



## Bir İletişim Uydu Operatörünün Fırlatma Aracı Seçim Problemi İçin Kesin ve Bulanık VZA Yaklaşımlarının Karşılaştırılması

G. Sena DAŞ<sup>1,\*</sup>, Taha TETİK<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kırıkkale Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, Yahşihan/Kırıkkale

<sup>2</sup>Türksat A.Ş. Gölbaşı/Ankara

### Öz

Uzay endüstrisinde, bir uydu için fırlatma aracı seçimi kritik bir idari ve teknik karar verme problemidir. Seçilen fırlatma aracına bağlı olarak fırlatma maliyeti, milyon dolarlık bir uydunun toplam maliyetinin yüzde 20'si ile 50'si arasında değişebilir. Bu çalışmanın amacı, istenilen yörüngeye bir yere eş zamanlı iletişim uydusunu fırlatmak için kullanılan fırlatma aracı alternatiflerini, Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemleri kullanarak analiz etmektir. Bu amaçla, kesin ve bulanık Veri Zarflama Analizi (VZA) yönteminin versiyonları ÇKKV yöntemi olarak kullanılmıştır. Fırlatma aracı seçeneklerinin değerlendirilmesi için sektör uzmanları tarafından oluşturulan kriterler hiyerarşisi kullanılmıştır. Kesin ve bulanık VZA yöntemlerinin çıktıları kıyaslanmıştır. Kıyaslama sonucunda VZA versiyonlarının, seçenekleri farklı sıraladıkları ama Seçenek 1'in genellikle sıralamanın ilk sırasında yer aldığı gözlenmiştir.

### Makale Bilgisi

*Başvuru: 18/01/2017*

*Düzeltilme: 01/03/2017*

*Kabul: 08/03/2017*

### Anahtar Kelimeler

*Bulanık Veri Zarflama  
Analizi  
Fırlatma Aracı Seçimi  
Çok Kriterli Karar  
Verme  
Uzay Endüstrisi*

### Keywords

*Fuzzy Data Envelopment  
Analysis  
Launch Vehicle Selection  
Multi Criteria Decision  
Making  
Space Business*

### Comparing Crisp and Fuzzy DEA Approaches for The Launch Vehicle Selection Problem of A Communication Satellite Operator

### Abstract

In space industry, launch vehicle selection for a satellite is a critical managerial and technical decision making problem. Depending on the selected launch vehicle, launch cost can vary from 20 % to 50 % of the total cost of a communication satellite that cost million dollars. The aim of this paper is to analyze several launch vehicle alternatives to boost a geostationary communication satellite into desired orbit under a Multi Criteria Decision Making (MCDM) scheme. For this purpose, variants of crisp and fuzzy Data Envelopment Analysis are utilized as a MCDM tool. In order to evaluate launch vehicle alternatives a criteria hierarchy, which is established by the experts working in communication sector, is used. The outcomes of the crisp and fuzzy DEA methods are compared with each other. As a result of the comparison it is observed that DEA variants ranked the alternatives differently but the launch vehicle Alternative 1 is mostly ranked first.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İletişim uyduları televizyon ve radyo yayınları, telefon, internet ve veri uygulamaları için kullanılan çok pahalı ve karmaşık sistemlerdir. Bir uyduyu uzaya göndermek ve görevin gerekliliklerine uygun olarak istenen yörüngeye yerleştirmek için fırlatma araçları kullanılır. Fırlatma araçlarının maliyeti, milyon dolarlarla ifade edilen bir uydu projesinin toplam maliyetinin % 20 ile % 50'sine karşılık gelir. Dolayısıyla, bu araçlar için hem maliyet olabildiğince etkin olmalı hem de güvenilir ve görev gerekliliklerini yerine getirecek uygunlukta olmalıdır. Dahası, günümüz uydu endüstrisinin, uydu sahiplerine ve işletmecilerine birçok alternatif fırlatma aracı sunması da problemi zorlaştırmaktadır. Dolayısıyla ticari uydu operatörleri, piyasadaki farklı seçeneklerden kendilerine en uygun olanını seçmek için fırlatma araçları uçuş geçmişi, güvenilirliği, performansı, maliyeti ve resmi düzenlemeleri gibi bir dizi faktörü dikkate almaktadırlar. Dolayısıyla bir uydu için fırlatma aracı seçme problemi nicel ve nitel faktörleri içeren kritik ve teknik bir karar verme problemi olarak tanımlanabilir.

Bu çalışmada, bir iletişim operatörünün beklentilerini karşılayacak en maliyet etkin, güvenilir ve göreve uygun fırlatma aracının seçilmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında, ticari yere eş zamanlı (geostationary) iletişim uyduları ve piyasada bulunan ilgili fırlatma araçları ele alınmış olup, Alçak Yörüngeli (Low-Earth Orbit) uydular dâhil edilmemiştir.

Yukarıda tanıtilen problem uzay endüstrisinde karşılaşılan bir tedarikçi seçim problemidir. Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) problemi olarak bilinen Tedarikçi Seçme problemi [1], araştırmacıların yoğun ilgi gösterdiği bir problemidir. Dolayısıyla, tedarikçi seçim problemini ele alan önceki çalışmalara, farklı tarama makalelerinden [1,2] ulaşılabilir.

Literatürde, Tedarikçi Seçme problemleri için kullanılacak birçok ÇKKV yöntemi bulunmaktadır. Chai vd. [2] bu yöntemleri dört farklı kategori altında sınıflandırmıştır;

- (i) AHP ve ANP gibi çok kriterli fayda (multi attribute utility) yöntemleri,
- (ii) ELECTRE ve PROMETHEE gibi sıralama (outranking) yöntemleri,
- (iii) TOPSIS ve VIKOR gibi uzlaşık (compromise) yöntemler,
- (iv) SMART ve DEMATEL gibi diğer ÇKKV teknikleri.

Bu sınıflandırmada yer almayan Veri Zarflama Analizi (VZA) temel olarak karar birimlerinin etkinliğini değerlendirmek için önerilmiş olmasına rağmen, ÇKKV problemlerinin çözümü için de sıkça tercih edilmektedirler. Bugüne kadar VZA ve bulanık VZA birçok ÇKKV problem için kullanılmış olsa da Hatami-Marbini vd. [3] işaret ettiği gibi, bulanık VZA literatüründeki önemli eksikliklerden biri çoğu çalışmanın gerçek hayat problemleri içermemesidir. Bu çalışmanın katkılarında biri bu boşluğun doldurulmasıdır. Dahası, bu çalışma literatürde uzay endüstrisinde karşılaşılan karar verme problemlerin çözümü için yapılmış az sayıdaki çalışmadan biridir.

Uzay endüstrisi için yapılan az sayıdaki çalışmalardan biri Frank [4] tarafından NASA uçuş araçları, fırlatma araçlar ve yer araştırma tesisleri için güvenlik iyileştirme stratejilerinin seçimi amacıyla; maliyet, çizelge ve teknik yapılabilirlik gibi faktörler dikkate alınarak yapılmıştır. NASA için yürütülen bir diğer çalışmada ise, Tavana [5] Mars'a yapılacak keşif görevleri için alternatif görev mimarilerini, görevin farklı fazlarını dikkate alarak değerlendirmiştir. Son olarak, Kahrıman vd. [6] bir uydu operatörünün uydu üreticisi seçim problemini maliyet ve uydunun taşıma kapasitesi gibi faktörleri dikkate alarak AHP ve TOPSIS yöntemlerini kullanarak çözmüşlerdir.

Bu çalışmada ise fırlatma aracı seçme probleminin çözümü için kesin ve bulanık VZA kullanılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ele alınan faktörlerin bir kısmının bulanık olarak ifade edilmesi problemin daha gerçekçi bir şekilde ele alınmasını sağladığı için böyle bir karşılaştırmanın problemin daha doğru çözülmesini sağlayacağı öngörülmüştür.

Bu kapsamda çalışmanın ikinci bölümde VZA yöntemi sunulmuştur. Üçüncü bölümde ise bulanık VZA analizi ve bulanık sayıları durulaştırmak için kullanılan yöntem yer almaktadır. Çalışmanın dördüncü bölümünde ise kullanılan karar hiyerarşisi sunulmuştur. Beşinci bölümde ise ele alınan yapılan karşılaştırma neticesinde ortaya çıkan sonuçlar yorumlanmış ve gelecek çalışmalar için öneriler sunulmuştur.

## 2. VERİ ZARFLAMA ANALİZİ (DATA ENVELOPMENT ANALYSIS)

VZA karar verme birimlerin (KVB) etkinliğini değerlendirmek için kullanılan parametrik olmayan bir tekniktir. Charnes vd. [7] tarafından önerilen yöntem her bir KVB'nin etkinliğini tüm KVB'lerin sınır kümesine (frontier set) göreceli olarak belirler. Dolayısıyla, her bir KVB'nin etkinlik skoru 1 veya % 100'e eşit veya küçüktür. Bir KVB'nin skoru 1 veya % 100 ise bu birim etkindir. Aksi takdirde, bu KVB etkin değildir. Etkin olmayan KVB'lerin etkinliği girdileri azaltarak veya çıktıları artırarak iyileştirilebilir.

$m$  tane girdi değişkeni,  $s$  tane çıktı değişkeni ve  $n$  tane KVB ile ifade edilen bir VZA modelinde KVB  $o$ 'nun etkinlik skoru  $\theta$  (Denklem 1) şöyledir;

$$\text{Maximize } \theta = \frac{u_1 y_{1o} + u_2 y_{2o} + \dots + u_s y_{ro}}{v_1 x_{1o} + v_2 x_{2o} + \dots + v_m x_{mo}} = \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{ro}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{io}}$$

st;

$$\frac{u_1 y_{11} + u_2 y_{21} + \dots + u_r y_{r1}}{v_1 x_{11} + v_2 x_{21} + \dots + v_m x_{m1}} = \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{r1}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{i1}} \leq 1 \quad (1)$$

$$\frac{u_1 y_{1o} + u_2 y_{2o} + \dots + u_r y_{ro}}{v_1 x_{1o} + v_2 x_{2o} + \dots + v_m x_{mo}} = \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{ro}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{io}} \leq 1$$

$$\frac{u_1 y_{1j} + u_2 y_{2j} + \dots + u_r y_{rj}}{v_1 x_{1j} + v_2 x_{2j} + \dots + v_m x_{mj}} = \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \leq 1$$

$$u_1, u_2, \dots, u_s \geq 0 \text{ ve } v_1, v_2, \dots, v_m \geq 0$$

Burada  $y_{ro}$  KVB  $o$  tarafından kullanılan çıktı  $r$  miktarını,  $x_{io}$  KVB  $o$  tarafından kullanılan girdi  $i$  miktarını,  $u_r$  VZA modeli tarafından çıktı  $r$ 'ye atanan katsayı veya ağırlığı,  $v_i$  ise VZA modeli tarafından girdi  $i$ 'ye atanan katsayı veya ağırlığı göstermektedir.

Modelin kısıtları ise bir KVB'nin 1 veya % 100'den daha etkin olmamasını garanti etmektedir[8]. Charnes vd.[7] yukarıda sunulan modelin kesirli haldeki amaç fonksiyonunu ve kısıtlarını yeniden formüle ederek Tablo1'de CCR modeli olarak anılan modeli önermişlerdir (Denklem 2). Bu model girdi değerinde bir artışın çıktı değerlerinde orantılı bir artışla sonuçlanacağını varsaymaktadır. Diğer yandan, girdi değerinde bir artışın çıktı değerlerini orantılı bir şekilde etkilemeyeceği durum için BCC modeli (Denklem 3) önerilmiştir [9]. Bu modeller girdi ve çıktı odaklı olarak ele alınabilir. Girdi odaklı modellerde çıktı miktarlarının sabit olduğu durumda girdi miktarının enazlanması, çıktı odaklı modellerde ise belirli bir girdi miktarı ile üretilecek çıktının en çoklanması hedeflenmektedir.

**Tablo 1.** CCR ve BCC modelleri (CCR and BCC models)

| Çıktılar; $y_{rk}, r=1,2,\dots,s$ ; Girdiler; $x_{ik}, i=1,2,\dots,m$  |  |
|--|--|
| CCR Modeli, Charnes vd. [7]  | BCC Modeli, Banker vd. [9]   |
| Amaç fonksiyonu; $h_k = \max \sum_{r=1}^s u_r y_{rk}$  | Amaç fonksiyonu; $h_k = \max \sum_{r=1}^s u_r y_{rk} + c_k$  |
| Kısıtlar;<br>$\sum_{i=1}^m v_i x_{ij} - \sum_{r=1}^s u_r y_{rj} \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$ $\sum_{i=1}^m v_i x_{ij} = 1,$ $u_r \geq 0, \quad r = 1, 2, \dots, s$ $v_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m$ | Kısıtlar;<br>$\sum_{i=1}^m v_i x_{ij} - \sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - c_k \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$ $\sum_{i=1}^m v_i x_{ij} = 1,$ $u_r \geq 0, \quad r = 1, 2, \dots, s$ $v_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m$ |

Özetle, VZA'nın esas amacı etkin ve etkin olmayan KVB'lerinin belirlenmesi ve etkin sınırın (efficient frontier) tahmin edilerek, etkin olmayan KVB'lerin girdi ve/veya çıktıların etkin sınıra nasıl

yaklaştırılacağıının bulunmasıdır. Dolayısıyla, KVB'lerin sıralanması VZA'nın esas amacı değildir. Buna rağmen, VZA'nın bir ÇKKV aracı olarak kullanımı oldukça popülerdir.

VZA ve ÇKKV arasındaki ilişki, karar hiyerarşisindeki kriterlerin maksimize edilecek olanlarının çıktı ve minimize edilecek olanlarının girdi olarak tasarlanmasıyla kurulur [10]. Her ne kadar VZA etkinlik ölçümü için avantajlı bir araç olsa da, yöntem bir ÇKKV aracı olarak kullanıldığında yönleme ilişkin bazı yetersizlikler ortaya çıkabilir. Literatürde VZA'ya yöneltilen bu eleştirilerden biri metodun düşük ayırma (discriminating) yeteneğidir [11]. VZA'nın sıralama amacıyla ayırma yeteneğinin iyileştirilebilmesi için çeşitli yöntemler önerilmiştir. Bu yöntemler hakkında daha fazla bilgiye Adler vd.[12] çalışmasından ulaşılabilir. Bu çalışmada, bu dezavantajı gidermek için önerilen yöntemlerden biri olan süper etkinlik sıralaması (super-efficiency ranking) yöntemi kullanılmıştır.

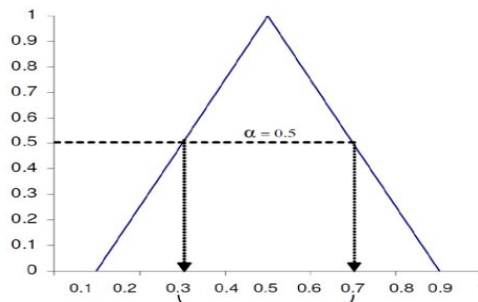
### 3. BULANIK VZA (FUZZY DEA)

Bulanık VZA, geleneksel VZA modelleriyle kıyaslandığında gerçek hayat problemlerini gerçekçi bir şekilde ifade etmek için önerilmiştir [13]. Gerçek hayat problemlerini daha iyi tanımlamak için Zadeh [14] tarafından önerilen bulanık küme teorisi dilsel değişkenlerin kullanımına izin verir. Dilsel değişkenler Üçgensel veya yamuksal sayılarla ifade edildiğinde Bulanık VZA modelleri bulanık doğrusal programlama modeli formunu alır [15]. Fakat bulanık doğrusal programlama modellerinde katsayılar bulanık sayılar olduğunda bu modeller kesin sayılarla ifade edilen VZA modelleri gibi standart doğrusal programlama yöntemiyle çözülemezler. Bu modelleri çözmek için çeşitli yöntemler önerilmiştir. Bunlar;

- (i) tolerans yaklaşımı (tolerance approach),
- (ii) yaklaşım (possibility approach),
- (iii) alfa kesim tabanlı yaklaşım ( $\alpha$ -level based approach),
- (iv) bulanık sıralama yaklaşımı (fuzzy ranking approach) ve
- (v) durulaştırma yaklaşımıdır (defuzzification approach) [3],[16].

Bu çalışmada, bulanık VZA modelleri Lertworasirikul vd. [17] tarafından önerilen durulaştırma yaklaşımı kullanılarak çözülmüştür. Bu kapsamda önce bulanık girdi ve çıktılar kesin sayılara dönüştürülmüş sonrasında ise bu kesin sayılar ile ifade edilen VZA modelleri çözülmüştür. Bulanık girdi ve çıktıları durulaştırmak için alfa kesim ( $\alpha$ -kesim) metodu kullanılmıştır. Bu yöntem karar vericilerin kendi tercihlerini veya yargılarını dahil edilmesi olarak bilinir [17]. Bu yaklaşım kullanılarak, karar vericinin bilgisindeki belirsizlik modele karar vericinin ele alınan konu hakkındaki bakış açısını temsil eden iyimserlik endeksi ( $\lambda$ ) kullanılarak dahil edilebilir.

Alfa kesim değerleri 0 ile 1 arasındadır.  $\alpha$ -kesim değerinin 1 olması karar vericinin konuyla ilgili değerlendirmesi konusunda kendinden eminken bu değer 1'den az olması karar vericinin kararı hakkındaki tereddütlere işaret eder. Bu değer belirlendikten sonra bulanık sayıdan farklı aralıklar üretilebilir. Örneğin, Şekil 1'deki bulanık sayıdan  $\alpha = 0.5$  değeri ile (0.3, 0.7) aralığı üretilir.



**Şekil 1.** Üçgensel bir bulanık sayıya alfa kesim uygulanması (Application of alpha cut to a TFN) [18]

Üçgensel bir bulanık sayıyı durulaştırmak için [19,20] tarafından da kullanılan Denklem (4)'den yararlanılmıştır. Burada M üçgensel bulanık sayının orta değerini, L alt sınırı ve U ise üst sınırını belirtmektedir. Şekil 1'de verilen üçgensel bulanık sayının için M değeri 0,5, L değeri 0,1 ve U değeri ise 0,9'dur.

$$\begin{aligned}
a_{ij}^{\alpha} &= [\lambda \cdot L_{ij}^{\alpha} + (1 - \lambda) \cdot U_{ij}^{\alpha}] \text{ öyle ki,} \\
L_{ij}^{\alpha} &= (M_{ij} - L_{ij}) \cdot \alpha + L_{ij} \\
U_{ij}^{\alpha} &= U_{ij} - (U_{ij} - M_{ij}) \cdot \alpha \\
\lambda &= [0,1], \quad \alpha = [0,1]
\end{aligned} \tag{4}$$

#### 4. KARAR HİYERARŞİSİ (DECISION HIERARCHY)

Çalışma kapsamında, fırlatma araçlarını değerlendirmek için 7 ana ve 6 alt kriterden oluşan bir karar hiyerarşisi kurulmuştur. Kriter hiyerarşisi bir uydu operatörünün uydu ve fırlatma sistemleri mühendisliği bölümünde çalışan dört uzman mühendisin (en az 10 yıllık iş tecrübesine sahip) görüşleri ve tecrübelerinden faydalanılarak tek seferde elde edilmiştir. Oluşturulan hiyerarşide “Toplam Fırlatma Sayısı”, “Ardarda Yapılan Başarılı Atış Sayısı”, “Güvenirlilik Oranı”, “Maliyet”, “Fırlatma Aracı Performansı” ve “Yıllık Atış Sayısı” gibi kriterler için nicel veriler mevcutken, diğer kriterler için uzmanlar tarafından yapılan subjektif değerlendirmeler dikkate alınmıştır.

**Uçuş Geçmişi (FH):** fırlatma aracının geçmiş uçuş verisi önemli bir kriterdir. Bu kriterin iki alt-kriteri mevcuttur; “Toplam Fırlatma Sayısı” ve “Ardarda Yapılan Başarılı Fırlatma Sayısı”.

- *Toplam Fırlatma Sayısı (FH1):* Aynı konfigürasyona sahip bir fırlatma aracının ilk uçuşundan beri yapılan toplam uçuş sayısı
- *Ardarda Yapılan Başarılı Atış Sayısı (FH2):* Aynı konfigürasyona sahip bir fırlatma aracının en son ardarda başarılı uçuş sayısı

**Güvenirlilik Oranı (R):** bir fırlatma aracının başarılı fırlatmaları,, arıza ve kısmi arıza sayılarının hesaplanmasıyla elde edilen bir skordur. Fırlatma aracı seçiminde önemli bir faktör olan güvenirlilik oranı, görev öncesinde teknik başarısızlık riskine işaret eder.

**Maliyet (C):** bu kriterde fırlatma aracı seçiminde etkili olan önemli faktörlerden biridir çünkü bir fırlatma aracı maliyeti milyar dolarlarla ifade edilen bir uydu projesinde maliyetinin % 20’si ile % 50’sini teşkil eder.

**Fırlatma Aracı Performansı (LP)** Bir diğer önemli faktör olan roket performansı, belirli bir kütle için Dünya’da belirlenen irtifaya kaldırılma kabiliyetinden ve ilgili faydalı yükün doğru yörüngeye yerleştirme kabiliyetinden oluşur [21].

**Müsaitlik ve zaman çizelgesi (AS):** Uydu operatörünün fırlatma çizelgesiyle tutarlı faaliyet gösteren bir fırlatma aracı seçimi önemlidir. Fırlatma otoritelerinin sayısı sınırlı olması, uydu operatörleri gibi müşterilere sunulacak muhtemel slotları (zaman dilimlerini) sınırlandırabilir. Bu durum uydu operatörünün fırlatmayı çizelgelemesini güçleştirmektedir. Bu anlamda, müşteriye sunulan olası fırlatma fırsatlarının mevcudiyeti ve fırlatma slotlarının fazlalığı önemli faktörlerdir. Yani fırlatma otoritesinin fırlatma çizelgesi sıklıkla farklı nedenlerden dolayı sektöre uğruyorsa, bu müşteri için büyük bir zaman ve para kaybı anlamına gelir.

**Resmi düzenlemeleri (GR):** Alternatifler değerlendirilirken resmi ihracat yönetmelikleri ve teknoloji değişim provizyonları da dikkate alınmalıdır. Muhtemel satıcı ve müşteri arasındaki resmi düzenlemelere bağlı olarak bir alternatif daha az tercih edilir duruma gelebilir.

**Programa bağlı Faktörler (PF):** Bir uydu projesinin tamamlanması birkaç yıl aldığından, proje esnasında program yönetimi uydu operatörleri için önemli bir faktör olmaktadır. Programa bağlı faktörler başlığında iki alt kriter dikkate alınarak alternatifler değerlendirilmiştir; “Proje esnasında bilgiye erişim” ve “Çizelge denetimi & Hata Yönetimi” olarak adlandırılarak değerlendirilir.

- *Proje esnasında bilgiye erişim (PF1):* Bu kriter proje boyunca müşterinin ulaşabileceği teknik bilgi içeriği ile ilgilidir. Fırlatma aracının üretimi, bir Ulus için stratejik bir yetenek olduğundan, fırlatma otoriteleri proje süresince, müşteriyle proje hakkında sınırlı teknik bilgi paylaşır. Müşterinin teknik bilgiye ulaşma isteğine bağlı olarak, bu kriter önemli hale gelir.

- *Çizelge Denetimi ve Arıza Yönetimi (PF2)*: “Programa bağlı Faktörler” kriteri altında ele alınan diğer bir alt kriterdir. Bir uydu projesi esnasında, uydu tasarım ve üretimi, fırlatma aracının üretimi ve fırlatma ile uydunun yörüngeye yerleştirilmesi gibi aktiviteler kapsamında birçok kuruluş koordineli olarak çalışmaktadır. Dolayısıyla, farklı tarafların projeye dâhil olması durumunda bu birbirine sıkı sıkıya bağlı aktivitelerin çizelgelenmesi ve yönetilmesi projenin başarısı için kritiktir. Aynı zamanda söz konusu süreçler esnasında meydana gelebilecek sorun ve arızaların analiz edilerek kontrol altında yönetilebilmesi önemli bir unsur olarak ortaya çıkmaktadır.

## 5. ÖRNEK ÇALIŞMA (CASE STUDY)

Yapılan çalışma kapsamında piyasada mevcut bulunan 5 alternatif fırlatma aracı, yukarıda sunulan karar hiyerarşisi ile değerlendirilmiştir. Alternatiflere ait veriler, operatörün uydu ve fırlatma sistemleri alanında tecrübeli mühendisleri tarafından temin edilmiştir. Sübjektif değerlendirme gerektiren durumda uzmanlardan hem bulanık hem de kesin sayılarla veri elde edilmiştir. Kesin sayıların kullanıldığı değerlendirmelerde Saaty'nin Derecelendirme Ölçeği [22] kullanılırken, bulanık değerlendirmeler için literatürden temin edilen bir dizi dilsel değişken tercih edilmiştir. Bu kapsamda, Çok İyi (VG), İyi (G), Orta (F) ve Kötü (B) olmak üzere dört dilsel değişken kullanılmıştır. Değerlendirme yapılan kriterlere bağlı olarak, önceki tanımlamalara eşdeğer Çok Fazla (VM), Fazla (M), Orta (F) ve Az (L) değişkenleri de kullanılmıştır. İlk kez Prakash [18] tarafından kullanılan bu dilsel değişkenler ve bunlara karşılık gelen üyelik fonksiyonları Tablo 2'de sunulmuştur.

**Tablo 2.** Kullanılan Üçgensel Bulanık Sayıların üyelik fonksiyonları (Membership Function of the utilized TFN) [18]

| Dilsel Değişkenler | Üçgensel Bulanık Sayı |
|--------------------|-----------------------|
| Kötü (B)           | (1,3,5)               |
| Orta (F)           | (3,5,7)               |
| İyi (G)            | (5,7,9)               |
| Çok İyi (VG)       | (7,9,11)              |

Elde edilen veriler ve değerlendirmeler neticesinde ele alınan alternatifler (Alt.) için oluşan skor matrisleri sırasıyla Tablo 3 ve 4'de sunulmuştur. Örneğin, Tablo 3'deki verilere gören A1 alternatifi programa bağlı faktörler açısından (PF1 ve PF2) uygun bir alternatif iken resmi düzenlemelerle ilgili (GR) faktörler açısından en kötü alternatiftir. Alternatiflere ait bu değerlendirme Tablo 3'de kesin sayılarla, Tablo 4'de ise bulanık sayılarla ifade edilmiştir.

**Tablo 3.** Kesin veri içeren matrisi (Data Matrix with crisp data)

| Alt. | FH1 | FH2 | R     | C        | LP   | AS1 | AS2 | GR | PF1 | PF2 |
|------|-----|-----|-------|----------|------|-----|-----|----|-----|-----|
| A1   | 53  | 52  | 0.981 | \$131.00 | 6.50 | 10  | 7   | 1  | 9   | 7   |
| A2   | 46  | 32  | 0.957 | \$69.23  | 5.50 | 6   | 3   | 3  | 1   | 2   |
| A3   | 14  | 1   | 0.929 | \$61.20  | 4.85 | 12  | 7   | 5  | 7   | 7   |
| A4   | 86  | 4   | 0.895 | \$110.15 | 6.65 | 12  | 1   | 7  | 3   | 3   |
| A5   | 29  | 23  | 0.966 | \$115.00 | 5.70 | 8   | 2   | 2  | 3   | 2   |

**Tablo 4.** Kesin ve Bulanık veri içeren matrisi (Data Matrix with crisp and fuzzy data)

| Alt. | FH1 | FH2 | R     | C        | LP   | AS1 | AS2 | GR | PF1 | PF2 |
|------|-----|-----|-------|----------|------|-----|-----|----|-----|-----|
| A1   | 53  | 52  | 0.981 | \$131.00 | 6.50 | 10  | G   | L  | VG  | G   |
| A2   | 46  | 32  | 0.957 | \$69.23  | 5.50 | 6   | B   | F  | B   | B   |
| A3   | 14  | 1   | 0.929 | \$61.20  | 4.85 | 12  | G   | F  | G   | G   |
| A4   | 86  | 4   | 0.895 | \$110.15 | 6.65 | 12  | B   | M  | B   | B   |
| A5   | 29  | 23  | 0.966 | \$115.00 | 5.70 | 8   | B   | L  | B   | B   |

Her alternatifin etkinlik skorunu bulmak için CCR ve BCC modelleri kullanılmıştır. Adil bir karşılaştırma yapmak için bu modellerin hem girdi odaklı hem de çıktı odaklı versiyonları da çözülmüştür. Modelleri çözmek için Frontier adlı VZA yazılımı kullanılmıştır. Tablo 3’de sunulan kesin veriler içeren skor matrisi için çözülen CCR ve BCC modellerine ait sonuçlar Tablo 5’de gösterilmiştir. Tablo 5’e göre, A5 dışında bütün alternatiflerin skorları (girdi ve çıktı odaklı modellerde) % 100 olarak hesaplanmıştır. Görüldüğü üzere A5 dışındaki tüm alternatifler verimliliği eşittir. Dolayısıyla değerlendirilen alternatifler arasında bir sıralama yapılamamaktadır. Fakat bu sonuç, çalıştırılan modellerin alternatifleri ayırt edememesinden kaynaklandığından bu istenen bir sonuç değildir.

**Tablo 5.** Kesin verilere CCR ve BCC Modellerinin uygulanmasıyla elde edilen skorlar (Scores obtained by applying CCR and BCC Models to crisp data)

| Alt. | Girdi Odaklı  |               | Çıktı Odaklı  |               |
|------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|      | CCR Skoru (%) | BCC Skoru (%) | CCR Skoru (%) | BCC Skoru (%) |
| A1   | 100.00        | 100.00        | 100.00        | 100.00        |
| A2   | 100.00        | 100.00        | 100.00        | 100.00        |
| A3   | 100.00        | 100.00        | 100.00        | 100.00        |
| A4   | 100.00        | 100.00        | 100.00        | 100.00        |
| A5   | 91.10         | 91.60         | 91.10         | 99.10         |

Gerçekten etkili alternatifleri ayırt etmek için, süper etkinlik sıralaması yöntemi kullanılmıştır. Süper etkinlik yöntemi, modeldeki k. kısıtın ortadan kaldırarak aşırı verimli bir k birimi için l'den daha büyük bir verimlilik skoru elde etmesini sağlamaktadır [12]. Tablo 6’de gösterildiği gibi, ilgili kısıt ihmal edildiğinde bu yöntemle hesaplanan etkinlik değeri 1’den veya % 100’den daha yüksek olabilir. Klasik CCR ve BCC modelleri kullanılarak elde edilen sıralamalardan farklı olarak, süper etkinlik modeli kullanıldığında alternatifler için daha gerçek bir sıralama elde edilmektedir. Bu sonuçlara göre, hem girdi hem de çıktı odaklı CCR modelleri, A1 alternatifini birinci olarak sıralarken; girdi ve çıktı odaklı BCC modelleri birinci sıradaki alternatifi net olarak belirleyememektedir.

**Tablo 6.** Kesin verilere Süper etkinlik yönteminin uygulanmasıyla elde edilen sıralama (Ranking obtained by applying super-efficiency method to crisp data)

| Alt. | Sıralama     |     |              |     | Skor         |         |              |         |
|------|--------------|-----|--------------|-----|--------------|---------|--------------|---------|
|      | Girdi Odaklı |     | Çıktı Odaklı |     | Girdi Odaklı |         | Çıktı Odaklı |         |
|      | CCR          | BCC | CCR          | BCC | CCR (%)      | BCC (%) | CCR (%)      | BCC (%) |
| A1   | 1            | 2   | 1            | 2   | 628.30       | 1000.00 | 628.30       | 1000.00 |
| A2   | 3            | 4   | 3            | 2   | 157.40       | 157.70  | 157.40       | 1000.00 |
| A3   | 2            | 2   | 2            | 2   | 241.50       | 1000.00 | 241.50       | 1000.00 |
| A4   | 4            | 2   | 4            | 4   | 123.60       | 1000.00 | 123.60       | 169.80  |
| A5   | 5            | 5   | 5            | 5   | 91.10        | 91.60   | 91.10        | 99.10   |

Ele alınan fırlatma aracı seçim problemine Bulanık VZA’da uygulanmıştır. Kesin verilerle çözülen modellere benzer olarak, bulanık veriler için de CCR, BCC ve süper etkinlik sıralaması teknikleri test edilmiştir. Denenen her bir model için, hem girdi odaklı hem de çıktı odaklı modeller çözülmüştür.

Daha önce Bölüm 3’te de açıklandığı gibi, bulanık veri  $\alpha$ -kesme yöntemi uygulanarak durulaştırılmıştır. Sonrasında, elde edilen kesin modeller çözülmüştür. Uzman bilgisindeki potansiyel belirsizlikleri gidermek için  $\alpha$ -kesme yöntemi uygulanırken üç farklı  $\alpha$  seviyesi (0.6, 0.8, ve 1) kullanılmıştır. İyimserlik indisi  $\lambda$  ise yine uzmanlar tarafından 0.6 olarak belirlenmiştir. Bunun neticesinde Tablo 4’de sunulan skor matrisinden elde edilen matrislerden biri ( $\alpha = 0.6$  için) Tablo 7’de sunulmuştur.

**Tablo 7.**  $\alpha=0.6$  ve  $\lambda=0.6$  için Skor Matrisi (Score matrix for  $\alpha=0.6$  and  $\lambda=0.6$ )

| Alt. | FH1   | FH2   | R     | C     | LP    | AS1   | AS2   | GR    | PF1   | PF2   |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| A1   | 0.232 | 0.464 | 0.208 | 0.269 | 0.223 | 0.208 | 0.308 | 0.128 | 0.365 | 0.308 |
| A2   | 0.202 | 0.286 | 0.202 | 0.142 | 0.188 | 0.125 | 0.128 | 0.218 | 0.117 | 0.128 |
| A3   | 0.061 | 0.009 | 0.196 | 0.126 | 0.166 | 0.250 | 0.308 | 0.218 | 0.283 | 0.308 |
| A4   | 0.377 | 0.036 | 0.189 | 0.226 | 0.228 | 0.250 | 0.128 | 0.308 | 0.117 | 0.128 |
| A5   | 0.127 | 0.205 | 0.204 | 0.236 | 0.195 | 0.167 | 0.128 | 0.128 | 0.117 | 0.128 |

Elde edilen yeni verilerle CCR ve BCC modelleri çözüldüğünde Tablo 8'de sunulan sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçlarda görüldüğü gibi farklı  $\alpha$  değerleri için aynı sıralama elde edilmiş ve uygulanan yöntemlerle bir sıralama elde edilememiştir. Bu nedenle durulaştırılan bu veriler için de süper etkinlik yöntemi uygulanmıştır.

**Tablo 8.** Bulanık CCR ve BCC modellerden elde edilen skorlar (Scores obtained from fuzzy CCR and BCC models)

| Alt. | $\alpha=0.6, 0.8, 1$ |         |              |         |
|------|----------------------|---------|--------------|---------|
|      | Girdi Odaklı         |         | Çıktı Odaklı |         |
|      | CCR (%)              | BCC (%) | CCR (%)      | BCC (%) |
| A1   | 100.00               | 100.00  | 100.00       | 100.00  |
| A2   | 100.00               | 100.00  | 100.00       | 100.00  |
| A3   | 100.00               | 100.00  | 100.00       | 100.00  |
| A4   | 100.00               | 100.00  | 100.00       | 100.00  |
| A5   | 100.00               | 100.00  | 100.00       | 100.00  |

Farklı  $\alpha$  seviyeleri için süper etkinlik yöntemi uygulandığında elde edilen sonuçlar ise Tablo 9'da verilmiştir. Buna göre,  $\alpha=0.6$  ve  $\alpha=1$  seviyeleri için aynı sıralama elde edilmiş ancak  $\alpha=0.8$  seviyesi için farklı bir sıralama elde edilmiştir. Buna rağmen, elde edilen sıralamalarda A1 genellikle birinci sırada, A5 ise çoğunlukla son sırada yer almıştır. Süper etkinlik yöntemi ile elde edilen sıralamada bazı küçük değişiklikler olmasına rağmen, bulanık veriler kullanılarak elde edilen sonuçlar ile kesin veriler kullanılarak elde edilen sonuçlar tutarlılık göstermektedir. Küçük  $\alpha$  seviyelerinde bile A1 genellikle birinci sırada yer almıştır. Elde edilen sıralamalar arasından en makul sıralama A1, A3, A2, A4 ve A5 sıralamadır. Diğer bir sonuç ise  $\alpha=0.8$  seviyesi dışındaki  $\alpha$  değerleri için, girdi ve çıktı odaklı CCR ve BCC modellerinin farklı sıralamalar üretmiş olmasıdır.

**Tablo 9.** Farklı  $\alpha$  seviyeleri için süper etkinlik yöntemiyle elde edilen sıralaması (Summary for DEA super efficiency ranking for different alpha levels)

|          |    | $\alpha=0.6$   |         |                 |        | $\alpha=0.8$   |        |                 |        | $\alpha=1$     |         |                 |        |
|----------|----|----------------|---------|-----------------|--------|----------------|--------|-----------------|--------|----------------|---------|-----------------|--------|
|          |    | Input Oriented |         | Output Oriented |        | Input Oriented |        | Output Oriented |        | Input Oriented |         | Output Oriented |        |
|          |    | CCR            | BCC     | CCR             | BCC    | CCR            | BCC    | CCR             | BCC    | CCR            | BCC     | CCR             | BCC    |
| Sıralama | A1 | 1              | 2       | 1               | 4      | 1              | 1      | 1               | 1      | 1              | 2       | 1               | 4      |
|          | A2 | 3              | 4       | 3               | 3      | 3              | 3      | 3               | 3      | 3              | 4       | 3               | 3      |
|          | A3 | 2              | 2       | 2               | 2      | 2              | 2      | 2               | 2      | 2              | 2       | 2               | 2      |
|          | A4 | 4              | 2       | 4               | 5      | 4              | 4      | 5               | 5      | 4              | 2       | 4               | 5      |
|          | A5 | 5              | 5       | 5               | 2      | 5              | 5      | 4               | 4      | 5              | 5       | 5               | 2      |
| Skor (%) | A1 | 285.90         | 1000.00 | 285.90          | 311.30 | 282.10         | 282.10 | 250.70          | 250.70 | 278.50         | 1000.00 | 278.50          | 300.00 |
|          | A2 | 157.40         | 157.70  | 157.40          | 466.10 | 157.40         | 157.40 | 155.00          | 155.00 | 157.40         | 157.70  | 157.40          | 466.10 |



|    |        |         |        |         |        |        |        |        |        |         |        |         |
|----|--------|---------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|---------|
| A3 | 237.30 | 1000.00 | 237.30 | 1000.00 | 237.10 | 237.10 | 231.40 | 231.40 | 236.90 | 1000.00 | 236.90 | 1000.00 |
| A4 | 126.50 | 1000.00 | 126.50 | 169.80  | 126.80 | 126.80 | 81.70  | 81.70  | 127.00 | 1000.00 | 127.00 | 169.80  |
| A5 | 106.40 | 107.50  | 106.40 | 1000.00 | 106.30 | 106.30 | 106.30 | 106.30 | 106.20 | 107.30  | 106.20 | 1000.00 |

Elde edilen sonuçlar kesin VZA modellerinde elde edilen sonuçlarla kıyaslandığında, bulanık verilerle çözülen süper etkinlik modelinin sıralama sonuçlarının kesin VZA modellerinden beklendiği oranda farklılaşmadığı görülmüştür. Dahası, kesin verilerin kullanılması durumunda durulaştırmaya bağlı parametrelerin belirlenmesi sorunu da ortadan kalkmaktadır.

## 6. SONUÇLAR (RESULTS)

Bu çalışmada, bir iletişim uydu operatöründe gözlemlenen fırlatma aracı seçim problemini çözmek için uygulanan kesin ve bulanık VZA analizinin karşılaştırması sunulmuştur. Çalışma kapsamında, problemin kesin ve bulanık verilerle ifade edildiği durumlar için CCR, BCC ve süper etkinlik yöntemleri uygulanmış; her bir modelin ise hem girdi odaklı hem de çıktı odaklı versiyonları çözülmüştür.

Kesin verilerin kullanılarak problemin tanımlandığı durumda CCR ve BCC modeliyle tam bir sıralama elde edilememiş ve bu yöntemlere kıyasla alternatifleri ayırmada daha başarılı olan süper etkinlik modeli kullanılmıştır. Süper etkinlik modeliyle klasik CCR ve BCC yöntemlerine kıyasla daha gerçekçi bir sıralama elde edilmiştir.

Aynı modelleri bulanık veriler için kullanabilmek amacıyla uzman değerlendirmelerindeki dilsel değişkenler  $\alpha$ -kesme yöntemiyle farklı  $\alpha$  seviyeleri için durulaştırılmıştır. Durulaştırılan bu verileri kullanan CCR ve BCC modelleri yine tam bir sıralama üretememiş ancak süper etkinlik modeliyle tam bir sıralama üretilmiştir. Elde edilen sıralamalarda bazı farklılıklar olmasına rağmen, farklı  $\alpha$  seviyelerinde genellikle A1 ilk sırada yer almıştır. Bu sonuç kesin verilerle elde edilen sonuçlarla tutarlılık göstermiştir. Yine farklı  $\alpha$  seviyelerinde girdi odaklı süper etkinlik modeli hep aynı sıralamayı üretmesine rağmen, çıktı odaklı süper etkinlik modelleri farklı sıralamalar üretmiştir. Bu sıralamalar arasından en makul sıralamanın ise A1, A3, A2, A4 ve A5 sıralaması olduğu görülmüştür. Diğer bir sonuç ise  $\alpha=0.8$  seviyesi dışındaki  $\alpha$  değerleri için, girdi ve çıktı odaklı CCR ve BCC modellerinin farklı sıralamalar üretmiş olmasıdır.

Genel olarak kesin ve bulanık VZA modellerinde elde edilen sonuçlar kıyaslandığında, bulanık verilerle çözülen süper etkinlik modelinin sıralama sonuçlarını beklendiği oranda farklılaşmadığı görülmüştür. Bulanık versiyonuyla karşılaştırıldığında kesin süper etkinlik modeli anlamlı ve yeterli bir sıralama sunmaktadır. Bu durumun muhtemel nedenleri kullanılan durulaştırma tekniği ve veri seti olabilir. Dolayısıyla gelecek çalışmalarda farklı durulaştırma tekniklerinin kullanılarak bu kıyaslamaların geliştirilmesi planlanmaktadır.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Agarwal P, Sahai M, Mishra V, Bag M, Singh V. "A review of multi-criteria decision making techniques for supplier evaluation and selection". *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 2, 801–810, 2011.
- [2] Chai J, Liu JN, Ngai EW. "Application of decision-making techniques in supplier selection: A systematic review of literature". *Expert Systems with Applications* 40, 3872–3885, 2013.
- [3] Hatami-Marbini A, Emrouznejad A, Tavana M. "A Taxonomy and Review of the Fuzzy Data Envelopment Analysis Literature: Two Decades in the Making". *European Journal of Operational Research* 214, 457-472, 2011.
- [4] Frank MV. "Choosing among safety improvement strategies: a discussion with example of risk assessment and multi-criteria decision approaches for NASA". *Reliability Engineering & System Safety*, 311-324, 1995.

- [5] Tavana M. "A subjective assessment of alternative mission architectures for the human exploration of Mars at NASA using multicriteria decision making". *Computers & Operations Research*, 1147-1164, 2004.
- [6] Kahriman A, Öztokatlı M, Daş GS. "Selection of a communication satellite manufacturer using MCDM methods". In *Recent Advances in Space Technologies (RAST), 2015 7th International Conference*, 347-351, 2015.
- [7] Charnes A, Cooper W, Rhodes E. "Measuring the efficiency of decision-making units". *European Journal of Operational Research*, 2, 429–444, 1978.
- [8] Sherman HD, Zhu J. *Service Productivity Management: Improving Service Performance using Data Envelopment Analysis (DEA)*. Springer US, 2006.
- [9] Banker R, Charnes A, Cooper W. "Some models for estimating technical and scale inefficiency in data envelopment analysis". *Management Science*, 1078–1092, 1984.
- [10] Yılmaz B, Yurdusev MA. "Use Of Data Envelopment Analysis As A Multi Criteria Decision Tool – A Case Of Irrigation Management". *Mathematical and Computational Applications*, Vol. 16, No. 3, 669-679, 2011.
- [11] Moheb-Alizadeh, H., Rasouli, S., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2011). The use of multi-criteria data envelopment analysis (MCDEA) for location–allocation problems in a fuzzy environment. *Expert Systems with Applications*, 5687-5695
- [12] Adler N, Friedman L, Sinuany-Stern Z. "Review of ranking methods in the data envelopment analysis context". *European Journal of Operational Research* 140, 249–265, 2002.
- [13] Yang JL, Chiu HN, Tzeng G-H, Yeh RH. "Vendor selection by integrated fuzzy MCDM techniques with independent and interdependent relationships". *Information Sciences*, 4166–4183, 2008.
- [14] Zadeh L. "Fuzzy sets". *Information and Control*, 338-353, 1965).
- [15] Lertworasirikula S, Fanga S-C, Joines JA, Nuttle HL. "Fuzzy data envelopment analysis (DEA): A possibility approach". *Fuzzy Sets and Systems*, 379–394, 2003.
- [16] Angiz MZ, Emrouznejad A, Mustafa A. "Fuzzy data envelopment analysis: A discrete approach". *Expert Systems with Applications*, 2263–2269, 2012.
- [17] Lertworasirikul S, Fang S, Nuttle H, Joines J. "Fuzzy data envelopment analysis". *Proceedings of the 9th Bellman Continuum*, 342, Beijing, 2002.
- [18] Prakash T. *Land Suitability Analysis for Agricultural Crops: A Fuzzy Multicriteria Decision Making Approach*. Masters Thesis, Netherlands: ITC Institute, 2003.
- [19] Hsu TH, Nian SH. "Interactive fuzzy decision aided systems-a case on public transportation system operations". *Journal of Transportation Taiwan*, 10(4), 76-96, 1997.
- [20] Liou T-S, Wang M-JJ. "Ranking fuzzy numbers with integral value". *Fuzzy Sets and Systems*, 247-255, 1992.
- [21] Federal Aviation Agency-FAA. "2013 Commercial Space Transportation Report". Washington, DC, USA, 2013.
- [22] Saaty TL. "Decision making with the analytic hierarchy process". *Int. J. Services Sciences*, 83-98, 2008.