

## Karma-tamsayılı iki aşamalı veri zarflama analizi modeli ile en etkin tedarikçi seçimi

### The most efficient supplier selection with mixed-integer two-stage data envelopment analysis model

Volkan Soner ÖZSOY<sup>1\*</sup>, Mediha ÖRKÜ<sup>2</sup>, Hasan ÖRKÜ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Finans-Bankacılık ve Sigortacılık Bölümü, Ortaköy Meslek Yüksekokulu, Aksaray Üniversitesi, Aksaray, Türkiye.  
volkansonerozsoy@aksaray.edu.tr

<sup>2</sup>Matematik Bölümü, Fen Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye.  
medihaakcay@gazi.edu.tr

<sup>3</sup>İstatistik Bölümü, Fen Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye.  
hhorkcu@gazi.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 16.09.2019  
Kabul Tarihi/Accepted: 28.11.2019

Düzeltilme Tarihi/Revision: 28.10.2019

doi: 10.5505/pajes.2019.77527  
Araştırma Makalesi/Research Article

#### Öz

Tedarikçi seçimi tedarik zinciri yönetiminde en önemli stratejik konulardan biridir ve bir organizasyonda kilit bir rol oynar. Uygun bir tedarikçi seçmek satın alma departmanının en önemli kararlarından biridir ve bu karar genellikle çeşitli kriterlere dayanır. Bu çalışmada iki aşamalı üretim süreci olarak ifade edilen bir tedarik zinciri yapısında girdi, ara ürün ve çıktı ile birlikte en iyi (en etkin) tedarikçiyi değerlendirmek ve seçmek için karma-tamsayılı bir Veri Zarflama Analizi modeli önerilmiştir. Hem plastik ambalaj kayışı endüstrisindeki firmaların hem de reçine üreten firmaların tedarikçilerinin seçilmesi probleminde önerilen model uygulanmış ve modelin performansı diğer çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar önerilen karma tamsayılı iki aşamalı modelin karar vericinin tedarikçi seçimini kolaylaştırdığı göstermektedir.

**Anahtar kelimeler:** Tedarikçi seçimi, İki aşamalı üretim sistemi, Veri zarflama analizi, En etkin tedarikçi seçimi.

#### Abstract

Supplier selection is one of the most important strategic issues in supply chain management and plays a key role in an organization. Selecting a suitable supplier is one of the most important decisions of the purchasing department, and this decision is usually based on various criteria. In this study, a mixed-integer data envelopment analysis model is proposed to evaluate and select the best (most efficient) supplier with input, intermediate and output in a supply chain structure expressed as a two-stage production process. The proposed model was applied to the problem of selecting the suppliers of both the plastic packing strap industry and the suppliers of the resin manufacturers and the performance of the model was compared with the other studies. The results show that the proposed mixed-integer two-stage model facilitates the decision-maker's choice of supplier.

**Keywords:** Supplier selection, Two-stage production system, Data envelopment analysis, The most efficient supplier.

## 1 Giriş

Firmaların artan rekabet ortamında varlıklarını sürdürebilmek amacıyla uygun tedarikçilerle çalışmaları gerekmektedir ve bu noktada tedarikçi seçimi firmalar açısından çok önemli bir karar verme problemi olarak ortaya çıkmaktadır. Tedarikçi seçimi problemi en basit ifade ile üretim için gerekli hammaddelerin, yarı mamul ve diğer malzemelerin kimden ve ne kadar alınacağıının belirlenmesi olarak tanımlanabilir [1],[2]. Tedarik zinciri, malzemelerin sağlanması, bu malzemelerin ara ürünlerin ve tamamlanmamış ürünlerin müşterilere dağıtım işlevlerini yerine getiren bir şebekedir. Tedarik zinciri hammadde kaynağından son tüketicilere kadar olan süreçte üretilen ürün ve hizmetlerin daha yüksek katma değer sağlayacak şekilde gerçekleştirilmesi için yapılan faaliyetlerin tamamını kapsamaktadır. Firma, ihtiyaçlarını sürekli ve kabul edilebilir bir maliyetle karşılamak için en iyi tedarikçiyi bulmayı amaçlarken tedarik zinciri ise o ihtiyaçları düşük maliyet ile sağlamak için malzeme, ürün, bilgi ve finansal akışları koordine ederek firmanın karlılığını arttırmayı amaçlamaktadır. Tedarikçi seçimi bir organizasyonda kilit bir rol oynar, çünkü hammadde maliyeti nihai ürünün temel maliyetini oluşturur. Tipik bir üretici toplam satışlarının %

60'ını hammaddeler, parçalar, alt montajlar ve bileşenler gibi satın alınan ürünlere harcadığı, otomotiv endüstrisinde, bu maliyetlerin toplam gelirin % 50'sinden fazla olduğu ve yüksek teknoloji firmaları için ise toplam ürün maliyetlerinin % 80'ine kadar çıkabildiği ifade edilmektedir [3].

Tedarikçi seçimi probleminin çözümü için birçok yöntem önerilmiştir. Analitik hiyerarşi süreci (AHS), yapay zeka (YZ), analitik ağ süreci (AAS), doğrusal programlama (DP), çok amaçlı programlama, veri zarflama analizi (VZA), yapay sinir ağları (YSA) ve bulanık küme teorisi (BKT) bu problemin çözümü için önerilen yöntemler olarak sayılabilirler. Kilincci ve Onal [4], Türkiye'deki bir çamaşır makinesi şirketi için en iyi tedarikçiyi seçmek için bulanık bir AHS temelli bir yöntem önermiştir. Sevkli ve diğ. [5] tedarikçi seçimi probleminin çözümü için VZA ve AHS metodolojilerini uygulamışlardır. Lin ve diğ. [6], tedarikçi seçimi süreci için TOPSIS ve ANP yöntemlerinden bir hibrid yöntem önermişlerdir. Güneri ve diğ. [7] tedarikçi seçim problemi için uyarlanabilir nöro-bulanık çıkarım sistemine dayanan yeni bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Tedarikçi değerlendirme ve seçimi için kapsamlı bir literatür çalışması olarak Soheilrad ve diğ. [8]'e bakılabilir.

Son yıllarda, VZA tedarik zinciri yönetimini değerlendirmek için önemli bir araç haline gelmiştir. Charnes ve diğ. [9]

\*Yazışılan yazar/Corresponding author

tarafından geliştirilen VZA yöntemi karar verme birimlerinin (KVB) çoklu girdi ve çıktılarının varlığında KVB'nin etkinliğini değerlendirmek ve KVB'leri karşılaştırmak için kullanılan ve çok popüler parametrik olmayan bir yöntemdir. Son on yılda, VZA hem metodolojide hem de uygulamada önemli bir gelişme kaydetmiştir ve sistemlerin performansını değerlendirmek için önemli bir yönetim aracı haline gelmiştir. VZA yöntemi tedarik zinciri yönetiminde de başarıyla uygulanmaktadır. Easton ve diğ. [10] çalışmalarında petrol endüstrisindeki firmaların satın alma etkinliğini karşılaştırmak üzere bir VZA modeli geliştirmişlerdir. Çelebi ve Bayraktar [11], tedarikçi değerlendirmesi için YSA ve VZA'ya dayalı yeni bir yaklaşım sunmuşlardır ve bu yöntemin getirdiği yenilik gerçek hayat problemlerinde sıklıkla görülen değerlendirme niteliklerindeki eksik bilgi durumunda çalışabilmesidir. Saen [3], hem istenmeyen çıktılarını hem de aynı anda kesin olmayan verileri dikkate alan bir VZA metodolojisi önermiştir ve tedarikçi seçim problemlerine uygulamıştır. Zeydan ve diğ. [12], tedarikçi seçimi yönetiminde kalite yönetimi, hata oranı, kalite yönetim sistemi denetimi ve garanti maliyeti oranı çıktı değişkenlerini kullanarak VZA, bulanık AHP ve TOPSIS yöntemlerinin bir entegrasyonu ile değerlendirmiştir. Bu çalışmanın sonuçları önerilen modelin tedarik zinciri yönetiminde, ürünün ve sürecin ömrünü uzatabildiğini, döngü süresini azaltabildiğini, karlılığı artırabildiğini ve kuruluşların israfını azaltabildiğini göstermiştir. Ribeiro Soriano ve diğ. [13], VZA'yı ticaret farklarını, lojistik altyapısını ve sosyal - çevresel eşitlik faktörlerini dikkate alarak ülke düzeyindeki etkinliklerin hesaplanmasında kullanmışlardır. Bu çalışmanın bulguları analizin ülkeye ticaret ve lojistik performansı, çevresel ve sosyal eşitlik konularında yardımcı olabileceğini göstermiştir. Karsak ve Dursun [14], kalite fonksiyon yayılımı ve VZA'yı entegre ederek tedarikçi seçimi için yeni bir bulanık çok kriterli karar verme yöntemi önermişlerdir. Egilmez ve diğ. [15], tedarik zinciri sürdürülebilirlik değerlendirmesi uygulaması olarak Amerika Birleşik Devletleri'nin gıda imalat sektörlerinin performansını incelemesini tek aşamalı VZA modeli ile incelemişlerdir. Azadi ve diğ. [16], yeşil tedarik zinciri yönetiminde toplu taşıma hizmet sağlayıcılarının performanslarını iki farklı VZA yaklaşımı ile incelemişlerdir. Bu çalışmanın sonuçları, sunulan yaklaşımların ulaştırma hizmeti sağlayıcılarının kapasite kullanımında etkin olmalarını sağladığını ortaya koymuştur. Mirhedayatian ve diğ. [17], bulanık veriye ve istenmeyen çıktılara dayanan yeni bir VZA yaklaşımı ile ekonomik ve çevresel performansını arttırmak için bir yeşil tedarik zinciri yönetimini değerlendirmiştir. Bu çalışmanın sonuçları, şirketlerin yöneticilerinin yeşil tedarik zinciri yönetimini ekonomik ve çevre performansına dayalı olarak değerlendirebileceğini ortaya koymuştur. Khodakarami ve diğ. [18] reçine işletmelerinde tedarik zinciri sürdürülebilirliği için iki aşamalı VZA modeli ile incelemişlerdir. Bu makalenin sonuçları, sunulan modelin yatırımcılar tarafından uzun vadeli yeşil yatırımları değerlendirmek için uygun bir teknik olabileceğini ortaya koymuştur. Tajbakhsh ve Hassini [19], iş ortaklarında tedarik zinciri sürdürülebilirliğini değerlendirmek için çok aşamalı VZA modeli önermiştir. Bu çalışma, ekonomik getirileri arttırmak, sosyal beklentileri karşılamak ve çevresel etkileri azaltmak için tedarik zinciri operasyonlarını değerlendirmiştir. Bu çalışmanın bulguları, sürdürülebilirlik performansının iyileştirilmesi için perakendeci kademesine (aşamasına) daha fazla dikkat edilmesi gerektiğini göstermiştir. Shi ve diğ. [20], sürdürülebilir tedarik zinciri tedarikçi seçiminde yeşil tedarikçileri değerlendirmek için Charnes ve diğ. [9] tarafından

önerilen ve isimlerinin baş harfleri ile anılan CCR (Charnes-Cooper-Rhodes) modelini kullanmıştır. Bu çalışmanın sonuçları, indeks sistem değerlendirmesi ve yaklaşımlarının kolayca işletilebileceğini, uygulanabilir ve uygun olduğunu göstermiştir. Shabani ve Farzipoor Saen [21], yeşil tedarik zincirinin kıyaslanması için VZA ile PERT/CPM (Program Değerlendirme Gözden Geçirme Tekniği/Kritik Yol Yöntemi) tekniği ile birleştirmiştir. Mahdilo ve diğ. [22], istenmeyen çıktı durumunu dikkate alan yeni bir VZA modeli önerdiler ve yeni modeli Güney Kore'deki Hyundai Steel Company tedarikçilerinin teknik, çevresel ve eko-etkinlik ölçümünde kullanmışlardır. Ji ve diğ. [23], Pareto optimal çözümlerini bulmak için doğrusal olmayan modelin inşası için VZA'ya dayalı bir yaklaşım geliştirmiştir. Önerilen yaklaşım ile ulaşım alanında sürdürülebilir tedarik zinciri yönetiminin ekotasarımı incelenmiştir. ZARBakhshnia ve Jaghdani [24], en iyi sürdürülebilir tedarikçiyi değerlendirmek ve seçmek için kontrol edilemeyen girdiler ve istenmeyen çıktılarının varlığında iki aşamalı VZA modelini önermişlerdir.

Klasik CCR (Charnes ve diğ. [9]) ve varyasyonları KVB'lerin iç yapısını görmezden gelir ve her KVB'yi çıktı üretmek için girdi kullanan bir "kara kutu (black-box)" olarak görür. KVB'lerin iç yapısını dikkate almamak, yanıltıcı sonuçlar doğurabilir, yani sistem etkin olsa da, sistemin tüm alt aşamaları etkin olmayan durumda olabilir. Son zamanlarda, KVB'lerin iç ağ yapıları ile modellenmesi VZA çalışmalarında önemli bir araştırma alanı olmuştur. Tek aşamalı süreçle yapılan geleneksel VZA çalışmalarının aksine, iki aşamalı işlemler veya genel olarak ağ yapılarının analizi, KVB'lerin iç yapısının performans değerlendirmesini iki aşamalı modelleme ile incelemeyi mümkün kılar. İki aşamalı süreçlerde VZA ile performans ölçümü için çeşitli alanlarda uygulama alanı bulmuştur: Chen ve Zhu [25] bilgi teknolojisinde, Wanke ve Barros [26] ve Wang ve diğ. [27] bankacılık sektöründe, Premachandra ve diğ. [28] yatırım fonlarında, Kao ve Hwang [29] ve Chen ve diğ. [30] sigorta şirketlerinde ve Moreno ve Lozano [31] ve Li ve diğ. [32] spor alanında iki aşamalı VZA ile ilgili önemli çalışmalarıdır.

Birçok alanda olduğu gibi tedarik zinciri yönetiminde de KVB'lerin sıralanması ve en etkin KVB'nin belirlenmesi çok önemli problemlerdir. Çapraz etkinlik [33], süper etkinlik [34] ve bu yöntemlerin uzantıları KVB'lerin sıralanması için VZA çalışmalarında önemli bir yere sahiptir. İki aşamalı üretim süreçlerinde, KVB'lerin alt aşamalarda ve sistemin bütününde sıralanması ve en etkin KVB'nin belirlenmesi tek aşamalı süreçlere benzer bilimsel bir zorluktur. Klasik tek aşamalı VZA çalışmalarında en etkin KVB'yi bulmak için çeşitli VZA yaklaşımları önerilmiştir. Amin ve Toloo [35], en etkin KVB'yi bulmak için karma-tamsayılı doğrusal programlama modeli önermiştir. Amin [36] daha sonra Amin ve Toloo [35] modelinin birden fazla etkin KVB verebileceğini göstermiş ve karma-tamsayılı doğrusal olmayan modeli önermiştir. Foroughi [37], en etkin KVB'yi bulmak için bir karma-tamsayılı doğrusal programlama modeli önermiştir. Wang ve Jiang [38], Foroughi [37] modelinin çok karmaşık olduğunu ve birçok gereksiz kısıtlamayı içerdiğini göstermiştir ve en etkin KVB'yi bulmak için bir karma-tamsayılı doğrusal programlama modeli önermişlerdir. Toloo [39], Wang ve Jiang [38] modelinin bir minimax versiyonunu önermiştir. Bununla birlikte, iki aşamalı VZA modellemesinde KVB'lerin sıralanması ve en etkin KVB'nin belirlenmesi problemi ile ilgili çok az çalışma mevcuttur. Liu ve diğ. [40] ve Liu ve Lu [41] ağ yapı sistemlerini sıralayabilmek için girdi/çıktı kombinasyonlarındaki bilgileri kullanarak bir yaklaşım önermiştir. Seiford ve Zhu'nun [42] yöntemini

kullanarak Liu ve Lu [41] iki aşamalı üretim birimlerinin sıralanması için bir model önermiştir.

Bu çalışmanın temel amacı, iki aşamalı VZA modellerinde en etkin KVB'yi belirlemek ve iki aşamalı olarak ifade edilen tedarik zinciri yönetiminde kullanmaktır. Wang ve Jiang [38]'in tek aşamalı süreçler için karma-tamsayı programlama yaklaşımına dayanan bu çalışma, iki aşamalı tedarik zincir yönetiminde en etkin tedarikçinin belirlenmesinde yeni bir VZA yaklaşımı sunmaktadır. Çalışmanın ikinci bölümünde iki aşamalı VZA üretim sistemi ve modellemesi sunulmaktadır. Bölüm 3'de, iki aşamalı üretim sistemleri için en etkin KVB'yi belirlemek üzere önerilen karma-tamsayı programlama modeli yer almaktadır. Bölüm 4'te ise önerilen yöntemin tedarikçi seçimindeki potansiyel uygulamalarını göstermek için literatürden alınan iki sayısal örneğin çözümleri yer almaktadır. Son olarak, Bölüm 5'de sonuçlar ve gelecekteki çalışmalar için bazı öneriler yer almaktadır.

## 2 İki aşamalı üretim sistemi

VZA, çoklu girdi ve çıktılara sahip KVB'lerin göreceli etkinliğini ölçmek ve karşılaştırmak için geliştirilmiş doğrusal programlama tabanlı popüler bir yaklaşımdır. VZA yöntemi ile etkin çalışan birimler belirlenebildiği gibi, etkin olmayan birimler için de girdilerindeki fazlalıkları ve çıktılarındaki eksiklikleri belirleyerek performans seviyelerini nasıl artırabilecekleri hususunda karar vericilere yol gösterebilir. Bir KVB'nin etkinlik değeri çıktı değerinin girdi değerine oranı olarak tanımlanabilir ve bu değer en fazla 1 ile sınırlandırılmıştır.  $m$  girdilerin sayısını ve  $s$  çıktıların sayısını göstermek üzere  $x_{ij}$  ( $i = 1, \dots, m$ ) ve  $y_{rj}$  ( $r = 1, \dots, s$ ) sırasıyla  $KVB_j$  ( $j = 1, \dots, n$ ) için girdi ve çıktı değerlerini temsil etmektedir. Her  $KVB$ 'nin  $x_{ij}$  girdilerini kullanıp  $y_{rj}$  çıktılarını ürettiği varsayılmaktadır.  $u_r$  ve  $v_i$ ,  $r$ -inci çıktı ve  $i$ -nci girdiye atanan ağırlık olmak üzere  $KVB_k$  için etkinlik değeri  $E_k = \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rk}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ik}}$  ile hesaplanır.

$k$ -ıncı birim için temel CCR modeli (1) ile verilmektedir.

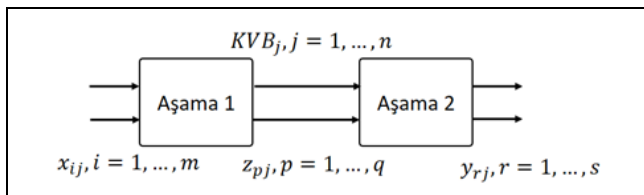
$$E_k = \max \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rk}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ik}}$$

Kısıtlar:

$$\frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \leq 1, \quad j = 1, \dots, n \quad (1)$$

$$u_r, v_i \geq 0; \quad r = 1, \dots, s; \quad i = 1, \dots, m$$

Bununla birlikte, çoğu üretim süreci Şekil 1'de verilen iki aşamalı bir üretim süreci yapısında olabilir. Burada  $x_{ij}$ , ( $i = 1, \dots, m$ ),  $z_{pj}$ , ( $p = 1, \dots, q$ ) ve  $y_{rj}$ , ( $r = 1, \dots, s$ ) sırasıyla girdiler, ara ürünler ve çıktıları simgelemektedir. Her  $KVB$  ilk aşamada girdileri ( $x_{ij}$ ) kullanır ve çıktılar ( $z_{pj}$ ) üretir. İlk aşamadaki bu çıktılar ikinci aşamadaki girdiler ( $z_{pj}$ ) haline gelir. Bu nedenle, ikinci aşama bu ilk aşama çıktıları kendi çıktıları için kullanır ( $y_{rj}$ ).



Şekil 1. İki aşamalı sistemin gösterimi.

Figure 1. Demonstration of the two-stage system.

İki aşamalı üretim sürecini dikkate alan çok çeşitli uygulamalar yapılmıştır. Örneğin, bankacılık işlemleri iki aşamalı olarak değerlendirilirse, aşamalar karlılık ve pazarlanabilirlik olarak adlandırılabilir. Bankalar genellikle karlılık aşamasında mevduat üretmek için emek ve varlıkları, kredi geliri elde etmek için kullanılan mevduatları kullanmaktadır [25]. Seiford ve Zhu [42] ABD ticari bankalarının performansını bankacılık işlemleri karlılığı ve pazarlanabilirlik alt aşamalarında değerlendirebilmek için iki aşamalı VZA modellemesini kullanmıştır. Bu çalışmada, karlılığı değerlendirirken işgücü ve varlıklar girdi olarak alınmış, kâr ve gelirler çıktı olarak. Pazarlanabilirlik için ikinci aşamada, kâr ve gelir çıktı olarak, piyasa değeri, hisse başına kazanç ve getiri çıktı olarak kullanılmıştır. Kao ve Hwang [29], bazı Tayvan hayat dışı sigorta şirketlerini iki aşamalı prim kazanımı ve kar elde etme süreci ile ölçmüşlerdir. İlk aşama sigortanın pazarlanması ile karakterize edilirken, ikinci aşama yatırım ile karakterize edilmiştir.

Kao ve Hwang [29],[43] tarafından önerilen ve iki alt aşamının da beraber değerlendirildiği model (2) ile verilmektedir. Bu modelden önce yapılan iki aşamalı VZA çalışmaları iki aşamayı ayrı ayrı tek aşamalı modeller ile çözerek etkinlikler elde etme üzerine kuruluydular.

İki aşamalı sistemler için  $k$ -ıncı  $KVB$ 'nin genel sistem ve alt aşama etkinliklerini ölçmek için, toplam çıktının toplam girdiye eşit veya daha az olmasını gerektiren kısıtlama ile tanımlandığı (1) ile verilen temel CCR modeli gibi, Kao ve Hwang [29],[43] ilişkisel modeli, iki alt aşama için etkinlik skorlarının da 1'e eşit veya daha küçük olmasını sağlamaktadır.

$$E_k = \max \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rk}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ik}}$$

Kısıtlar

$$\frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \leq 1 \quad j = 1, \dots, n$$

$$\frac{\sum_{p=1}^q w_p z_{pj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \leq 1 \quad j = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$\frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}}{\sum_{p=1}^q w_p z_{pj}} \leq 1 \quad j = 1, \dots, n$$

$$u_r, v_i, w_p \geq \varepsilon, \quad i = 1, \dots, m$$

$$r = 1, \dots, s \quad p = 1, \dots, q$$

Bu kesirli programlama problemi, Charnes ve Cooper [44] dönüşümü ile doğrusal programlama problemine (3)'de verildiği gibi dönüştürülebilir.

$$E_k = \max \sum_{r=1}^s u_r y_{rk}$$

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{ik} = 1$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0 \quad j = 1, \dots, n$$

$$\sum_{p=1}^q w_p z_{pj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0 \quad j = 1, \dots, n \quad (3)$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{p=1}^q w_p z_{pj} \leq 0 \quad j = 1, \dots, n$$

$$u_r, v_i, w_p \geq \varepsilon, \quad i = 1, \dots, m$$

$$r = 1, \dots, s \quad p = 1, \dots, q$$

Üçüncü ve dördüncü kısıtlamaların toplamı, her KVB için ikinci kısıtlamaya eşit olduğundan, ikinci kısıtlama grubu gereksizdir ve ihmal edilebilir.  $u_r^*, v_i^*, w_p^*$  optimal çözümü elde edildiğinde, sistem etkinliği ve iki alt aşamanın etkinlikleri sırasıyla aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanır.

$$E_k^s = \sum_{r=1}^s u_r^* y_{rk} / \sum_{i=1}^m v_i^* x_{ik},$$

$$E_k^1 = \sum_{p=1}^q w_p^* z_{pk} / \sum_{i=1}^m v_i^* x_{ik},$$

ve

$$E_k^2 = \sum_{r=1}^s u_r^* y_{rk} / \sum_{p=1}^q w_p^* z_{pk}.$$

Açıkça, sistem etkinliği iki alt sürecin etkinliğinin çarpımıdır:  $E_k^s = E_k^1 \times E_k^2$ .

### 3 En iyi tedarikçinin bulunması için önerilen model

Bu çalışmada, iki aşamalı süreçlerde (ayrıca alt aşamalarda) en etkin birimi bulmak için önerilen model, Wang ve Jiang [38] modeline dayanmaktadır. Klasik tek aşamalı üretim süreçleri için en etkin birimi bulmak amacıyla Wang ve Jiang [38] tarafından önerilen model (4) ile verilmektedir.

$$\min \sum_{i=1}^m v_i \left( \sum_{j=1}^n x_{ij} \right) - \sum_{r=1}^s u_r \left( \sum_{j=1}^n y_{rj} \right)$$

Kısıtlar

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq I_j, \quad j = 1, \dots, n$$

$$\sum_{j=1}^n I_j = 1 \quad (4)$$

$$I_j \in \{0,1\} \quad j = 1, \dots, n$$

$$u_r \geq \frac{1}{(m+s) \max(y_{rj})}, \quad r = 1, \dots, s$$

$$v_i \geq \frac{1}{(m+s) \max(x_{ij})}, \quad i = 1, \dots, m$$

Bu modelde  $I_j$  değişkenleri 0-1 iki değerli karar değişkenleridir ve  $\sum_{j=1}^n I_j = 1$  kısıtından dolayı bu değişkenlerden sadece bir tanesi 1 değerini alabilir. Eğer  $I_o = 1$  ise,  $\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq I_j$  kısıtı ilgilenilen  $KVB_o$  birimi için  $\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 1$  halini alır. Benzer şekilde  $j \neq o$  için,  $I_j = 0$  ise,  $\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq I_j$  kısıtı klasik CCR etkinlik kısıtı yani  $\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0$  halini alır. Buradan,  $I_o^s = 1$  olursa  $KVB_o$  en etkin birim olarak belirlenir ve model bu birimin etkinlik skoru için 1'den büyük olmaya izin vermektedir.  $j \neq o$  için diğer birimlerin skorları 1 ya da 1'den küçük kalmaktadır. Ağırlık değişkenleri için  $u_r \geq 1 / ((m+s) \max(y_{rj}))$  ve  $v_i \geq 1 / ((m+s) \max(x_{ij}))$  kısıtlamaları ilk defa Sueyoshi [45] tarafından önerilmiştir ve birçok VZA uygulamasında kullanılmaktadır.

Wang ve Jiang [38] modeli temelinde, iki aşamalı üretim sistemleri için önerilen karma tamsayı model (5) ile verilmektedir:

$$\min \sum_{i=1}^m v_i \left( \sum_{j=1}^n x_{ij} \right) - \sum_{r=1}^s u_r \left( \sum_{j=1}^n y_{rj} \right)$$

Kısıtlar

$$\sum_{p=1}^q w_p z_{pj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq I_{1j}, \quad j = 1, \dots, n$$

$$\sum_{j=1}^n I_{1j} = 1$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{p=1}^q w_p z_{pj} \leq I_{2j}, \quad j = 1, \dots, n \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^n I_{2j} = 1$$

$$I_{1j} \in \{0,1\}, I_{2j} \in \{0,1\}, \quad j = 1, \dots, n$$

$$u_r \geq \frac{1}{(s+q+m) \max(y_{rj})}, \quad r = 1, \dots, s$$

$$w_p \geq \frac{1}{(s+q+m) \max(z_{pj})}, \quad p = 1, \dots, q$$

$$v_i \geq \frac{1}{(s+q+m) \max(x_{ij})}, \quad i = 1, \dots, m$$

Önerilen modelde  $I_{1j}$  ve  $I_{2j}$  değişkenleri 0-1 iki değerli karar değişkenleridir ve  $\sum_{j=1}^n I_{1j} = 1$  ve  $\sum_{j=1}^n I_{2j} = 1$  kısıtlarından dolayı  $I_{1j}$  değişkenlerden sadece bir tanesi 1 değerini ve  $I_{2j}$  değişkenlerden sadece bir tanesi 1 değerini alabilir.  $u_r \geq 1 / ((s+q+m) \max(y_{rj}))$  ( $r = 1, \dots, s$ ),  $w_p \geq 1 / ((s+q+m) \max(z_{pj}))$  ( $p = 1, \dots, q$ ) ve  $v_i \geq 1 / ((s+q+m) \max(x_{ij}))$  ( $i = 1, \dots, m$ ) ağırlık kısıtlamaları Sueyoshi [45] ve Wang ve Jiang [38] modellerine benzer şekilde iki aşamalı üretim süreci VZA modeline adapte edilmişlerdir. Önerilen model hem birinci aşamada hem de ikinci aşamada en etkin birimin etkinlik skorunun 1'den büyük olmasına izin vermektedir.

Önerilen modeli  $KVB_k$  (birinci aşama) ve  $KVB_l$  (ikinci aşama) için (6)'da verildiği gibi detaylı olarak inceleyelim. Yani birinci aşama için  $I_{1k}^* = 1$  ve  $I_{1k}^* = 0, \forall j \neq k$  ve ikinci aşama için  $I_{2l}^* = 1$  ve  $I_{2l}^* = 0, \forall j \neq l$  elde edilmiş olsun. Buradan  $k$ 'inci ve  $l$ 'inci birimlerin sırasıyla birinci ve ikinci aşamada en etkin birimler olduğu kastedilmektedir.  $k$  ve  $l$  ile gösterilen birimler aynı birimler de olabilir farklı birimler de olabilir. Yani bir KVB hem ilk aşamanın hem ikinci aşamanın en etkin birimi olabilir. Gösterimi kolaylaştırmak için,  $I_r^u = \frac{1}{(s+q+m) \max(y_{rj})}$ ;  $r = 1, \dots, s$ ,  $I_p^w = \frac{1}{(s+q+m) \max(z_{pj})}$ ;  $p = 1, \dots, q$ , ve  $I_i^v = \frac{1}{(s+q+m) \max(x_{ij})}$ ;  $i = 1, \dots, m$  olsun.

$$\begin{aligned}
 & \min \sum_{i=1}^m v_i \left( \sum_{j=1}^n x_{ij} \right) - \sum_{r=1}^s u_r \left( \sum_{j=1}^n y_{rj} \right) \\
 & \text{kısıtlar} \\
 & \sum_{p=1}^q w_p z_{pk} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ik} \leq 1, \quad j = k \\
 & \sum_{p=1}^q w_p z_{pj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0, \quad j \neq k; j = 1, \dots, n \\
 & \sum_{r=1}^s u_r y_{rl} - \sum_{p=1}^q w_p z_{pl} \leq 1, \quad j = l \\
 & \sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{p=1}^q w_p z_{pj} \leq 0, \quad j \neq l; j = 1, \dots, n \\
 & u_r \geq I_r^u, \quad r = 1, \dots, s \\
 & w_p \geq I_p^w, \quad p = 1, \dots, q \\
 & v_i \geq I_i^v, \quad i = 1, \dots, m
 \end{aligned} \tag{6}$$

$I_{1k} = 1$  yani  $KVB_k$  ilk aşamanın en etkin birimi olarak kabul edildiğinden, önerilen model  $\sum_{p=1}^q w_p z_{pk} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ik} \leq 1$  kısıtından dolayı birinci aşama etkinliği olan  $E_k^1 = \frac{\sum_{p=1}^q w_p z_{pk}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ik}}$  skorunun 1'den büyük değer almasına izin verir.  $KVB_k$  haricindeki diğer birimler için  $I_{1j} = 0$  olacağından  $\sum_{p=1}^q w_p z_{pj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0$  kısıtından  $E_j^1$  skoru 1'e eşit ya da daha küçük bir değer olabilir. Benzer şekilde  $KVB_l$  için  $I_{2l} = 1$  olarak kabul edildiğinden, önerilen model ikinci aşama etkinliği olan  $E_l^2 = \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rl}}{\sum_{p=1}^q w_p z_{pl}}$  skorunun 1'den büyük değer almasına izin verirken,  $KVB_l$  haricindeki diğer birimler için  $I_{2j} = 0$  olacağından  $E_j^2$  skoru 1'e eşit ya da daha küçük bir değer olabilir.

$\sum_{p=1}^q w_p z_{pk} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ik} \leq 1$  ve  $\sum_{r=1}^s u_r y_{rl} - \sum_{p=1}^q w_p z_{pl} \leq 1$  kısıtları aktif kısıtlar ise en etkin birimlerin etkinlik skorları 1'den kesin olarak büyük olur. Bu durumu modelin dualini alarak (7)'de görmek mümkündür.

$$\begin{aligned}
 & \max \lambda_{1k} + \lambda_{2l} + \sum_{r=1}^s I_r^u p_r + \sum_{p=1}^q I_p^w t_p + \sum_{i=1}^m I_i^v q_i \\
 & \text{kısıtlar} \\
 & -\sum_{j=1}^n \lambda_{1j} x_{ij} + q_i = \sum_{j=1}^n x_{ij}, \quad i = 1, \dots, m \\
 & \sum_{j=1}^n (\lambda_{2j} - \lambda_{1j}) z_{pj} + t_p = 0, \quad p = 1, \dots, q \\
 & \sum_{j=1}^n \lambda_{2j} y_{rj} + p_r = -\sum_{j=1}^n y_{rj}, \quad r = 1, \dots, s \\
 & \lambda_{1j} \leq 0, \quad j = 1, \dots, n \\
 & \lambda_{2j} \leq 0, \quad j = 1, \dots, n \\
 & q_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, m \\
 & t_p \geq 0, \quad p = 1, \dots, q \\
 & p_r \geq 0, \quad r = 1, \dots, s
 \end{aligned} \tag{7}$$

Tümler gevşeklik koşulları (complementary slackness conditions), önerilen modelin herhangi bir optimal çözümü

$(u^*, w^*, v^*)$  ile dual modelin  $(p^*, t^*, q^*, \lambda_{1k}^*, \lambda_{2l}^*)$  çözümü arasında geçerlidir:

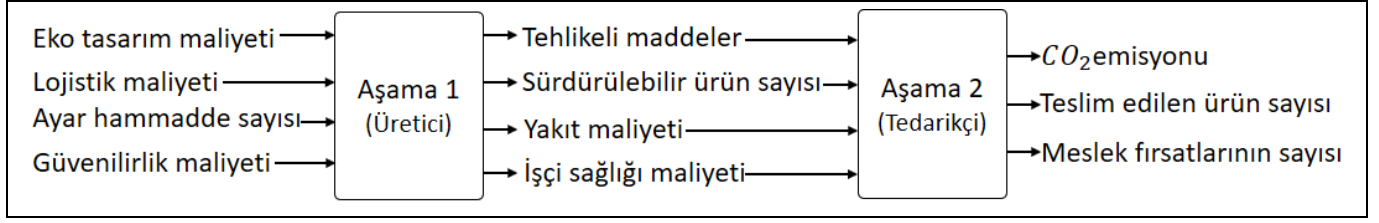
$$\begin{aligned}
 & \lambda_{1k}^* (1 + \sum_{i=1}^m v_i^* x_{ik} - \sum_{p=1}^q w_p^* z_{pk}) = 0 \\
 & \lambda_{1j}^* (\sum_{i=1}^m v_i^* x_{ij} - \sum_{p=1}^q w_p^* z_{pj}) = 0, \quad j = 1, \dots, n; j \neq k \\
 & \lambda_{2l}^* (1 + \sum_{p=1}^q w_p^* z_{pl} - \sum_{r=1}^s u_r^* y_{rl}) = 0 \\
 & \lambda_{2j}^* (\sum_{p=1}^q w_p^* z_{pj} - \sum_{r=1}^s u_r^* y_{rj}) = 0, \quad j = 1, \dots, n; j \neq l \\
 & q_i (v_i^* - I_i^v) = 0, \quad i = 1, \dots, m \\
 & t_p (w_p^* - I_p^w) = 0, \quad p = 1, \dots, q \\
 & p_r (u_r^* - I_r^u) = 0, \quad r = 1, \dots, s \\
 & \lambda_{1k}^* (1 + \sum_{i=1}^m v_i^* x_{ik} - \sum_{p=1}^q w_p^* z_{pk}) = 0 \text{ eşitliğinde, } \lambda_{1k}^* \neq 0 \text{ ise,} \\
 & KVB_k \text{ için ilk aşama etkinliği } \frac{\sum_{p=1}^q w_p z_{pk}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ik}} = 1 + \frac{1}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ik}} \text{ olarak} \\
 & \text{ yazılabilir. } \lambda_{1k}^* \neq 0 \text{ olması } \sum_{p=1}^q w_p z_{pk} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ik} \leq 1 \\
 & \text{ kısıtının aktif bir kısıt olduğunu anlamına gelmektedir. Benzer} \\
 & \text{ şekilde } \lambda_{2l}^* (1 + \sum_{p=1}^q w_p^* z_{pl} - \sum_{r=1}^s u_r^* y_{rl}) = 0 \text{ eşitliğinde } \lambda_{2l}^* \neq \\
 & 0 \text{ ise, } KVB_l \text{ için ikinci aşama etkinliği } \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rl}}{\sum_{p=1}^q w_p z_{pl}} = 1 + \frac{1}{\sum_{p=1}^q w_p z_{pl}} \\
 & \text{ olarak yazılabilir. } \lambda_{2l}^* \neq 0 \text{ olması } \sum_{p=1}^q w_p^* z_{pl} - \sum_{r=1}^s u_r^* y_{rl} \leq 1 \\
 & \text{ kısıtının aktif bir kısıt olduğunu anlamına gelmektedir. Buradan} \\
 & KVB_k \text{ ve } KVB_l \text{ için ilgili kısıtlar aktif kısıtlar ise bu birimlerin} \\
 & \text{ etkinlik skorları 1'den kesin olarak büyük olacağı} \\
 & \text{ anlaşılmaktadır.}
 \end{aligned}$$

#### 4 Sayısal örnekler

Tedarik zincirinin iki aşamalı olarak ifade edildiği iki gerçek örnek üzerinde önerilen yöntemin uygulanabilirliği gösterilmiştir. İlk uygulama plastik ambalaj kayışı endüstrisi alanındadır. Bu araştırmanın verileri 2006 yılı için İran'daki Şahriar Plastik şirketine aittir [24]. Tedarik zinciri, üretim ve dağıtım aşamaları olmak üzere iki aşamalı olarak yapılandırılmıştır. Birinci aşamanın girdileri  $x_1$ : eko-tasarım maliyeti,  $x_2$ : lojistik maliyeti,  $x_3$ : hammadde sayısı ve  $x_4$ : güvenilirlik maliyetidir İlk aşamadaki çıktılar yani ara ürünler  $z_1$ : tehlikeli maddeler,  $z_2$ : sürdürülebilir ürün sayısı,  $z_3$ : yakıt maliyeti (10000 Rials) ve  $z_4$ : iş sağlığı maliyetidir (10000 Rials). Tehlikeli maddeler değişkeni ilk aşama için istenmeyen çıktı durumundadır. Sonunda, ikinci aşamadan üç çıktıya ulaşılır:  $y_1$ : CO<sub>2</sub> emisyonu,  $y_2$ : teslim edilen ürün sayısı ve  $y_3$ : meslek fırsatlarının sayısı. CO<sub>2</sub> emisyonu da istenmeyen bir çıktıdır. İstenmeyen çıktılarının negatif etkilerinden kurtulmak için Seiford ve Zhu [46] tarafından önerilen model uygulanarak işlemlere dahil edilmişlerdir. Şekil 2'de üretim ve dağıtım olarak ayrılan tedarik zinciri yapısı gösterilmektedir.

Tanımlanan şirket için tedarikçilerin değerlendirilmesi amacıyla, ham plastik alanında on tedarikçiye ilişkin veri seti Tablo 1'de yer almaktadır. Her tedarikçi bir KVB olarak kabul edilerek önerilen modelin ve literatürde iki aşamalı süreçler için önerilen Kao ve Hwang [29] ve Chen [30] modellerinin çözümlerine de yer verilmiştir. Modeller MATLAB R2018b programında kodlanmış olup çözümünden elde edilen etkinlik skorları Tablo 2'de yer almaktadır.

Kao ve Hwang [29] modeli ilk aşamada yani üretim aşamasında 10 şirketten 6 tanesini (Axon Polymer, Corbi Polymer, Karan Co, Noavaran Baspar, Razin Polymer ve Persian Plastic), ikinci aşamada yani dağıtım aşamasında ise 10 şirketten 5 tanesini (Axon Polymer, Iran Masterbatch, Karan Co, Polyma ve Persian Plastic) etkin olarak değerlendirmiştir.



Şekil 2. Plastik tedarikçileri için iki aşamalı tedarik yapısı.

Figure 2. Two-stage supply structure for plastic suppliers.

Tablo 1. 10 plastik tedarikçisine ait veri seti.

Table 1. Data set of 10 plastic suppliers.

KVB	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$z_4$	$y_1$	$y_2$	$y_3$
Axon Polymer	390	94	103	58	71	236	396	138	177	432	3
Corbi Polymer	398	96	127	66	44	281	453	143	169	423	2
Iran Masterbatch	290	109	112	74	45	246	240	113	165	410	2
Karan Co.	318	79	103	77	33	287	443	134	179	596	3
Noavaran Baspar	288	94	133	88	55	276	527	151	169	477	2
Parsan Polymer	338	105	144	89	64	296	351	178	165	505	3
Plasto Iran	326	199	157	94	40	319	529	124	180	491	3
Razin Polymer	329	89	129	96	44	329	395	193	184	533	2
Polyma	350	76	114	106	72	297	310	155	166	410	3
Persian Plastic	295	93	99	69	42	218	405	144	173	440	3

Tablo 2: 10 plastik tedarikçisine ait model çözümleri.

Table 2. Model solutions for plastic suppliers.

KVB	Önerilen Model			Kao ve Hwang [29]			Chen [30]		
	$E^s$	$E^1$	$E^2$	$E^s$	$E^1$	$E^2$	$E^s$	$E^1$	$E^2$
Axon Polymer	0.9597	0.9068	<b>1.0584</b>	1	1	1	1	1	1
Corbi Polymer	0.7955	0.9949	0.7996	0.8642	1	0.8642	0.9321	1	0.8642
Iran Masterbatch	0.8313	0.8464	0.9821	0.8995	0.8995	1	0.9471	0.8995	1
Karan Co.	<b>1.0937</b>	<b>1.1171</b>	0.9791	1	1	1	1	1	1
Noavaran Baspar	0.8150	0.9575	0.8512	0.9141	1	0.9141	0.9571	1	0.9141
Parsan Polymer	0.8598	0.8598	1	0.8549	0.9370	0.9124	0.9251	0.9370	0.9124
Plasto Iran	0.7309	0.8545	0.8554	0.8226	0.9076	0.9064	0.9105	1	0.8209
Razin Polymer	0.7974	1	0.7974	0.8724	1	0.8724	0.9362	1	0.8724
Polyma	0.7620	0.7902	0.9643	0.9669	0.9669	1	0.9832	0.9669	1
Persian Plastic	0.9888	0.9888	1	1	1	1	1	1	1

Chen [30] modeli ise ilk aşamada yani üretim aşamasında 10 şirketten 7 tanesini (Axon Polymer, Corbi Polymer, Karan Co, Noavaran Baspar, Plasto Iran, Razin Polymer ve Persian Plastic), ikinci aşamada yani dağıtım aşamasında ise 10 şirketten 5 tanesini (Axon Polymer, Iran Masterbatch, Karan Co, Polyma ve Persian Plastic) etkin olarak değerlendirmiştir. Kao ve Hwang [29] ve Chen [30] modelleri, Axon Polymer, Karan Co. ve Persian Plastic şirketlerini hem iki alt aşamada hem de genel etkinlik değerlendirmesinde 1 etkinlik skoru atayarak etkin şirketler olarak değerlendirmişlerdir.

Önerilen model ilk aşamada yani üretim aşamasında 1.1171 etkinlik skoru ile Karan Co. şirketini en etkin şirket olarak belirlemiştir, diğer şirketler ise skor değerleri ile birbirinden tam olarak ayrılabilmişlerdir. İkinci aşamada yani dağıtım

aşamasında ise 1.0584 etkinlik skoru ile Axon Polymer şirketi en etkin şirket olarak değerlendirilmiştir. Parsan Polymer ve Persian Plastic şirketleri 1 etkinlik skoru ile etkin birimler olarak değerlendirilirken diğer birimler ise birbirinden farklı ve 1'den küçük skorlar alarak sıralanmışlardır. İki alt aşamanın çarpımı olarak ifade edilen genel etkinlik değerlendirmesinde ise 1.0937 etkinlik skoru ile Karan Co. şirketi en etkin şirket olarak öne çıkmaktadır.

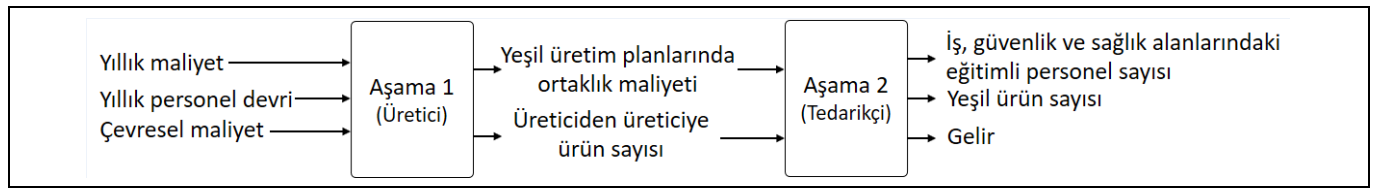
Kao ve Hwang [29] ve Chen [30] modelleri toplam KVB sayısına göre çok fazla sayıda birimi etkin bulmuşlar ve bu durumda en etkin birimin belirlenemediği gibi birimlerin de sıralanması mümkün olmamıştır. Önerilen model en etkin birimi hem genel süreçte hem de alt aşamalarda belirleyebilmekte ve diğer birimlerin sıralanmasına da katkı sunmaktadır. Önerilen model

tarafından ilk aşamada ve genel süreçte en etkin bulunan Karan Co. şirketi ve ikinci aşamada en etkin bulunan Axon Polymer şirketinin Kao ve Hwang [28] ve Chen [30] modelleri tarafından hem iki alt aşamada hem de genel etkinlik değerlendirmesinde etkin şirketler içerisinde olması dikkat çekicidir. Bu durum önerilen yöntemin bir başarısı olarak öne çıkmaktadır.

İkinci uygulama olarak reçine üreten 27 İran şirketi dikkate alınmıştır [18]. Reçine üreten firmaların sürdürülebilirliğini ölçmek ve firmaların performansını artırmak için reçine üreten 27 İran şirketi değerlendirilmektedir. Üretici (aşama 1) ve tedarikçi (aşama 2) olmak üzere iki aşamalı bir tedarik zinciri yapısı göz önüne alınmıştır. Üretici aşamasındaki girdiler  $x_1$ : yıllık maliyet (ekonomik sürdürülebilirlik),  $x_2$ : yıllık personel cirosu (sosyal sürdürülebilirlik) ve  $x_3$ : çevresel maliyet (çevresel sürdürülebilirlik) şeklindedir. Çevresel maliyetler neden olduğu, yani ekonomik birimlerle ilgili

maliyetlerin fiilen veya potansiyel olarak kendi faaliyetlerinde çevresel bozulmaya neden olan maliyetler olarak görülebilir. Bu nedenle çevresel maliyetler girdi olarak kabul edilmiştir. Ara ürünler  $z_1$ : yeşil üretim planlarında ortaklık maliyeti (ekonomik sürdürülebilirlik) ve  $z_2$ : tedarikçiden üreticiye ürün sayısı (ekonomik sürdürülebilirlik) olarak kabul edilmiştir. Üretici aşamasının çıktıları,  $y_1$ : iş, güvenlik ve sağlık alanlarında eğitilmiş personel sayısı (sosyal sürdürülebilirlik),  $y_2$ : yeşil ürün sayısı (çevresel sürdürülebilirlik) ve  $y_3$ : gelirdir (ekonomik sürdürülebilirlik). Şekil 3'te tedarikçi ve üretici olarak ayrılan tedarik zinciri yapısı gösterilmektedir.

Tablo 3'te 27 reçine firmasına ilişkin veri seti yer almaktadır. Her firma bir KVB olarak kabul edilerek önerilen modelin ve literatürdeki diğer iki modelin çözümlerine yer verilmiştir. Modeller çözülerek elde edilen etkinlik skorları Tablo 4'te yer almaktadır.



Şekil 3. Reçine firmaları için iki aşamalı tedarik yapısı.

Figure 3. Two-stage supply structure for resin companies.

Tablo 3. 27 reçine firmasına ait veri seti.

Table 3. Data set of 27 resin companies.

KVB	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$z_1$	$z_2$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	KVB	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$z_1$	$z_2$	$y_1$	$y_2$	$y_3$
Aria Resin Co.	2982	0.2	117	8	145	158	5	4760	Laleh Petroch. Co.	2774	0.2	112	7	143	218	6	3370
Azar Resin Co.	2684	0.5	101	6	135	191	5	3240	Khosh & Kcc Co.	2657	0.45	176	9	115	176	5	4670
Peka Chemie Co.	3753	0.15	84	11	213	217	9	4850	Rang Afarin Co.	3852	0.5	161	12	178	197	12	5110
Bonyan K. C. Co.	2961	0.1	121	9	152	295	13	4190	Dorsa Chemie Co.	3758	0.1	95	8	126	423	9	4840
Pars P. Chem. Co.	2789	0.35	116	5	139	337	7	4710	Bushehr C. I. Co.	3984	0.3	153	15	114	259	12	5710
Paint Sahar Co.	2951	0.6	135	14	91	263	8	4510	Rang Avar P. C. Co.	3656	0.55	76	11	89	110	9	4380
Taba Coatings	2856	0.2	174	8	153	338	13	4930	Rangrazi Iran Co.	2814	0.6	241	7	135	73	6	3850
Paksan Co.	2654	0.45	132	11	175	194	11	4350	Petromad Kimia Co.	3881	0.4	135	9	84	198	5	5650
Chemical C. A. Co.	2921	0.2	110	7	97	172	4	4130	Pars Zinc Dust Co.	3175	0.1	92	6	124	331	6	4140
Alborz Chelic Co.	2723	0.7	98	10	64	387	3	3860	Peik Chimie Co.	746	0.5	168	7	97	578	8	4470
Mobin Petroche. Co.	3975	0.5	164	11	142	419	6	5157	Resin Fam Co.	2667	0.2	114	8	119	114	5	3750
Marun Petroche. Co.	1855	0.65	135	7	118	476	9	4230	Doreen Chimie Co.	2894	0.65	139	11	142	135	9	4180
Fajr Petrochem. Co.	4186	0.3	139	13	164	117	10	5970	Pars Eshen Co.	3651	0.5	175	9	136	238	7	4460
									Nikoo Resin Co.	1956	0.1	131	13	157	194	12	4290

Tablo 4. 27 reçine firmasına ait model çözümleri.

Table 4. Model solutions for resin companies.

KVB	Önerilen Model			Kao ve Hwang [29]			Chen [30]		
	$E^s$	$E^1$	$E^2$	$E^s$	$E^1$	$E^2$	$E^s$	$E^1$	$E^2$
Aria Resin Co.	0.4487	0.8023	0.5593	0.5068	0.6621	0.7654	0.7032	0.6621	0.7654
Azar Resin Co.	0.3689	0.6176	0.5973	0.4158	0.6394	0.6504	0.6446	0.7278	0.5304
Peka Chemie Co.	0.5140	1	0.5140	0.6094	1	0.6094	0.8047	1	0.6094
Bonyan Kala Chemie	0.7174	0.9280	0.7731	0.9136	0.9265	0.9860	0.9551	0.9265	0.9860
Pars Pamchal Chemical	0.5756	0.5756	1	0.5454	0.5454	1	0.7071	0.6733	0.7575

Table 4. Continued.

KVB	Önerilen Model			Kao ve Hwang [29]			Chen [30]		
	$E^s$	$E^1$	$E^2$	$E^s$	$E^1$	$E^2$	$E^s$	$E^1$	$E^2$
Paint Sahar Co.	0.4648	0.9156	0.5077	0.4852	0.7524	0.6449	0.7094	0.7723	0.6279
Taba Coatings	0.7139	0.7845	0.9101	0.6442	0.6442	1	0.7836	0.6442	1
Paksan Co.	0.5563	1	0.5563	0.6447	0.8992	0.7170	0.8129	0.8992	0.7170
Chemical Carbon Acid	0.4099	0.6640	0.6174	0.4599	0.5494	0.8372	0.6514	0.5494	0.8372
Alborz Chelic Co.	0.4129	0.6841	0.6035	0.5025	0.6861	0.7325	0.7129	0.8526	0.5491
Mobin Petrochemical	0.4337	0.6854	0.6328	0.4156	0.5836	0.7122	0.6310	0.5836	0.7122
Marun Petrochemical	0.7151	0.7151	1	0.6737	0.7279	0.9255	0.8111	0.7279	0.9255
Fajr Petrochemical Co.	0.4403	0.8501	0.5179	0.5349	0.7274	0.7354	0.7308	0.7274	0.7354
Laleh Petrochemical	0.4597	0.7769	0.5917	0.4162	0.6517	0.6387	0.6563	0.7357	0.5482
Khosh & Kcc Co.	0.4065	0.7306	0.5565	0.3986	0.5249	0.7595	0.6056	0.5249	0.7595
Rang Avarin Co.	0.4594	0.7955	0.5775	0.5304	0.6886	0.7703	0.7219	0.6886	0.7703
Dorsa Chemie Co.	0.6160	0.6864	0.8975	0.7343	0.8026	0.9149	0.8526	0.8026	0.9149
Bushehr Chemical	0.5325	0.9037	0.5892	0.5478	0.5478	1	0.7308	0.7056	0.7665
Rang Avar Paint &	0.3866	0.7006	0.5519	0.6343	0.8115	0.7816	0.8027	1	0.6054
Rangsazi Iran Co.	0.2897	0.5462	0.5304	0.3150	0.5097	0.6180	0.5463	0.5097	0.6180
Petromad Kimia Co.	0.3829	0.5632	0.6798	0.4958	0.4958	1.0000	0.6629	0.4958	1
Pars Zinc Dust Co.	0.5505	0.6503	0.8465	0.5982	0.6975	0.8576	0.7633	0.6975	0.8576
Peik Chimie Co.	<b>1.1248</b>	0.9996	<b>1.1253</b>	1	1	1	1	1	1
Resin Fam Co.	0.4070	0.8238	0.4941	0.4375	0.6537	0.6693	0.6599	0.6537	0.6693
Doreen Chimie Co.	0.4088	0.8147	0.5018	0.5085	0.7119	0.7143	0.7129	0.7119	0.7143
Pars Eshen Co.	0.3765	0.6140	0.6133	0.3668	0.5051	0.7262	0.5793	0.5051	0.7262
Nikoo Resin Co.	0.8586	<b>1.6353</b>	0.5251	0.8238	1	0.8238	0.9119	1	0.8238

Kao ve Hwang [29] ve Chen [30] modelleri, Peik Chimie Co. şirketini hem iki alt aşamada hem de genel etkinlik değerlendirmesinde 1 etkinlik skoru atayarak etkin şirket olarak değerlendirmiştir. Kao ve Hwang [29] modeli ilk aşamada yani tedarik aşamasında 27 şirketten 3 tanesini (Peka Chimie Co, Peik Chimie Co. ve Nikoo Resin Co.), ikinci aşamada yani üretim aşamasında ise 27 şirketten 4 tanesini (Pars Pamchal Chemical Co., Taba Coatings, Peka Chimie Co, Bushehr Chemical Industries Co. ve Peik Chimie Co.) etkin olarak değerlendirmiştir. Chen [30] modeli ilk aşamada yani tedarik aşamasında 27 şirketten 4 tanesini (Bonyan Kala Chemie Co., Rang Avar Paint & Chemical Co., Peik Chimie Co. ve Nikoo Resin Co.), ikinci aşamada yani üretim aşamasında ise 27 şirketten 3 tanesini (Taba Coatings, Petromad Kimia Co. ve Peik Chimie Co.) etkin olarak değerlendirmiştir.

Önerilen model ilk aşamada yani tedarik aşamasında 1.6365 etkinlik skoru ile Nikoo Resin Co. şirketini en etkin şirket olarak belirlemiştir, bu şirketi Peka Chemie Co., Paksan Co. ve Peik Chimie Co. şirketi takip etmektedir. İkinci aşamada yani üretim aşamasında ise 1.1253 etkinlik skoru ile Peik Chimie Co. şirketi en etkin şirket olarak değerlendirilmiştir. Pars Pamchal Chemical Co. ve Marun Petrochemical Co. şirketi ise 1 etkinlik skoru ile Peik Chimie Co. şirketini takip etmektedirler. İki alt aşamanın çarpımı olarak ifade edilen genel etkinlik değerlendirmesinde ise 1.1248 etkinlik skoru ile Peik Chimie Co. şirketi en etkin şirket olarak öne çıkmaktadır.

Kao ve Hwang [29] ve Chen [30] modelleri ilk örneğe benzer şekilde birimlerin sıralanmasında sorun yaşamaktadırlar.

Önerilen model tarafından ikinci aşamada ve genel süreçte en etkin bulunan Peik Chimie Co. şirketinin Kao ve Hwang [29] ve Chen [30] modelleri tarafından hem iki alt aşamada hem de genel etkinlik değerlendirmesinde etkin bir şirket olarak değerlendirilmesi ve ilk aşamada en etkin bulunan Nikoo Resin Co. şirketinin Kao ve Hwang [29] ve Chen [30] modelleri tarafından sürecin ilk aşamasında etkin şirketler arasında değerlendirilmesi dikkat çekicidir. Her ne kadar Kao ve Hwang [29] ve Chen [30] modelleri şirketlerin sıralamasında problem yaşasalar da literatürde iki aşamalı süreçlerin performans değerlendirmesinde kabul gören modeller olduklarından, bu durum önerilen yöntemin bir başarısı olarak öne çıkmaktadır.

## 5 Sonuçlar

Sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimi hammaddelerin, parçaların ve ürünlerin tedarikçilerden üreticilere ve son olarak müşterilere ve tüketicilere kadar aktarma süreçlerinin yönetilmesi olarak tanımlanmakta ve aynı zamanda malların tüm çevrelerinde çevre koruma ve sosyal sorumluluk için garanti sağlamaktadır. Bu nedenle, tedarikçilerin değerlendirilmesi ve en iyi tedarikçinin seçilmesi önemli bir karar problemidir. Bu çalışmada, tedarik yapısı iki aşamalı süreç olarak ele alınıp, en iyi (en etkin) tedarikçiyi değerlendirmek ve seçmek için bir karma-tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir. Literatürden alınan iki farklı gerçek veri üzerinde önerilen yöntemin başarısı gösterilmiştir. Ayrıca literatürde en yaygın olan iki aşamalı modellerden Kao ve Hwang [29] ve Chen [30] modelleri çok fazla sayıda birimi etkin olarak değerlendirmektedirler. Bu



yüzden en etkin birimin belirlenememesine ve birimlerin de tam olarak sıralanmaması sebep olmaktadır. Önerilen model en etkin birimi hem genel süreçte hem de alt aşamalarda belirleyebilmekte ve diğer birimlerin sıralanmasına da katkı sunmaktadır. Literatürdeki iki aşamalı modellerde etkin tedarikçi sayısı birden fazla olması sebebi ile karar verici hangi tedarikçiyi seçeceğine karar verememekte iken önerilen karma tamsayılı iki aşamalı model sayesinde karar vericinin tedarikçi seçimini kolaylaştırmaktadır.

Gelecek bir araştırma alanı olarak, kontrol edilemeyen girdilerin, istenmeyen çıktılarının (bir dönüşüme tabi tutulmadan) ve değişkenlerin bulanık durumda olduğu iki aşamalı bir VZA yapısında en etkin KVB'nin seçimi problemi ele alınabilir.

## 6 Conclusions

Sustainable supply chain management is defined as managing transfer processes of raw materials, parts, and products from suppliers to producers and finally to customers and consumers and also provides a guarantee for environmental protection and social responsibility in all circles of goods. Therefore, to evaluate suppliers and to choose the best among them is an important decision problem. In this study, a mixed-integer linear programming model is proposed to evaluate and select the best (most efficient) supplier in a supply chain structure expressed as a two-stage production process. The achievement of the proposed model was demonstrated using two different real data from the literature. Furthermore, Kao and Hwang [29] and Chen [30] models from the most commonly used two-stage models in the literature evaluate a large number of units as efficient. Therefore, they cause the most efficient unit to not be determined, and the units not to be ranked exactly. The proposed model can determine the most efficient unit both in the overall process and in the sub-stages and also contributes to the ranking of other units. While the decision-maker cannot decide which supplier to choose as the number of efficient suppliers is more than one in the other two-stage models in the literature, it facilitates the decision of the decision maker thanks to the proposed mixed integer two-stage model. As a future research area, the problem of choosing the most efficient DMU can be addressed in a two-stage DEA structure where uncontrollable inputs, undesirable outputs (without transformed) and fuzzy variables.

## 7 Kaynaklar

- [1] Dağdeviren M, Eraslan E. "Promethee sıralama yöntemi ile tedarikçi seçimi". *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 23(1), 69-75, 2008.
- [2] Torun H, Canbulut G. "İki aşamalı tedarik zinciri koordinasyonunun bulanık talep altında analizi". *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, baskıda, 2019.
- [3] Saen, RF. "Developing a new data envelopment analysis methodology for supplier selection in the presence of both undesirable outputs and imprecise data". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 51, 1243-1250, 2010.
- [4] Kilincci O, Onal SA. "Fuzzy AHP approach for supplier selection in a washing machine company". *Expert Systems with Applications*, 38(8), 9656-9664, 2011.
- [5] Sevklı M, Lenny Koh S, Zaim S, Demirbag M, Tatoglu E. "An application of data envelopment analytic hierarchy process for supplier selection: A case study of BEKO in Turkey". *International Journal of Production Research*, 45(9), 1973-2003, 2007.
- [6] Lin CT, Chen CB, Ting YC. "An ERP model for supplier selection in electronics industry". *Expert Systems with Applications*, 38(3), 1760-1765, 2011.
- [7] Güneri AF, Ertay T, Yücel A. "An approach based on ANFIS input selection and modeling for supplier selection problem". *Expert Systems with Applications*, 38(12), 14907-1491, 2011.
- [8] Soheilrad S, Govindan K, Mardani A, Zavadskas EK, Nilashi M, Zakuan N. "Application of data envelopment analysis models in supply chain management: a systematic review and meta-analysis". *Annals of Operations Research*, 271, 915-969, 2018.
- [9] Charnes A, Cooper WW, Rhodes E. "Measuring the efficiency of DMUs". *European Journal of Operational Research*, 2, 429-444, 1978.
- [10] Easton L, Murphy DJ, Pearson JN. "Purchasing performance evaluation with data envelopment analysis". *European Journal of Purchasing & Supply Management*, 8(3), 123-134, 2002.
- [11] Çelebi D, Bayraktar D. "An integrated neural network and data envelopment analysis for supplier evaluation under incomplete information". *Expert Systems with Applications*, 35(4), 1698-1710, 2008.
- [12] Zeydan M, Çolpan C, Çobanoğlu C. "A combined methodology for supplier selection and performance evaluation". *Expert Systems with Applications*, 38(3), 2741-2751, 2011.
- [13] Ribeiro Soriano D, Ross AD, Parker H, del Mar Benavides-Espinosa M, Droge C. "Sustainability and supply chain infrastructure development". *Management Decision*, 50(10), 1891-1910, 2012.
- [14] Karsak EE, Dursun M. "An integrated supplier selection methodology incorporating QFD and DEA with imprecise data". *Expert Systems with Applications*, 41(16), 6995-7004, 2014.
- [15] Egilmez G, Kucukvar M, Tatari O, Bhutta MKS. "Supply chain sustainability assessment of the US. food manufacturing sectors: A life cycle-based frontier approach". *Resources, Conservation and Recycling*, 82, 8-20, 2014.
- [16] Azadi M, Shabani A, Khodakarami M, Saen RF. "Planning in feasible region by two-stage target-setting DEA methods: An application in green supply chain management of public transportation service providers". *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 70, 324-338, 2014.
- [17] Mirhedayatian SM, Azadi M, Saen RF. "A novel network data envelopment analysis model for evaluating green supply chain management". *International Journal of Production Economics*, 147(Part B), 544-554, 2014.
- [18] Khodakarami M, Shabani A, Saen RF, Azadi M. "Developing distinctive two-stage data envelopment analysis models: An application in evaluating the sustainability of supply chain management". *Measurement*, 70, 62-74, 2015.
- [19] Tajbakhsh A, Hassini E. "A data envelopment analysis approach to evaluate sustainability in supply chain networks". *Journal of Cleaner Production*, 105, 74-85, 2015.

- [20] Shi P, Yan B, Shi S, Ke C. "A decision support system to select suppliers for a sustainable supply chain based on a systematic DEA approach". *Information Technology and Management*, 16(1), 39-49, 2015.
- [21] Shabani A, Saen RF. "Developing a novel data envelopment analysis model to determine prospective benchmarks of green supply chain in the presence of dual-role factor". *Benchmarking: An International Journal*, 22(4), 711-730, 2015.
- [22] Mahdiloo M, Saen RF, Lee KH. "Technical, environmental and eco-efficiency measurement for supplier selection: An extension and application of data envelopment analysis". *International Journal of Production Economics*, 168, 279-289, 2015.
- [23] Ji X, Wu J, Zhu Q. "Eco-design of transportation in sustainable supply chain management: A DEA-like method". *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 48, 451-459, 2016.
- [24] Zarbakhshnia N, Jaghdani TJ. "Sustainable supplier evaluation and selection with a novel two-stage DEA model in the presence of uncontrollable inputs and undesirable outputs: a plastic case study". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97(5-8), 2933-2945, 2018.
- [25] Chen Y, Zhu J. "Measuring information technology's indirect impact on firm performance". *Information Technology and Management*, 5(1), 9-22, 2004.
- [26] Wanke P, Barros C. "Two-stage DEA: An application to major Brazilian banks". *Expert Systems with Applications*, 41(5), 2337-2344, 2014.
- [27] Wang K, Huang W, Wu J, Liu YN. "Efficiency measures of the Chinese commercial banking system using an additive two-stage DEA". *Omega*, 44, 5-20, 2014.
- [28] Premachandra IM, Zhu J, Watson J, Galagedera DU. "Best-performing US mutual fund families from 1993 to 2008: Evidence from a novel two-stage DEA model for efficiency decomposition". *Journal of Banking & Finance*, 36(12), 3302-3317, 2012.
- [29] Kao C, Hwang SN. "Efficiency decomposition in two-stage data envelopment analysis: An application to non-life insurance companies in Taiwan". *European Journal of Operational Research*, 185(1), 418-429, 2008.
- [30] Chen Y, Cook WD, Li N, Zhu J. "Additive efficiency decomposition in two-stage DEA". *European Journal of Operational Research*, 196(3), 1170-1176, 2009.
- [31] Moreno P, Lozano S. "A network DEA assessment of team efficiency in the NBA". *Annals of Operations Research*, 214(1), 99-124, 2014.
- [32] Li Y, Lei X, Dai Q, Liang L. "Performance evaluation of participating nations at the 2012 London Summer Olympics by a two-stage data envelopment analysis". *European Journal of Operational Research*, 243(3), 964-973, 2015.
- [33] Sexton TR, Silkman RH, Hogan AJ. "Data envelopment analysis: Critique and extensions". *New Directions for Evaluation*, (32), 73-105, 1986.
- [34] Andersen P, Petersen NC. "A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis". *Management Science*, 39(10), 1261-1264, 1993.
- [35] Amin GR, Toloo M. "Finding the most efficient DMUs in DEA: An improved integrated model". *Computers & Industrial Engineering*, 52(1), 71-77, 2007.
- [36] Amin GR. "Comments on finding the most efficient DMUs in DEA: An improved integrated model". *Computers & Industrial Engineering*, 56(4), 1701-1702, 2009.
- [37] Ferooghi AA. "A new mixed integer linear model for selecting the best decision making units in data envelopment analysis". *Computers & Industrial Engineering*, 60(4), 550-554, 2011.
- [38] Wang YM, Jiang P. "Alternative mixed integer linear programming models for identifying the most efficient decision making unit in data envelopment analysis". *Computers & Industrial Engineering*, 62(2), 546-553, 2012.
- [39] Toloo M. "Alternative minimax model for finding the most efficient unit in data envelopment analysis". *Computers & Industrial Engineering*, 81, 186-194, 2015.
- [40] Liu JS, Lu WM, Yang C, Chuang M. "A network-based approach for increasing discrimination in data envelopment analysis". *Journal of the Operational Research Society*, 60(11), 1502-1510, 2009.
- [41] Liu JS, Lu WM. "DEA and ranking with the network-based approach: a case of R&D performance". *Omega*, 38(6), 453-464, 2010.
- [42] Seiford LM, Zhu J. "Profitability and marketability of the top 55 US commercial banks". *Management Science*, 45(9), 1270-1288, 1999.
- [43] Kao C, Hwang SN. "Multi-period efficiency and Malmquist productivity index in two-stage production systems". *European Journal of Operational Research*, 232(3), 512-521, 2014.
- [44] Charnes A, Cooper WW. "Programming with linear fractional functionals". *Naval Research Logistics*, 9(3-4), 181-186, 1962.
- [45] Sueyoshi T. "DEA non-parametric ranking test and index measurement: slack-adjusted DEA and an application to Japanese agriculture cooperatives". *Omega*, 27(3), 315-326, 1999.
- [46] Seiford LM, Zhu J. "Modeling undesirable factors in efficiency evaluation". *European Journal of Operational Research*, 142, 16-20, 2002.