



# Material Selection for Fuselage Using Integrated SWARA-MULTIMOORA Approach

 Aslı ÇALIŞ BOYACI<sup>1,\*</sup> Mehmet Çağrı TÜZEMEN<sup>2</sup>

Ondokuz Mayıs University, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, 55139, Atakum/SAMSUN

Gazi University, Faculty of Engineering, Mechanical Engineering Department, 06580, Çankaya/ANKARA

## Graphical/Tabular Abstract

The variety of engineering materials is increasing day by day with alloying, post-treatments such as heat treatment, and the production of composite materials, besides pure elements. The selection of the most suitable material for each different part to be produced from such a large material pool is very important. In this study, which aims to select materials for the fuselage of the passenger aircraft, firstly criteria and alternatives have been determined in line with expert opinions. The criteria weights were obtained using SWARA method, and then alternative materials were ranked by MULTIMOORA method according to the criteria weights.

### Article Info:

Research article

Received: 20/07/2020

Revision: 12/09/2020

Accepted: 21/09/2020

### Highlights

- Passenger aircraft
- Fuselage
- SWARA-MULTIMOORA

### Keywords

Fuselage  
 Material selection  
 MCDM  
 SWARA  
 MULTIMOORA

Table A. The decision matrix

	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$	$K_7$	$K_8$
	<i>maks</i>	<i>maks</i>	<i>maks</i>	<i>maks</i>	<i>maks</i>	<i>maks</i>	<i>min</i>	<i>min</i>
$A_1$	1240	740	145	0,3	1185	0,16	238	1,6
$A_2$	1020	440	45	0,4	440	6,6	24	2,1
$A_3$	560	420	209	28	285	12,3	1,95	7,85
$A_4$	485	283	72,4	18	143	23,6	16	2,77
$A_5$	228	138	70,3	18	117	23,7	4,98	2,68
$A_6$	310	207	69	17	95	23,6	7,55	2,7
$A_7$	572	331	71	11	160	23,4	13	2,8
$A_8$	290	130	45	15	110	26	36,8	1,77
$A_9$	900	550	114	14	548	8,6	105	4,43

**Purpose:** In this study, it is aimed to select materials for the fuselage of the passenger aircraft. Criteria and alternatives are determined in line with expert opinions. In the study, 8 criteria such as density, tensile strength, shear strength, cost, and 9 alternatives are taken into consideration. An integrated SWARA-MULTIMOORA approach is used for the material selection process.

**Theory and Methods:** SWARA and MULTIMOORA methods were used in the study. SWARA method can value the criteria weights as one weight of criterion is higher or lower significant than the other criterion. MULTIMOORA is produced by adding the full multiplicative form to MOORA. This is not an independent MCDM method, it is based on the evaluation of other MOORA techniques and the ranking of the results by dominance. The criteria weights were obtained using SWARA method and alternatives were ranked by MULTIMOORA method

**Results:** The results have shown that tensile strength was the most important criterion affecting the selection process with a weight of 0,457; percentage elongation was the least important with 0,016.  $A_1$  (CFRP) was identified as the most suitable material and  $A_5$  (Al 5052-H32) as the least suitable material for fuselage according to the integrated SWARA-MULTIMOORA method.

**Conclusion:** Among the alternatives, the most suitable three materials for the fuselage were respectively CFRP, Ti-6Al-4V, and GFRP; the least suitable material was Al 5052-H32 according to the integrated SWARA-MULTIMOORA method. While Al was mostly used for fuselage in passenger aircraft production, it is seen that composite materials are used increasingly today. It was supported by our findings. As future work, results can be compared using different MCDM methods.



## Bütünleşik SWARA-MULTIMOORA Yaklaşımı ile Uçak Gövdesi için Malzeme Seçimi

Aslı ÇALIŞ BOYACI<sup>1,\*</sup> Mehmet Çağrı TÜZEMEN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 55139, Atakum/SAMSUN

<sup>2</sup> Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 06580, Çankaya/ANKARA

### Öz

Saf elementlerin yanında alaşımlama, ısıtma işlemi gibi ardıl işlemler ve kompozit malzeme üretimi ile mühendislik malzemelerinin çeşidi her geçen gün daha da artmaktadır. Böylesine geniş bir malzeme havuzundan, üretilecek her bir farklı parça için en uygun malzemenin seçimi ise oldukça önemlidir. Uçağın önemli bir bölümünü oluşturan gövde için uygun malzeme seçimi termal ve mekanik özelliklerin yanı sıra hafiflik ve maliyet açısından da önem arz etmektedir. Yolcu uçağı gövdesi için malzeme seçiminin amaçlandığı bu çalışmada, öncelikle uzman görüşleri doğrultusunda kriterler ve alternatifler belirlenmiştir. Yoğunluk, çekme dayanımı, kayma dayanımı, maliyet gibi kriterlerin dikkate alındığı çalışmada, kriter ağırlıkları SWARA yöntemiyle elde edilmiş, ardından belirlenen kriter ağırlıkları doğrultusunda alternatif malzemeler MULTIMOORA yöntemi ile sıralanmıştır. Sonuç olarak, yolcu uçağı gövdesi için en uygun ilk üç malzeme sırasıyla CFRP, Ti-6Al-4V ve GFRP olarak belirlenmiştir.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 20/07/2020  
Düzeltilme: 12/09/2020  
Kabul: 21/09/2020

### Anahtar Kelimeler

Uçak gövdesi  
Malzeme seçimi  
ÇKKV  
SWARA  
MULTIMOORA

### Keywords

Fuselage  
Material selection  
MCDM  
SWARA  
MULTIMOORA

## Material Selection for Fuselage Using Integrated SWARA-MULTIMOORA Approach

### Abstract

The variety of engineering materials is increasing day by day with alloying, post-treatments such as heat treatment, and the production of composite materials, besides pure elements. The selection of the most suitable material for each different part to be produced from such a large material pool is very important. The selection of suitable material for the fuselage, which constitutes an important part of the aircraft, is important in terms of lightness and cost, as well as thermal and mechanical properties. In this study, which aims to select materials for the fuselage of the passenger aircraft, firstly criteria and alternatives have been determined in line with expert opinions. In the study in which criteria such as density, tensile strength, shear strength and cost were taken into consideration, the criteria weights were obtained using SWARA method, and then alternative materials were ranked by MULTIMOORA method according to the criteria weights. As a result, three most suitable materials for the fuselage of the passenger aircraft were determined as CFRP, Ti-6Al-4V and GFRP, respectively.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Eski çağlarda ulaşım araçlarının binek hayvanlarıyla sınırlı olması ulaşımı oldukça zorlaştırmakta; mesafeler günlerle, haftalarla ve hatta aylarla ifade edilmekte idi. Günümüzde ise çeşitli ulaşım araçlarının varlığı ile ulaşım kolaylaşmış, özellikle havayolu taşımacılığı ile mesafeler olabildiğince kısalmış ve dünyanın herhangi bir yerine ulaşım saatlerle ifade edilebilir hale gelmiştir. Ancak ulaştırma sektöründe yaşanan gelişmeler kimi sorunları da beraberinde getirmiştir. Bu sorunlardan en önemlisi kuşkusuz karbon salınımında meydana gelen artıştır. Karbon salınımının artması, küresel ısınmadan buzulların erimesine, tatlı su kaynaklarının azalmasından canlı hayatının riske girmesine, iklim değişikliklerinden kuraklık veya sel gibi doğal felaketlere kadar uzanan zincirleme sonuçları doğurabilmektedir [1].

Uluslararası havacılık sektörü insan kaynaklı karbon salınımının yaklaşık %2,5'ini oluşturmaktadır [1]. 2010 yılında 2,4 milyar yolcu taşıyan bu sektörün 2050 yılında 16 milyar yolcu taşıması ve bu salınımların

planlanandan çok daha hızlı artarak %300 kadar artması beklenmektedir [2, 3]. Havacılık sektöründeki hızlı büyümenin doğurduğu rekabet neticesinde firmaların hayatta kalma savaşı ve çevresel sorunlar ile aynı anda başa çıkma çabası, mühendisleri var olanı geliştirmeye ve yeni çözüm arayışlarına sürüklemiştir. Bu doğrultuda yapılabilecek iyileştirmelerin başında motorların verimliliğinin artırılması, tasarım optimizasyonu ile sürtünmenin azaltılması, yapısal tasarım değişikliği ve/veya malzeme değişikliği ile uçak ağırlığının azaltılması gelmektedir. Bu noktada kanat, kuyruk ve burun gibi bölgelerde yapısal tasarım değişimi veya uçağın her bir parçası için farklı malzemelerin değerlendirilip kullanılması sıklıkla kullanılan yöntemlerdir. Uçağın genel tasarım kısıtlamaları ve kararlılığı dolayısıyla geniş çaplı bir yapısal tasarım değişikliği mümkün olamamaktadır. Bu sebeple uçağın ilgili parçasında doğru malzeme seçimi önemli bir hal almaktadır. Malzeme seçimi ile uçağın ağırlığında meydana gelebilecek iyileştirme her bir uçuşta daha az yakıt tüketimini dolayısıyla uçağa daha az yakıt ikmalini sağlayabilecektir. Bu durumda uçağın ağırlığında meydana gelebilecek malzeme türünden kaynaklı iyileşmeye ek olarak yakıt ikmalinden kaynaklı bir iyileşme de söz konusu olabilecektir. Ağırlıktaki 1 kg'lık düşüş her 1000 km'de 20 ile 30 gr. arasında yakıt artırımına denk gelmektedir [4]. Yıllık uçuş sayısından yola çıkılarak yapılan bir hesapla uçakların bir yıl içerisinde yaklaşık 85,5 milyar km [5, 6] yol kat ettiği düşünüldüğünde uçağın 1 kg hafiflemesiyle yılda 2 milyon kg'ın üzerinde yakıt tasarrufu sağlayabileceği görülmektedir. Tüketilen her bir kg jet yakıtının 3,6 kg CO<sub>2</sub> salınımına neden olduğu hesaplandığında bunun hiç de küçümsenmeyecek bir değer olduğu aşikârdır [7]. Hafiflik aynı zamanda faydalı yük ve menzili de etkilemektedir [8].

Yoğunluk, çevresel etkileri bakımından uçak tasarımında malzeme seçimi için önemli bir kriterdir. Ancak tek başına yeterli değildir. Uçak malzemesi seçimini etkileyecek farklı kriterler de söz konusudur. Uçak gövdesi kalkış, uçuş, iniş ve taksit esnasında çok çeşitli yüklere veya darbelere maruz kalabilmektedir. Örneğin kuş sürüsüne çarpma olayı çoğunlukla uçağın düşük irtifada olduğu kalkış ve iniş esnasında meydana gelmektedir. Uçağın kuş çarpmasına en çok maruz kaldığı bölgeleri ise burun, motor ve kanat kısımlarıdır [9]. Seyir esnasında kanatlar sayesinde bir kaldırma kuvveti oluşmakta ve bu kuvvet uçağın ağırlığını dengelemektedir. Ancak seyir irtifasında hava değişkenlik gösterebilmekte hatta uçak hava boşluklarına düşebilmektedir. Bu esnada kanatlara ve gövdeye değişken yükler gelebilmektedir. İniş esnasında iniş takımlarına darbeleri yükler etki etmektedir. Bu yük iniş takımlarından gövdeye, gövdeden kanatlara kadar aktarılmaktadır. Uçak gövdesinin gelebilecek bütün bu dinamik yüklere dayanabilecek mekanik özelliklere sahip olması gerekmektedir. Ayrıca uçak yükselirken ve alçalırken dış hava sıcaklıkları da oldukça değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle uçak gövdesinde sıcaklık değişimlerine de dayanıklı malzemeler kullanılması gerekmektedir. Bununla birlikte kullanılan malzemenin maliyeti de her zaman önemli bir kriter olmuştur. Bu noktada, Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yaklaşımları, çoklu ve çeşitli ölçüm birimlerini içeren karşılaştırma problemleri için sağlamlık ve esneklik sağladığından, beklenen performansı gösterebilecek aday malzemeler arasından en uygun alternatifin seçimi amacıyla kullanılabilir [10, 11]. ÇKKV yöntemleri ile istenen fiziksel ve mekanik özellikleri optimum oranda karşılayan malzemelerin belirlenmesi mümkündür. Böylece, mühendislerin prototipleme ve çeşitli mekanik testler gibi zaman alıcı ve pahalı yöntemlerden önce en uygun malzemeyi seçebilmeleri sağlanabilir. ÇKKV yöntemleri yardımıyla, sayısal analizden önce malzemeler uygunluklarına göre sıralanabilir ve böylece analiz süresi kısaltılabilir. Bu sayede hem zamandan hem de maliyetten tasarruf sağlanabilir.

Bu çalışmada, ÇKKV yöntemlerinden SWARA (Step-Wise Weight Assessment Ratio Analysis) ve MULTIMOORA (MOORA plus Full Multiplicative Form) ile yolcu uçağı gövdesi için malzeme seçimi amaçlanmıştır. Yoğunluk, çekme dayanımı, kayma dayanımı, maliyet gibi kriterlerin dikkate alındığı çalışmada, kriter ağırlıkları uzman görüşleri doğrultusunda SWARA yöntemi ile belirlenmiş; yine uzmanlar tarafından belirlenen alternatif malzemeler de SWARA ile belirlenen kriter ağırlıkları doğrultusunda MULTIMOORA yöntemi ile değerlendirilmiştir.

Literatürde, mühendislik uygulamalarında malzeme seçimi üzerine gerçekleştirilmiş birçok çalışma mevcut olup bu çalışmaların çoğu otomobil parçaları seçimi üzerinedir [12-16]. Buna rağmen literatürde uçak malzemesi seçimi ile ilgili sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Dozic ve Kalic, uçak türü seçimi üzerine gerçekleştirdikleri çalışmada, AHP ve Even Swaps Metodu (ESM)'nu kullanmışlardır [17]. Bir diğer çalışmada ise Dozic vd. yolcu uçağı türünü seçmek için bulanık AHP yöntemini kullanmışlardır. Yöntemin uygulanabilirliğini göstermek için bir örnek olay incelemesine yer vermişlerdir [18].

SWARA yöntemi literatürde, alışveriş merkezi yer seçimi [19], ambalaj tasarımı seçimi [20], personel seçimi [21], bulut depolama hizmet sağlayıcılarının değerlendirilmesi [22], sunucu seçimi [23], fitness

merkezlerinin değerlendirilmesi [24], memnuniyet düzeyi analizi [25], tedarikçi seçimi [26], eğitim göstergeleri açısından Düzey-1 bölgelerinin değerlendirilmesi [27], akrobasi uçağı seçimi [28], yenilenebilir enerji için sürdürülebilirlik göstergelerinin değerlendirilmesi [29] gibi farklı alanlardaki birçok problemin çözümünde kullanılmıştır.

Literatürde MULTIMOORA yöntemi ile gerçekleştirilmiş birçok çalışma mevcuttur. Bunlardan bazıları, proje yönetimi [30], personel seçimi [31, 32], özel eğitim ve rehabilitasyon merkezi seçimi [33], endüstriyel robot seçimi [34], ekskavatör alternatiflerinin değerlendirilmesi [35], malzeme seçimi [36], ülke riski değerlendirmesi [37], imalat sanayi sektörlerinin sıralanması [38], bisiklet paylaşım istasyonlarının değerlendirilmesi [39], akıllı bisiklet paylaşım programlarının değerlendirilmesi [40], teknolojik tahmin yöntemi seçimi [41], depolama sahası seçimi [42] üzerinedir.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, SWARA ve MULTIMOORA yöntemleri kullanılarak uçak malzemesi seçimi üzerine gerçekleştirilmiş bir çalışmanın mevcut olmadığı görülmüştür. Bu doğrultuda çalışmanın, literatürdeki bu boşluğu doldurması beklenmektedir.

## 2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

### 2.1. SWARA Yöntemi (SWARA Method)

SWARA yöntemi, Keršulienė vd. tarafından 2010 yılında önerilmiştir [43]. SWARA karmaşık bir yöntem olmayıp, uzmanların aynı amaç uğruna birlikte çalışabilmesini kolaylaştırmaktadır. Dahası, AHP gibi kriter ağırlıklarının belirlenmesinde kullanılan diğer ÇKKV yöntemlerine kıyasla kriterler arasında daha az sayıda karşılaştırma içerdiğinden zamandan tasarruf sağlamaktadır [19, 20]. SWARA yönteminin adımlarını aşağıdaki gibi özetlemek mümkündür [20, 43]:

Adım 1: Karar vericiler tarafından en önemli kriter ilk sırada olacak şekilde kriterler sıralanır.

Adım 2: İkinci kriterden başlanarak, her bir kriter için  $j$  kriterinin bir önceki kriter olan  $(j-1)$ 'e göre göreceli önemi belirlenir. Bu oran ortalama değer karşılaştırmalı önemi ( $s_j$ ) olarak ifade edilir.

Adım 3: Denklem 1 kullanılarak katsayı ( $c_j$ ) belirlenir.

$$c_j = \begin{cases} 1 & j = 1 \\ s_j + 1 & j > 1 \end{cases} \quad 1$$

Adım 4: Her bir kriter için düzeltilmiş ağırlık değeri ( $q_j$ ) Denklem 2 yardımıyla hesaplanır.

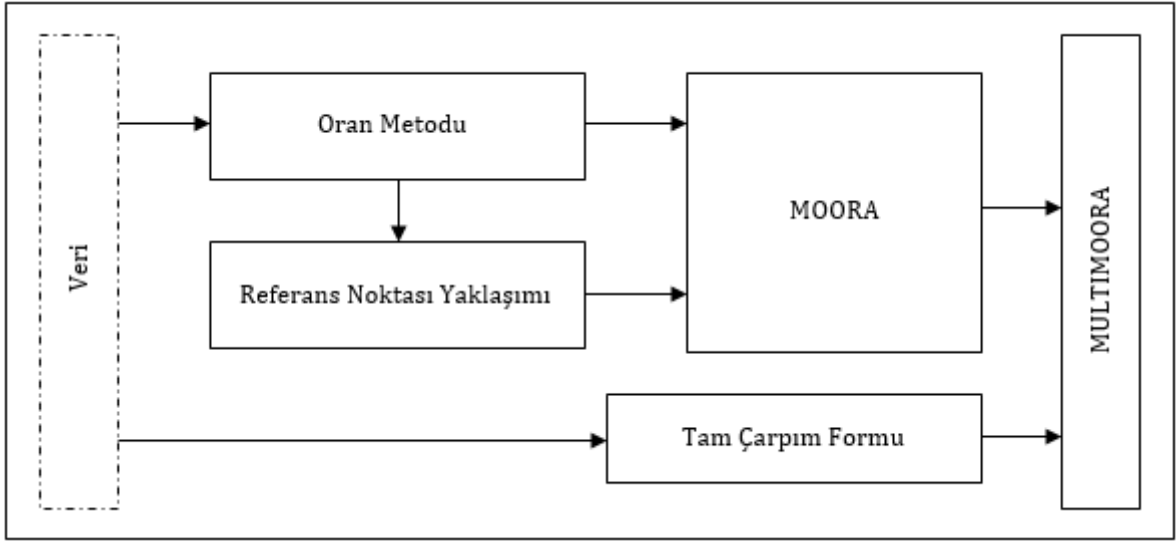
$$q_j = \begin{cases} 1 & j = 1 \\ \frac{q_{j-1}}{c_j} & j > 1 \end{cases} \quad 2$$

Adım 5: Kriter ağırlıkları ( $w_j$ ) Denklem 3 yardımıyla hesaplanır.

$$w_j = \frac{q_j}{\sum_{k=1}^n q_k} \quad 3$$

### 2.2. MULTIMOORA Yöntemi (MULTIMOORA Method)

MOORA (Multi-Objective Optimization on the basis of Ratio Analysis) yöntemi, ilk olarak Brauers ve Zavadskas tarafından 2006 yılında önerilmiştir [44]. Brauers ve Zavadskas, Oran Metodu ve Referans Noktası Yaklaşımı'ndan oluşan MOORA yöntemine, 2010 yılında Tam Çarpım Formu'nu da ekleyerek yöntemi MULTIMOORA olarak genişletmiş ve daha sağlam bir hale getirmişlerdir [30]. MULTIMOORA yöntemi aşağıdaki aşamalardan oluşmaktadır (Şekil 1):



Şekil 1. MULTIMOORA yönteminin aşamaları [45]

**MOORA-Oran Metodu:** Oran Metodu için öncelikle farklı amaç veya kriterlere göre farklı alternatiflerin değerlerini gösteren karar matrisi oluşturulmaktadır. Karar matrisinde  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $n$  kriter sayısı,  $j = 1, 2, \dots, m$ ;  $m$  ise alternatif sayısı olmak üzere  $x_{ij}$ ,  $j$  alternatifinin  $i$  kriterine göre değerini göstermektedir.  $x_{ij}^*$  ise  $j$  alternatifinin  $i$  kriterine göre normalleştirilmiş değerini gösteren boyutsuz bir sayı olup genellikle  $[0;1]$  aralığındadır. Karar matrisi Denklem 4 kullanılarak normalize edilmektedir.

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m x_{ij}^2}} \quad 4$$

$i = 1, 2, \dots, g$  fayda yönlü kriterleri,  $i = g + 1, g + 2, \dots, n$  ise maliyet yönlü kriterleri ifade etmek üzere,  $j$  alternatifinin tüm kriterlere göre normalleştirilmiş performans değeri ( $y_j^*$ ) Denklem 5 ile elde edilir.

$$y_j^* = \sum_{i=1}^g x_{ij}^* - \sum_{i=g+1}^n x_{ij}^* \quad 5$$

Karar vericilerin bazı kriterlere daha fazla önem vermek istemeleri durumunda kriter ağırlıkları ( $s_i$ ) hesaba katılarak  $j$  alternatifinin tüm kriterlere göre normalleştirilmiş performans değeri Denklem 6 ile elde edilmektedir.

$$y_j^* = \sum_{i=1}^g s_i x_{ij}^* - \sum_{i=g+1}^n s_i x_{ij}^* \quad 6$$

$y_j^*$  değerlerinin büyükten küçüğe doğru sıralanması ile en uygun alternatif belirlenir [46].

**MOORA-Referans Noktası Yaklaşımı:** Referans Noktası Yaklaşımı'nda, Oran Metodu'na ek olarak, her bir kriter için referans noktaları ( $r_i$ ), belirlenir. Fayda yönlü kriterler için en yüksek, maliyet yönlü kriterler için ise en düşük  $r_i$  değerleri referans noktaları olarak belirlenir.  $x_{ij}^*$  değerlerinin, belirlenen bu noktaların her biri ile olan mesafesi Denklem 7 kullanılarak hesaplanır.

$$r_i - x_{ij}^* \quad 7$$

Alternatifler ve referans noktası arasındaki mesafeyi ölçmek için Tchebycheff Min-Max Metrik kullanılır (Denklem 8) [44]. Kriterlerin farklı ağırlıklara sahip olması durumunda, Tchebycheff Min-Max Metrik ile hesaplama yapılmadan önce Denklem 9 kullanılır. Alternatiflerin sıralaması, Denklem 8 ile elde edilen değerlerin artan düzende sıralanması ile sağlanır.

$$\min_{(j)} \left\{ \max_{(i)} |r_i - x_{ij}^*| \right\} \quad 8$$

$$|s_i r_i - s_i x_{ij}^*| \quad 9$$

**Tam Çarpım Formu ve MULTIMOORA:** Tam Çarpım Formu'na göre  $j$ . alternatifin toplam faydası  $U'_j$ ,  $A_j$  (Denklem 11) ve  $B_j$  (Denklem 12) değerleri elde edildikten sonra Denklem 10 kullanılarak hesaplanır [30].

$$U'_j = \frac{A_j}{B_j} \quad 10$$

$$A_j = \prod_{i=1}^g x_{ij} \quad 11$$

$$B_j = \prod_{i=g+1}^n x_{ij} \quad 12$$

Burada,  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $n$  kriterlerin sayısını,  $j = 1, 2, \dots, m$ ;  $m$  alternatiflerin sayısını,  $g$  fayda yönlü kriterlerin sayısını,  $(n - g)$  maliyet yönlü kriterlerin sayısını göstermektedir. En uygun alternatifin belirlenmesi ise,  $U'_j$  değerlerinin büyükten küçüğe doğru sıralanması ile gerçekleşmektedir.

MULTIMOORA yöntemine göre alternatiflerin değerlendirilmesi, MOORA-Oran Metodu ve MOORA-Referans Noktası Yaklaşımı'ndan elde edilen sonuçlar ile Tam Çarpım Formu'ndan elde edilen sonuçların baskınlık teorisi dikkate alınarak birleştirilmesiyle sağlanmaktadır. Baskınlık teorisinde aşağıdaki unsurlara dikkat edilir [47]:

### Baskınlık

- **Mutlak Baskınlık;** bir alternatifin diğer tüm alternatiflere göre baskın olması durumu olup MULTIMOORA sıralamasında (1-1-1) şeklinde gösterilir.
- **Genel Baskınlık** ise üç yöntemden ikisinde baskınlık sağlanması durumu olup  $a < b < c < d$  için aşağıdaki şekilde ifade edilir:
  - (d-a-a) genellikle baskındır (c-b-b)'ye;
  - (a-d-a) genellikle baskındır (b-c-b)'ye;
  - (a-a-d) genellikle baskındır (b-b-c)'ye.

### Geçişlilik

Eğer a, b'ye baskın ve b, c'ye baskın ise a, c'ye de baskındır.

### Tam Baskınlık

Bir alternatifin diğer bir alternatif üzerindeki tam baskınlığıdır. Örneğin, (a-a-a) tam baskındır (b-b-b)'ye.

### Dengelilik

- **Mutlak Dengelilik;** iki alternatifin de (e-e-e) gibi aynı sonuca sahip olması durumudur.
- **Kısmi Dengelilik;** üç sıralamadan ikisinin dengeli olması durumudur. Örneğin, (5-e-7) ve (6-e-3).

### **Döngüsel Akıl Yürütme**

(11-20-14) genellikle baskındır (14-16-15)'e;

(14-16-15) genellikle baskındır (15-19-12)'ye;

Fakat (15-19-12) genellikle baskındır (11-20-14)'e.

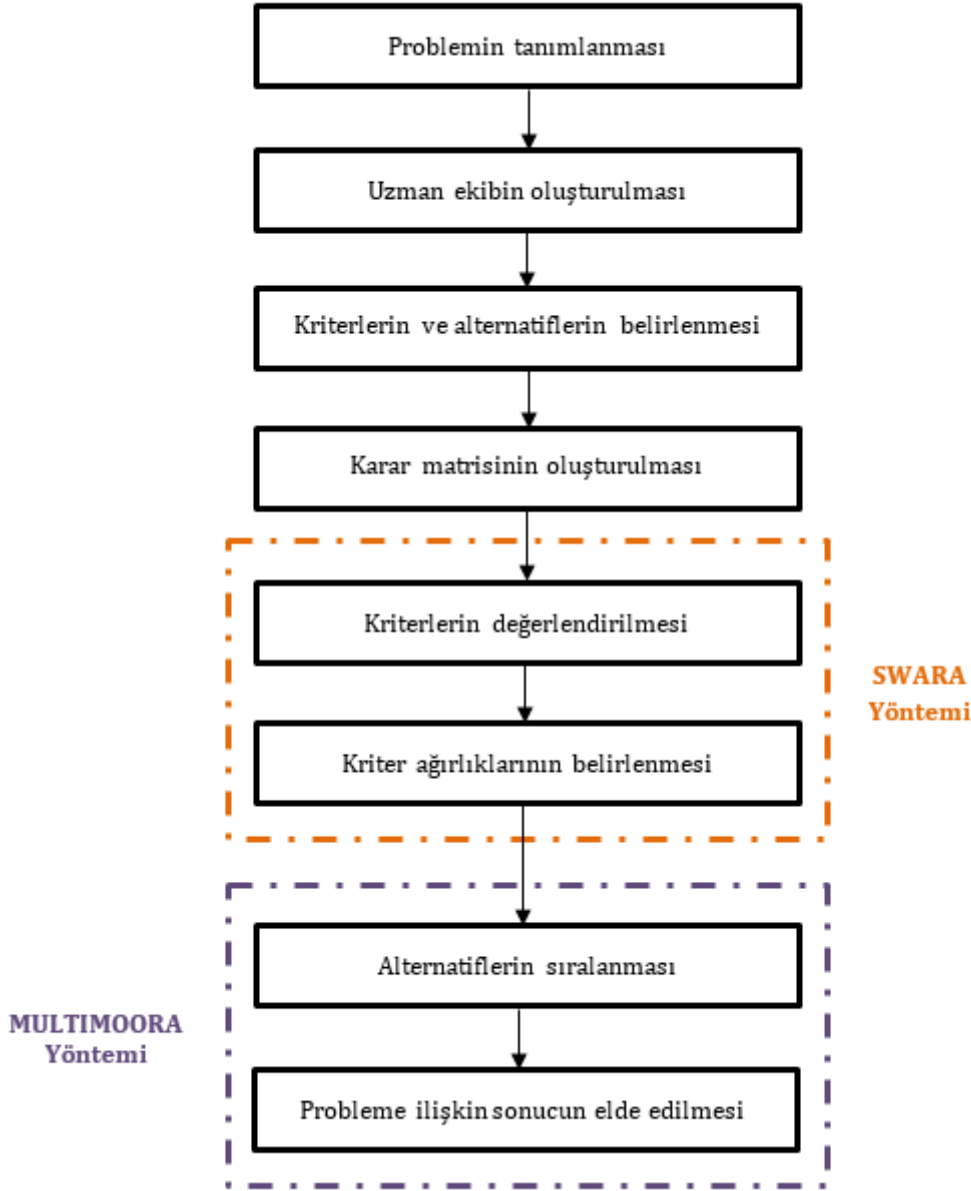
Böyle bir durumda üç alternatif de aynı sıraya atanır [47].

### **3. UYGULAMA (APPLICATION)**

Bütünleşik SWARA-MULTIMOORA yöntemi ile yolcu uçağı gövdesi için malzeme seçiminin gerçekleştirildiğı bu çalışmaya ait akış diyagramı Şekil 2'de verilmektedir.

#### **3.1. Problemin Tanımı (Definition of the Problem)**

Mühendislik malzemeleri gerek alaşımlama gerek ısıl işlem gibi son işlemler gerekse kompozit malzeme yapımı ve nanopartikül eklentisi ile sürekli çeşitlendirilmeye devam etmektedir. Mühendisler uygulama alanına göre on binlerce malzeme arasından uygun olanını seçmek durumundadır. Havacılık alanında istenen özellikleri ise bu malzemelerin yalnızca %0,05'i karşılayabilmektedir [48]. Alüminyum (Al) alaşımı uzun yıllardır uçak yapımında en çok kullanılan malzemelerdendir. Kullanım oranı düşmekle birlikte hala sıklıkla kullanılmaktadır [9, 49]. Saf Al'un mekanik özellikleri istenilen seviyede olmadığı için, çeşitli alaşım elementleri ve ısıl işlemler ile yüksek mukavemetli Al alaşımları elde edilmekte ve havacılık sektöründe kullanılmaktadır. Al, çelik ve titanyuma (Ti) göre daha hafiftir. Ti özellikle değişken sıcaklıklar gibi zorlu servis koşulları düşünüldüğünde benzersiz özellikler sunabilmektedir [8, 50]. Magnezyum (Mg) da Ti ve Al gibi alaşım olarak kullanılmaktadır. Mg alaşımlarının sertlik ve şok emici özellikleri malzeme seçiminde belirgin bir rol oynamaktadır [49]. Üstelik yoğunluğu çok düşük olduğundan hafiflik de sağlamaktadır. Son yıllarda ise uçak yapımında kompozit malzeme kullanımı gitgide artmaktadır. Bunun en önemli nedenleri yüksek mukavemet, yüksek elastisite modülü ve hafifliğe sahip olmalarıdır [51, 52].



Şekil 2. Uygulamaya ait akış diyagramı

Yukarıda bahsi geçen malzeme özellikleri ve daha önce değinilen uçakların maruz kaldığı yükler, servis koşulları ve beklenen özellikler dikkate alınarak uçak gövdesi seçimi için alternatif malzemeler ve kriterler üç kişilik uzman ekip tarafından belirlenmiştir. Buna göre alternatifler; karbon fiber takviyeli polimer kompozit (CFRP), cam fiber takviyeli polimer kompozit (GFRP), çelik alaşımı (AISI 4130), Al alaşımları (Al 2024-T3, Al 5052-H32, Al 6061-T6 ve Al 7075-T6), Mg alaşımı (AZ31B) ve Ti alaşımıdır (Ti-6Al-4V). Kriterler ise çekme dayanımı, kayma dayanımı, elastisite modülü, yüzde uzama, yorulma, termal genişleme, maliyet ve yoğunluktur. Maliyet ve yoğunluk kriterleri maliyet yönlü iken diğer kriterler fayda yönlüdür. Çalışmanın geri kalanında sekiz kriter ve dokuz alternatif aşağıdaki sembollerle ifade edilecektir:

**Kriter 1 (K1):** Çekme dayanımı [MPa]

**Kriter 2 (K2):** Kayma dayanımı [MPa]

**Kriter 3 (K3):** Elastisite modülü [GPa]

**Kriter 4 (K4):** Yüzde uzama (%)

**Kriter 5 (K5):** Yorulma [MPa]



**Kriter 6 (K6):** Termal genişleme [ $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ]

**Kriter 7 (K7):** Maliyet [\$/kg]

**Kriter 8 (K8):** Yoğunluk [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]

**Alternatif 1 (A1):** CFRP

**Alternatif 2 (A2):** GFRP

**Alternatif 3 (A3):** AISI 4130

**Alternatif 4 (A4):** Al 2024-T3

**Alternatif 5 (A5):** Al 5052-H32

**Alternatif 6 (A6):** Al 6061-T6

**Alternatif 7 (A7):** Al 7075-T6

**Alternatif 8 (A8):** AZ31B

**Alternatif 9 (A9):** Ti-6Al-4V

Alternatiflerin kriterler bazındaki değerleri ile oluşturulan başlangıç karar matrisi Tablo 1’de sunulmaktadır [53, 54].

**Tablo 1.** Başlangıç karar matrisi

	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$	$K_7$	$K_8$
	<i>maks</i>	<i>maks</i>	<i>maks</i>	<i>maks</i>	<i>maks</i>	<i>maks</i>	<i>min</i>	<i>min</i>
$A_1$	1240	740	145	0,3	1185	0,16	238	1,6
$A_2$	1020	440	45	0,4	440	6,6	24	2,1
$A_3$	560	420	209	28	285	12,3	1,95	7,85
$A_4$	485	283	72,4	18	143	23,6	16	2,77
$A_5$	228	138	70,3	18	117	23,7	4,98	2,68
$A_6$	310	207	69	17	95	23,6	7,55	2,7
$A_7$	572	331	71	11	160	23,4	13	2,8
$A_8$	290	130	45	15	110	26	36,8	1,77
$A_9$	900	550	114	14	548	8,6	105	4,43

### 3.2. SWARA Yöntemi ile Kriter Ağırlıklarının Belirlenmesi (Determination of the Weights of the Criteria Using SWARA Method)

Bu alt bölümde kriter ağırlıkları karar vericiler (KV) tarafından belirlenmiştir. Bu aşamada öncelikle, KV’ler tarafından en önemli kriter ilk sırada olacak şekilde kriterler sıralanmış, ardından  $s_j$  değerleri Tablo 2’deki gibi elde edilmiştir.

**Tablo 2.** Kriterlere ilişkin sıralamalar ve  $s_j$  değerleri

Sıra	KV <sub>1</sub>		KV <sub>2</sub>		KV <sub>3</sub>	
	$K_j$	$s_j$	$K_j$	$s_j$	$K_j$	$s_j$
1	$K_1$	-	$K_1$	-	$K_1$	-
2	$K_8$	0,90	$K_5$	0,80	$K_5$	0,85
3	$K_3$	0,85	$K_8$	0,80	$K_6$	0,75
4	$K_5$	0,80	$K_3$	0,90	$K_8$	0,90
5	$K_7$	0,90	$K_6$	0,80	$K_7$	0,80
6	$K_2$	0,80	$K_4$	0,70	$K_2$	0,60
7	$K_4$	0,85	$K_2$	0,90	$K_3$	0,65
8	$K_6$	0,75	$K_7$	0,90	$K_4$	0,40

**Tablo 3.** Kriter ağırlıkları ( $w_j$ )

	KV <sub>1</sub>	KV <sub>2</sub>	KV <sub>3</sub>	<b>Final</b>
	$w_j$	$w_j$	$w_j$	$w_j$
$K_1$	0,468	0,452	0,451	<b>0,457</b>
$K_2$	0,022	0,013	0,025	<b>0,020</b>
$K_3$	0,133	0,073	0,015	<b>0,074</b>
$K_4$	0,012	0,024	0,011	<b>0,016</b>
$K_5$	0,074	0,251	0,244	<b>0,189</b>
$K_6$	0,007	0,041	0,139	<b>0,062</b>
$K_7$	0,039	0,007	0,041	<b>0,029</b>
$K_8$	0,246	0,139	0,073	<b>0,153</b>

Son olarak, kriter ağırlıkları ( $w_j$ ) Tablo 3'teki gibi elde edilmiştir. Tablo 3 incelendiğinde, uçak gövdesi için malzeme seçiminde en yüksek öneme sahip olan kriterin 0,457'lik değeri ile  $K_1$  yani 'çekme dayanımı' olduğu; en düşük öneme sahip olan kriterin ise 0,016'lık değeri ile  $K_4$  yani 'yüzde uzama' olduğu görülmektedir.

### 3.2. MULTIMOORA Yöntemi ile Alternatiflerin Sıralanması (Ranking the Alternatives Using MULTIMOORA Method)

Oran Metodu, Referans Noktası Yaklaşımı ve Tam Çarpım Formu ile elde edilen sonuçlar ile baskınlık teorisine dikkate alınarak MULTIMOORA yöntemi ile elde edilen genel sıralama Tablo 4'te sunulmaktadır.

Tablo 4 incelendiğinde, Bütünleşik SWARA-MULTIMOORA yöntemine göre yolcu uçağı gövdesi için en uygun malzemenin  $A_1$ , yani CFRP olduğu;  $A_9$  (Ti-6Al-4V) ve  $A_2$  (GFRP)'nin de sırasıyla  $A_1$ 'i takip eden alternatifler olduğu görülmektedir. Tercih sıralamasında son sırada yer alan alternatif ise  $A_5$ , yani Al 5052-H32 olmuştur. Alternatiflerin genel sıralaması,  $A_1 > A_9 > A_2 > A_7 > A_3 > A_4 > A_6 > A_8 > A_5$  şeklinde gerçekleşmiştir.

**Tablo 4.** MULTIMOORA yöntemi ile alternatiflere ilişkin sıralama

	<i>Oran Metodu</i>	<i>Referans Noktası Yaklaşımı</i>	<i>Tam Çarpım Formu</i>	<b>MULTIMOORA</b>
<i>A<sub>1</sub></i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>9</i>	<b>1</b>
<i>A<sub>2</sub></i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>8</i>	<b>3</b>
<i>A<sub>3</sub></i>	<i>6</i>	<i>5</i>	<i>1</i>	<b>5</b>
<i>A<sub>4</sub></i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>3</i>	<b>6</b>
<i>A<sub>5</sub></i>	<i>9</i>	<i>9</i>	<i>5</i>	<b>9</b>
<i>A<sub>6</sub></i>	<i>8</i>	<i>7</i>	<i>4</i>	<b>7</b>
<i>A<sub>7</sub></i>	<i>4</i>	<i>4</i>	<i>2</i>	<b>4</b>
<i>A<sub>8</sub></i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>7</i>	<b>8</b>
<i>A<sub>9</sub></i>	<i>3</i>	<i>2</i>	<i>6</i>	<b>2</b>

#### 4. TARTIŞMA VE SONUÇ (DISCUSSION AND CONCLUSION)

Bu çalışmada, bütünleşik SWARA-MULTIMOORA yöntemi ile yolcu uçağı gövdesi için alternatif malzemeler sıralanmıştır. Bu doğrultuda öncelikle makine mühendislerinden oluşan üç kişilik uzman ekibin ortak görüşü doğrultusunda uçak gövdesinde kullanılacak malzeme alternatifleri ve bu malzemelerin sağlaması gereken özellikleri temsil eden kriterler belirlenmiştir. Ardından uzmanların ayrı ayrı görüşleri alınarak SWARA yöntemi ile kriterler ağırlıklandırılmıştır. Buna göre uçak gövdesi için malzeme seçiminde en yüksek öneme sahip olan kriterin K<sub>1</sub> yani ‘çekme dayanımı’, en düşük öneme sahip olan kriterin ise K<sub>4</sub> yani ‘yüzde uzama’ olduğu görülmüştür. Son aşamada ise kriter ağırlıkları doğrultusunda MULTIMOORA yöntemi ile alternatifler sıralanmıştır. Alternatifler arasından uçak gövdesi için en uygun ilk üç malzeme sırasıyla CFRP, Ti-6Al-4V ve GFRP olarak belirlenmiştir. Al 5052-H32, AZ31B ve Al 6061-T6 alaşımları ise son üç sırada yer almıştır.

Yolcu uçağı üretiminde gövde malzemesi olarak daha önceleri çoğunlukla Al kullanılırken, günümüzde giderek artan oranlarda kompozit malzemelerin kullanıldığı görülmektedir. Çalışmada elde edilen sonuçlar gerçek hayattaki uygulamalar ile kıyaslandığında birinci ve üçüncü sıradaki kompozit malzemelerin paralellik gösterdiği görülmektedir. İkinci sıradaki Ti ise mekanik özellikleri açısından oldukça iyi bir malzeme olmasına rağmen kompozit malzemelere göre ağır ve GFRP’ye göre ise oldukça pahalı olduğundan gövdenin genelinden ziyade daha küçük parçalarında kullanımının üreticiler tarafından uygun bulunduğu söylenebilir. Bütünleşik SWARA-MULTIMOORA yöntemi ile elde edilen sıralama ile gerçek hayattaki uygulamalar arasındaki bu farklar aslında uzman ekip ile ticari kuruluşların görüş farklılıklarını da ortaya koymaktadır. Bu fark ticari kuruluşların, fayda yönlü kriterler açısından asgari dayanım şartlarını sağladıktan sonra kendileri için en önemli faktörlerden olan maliyet kriterine göre ekonomik açıdan rekabet edebilir bir ürün ortaya koyma düşüncesinden doğmaktadır. Ekonomik açıdan rekabet müşteri için hem satın alma maliyetini hem de yakıt tüketimi ve yedek parça maliyeti gibi işletim maliyetlerini kapsamaktadır. Dolayısıyla, üreticilerin asgari mekanik ve termal şartları sağladıktan sonra hafif ve uygun maliyetli malzemeleri daha çok tercih ettiği söylenebilir. Bu doğrultuda GFRP’nin, CFRP ve Ti-6Al-4V alaşımına göre uçak gövdesi seçiminde daha fazla tercih edildiği görülmektedir. Son sıralarda yer alan AZ31B, Al 5052-H32 ve Al 6061-T6 alaşımlarının mekanik özellikleri incelendiğinde uzmanlar tarafından en önemli kriter olarak belirlenen çekme dayanımlarının diğer malzemeler göre oldukça düşük olduğu görülmektedir.

İleriki çalışmalar için farklı ÇKKV yöntemleri kullanılarak sonuçlar karşılaştırılabilir. Ayrıca kriter sayısı artırılarak uçağın farklı parçaları için karşılaştırmalı analizler yapılabilir.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] Tabuchi, H. 'Worse than anyone expected': air travel emissions vastly outpace predictions. (2019). [www.nytimes.com/2019/09/19/climate/air-travel-emissions.html](http://www.nytimes.com/2019/09/19/climate/air-travel-emissions.html). (Erişim Tarihi:18.07.2020).
- [2] New global agreement will help curb pollution from aviation. (2016). [www.worldwildlife.org/stories/new-global-agreement-will-help-curb-pollution-from-aviation](http://www.worldwildlife.org/stories/new-global-agreement-will-help-curb-pollution-from-aviation). (Erişim Tarihi:18.07.2020).
- [3] Reducing emissions from aviation. (2017). [https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/aviation\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/aviation_en). (Erişim Tarihi:18.07.2020).
- [4] Steinegger, R. Fuel economy as function of weight and distance. Zürcher Fachhochschule, (1-11), (2017).
- [5] Kryemadhi, W. How many miles do airplanes fly in the world each year? (2017). <https://www.quora.com/How-many-miles-do-airplanes-fly-in-the-world-each-year> (Erişim Tarihi:18.07.2020).
- [6] Flight length. (2020). [https://en.wikipedia.org/wiki/Flight\\_length](https://en.wikipedia.org/wiki/Flight_length) (Erişim Tarihi:18.07.2020).
- [7] Farokhi, S. (2020). Future propulsion systems and energy sources in sustainable aviation. John Wiley & Sons, 228-229.
- [8] Singh, P., Pungotra, H., Kalsi, N. S. On the characteristics of titanium alloys for the aircraft applications. *Materials Today: Proceedings*, 4(8)(8971-8982), (2017).
- [9] Jun, L. I. U., Yulong, L. I., Xiancheng, Y. U., Xiaosheng, G. A. O., Zongxing, L. I. U. Design of aircraft structures against threat of bird strikes. *Chinese Journal of Aeronautics*, 31(7)(1535-1558), (2018).
- [10] Mousavi-Nasab, S. H., Sotoudeh-Anvari, A. A comprehensive MCDM-based approach using TOPSIS, COPRAS and DEA as an auxiliary tool for material selection problems. *Materials & Design*, 121(237-253), (2017).
- [11] Çalış Boyacı, A. selection of eco-friendly cities in Turkey via a hybrid hesitant fuzzy decision making approach. *Applied Soft Computing*, 89(106090), (2020).
- [12] Shaikh, A., Singh, A., Ghose, D., Shabbiruddin. analysis and selection of optimum material to improvise braking system in automobiles using integrated fuzzy-COPRAS methodology. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, (1-9), (2020).
- [13] Pu, Y., Ma, F., Han, L., Wang, G. Material selection of green design processes for car body via considering environment property. *Mathematical Problems in Engineering*, (1-8), (2020).
- [14] Catibog, J. M. R., Lazarte, A. M. B., Magdaluyo Jr, E. R. Materials selection methods in the design of monocoque for a fuel efficient concept vehicle. *Procedia CIRP*, 84(998-1002), (2019).
- [15] Ghose, D., Pradhan, S., Tamuli, P., Shabbiruddin. Optimal material for solar electric vehicle application using an integrated fuzzy-COPRAS model. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, (1-20), (2019).
- [16] Pu, Y., Ma, F., Zhang, J., Yang, M. Optimal lightweight material selection for automobile applications considering multi-perspective indices. *Ieee Access*, 6(8591-8598), (2018).
- [17] Dozic, S. Kalic, M.. Comparison of two MCDM methodologies in aircraft type selection problem. *Transportation Research Procedia*, 10(910-919), (2015).

- [18] Dozic, S., Lutovac, T., Kalic, M. Fuzzy AHP approach to passenger aircraft type selection. *Journal of Air Transport Management*, 68(165-175), (2018).
- [19] Zolfani, S. H., Aghdaie, M. H., Derakhti, A., Zavadskas, E. K., Varzandeh, M. H. M. Decision making on business issues with foresight perspective; An application of new hybrid MCDM model in shopping mall locating. *Expert Systems with Applications*, 40(17)(7111-7121), (2013).
- [20] Stanujkic, D., Karabasevic, D., Zavadskas, E. K. A framework for the selection of a packaging design based on the SWARA method. *Inzinerine Ekonomika-Engineering Economics*, 26(2)(181-187), (2015).
- [21] Karabašević, D., Stanujkić, D., Urošević, S. The MCDM model for personnel selection based on SWARA and ARAS methods. *Management: Journal of Sustainable Business and Management Solutions in Emerging Economies*, 20(77)(43-52), (2015).
- [22] Çakır, E., Kutlu Karabıyık, B. Bütünleşik SWARA-COPRAS yöntemi kullanarak bulut depolama hizmet sağlayıcılarının değerlendirilmesi. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 10(4)(417-434), (2017).
- [23] Yurdoğlu, H., Kundakcı, N. SWARA ve WASPAS yöntemleri ile sunucu seçimi. *Balıkesir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 20(38)(253-269), (2017).
- [24] Çakır, E. Bütünleşik SWARA ve EDAS yöntemi kullanarak fitness merkezlerinin değerlendirilmesi: Örnek bir uygulama. *Hitit Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 11(3)(1907-1923), (2018).
- [25] Bakır, M. 2019. SWARA ve MABAC yöntemleri ile havayolu işletmelerinde ewom' a dayalı memnuniyet düzeyinin analizi. *İzmir İktisat Dergisi*, 34(1)(51-66), (2019).
- [26] Durmaz, K. İ., Gencer, C. Tedarikçi seçiminde entegre lojistik destek yaklaşımı ve işletme uygulaması: SWARA-SMAA-2. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(2)(828-841), (2019).
- [27] Durmaz, K. İ., Çalış Boyacı, A., Gencer, C. Türkiye'deki düzey-1 bölgelerinin eğitim göstergeleri açısından çok kriterli karar verme yöntemleri ile değerlendirilmesi. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 13(1)(13-25), (2020).
- [28] Durmaz, K. İ., Gencer, C. A New plugin based on JSMAA: SWARA-JSMAA and aerobatic aircraft selection. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35(3)(1487-1498), (2020).
- [29] Ghenai, C., Albawab, M., Bettayeb, M. Sustainability indicators for renewable energy systems using multi-criteria decision-making model and extended SWARA/ARAS hybrid method. *Renewable Energy*, 146(580-597), (2020).
- [30] Brauers, W. K. M., Zavadskas, E.K. Project management by MULTIMOORA as an Instrument for transition economies. *Technological and Economic Development of Economy*, 16(1)(5-24), (2010).
- [31] Baležentis, A., Baležentis, T., Brauers, W. K. M. Personnel selection based on computing with words and fuzzy MULTIMOORA. *Expert Systems with Applications*, 39(7961-7967), (2012).
- [32] Baležentis, T., Zeng, S. Group multi-criteria decision making based upon interval-valued fuzzy numbers: An extension of the MULTIMOORA method. *Expert Systems with Applications*, 40(543-550), (2013).
- [33] Özçelik, G., Aydoğan, E. K., Gencer, C. A hybrid moora-fuzzy algorithm for special education and rehabilitation center selection. *Journal of Military and Information Science*, 2(3)(53-62), (2014).
- [34] Datta, S., Sahu, N., Mahapatra, S. Robot selection based on grey-MULTIMOORA approach. *Grey Systems: Theory and Application*, 3(2)(201-232), (2013).

- [35] Altuntaş, S., Dereli, T., Yılmaz, M.K. Evaluation of excavator technologies: application of data fusion based MULTIMOORA methods. *Journal of Civil Engineering and Management*, 21(8)(977-997), (2015).
- [36] Hafezalkotob, A., Hafezalkotob, A. Comprehensive MULTIMOORA method with target-based attributes and integrated significant coefficients for materials selection in biomedical applications. *Materials and Design*, 87(949-959), (2015).
- [37] Türe, H., Koçak, D., Doğan, S. MULTIMOORA yöntemi ile ülke riski değerlendirmesi. *Gazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 18(3)(824-844), (2016).
- [38] Çalış, A., Özçelik, G., Gencer, C. Türkiye'deki imalat sanayi sektörlerinin PROMETHEE MULTIMOORA ve SMAA-2 yöntemleriyle sıralanması. *Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 27(2)(28-44), (2016).
- [39] Kabak, M., Erbaş, M., Çetinkaya, C., Özceylan, E. A GIS-based MCDM approach for the evaluation of bike-share stations. *Journal of Cleaner Production*, 201(49-60), (2018).
- [40] Tian, Z.P., Wang, J.Q., Wang, J., Zhang, H.Y. A multi-phase QFD-based hybrid fuzzy MCDM approach for performance evaluation: a case of smart bike-sharing programs in Changsha. *Journal of Cleaner Production*, 171(1068-1083), (2018).
- [41] Dahooie, J.H., Zavadskas, E.K., Firoozfar, H.R., Vanaki, A.S., Mohammadi, N., Brauers, W.K.M. An improved fuzzy MULTIMOORA approach for multi-criteria decision making based on objective weighting method (CCSD) and its application to technological forecasting method selection. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 79(114-128), (2019).
- [42] Rahimi, S., Hafezalkotob, A., Monavari, S.M., Hafezalkotob, A., Rahimi, R. Sustainable landfill site selection for municipal solid waste based on a hybrid decision-making approach: Fuzzy group BWM-MULTIMOORA-GIS. *Journal of Cleaner Production*, 248(11986), (2020).
- [43] Keršulienė, V., Zavadskas, E.K., Turskis, Z. Selection of rational dispute resolution method by applying new step-wise weight assessment ratio analysis (SWARA), *Journal of Business Economics and Management*, 11(2)(243-258), (2010).
- [44] Brauers, W. K. M., Zavadskas, E. K. The MOORA method and its application to privatization in a transition economy. *Control Cybern.* 35(2)(445-469), (2006).
- [45] Baležentis, A., Baležentis, T., Valkauskas, R. Evaluating situation of lithuania in the european union: structural indicators and MULTIMOORA method. *Technological and Economic Development of Economy*, 16(4)(578-602), (2010).
- [46] Brauers, W. K. M., Zavadskas, E. K. Multi-objective decision making with a large number of objectives. An application for Europe 2020. *International Journal of Operations Research*, 10(2)(67-79), (2013).
- [47] Brauers, W. K. M., Zavadskas, E. K. 2011. MULTIMOORA optimization used to decide on a bank loan to buy property. *Technological and Economic Development of Economy*, 17(1)(174-188), (2011).
- [48] Mouritz, A. P. (2012). *Introduction to aerospace materials*. Elsevier, Woodhead, Cambridge, 5.
- [49] Zhang, X., Chen, Y., Hu, J. Recent advances in the development of aerospace materials. *Progress in Aerospace Sciences*, 97(22-34), (2018).
- [50] Khanna, N., Davim, J. P. Design-of-experiments application in machining titanium alloys for aerospace structural components. *Measurement*, 61(280-290), (2015).

- [51] Calado, E. A., Leite, M., Silva, A. Selecting composite materials considering cost and environmental impact in the early phases of aircraft structure design. *Journal of Cleaner Production*, 186(113-122), (2018).
- [52] Huda, Z., Edi, P. Materials selection in design of structures and engines of supersonic aircrafts: A review. *Materials & Design*, 46(552-560), (2013).
- [53] Callister, W. D., Rethwisch, D. G. (2018). *Materials science and engineering: an introduction* (Vol. 9). New York: Wiley.
- [54] Jones, D. R., Ashby, M. F. (2018). *Engineering materials 1: An introduction to properties, applications and design*. Butterworth-Heinemann.