

# Yükseköğretimde Yenilikçi Eğitim Teknolojilerinin Seçimi: Resim Bulanık EDAS ve Best Worst Yöntemi ile Bir Uygulama\*

(Araştırma Makalesi)

*Selection of Innovative Educational Technologies in Higher Education: An Application with Picture Fuzzy EDAS and Best Worst Method*

Doi: 10.29023/alanyaakademik.1655523

Eren KAMBER<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Üyesi, Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Rafet Kayış Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, eren.kamber@alanya.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-6426-9936

## ÖZET

**Anahtar Kelimeler:**  
AR, VR, Eğitim, EDAS, Resim Bulanık EDAS, Çok Kriterli Karar Verme, Best Worst Yöntemi

**Makale geliş tarihi:**  
11.03.2025

**Kabul tarihi:**  
20.06.2025

## Keywords:

AR, VR, Education, EDAS, Picture Fuzzy EDAS, Multi-Criteria Decision Making, Best Worst Method

Bu çalışma, yükseköğretimde artırılmış gerçeklik (AR) ve sanal gerçeklik (VR) teknolojilerinin seçimini optimize etmek amacıyla resim bulanık (PF) sayılarla genişletilmiş EDAS (PF-EDAS) yöntemini uygulamaktadır. Dijital dönüşüm süreciyle birlikte eğitim ortamlarında AR/VR teknolojilerine yönelik artan talep, bu teknolojilerin etkili ve sürdürülebilir bir şekilde seçilmesini gerektirmektedir. Çalışmada, dilsel değerlendirmeler resim bulanık sayılarla modellenmiş ve belirsizliklerin üstesinden gelmek amacıyla PF-EDAS yöntemi Best Worst Yöntemi (BWM) ile entegre edilmiştir. Bu yöntem, kriter ağırlıklarının tutarlı bir şekilde belirlenmesini ve alternatiflerin güvenilir bir şekilde değerlendirilmesini sağlamıştır. Kriterler arasında öğrenme etkinliği, kullanım kolaylığı, maliyet, kapsayıcılık ve sürdürülebilirlik gibi faktörler yer almıştır. Değerlendirme sonuçları, AR/VR teknolojilerinin özellikle fen, teknoloji, mühendislik ve matematik (STEM) alanlarında yenilikçi öğretim yöntemlerini destekleyebileceğini göstermektedir. Karşılaştırmalı analizde PF-CODAS ve PF-CoCoSo yöntemleri de kullanılmış ve sonuçların tutarlılığı doğrulanmıştır. Çalışma, belirsizlik ve muğlaklık içeren çok kriterli karar verme (ÇKKV) süreçlerinde PF-EDAS yönteminin etkin bir araç olduğunu ortaya koymaktadır. Gelecekte, farklı eğitim seviyelerinde daha geniş karar gruplarıyla uygulanması ve dinamik veri entegrasyonu ile desteklenmesi bu yöntemin genel uygulanabilirliğini artırabilir.

## ABSTRACT

This study applies the Picture Fuzzy EDAS (PF-EDAS) method to optimize the selection of augmented reality (AR) and virtual reality (VR) technologies in higher education. With the increasing demand for AR/VR technologies driven by digital transformation, their effective and sustainable integration into educational environments has become essential. In this study, linguistic assessments were modeled using picture fuzzy numbers, and the PF-EDAS method was integrated with the Best Worst Method (BWM) to handle uncertainties and determine reliable criteria weights for evaluation. Key criteria considered include learning effectiveness, ease of use, cost, inclusivity, and sustainability. The results indicate that AR/VR technologies have significant potential to support innovative teaching methods, particularly in science, technology, engineering, and mathematics (STEM) fields. However, challenges such as high costs and the need for specialized hardware remain critical barriers to widespread adoption. A comparative analysis using the PF-CODAS and PF-CoCoSo methods validated the consistency of the results. The findings demonstrate that the PF-EDAS method is an effective tool for multi-criteria decision-making under uncertainty and ambiguity. Future research could extend its application to different educational levels with larger decision-making groups and incorporate dynamic data integration to improve adaptability and generalizability.

\* Bu makale için Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Alanı Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu'nun 10.03.2025 tarihli ve 02/02 nolu kararınca etik kurul onayı alınmıştır.

## 1. GİRİŞ

Dijital dönüşüm, organizasyonların bilgi çağının gerekliliklerine etkin bir şekilde uyum sağlaması için kritik bir yol olarak kabul edilmektedir. Sürdürülebilir bir eğitim yönetim çerçevesinin stratejik yönelimi, küresel yükseköğretim sektöründe süregelen dijital devrim tarafından şekillenmektedir (Mohamed Hashim vd., 2022). Teknolojik ilerlemeler, eğitim alanını derinden dönüştürerek geleneksel öğretim yöntemlerini sürükleyici ve etkileşimli öğrenme ortamlarına yönlendirmiştir (Almufarreh & Arshad, 2023). Özellikle Artırılmış Gerçeklik (AR) ve Sanal Gerçeklik (VR) gibi dönüştürücü teknolojiler, eğitimin yeni bir çağa giriş yaptığını göstermektedir (Muñoz-Saavedra vd., 2020).

Dijital yeniliklerin hızlı ilerlemesi, çeşitli sektörlerde benzeri görülmemiş dönüşümlere yol açmış ve eğitim, bu dönüşüm dalgasının merkezinde yer almıştır. AR ve VR gibi yükselen teknolojik paradigmlar, eğitim uygulamalarını dönüştürme potansiyeline sahip önemli araçlar olarak görülmektedir. Bu teknolojiler, geleneksel pedagojik çerçevelere meydan okuyarak ve bunları yeniden tanımlama potansiyeli sunarak etkileşimli, sürükleyici ve dönüştürücü öğrenme deneyimleri sağlamaktadır (Burley & Steven, 2023).

Günümüzde AR, eğitim ortamlarında yaygın olarak kullanılan bir teknoloji haline gelmiştir. Son yıllarda AR, aynı zamanda akademik araştırmaların da önemli bir konusu olmuştur. AR teknolojisinin bu denli yaygınlaşmasının temel nedenlerinden biri, artık pahalı donanım ve karmaşık ekipmanlara, örneğin başa takılan ekranlara, bağımlı olmamasıdır. Bu teknoloji artık bilgisayarlar ve mobil cihazlarla kolaylıkla entegre edilebilmektedir ve bu durum, geçmişte karşılaşılan erişim engellerini büyük ölçüde ortadan kaldırmıştır (Akçayır & Akçayır, 2017).

Bu çalışmada kullanılan çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemleri, bulanık sayıların genişletmelerine dayanmaktadır. Çok kriterli grup karar verme, pratik senaryolarda sıkça karşılaşılan ve genellikle doğasında belirsizlik ve muğlaklık barındıran önemli ve karmaşık bir süreçtir (Krishankumar vd., 2020). Örneğin potansiyel bir tedarikçiyi seçme süreci, alternatiflerin ilk havuzunu daraltarak en uygun seçeneğe ulaşmayı amaçlayan karmaşık bir karar verme sürecidir. Bu süreçler, içerdikleri belirsizlik nedeniyle çeşitli ÇKKV tekniklerinin son yıllarda geliştirilmesine yol açmıştır (Gupta vd., 2019).

Bulanıklık, farklı deneyim seviyelerine ve yargılara sahip karar vericilerin etkin bir şekilde iletişim kurmasını sağlamaktadır (Kamber vd., 2024). Bu nedenle, bulanık sayılar, karar vericilerin görüşlerini daha doğru bir şekilde ifade etmek amacıyla ÇKKV problemlerinde sıkça kullanılmaktadır.

Çalışma kapsamında, bulanık sayıları içeren ÇKKV yöntemi olan PF-EDAS yöntemi kullanılmış olup, yükseköğretimde AR ve VR teknolojilerinin seçimi problemi ile ele alınmıştır. Makalenin motivasyonu ve literatüre yaptığı başlıca katkılar aşağıda listelenmiştir.

- Klasik Best Worst Yöntemi (BWM) ile resim bulanık EDAS yöntemlerinin birleştirilmesi, bu makalenin yeniliği olarak PF-EDAS yönteminin çözüm perspektifini geliştirmiştir.
- Yükseköğretimde öncelikli kullanılacak AR/VR teknolojisi seçimi problemi PF-EDAS yöntemi ile ele alınmış, resim bulanık sayı ortamında belirsizlik yöntemleri kullanılmıştır.
- Bu çalışma, EDAS (Evaluation based on Distance from Average Solution - Ortalama Çözüm Uzaklığına Dayalı Değerlendirme) yönteminin ve resim bulanık sayıların baskınlıklarını birleştirmiştir. Resimsel bulanık sayıların avantajlarından biri, kabul, tereddüt ve reddetme derecelerinin aynı anda ifade edilebilmesidir (Cuong & Kreinovich, 2013). Ayrıca, resim bulanık sayılar karar vericilerin tereddüt ve reddetme derecelerini aynı anda ifade etmelerine olanak tanımaktadır (Kamber vd., 2024).
- EDAS yönteminin başlıca avantajları ideal çözüme olan uzaklıkların hesaplanmasını kolaylaştırması ve sonuçlara hızlı bir şekilde ulaşılmasıdır (Karaşan & Kahraman, 2018).

Çalışmanın geri kalan bölümleri şu şekilde yapılandırılmıştır. Bölüm 2'de, resim bulanık sayılar, AR/VR tanımları ve yükseköğretimde kullanımı ve EDAS yöntemi hakkındaki literatür taraması sunulmaktadır. Bölüm 3'te BWM, resim bulanık sayılar ve klasik EDAS yöntemi çözüm adımları açıklanmıştır. Bölüm 4'te PF-EDAS yöntemi çözüm adımları anlatılmıştır. Bölüm 5'te, PF-EDAS yöntemi kullanılarak yükseköğretimde kullanılacak AR/VR teknolojisi seçimi problemi için uygulama gerçekleştirilmiştir. Bölüm 6'da, uygulama sonuçlarını karşılaştırmak adına PF-CODAS ve PF-CoCoSo yöntemleri ile yükseköğretimde kullanılacak AR/VR teknolojisi seçimi problemi yeniden çözülmüştür. Son olarak, çalışmanın sonucu Bölüm 7'de aktarılmıştır.

## 2. LİTERATÜR TARAMASI

VR, çeşitli görüntüleme ve arayüz cihazları kullanılarak bilgisayar grafikleri sistemleri ile desteklenen, bilgisayar tarafından oluşturulmuş bir ortamla kullanıcıların etkileşim kurmasını sağlamaktadır. Bu platform, öğretmenlere çeşitli öğretim yöntemleri ve araçları sunmaktadır. Ancak sanal gerçekliğin en önemli özelliği, öğrencilerin

problem çözme becerilerini geliştirmesini ve yeni kavramlar ile bilgileri araştırmasını sağlamasıdır (Gudoniene & Rutkauskiene, 2019).

VR, öğrencilerin sistem tarafından sağlanan nesnelere etkileşim kurabileceği paylaşımlı bir platformdur. Kullanıcılar için etkileşim üç temel kategoriye ayrılır: navigasyon (3 boyutlu ortamda gerçekleştirilen ve sanal gerçekliğin temel özelliği olan keşif, arama ve manevra yapma), seçim/manipülasyon (sanal nesnelere etkileşimde bulunma) ve sistem kontrol görevleri (etkileşim modlarını veya sistemin durumunu kontrol etme imkânı sağlar). Etkili bir simülasyon, kullanıcıyı sistemin simüle etmeye çalıştığı senaryoya yakın, hatta tamamen aynı olan bir duruma yerleştirebilen bir simülasyondur (Endsley, 2016).

Öte yandan AR, “gerçek dünyadaki bir görüntü veya videonun sanal nesnelere eşleştirilmesiyle zenginleştirilmiş sanal bir dünya” olarak tanımlanabilmektedir (Valente vd., 2016). Genel olarak AR/VR, öğrencilerin motivasyon ve katılımını artırarak geleneksel öğrenme yöntemlerinin sunmakta zorlandığı sanal deneyimleri öğrencilere sunmaktadır (Ardiny & Khanmirza, 2018).

AR, metin, görüntü, video ve 3 boyutlu nesnelere gibi dijital bilgileri gerçek dünyaya entegre eden, gelişmekte olan bir teknolojidir. Artırılmış gerçeklik terimi, ilk olarak 1990 yılında Boeing çalışanları tarafından ortaya atılmıştır (Akçayır ve Akçayır, 2017). AR, öğrencilerin gerçek dünya ortamlarında otantik keşiflere katılmasını sağlarken, VR ise öğrencilerin sürükleyici simülasyon öğrenme deneyimlerini gerçekleştirmelerine olanak tanımaktadır (Tan vd., 2022).

AR teknolojisi, öğrencilere etkileşimli bir ortamda daha etkili öğrenme imkânı sunmaktadır. Öğrencilerin hem birbirleriyle hem de çevreleriyle sosyal iletişim kurmasını sağlamaktadır. AR teknolojisi, öğrencilere gerçek dünya senaryolarında etkili ve çekici bir öğrenme ortamı sunan yeni tür otomatik uygulamaların kullanımını tanıtmaktadır (Weng vd., 2016). Güçlü bir eğitim aracı olan AR, daha kısa eğitim süreleri ve görevlerde daha hızlı uzmanlaşma sağlayabilmektedir. Ancak, bu etkinin sağlanması için uygun senaryoların belirlenmesi ve uygun öğrenme deneyimlerinin tasarlanması gereklidir (Gudoniene & Rutkauskiene, 2019).

Fazel ve Izadi'ye (2018) göre, öğrenme süreci boyunca AR kullanımı, öğrencilerin gerçek ve sanal yaşam ortamları arasında bir bağ kurmasına yardımcı olmaktadır. VR'nin uygulanması ise, öğrencilerin eğitim deneyimlerini geliştirmek için sürükleyici simülasyonlara katılmalarını sağlamaktadır (Tan vd., 2022). Ayrıca bu teknolojik cihazlar, öğrencilerin kişisel hedeflerine uygun bilgileri sağlayarak öğrenme süreçlerini desteklemektedir (Cheng, 2017).

AR ve VR'nin eğitim ortamlarında uygulanması, bilginin nasıl edinildiğini ve uygulandığını köklü bir şekilde değiştirme potansiyeline sahiptir. Bu teknolojiler, öğrencilere içerikle daha önce görülmemiş düzeyde etkileşimde bulunma, karmaşık kavramları keşfetme ve sanal ortamlarla etkileşim kurma fırsatları sunmaktadır (Algerafi vd., 2023).

Literatürde yüksek öğrenim kapsamında AR/VR teknolojilerini içeren çalışmalar son yıllarda sıklıkla gerçekleştirilmektedir. Örneğin, Wang vd. (2018), VR teknolojileri, uygulamaları ve gelecekteki yönelimleri üzerine kapsamlı bir literatür incelemesi ve üç aşamalı bir analiz gerçekleştirmiştir. Diao ve Shih (2019) ise VR'nin uygulanmasında karşılaşılan bazı sorunları, sistem türleri ve ekipmanların seçimi, araştırma yöntemlerinin uygulanması, öğrenme stratejilerinin benimsenmesi ve öğretim yöntemleri bağlamında ele almıştır. Soliman vd. (2021), VR'nin mühendislik eğitiminde öğrencilerin dersleri anlama düzeylerini, notlarını ve eğitim deneyimlerini artıran etkili bir araç olduğunu ortaya koymuştur. Di Lanzo vd. (2020) ise sanal ortamların mühendislik eğitiminde öğretim aracı olarak kullanımını detaylı bir şekilde tartışmış ve bulgular, sanal sınıf ortamının geleneksel eğitim ortamını tamamlayıcı nitelikte olduğu ve öğrencilerin ilgili becerileri öğrenmelerine katkı sağladığını göstermiştir. Zhang vd. (2019) tarafından yapılan bir çalışma, PowerPoint tabanlı ders modelinden daha etkileşimli bir AR modeline geçilmesi durumunda öğrencilerin öğrenme sonuçlarının benzer olabileceğini, ancak sınavlarda daha yüksek özgüvene sahip olmalarının daha fazla ilgi ve motivasyon sağlayabileceğini göstermiştir. Ayrıca, okullardan uzun süre ayrı kalma durumu, evlerde eğitim amacıyla AR/VR ile ilgili teknolojilerin kullanımını teşvik edebilmektedir.

Bulanık sayılar ilk olarak Zadeh tarafından 1965 yılında, problemlerdeki belirsizliği net bir şekilde açıklamak amacıyla önerilmiştir. Bulanık teoride, değerlendirilmesi gereken farklı durumlar 0 ile 1 arasında bir üyelik derecesi ile ifade edilmektedir (Zadeh, 1965). Problemleri üyelik dereceleri atayarak ifade etmek, çözüm aşamasında birçok avantaj sağlamıştır. Ancak, bazı karmaşık problemlerde yalnızca üyelik dereceleri atamak, belirsizlik düzeyini anlamak için yeterli değildir. Bu tür problemlerin karmaşıklığını açık bir şekilde ifade edebilmek için bulanık genişletmelere varlıkların üyelik dışı dereceleri de dahil edilmiştir (Wang & Li, 2020). Ayrıca hem üyelik hem de üyelik dışı dereceleri dikkate alan birçok bulanık genişletme, çeşitli araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir (Yager & Abbasov, 2013).

Cuong ve Kreinovich (2013), sezgisel bulanık kümelerin bir genişletmesi olarak resimsel bulanık kümeleri (picture fuzzy sets - PF) önermiştir. Resimsel bulanık kümeler, diğer bulanık genişletmelere kıyasla birçok avantajı

sahiptir. Bazı problemler, üyelik ve üyelik dışı derecelerle sınırlı olan sezgisel bulanık kümeler veya Pisagor bulanık kümeler ile açıklanamamaktadır. Örneğin, bir oylama sistemini değerlendirirken insan görüşleri evet, hayır, çekimser ve ret gibi yanıtları içerebilmektedir. Bir oylama sistemine benzer şekilde, resimsel bulanık kümede üyelik derecesi, tarafsız üyelik derecesi ve üyelik dışı derecesi olmak üzere üç işlevden oluşmaktadır (Wei & Gao, 2018). Resimsel bulanık kümeler için bir kısıt olarak, bu üç derecenin toplamının 0 ile 1 arasında olması gerekmektedir (Wei vd., 2018).

Keshavarz Ghorabae vd. (2015) tarafından geliştirilen EDAS (Evaluation based on Distance from Average Solution - Ortalama Çözüm Uzaklığına Dayalı Değerlendirme), her bir kriteri göz önünde bulundurarak alternatiflerin ortalama çözümden uzaklıkları üzerinden değerlendirildiği bir yöntemdir. EDAS yöntemi, TOPSIS gibi mesafeye dayalı ÇKKV tekniklerine benzerlik göstermektedir. Bu yöntemin temel avantajları, ideal çözüme olan uzaklıkların kolayca hesaplanmasını sağlaması ve sonuçlara hızlı bir şekilde ulaşılmasını mümkün kılmasıdır (Karaşan & Kahraman, 2018).

Klasik EDAS yönteminin uygulamaları literatür taraması sonucunda farklı alanlarda görülebilmektedir. Ayrıca, EDAS yönteminin bulanık sayılarla entegre edilmiş birçok farklı uygulamasının da değişik sektörlerde uygulandığı görülmektedir. Bu çalışmalar, bulanık EDAS yöntemi ile tedarikçilerin sıralanması (Keshavarz Ghorabae vd., 2016) ve aralık değerli nütrosifik EDAS yöntemi (Karaşan & Kahraman, 2018), yatırım projeleri seçimi için nütrosifik bulanık EDAS (Fan vd., 2020), aralık değerli Pisagor bulanık EDAS yöntemi ile araç seçimi (Yanmaz vd., 2020), küresel bulanık EDAS ve endüstriyel robot seçiminde uygulaması (Garg & Sharaf, 2022), sezgisel bulanık EDAS yöntemi ile katı atık bertaraf sahası seçimi (Kahraman vd., 2017), bulanık EDAS yöntemi uygulaması ile hastane yeri seçimi (Yılmaz & Atan, 2021) şeklinde farklı sektörlerde yapılan EDAS yöntemi uygulamaları olarak listelenebilmektedir.

### 3. YÖNTEM

#### 3.1. Resim Bulanık Sayıların Temel Kavramları

**Tanım 1.**  $X$  evrenindeki bir resim bulanık sayısı (PFS),  $A = \{x, \mu(x), \eta(x), \nu(x) \mid x \in X\}$  biçiminde tanımlansın.

Öyle ki,  $\mu_A(x) \in [0,1]$  "A'nın pozitif üyelik derecesi",  $\eta_A(x) \in [0,1]$  "A'nın tarafsız üyelik derecesi" ve  $\nu_A(x) \in [0,1]$  "A'nın negatif üyelik derecesi" olarak adlandırılmaktadır. Ayrıca,  $\mu_A(x)$ ,  $\eta_A(x)$  ve  $\nu_A(x)$  değerleri  $0 \leq \mu(x) + \eta(x) + \nu(x) \leq 1$ ,  $\forall x \in X$  eşitliğini sağlamalıdır. Eşitlik sonrası, A kümesinde x'in ret üyeliği derecesi  $x \in X$ ,  $\pi_A(x) = 1 - (\mu(x) + \eta(x) + \nu(x))$  olarak sağlanmaktadır (Cuong & Kreinovich, 2013).

**Tanım 2.**  $A = (\mu_A, \eta_A, \nu_A)$  ve  $B = (\mu_B, \eta_B, \nu_B)$  kümeleri iki ayrı resim bulanık kümeleri temsil etsin. Resim bulanık sayıları içeren çeşitli matematiksel hesaplamalar ve formüller şu şekildedir: (Cuong & Kreinovich, 2013).

$$A \oplus B = (\mu_A + \mu_B - \mu_A \mu_B, \eta_A \eta_B, \nu_A \nu_B); \quad (1)$$

$$A \otimes B = (\mu_A \mu_B, \eta_A + \eta_B - \eta_A \eta_B, \nu_A + \nu_B - \nu_A \nu_B); \quad (2)$$

$$\lambda A = (1 - (1 - \mu_A)^\lambda, \eta_A^\lambda, \nu_A^\lambda), \lambda > 0; \quad (3)$$

$$A^\lambda = (\mu_A^\lambda, 1 - (1 - \eta_A)^\lambda, 1 - (1 - \nu_A)^\lambda), \lambda > 0; \quad (4)$$

**Tanım 3.** Aynı şekilde,  $A = (\mu_A, \eta_A, \nu_A)$  ve  $B = (\mu_B, \eta_B, \nu_B)$  kümeleri iki ayrı resim bulanık kümeleri temsil etsin. A ve B'nin skor ve doğruluk fonksiyonları aşağıda ifade edilmektedir (Cuong & Kreinovich, 2013):

$$S(A) = \mu_A - \nu_A, \quad S(B) = \mu_B - \nu_B; \quad (5)$$

$$H(A) = \mu_A + \eta_A + \nu_A, \quad H(B) = \mu_B + \eta_B + \nu_B; \quad (6)$$

Tanım 3'e göre, A ve B kümeleri büyüklüklerine göre şu şekilde sıralanmaktadır:

Eğer  $s(A) < s(B)$  ise,  $A < B$ ;

Eğer  $s(A) > s(B)$  ise,  $A > B$ ;

Eğer  $s(A) = s(B)$  ve  $h(A) < h(B)$  ise  $A < B$ ;

Eğer  $s(A) = s(B)$  ve  $h(A) > h(B)$  ise  $A > B$ ;

Eğer  $s(A) = s(B)$  ve  $h(A) = h(B)$  ise  $A = B$ ;

**Tanım 4.** Normalize edilmiş resim bulanık Öklid mesafesi (Cuong & Kreinovich, 2013) ve Taksicab (Cuong & Kreinovich, 2013) mesafesi şu şekildedir:

$$e_p(A, B) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \begin{array}{c} (\mu_A(x_i) - \mu_B(x_i))^2 + \\ (\eta_A(x_i) - \eta_B(x_i))^2 + \\ (v_A(x_i) - v_B(x_i))^2 \end{array} \right)}; \quad (7)$$

$$d_p(A, B) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (|\mu_A(x_i) - \mu_B(x_i)| + |\eta_A(x_i) - \eta_B(x_i)| + |v_A(x_i) - v_B(x_i)|) \quad (8)$$

**Tanım 5.** Ağırlıklandırılmış karar matrisi  $T = (t_{ij})_{m \times n}$  şu şekilde hesaplanmaktadır (Wang vd., 2018):

$$t_{ij} = w_j r_{ij} = \langle 1 - (1 - \mu_{r_{ij}})^{w_j}, \eta_{r_{ij}}^{w_j}, (\eta_{r_{ij}} + v_{r_{ij}})^{w_j} - \eta_{r_{ij}}^{w_j} \rangle; \quad (9)$$

### 3.2. EDAS Yöntemi

Ghorabae vd. (2015) tarafından geliştirilen EDAS yöntemi “Evaluation Based On Distance From Average Solution” yani “Ortalama Çözüm Uzaklığına Dayalı Değerlendirme” ismiyle ileri sürülmüş; COPRAS, SAW, TOPSIS, VIKOR gibi ÇKKV yöntemleri ile kıyaslanmış ve yöntemin geçerli olup olmadığı konusunda testler yapılmıştır. Güncel bir yöntem olarak günümüzde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Özbek & Engür, 2018). EDAS yöntem adımları alt kısımda anlatılacaktır (Ghorabae vd., 2015).

**Adım 1:** Karar matrisi oluşturulur. Eşitlik (10) de X karar matrisi  $m \times n$  boyutunda gösterilmektedir. Satırlar alternatifleri ( $i=1,2,\dots,m$ ), sütunlar ise kriterleri ( $j=1,2,\dots,n$ ) ifade etmektedir.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

**Adım 2:** Yöntemin ikinci aşamasında, problemde yer alan bütün kriterler için ortalama çözümün belirlenmesi gerekmektedir. AV olarak sembolize edilen ortalama çözüm Eşitlik (11) ve (12) kullanılarak hesaplanır.

$$AV = [AV_j]_{1 \times n} \quad (11)$$

$$AV_j = \frac{\sum_{i=1}^m x_{ij}}{m} \quad (12)$$

**Adım 3:** Ortalamadan pozitif uzaklık matrisi (PDA) ve ortalamadan negatif uzaklık matrisi (NDA) ortalama çözüm kullanılarak hesaplanır. Kriterlerin fayda veya maliyet yönü olmasına göre hesaplama değişkenlik gösterir.

$$PDA = [PDA_{ij}]_{m \times n} \quad (13)$$

$$NDA = [NDA_{ij}]_{m \times n} \quad (14)$$

Eğer kriterler fayda yönü ise Eşitlik (15) ve (16) yardımı ile uzaklık matrisleri hesaplanır.

$$PDA_{ij} = \frac{\max(0, (X_{ij} - AV_j))}{AV_j} \quad (15)$$

$$NDA_{ij} = \frac{\max(0, (AV_j - X_{ij}))}{AV_j} \quad (16)$$

Eğer kriterler maliyet yönü ise Eşitlik (17) ve (18) yardımı ile uzaklık matrisleri hesaplanır.

$$PDA_{ij} = \frac{\max(0, (AV_j - X_{ij}))}{AV_j} \quad (17)$$

$$NDA_{ij} = \frac{\max(0, (X_{ij} - AV_j))}{AV_j} \quad (18)$$

**Adım 4:** Karar matrisinde yer alan alternatifler için, ağırlıklı uzaklık matrisleri hesaplanır. Pozitif uzaklık matrisi ( $SP_i$ ) için Eşitlik (19), negatif uzaklık matrisi ( $SN_i$ ) için ise Eşitlik (20) kullanılır.

$$SP_i = \sum_{j=1}^n w_j PDA_{ij} \quad (19)$$

$$SN_i = \sum_{j=1}^n w_j NDA_{ij} \quad (20)$$

**Adım 5:** Eşitlik (21) ve (22) kullanılarak  $SP_i$  ve  $SN_i$  değerleri normalize edilir.

$$NSP_i = \frac{SP_i}{\max_i(SP_i)} \quad (21)$$

$$NSN_i = 1 - \frac{SN_i}{\max_i(SN_i)} \quad (22)$$

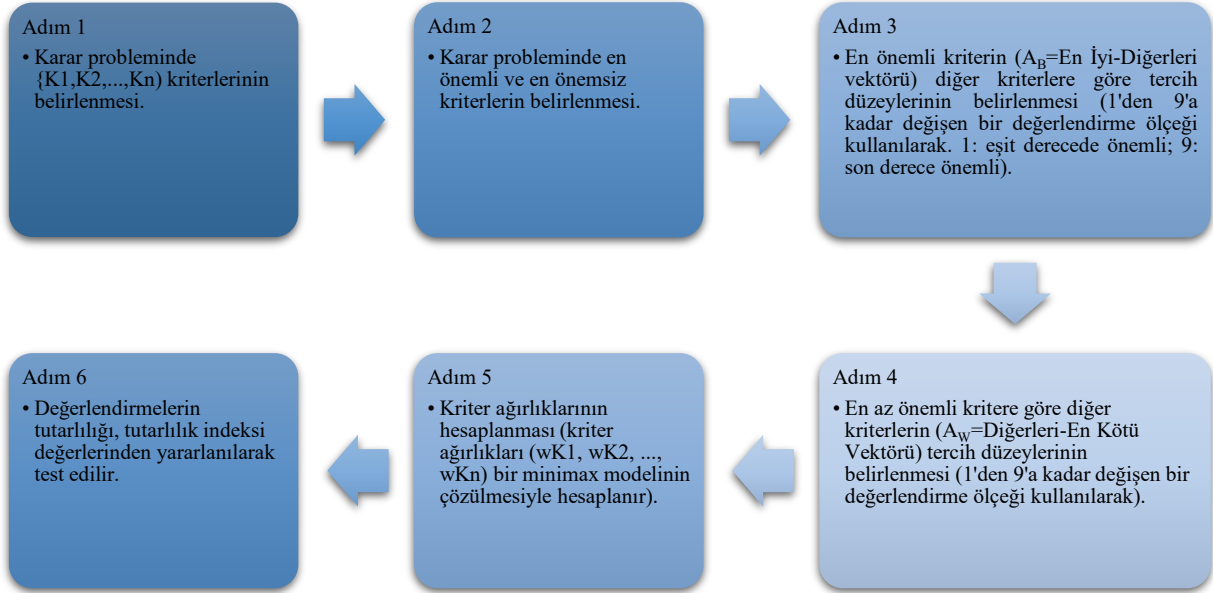
**Adım 6:** Son olarak, normalize edilen  $SP_i$  ve  $SN_i$  değerleri kullanılarak, Eşitlik (23)'te gösterildiği üzere her bir alternatif için değerlendirme skorları ( $AS_i$ ) hesaplanır.  $AS_i$  değerleri 0 ile 1 arasında değerler olması gerekmektedir.

$$AS_i = \frac{1}{2}(NSP_i + NSN_i) \quad (23)$$

Alternatifler  $AS_i$  değerlerine göre büyükten küçüğe sıralanır. En büyük  $AS_i$  değerine sahip olan alternatif, EDAS çözüm yöntemine göre en iyi seçenek olarak belirlenir.

### 3.3. Best Worst Yöntemi

Rezaei (2015) tarafından geliştirilen vektör tabanlı ÇKKV yöntemi olan BWM, AHP yöntemiyle karşılaştırıldığında üstünlük olarak daha az çift karşılaştırma matrisi gerektirmektedir. Bu çalışmada, kriter ağırlıklarını belirlemek için BWM bir ÇKKV yöntemi olarak kullanılmıştır. BWM yönteminde yer alan adımlar Şekil 1'de gösterilmiştir (Rezaei, 2015). BWM yöntemi adımları için kullanılan denklemler Rezaei (2015) tarafından yapılan çalışmadan alınmıştır.



Şekil 1. BWM Yöntem Adımları

$a_{Bj}$ , en iyi B kriterine göre j kriterinin tercihini göstermektedir ( $j=1,2,\dots,n$ ).  $a_{BB} = 1$  değerini almaktadır.  $a_{jW}$ , j kriterinin en kötü kritere göre tercihini göstermektedir.  $a_{WW} = 1$  değerini almaktadır.

Kriterler için en uygun ağırlık, her  $w_B/w_j$  ve  $w_j/w_W$  çifti için  $w_B/w_j = a_{Bj}$  ve  $w_j/w_W = a_{jW}$  sağlayan ağırlıktır. Tüm j'ler için bu koşulları sağlama amacıyla,  $|\frac{w_B}{w_j} - a_{Bj}|$  ve  $|\frac{w_j}{w_W} - a_{jW}|$  maksimum mutlak farklarının minimize edildiği bir çözüm bulunmalıdır. Ağırlıklar için negatif olmama ve ağırlıkların toplamda 1 olması koşulu dikkate alındığında düzenlenen problem modeli aşağıda gösterilmiştir:

min  $\xi$

s. t.

$$\left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right| \leq \xi$$

$$\left| \frac{w_j}{w_W} - a_{jW} \right| \leq \xi$$

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

$$w_j \geq 0, \quad \forall j$$

Matematiksel modelin çözümü sonucunda optimal ağırlıklar ( $w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*$ ) ve  $\xi^*$  elde edilmektedir.

#### 4. PF-EDAS YÖNTEMİ

Çalışma kapsamında Rezaei (2015) tarafından geliştirilen Best Worst yöntemi ile, Zhang vd. (2021) tarafından geliştirilen PF-EDAS yöntemi entegre edilecektir. Bu bağlamda, mevcut PF-EDAS metodunun BWM metodu ile birlikte kullanılarak geliştirilmiş hali ve uygulama adımları şu şekilde olacaktır:

**Adım 1.** Resim bulanık karar matrisi aşağıdaki denklemde verildiği formatta oluşturulur.

$$\tilde{X} = [\tilde{x}_{ij}]_{n \times m} = \begin{bmatrix} (\tilde{x}_{11} \tilde{x}_{12} \dots \tilde{x}_{1m}) \\ \vdots \\ (\tilde{x}_{n1} \tilde{x}_{n2} \dots \tilde{x}_{nm}) \end{bmatrix} \quad (24)$$

Burada,  $\tilde{x}_{ij} \geq 0$  ve  $\tilde{x}_{ij} = \{ \mu(x), \eta(x), \nu(x) \}$ ,  $0 \leq \mu(x) + \eta(x) + \nu(x) \leq 1$  şeklindedir.

Alternatifleri kriterlere göre değerlendirmek ve resim bulanık karar matrisini hazırlamak için, resim bulanık sayıları içeren Tablo 1'deki ölçek (Duong & Thao, 2021) uygulanır. Karar vericilerin görüşleri, Tablo 1 yardımıyla karar matrisindeki dilsel terimler kullanılarak resim bulanık sayılara dönüştürülecektir.

**Tablo 1. Resim Bulanık Sayıları İçin Dilsel Ölçek**

Alternatifler için dilsel değişken ifadeler	Resim bulanık sayılar
Çok çok düşük (ÇÇD)	(0; 0; 1)
Çok düşük (ÇD)	(0; 0,05; 0,9)
Düşük (D)	(0,2; 0,45; 0,25)
Orta (O)	(0,45; 0,4; 0,1)
Yüksek (Y)	(0,8; 0,1; 0,05)
Çok yüksek (ÇY)	(0,9; 0,05; 0)
Çok çok yüksek (ÇÇY)	(1; 0; 0)

**Adım 2.** Resim bulanık normalize edilmiş matris hesaplanır. Maliyet yönlü kriterlerin olması durumunda, kriterlerin normalleştirilmesi için aşağıdaki formül kullanılır. Resim bulanık kümelerinde fayda kriterleri için normalleştirmeye gerek yoktur (Khan vd., 2019).

$$r_{ij} = \{ \nu(x), \eta(x), \mu(x) \} \quad (25)$$

**Adım 3.** Resim bulanık karar matrisinde yer alan her bir kriter için ortalama çözüm ( $AV_j$ ) Eşitlik (26) kullanılarak hesaplanır.

$$AV_j = (1 - \prod_{r=1}^k (1 - \mu_{\tilde{x}_{ij}})^{\frac{1}{k}}; \prod_{r=1}^k \eta_{\tilde{x}_{ij}}^{\frac{1}{k}}; \prod_{r=1}^k \nu_{\tilde{x}_{ij}}^{\frac{1}{k}}) \quad (26)$$

**Adım 4.** Adım 3'te hesaplanan ortalama çözümlere göre, ortalamadan pozitif uzaklık matrisi ( $PDA_{ij}$ ) ve ortalamadan negatif uzaklık matrisi ( $NDA_{ij}$ ) hesaplanır. Skor fonksiyonlarını hesaplamak için, Eşitlik (5) ele alınır.

$$PDA_{ij} = \frac{\max(0, s(AV_j) - s(\tilde{x}_{ij}))}{s(AV_j)} \quad (27)$$

$$NDA_{ij} = \frac{\max(0, s(\tilde{x}_{ij}) - s(AV_j))}{s(AV_j)} \quad (28)$$

**Adım 5.** Her kriter için kriter ağırlıkları ( $w_j$ ), BWM yönteminin uygulama adımlarında sunulduğu şekilde hesaplanır.

**Adım 6.** Karar matrisinde yer alan alternatifler için, ağırlıklı uzaklık matrisleri Eşitlik (19) ve Eşitlik (20) ile gösterildiği üzere hesaplanır.

**Adım 7.** Eşitlik (21) ve Eşitlik (22) kullanılarak  $SP_i$  ve  $SN_i$  değerleri normalize edilir.

**Adım 8.** Normalize edilen  $SP_i$  ve  $SN_i$  değerleri kullanılarak, Eşitlik (23)'te gösterildiği üzere her bir alternatif için değerlendirme skorları ( $AS_i$ ) hesaplanır.  $AS_i$  değerleri 0 ile 1 arasında değerler olması gerekmektedir.

**Adım 9.** Alternatifler  $AS_i$  değerlerine göre büyükten küçüğe sıralanır. En büyük  $AS_i$  değerine sahip olan alternatif, PF-EDAS çözüm yöntemine göre en iyi seçenek olarak belirlenir.

## 5. UYGULAMA

Çalışma kapsamında, yükseköğretimde AR/VR teknolojisi seçimi problemi için Tablo 2’de yer alan alternatifler kullanılmıştır. Tablo 2, yükseköğretim ortamında değerlendirilen altı farklı AR/VR teknolojisinin avantajlarını, dezavantajlarını ve kullanım alanlarını detaylandırmaktadır. Her alternatif farklı teknik özelliklere sahip olup belirli eğitim senaryolarında üstünlük gösterecek şekilde tasarlanmıştır. No-code platform tabanlı sistemler (Alt1) kolay içerik üretimi sunarken, yüksek kaliteli VR gözlükler (Alt2), tıp ve mühendislik gibi disiplinlerde güçlü öğrenme deneyimleri sağlamaktadır. Taşınabilir mobil VR cihazları (Alt3) ise basit simülasyonlara erişimi kolaylaştırmaktadır. Daha gelişmiş hareket takibi ve etkileşim özellikleri sunan VR sistemleri (Alt4), mühendislik ve tasarım gibi alanlarda etkin kullanım sağlamaktadır. Sanal saha gezileri sunan uygulamalar (Alt5) ve hem AR hem de VR deneyimleri bir arada sunan platformlar (Alt6) ise farklı öğrenme ortamlarını zenginleştirilmektedir. Özetle, Tablo 2’de açıklanan her alternatifin güçlü ve zayıf yönlerini ortaya koyarak yükseköğretimde doğru AR/VR teknolojisi seçimi için kapsamlı bir değerlendirme imkanı sunmaktadır.

**Tablo 2. AR/VR Alternatifleri ve Özellikleri**

Alternatifler	Açıklama	Avantajlar	Dezavantajlar	Eğitimdeki Kullanım Alanları
Alt1	No-code platform ile AR/VR eğitim içeriklerinin kolayca oluşturulmasına olanak tanır.	Kolay içerik üretimi, geniş özelleştirme seçenekleri.	Yüksek başlangıç maliyeti, teknik bilgi gerekliliği.	Öğretim içeriklerinin özelleştirilmesi, kurumsal eğitim.
Alt2	Yüksek kaliteli sanal gerçeklik deneyimi sunan bir VR gözlüğü.	Yüksek çözünürlük, geniş uygulama desteği.	Maliyetli, sınırlı taşınabilirlik.	Tıp, mühendislik ve uygulamalı eğitimler.
Alt3	Mobil cihazlarla uyumlu, taşınabilir bir sanal gerçeklik cihazı.	Taşınabilir, uygun maliyetli.	Sınırlı işlem gücü, mobil cihaz bağımlılığı.	Taşınabilir eğitim çözümleri, basit simülasyonlar.
Alt4	Gelişmiş hareket takibi ve etkileşim özellikleri sunan bir VR sistemi.	Hassas hareket takibi, geniş ekosistem desteği.	Yüksek donanım gereksinimi, maliyetli.	Mühendislik, mimarlık ve tasarım eğitimleri.
Alt5	Sanal saha gezileri sunan bir AR/VR uygulaması.	Zenginleştirilmiş öğrenme deneyimi, sınırsız keşif imkanı.	Donanım bağımlılığı, sınırlı AR özellikleri.	Tarih, coğrafya ve fen bilimleri öğretimi.
Alt6	Hem artırılmış hem de sanal gerçeklik deneyimleri sunan bir platform.	Hem AR hem VR özellikleri, STEM odaklı zengin içerik.	Özel donanım gereksinimi, yüksek maliyet.	Fen, teknoloji, mühendislik ve matematik eğitimleri.

Tablo 2’de yer alan alternatifler literatür taraması sonucunda oluşturulan ve Tablo 3 ile gösterilen kriterler ile değerlendirilmiştir. Tablo 3, AR/VR teknolojilerinin seçiminde dikkate alınan altı temel kriteri detaylandırmaktadır. Bu kriterler hem pedagojik gereklilikleri hem de teknolojik ve ekonomik sınırlamaları kapsamaktadır. Öğrenme etkisi ve deneyimi (K1), AR/VR teknolojilerinin öğrenci başarısı, bilgi kalıcılığı ve motivasyon üzerindeki doğrudan etkisini değerlendirirken, teknik ve kullanım kolaylığı (K2), bu teknolojilerin öğretmen ve öğrenciler tarafından ne kadar kolay benimsenebileceğini ele almaktadır. Maliyet (K3), kurulum ve bakım masraflarını analiz ederek teknolojinin ekonomik uygulanabilirliğini değerlendirmektedir. Yenilikçi öğretim yöntemleri ve yapay zeka entegrasyonu (K4), bireyselleştirilmiş öğrenme yollarını ve karmaşık simülasyonları destekleyen teknolojilerin önemini vurgulamaktadır. Kapsayıcılık ve erişim (K5), farklı sosyo-ekonomik gruplar ve engelli bireyler için erişilebilirliği öne çıkarırken, uzun vadeli sürdürülebilirlik (K6) ise teknolojinin bakım, uyumluluk ve uzun vadeli uygulanabilirlik konularındaki performansını analiz etmektedir. Bu kriterler, karar vericilere hem pedagojik hem de teknik faktörleri göz önünde bulundurarak kapsamlı bir değerlendirme yapma imkanı tanımaktadır. Bulanık karar verme modelinde K3 kriteri maliyet yönlü, diğer kriterler ise fayda yönlü olarak ele alınmıştır.

Yükseköğretimde öncelikli kullanılacak AR/VR teknolojisi seçimi çalışmasında, PF-EDAS yöntemi ile ele alınmış ve uygun alternatif belirlenmeye çalışılmıştır.

**Tablo 3. AR/VR Seçim Kriterleri**

Kriter adı	Açıklama
K1- Öğrenme Etkisi ve Deneyimi (Le Tan vd., 2023; Jang vd., 2021; Çeken & Taşkın, 2025)	AR/VR'nin öğrencilerin akademik başarı, bilgi kalıcılığı, kavramsal öğrenme ve motivasyonuna olan doğrudan etkisi
K2- Teknik ve Kullanım Kolaylığı (Jang vd., 2021; AlGerafi vd., 2023; Reeves vd., 2021)	Teknolojik gereksinimlerinin karşılanabilirliği, kullanıcı dostu arayüzlere sahip olması ve öğretmenlerin/öğrencilerin kolay adaptasyonu
K3- Maliyet (Jang vd., 2021; Reeves vd., 2021; Kovalenko vd., 2021)	AR/VR'nin maliyet etkinliği, kurulum ve bakım masrafları
K4- Öğretim Yöntemlerinde İnovasyon ve Yapay Zeka Entegrasyonu (Gudoniene ve Rutkauskienė, 2019; AlGerafi vd., 2023; Çeken & Taşkın, 2025)	Yenilikçi öğretim yöntemlerinin geliştirilmesini ve yapay zekanın AR/VR teknolojileri ile birleşerek bireyselleştirilmiş öğrenme yolları ve karmaşık simülasyonlar sunması
K5- Kapsayıcılık ve Erişim (Alam vd., 2024; Reeves vd., 2021; Kovalenko vd., 2021)	Farklı sosyo-ekonomik gruplar ve engelli bireyler için erişilebilirlik
K6- Uzun Vadeli Sürdürülebilirlik (Le Tan vd., 2023; Alam vd., 2024; Reeves vd., 2021)	Teknolojinin uzun vadeli uygulanabilirliği, bakım gereksinimleri ve sürdürülebilirliği

PF-EDAS uygulama adımları şu şekildedir:

**Adım 1:** Karar vericilerin değerlendirmeleri sonucunda, yükseköğretimde AR/VR teknolojisi seçimi için belirlenmiş olan alternatifler (Alt1, Alt2, Alt3, Alt4, Alt5, Alt6) çalışma kapsamında belirlenmiş olan kriterlere göre (K1, K2, K3, K4, K5, K6) Tablo 4'de gösterildiği şekilde belirlenmiştir. Tablo 1'de yer alan dilsel ölçek dikkate alınmış ve karar vericiler değerlendirmeleri resim bulanık sayılara dönüştürülmüştür. Değerlendirmeyi gerçekleştiren karar vericiler, eğitim alanında en az 10 yıl tecrübeye sahip akademisyenlerden oluşmaktadır.

**Tablo 4. Dilsel Karar Matrisi**

Alternatifler	Karar vericiler	K1	K2	K3	K4	K5	K6
Alt1	KV1	Y	Y	D	Y	O	O
	KV2	ÇY	O	D	ÇY	D	O
	KV3	O	D	Y	O	Y	ÇY
Alt2	KV1	ÇY	Y	O	O	Y	O
	KV2	Y	O	D	Y	D	O
	KV3	D	D	Y	D	O	ÇY
Alt3	KV1	O	O	O	D	Y	D
	KV2	D	D	Y	D	O	D
	KV3	O	Y	D	O	ÇY	Y
Alt4	KV1	Y	O	D	O	D	Y
	KV2	Y	O	D	Y	D	Y
	KV3	Y	D	Y	D	O	ÇY
Alt5	KV1	Y	ÇY	Y	O	ÇY	D
	KV2	O	D	O	O	Y	D
	KV3	O	O	ÇY	O	ÇY	Y
Alt6	KV1	ÇY	ÇY	D	ÇY	Y	Y
	KV2	ÇY	ÇY	O	ÇY	O	Y
	KV3	O	O	Y	Y	Y	ÇY

Karar vericilerin görüşlerinin bütünleşik olarak ifade edilebilmesi ve çalışma modelinde uygun şekilde kullanılabilmesi için, Wei (2017) tarafından geliştirilen Eşitlik (29) kullanılarak Resim Bulanık Ağırlıklı Toplama (PFWA) operatörü uygulanmıştır. Tablo 5'te karar vericilerin görüşlerinin PFWA operatörü ile birleştirilerek bütünleşik resim bulanık karar matrisine dönüşümü gösterilmiştir.

$$PFWA_w(a_1, a_2, \dots, a_n) = \left(1 - \prod_{j=1}^n (1 - \mu_{a_j})^{w_j}; \prod_{j=1}^n (\eta_{a_j})^{w_j}; \prod_{j=1}^n (v_{a_j})^{w_j}\right) \quad (29)$$

**Tablo 5. Bütünleşik Resim Bulanık Karar Matrisi**

	K1	K2	K3	K4	K5	K6
Alt1	(,77; ,12; ,00)	(,55; ,26; ,11)	(,49; ,28; ,15)	(,77; ,12; ,00)	(,55; ,26; ,11)	(,68; ,20; ,00)
Alt2	(,79; ,10; ,00)	(,55; ,26; ,11)	(,55; ,26; ,11)	(,55; ,26; ,11)	(,55; ,26; ,11)	(,68; ,20; ,00)
Alt3	(,37; ,42; ,14)	(,55; ,26; ,11)	(,77; ,12; ,00)	(,29; ,43; ,18)	(,77; ,12; ,00)	(,49; ,28; ,15)
Alt4	(,79; ,10; ,05)	(,37; ,42; ,13)	(,49; ,28; ,15)	(,55; ,26; ,11)	(,29; ,43; ,18)	(,83; ,08; ,00)
Alt5	(,60; ,25; ,08)	(,55; ,26; ,11)	(,77; ,12; ,00)	(,44; ,40; ,10)	(,87; ,06; ,00)	(,49; ,28; ,15)
Alt6	(,82; ,10; ,00)	(,71; ,16; ,06)	(,55; ,26; ,11)	(,87; ,06; ,00)	(,71; ,16; ,06)	(,83; ,08; ,00)

Tablo 5 için örneğin Alt1 için K1 değerinin hesaplanmasında, üç uzman görüşünün dilsel ifadelerinin karşılığı olan bulanık sayıların ((0,8; 0,1; 0,05) (0,9; 0,05; 0) (0,45; 0,4; 0,1)) ortalaması Eşitlik (29) ile gösterilen PFWA operatörü kullanılarak hesaplanmış ve (0,77; 0,12; 0,00) değeri bulunmuştur.

**Adım 2:** Resim bulanık normalize edilmiş matrisi Eşitlik (25) kullanılarak Tablo 6'da gösterildiği şekilde hesaplanmıştır. Normalize işleminde örneğin Alt1 için, K1 kriteri fayda yönlü olduğu için K1 sütunu Tablo 5 ile Tablo 6'da aynı iken, maliyet yönlü K3 kriteri sütununda değerler (,49; ,28; ,15) iken (,15; ,28; ,49) olarak Tablo 6'da normalize edilmiştir.

**Adım 3:** Normalize resim bulanık karar matrisinde yer alan her bir kriter için ortalama çözüm (AV<sub>j</sub>) değerleri Eşitlik (26) kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 6'da gösterilmiştir.

**Tablo 6. Normalize Resim Bulanık Karar Matrisi**

	K1	K2	K3	K4	K5	K6
Alt1	(,77; ,12; ,00)	(,55; ,26; ,11)	(,15; ,28; ,49)	(,77; ,12; ,00)	(,55; ,26; ,11)	(,68; ,20; ,00)
Alt2	(,79; ,10; ,00)	(,55; ,26; ,11)	(,11; ,26; ,55)	(,55; ,26; ,11)	(,55; ,26; ,11)	(,68; ,20; ,00)
Alt3	(,37; ,42; ,14)	(,55; ,26; ,11)	(,00; ,12; ,77)	(,29; ,43; ,18)	(,77; ,12; ,00)	(,49; ,28; ,15)
Alt4	(,79; ,10; ,05)	(,37; ,42; ,13)	(,15; ,28; ,49)	(,55; ,26; ,11)	(,29; ,43; ,18)	(,83; ,08; ,00)
Alt5	(,60; ,25; ,08)	(,55; ,26; ,11)	(,00; ,12; ,77)	(,44; ,40; ,10)	(,87; ,06; ,00)	(,49; ,28; ,15)
Alt6	(,82; ,10; ,00)	(,71; ,16; ,06)	(,11; ,26; ,55)	(,87; ,06; ,00)	(,71; ,16; ,06)	(,83; ,08; ,00)
AV	(,72; ,15; ,00)	(,56; ,24; ,10)	(,08; ,21; ,59)	(,63; ,21; ,00)	(,67; ,19; ,00)	(,70; ,16; ,00)

**Adım 4:** Normalize resim bulanık karar matrisinde yer alan resim bulanık sayılar, Eşitlik (5) yardımı ile skor fonksiyonları değerlerine dönüştürülmüştür. Sonrasında, elde edilen skor fonksiyon değerleri kullanılarak, ortalamadan pozitif uzaklık matrisi (PDA<sub>ij</sub>) ve ortalamadan negatif uzaklık matrisi (NDA<sub>ij</sub>) sırasıyla Eşitlik (27) ve Eşitlik (28) kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 7'de gösterilmiştir.

Tablo 7'nin hesaplanması için, öncelikle normalize resim bulanık karar matrisinin Eşitlik (5) kullanılarak skor fonksiyonları hesaplanmıştır. Sonrasında PDA ve NDA değerleri hesaplanmıştır. Örneğin Alt1 için K1 PDA değerinin hesaplanmasında, 0,77 olarak elde edilen skor fonksiyonu değeri ile 0,73 olarak elde edilen AV<sub>j</sub> değeri, Eşitlik (27) kullanılarak 0,07 şeklinde PDA değeri bulunmuştur. Alt1 için K1 NDA değerinin hesaplanmasında ise, Eşitlik (28) kullanılmış ve sonuç 0'dan küçük hesaplandığı için Tablo 7'de 0 olarak alınmıştır.

**Tablo 7. PDA ve NDA Değerleri**

	K1	K2	K3	K4	K5	K6
PDA değerleri						
Alt1	0,07	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00
Alt2	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Alt3	0,00	0,00	0,53	0,00	0,15	0,00
Alt4	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,19
Alt5	0,00	0,00	0,53	0,00	0,29	0,00
Alt6	0,13	0,43	0,00	0,37	0,00	0,19
NDA değerleri						
Alt1	0,00	0,03	0,32	0,00	0,35	0,03

Alt2	0,00	0,03	0,13	0,31	0,35	0,03
Alt3	0,68	0,03	0,00	0,84	0,00	0,51
Alt4	0,00	0,48	0,32	0,31	0,85	0,00
Alt5	0,28	0,03	0,00	0,46	0,00	0,51
Alt6	0,00	0,00	0,13	0,00	0,04	0,00

**Adım 5:** Bu adımda çalışma kapsamında belirlenen kriterlerin BWM yöntemi kullanılarak ağırlıkları belirlenmektedir. Öncelikle, çalışmada kullanılan kriterler ( $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$ ) için karar vericilerin görüşleri doğrultusunda en iyi (en çok arzu edilen, en önemli) ve en kötü (en az arzu edilen, en az önemli) olanlar belirlenmiş ve Tablo 8’de gösterilmiştir.

**Tablo 8. Uzmanlar İçin En İyi ve En Kötü Kriterler**

Uzmanlara Göre En İyi/En Kötü Kriterler					
KV1			K1		K3
KV2	En İyi Kriterler		K4	En Kötü Kriterler	K3
KV3			K3		K2

Sonrasında, en iyi kriterin diğer tüm kriterlere göre tercihi ( $A_B$ ) ve tüm kriterlerin en kötü kritere göre tercihi ( $A_W$ ) belirlenmiş ve sırasıyla Tablo 9 ve 10’da gösterilmiştir.

**Tablo 9. Uzmanlara Göre  $A_B$  Vektörleri**

Tanım	K1	K2	K3	K4	K5	K6
KV1’e göre en iyi kriterden (K1) diğer kriterlere göre tercih puanı	1	3	9	3	5	7
KV2’ye göre en iyi kriterden (K4) diğer kriterlere göre tercih puanı	3	4	9	1	8	4
KV3’e göre en iyi kriterden (K3) diğer kriterlere göre tercih puanı	6	9	1	6	4	2

**Tablo 10. Uzmanlara Göre  $A_W$  Vektörleri**

Tanım	K1	K2	K3	K4	K5	K6
KV1’e göre diğer kriterlerden en kötü kritere (K3) göre tercih puanı	8	6	1	6	5	3
KV2’ye göre diğer kriterlerden en kötü kritere (K3) göre tercih puanı	7	5	1	9	2	5
KV3’e göre diğer kriterlerden en kötü kritere (K2) göre tercih puanı	4	1	8	4	6	7

Son olarak, kriterler için optimum ağırlıklar ( $w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*$ ) hesaplanmıştır. Oluşturulan matematiksel model Excel üzerinden çözücü eklentisi ile çözümlenerek Tablo 11’deki sonuçlar elde edilmiştir. Tablo 11’de aynı zamanda üç karar vericinin görüşleri doğrultusunda elde edilen ortalama kriter ağırlıkları da sunulmuştur. Hesaplanan tutarlılık oranı Tablo 11’de gösterilmiş olup tutarlılık oranı kabul edilebilir seviyede sifra yakın değerle elde edilmiştir.

**Tablo 11. Karar Vericiler İçin Hesaplanan Kriter Ağırlıkları ve Tutarlılık Oranları ile Hesaplanan Ortalama Değerler**

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	$\xi$
KV1	0,4273	0,1756	0,0410	0,1756	0,1054	0,0753	0,2222
KV2	0,1795	0,1346	0,0390	0,4449	0,0673	0,1346	0,1667
KV3	0,0851	0,0383	0,4085	0,0851	0,1277	0,2553	0,2083
Ortalama	0,2306	0,1162	0,1628	0,2352	0,1001	0,1551	0,1991

**Adım 6:** Kriter ağırlıkları kullanılarak, ağırlıklı uzaklık matrisleri hesaplanmaktadır. Pozitif uzaklık matrisi ( $SP_i$ ) hesaplamak için Eşitlik (19), negatif uzaklık matrisi ( $SN_i$ ) hesaplamak için ise Eşitlik (20) kullanılmış ve elde edilen değerler Tablo 12’de gösterilmiştir. Örneğin,  $SP_1$  değerinin hesaplanmasında, Tablo 7’de yer alan 0,07; 0,00; 0,00; 0,02; 0,00; 0,00 değerleri ile Tablo 11’deki ortalama kriter ağırlıkları çarpılmış ve çarpım toplamları alındığında 0,066 elde edilmiştir.

Tablo 12. SPi ve NPi Değerleri

Alternatifler	SPi	NPi
Alt1	0,066	0,095
Alt2	0,022	0,136
Alt3	0,101	0,436
Alt4	0,035	0,265
Alt5	0,115	0,256
Alt6	0,196	0,024

**Adım 7:**  $SP_i$  ve  $SN_i$  değerleri Eşitlik (21) ve Eşitlik (22) kullanılarak normalize edilmiş ( $NSP_i$ ,  $NSN_i$ ) ve Tablo 13'te gösterilmiştir.

**Adım 8:** Normalize edilen  $SP_i$  ve  $SN_i$  değerleri kullanılarak, Eşitlik (23)'te gösterildiği üzere her bir alternatif için değerlendirme skorları ( $AS_i$ ) hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 13'te gösterilmiştir. Örneğin, AS1 hesaplanırken, 0,336 ve 0,782 değerlerinin ortalaması alınmış ve 0,56 değeri elde edilmiştir.

**Adım 9:** Son olarak, PF-EDAS yöntemine göre alternatifler  $AS_i$  değerlerine göre sıralanmaktadır. En büyük  $AS_i$  değerine sahip olan alternatif, PF-EDAS çözüm yöntemine göre en iyi seçenek olarak Tablo 13'te gösterildiği üzere Alternatif 6 (Alt6) olarak belirlenmiştir.

Tablo 13. NSPi, NSNi ve ASi Değerleri

Alternatifler	NSPi	NSNi	ASi	Sıralama
Alt1	0,336	0,782	0,56	2
Alt2	0,113	0,688	0,40	4
Alt3	0,516	0	0,26	6
Alt4	0,180	0,391	0,29	5
Alt5	0,589	0,412	0,50	3
Alt6	1	0,944	0,97	1

## 6. KARŞILAŞTIRMALI ANALİZ

Çalışma kapsamında ele alınan yükseköğretimde AR/VR teknolojisi seçimi problemi, PF-EDAS yöntemi ile çözülerek uygulama başlığı altında anlatılmıştır. Bu bölümde ise, PF-EDAS yöntemi kapsamında elde edilen sonuçların tutarlılığını ve geçerliliğini kanıtlamak amacıyla AR/VR teknolojisi seçimi problemi, Aydoğmuş vd. (2021) tarafından geliştirilen resim bulanık CODAS (PF-CODAS) ve Peng ve Luo (2021) tarafından geliştirilen PF-CoCoSo yöntemleri ile tekrar değerlendirilmiştir. AR/VR alternatiflerinin PF-CODAS yöntemi ile değerlendirilmesine ait adımlar aşağıda sunulmuştur:

### 6.1. PF-CODAS

PF-CODAS yönteminin çözüm adımlarında, öncelikle PF-EDAS yöntemine benzer şekilde resim bulanık sayılardan oluşan, karar vericilerin görüşleri doğrultusunda karar matrisi hazırlanmıştır. Uygulama kısmında, sırasıyla Tablo 4 ve Tablo 5'te gösterilen karar vericilerin dilsel görüşlerini içeren matris ve bütünleşik resim bulanık karar matrisi, PF-CODAS yönteminin çözüm aşamalarında da aynı veriler doğrultusunda kullanılmıştır. PF-CODAS yönteminin bir sonraki adımında, karar matrisi normalize edilmektedir. Benzer şekilde, uygulama kısmında Tablo 6'da elde edilen normalize resim bulanık karar matrisi karşılaştırmalı analizde de aynı şekilde kullanılmıştır.

Sonraki adımda, ağırlıklı karar matrisi elde edilmiş ve Tablo 14'te gösterilmiştir. Ağırlıklı karar matrisinin elde edilmesi için, uygulama kısmında hesaplanmış olan kriter ağırlıklarının Eşitlik (3) yardımı ile normalize resim bulanık karar matrisiyle çarpım işlemi gerçekleştirilmiş ve bu işlemin sonucunda ağırlıklandırılmış normalize karar matrisi hazırlanmıştır.

Her kriter için negatif ideal çözümler (NİÇ), Tablo 14'te gösterildiği gibi hesaplanmıştır. Kriterlere ait negatif ideal çözümü seçmek için, alternatifler arasında en düşük puana sahip olan skor fonksiyonları Eşitlik (5) yardımı ile belirlenmiştir. Örneğin, Tablo 14'te, K1 için en düşük skor fonksiyonuna ait değer (0,10; 0,82; 0,06) Alt3'e aittir ve NİÇ satırında gösterilmiştir.

İlerleyen adımda, göreceli değerlendirme puanları belirlenmiştir. Göreceli değerlendirme puanları kullanılarak Tablo 15'te gösterildiği gibi, yükseköğretimde AR/VR teknolojisi seçimi probleminde en iyi alternatifin belirlenmesi için bileşik oran puanları hesaplanmıştır. Sonuç olarak, PF-CODAS yöntemine göre AR/VR

teknolojisi seçimi probleminde en iyi seçenek Alt6 olarak belirlenmiş ve alternatiflerin sıralaması Tablo 15'te gösterilmiştir.

**Tablo 14. Ağırlıklandırılmış Normalize Karar Matrisi ve Uzaklıklar**

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	E <sub>i</sub>	T <sub>i</sub>
Alt1	(,29; ,62; ,00)	(,09; ,86; ,04)	(,03; ,81; ,15)	(,30; ,62; ,00)	(,08; ,88; ,03)	(,16; ,78; ,00)	0,19	0,25
Alt2	(,31; ,60; ,00)	(,09; ,86; ,04)	(,02; ,81; ,16)	(,17; ,73; ,06)	(,08; ,88; ,03)	(,16; ,78; ,00)	0,16	0,20
Alt3	(,10; ,82; ,06)	(,09; ,86; ,04)	(,00; ,72; ,27)	(,08; ,82; ,07)	(,14; ,81; ,00)	(,10; ,82; ,06)	0,07	0,06
Alt4	(,31; ,59; ,06)	(,05; ,90; ,03)	(,03; ,81; ,15)	(,17; ,73; ,06)	(,03; ,92; ,03)	(,25; ,68; ,00)	0,17	0,20
Alt5	(,19; ,73; ,05)	(,09; ,86; ,04)	(,00; ,72; ,27)	(,13; ,81; ,04)	(,19; ,76; ,00)	(,10; ,82; ,06)	0,11	0,12
Alt6	(,33; ,59; ,00)	(,14; ,81; ,03)	(,02; ,81; ,16)	(,38; ,53; ,00)	(,12; ,83; ,03)	(,25; ,68; ,00)	0,25	0,35
NİÇ	(,10; ,82; ,06)	(,05; ,90; ,03)	(,00; ,72; ,27)	(,08; ,82; ,07)	(,03; ,92; ,03)	(,10; ,82; ,06)		

**Tablo 15. Göreceli Değerlendirme Matrisi ve Sıralama**

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	H <sub>i</sub>	Sıralama
Alt1	0,00	0,08	0,32	0,06	0,21	-0,16	0,51	2
Alt2	-0,08	0,00	0,24	-0,01	0,13	-0,24	0,12	4
Alt3	-0,32	-0,24	0,00	-0,25	-0,11	-0,48	-1,08	6
Alt4	-0,06	0,01	0,25	0,00	0,15	-0,23	0,19	3
Alt5	-0,21	-0,13	0,11	-0,15	0,00	-0,37	-0,55	5
Alt6	0,16	0,24	0,48	0,23	0,37	0	1,33	1

## 6.2. PF-CoCoSo

Yükseköğretimde AR/VR teknolojisi seçimi probleminin PF-CoCoSo yöntemi ile çözümünde, öncelikle karar matrisi hazırlanır. PF-CODAS yönteminde olduğu gibi, uygulama kısmında, sırasıyla Tablo 4 ve Tablo 5'te sunulan resim bulanık karar matrisi, çözüm aşamalarında aynı veriler doğrultusunda kullanılmıştır. Bir sonraki adımlar, karar matrisi normalize edilir. Normalize karar matrisi için de, uygulama kısmında Tablo 6'da elde edilen normalize resim bulanık karar matrisi aynı şekilde kullanılmıştır. PF-CoCoSo yönteminin bir sonraki adımında, ağırlıklı karşılaştırılabilirlik dizisi toplamı (S<sub>i</sub>) Her bir alternatif için karşılaştırılabilirlik dizilerinin güç ağırlığının toplamı (P<sub>i</sub>) sırasıyla Eşitlik (30) ve (31) kullanılarak bulunur.

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j r_{ij} \quad (30)$$

$$P_i = \sum_{j=1}^n (r_{ij})^{w_j} \quad (31)$$

Sonraki aşamada ise, alternatiflerin göreceli ağırlıkları (k<sub>ia</sub>, k<sub>ib</sub>, k<sub>ic</sub>) Eşitlik (32), (33) ve (34) yardımıyla hesaplanır.

$$k_{ia} = \frac{P_i + S_i}{\sum_{i=1}^m (P_i + S_i)} \quad (32)$$

$$k_{ib} = \frac{S_i}{\min S_i} + \frac{P_i}{\min P_i} \quad (33)$$

$$k_{ic} = \frac{\lambda S_i + (1-\lambda)P_i}{\lambda \max S_i + (1-\lambda)\max P_i}, 0 \leq \lambda \leq 1 \quad (34)$$

Son adımda, alternatiflerin nihai sıralaması (k<sub>i</sub>) Eşitlik (35) ile hesaplanır.

$$k_i = (k_{ia} k_{ib} k_{ic})^{1/3} + \frac{k_{ia} + k_{ib} + k_{ic}}{3} \quad (35)$$

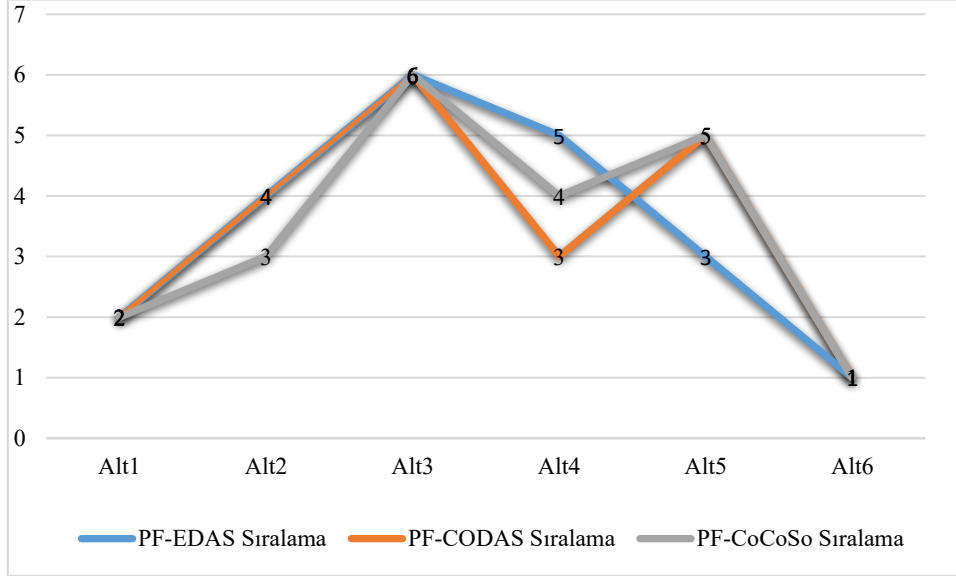
Tablo 16'de gösterildiği üzere, yükseköğretimde AR/VR teknolojisi seçimi probleminin çözüm aşamasında alternatifler k<sub>i</sub> değerlerine göre sıralanmıştır. Sonuç olarak, PF-CoCoSo yöntemine göre AR/VR teknolojisi seçimi probleminde en iyi seçenek Alt6 olarak belirlenmiş ve alternatiflerin sıralaması Tablo 16'de gösterilmiştir.

**Tablo 16. Alternatiflerin PF-CoCoSo ile Sıralanması**

	S <sub>i</sub>	P <sub>i</sub>	k <sub>ia</sub>	k <sub>ib</sub>	k <sub>ic</sub>	k <sub>i</sub>	Sıralama
Alt1	2,863	7,111	0,174	2,514	0,952	1,96	2
Alt2	2,639	7,002	0,168	2,385	0,967	1,902	3
Alt3	1,986	6,627	0,15	2	0,915	1,672	6

Alt4	2,611	6,984	0,167	2,368	0,965	1,892	4
Alt5	2,316	6,795	0,159	2,192	0,912	1,769	5
Alt6	3,242	7,239	0,183	2,724	1	2,095	1

Yükseköğretimde AR/VR teknolojisi seçimi problemine yönelik karşılaştırmalı analiz sonuçları, önerilen PF-EDAS yöntemi ile PF-CODAS ve PF-CoCoSo yöntemleri ile alternatiflerin sıralaması Grafik 1’de verilmiştir. Sonuçlar, PF-EDAS yöntemi ile çözümün karşılaştırmalı analiz sonuçları ile tutarlı olduğunu göstermektedir.



Grafik 1. Sonuçların Karşılaştırılması

## 7. SONUÇ

Bu çalışma, yükseköğretimde AR ve VR teknolojilerinin seçimini optimize etmek amacıyla belirsizlik ve muğlaklık içeren ÇKKV problemlerini ele almış ve resim bulanık sayılarla genişletilmiş EDAS (PF-EDAS) yöntemini kullanmıştır. Dijital dönüşüm çağında, eğitim teknolojilerinin pedagojik ve ekonomik anlamda sürdürülebilir şekilde entegre edilmesi önem taşımaktadır. AR/VR teknolojilerinin öğrenme süreçlerine katkısını en üst düzeye çıkarmak için doğru alternatiflerin belirlenmesi, ÇKKV tekniklerinin kullanımını zorunlu kılmaktadır. Bu çalışma, dilsel ölçekler aracılığıyla karar vericilerin değerlendirmelerini resim bulanık sayılara dönüştürmüş ve bu sayede daha kapsamlı ve esnek bir değerlendirme sunmuştur.

Çalışmada kullanılan BWM ile kriter ağırlıkları belirlenmiş ve ardından PF-EDAS yöntemi ile AR/VR alternatifleri değerlendirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre Alt6 (hem AR hem de VR deneyimleri sunan bir platform), yükseköğretimde uygulanacak en uygun alternatif olarak belirlenmiştir. Alt6'nın STEM odaklı zengin içerikler sunması hem artırılmış hem de sanal gerçeklik deneyimlerini bir arada barındırması, bu seçimi destekleyen temel faktörlerdir. Ancak, yüksek başlangıç maliyeti ve özel donanım gereksinimi, bu teknolojinin yaygın şekilde uygulanmasını sınırlayabilecek faktörler arasında yer almaktadır. EDAS yöntemi, diğer ÇKKV yöntemlerinin çoğuna kıyasla daha az hesaplama gerektirirken, aynı alternatif sıralamasını üretebilmektedir. Ayrıca bu yöntemde alternatiflerin değerlendirilmesi, her bir alternatifin her bir kritere göre ortalama çözümden uzaklığına dayanmaktadır (Kahraman vd., 2017). Karşılaştırmalı analizde, PF-CODAS ve PF-CoCoSo yöntemleri de benzer sonuçlar vermiş ve yöntemin tutarlılığını ve geçerliliğini ortaya koymuştur.

Kriter ağırlıklandırma süreci, BWM kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üç karar verici, kriterlerin önem düzeylerini belirlemiş ve en iyi ile en kötü kriterler belirlenmiştir. Her karar verici için ayrı ayrı yapılan değerlendirmeler sonucunda, kriterler için optimum ağırlıklar hesaplanmıştır. Ağırlıklandırma sonuçlarına göre en yüksek ağırlık K4 (Öğretim yöntemlerinde inovasyon ve yapay zeka entegrasyonu) ve K1 (Öğrenme etkisi ve deneyimi) kriterlerinde görülmüştür. K3 (Maliyet) kriteri ise genellikle en düşük ağırlığa sahiptir. Bu dağılım, eğitimin yenilikçi yönünün ve pedagojik etkinliğin maliyetten daha öncelikli olduğunu göstermektedir. Ağırlıklandırma sonuçlarının tutarlılığı kabul edilebilir seviyededir ve bu süreç, genel karar verme sürecinde güvenilir bir temel sağlamıştır.

Elde edilen bulgular doğrultusunda gelecekteki araştırmalar için çeşitli öneriler sunulabilir. İlk olarak, bu çalışmanın odaklandığı yükseköğretim ortamının ötesine geçilerek farklı eğitim seviyelerinde (ilköğretim, ortaöğretim) ve disiplinlerde (mühendislik, tıp, sosyal bilimler) benzer analizler yapılabilir. Böylece, disiplinler arası farklılıkların teknoloji seçimindeki etkisi daha kapsamlı bir şekilde değerlendirilebilir. İkinci olarak, daha

geniş ve çeşitli uzman görüşlerinin dahil edildiği karar gruplarıyla çalışmak, sonuçların genellenebilirliğini ve güvenilirliğini artırabilir. Üçüncü olarak, bu çalışma statik bir analiz sunarken, gelecekte dinamik ve gerçek zamanlı veri kullanımını temel alan modellerin geliştirilmesi önerilmektedir. Bu tür modeller, kullanıcı geri bildirimleri ve uygulama sürecindeki değişkenliklerin değerlendirme sürecine entegrasyonunu mümkün kılarak daha uyarlanabilir ve sürdürülebilir karar mekanizmaları sağlayabilir.

Bunun yanı sıra, maliyet ve donanım gereksinimlerinin uzun vadeli sürdürülebilirlik üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmelidir. Özellikle düşük bütçeli veya sınırlı teknik altyapıya sahip kurumların bu teknolojileri benimseme sürecinde karşılaşılabileceği zorluklara yönelik çözüm önerilerinin geliştirilmesi, AR/VR entegrasyonunu daha erişilebilir hale getirebilir. Gelecekte yapılacak çalışmalar, maliyet-fayda analizine odaklanarak teknolojilerin eğitim süreçlerine olan katkısını optimize edebilir ve uygulama alanlarının genişletilmesine yardımcı olabilir.

Bu çalışma, belirsizlik altında ÇKKV süreçlerinde resim bulanık sayılarla genişletilmiş EDAS yönteminin etkili bir araç olduğunu göstermiştir. Eğitim teknolojilerinin seçimi, dijital dönüşüm sürecinin dinamik yapısı göz önünde bulundurularak daha uyarlanabilir ve disiplinler arası yaklaşımlar kullanılarak sürdürülebilir şekilde yönetilmelidir.

### EXTENDED SUMMARY

The increasing demand for augmented reality (AR) and virtual reality (VR) technologies in educational settings, particularly in higher education, highlights the importance of selecting the right technological solutions for enhanced learning experiences. These technologies hold transformative potential by offering immersive and interactive environments that foster knowledge retention, critical thinking, and engagement. However, the selection process is complex due to the multifaceted nature of AR/VR technologies and the presence of numerous evaluation criteria.

In response to this challenge, the current study utilizes the PF-EDAS method, an extension of the EDAS approach, combined with the BWM for determining reliable criteria weights and handling uncertainties. The integration of these techniques aims to optimize AR/VR selection in higher education, providing a structured approach to decision-making under conditions of ambiguity and uncertainty. The primary contribution of this research lies in merging picture fuzzy numbers with multi-criteria decision-making (MCDM) tools, thereby addressing the imprecise and uncertain nature of linguistic assessments typically encountered in real-world scenarios.

Picture fuzzy numbers are particularly advantageous in contexts where decision-makers exhibit varying degrees of acceptance, rejection, and hesitation regarding certain alternatives. This study capitalizes on these properties to enhance the evaluation process. The BWM, on the other hand, ensures consistent and efficient weight allocation by requiring fewer comparisons than traditional methods, such as AHP.

The selection process in this study revolves around key criteria that are crucial for effective AR/VR implementation in educational contexts. These include learning effectiveness, ease of use, cost, inclusivity, sustainability, and innovative teaching integration. Each criterion has its own significance:

1. Learning Effectiveness assesses the extent to which AR/VR technologies can enhance knowledge retention, understanding, and motivation.
2. Ease of Use examines the adaptability of these technologies among educators and students, considering user-friendly interfaces and minimal technical barriers.
3. Cost evaluates the financial feasibility of AR/VR deployment, including acquisition and maintenance expenses.
4. Inclusivity ensures that the technology is accessible to diverse user groups, including students with disabilities or from different socio-economic backgrounds.
5. Sustainability considers the long-term viability and adaptability of the technologies in dynamic educational settings.
6. Innovative Teaching Methods and AI Integration highlight the importance of technologies that enable personalized learning and complex simulations.

The study's methodology is centered on the integration of PF-EDAS and BWM. The decision-making process began with the identification of evaluation criteria based on a literature review and expert consultations. Decision-makers were asked to provide their evaluations using linguistic terms, which were then converted into picture fuzzy numbers to capture the inherent uncertainty and hesitation in their judgments. These fuzzy assessments were processed through the PF-EDAS approach, which evaluates alternatives based on their distances from the average solution, considering both positive and negative criteria distances.

In tandem, the BWM was employed to assign weights to the criteria. By comparing the most and least important criteria, the BWM minimized the subjectivity and inconsistency typically associated with weight determination in traditional methods. The integration of these methods provided a robust mechanism to rank AR/VR alternatives accurately and reliably.

The application of the PF-EDAS method involved assessing six distinct AR/VR alternatives, each representing a different technological configuration with specific strengths and weaknesses. These alternatives were evaluated against the criteria mentioned earlier, with decision-makers including academic experts with extensive experience in technology integration within education. The alternatives ranged from high-end VR systems with advanced motion tracking to portable, cost-effective AR solutions.

The evaluation results demonstrated a clear preference for an AR/VR platform (Alternative 6) that integrates both AR and VR capabilities. This platform stood out due to its ability to support STEM-focused content and its versatility in offering immersive experiences across different disciplines. The platform's strengths included:

- Comprehensive support for AR and VR environments, allowing educators to design hybrid learning scenarios.
- STEM-specific content, which is crucial for disciplines requiring practical, hands-on learning.
- A wide range of applications, including virtual labs, field trips, and simulations.

However, challenges such as high initial costs and the need for specialized hardware were highlighted as barriers to widespread adoption. These findings suggest that while AR/VR technologies offer immense potential, their implementation requires careful consideration of institutional budget constraints and technical infrastructure.

To ensure the robustness of the results, a comparative analysis was conducted using the PF-CODAS and PF-CoCoSo methods. This methods, which evaluates alternatives based on their distances from a negative ideal solution, provided a secondary validation of the rankings obtained through PF-EDAS. The consistency between the two methods affirmed the reliability of the decision-making process.

The study's findings have several implications for educational institutions seeking to integrate AR/VR technologies effectively:

1. Strategic Planning: Institutions should prioritize AR/VR investments based on their pedagogical needs and financial capabilities, with a focus on technologies that offer scalable and sustainable solutions.
2. Customized Implementations: The selection process should consider the specific requirements of different disciplines, as the effectiveness of AR/VR varies across subject areas.
3. Training and Support: Adequate training programs for educators and technical support staff are essential to ensure the successful adoption of AR/VR technologies.

Building on the current findings, future research could explore:

- The application of the PF-EDAS framework in other educational contexts, such as primary and secondary education.
- Longitudinal studies to assess the long-term impact of AR/VR technologies on learning outcomes.
- The integration of real-time data and feedback mechanisms to enhance the adaptability of the decision-making model.

In conclusion, the combination of PF-EDAS and BWM provides a powerful approach for optimizing AR/VR selection in higher education. By addressing uncertainty and incorporating expert judgments, this framework ensures that decision-makers can navigate the complexities of technology integration and make informed choices that maximize educational benefits.

## KAYNAKÇA

Akçayır, M., & Akçayır, G. (2017). Advantages and challenges associated with augmented reality for education: A systematic review of the literature. *Educational Research Review*, 20, 1-11. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2016.11.002>

Alam, S. S., Ahmed, S., & Kokash, H. A. (2024). Interplay of perceived organizational and external e-readiness in the adoption and integration of augmented reality and virtual reality technologies in Malaysian higher education institutions. *Education and Information Technologies*, 29(11), 13735-13761. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10639-023-12428-7>

- AlGerafi, M. A., Zhou, Y., Oubibi, M., & Wijaya, T. T. (2023). Unlocking the potential: A comprehensive evaluation of augmented reality and virtual reality in education. *Electronics*, 12(18), 3953. Doi: <https://doi.org/10.3390/electronics12183953>
- Almufarreh, A., & Arshad, M. (2023). Promising emerging technologies for teaching and learning: Recent developments and future challenges. *Sustainability*, 15(8), 6917. Doi: <https://doi.org/10.3390/su15086917>
- Ardiny, H., & Khanmirza, E. (2018, October). The role of AR and VR technologies in education developments: Opportunities and challenges. Proceedings of the 6th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics, Tehran, Iran, 482-487.
- Aydoğmuş, H. Y., Kamber, E., & Kahraman, C. (2021). ERP selection using picture fuzzy CODAS method. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 40(6), 11363-11373. Doi: <https://doi.org/10.3233/JIFS-202564>
- Badi, I., Ballem, M., & Shetwan, A. (2018). Site selection of desalination plant in libya by using combinative distance-based assessment (CODAS) method. *International Journal for Quality Research*, 12(3). Doi: 10.18421/IJQR12.03-04
- Burley, J., & Stubbs, A. (2023). Emerging Technologies & Higher Education. *Institute for Ethics and Emerging Technologies*
- Cheng, K. H. (2017). Reading an augmented reality book: An exploration of learners' cognitive load, motivation, and attitudes. *Australasian Journal of Educational Technology*, 33(4). Doi: <https://doi.org/10.14742/ajet.2820>
- Cuong, B. C., & Kreinovich, V. (2013, December). Picture fuzzy sets-a new concept for computational intelligence problems. In *2013 third world congress on information and communication technologies (WICT 2013)* (pp. 1-6). IEEE.
- Çeken, B., & Taşkın, N. (2025). Examination of multimedia learning principles in augmented reality and virtual reality learning environments. *Journal of Computer Assisted Learning*, 41(1), e13097. Doi: <https://doi.org/10.1111/jcal.13097>
- Dede, C. (2009). Immersive interfaces for engagement and learning. *Science*, 323(5910), 66-69.
- Diao, P. H., & Shih, N. J. (2019). Trends and research issues of augmented reality studies in architectural and civil engineering education—A review of academic journal publications. *Applied Sciences*, 9(9), 1840. Doi: <https://doi.org/10.3390/app9091840>
- Di Lanzo, J. A., Valentine, A., Sohel, F., Yapp, A. Y., Muparadzi, K. C., & Abdelmalek, M. (2020). A review of the uses of virtual reality in engineering education. *Computer Applications in Engineering Education*, 28(3), 748-763. Doi: <https://doi.org/10.1002/cae.22243>
- Duong, T. T. T., & Thao, N. X. (2021). A novel dissimilarity measure on picture fuzzy sets and its application in multi-criteria decision making. *Soft Computing*, 25, 15-25. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00500-020-05405-6>
- Endsley, M. R., Bolté, B., & Jones, D. G. (2003). *Designing for situation awareness: An approach to user-centered design*. CRC press.
- Fan, J., Jia, X., & Wu, M. (2020). A new multi-criteria group decision model based on Single-valued triangular Neutrosophic sets and EDAS method. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 38(2), 2089-2102. Doi: <https://doi.org/10.3233/JIFS-190811>
- Fazel, A., & Izadi, A. (2018). An interactive augmented reality tool for constructing free-form modular surfaces. *Automation in Construction*, 85, 135–145. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.10.015>
- Garg, H., & Sharaf, I. M. (2022). A new spherical aggregation function with the concept of spherical fuzzy difference for spherical fuzzy EDAS and its application to industrial robot selection. *Computational and Applied Mathematics*, 41(5), 212. Doi: <https://doi.org/10.1007/s40314-022-01903-5>
- Ghorabae, M.K., Zavadskas, E. K., Turskis, Z., & Antucheviciene, J. (2016). A new combinative distance-based assessment (CODAS) method for multi-criteria decision-making. *Economic Computation & Economic Cybernetics Studies & Research*, 50(3).

- Ghorabae, M. K., Amiri, M., Zavadskas, E. K., Hooshmand, R., & Antuchevičienė, J. (2017). Fuzzy extension of the CODAS method for multi-criteria market segment evaluation. *Journal of Business Economics and Management*, 18(1), 1-19.
- Gudoniene, D., & Rutkauskienė, D. (2019). Virtual and augmented reality in education. *Baltic Journal of Modern Computing*, 7(2), 293-300. Doi: 10.22364/bjmc.2019.7.2.07
- Gupta, S., Soni, U., & Kumar, G. (2019). Green supplier selection using multi-criterion decision making under fuzzy environment: A case study in automotive industry. *Computers & Industrial Engineering*, 136, 663-680. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.07.038>
- Jang, J., Ko, Y., Shin, W. S., & Han, I. (2021). Augmented reality and virtual reality for learning: An examination using an extended technology acceptance model. *IEEE access*, 9, 6798-6809. Doi: 10.1109/ACCESS.2020.3048708
- Kahraman, C., Keshavarz Ghorabae, M., Zavadskas, E. K., Cevik Onar, S., Yazdani, M., & Oztaysi, B. (2017). Intuitionistic fuzzy EDAS method: an application to solid waste disposal site selection. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 25(1), 1-12.
- Kamber, E., Aydoğmuş, U., Aydoğmuş, H. Y., Gümü, M., & Kahraman, C. (2024). Prioritization of drip-irrigation pump alternatives in agricultural applications: An integrated picture fuzzy BWM&CODAS methodology. *Applied Soft Computing*, 154, 111308. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.11130>
- Karaşan, A., & Kahraman, C. (2018). Interval-valued neutrosophic extension of EDAS method. In *Advances in Fuzzy Logic and Technology 2017: Proceedings of: EUSFLAT-2017–The 10th Conference of the European Society for Fuzzy Logic and Technology, September 11-15, 2017, Warsaw, Poland IWIFSGN'2017–The Sixteenth International Workshop on Intuitionistic Fuzzy Sets and Generalized Nets, September 13-15, 2017, Warsaw, Poland, Volume 2 10* (pp. 343-357). Springer International Publishing.
- Keshavarz Ghorabae, M., Zavadskas, E. K., Olfat, L., & Turskis, Z. (2015). Multi-criteria inventory classification using a new method of evaluation based on distance from average solution (EDAS). *Informatica*, 26(3), 435-451.
- Keshavarz Ghorabae, M., Zavadskas, E. K., Amiri, M., & Turskis, Z. (2016). Extended EDAS method for fuzzy multi-criteria decision-making: an application to supplier selection. *International Journal Of Computers Communications & Control*, 11(3), 358-371.
- Khan, A. A., Ashraf, S., Abdullah, S., Qiyas, M., Luo, J., & Khan, S. U. (2019). Pythagorean fuzzy Dombi aggregation operators and their application in decision support system. *Symmetry*, 11(3), 383. Doi: 10.3390/sym11030383
- Krishankumar, R., Gowtham, Y., Ahmed, I., Ravichandran, K. S., & Kar, S. (2020). Solving green supplier selection problem using q-rung orthopair fuzzy-based decision framework with unknown weight information. *Applied Soft Computing*, 94, 106431. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106431>
- Kovalenko, V., Marienko, M., & Sukhikh, A. (2022). Use of augmented and virtual reality tools in a general secondary education institution in the context of blended learning. *arXiv preprint arXiv:2201.07003*.
- Le Tan, T., Nguyen, H. T. T., Khanh, N. C. N., Le, T. H. T., & Vo, U. T. H. (2024). Researching Influences of Learner Experience on AR/VR Adoption-The Case of Vietnamese Universities. *J. Inf. Technol. Educ. Res.*, 23, 7.
- Mohamed Hashim, M. A., Tlemsani, I., & Matthews, R. (2022). Higher education strategy in digital transformation. *Education and Information Technologies*, 27(3), 3171-3195. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10639-021-10739-1>
- Muñoz-Saavedra, L., Miró-Amarante, L., & Domínguez-Morales, M. (2020). Augmented and virtual reality evolution and future tendency. *Applied Sciences*, 10(1), 322. Doi: <https://doi.org/10.3390/app10010322>
- Özbek, A., & Engür, M. (2018). EDAS yöntemi ile lojistik firma web sitelerinin değerlendirilmesi. *Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Meslek Yüksekokulu Dergisi*, 21(2), 417-429. Doi: <https://doi.org/10.29249/selcuksbmyd.454013>
- Panchal, D., Chatterjee, P., Shukla, R. K., Choudhury, T., & Tamosaitiene, J. (2017). Integrated Fuzzy AHP-CODAS Framework for Maintenance Decision in Urea Fertilizer Industry. *Economic Computation & Economic Cybernetics Studies & Research*, 51(3).
- Peng, X., & Luo, Z. (2021). Decision-making model for China's stock market bubble warning: the CoCoSo with picture fuzzy information. *Artificial Intelligence Review*, 54(8), 5675-5697.

- Reeves, L. E., Bolton, E., Bulpitt, M., Scott, A., Tomey, I., Gates, M., & Baldock, R. A. (2021). Use of augmented reality (AR) to aid bioscience education and enrich student experience. *Research in Learning Technology*, 29, 2572. Doi: 10.25304/rlt.v29.2572
- Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*, 53, 49-57. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.11.009>
- Soliman, M., Pesyridis, A., Dalaymani-Zad, D., Gronfula, M., & Kourmpetis, M. (2021). The application of virtual reality in engineering education. *Applied Sciences*, 11(6), 2879. Doi: <https://doi.org/10.3390/app11062879>
- Tan, Y., Xu, W., Li, S., & Chen, K. (2022). Augmented and Virtual Reality (AR/VR) for education and training in the AEC Industry: A systematic review of research and applications. *Buildings*, 12(10), 1529. <https://doi.org/10.3390/buildings12101529>
- Wang, L., Peng, J. J., & Wang, J. Q. (2018). A multi-criteria decision-making framework for risk ranking of energy performance contracting project under picture fuzzy environment. *Journal of cleaner production*, 191, 105-118. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.169>
- Wang, L., & Li, N. (2020). Pythagorean fuzzy interaction power Bonferroni mean aggregation operators in multiple attribute decision making. *International Journal of Intelligent Systems*, 35(1), 150-183. Doi: <https://doi.org/10.1002/int.22204>
- Wang, P., Wu, P., Wang, J., Chi, H. L., & Wang, X. (2018). A critical review of the use of virtual reality in construction engineering education and training. *International journal of environmental research and public health*, 15(6), 1204. Doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph15061204>
- Weng, N. G., Bee, O. Y., Yew, L. H., & Hsia, T. E. (2016). An augmented reality system for biology science education in Malaysia. *International Journal of Innovative Computing*, 6(2).
- Wei, G. (2017). Picture fuzzy aggregation operators and their application to multiple attribute decision making. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 33(2), 713-724. Doi: <https://doi.org/10.3233/JIFS-161798>
- Wei, G., & Gao, H. (2018). The generalized Dice similarity measures for picture fuzzy sets and their applications. *Informatica*, 29(1), 107-124.
- Wei, G., Alsaadi, F. E., Hayat, T., & Alsaadi, A. (2018). Projection models for multiple attribute decision making with picture fuzzy information. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 9(4), 713-719. Doi: <https://doi.org/10.1007/s13042-016-0604-1>
- Valente, L., Feijó, B., Ribeiro, A., & Clua, E. (2016). The concept of pervasive virtuality and its application in digital entertainment systems. In G. Wallner, S. Kriglstein, H. Hlavacs, R. Malaka, A. Lugmayr, H. S. Yang (Eds.), *Entertainment computing* (pp. 187–198). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-46100-7\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-319-46100-7_16)
- Yager, R. R., & Abbasov, A. M. (2013). Pythagorean membership grades, complex numbers, and decision making. *International journal of intelligent systems*, 28(5), 436-452. Doi: <https://doi.org/10.1002/int.21584>
- Yanmaz, O., Turgut, Y., Can, E. N., & Kahraman, C. (2020). Interval-valued Pythagorean fuzzy EDAS method: An application to car selection problem. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 38(4), 4061-4077. Doi: <https://doi.org/10.3233/JIFS-182667>
- Yılmaz, M., & Atan, T. (2021). Hospital site selection using fuzzy EDAS method: case study application for districts of Istanbul. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 41(2), 2591-2602. Doi: <https://doi.org/10.3233/JIFS-201757>
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3), 338-353.
- Zhang, L., Luczak, T., Smith, E., & Burch, R. F. (2019). Using Microsoft HoloLens to improve memory recall in anatomy and physiology: A pilot study to examine the efficacy of using augmented reality in education. *Journal of Educational Technology Development and Exchange (JETDE)*, 12(1), 2.
- Zhang, S., Wei, G., Gao, H., Wei, C., & Wei, Y. (2019). EDAS method for multiple criteria group decision making with picture fuzzy information and its application to green suppliers selections. *Technological and Economic Development of Economy*, 25(6), 1123-1138. Doi: <https://doi.org/10.3846/tede.2019.10714>