Z_2 = 103 \cdot x_1 + 50 \cdot x_2 + 98 \cdot x_3 + 79 \cdot x_4 + 88 \cdot x_5$$

$$\text{Min } Z_3 = 2.757 \cdot x_1 + 2.612 \cdot x_2 + 1.021 \cdot x_3 + 2.558 \cdot x_4 + 1.858 \cdot x_5$$

$$\text{Min } Z_4 = 0.09 \cdot x_1 + 0.15 \cdot x_2 + 0.35 \cdot x_3 + 0.05 \cdot x_4 + 0.26 \cdot x_5$$

$$\text{Max } Z_5 = 7 \cdot x_1 + 10 \cdot x_2 + 4 \cdot x_3 + 1 \cdot x_4 + 9 \cdot x_5$$

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 \geq 250$$

$$x_1 \leq 250$$

$$x_2 \leq 400$$

$$x_3 \leq 330$$

$$\begin{aligned}
 x_4 &\leq 225 \\
 x_5 &\leq 550 \\
 25 \cdot x_1 + 19 \cdot x_2 + 60 \cdot x_3 + 71 \cdot x_4 + 61 \cdot x_5 &\leq 10000 \\
 0.09 \cdot x_1 + 0.15 \cdot x_2 + 0.35 \cdot x_3 + 0.05 \cdot x_4 + 0.26 \cdot x_5 &\leq 100 \\
 2.757 \cdot x_1 + 2.612 \cdot x_2 + 1.021 \cdot x_3 + 2.558 \cdot x_4 + 1.858 \cdot x_5 &\leq 10000 \\
 103 \cdot x_1 + 50 \cdot x_2 + 98 \cdot x_3 + 79 \cdot x_4 + 88 \cdot x_5 &\leq 20000 \\
 x_i &\geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, 5
 \end{aligned}$$

Öncelikle, yukarıda verilen BÇADP tedarikçi seçim problemi TADP modelini oluşturabilmek için ayrı ayrı çözümlenerek ilgili amaç fonksiyonlarının alt ve üst sınırları elde edilmiştir. Üyelik fonksiyonları Eşitlik (25) ve Eşitlik (26) kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 6’da verilmiştir. ATM Eşitlik (30) kullanılarak aşağıdaki gibi formüle edilmiştir. Buradaki TADP modelini oluşturabilmek için aralık tip-2 BAHP yönteminden elde edilen ağırlıklar kullanılmıştır.

Tablo 6. Üyelik fonksiyonları için veriler

| Amaç fonksiyonu | $\mu = 1$ | $\mu = 0$ |
|-----------------|-----------|-----------|
| Z_1 | 4750 | 10000 |
| Z_2 | 12500 | 20000 |
| Z_3 | 449.274 | 1044.8 |
| Z_4 | 22.942 | 65.905 |
| Z_5 | 4000 | 1410.728 |

Tedarikçi seçim problemi için kesin tek amaçlı doğrusal model aşağıda verilmiştir:

$$\text{Maksimum } 0.40 \cdot \lambda_1 + 0.05 \cdot \lambda_2 + 0.31 \cdot \lambda_3 + 0.16 \cdot \lambda_4 + 0.05 \cdot \lambda_5$$

$$\begin{aligned}
 \lambda_1 &\leq \mu_1(x) = \frac{10000 - (25 \cdot x_1 + 19 \cdot x_2 + 60 \cdot x_3 + 71 \cdot x_4 + 61 \cdot x_5)}{5250} \\
 \lambda_2 &\leq \mu_2(x) = \frac{20000 - (103 \cdot x_1 + 50 \cdot x_2 + 98 \cdot x_3 + 79 \cdot x_4 + 88 \cdot x_5)}{7500} \\
 \lambda_3 &\leq \mu_3(x) = \frac{1044.8 - (2.757 \cdot x_1 + 2.612 \cdot x_2 + 1.021 \cdot x_3 + 2.558 \cdot x_4 + 1.858 \cdot x_5)}{595.526} \\
 \lambda_4 &\leq \mu_4(x) = \frac{65.905 - (0.09 \cdot x_1 + 0.15 \cdot x_2 + 0.35 \cdot x_3 + 0.05 \cdot x_4 + 0.26 \cdot x_5)}{42.963} \\
 \lambda_5 &\leq \mu_5(x) = \frac{(7 \cdot x_1 + 10 \cdot x_2 + 4 \cdot x_3 + 1 \cdot x_4 + 9 \cdot x_5) - 1410.728}{2589.727}
 \end{aligned}$$

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 \geq 250$$

$$x_1 \leq 250$$

$$x_2 \leq 400$$

$$x_3 \leq 330$$

$$x_4 \leq 225$$

$$x_5 \leq 550$$

$$25 \cdot x_1 + 19 \cdot x_2 + 60 \cdot x_3 + 71 \cdot x_4 + 61 \cdot x_5 \leq 10000$$

$$0.09 \cdot x_1 + 0.15 \cdot x_2 + 0.35 \cdot x_3 + 0.05 \cdot x_4 + 0.26 \cdot x_5 \leq 100$$

$$2.757 \cdot x_1 + 2.612 \cdot x_2 + 1.021 \cdot x_3 + 2.558 \cdot x_4 + 1.858 \cdot x_5 \leq 10000$$

$$103 \cdot x_1 + 50 \cdot x_2 + 98 \cdot x_3 + 79 \cdot x_4 + 88 \cdot x_5 \leq 20000$$

$$x_i \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, 5$$

Tedarikçi seçim problemi için oluşturulan kesin tek amaçlı doğrusal model GAMS 24.0.1. kullanılarak çözülmüş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

$$\begin{aligned}
 \lambda_1 &= 1, \lambda_2 = 0.661, \lambda_3 = 0.658, \lambda_4 = 1, \lambda_5 = 0.421 \\
 Z_1 &= 4750, Z_2 = 37.5, Z_3 = 653, Z_4 = 125000, Z_5 = 2500 \\
 x_2 &= 250
 \end{aligned}$$

Elde edilen sonuçları karşılaştırabilmek için, tedarikçi seçim problemi Buckley (1985)’in tip-1 bulanık AHP yöntemi ile çözülmüştür. Tip-1 bulanık kümeler ile elde edilen sonuçlar Tablo 7’de verilmiştir. Tip-1 BAHP ve Tip-2 BAHP yöntemlerinde elde edilen ağırlıkların kullanılması sonucunda, optimal Maliyet

4750 TL, Geç Teslimat miktarı 37.5 ton, CO_2 salınımı 653 kg, Kirlilik üretimi 125000 ton ve Çevre Dostu Malzeme Kullanımı derecesi 2500 birim elde edilmiştir. Amaçlara ulaşma seviyeleri veya karar vericilerin tatmin seviyeleri (λ_j)'ler her iki yöntemde de aynı elde edilmiştir. Tip-1 BAHP ve Tip-2 BAHP yöntemlerini kullanarak yeşil tedarikçi değerlendirmesi bu çalışmada yapılmıştır. Kriterlerin ağırlıklarına bakıldığında, kriterlerin sıralanması Maliyet > CO_2 salınımı > Geç Teslimat > Kirlilik üretimi > Çevre Dostu Malzeme Kullanımı olarak elde edilmiştir.

Tablo 7. Tip-1 ve tip-2 BAHP yöntemlerine göre sonuçların karşılaştırılması

| | Tip-1 BAHP | | Tip-2 BAHP | |
|-------------|------------|----------|------------|----------|
| | Ağırlıklar | Sıralama | Ağırlıklar | Sıralama |
| C1 | 0.4542 | 1 | 0.40 | 1 |
| C2 | 0.0572 | 5 | 0.05 | 4 |
| C3 | 0.3542 | 2 | 0.31 | 2 |
| C4 | 0.1954 | 3 | 0.16 | 3 |
| C5 | 0.0673 | 4 | 0.05 | 4 |
| x_1 | – | | – | |
| x_2 | 250 | | 250 | |
| x_3 | – | | – | |
| x_4 | – | | – | |
| x_5 | – | | – | |
| λ_1 | 1 | | 1 | |
| λ_2 | 0.661 | | 0.661 | |
| λ_3 | 0.658 | | 0.658 | |
| λ_4 | 1 | | 1 | |
| λ_5 | 0.421 | | 0.421 | |
| Z_1 | 4750 | | 4750 | |
| Z_2 | 37.5 | | 37.5 | |
| Z_3 | 653 | | 653 | |
| Z_4 | 125000 | | 125000 | |
| Z_5 | 2500 | | 2500 | |

5. Sonuç

Tedarikçilerden malzemeleri (ham madde, parça, yarı mamul vb.) müşterilere doğru zamanda ve doğru miktarda ulaştırmayı amaçlayan tedarik zinciri yönetiminin en önemli aşamalarından birisi tedarikçi seçimidir. Özellikle küreselleşme ve artan müşteri bilincinin etkisiyle satın alma işlevi yeni bir boyut kazanmıştır. Tedarikçi seçiminde fiyat, kalite gibi kriterlerin yerine çevresel etkilerin göz önüne alınması YTS kavramını ortaya çıkarmış ve böylece yeşil kriterler tedarikçi seçimine entegre edilmiştir.

Bu çalışmada, YTS problemi için iki aşamadan oluşan entegre bir model önerilmiştir. İlk aşamada, karar vericilerin yargılarındaki tercihleri daha iyi açıklayabilmek için tip-2 BAHP yönteminden yararlanılmıştır. İkinci aşamada ise ilk aşamada elde edilen ağırlıklar BÇADP modelinde kullanılarak TADP modeli elde edilmiştir. Önerilen model, en iyi tedarikçi seçiminin yanı sıra tedarikçi seçiminde etkili olan kriterlerin sıralanmasının da elde edilmesine imkân sağlamıştır.

Gelecekteki çalışmalarda YTS'nde etkili olan yeni kriterler eklenerek model genişletilebilir. Aynı zamanda oluşturulan modelde bazı parametreler (kapasite, talep vb.) tip-1 ve/veya tip-2 bulanık kümelerle

ele alınıp modeldeki belirsizlikler daha iyi yansıtılabilir. Önerilen tedarikçi seçimi problemi sistematik yaklaşım sağladığı için karar problemlerine kolayca uygulanabilir.

Kaynakça

- Amid, A., Ghodsypour, S.H., & O'Brien, C. (2006). "Fuzzy Multiobjective Linear Model for Supplier Selection in a Supply Chain", International Journal of Production Economics, 104, 394-407.
- Amid, A., Ghodsypour, S.H., & O'Brien, C. (2009). "A Weighted Additive Fuzzy Multiobjective Model for The Supplier Selection Problem under Price Breaks in a Supply Chain", International Journal of Production Economics, 121, 323-332.
- Amid, A., Ghodsypour, S.H., & O'Brien, C. (2011). "A Weighted Max-Min Model for Fuzzy Multi-Objective Supplier Selection in a Supply Chain", International Journal of Production Economics, 131, 139-145.
- Bhardwaj, B.R. (2016). "Role Of Green Policy On Sustainable Supply Chain Management: A Model for Implementing Corporate Social Responsibility (CSR)", Benchmarking: An International Journal, 23, 456-468.
- Buckley, J.J. (1985). "Fuzzy Hierarchical Analysis", Fuzzy Sets and Systems, 17, 233-247.
- Büyüközkan, G. (2012). "An Integrated Fuzzy Multi-Criteria Group Decision-Making Approach for Green Supplier Evaluation", International Journal of Production Research, 50, 2892-2909.
- Büyüközkan, G., & Çifçi, G. (2012). "A Novel Hybrid MCDM Approach Based on Fuzzy Dematel, Fuzzy ANP and Fuzzy TOPSIS to Evaluate Green Suppliers", Expert Systems with Applications, 39, 3000-3011.
- Chen, S.-M., & Lee, L.-W. (2010). "Fuzzy Multiple Attributes Group Decision-Making Based on The Ranking Values and The Arithmetic Operations of Interval Type-2 Fuzzy Sets", Expert Systems with Applications, 37, 824-833.
- Chung, C.-C., Chao, L.-C., & Lou, S.-J. (2016). "The Establishment of A Green Supplier Selection and Guidance Mechanism with The ANP and IPA", Sustainability, 8, 259.
- Fahimnia, B., Sarkis, J., & Davarzani, H. (2015). "Green Supply Chain Management: A Review and Bibliometric Analysis", International Journal of Production Economics, 162, 101-114.
- Fallahpour, A., Olugu, E.U., Musa, S.N., Khezrimotlagh, D., & Wong, K.Y. (2016). "An Integrated Model for Green Supplier Selection Under Fuzzy Environment: Application of Data Envelopment Analysis and Genetic Programming Approach", Neural Computing and Applications, 27, 707-725.
- Feyzioglu, O., & Büyüközkan, G. (2010). "Evaluation of Green Suppliers Considering Decision Criteria Dependencies", in: Ehr Gott, M., Naujoks, B., Stewart, J.T., Wallenius, J. (Eds.), Multiple Criteria Decision Making for Sustainable Energy and Transportation Systems: Proceedings of the 19th International Conference on Multiple Criteria Decision Making, Auckland, New Zealand, 7th - 12th January 2008. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 145-154.
- Govindan, K., & Sivakumar, R. (2016). "Green Supplier Selection and Order Allocation in A Low-Carbon Paper Industry: Integrated Multi-Criteria Heterogeneous Decision-Making and Multi-Objective Linear Programming Approaches", Annals of Operations Research, 238, 243-276.
- Hosseini, S., & Khaled, A.A. (2016). "A Hybrid Ensemble and AHP Approach for Resilient Supplier Selection", Journal of Intelligent Manufacturing, 1-22.
- Igarashi, M., De Boer, L., & Fet, A.M. (2013). "What is Required for Greener Supplier Selection? A Literature Review and Conceptual Model Development", Journal of Purchasing and Supply Management, 19, 247-263.
- Kahraman, C., Öztayşi, B., Uçal Sarı, İ., & Turanoğlu, E. (2014). "Fuzzy Analytic Hierarchy Process with Interval Type-2 Fuzzy Sets", Knowledge-Based Systems, 59, 48-57.
- Kannan, D., Khodaverdi, R., Olfat, L., Jafarian, A., & Diabat, A. (2013). "Integrated Fuzzy Multi Criteria Decision Making Method and Multi-Objective Programming Approach for Supplier Selection and Order Allocation in A Green Supply Chain", Journal of Cleaner Production, 47, 355-367.
- Mendel, J.M., John, R.I., & Liu, F. (2006). "Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems Made Simple", IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 14, 808-821.
- My Dung, T.T., Luan, N.M., & Quoc, L.H. (2016). "The Analytic Approach Applications in Green Supplier Selection: A Literature Review", ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 11, 6754-6762.
- Seuring, S., & Müller, M. (2008). "From A Literature Review to A Conceptual Framework for Sustainable Supply Chain Management", Journal of Cleaner Production, 16, 1699-1710.

Shahryari Nia, A., Olfat, L., Esmaceli, A., Rostamzadeh, R., & Antuchevičienė, J. (2016). “Using Fuzzy Choquet Integral Operator for Supplier Selection With Environmental Considerations”, *Journal of Business Economics and Management*, 17, 503-526.

Shaw, K., Shankar, R., Yadav, S.S., & Thakur, L.S. (2012). “Supplier Selection Using Fuzzy AHP and Fuzzy Multi-Objective Linear Programming for Developing Low Carbon Supply Chain”, *Expert Systems with Applications*, 39, 8182-8192.

Srivastava, S.K. (2007). “Green Supply-Chain Management: A State-Of-The-Art Literature Review”, *International Journal of Management Reviews*, 9, 53-80.

Taticchi, P., Tonelli, F., & Pasqualino, R. (2013). “Performance Measurement of Sustainable Supply Chains: A Literature Review and A Research Agenda”, *International Journal of Productivity and Performance Management*, 62, 782-804.

Tiwari, R.N., Dharmar, S., & Rao, J.R. (1987). “Fuzzy Goal Programming - An Additive Model”, *Fuzzy Sets and Systems*, 24, 27-34.

Zadeh, L.A. (1975). “The Concept of A Linguistic Variable and Its Application to Approximate Reasoning—P”, *Information Sciences*, 8, 199-249.

Zhang, X., Xu, Z., & Xing, X. (2016). “Hesitant Fuzzy Programming Technique for Multidimensional Analysis of Hesitant Fuzzy Preferences”, *OR Spectrum*, 38, 789-817.

Zimmer, K., Fröhling, M., & Schultmann, F. (2016). “Sustainable Supplier Management - A Review of Models Supporting Sustainable Supplier Selection, Monitoring and Development”, *International Journal of Production Research*, 54, 1412-1442.

Zimmermann, H.J. (1978). “Fuzzy Programming and Linear Programming with Several Objective Functions”, *Fuzzy Sets and Systems*, 1, 45-55.