

KRİTER AĞIRLIKLANDIRMA YÖNTEMLERİNDEN BWM VE FUCOM YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI VE BİR UYGULAMA

Gülay DEMİR¹

Hüdaverdi BİRCAN²

ÖZET

Çok kriterli karar verme yöntemlerinde kriter ağırlıklandırma aşaması nihai karar vermeyi etkilemektedir. Bu nedenle çalışmanın amacı kriterlerin ağırlık katsayılarının belirlenmesinde kullanılan Best Worst Method (BWM) ve Full Consistency Method (FUCOM) yöntemlerini karşılaştırarak bir uygulama üstünde göstermektir. Her iki yöntemin hem ortak yönleri hem de hesaplama adımlarında birbirlerinden farklılıkları bulunmaktadır. Önerilen yöntemleri göstermek için kullanılan uygulamada ideal özel okul seçimini etkileyen kriterler kullanılmıştır. Bu kriterlerin tespiti ve derecelerini belirlemek için Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Eğitim Fakültesi üyeleri ile görüşülmüştür. Bu kişilerin ortak görüşleri çalışmada karar verici olarak yer almaktadır. BWM ile yapılan uygulama sonucunda ideal özel okul seçimini etkileyen kriterler içinde başarı durumu 0,2947 ağırlığı ile en önemli kriter olurken okulun vizyonu/misyonu 0,0212 ağırlığı ile en önemsiz kriter olmuştur. FUCOM ile yapılan uygulama sonucunda ideal özel okul seçimini etkileyen kriterler içinde bütçe 0,317 ağırlığı ile en önemli kriter olurken okulun vizyonu/misyonu 0,056 ağırlığı ile en önemsiz kriter olmuştur. Ağırlık katsayılarının nihai değerleri LINGO 17 yazılımı ile elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: FUCOM, Best Worst Method

COMPARISON OF BWM AND FUCOM METHODS OF CRITERIA WEIGHTING METHODS AND AN APPLICATION

ABSTRACT

In multi-criteria decision-making methods, the criteria on weighting stage affects final decision making. Therefore, the aim of this study is to compare the Best Worst Method (BWM) and Full Consistency Method (FUCOM) methods which are used to determine the weight coefficients of the criteria. Both methods have both common aspects and differences in calculation steps. Criteria affecting the choice of ideal private school were used in the application used to illustrate the proposed methods. In order to determine the criteria and to determine their degrees, members of Sivas Cumhuriyet University Faculty of Education were interviewed. The common opinions of the people are included in the study as decision makers. As a result of the application made with BWM, success status was the most important criteria with the weight of 0,2947 and the vision/mission of the school was the least significant criteria with the weight of 0.0212 among the criteria affecting the ideal private school selection. As a result of the application made with FUCOM, the budget was the most important criterion among the criteria that affect the choice of the ideal private school with a weight of 0.317, while the vision/mission of the school was the least important criterion with a weight of 0.056. The final values of the weight coefficients were obtained by LINGO 17 software.

Key Words: FUCOM, Best Worst Method

¹ Dr. Öğr. Üyesi. Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Sivas, gulaydemir@cumhuriyet.edu.tr

² Prof. Dr. Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, İşletme Bölümü, Sivas, hbircan@cumhuriyet.edu.tr

GİRİŞ

Çok kriterli karar verme problemlerinde kriter ağırlıklarının belirlenmesi ve problemin çözümü için uygun modelin seçilmesi çok önemli iki sorundur. Problem için hangi modelin uygulanması ve ağırlıklandırma için en uygun yöntemin belirlenmesine yönelik literatürde fikir birliği bulunmamaktadır. Ağırlıklandırma kriterlere verilen önem dereceleri, bu önem derecelerinin toplamları 1 olmalıdır. Kriterlerin ağırlıklarının gösterildiği ve kriter sayısı uzunluğunda satır vektörü olarak yazılır ve w ile gösterilir. Ayrıca kriterlerin ağırlıkları $[0,1]$ aralığında olmalıdır.

Literatürde çok fazla sayıda kriter ağırlıklandırma yöntemi vardır (Pöyhönen ve Hämmäläinen, 2001: 569-583). Bu ağırlıklandırma yöntemleri kriter ağırlıklarını subjektif, objektif ve karma yöntemler olarak üçe ayırır. Karar vericinin kendi değerlendirmelerini baz alan subjektif ağırlıklandırmanın SMART, AHP, Delphi vb yöntemleri vardır. Ham verilerin analizini temel alan ve karar vericinin tercihlerini dikkate almadan matematiksel algoritmalar ve modelleri içeren objektif ağırlıklandırmayı kullanan ENTROPY, TOPSIS yöntemleri vardır. Diğer yöntemlerin toplam ve çarpımsal sentezi ile elde edilen karma ağırlıklandırmanın da çeşitleri vardır (Shemshadi, vd., 2011: 12161).

Bu çalışmanın amacı kriterlerin ağırlık katsayılarının belirlenmesinde kullanılan Best Worst Method (BWM) ve Full Consistency Method (FUCOM) yöntemlerini karşılaştırarak bir uygulama üstünde göstermektir.

1. LİTERATÜR İNCELEMESİ

BWM ile yapılmış bazı çalışmaların özeti aşağıda verilmiştir:

Rezaei (2015), çok kriterli karar verme problemlerini çözmek için (BWM) olarak adlandırılan yeni bir yöntem önermiştir. Önerilen yöntem gösterilerek yöntemin performansını değerlendirmek amacıyla bazı sayısal örnekler kullanılmıştır (cep telefonu seçimi). Karşılaştırma için, ikili karşılaştırma tabanlı bir yöntem olan AHP (Analitik Hiyerarşi Süreci) kullanılmıştır. İstatistiksel sonuçlar BWM'nin tutarlılık oranı ve diğer değerlendirme kriterleri bakımından AHP'den önemli ölçüde daha iyi performans gösterdiği yorumu yapılmıştır.

Rezaei (2016), çalışmada öncelikle kriterlerin nasıl tartılabileceği ve sıralayabileceği gösterilerek çok sayıda optimum çözüm için aralık analizi kullanma önerilmiştir. Daha sonra BWM için doğrusal bir model önerilmiştir.

Ahmadi vd. (2017), çalışmada sosyal sürdürülebilirlik kriterlerini değerlendirmek ve ağırlıklandırmak için 38 uzman kullanılmış ve kriterler BWM'den elde edilen ortalama ağırlıklarına göre sıralanmıştır.

Safarzadeh vd. (2018), çalışmada BWM'ye dayalı yeni bir grup karar verme yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntemi değerlendirmek ve onu nasıl kullanılacağını netleştirmek için bazı sayısal örnekler sunulmuştur.

Brunelli ve Rezaei (2019), çalışmada BWM yöntem çerçevesine yeni bir alternatif ölçüm getirilerek daha basit bir doğrusallaştırma modeli önerilmiştir.

FUCOM ile yapılmış bazı çalışmaların özeti aşağıda verilmiştir:

Pamuçar vd. (2018) çalışmada yazarlar tarafından FUCOM önerilmiştir. Model için ağırlık katsayılarının optimal değerlerini sağlaması gereken iki grup kısıtlamanın tanımı yapılmıştır. Kısıtlamalar belirdikten ve model çözüldükten sonra, optimum ağırlık değerlerine ek olarak, tam tutarlılıktan sapma (DFC) değeri elde edilmesi gösterilmiştir. Önerilen modeli göstermek ve performansını değerlendirmek için literatürden birkaç sayısal örnek üzerinde test edilmiştir. Diğer öznel modellerle BWM ve AHP karşılaştırmalar yapılmıştır.

Prentkovskis vd.(2018) çalışmada hizmet kalitesinin ölçümünün iyileştirilmesi için ilk aşamada kalite boyut sıralamasını yapmak için DELPHİ yöntemi kullanılmıştır. Sonra kalite boyutlarının ağırlık katsayıları FUCOM yöntemi ile hesaplanmıştır. Son olarak SERVQUAL yöntemi kullanılarak kalite seviyesi belirlenmiştir.

Noureddine ve Ristic (2019) çalışmada, çok kriterli karar verme alanında yeni bir yaklaşım kullanılarak tehlikeli maddelerin taşınması için en uygun rota kriterleri seçilmiştir. Bu kriterlerin ağırlık katsayıları Tam Tutarlılık Yöntemi (FUCOM) uygulanarak belirlenmiştir. Tedarikçilerin değerlendirilmesi ve seçilmesi, TOPSIS (İdeal Çözüme Benzerlik ile Tercih Sırası Tekniği) ve MABAC (Çok Amaçlı Sınır Yaklaştırma Alanı Karşılaştırma Alanı Karşılaştırması) yöntemleri uygulanarak belirlenmiştir. Modellerin istikrarını sağlamak ve FUCOM-TOPSIS-MABAC modelinden elde edilen sonuçları doğrulamak için bir duyarlılık analizi (on farklı senaryodan) yapılmıştır. Duyarlılık analizi, ağırlık katsayıları kriterlerinde orijinal değerlerine göre değişiklik yapılmasını gerektirmiştir. Önerilen rota modeli, Sırbistan'daki Eurodiesel taşımacılığının gerçek örneği üzerinde test edilmiştir.

Badi ve Abdulshahed (2019) çalışmada, çalışmada dört Libya havayolu şirketinin performansı beş kriter altında hem FUCOM hem de AHP ile değerlendirilmiştir. Havayolunun güvenilirliği, personeli, yönetimi, müşteri memnuniyeti ve somut özelliklerden oluşan beş ana kriter altında 16 kriter incelenmiştir. Güvenirliliğin en önemli kriter ağırlığına sahip olduğu ve ardından müşteri memnuniyetinin geldiği görülmüştür.

Mujkanović vd. (2019) çalışmada uluslararası taşımacılıkta kullanılan en iyi ulaşım aracını değerlendirme ve seçme konusunda bir seçim yapılmıştır. Çok kriterli model beş kriter ve beş alternatiften oluşmuştur. Kullanılan kriterlerin önemini belirlemek için Tam Tutarlılık Yöntemi (FUCOM), ARAS yöntemi kullanılarak alternatifler sıralanmıştır. Basit Katkı Ağırlık (SAW), Ağırlıklı Toplanmış Toplam Ürün Değerlendirmesi (WASPAS) ve Çok Amaçlı Sınır Yaklaşım Alanı Karşılaştırması (MABAC) ile sonuçları karşılaştırmak için modelin kararlılığını kontrol edilmiştir.

2. ARAŞTIRMADA KULLANILAN YÖNTEMLER

2.1. BWM YÖNTEMİ

Kriter ağırlıklandırmada kullanılan bu yöntem iki kriter arasındaki karşılaştırma fikrine dayanmaktadır. Rastgele bir ikili karşılaştırma değil, sistematik bir karşılaştırmadır. n kriter sayısı olmak üzere $(2n - 3)$ tane ikili karşılaştırma yapılır. Bu yöntem 2015 yılında Jafar Rezaei tarafından literatüre kazandırılmıştır. Kriter ağırlıklandırma gerektiren birçok karar verme problemlerinde kullanılmıştır. Modelin adımları (Rezaei, 2015: 51-52):

Adım 1: Kriterlerin belirlenmesi

Adım 2: En İyi (en çok istenen, en önemli) kriterin ve En Kötü (en az istenen, en az önemli) kriterin belirlenmesi

Tanımlama karar vericinin görüşüne dayanır ve kriterlerin değerleri bu adımda dikkate alınmaz ve herhangi bir karşılaştırma yapılmaz.

Adım 3: En iyi kriterin önceliğinin belirlenmesi

$A_{(en\ iyi)} = (a_{(en\ iyi(1))}, a_{(en\ iyi(2))}, \dots, a_{(en\ iyi(n))})$ 1-9 arasında sayı kullanarak diğer tüm kriterlere göre en iyi kriterin önceliği belirlenir.

Adım 4: En kötü kriterin önceliğinin belirlenmesi

$A_{(en\ kötü)} = (a_{(en\ kötü(1))}, a_{(en\ kötü(2))}, \dots, a_{(en\ kötü(n))})$ 1-9 arasında ikili karşılaştırma ölçeği kullanarak diğer tüm kriterlere göre en kötü kriterin önceliği belirlenir. 1-9 arasında ikili karşılaştırma ölçeği ve sözlü anlatımları Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. BWM Kullanılan İkili Karşılaştırma Ölçeği

Önem Derecesi	Kriterlerin Karşılaştırılması için Sözlü Anlatım
1	Eşit derecede önemli
2	Eşit olarak orta derecede önemli
3	Orta derecede daha önemli
4	Orta derecede çok daha önemli
5	Güçlü olarak önemli
6	Güçlü olarak çok önemli
7	Çok güçlü olarak önemli
8	Çok güçlü olarak daha önemli
9	Oldukça çok önemli

Adım 5: En uygun ağırlıkları belirlemek

$\min \xi_L$

Öyle ki,

$$|w_{(en\ iyi)} - a_{(en\ iyi(j))} \cdot w_j| \leq \xi_L \quad \forall j \quad (1)$$

$$|w_j - a_{jw} \cdot w_{(en\ kötü(j))}| \leq \xi_L \quad \forall j \quad (2)$$

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

$$w_j \geq 0$$

Adım 6: Tutarlılık oranının hesaplanması

Karşılaştırmaların tutarlılığını kontrol etmek ve sonuçların güvenilir olup olmadığını anlamak için hesaplanır. Tutarlılık oranı ne kadar küçük olursa karşılaştırmalar o kadar tutarlı olur. Tutarlılık indeksi Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. BWM Kullanılan Tutarlılık İndeksi

$a_{(eni-yi-en\ kötü)}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Tutarlılık Endeksi	0,00	0,44	1,00	1,63	2,3	3,00	3,73	4,47	5,23

BWM'nin Tutarlılık Oranı, elde edilen ξ_L ve karşılık gelen tutarlılık indeksini Tablo 2 aşağıdaki şekilde birleştirerek hesaplanabilir:

$$\text{Tutarlılık Oranı} = \xi_L / (\text{Tutarlılık indeksi}) \quad (3)$$

Formüldeki tutarlılık indeksi, ξ_L 'nin maksimum olası değeridir. Burada tutarlılık oranı $\in [0, 1]$. Tutarlılık oranı sıfıra ne kadar yakın olursa, elde edilen vektör o kadar tutarlı olur ve bunun tersi de geçerlidir. Genel olarak, Tutarlılık Oranı ≤ 0.1 elde edilen vektörün kabul edilebilir olduğunu göstermektedir.

2.2. FUCOM YÖNTEMİ

FUCOM, tüm elemanların ağırlık katsayılarını belirli bir hiyerarşi düzeyinde karşılıklı olarak karşılaştırarak ve karşılaştırma için tutarlılık koşullarını sağlayan bir yöntemdir. Gerçek hayatta, ikili karşılaştırma değerleri $a_{ij} = \frac{w_i}{w_j}$ (burada a_{ij} kriter i 'nin kriter j 'ye göreceli tercihini gösterir) doğru ölçümlere değil, öznel tahminlere dayanır. Ayrıca a_{ij} değerlerinin ideal oran $\frac{w_i}{w_j}$ 'den sapması da bulunmaktadır (burada w_i kriter i 'nin, w_j kriter j 'nin ağırlıklarını göstermektedir). FUCOM yönteminin aşamaları 3 adımdan oluşmaktadır (Pamučar vd., 2018: 5-7):

Adım 1: Kriterlerin sıralanması

Sıralama kriter kümesindeki $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ kriterleri en yüksek ağırlık katsayısına sahip olması beklenen kriterden başlayarak en az önem derecesine göre yapılır. Böylece ağırlık katsayısının beklenen değerlerine göre sıralanmış kriterler elde edilir.

$$C_{j(1)} > C_{j(2)} > \dots > C_{j(k)} \quad (4)$$

k : gözlenen kriter sırası

Aynı öneme sahip iki veya daha fazla kriter varsa (4)'deki ifadede bu kriterler arasına ">" işareti yerine "=" işareti yerleştirilir.

Adım 2: Kriterlerin öneminin belirlenmesi

Sıralanan kriterlerin karşılaştırılması gerçekleştirilir ve kriterlerin karşılaştırmalı önemi $(\varphi_{k/(k+1)})$ belirlenir. Değerlendirme kriterlerinin karşılaştırmalı önemlerinin (önceliklerinin) vektörleri (5)'te olduğu gibi elde edilir.

$$\Phi = (\varphi_{1/2}, \varphi_{2/3}, \dots, \varphi_{k/(k+1)}) \quad (5)$$

Kriterlerin karşılaştırmalı önemi iki yoldan biri kullanılarak belirlenir:

- Karar vericilerin tercihlerine göre $(\varphi_{k/(k+1)})$ karşılaştırmalı önem gözlenen kriterler arasında tanımlanır. Örneğin; sırasıyla $w_A = 300$ gr ve $w_B = 255$ gr ağırlığında olan A ve

B taşları için taş B'ye göre taş A'nın karşılaştırmalı önemi

$$(\varphi_{A/B}) = 300/255 = 1,18 \text{ dir.}$$

- b. Kriterlerin karşılaştırılması için önceden belirlenmiş bir ölçüm ölçeğine dayanarak karar vericiler her kriterin önemini belirleyebilir. A ve B taşlarının ağırlıkları tam olarak belirlenemiyorsa [1,9] ölçüm ölçeğine göre, A ve B taşlarının sırasıyla $w_A = 8$ ve $w_B = 7$ ağırlıklarına sahip olduğu söylenebilirse taş B'ye göre taş A'nın karşılaştırmalı önemi $(\varphi_{A/B}) = 8/7 = 1,14$ olarak da belirlenebilir. Bu taş B ile ilgili olarak taş A'nın 1,18 (kesin ölçümlerde), 1,14 (ölçüm ölçeğinin uygulanması durumunda) ile daha büyük öneme (önceliğe) sahip olduğu anlamına gelir.

Böylece Adım 1'de sıralanan kriterlerin tamamı için kriterlerin $(\varpi_{C_j(k)})$ önemi elde edilmiş olur. Birinci derecedeki kriter kendisiyle karşılaştırıldığı için önemi $\varpi_{C_j(1)} = 1$ olur ve tüm karşılaştırmaların sayısı da $(n - 1)$ olur. FUCOM yöntemi kriterlerin ikili karşılaştırılması için tamsayı, ondalık değerler veya önceden belirlenmiş bir ölçüm ölçeğinin değerlerini kullanarak kriterlerin ikili karşılaştırılmasına imkân sağlar.

Adım 3: Ağırlık katsayılarının nihai değerlerinin bulunması

Değerlendirme kriterlerin $(w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ ağırlık katsayılarının nihai değerleri bulunur. Ağırlık katsayılarının nihai değerleri iki koşulu sağlamalıdır:

Koşul 1: Ağırlık katsayılarının oranının Adım 2'de tanımlanan gözlemlenen kriterler $\varphi_{k/(k+1)}$ arasındaki karşılaştırmalı öneme eşit olması gerekir. Yani,

$$\frac{w_k}{w_{k+1}} = \varphi_{k/(k+1)} \quad (6)$$

Koşul 2: Ağırlık katsayılarının nihai değerleri, matematiksel geçişlilik koşulunu yerine getirmelidir. Yani,

$$\varphi_{k/(k+1)} \otimes \varphi_{(k+1)/(k+2)} = \varphi_{k/(k+2)} \cdot \varphi_{k/(k+1)} = \frac{w_k}{w_{k+1}} \text{ ve}$$

$$\varphi_{(k+1)/(k+2)} = \frac{w_{k+1}}{w_{k+2}} \text{ den } \frac{w_k}{w_{k+1}} \otimes \frac{w_{k+1}}{w_{k+2}} \text{ elde edilir. İkinci koşul,}$$

$$\frac{w_k}{w_{k+2}} = \varphi_{k/(k+1)} \otimes \varphi_{(k+1)/(k+2)} \quad (7)$$

Tam tutarlılık yani minimum DFC (χ) yalnızca geçişliliğe tam olarak bağlı kalındığında karşılanır. Bu şekilde maksimum tutarlılık şartı yerine getirilerek ağırlık katsayılarının elde edilen değerleri için DFC, $\chi=0$ 'dır. Ağırlık katsayılarının kabul edilebilir

olduğu veya optimal değerlere yakın olduğu DFC değerlerinin $[0, 0.025]$ aralığında olması gerekir. Koşulların karşılanabilmesi için $(w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ ağırlık katsayılarının değerlerinin, χ değerinin en aza indirilmesiyle,

$$\left| \frac{w_k}{w_{k+1}} - \varphi_{k/(k+1)} \right| \leq \chi \text{ ve } \left| \frac{w_k}{w_{k+2}} - \varphi_{k/(k+1)} \otimes \varphi_{(k+1)/(k+2)} \right| \leq \chi$$

Durumlarını karşılaması gerekir. Bu şekilde maksimum tutarlılık şartı yerine getirilir. Tanımlanan ayarlara dayanarak, değerlendirme kriterlerinin ağırlık katsayılarının nihai değerlerini belirlemek için nihai model aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

Min χ

$$\left| \frac{w_{j(k)}}{w_{j(k+1)}} - \varphi_{k/(k+1)} \right| \leq \chi, \forall_j$$

$$\left| \frac{w_{j(k)}}{w_{j(k+2)}} - \varphi_{k/(k+1)} \otimes \varphi_{(k+1)/(k+2)} \right| \leq \chi, \forall_j \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1, \forall_j w_j \geq 0, \forall_j$$

Denklem (8) çözülerek $(w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ değerlendirme kriterlerinin nihai ağırlık katsayıları ve DFC (χ) derecesi bulunur.

3. BWM İLE FUCOM YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

BWM ve FUCOM yöntemlerine ait belirli özellikler verilerek kıyaslamaları yapılmıştır.

BWM için temel özellikler;

- Kriter ağırlıklandırma yöntemidir
- Tek karar verici veya grup karar vericilerle kullanılır
- İşlem adımları basit bir algoritmaya dayanmaktadır
- Karar vericilerin kişisel tercihlerine göre belirlenen en iyi ve en kötü kriterler nihai ağırlıkların değeri üzerinde öznel bir etkiye sahiptir
- n kriter sayısı olmak üzere $(2n-3)$ karşılaştırma yapar
- Her karşılaştırma doğrusal programlama kısıtıdır
- Karşılaştırmalar için 1-9 ikili karşılaştırma ölçeği kullanır
- Tutarlılık oranının hesaplanması ile bulunan ağırlıklar vektörünün güvenilirlik onayı yapılır.

FUCOM için temel özellikler;

- Kriter ağırlıklandırma yöntemidir
- Tek karar verici veya grup karar vericilerle kullanılır
- İşlem adımları basit bir algoritmaya dayanmaktadır
- Karar vericilerin kişisel tercihlerine göre kriterler arasında yapılan sıralama kriterlerin nihai ağırlıklarının değeri üzerinde öznel bir etkiye sahiptir
- n kriter sayısı olmak üzere (n-1) karşılaştırma yapar
- Her karşılaştırma doğrusal programlama kısıtıdır
- Karşılaştırmalar için 1-9 ikili karşılaştırma ölçeği kullanır
- Kriterlerin ağırlık katsayıları arasındaki ilişki kriterlerin karşılaştırmalı önemine eşit olmalı koşulu sağlanmalı
- Kriterler arasındaki ilişkide matematiksel geçişlilik sağlanmalı
- Tam tutarlılıktan sapma derecesi ile elde edilen ağırlık vektörü için hata değerleri belirlenerek tahmin edilen ağırlık katsayılarının güvenilirliği onaylanır.

4. ANALİZ VE BULGULAR

Kriter ağırlık katsayılarının belirlenmesi, ideal özel okul seçimini etkileyen kriterlerin değerlendirilmesi örneği ile sunulacaktır. Okul çağında çocuğu olan ebeveynlerin en iyi okulu seçerken dikkat etmesi gereken kriterler Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Eğitim Fakültesi öğretim üyeleri ile görüşülerek oluşturulmuştur. Okul ücretinin aile bütçesine uygun olması (bütçe), ev ile okul arasındaki mesafenin kısa olması (ulaşım), okulun vizyon ve misyonu ile ailenin çocuğuna kazandırmak istediği dünya görüşünün uygun olması (okulun vizyonu/misyonu), okulun uygulayacağı akademik eğitim programlarının çok yönlü olması (eğitim programları), idareci ve öğretmenlerin tecrübeli olması (akademik kadro), okulun spor, sanat dil ve teknoloji sınıflarına ve uygulama alanlarına sahip olması (fiziksel özellikler), okuma-yazma, anlama-konuşma etkinliklerine sahip bir dil programının olması (yabancı dil eğitimi), okulun akademik başarısının yanında sanat, bilim, spor, proje ve yabancı dil gibi alanlarda başarısının olması (başarı durumu), beslenme, hijyen, güvenlik ve servis hizmetlerinin olması (ek hizmetler) şeklinde oluşturulan kriterlerin adı ve etiketleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Kriterlerin Adı ve Etiketi

Kriterin Adı	Kriterin Etiketi
Bütçe	C_1
Ulaşım	C_2
Okulun vizyonu/misyonu	C_3

Eğitim programları	C_4
Akademik kadro	C_5
Fiziksel özellikler	C_6
Yabancı dil eğitimi	C_7
Başarı durumu	C_8
Ek hizmetler	C_9

4.1. BWM BULGULARI

Adım 1: Kriterlerin belirlenmesi

Tablo 3'deki kriterler kullanılacaktır.

Adım 2: En İyi (en çok istenen, en önemli) kriterin ve En Kötü (en az istenen, en az önemli) kriterin belirlenmesi Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. En İyi ve En Kötü Kriter

Kriter	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9
		↓					↓		
		En Kötü (En az önemli)					En İyi (En önemli)		

Adım 3: En iyi kriterin önceliğinin belirlenmesi

1-9 arasında sayı kullanarak diğer tüm kriterlere göre en iyi kriterin önceliği belirlenerek Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. En İyi Kriter İçin İkili Karşılaştırma Vektörü

En İyi Kriter	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9
C_8	2	5	9	3	4	7	6	1	8

Adım 4: En kötü kriterin önceliğinin belirlenmesi

1-9 arasında ikili karşılaştırma ölçeği kullanarak diğer tüm kriterlere göre en kötü kriterin önceliği belirlenerek Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. En Kötü Kriter İçin İkili Karşılaştırma Vektörü

En Kötü Kriter	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9
C_3	6	4	1	7	3	2	8	9	5

Adım 5: En uygun ağırlıkları belirlemek

min_{ÇL}

Öyle ki,

$$|w_8 - 2w_1| \leq \xi_L$$

$$|w_8 - 5w_2| \leq \xi_L$$

$$|w_8 - 9w_3| \leq \xi_L$$

$$|w_8 - 3w_4| \leq \xi_L$$

$$|w_8 - 4w_5| \leq \xi_L$$

$$|w_8 - 7w_6| \leq \xi_L$$

$$|w_8 - 6w_7| \leq \xi_L$$

$$|w_8 - 8w_9| \leq \xi_L$$

$$|w_1 - 6w_3| \leq \xi_L$$

$$|w_2 - 4w_3| \leq \xi_L$$

$$|w_4 - 7w_3| \leq \xi_L$$

$$|w_5 - 3w_3| \leq \xi_L$$

$$|w_6 - 2w_3| \leq \xi_L$$

$$|w_7 - 8w_3| \leq \xi_L$$

$$|w_9 - 5w_3| \leq \xi_L$$

$$w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5 + w_6 + w_7 + w_8 + w_9 = 1$$

$$w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6, w_7, w_8, w_9 \geq 0$$

Ağırlık katsayılarının değerleri ve ξ_L değeri LINGO 17 yazılımı ile elde edilmiştir. Ağırlık değerleri Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7. Ağırlık Değerleri

w₁	0,1991
w₂	0,0796
w₃	0,0212
w₄	0,1327
w₅	0,0996
w₆	0,0569
w₇	0,0664
w₈	0,2947
w₉	0,0498
ξ_L	0,1040

Uygulama için 9 kriter kullanılıp $(2n - 3) = 15$ karşılaştırma yapılarak doğrusal programlama kısıtları olarak her biri modelde yer almıştır. $\xi_L=0,1040$ karşılaştırma sisteminin tutarlılık oranı için Tablo 2'deki tutarlılık indeksindeki 9 sayısına karşılık gelen 5,23 değeri kullanılarak tutarlılık oranı denklem (3) yardımıyla hesaplanarak $(0,104/5,23=0,020)$ bulunmuştur. Bu değer $0,020 < 0,1$ olduğundan karşılaştırmaların tutarlı olduğu ve sonuçların güvenilir olduğu yorumu yapılabilir. İdeal özel okul seçimini etkileyen kriterler içinde başarı durumu 0,2947 ağırlığı ile en önemli kriter olurken okulun vizyonu/misyonu 0,0212 ağırlığı ile en önemsiz kriter olmuştur.

4.2. FUCOM BULGULARI

Adım 1: Kriterlerin sıralanması

$$C_1 > C_5 > C_7 > C_4 > C_8 > C_9 > C_2 > C_6 > C_3$$

Adım 2: Kriterlerin öneminin belirlenmesi

Kriterlerin önemi için [1,9] ölçeği kullanılmıştır. Adım 1'de sıralanan tüm kriterler için karar vericiler tarafından değerler kriterlerin önemi olup $(\varpi_{C_j(k)})$ Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Kriterlerin Önemi

Kriterler	C_1	C_5	C_7	C_4	C_8	C_9	C_2	C_6	C_3
$(\varpi_{C_j(k)})$	1	2,4	3,1	3,6	4,7	5,2	6,6	7,4	8,5

Elde edilen kriterlerin önemlerine dayanarak kriterlerin karşılaştırmalı önemi hesaplanır.

$$\varphi_{C_1/C_5} = \frac{2,4}{1} = 2,4 \quad \varphi_{C_5/C_7} = \frac{3,1}{2,4} = 1,29 \quad \varphi_{C_7/C_4} = \frac{3,6}{3,1} = 1,16$$

$$\varphi_{C_4/C_8} = \frac{4,7}{3,6} = 1,31 \quad \varphi_{C_8/C_9} = \frac{5,2}{4,7} = 1,11 \quad \varphi_{C_9/C_2} = \frac{6,6}{5,2} = 1,27$$

$$\varphi_{C_2/C_6} = \frac{7,4}{6,6} = 1,12 \quad \varphi_{C_6/C_3} = \frac{8,5}{7,4} = 1,15$$

Adım 3: Ağırlık katsayılarının nihai değerlerinin bulunması:

$$\frac{w_1}{w_5} = 2,4 \quad \frac{w_5}{w_7} = 1,29 \quad \frac{w_7}{w_4} = 1,16 \quad \frac{w_4}{w_8} = 1,31 \quad \frac{w_8}{w_9} = 1,11 \quad \frac{w_9}{w_2} = 1,27$$

$$\frac{w_2}{w_6} = 1,12 \quad \frac{w_6}{w_3} = 1,15$$

Ağırlık katsayılarının oranının Adım 2’de tanımlanan gözlemlenen kriterler $\varphi_{k/(k+1)}$ arasındaki karşılaştırmalı öneme eşit olduğundan başka bir ifadeyle Eşitlik (6) sağlandığından koşul 1 yerine getirilmiş olur.

$$\frac{w_1}{w_7} = (2,40).(1,29) = 3,096 \quad \frac{w_5}{w_4} = (1,29).(1,16) = 1,496$$

$$\frac{w_7}{w_8} = (1,16).(1,31) = 1,520 \quad \frac{w_4}{w_9} = (1,31).(1,11) = 1,454$$

$$\frac{w_8}{w_2} = (1,11).(1,27) = 1,410 \quad \frac{w_9}{w_6} = (1,27).(1,12) = 1,422$$

$$\frac{w_2}{w_3} = (1,12).(1,15) = 1,288$$

elde edilir. Eşitlik (7) koşulu sağlandığından Koşul 2 kabul edilmiş olur. Eşitlik (8) ifadesi kullanılarak ağırlık katsayılarını belirlemek için nihai model tanımlanırsa:

$\min \chi$

öyle ki,

$$\left| \frac{w_1}{w_5} - 2,40 \right| \leq \chi \quad \left| \frac{w_5}{w_7} - 1,29 \right| \leq \chi \quad \left| \frac{w_7}{w_4} - 1,160 \right| \leq \chi$$

$$\left| \frac{w_4}{w_8} - 1,31 \right| \leq \chi \quad \left| \frac{w_8}{w_9} - 1,11 \right| \leq \chi \quad \left| \frac{w_9}{w_2} - 1,270 \right| \leq \chi$$

$$\left| \frac{w_2}{w_6} - 1,12 \right| \leq \chi \quad \left| \frac{w_6}{w_3} - 1,15 \right| \leq \chi \quad \left| \frac{w_1}{w_7} - 3,096 \right| \leq \chi$$

$$\left| \frac{w_5}{w_4} - 1,496 \right| \leq \chi \quad \left| \frac{w_7}{w_8} - 1,520 \right| \leq \chi \quad \left| \frac{w_4}{w_9} - 1,454 \right| \leq \chi$$

$$\left| \frac{w_8}{w_2} - 1,410 \right| \leq \chi \quad \left| \frac{w_5}{w_6} - 1,422 \right| \leq \chi \quad \left| \frac{w_2}{w_3} - 1,288 \right| \leq \chi$$

$$\sum_{j=1}^7 w_j = 1$$

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

Bu modeli çözerek ağırlık katsayılarının nihai değerleri Tablo 9 da verilmiştir.

Tablo 9. Kriterin Ağırlık Değerleri

Kriterin Adı	Kriterin Ağırlık Değerleri
--------------	----------------------------

Bütçe	0,317
Ulaşım	0,069
Okulun Vizyonu/Misyonu	0,056
Eğitim Programları	0,094
Akademik Kadro	0,122
Fiziksel Özellikler	0,074
Yabancı Dil Eğitimi	0,110
Başarı Durumu	0,083
Ek Hizmetler	0,075

Tam tutarlılıktan sapma değeri; $\chi=0,02$ olarak bulunmuştur. Hesaplama sonrasında en önemli kriterin bütçe olduğu, en az öneme sahip kriterin ise okulun vizyonu/misyonu olduğu sonucuna varılmıştır. Bütçe kriteri için nihai ağırlık katsayı değeri: 0,317'dir. Okulun vizyonu/misyonu için nihai ağırlık katsayı değeri: 0,056'dır. Ağırlık katsayılarının nihai değerleri ve tam tutarlılıktan sapma değeri LINGO 17 yazılımı ile elde edilmiştir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Çok kriterli karar verme problemlerinde kriterlerin ağırlıklarını belirlemek alternatiflerin sıralamasında önemli etkiler oluşturur. BWM ve FUCOM yöntemlerinin ikisi de kriter ağırlıklandırmada kullanılan yöntemlerdir. Her iki yöntemde tek karar verici veya grup karar vericilerle karar verilir. Yine her iki yöntemin işlem adımları basit bir algoritmaya dayanmaktadır. Karşılaştırma için her iki yöntemde 1-9 ikili karşılaştırma ölçeği kullanılır. Bu karşılaştırmada n kriter sayısı olmak üzere BWM (2n-3) karşılaştırma yaparken, FUCOM (n-1) karşılaştırma yapar. Yine her iki yöntemde yapılan bu karşılaştırmalar doğrusal programlama kısıtını oluşturmaktadır. FUCOM'da kriterler arasındaki ilişkide matematiksel geçişlilik olmalı ve kriterlerin ağırlık katsayıları arasındaki ilişki kriterlerin karşılaştırmalı önemine eşit olmalı koşulları BWM bulunmamaktadır. Her iki yöntemde bulunan ağırlık vektörünün güvenilirlik onayını yapan tutarlılık oranı hesaplanmaktadır.

Çalışmada BWM yöntemi ile ideal özel okul seçimi için kullanılan kriterlerden en iyi ve en kötü kriter karar vericiler tarafından belirlendikten sonra bu kriterlere belirlenen bir ölçeğe göre değer verilmesi istenmiştir. Sonra kriterlerin ikili karşılaştırmaları yapıp modelde tanımlanan koşullar sağlandıktan sonra elde edilen amaç fonksiyonu ve kısıtlarla ilgili bir matematiksel model yazılmıştır. Hesaplanan tutarlılık oranına göre karşılaştırmaların tutarlı olduğu ve sonuçların güvenilir olduğu yorumu yapılabilir. İdeal özel okul seçimini etkileyen kriterler içinde başarı durumu en önemli kriter olurken okulun vizyonu/misyonu en önemsiz kriter olmuştur.

Çalışmada FUCOM yöntemi ideal özel okul seçimi için kullanılan kriterlerden bazıları iki karar vericinin öznel tercihleriyle sıralanması sağlandıktan sonra bu kriterlere belirlenen bir ölçüğe göre değer verilmesi istenmiştir. Sonra kriterlerin ikili karşılaştırmaları yapıp modelde tanımlanan koşullar sağlandıktan sonra elde edilen amaç fonksiyonu ve kısıtlarla ilgili bir matematiksel model yazılmıştır. Bu model tek karar verici için yapılarak kriter ağırlık katsayıları ve tam tutarlılıktan sapma değerleri hesaplanmıştır. Tüm hesaplamalar sonucunda kriter ağırlık katsayılarının elde edilen değerleri optimum değere eşit olduğu şeklinde yorum yapılabilir. İdeal özel okul seçimini etkileyen kriterler içinde bütçe en önemli kriter olurken okulun vizyonu/misyonu en önemsiz kriter olmuştur.

Literatürde BWM ve FUCOM kriterlerin ağırlıklarını belirlemek için kullanılıp bunlara ilave alternatifleri sıralamak için diğer ÇKKV yöntemleri tercih edilmiştir. Bu çalışmayı yapılanlardan ayıran fark iki ağırlıklandırma yönteminin kıyaslanmasıdır.

İleride yapılacak çalışmalar için BWM yönteme uygun bir yazılım geliştirilebilir. BWM yöntemi ile diğer kriter ağırlıklandırma yöntemlerinin uygulanmasıyla karşılaştırmalı olarak analiz edilebilir. FUCOM yöntemi ile ilgili yapılan çalışmaların sayısı arttıkça reel yaşamdaki problemlere uygulandıkça yöntem destek görecektir. İleride yapılacak çalışmalar için yönteme uygun bir yazılım geliştirilebilir. FUCOM yöntemi diğer kriter ağırlıklandırma yöntemlerinin uygulanmasıyla karşılaştırmalı olarak analiz edilebilir. Bulanık kümeler, gri teori gibi belirsizlik teorileri ile desteklenerek yeni uygulama alanları bulunabilir.

KAYNAKÇA

- Ahmadi, H. B., Sarpong, S. K. & Rezaei, J. (2017). Assessing the Social Sustainability of Supply Chains Using Best Worst Method. *Resources, Conservation & Recycling*, 126, 99-106.
- Badi, I. & Abdulshahed, A. (2019). Ranking The Linyan Airlines by Using Full Consistency Method (FUCOM) and Analytical Hierarhy Process (AHP). *Operational Research in Engineering Sciences: Theory and Applications*, 2(1), 1-14.
- Brunelli, M. & Rezaei, J. (2019). A Multiplicative Best Worst Method for Multi Criteria Decision Making. *Operations Research Letters*, 47, 12-15.
- Mujkanović A., Rahmanović, A., Nunić, Z., Stević, Ž. & Sremac, S. (2019). Selection of Transportation Mean Using Integrated FUCOM-ARAS Model. 12th International Conference of Iranian Operations Research Society.
- Noureddine, M. & Ristic, M. (2019). Route Planning for Hazardous Materials Transportation: Multi criteria Decision Making Approach. *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, 2(1), 66-85.
- Pamučar, D., Stević, Ž. & Sremac, S. (2018). A New Model for Determining Weight Coefficients of Criteria in MCDM Models: Full Consistency Method (FUCOM). *Symmetry*, 10 (393), 2-22.
- Pöyhönen, M., & Hämäläinen, R. P. (2001). On the Convergence of Multi Attribute Weighting Methods. *European Journal of Operational Research*, 129(3), 569-583.
- Prentkovskis, O., Erceg, Ž., Stević, Ž., Tanackov, I., Vasiljević, M. & Gavranović, M. (2018). A New Methodology for Improving Service Quality Measurement: Delphi-FUCOM-SERVQUAL Model. *Symmetry*, 10(12), 2-25.
- Rezaei, J. (2015). Best Worst Multi Criteria Decision Making Method. *Omega*, 53, 49-57.
- Rezaei, J. (2016), Best Worst Multi Criteria Decision Making Method: Some Properties and A Linear Model. *Omega*, 64, 126-130.
- Safarzadeh, S., Khansefid, S. & Barzoki, M. R. (2018). A Group Multi Criteria Decision Making Based on Best Worst Method. *Computers & Industrial Engineering*, 126, 111-121.
- Shemshadi, A., Shirazi, H., Toreihi, M. & Tarokh, M. J. (2011). A Fuzzy VIKOR Method for Supplier Selection Based on Entropy Measure for Objective Weighting. *Expert System With Applications*, 38(10), 12160-12167.