





Metallic biomaterial assessment via a risk-based decision-making approach

Hilal Singer^{1,2*} , Tijen Över Özçelik¹ 

¹Department of Industrial Engineering, Sakarya University, Sakarya, 54050, Turkey

²Department of Industrial Engineering, Bolu Abant İzzet Baysal University, Bolu, 14030, Turkey

Highlights:

- A risk-based decision-making approach
- Prioritization of metallic biomaterials
- The best option was determined as titanium

Keywords:

- Biomaterial
- Fuzzy FMEA
- Fuzzy AHP
- Fuzzy EDAS
- Metal

Article Info:

Research Article
Received: 09.05.2021
Accepted: 30.07.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.935288

Correspondence:

Author: Hilal Singer
e-mail:
hilal.singer@hotmail.com
phone: +90 374 254 1000 /
4902

Graphical/Tabular Abstract

Metallic biomaterials have been widely used for medical applications owing to their excellent mechanical properties and good durability. Stainless steel, cobalt-chromium alloys, and titanium materials are some metallic biomaterials. Each material has its own advantages and disadvantages. Therefore, it is important to perform the decision-making analysis for metallic biomaterial assessment. In this paper, we proposed a risk-based decision-making approach to assess stainless steel, titanium, and cobalt-chromium alloys.

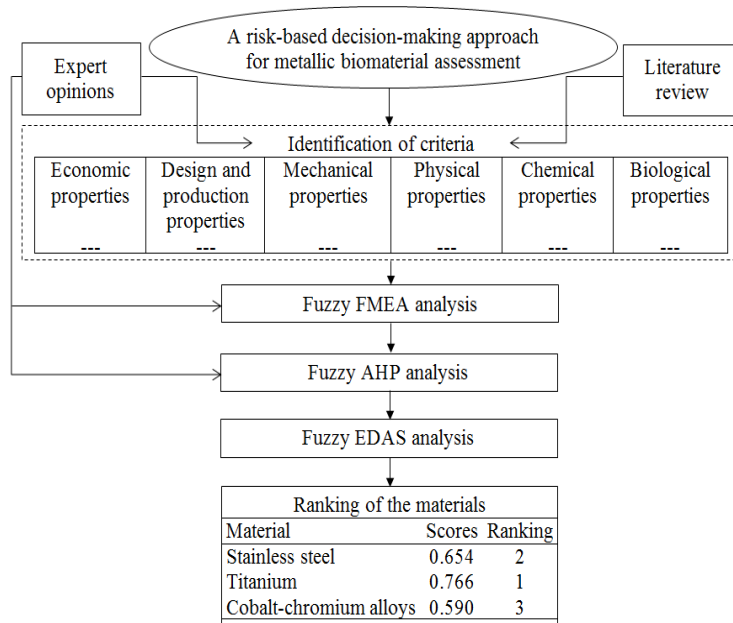


Figure A. Illustration of the study

Purpose: In this study, it was aimed to develop a decision-making approach using different fuzzy methods and assess stainless steel, titanium, and cobalt-chromium alloys with the help of the proposed model.

Theory and Methods:

The data used in this study were obtained from many experts. The fuzzy AHP method was utilized to prioritize the evaluation criteria and risk factors of the problem. The fuzzy FMEA method was employed to obtain the risk priority numbers of the materials. The fuzzy EDAS method was used to determine the ranking of the materials. Lastly, the findings of the study were discussed by performing a sensitivity analysis.

Results:



The ranking order of the risk factors was as follows: severity > detectability > occurrence. Infection, carcinogenicity, and tensile strength were the most important subcriteria. The best option was determined as titanium. The findings of the current study were found to be consistent.

Conclusion:

The proposed approach could be used as a good tool in the systematic assessment of risks. This study established a foundation for the unbiased assessment and prioritization of materials.



Bir risk temelli karar verme yaklaşımı ile metalik biyomalzeme değerlendirme

Hilal Singer^{1,2*} , Tijen Över Özçelik¹ 

¹Sakarya Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 54050 Serdivan, Sakarya, Türkiye

²Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 14030 Merkez, Bolu, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Bir risk temelli karar verme yaklaşımı
- Metalik biyomalzemelerin önceliklendirilmesi
- En iyi seçenek, titanyum olarak belirlenmiştir

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 09.05.2021

Kabul: 30.07.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.935288

Anahtar Kelimeler:

Biyomalzeme,
bulanık HTEA,
Bulanık AHP,
bulanık EDAS,
metal

ÖZ

Bu çalışma, bulanık analitik hiyerarşi prosesi (AHP), bulanık hata türleri ve etkileri analizi (HTEA) ve bulanık ortalama çözüm uzaklığına göre değerlendirme (EDAS) yöntemini bütünleştiren bir karar verme yaklaşımı ile metalik biyomalzemeleri incelemektedir. Çalışmada, paslanmaz çelik, titanyum ve kobalt-krom alaşımları altı ana kriter, otuz bir alt kriter ve üç risk faktörü kullanılarak değerlendirilmiştir. Bulanık AHP yöntemi değerlendirme kriterlerinin ve risk faktörlerinin önemini belirlemek için kullanılırken, bulanık EDAS yöntemi bulanık HTEA yönteminden elde edilen risk öncelik katsayılarını analiz etmek için kullanılmıştır. Sonuçlara göre, ilk üç önemli kriter enfeksiyon, kanserojenlik ve çekme mukavemetidir. Malzemelerin sıralaması ise net skorların azalan düzenine göre titanyum, paslanmaz çelik ve kobalt-krom alaşımları şeklindedir. Sonuç olarak bu çalışma, mevcut malzemelerin tarafsız değerlendirilmesi ve önceliklendirilmesi için bir temel oluşturmaktadır.

Metallic biomaterial assessment via a risk-based decision-making approach

H I G H L I G H T S

- A risk-based decision-making approach
- Prioritization of metallic biomaterials
- The best option was determined as titanium

Article Info

Research Article

Received: 09.05.2021

Accepted: 30.07.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.935288

Keywords:

Biomaterial,
fuzzy FMEA,
fuzzy AHP,
fuzzy EDAS,
metal

ABSTRACT

This study examined metallic biomaterials via a decision-making approach combining the fuzzy analytic hierarchy process (AHP), the fuzzy failure modes and effects analysis (FMEA), and the fuzzy evaluation based on distance from an average solution (EDAS) method. In the study, stainless steel, titanium, and cobalt-chromium alloys were assessed by employing six main criteria, thirty-one subcriteria, and three risk factors. The fuzzy AHP method was used to determine the importance of the evaluation criteria and risk factors, while the fuzzy EDAS method was employed to analyze the risk priority numbers obtained from the fuzzy FMEA method. According to the results, the first three important criteria were infection, carcinogenicity, and tensile strength. Furthermore, the ranking of the materials in the descending order of the crisp scores was titanium, stainless steel, and cobalt-chromium alloys. Consequently, this study established a foundation for the unbiased assessment and prioritization of current materials.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *hilal.singer@hotmail.com, tover@sakarya.edu.tr /

Tel: +90 374 254 1000 / 4902

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Biyomalzemeler, hasarlı vücut parçalarının restorasyonu için kullanılan doğal ya da sentetik malzemeler olarak tanımlanabilir. Bu malzemeler metaller, seramikler, polimerler ve kompozitler olmak üzere dört farklı gruba ayrılır. Metalik biyomalzemeler yüksek süneklik, iyi mukavemet ve kolay şekillendirilebilirlik gibi bazı üstün özellikleri nedeniyle biyomedikal uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır. Uygulamalarda en yoğun kullanılan metal ve alaşımları; paslanmaz çelikler, kobalt-krom alaşımları, titanyum ve titanyum alaşımlarıdır [1].

Günümüzde, yaşlı nüfusunun artması, yaşam tarzının değişmesi ve kaliteli yaşam beklentisi gibi çeşitli faktörler nedeniyle biyomalzemelere olan talep artış göstermiştir. Bu talep artışı ve uygulamalar dejenerasyon, alerji ve enfeksiyon gibi çeşitli sorunları da beraberinde getirmiştir. Bu nedenle, biyomalzemelerin değerlendirilmesi ve seçimi büyük önem kazanmıştır [2]. Ancak, önemli gereksinimler ve biyoyoumluluk nedeniyle bu en zorlu karar süreçlerinden biridir. Biyomalzemeler insan vücudu tarafından kabul edilmeli ve olumsuz etkilere neden olmamalıdır. Ancak, biyolojik ortamın malzemelerle istenmeyen etkileşimleri nedeniyle her uygulamada riskler ve hatalar mevcuttur. Biyomalzemelerin değerlendirilmesi risk yönetimi perspektifinden güvenliğin araştırılmasını ve performansın incelenmesini kapsar. Bir biyomalzemenin başarısı büyük ölçüde malzeme özelliklerine, biyoyoumluluğa ve kişinin sağlık durumuna bağlıdır [3, 4]. Çoklu ve çelişen kriterler nedeniyle biyomalzemelerin değerlendirilmesi ve seçimi için çok kriterli karar verme (ÇKKV) kaçınılmazdır. ÇKKV, birden fazla çelişen kriter ile tanımlanan alternatifler üzerinde kişinin/kişilerin bir tercih kararına varması olarak tanımlanabilir. İnsan yargıları çoğunlukla öznel ve belirsiz olmakta ve tam sayısal değerlerle kestirilememektedir. Bu nedenle, kesin değerler çoğu gerçek hayat durumlarını modellemek için yetersizdir. Karar elemanları arasındaki ilişkilerde dilsel belirsizliklerle uğraşırken veya ilişkiler belirli sayılarla ifade edilemediğinde bulanık teorinin kullanımı önem arz etmektedir. Tercihlerin belirsiz doğası nedeniyle karar verme sürecini daha esnek ve uygun hale getirmek için bulanık küme teorisi ile karar verme yöntemleri sıkça bütünleştirilmektedir. En popüler bulanık ÇKKV yöntemlerinden biri bulanık analitik hiyerarşi prosesi (AHP) yöntemidir. Bu yöntem, karar elemanlarının ikili karşılaştırılmasına dayanmaktadır. Son yıllarda, bulanık AHP'nin diğer ÇKKV yöntemleri ile bütünleşik kullanımına dayalı uygulamalar artmıştır. Tercih edilen bu yöntemlerden biri de bulanık ortalama çözüm uzaklığına göre değerlendirme (EDAS) yöntemidir. Bu yöntemde, en iyi seçenek ortalama çözüme olan uzaklıkla ilişkilidir. Bu iki yöntem, personel değerlendirme [5], tedarikçi seçimi [6], üçüncü parti lojistik firması seçimi [7], yapısal kompozit kerestelerin değerlendirilmesi [8] ve en uygun ulaşım türünün belirlenmesi [9] gibi çeşitli problemlerin çözümünde birlikte kullanılmış ve oldukça başarılı sonuçlar sağlamıştır.

Bulanık ÇKKV yöntemlerinin risk açısından ele alınan problemlerin çözümünde yardımcı bir araç olarak kullanılabilirliği mümkündür. Karar verme modellerinde risk, problemde mevcut olan bilgilerle ilgili iyimserlik derecesinin göstergesi olabilir. Bazı durumlarda ise olumsuz etkilerin yoğunluğu ve olasılığı olarak yorumlanabilir [10]. Risk analizi mevcut bilgilerin sistematik kullanımıyla riskin nedenlerinin tespit edilmesine ve kontrol önlemlerinin belirlenmesine yardımcı olmaktadır. Bir tasarımda, sistemde, hizmette veya süreçte farklı nedenlerden dolayı birçok hata meydana gelebilir. Bu sebeple, her hata değerlendirilmeli ve yüksek riskli olanlar tespit edilmelidir. Risk değerlendirmede kullanılacak çok çeşitli yöntemler mevcuttur. Hata türleri ve etkileri analizi (HTEA) en popüler ve güvenilir risk değerlendirme yöntemlerinden biridir. HTEA, sorunların ortaya çıkma olasılığını ortadan kaldırmak veya azaltmak için çözümler sunmada sıkça kullanılmaktadır. Hata türleri şiddet, olasılık ve fark edilebilirlik risk faktörlerinin sayısal değerlerinin çarpımı olan risk öncelik katsayısına göre önceliklendirilmektedir. Ancak, bu katsayının hesaplanması ve önceliklendirmelerin hesaplanan katsayılarla göre yapılması açısından yöntem eleştirilmektedir. Bu eleştirilerden bazıları aşağıdaki gibi sıralanabilir [11].

- Risk faktörlerinin arasındaki önem dikkate alınmamaktadır.
- Farklı şiddet, olasılık ve fark edilebilirlik değerlendirmeleri tam olarak aynı risk öncelik katsayısını üretebilir.
- Risk faktörleri ile ilişkili soyut miktarların kesin sayısal değerlendirmelerini elde etmek zor ve hatta bazen imkânsızdır.
- Risk öncelik katsayıları sürekli değildir. Çünkü 1'den 1000'e kadar birçok sayı elde edilememektedir.

Geleneksel HTEA'nın etkinliğini artırmak ve sınırlamalarının üstesinden gelmek için bulanık HTEA yöntemi sunulmuştur. Bulanık HTEA, belirsiz kavramların mevcudiyetinde ve yeterli bilgi bulunmadığında en iyi şekilde çalışan bir risk analiz aracıdır. Bulanık HTEA yönteminin oldukça başarılı neticeler sağladığı kanıtlanmıştır. Literatürdeki bazı çalışmalarda, bu yöntemi desteklemek için ÇKKV, matematiksel programlama ve yapay zekâ gibi farklı yaklaşımlardan faydalanılmıştır. Her ne kadar çeşitli yaklaşımlar önerilse de, daha fazla çalışmaya ihtiyaç olduğu bildirilmiştir [12-14].

Malzemelerdeki riskler farklı sorunlardan kaynaklanabilir. Nominal ve gerçek değerler arasındaki sapma veya aşınma, yorulma vb. sonuçların dejenerasyona yol açması birer örnek olarak verilebilir. Bu bağlamda mevcut malzemelerin incelenmesi önem arz etmektedir. Ancak, bu konu üzerine odaklanan çalışma sayısı sınırlıdır. Sadece, Hafezalkotob ve Hafezalkotob [15] tarafından yapılan bir çalışmada sıcaklık değişiminin malzeme özellikleri üzerine etkisini risk açısından incelemek için farklı aksiyomatik tasarım yaklaşımları kullanılmıştır. Ancak, araştırmacıların bu

çalışması biyomalzemelerden farklı bir konuyu ele almaktadır. Geleneksel mühendislik malzemesi seçimi problemlerine kıyasla biyomalzemeler ile ilgili problemleri çözmek için daha az araştırma çalışması gerçekleştirilmiştir. Bahraminasab ve Jahan [16] çalışmalarında yoğunluk, çekme mukavemeti, elastikiyet modülü, uzama, korozyon direnci, aşınma direnci ve kemik bütünleşmesi kriterlerini dikkate alarak diz protezinin femoral bileşeni için en uygun seçeneği çok kriterli optimizasyon ve uzlaşık çözüm (VİKOR) yöntemi ile belirlemişlerdir. Kabir ve Lizu [17] yukarıda bahsi geçen kriterlere maliyet kriterini dâhil ederek bulanık AHP analizini gerçekleştirmişlerdir. Ardından, zenginleştirilmiş değerlendirme için tercih sıralama organizasyonu metodu ile malzemeler sıralanmıştır. Jahan ve Edwards [18] çalışmalarında doku toleransı, korozyon direnci, çekme mukavemeti, yorulma direnci, tokluk, aşınma direnci, elastikiyet modülü, özgül ağırlık ve maliyet kriterlerini içeren kalça eklem protezi malzeme seçim probleminin çözümünde ideal çözüme benzerliğe göre tercih sıralama tekniği (TOPSİS) ile VİKOR yöntemini kullanmışlardır. Aynı kriterler farklı yazarlar tarafından kullanılarak da en uygun seçenekler belirlenmiştir. Jahan [19] VİKOR ve hedef programlama yaklaşımlarını, Petković vd. [20] TOPSİS, VİKOR ve ağırlıklandırılmış bütünleşik toplam çarpım değerlendirmesi yöntemlerini, Chatterjee vd. [21] ise deney tasarımı ve EDAS yönteminden oluşan bütünleşik bir yaklaşımı kullanmıştır. Chowdary vd. [22] çalışmalarında çekme mukavemeti, deformasyon dayanımı, young modülü, yoğunluk, termal iletkenlik, dielektrik sabiti ve poisson oranı kriterlerine göre biyomalzemeleri sıralamak için bulanık AHP ve TOPSİS yöntemlerini kullanmışlardır. Hafezalkotob ve Hafezalkotob [23, 24] kalça ve diz eklemi protez malzeme seçimi için MULTIMOORA yönteminin uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Messellek vd. [25] kalça protezinin femoral bileşeninin tasarımını ve ömrünü iyileştirmek için en iyi malzeme seçiminde sonlu elemanlar analizi ve VİKOR yöntemine dayalı bütünleşik bir yaklaşım önermişlerdir. Das vd. [26] mekanik gevşeme, aşındırıcı parçacık boyutu ve doğrusal aşınma kriterlerine dayanarak kalça eklem implantları için biyomalzeme seçiminde AHP, WPM ve TOPSİS yöntemlerini kullanmışlardır. Bu çalışmaların haricinde, biyomalzemelerin biyolojik performanslarının incelenmesi için çeşitli *in vitro* ve *in vivo* testler gerçekleştirilmiştir [27-29].

Literatür araştırması, biyomalzemelerin incelenmesi için kullanılan kriter sayısının yetersiz olduğunu, mevcut çalışmalarda belirsiz yargıların üstesinden gelme bakımından bir eksikliğin bulunduğunu ve ilgili problemlerin risk açısından ele alınmadığını göstermiştir. Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, bu çalışma sıkça kullanılan metalik biyomalzemelerden paslanmaz çelik, titanyum ve kobalt-krom alaşımlarının geniş bir yapı içerisinde risk açısından incelenmesine odaklanmaktadır. Bu amaç için bulanık AHP, bulanık HTEA ve bulanık EDAS yöntemlerini içeren bütünleşik bir karar verme yaklaşımı önerilmektedir. Bu çalışmadaki değerlendirme çerçevesi, geçmiş ve şimdiki nesil biyomalzemeler üzerinde uygulanabilir olup, gelecek nesil biyomalzemelerin

düzenlenmesini desteklemede faydalı sonuçlar sağlayacaktır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Bulanık Kümeler ve Bulanık Sayılar (Fuzzy Sets and Fuzzy Numbers)

Bulanıklık, belirsizliğin bir ifadesidir. İnsan kararının belirsizliğini ve öznelliğini çözmeye amacıyla karar verme sürecinde dilsel terimleri ifade etmek için bulanık küme teorisi ortaya atılmıştır. Klasik küme teorisinde varlığın kümede hem olması hem de olmaması durumuna izin verilmez. Bulanık küme teorisinde ise varlıkların kısmen kümeye ait olması kabul edilen bir durumdur. Dolayısıyla, çoğu gerçek dünya probleminin incelenmesinde ve çözümünde bulanık küme teorisinden faydalanılmaktadır [30]. Bulanık bir alt küme, üyelik fonksiyonu ile tanımlanır. Bu üyelik fonksiyonu, her x elemanını $[0,1]$ aralığındaki bir sayı ile eşler. Üyelik fonksiyonunun değeri ne kadar büyük ise kümenin elemanı olma derecesi o kadar güçlü olur. En çok tercih edilen bulanık sayılar, üçgen bulanık sayılardır ($\tilde{A} = (l, m, u)$). Üçgen üyelik fonksiyonu Eş. 1'deki gibi gösterilebilir.

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0, & x < l \text{ veya } x > u \\ (x - l)/(m - l), & l \leq x \leq m \\ (u - x)/(u - m), & m \leq x \leq u \end{cases} \quad (1)$$

Burada; l , m ve u sırasıyla en küçük, olası ve en büyük değerleri ifade etmektedir. İki üçgen bulanık sayı üzerinde gerçekleştirilebilecek ana aritmetik işlemler şunlardır [31](Eş. 2-Eş. 5):

$$\tilde{M}_1 \oplus \tilde{M}_2 = (l_1, m_1, u_1) \oplus (l_2, m_2, u_2) = (l_1 + l_2, m_1 + m_2, u_1 + u_2) \quad (2)$$

$$\tilde{M}_1 \ominus \tilde{M}_2 = (l_1, m_1, u_1) \ominus (l_2, m_2, u_2) = (l_1 - u_2, m_1 - m_2, u_1 - l_2) \quad (3)$$

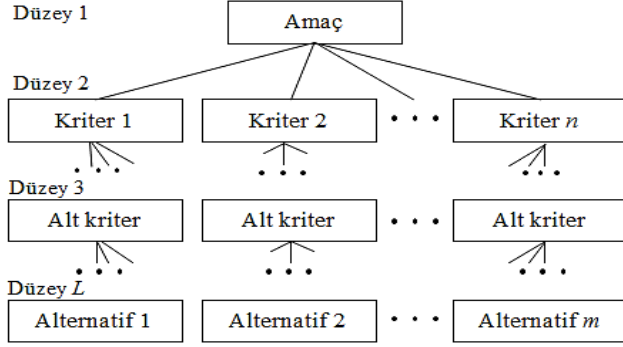
$$\tilde{M}_1 \otimes \tilde{M}_2 = (l_1, m_1, u_1) \otimes (l_2, m_2, u_2) = (l_1 l_2, m_1 m_2, u_1 u_2) \quad (4)$$

$$\tilde{M}_1^{-1} = (l_1, m_1, u_1)^{-1} = (1/u_1, 1/m_1, 1/l_1) \quad (5)$$

2.2. Bulanık AHP Yöntemi (Fuzzy AHP Method)

AHP, karmaşık karar durumlarını organize etmek ve çözmek için kullanılan bir ÇKKV yöntemidir. Bu yöntemin adımları şunlardır: (1) karar hiyerarşisinin oluşturulması, (2) karar elemanlarının ikili karşılaştırılması, (3) tutarlılık kontrolü, (4) karar elemanlarının ağırlıklandırılması ve (5) çıktıların sentezlenmesi. AHP analizi, hiyerarşinin aynı düzeyinde yer alan elemanların daha üst düzeyde bulunan ana elemana göre ikili karşılaştırılmasına dayanmaktadır (Şekil 1). Saaty'nin 1'den (eşit önem) 9'a (mutlak önem) kadar değişen ölçeği kullanılarak yapılan ikili karşılaştırmalar ile hiyerarşinin her düzeyi için bir matris oluşturulur. Buradaki amaç, karar

elemanlarının önem derecesini belirlemektir. Ayrıca, AHP yöntemi kararların tutarsızlığını bir dizi matematiksel işlemlerle kontrol edebilmektedir. Son aşamada, matrisin her sütununun öğeleri aynı sütunun öğelerinin toplamına bölünür ve elde edilen matrisin sıra ortalamasının alınması ile ağırlıklar elde edilir [32, 33].



Şekil 1. Bir AHP hiyerarşisi (An AHP hierarchy)

Klasik AHP yöntemi, insanların düşünme şeklini tam olarak yansıtmaz; çünkü karar vericilerin fikirlerini kesin değerlerle ifade etmesi genellikle zor ve zaman alıcıdır. Her karar verici, karar elemanlarını değerlendirirken kesin değerler yerine dilsel ifadeleri tercih eder. Bu nedenle, bulanık AHP yöntemi sıkça tercih edilmektedir [34]. Literatürde, çeşitli bulanık AHP yöntemleri mevcuttur. Bu çalışmada, Buckley AHP yöntemi [35] etkinliği nedeniyle tercih edilmiştir. Bu yöntem, şu adımlardan oluşmaktadır [36]:

Adım 1: İkili karşılaştırma matris(ler)i oluşturulur.

Adım 2: Bulanık karşılaştırma değerlerinin geometrik ortalamaları hesaplanır.

$$\tilde{r}_i = (\tilde{a}_{i1} \otimes \tilde{a}_{i2} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{in})^{1/n} \quad (6)$$

Eş. 6'da \tilde{r}_i , i . karar elemanının ikili karşılaştırmalarının geometrik ortalama değerlerini; \tilde{a}_{ij} , bir karar elemanının diğerine göre tercih derecesini; n ise karar elemanı sayısını belirtmektedir.

Adım 3: Bulanık ağırlık değerleri (\tilde{w}_i) hesaplanır.(Eş. 7)

$$\tilde{w}_i = \tilde{r}_i \otimes (\tilde{r}_1 \oplus \tilde{r}_2 \oplus \dots \oplus \tilde{r}_n)^{-1} \quad (7)$$

Adım 4: Durulaştırma ve normalizasyon işlemleri Eş. 8 ile gerçekleştirilerek net ağırlık değerleri (w_{Fj}) elde edilir.

$$w_{Fj} = \frac{\tilde{w}_{Fj}}{\sum_{j=1}^n \tilde{w}_{Fj}} = \frac{w_{Fjl} + w_{Fjm} + w_{Fju}}{\sum_{j=1}^n \tilde{w}_{Fij}} \quad (8)$$

2.3. Bulanık HTEA Yöntemi (Fuzzy FMEA Method)

HTEA, potansiyel hataları veya zorlukları meydana gelmeden önce tanımlamak, analiz etmek, önlemek ve bunların etkilerini değerlendirmek için uzmanların

deneyimlerini birleştiren bir risk yönetim tekniğidir. HTEA analizi, sistemlerde, ürünlerde, süreçlerde veya hizmetlerde arıza/hata olasılığının ortadan kaldırılmasını veya azaltılmasını sağlar ve önleyici faaliyetlerin belirlenmesine katkıda bulunur [37]. Bu yöntemin uygulama prosedürü hazırlık, tanımlama, önceliklendirme, risk azaltma ve yeniden değerlendirme adımlarından oluşur (Şekil 2) [38].

HTEA'da, her bir hata türü için risk öncelik katsayısı belirlenir. Bu katsayı, üç risk faktörünün sayısal değerlerinin çarpımıyla elde edilir (Eş. 9).

$$\text{Risk öncelik katsayısı} = \text{Şiddet} \times \text{Olasılık} \times \text{Fark edilebilirlik} \quad (9)$$

Her risk faktörünün, 1'den 10'a kadar sayısal derecelendirmesi bulunmaktadır.

- Şiddet: 1 = şiddetli değil → 10 = çok yüksek şiddetli
- Olasılık: 1 = olası değil → 10 = çok yüksek olası
- Fark edilebilirlik: 1 = fark etmek çok kolay → 10 = fark etmek çok zor

İyileştirme eylemlerini planlamada risk öncelik katsayıları dikkate alınır. HTEA analizinin sonucunda, daha yüksek katsayıya sahip olan hata türünün daha fazla önem arz ettiği belirtilir ve düşük katsayılı olanlara göre daha yüksek bir öncelik verilmesi gerektiği vurgulanır. Katsayı değeri 100'ü aşan riskler için mutlaka önlem alınmalıdır [39].

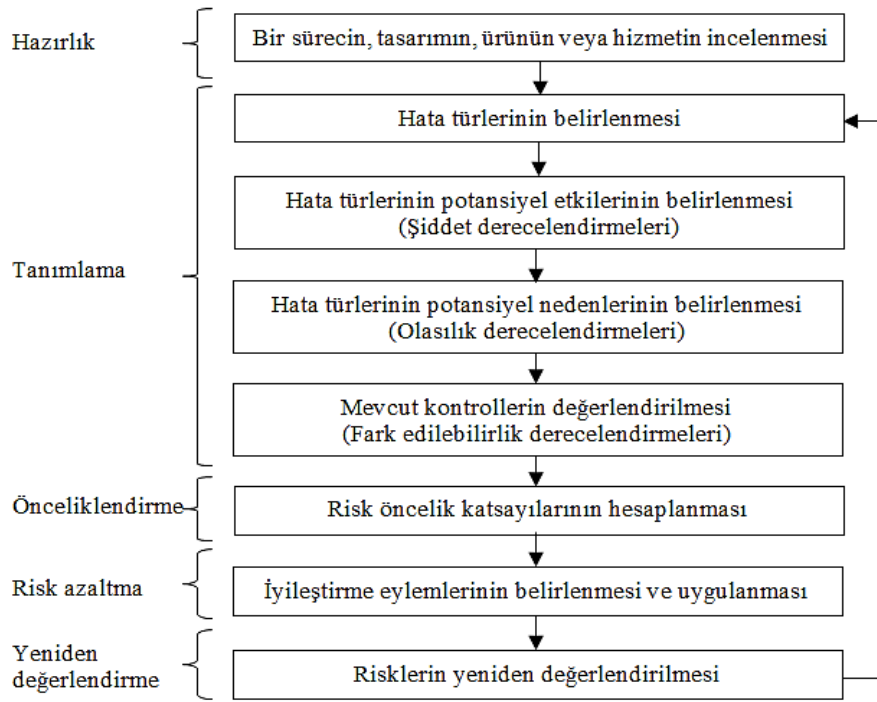
HTEA yöntemi uzmanların görüşlerine dayanmaktadır. Dolayısıyla, belirsizliği ele almak ve görüşleri modellemek için makul bir araç sunmak gerekir. Risk faktörlerinin değerlerini elde etme sürecinde yargıları anlamlı kılmak için HTEA'ya bulanık teori uygulanabilir [40]. Bulanık HTEA'da, şiddet, olasılık ve fark edilebilirlik risk faktörleri için kullanılan ölçekler bulanıklaştırılır ve dilsel etiketler kullanılır. Bulanık risk öncelik katsayısının hesaplanmasında ise Eş. 10'dan faydalanılabilir. Bu eşitlik, üç risk faktörünün eşit önemde ele alınması dezavantajının üstesinden gelmektedir [31].

$$BRÖS_i = \left(\tilde{R}_i^O\right)^{\frac{\tilde{w}^O}{\tilde{w}^O + \tilde{w}^S + \tilde{w}^F}} \times \left(\tilde{R}_i^S\right)^{\frac{\tilde{w}^S}{\tilde{w}^O + \tilde{w}^S + \tilde{w}^F}} \times \left(\tilde{R}_i^F\right)^{\frac{\tilde{w}^F}{\tilde{w}^O + \tilde{w}^S + \tilde{w}^F}} \quad (10)$$

Eş. 10'da $BRÖS_i$, risk öncelik katsayısını; \tilde{R}_i^O , olasılık değerini; \tilde{R}_i^S , şiddet değerini; \tilde{R}_i^F , fark edilebilirlik değerini; \tilde{w}^O , \tilde{w}^S ve \tilde{w}^F ise sırasıyla bu risk faktörlerinin ağırlık değerlerini ifade etmektedir.

2.4. Bulanık EDAS Yöntemi (Fuzzy EDAS Method)

EDAS, bir ÇKKV yöntemidir. Bu yöntemde, karar seçenekleri ortalamadan pozitif uzaklıkların (PDA) yüksek değerlerine ve ortalamadan negatif uzaklıkların (NDA) düşük değerlerine göre değerlendirilir [41]. Tercihler kesin sayısal değerlerle ifade edilemediğinde dilsel bilginin kullanımı gerekir. Bu nedenle, bulanık EDAS yöntemi sunulmuştur. Bu yöntem, şu adımlardan oluşmaktadır [42, 43]:



Şekil 2. Bir HTEA prosedürü (A FMEA procedure)

Adım 1: Karar matrisi oluşturulur.

Adım 2: Ortalama çözüm matrisi elde edilir.

$$\bar{a}_{vj} = \frac{1}{m} \bigoplus_{i=1}^m \tilde{x}_{ij} \quad (11)$$

Eş. 11'de \bar{a}_{vj} , her bir kriter için ortalama çözüm değerini; \tilde{x}_{ij} , i . alternatifin j . kriter üzerindeki performans değerini; m ise alternatif sayısını temsil etmektedir.

Adım 3: PDA ve NDA matrisleri oluşturulur.(Eş. 12, Eş. 13)

$$\tilde{pda}_{ij} = \begin{cases} \frac{\psi(\tilde{x}_{ij} \ominus \bar{a}_{vj})}{\kappa(\bar{a}_{vj})} & \text{eğer } j \in \text{fayda kriteri kümesi} \\ \frac{\psi(\bar{a}_{vj} \ominus \tilde{x}_{ij})}{\kappa(\bar{a}_{vj})} & \text{eğer } j \in \text{maliyet kriteri kümesi} \end{cases} \quad (12)$$

$$\tilde{nda}_{ij} = \begin{cases} \frac{\psi(\bar{a}_{vj} \ominus \tilde{x}_{ij})}{\kappa(\bar{a}_{vj})} & \text{eğer } j \in \text{fayda kriteri kümesi} \\ \frac{\psi(\tilde{x}_{ij} \ominus \bar{a}_{vj})}{\kappa(\bar{a}_{vj})} & \text{eğer } j \in \text{maliyet kriteri kümesi} \end{cases} \quad (13)$$

Burada; \tilde{pda}_{ij} ve \tilde{nda}_{ij} , sırasıyla ortalama çözümlerden pozitif ve negatif uzaklıkları göstermektedir. $\kappa(\tilde{A})$ fonksiyonu, üçgen bulanık sayının durulaştırılmış değerini elde etmek için kullanılmaktadır. $\psi(\tilde{A})$ fonksiyonu ise üçgen bulanık sayı ile sıfır arasındaki en yüksek değeri belirlemektedir. $\kappa(\tilde{A})$ ve $\psi(\tilde{A})$ ile ilgili hesaplamaları

gerçekleştirmek için sırasıyla Eş. 14 ve Eş. 15'ten faydalanılır.

$$\kappa(\tilde{A}) = \frac{l+2m+u}{4} \quad (14)$$

$$\psi(\tilde{A}) = \begin{cases} \tilde{A} & \text{eğer } \kappa(\tilde{A}) > 0 \\ 0 & \text{eğer } \kappa(\tilde{A}) \leq 0 \end{cases} \quad (15)$$

Adım 4: Ağırlıklandırılmış pozitif uzaklıklar (\tilde{sp}_i) ile negatif uzaklıklar (\tilde{sn}_i) hesaplanır.(Eş. 16, Eş. 17)

$$\tilde{sp}_i = \bigoplus_{j=1}^n (\tilde{w}_j \otimes \tilde{pda}_{ij}) \quad (16)$$

$$\tilde{sn}_i = \bigoplus_{j=1}^n (\tilde{w}_j \otimes \tilde{nda}_{ij}) \quad (17)$$

Adım 5: Normalize \tilde{sp}_i değerleri (\tilde{ns}_p) ile \tilde{sn}_i değerleri (\tilde{ns}_n) belirlenir.(Eş. 18, Eş. 19)

$$\tilde{ns}_p = \frac{\tilde{sp}_i}{\max_i(\kappa(\tilde{sp}_i))} \quad (18)$$

$$\tilde{ns}_n = 1 - \frac{\tilde{sn}_i}{\max_i(\kappa(\tilde{sn}_i))} \quad (19)$$

Adım 6: Bulanık skorlar (\tilde{as}_i) elde edilir.(Eş. 20)

$$\tilde{as}_i = \frac{\tilde{ns}_p \oplus \tilde{ns}_n}{2} \quad (20)$$

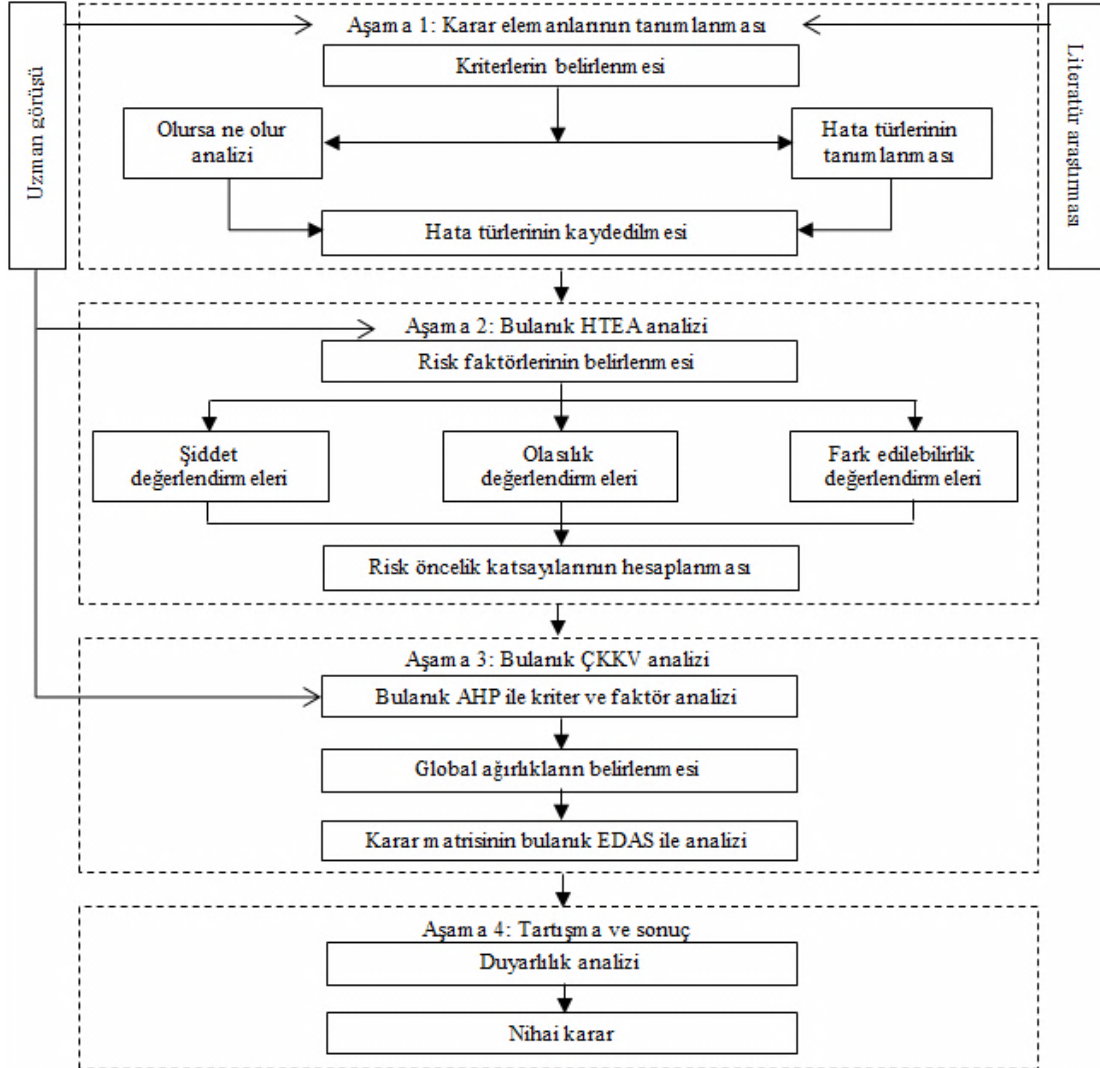
Adım 7: Net skorlar (as_i), Eş. 14 kullanılarak hesaplanır. En iyi seçenek, en yüksek skora sahiptir.

2.5. Değerlendirme Çerçevesi (Evaluation Framework)

Metalik biyomalzemeler, mekanik performans açısından diğer biyomalzemelerden daha güvenilir oldukları için yük taşıyan ortopedik implant uygulamalarında sıkça kullanılmaktadır. Malzeme özelliklerinin incelenmesi, biyomedikal uygulamaların başarılı olmasında ve risklerin azaltılmasında önemli bir rol oynar. Bu çalışma, paslanmaz çelik, titanyum ve kobalt-krom alaşımlarının risk perspektifinden incelenmesi için bir karar verme yaklaşımı önermektedir. Bu yaklaşım, bulanık AHP, bulanık HTEA ve bulanık EDAS yöntemlerine dayanmaktadır. Bulanık HTEA yöntemi ile metalik biyomalzemeler için bulanık risk öncelik katsayıları hesaplanmaktadır. Bu katsayının elde edilmesinde şiddet, olasılık ve fark edilebilirlik risk faktörlerinden faydalanılmaktadır. Bulanık HTEA yönteminin seçilme nedeni, etkili olmasının yanı sıra

problemin doğasına uygun olmasıdır. Başarılı bulanık ÇKKV yöntemlerinden bulanık AHP ve bulanık EDAS ile bulanık HTEA yönteminin hassasiyeti artırılmaktadır. Bulanık AHP ile değerlendirme kriterlerinin ve risk faktörlerinin önem derecesi belirlenirken, bulanık risk öncelik katsayılarını kullanan bulanık EDAS ile malzemeler analiz edilmektedir. Sıralama amacı için bulanık EDAS yönteminin tercih edilmesinde, hesaplama prosedürünün yenilikçi olması ve bazı seçkin bulanık ÇKKV yöntemlerinin etkinliği kanıtlanmış stratejilerine dayanması etkili olmuştur. Önerilen yaklaşım Şekil 3'te aydınlatılmıştır.

Kullanımda olan birçok biyomalzemeye rağmen, değerlendirme kriterleri tam olarak belirlenmemiştir. Bu durum, olumsuz sonuçları beraberinde getirebilmektedir [44]. Bu nedenle, çalışmadaki malzemelerin incelenmesi için ekonomik, tasarım ve üretim, mekanik, fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikler ile ilgili kriterlerden oluşan geniş bir yapı tasarlanmıştır. Çalışmada kullanılan değerlendirme kriterleri ve açıklamaları Tablo 1'de sunulmuştur.



Şekil 3. Çalışmanın adımları (The steps of the study)

Tablo 1. Değerlendirme kriterleri ve açıklamaları (The evaluation criteria and their definitions)

Ana kriter	Alt kriter	Kriter türü	Tanım
Ekonomik özellikler	K ₁ ARGE ve uygulamalar için yatırım eğilimi	K ₁₁ ↑	Olumlu yönde sonuçlar elde etmek için harcanan çaba
		K ₁₂ ↑	Malzemenin kullanıcı tarafından kullanılacağı tahmin edilen süre
	Maliyet	K ₁₃ ↓	Malzeme ve üretim maliyeti
	Bulunabilirlik	K ₁₄ ↑	Çeşitli kanallar aracılığıyla malzemeye kolayca erişebilme
Tasarım ve üretim özellikleri	K ₂ Üretim kolaylığı	K ₂₁ ↑	Bir ürünün tasarlanmasının veya mühendislik sürecinin kolaylığı
		K ₂₂ ↑	Normal ağırlığın altında veya çok az ağırlığa sahip olunması
		K ₂₃ ↑	Kabul edilebilir bir yüzey kalitesine kadar işleme kolaylığı
		K ₂₄ ↑	Canlı bakteri veya diğer mikroorganizmalardan arındırılabilme kabiliyeti
		K ₂₅ ↑	İş parçasının hasar görmeden plastik deformasyona uğrayabilme kabiliyeti
		K ₂₆ ↑	Malzemenin yapısal açıdan ve yüzey olarak uygunluğu
Mekanik özellikler	K ₃ Aşınma direnci	K ₃₁ ↑	Aşınma ortamının agresifliğine direnme yeteneği
		K ₃₂ ↑	Bir malzemenin tekrarlı gerilme etkisi altında oluşacak deformasyona karşı gösterdiği direnç
		K ₃₃ ↑	Çekme etkisi altında elde edilebilecek en yüksek gerilme değeri
		K ₃₄ ↑	Malzemenin kopuncaya kadar absorbe edebildiği enerji
		K ₃₅ ↓	Lokal plastik deformasyona karşı direncin bir ölçüsü
Fiziksel özellikler	K ₄ Yoğunluk	K ₃₆ ↓	Belirli bir zaman içerisinde meydana gelen biçim bozukluğu
		K ₄₁ ↓	Birim hacimdeki madde miktarı
		K ₄₂ ↑	Bir malzemenin kullanılırken orijinal boyutlarını koruyabilme becerisi
		K ₄₃ ↓	Akım iletim kabiliyeti
Kimyasal özellikler	K ₅ İyon salınımı	K ₄₄ ↓	Bir malzemenin manyetik alana tepkisi
		K ₅₁ ↓	Metal iyonlarının vücut içerisinde serbest bırakılması
		K ₅₂ ↑	Oksitlenme veya diğer kimyasal etkilerle aşınma durumu
		K ₅₃ ↓	Malzemenin biyolojik sistem ile etkileşime girme derecesi
		K ₅₄ ↓	Malzemenin vücutta bozunmaya uğraması
Biyolojik özellikler	K ₆ Kemik bütünleşmesi	K ₅₅ ↓	Vücudun en iyi şekilde çalıştığı asit ve baz seviyesine etki
		K ₆₁ ↑	Kemik ile yük taşıyan implant arasındaki bağlantı
		K ₆₂ ↓	Alerjenik yanıtı indüklenme kapasitesi
		K ₆₃ ↓	Vücutta normalde bulunmayan bakteri, virüs ve parazit gibi mikroorganizmaların istilası
		K ₆₄ ↓	Zehirli olma veya olumsuz sağlık etkilerine neden olma eğilimi
		K ₆₅ ↓	Kalsiyum karbonat veya diğer bazı çözünmeyen kalsiyum bileşiklerinin birikmesi veya dönüşümü ile doku veya materyalin sertleşmesi
K ₆₆ ↓	Kanser üretme yeteneği veya eğilimi		

↑ ve ↓, sırasıyla malzemenin yüksek (fayda yönlü) ve düşük (maliyet yönlü) değerlerinin ideal olduğunu belirtmektedir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Bulanık ÇKKV tabanlı bulanık HTEA yaklaşımı ile paslanmaz çelik, titanyum ve kobalt-krom alaşımları incelenecektir. Literatür araştırması ve uzman görüşü doğrultusunda altı ana kriter, otuz bir alt kriter ve üç risk

faktörü belirlenmiştir. Çalışmadaki karar elemanlarının değerlendirilmesi için Metalürji ve Malzeme Mühendisliği ile Biyomedikal Mühendisliği Bölümlerinden on uzman karar verme sürecine dâhil edilmiştir. Söz konusu uzmanlar alanında en az on yıllık deneyime sahip olup, biyomalzemeler ile ilgili çok sayıda ulusal ve uluslararası bilimsel yayınları mevcuttur. Her uzman, kişisel bilgi ve

uzmanlık temelinde kararlar vermiştir. Malzemeler, bulanık HTEA yöntemi kullanılarak risk faktörleri açısından değerlendirilmiştir. Karar verme sürecinde malzemenin ilgili niteliğinin insan sağlığı/yaşam kalitesi/tedavi üzerindeki etkisi, malzemenin ilgili nitelikte risk oluşturma olasılığı ve fark edilme durumu dikkate alınmıştır. Uzmanlardan Tablo 2’de verilen ölçeğe dayalı olarak derecelendirmeleri yapmaları istenmiştir. Uzmanların görüşlerinin birleştirilmesi ile elde edilen sonuçlar Tablo 3’te

sunulmuştur. Risk faktörleri arasındaki öncelikleri belirlemek için bulanık AHP yönteminden faydalanılmıştır. Uzmanlardan Tablo 4’te verilen bulanık değerlendirme ölçeğini kullanarak üç risk faktörünü ikili karşılaştırmaları istenmiştir. Uzmanların görüşleri geometrik ortalama ile birleştirildikten sonra yöntemin hesaplama prosedürüne göre ağırlık değerleri elde edilmiştir. Birleştirilmiş karar matrisi ile yöntemin çıktılarını Tablo 5’teki gibidir. Bu tabloda sunulan sonuçlara göre, risk faktörlerinin sıralama düzeni

Tablo 2. Bulanık HTEA ölçeği (The fuzzy FMEA scale)

Şiddet dilsel ölçeği	Olasılık dilsel ölçeği	Fark edilebilirlik dilsel ölçeği	Üçgen bulanık ölçek
Çok yüksek	Çok yüksek	Çok düşük	(7,9,10)
Yüksek	Yüksek	Düşük	(5,7,9)
Orta	Orta	Orta	(3,5,7)
Düşük	Düşük	Yüksek	(1,3,5)
Çok düşük	Çok düşük	Çok yüksek	(0,1,3)

Tablo 3. Metalik biyomalzemeler için risk, olasılık ve fark edilebilirlik sonuçları
(The severity, occurrence, and detection results for the metallic biomaterials)

Kri-ter	Paslanmaz çelik			Titanyum			Kobalt-krom alaşımları		
	Şiddet	Olasılık	Fark edilebilirlik	Şiddet	Olasılık	Fark edilebilirlik	Şiddet	Olasılık	Fark edilebilirlik
K ₁₁	(3,80, 5,80, 7,80)	(2,40, 4,20, 6,20)	(2,80, 4,60, 6,60)	(5,00, 7,00, 8,80)	(3,20, 5,00, 6,80)	(2,40, 4,20, 6,00)	(4,60, 6,60, 8,60)	(2,40, 4,20, 6,20)	(2,00, 3,80, 5,60)
K ₁₂	(3,00, 5,00, 7,00)	(3,00, 5,00, 7,00)	(2,60, 4,60, 6,60)	(4,60, 6,60, 8,40)	(3,20, 5,00, 6,80)	(1,80, 3,40, 5,20)	(3,40, 5,40, 7,40)	(2,60, 4,60, 6,60)	(3,00, 5,00, 6,80)
K ₁₃	(1,40, 3,40, 5,40)	(1,60, 3,40, 5,40)	(3,20, 5,00, 6,80)	(3,80, 5,80, 7,80)	(3,20, 5,00, 6,80)	(2,40, 4,20, 6,00)	(3,40, 5,40, 7,40)	(2,40, 4,20, 6,20)	(2,80, 4,60, 6,40)
K ₁₄	(3,80, 5,80, 7,40)	(3,60, 5,40, 7,00)	(0,80, 2,20, 4,20)	(2,60, 4,60, 6,60)	(2,40, 4,20, 6,20)	(1,60, 3,40, 5,40)	(3,40, 5,40, 7,20)	(3,60, 5,40, 7,20)	(1,00, 2,60, 4,60)
K ₂₁	(2,20, 4,20, 6,20)	(2,60, 4,20, 6,20)	(0,60, 2,20, 4,20)	(2,20, 4,20, 6,20)	(2,40, 4,20, 6,20)	(1,20, 3,00, 5,00)	(2,60, 4,60, 6,40)	(3,20, 5,00, 6,80)	(0,60, 2,20, 4,20)
K ₂₂	(3,40, 5,40, 7,40)	(2,20, 4,20, 6,20)	(1,60, 3,40, 5,40)	(5,80, 7,80, 9,40)	(3,00, 4,60, 6,40)	(0,60, 2,20, 4,20)	(3,00, 5,00, 7,00)	(2,20, 4,20, 6,20)	(1,20, 3,00, 5,00)
K ₂₃	(3,60, 5,40, 7,20)	(3,20, 5,00, 6,80)	(1,00, 2,60, 4,60)	(3,60, 5,40, 7,20)	(3,20, 5,00, 6,80)	(1,00, 2,60, 4,60)	(2,40, 4,20, 6,20)	(1,60, 3,40, 5,40)	(2,40, 4,20, 6,20)
K ₂₄	(2,80, 4,60, 6,60)	(1,60, 3,40, 5,40)	(1,60, 3,40, 5,40)	(3,60, 5,40, 7,40)	(2,80, 4,60, 6,60)	(0,80, 2,60, 4,60)	(3,20, 5,00, 7,00)	(2,40, 4,20, 6,20)	(1,20, 3,00, 5,00)
K ₂₅	(3,60, 5,40, 7,00)	(3,20, 5,00, 6,80)	(0,60, 2,20, 4,20)	(3,80, 5,80, 7,80)	(2,80, 4,60, 6,60)	(0,80, 2,60, 4,60)	(3,20, 5,00, 6,80)	(2,80, 4,60, 6,60)	(1,20, 3,00, 5,00)
K ₂₆	(4,60, 6,60, 8,40)	(2,60, 4,60, 6,60)	(3,00, 5,00, 7,00)	(6,60, 8,60, 9,80)	(3,60, 5,40, 7,00)	(1,00, 2,60, 4,60)	(5,00, 7,00, 8,80)	(3,00, 5,00, 7,00)	(3,00, 5,00, 6,80)
K ₃₁	(5,00, 7,00, 8,60)	(4,60, 6,60, 8,40)	(0,80, 2,60, 4,60)	(5,80, 7,80, 9,40)	(3,60, 5,40, 7,40)	(1,00, 3,00, 5,00)	(5,40, 7,40, 8,80)	(3,80, 5,80, 7,40)	(0,80, 2,60, 4,60)
K ₃₂	(3,80, 5,80, 7,60)	(3,80, 5,80, 7,60)	(2,40, 4,20, 6,20)	(4,60, 6,60, 8,60)	(2,80, 4,60, 6,60)	(2,00, 3,80, 5,80)	(5,00, 7,00, 8,80)	(4,20, 6,20, 8,00)	(1,40, 3,00, 5,00)
K ₃₃	(4,60, 6,60, 8,60)	(3,00, 5,00, 7,00)	(1,20, 3,00, 5,00)	(5,00, 7,00, 8,80)	(2,40, 4,20, 6,20)	(1,20, 3,00, 5,00)	(5,40, 7,40, 9,20)	(3,80, 5,80, 7,60)	(0,60, 2,20, 4,20)
K ₃₄	(5,00, 7,00, 8,60)	(3,60, 5,40, 7,00)	(0,20, 1,40, 3,40)	(5,00, 7,00, 9,00)	(2,60, 4,20, 6,20)	(0,80, 2,60, 4,60)	(3,00, 5,00, 7,00)	(1,40, 3,40, 5,40)	(2,40, 4,20, 6,20)
K ₃₅	(3,80, 5,80, 7,60)	(3,20, 5,00, 6,80)	(0,60, 2,20, 4,20)	(2,20, 4,20, 6,20)	(1,20, 3,00, 5,00)	(2,40, 4,20, 6,20)	(3,00, 5,00, 7,00)	(2,40, 4,20, 6,20)	(1,20, 3,00, 5,00)
K ₃₆	(2,20, 4,20, 6,20)	(0,80, 2,60, 4,60)	(4,60, 6,60, 8,60)	(3,00, 5,00, 7,00)	(1,60, 3,40, 5,40)	(3,00, 5,00, 7,00)	(3,80, 5,80, 7,80)	(2,80, 4,60, 6,60)	(2,60, 4,60, 6,60)
K ₄₁	(2,80, 4,60, 6,40)	(3,00, 5,00, 6,80)	(1,40, 3,00, 5,00)	(3,40, 5,40, 7,20)	(2,80, 4,60, 6,40)	(1,00, 2,60, 4,60)	(3,00, 5,00, 6,80)	(3,00, 5,00, 6,80)	(1,40, 3,00, 5,00)
K ₄₂	(3,40, 5,40, 7,40)	(1,60, 3,40, 5,40)	(2,40, 4,20, 6,20)	(4,60, 6,60, 8,60)	(3,40, 5,40, 7,40)	(1,20, 3,00, 5,00)	(3,40, 5,40, 7,40)	(1,60, 3,40, 5,40)	(2,40, 4,20, 6,20)
K ₄₃	(2,80, 4,60, 6,60)	(2,40, 4,20, 6,20)	(1,20, 3,00, 5,00)	(2,80, 4,60, 6,60)	(2,40, 4,20, 6,20)	(1,20, 3,00, 5,00)	(2,40, 4,20, 6,20)	(1,60, 3,40, 5,40)	(1,60, 3,40, 5,40)
K ₄₄	(5,40, 7,40, 9,20)	(4,60, 6,60, 8,40)	(1,00, 2,60, 4,60)	(3,00, 5,00, 7,00)	(1,40, 3,40, 5,40)	(2,80, 4,60, 6,60)	(3,40, 5,40, 7,40)	(2,20, 4,20, 6,20)	(2,80, 4,60, 6,60)
K ₅₁	(3,80, 5,80, 7,80)	(3,00, 5,00, 7,00)	(2,60, 4,60, 6,60)	(1,40, 3,40, 5,40)	(0,80, 2,60, 4,60)	(4,20, 6,20, 8,20)	(2,60, 4,60, 6,60)	(1,60, 3,40, 5,40)	(3,40, 5,40, 7,40)
K ₅₂	(5,00, 7,00, 9,00)	(3,80, 5,80, 7,80)	(2,20, 4,20, 6,20)	(6,60, 8,60, 9,80)	(3,80, 5,80, 7,40)	(1,20, 2,60, 4,60)	(5,80, 7,80, 9,40)	(4,20, 6,20, 8,00)	(1,40, 3,00, 5,00)
K ₅₃	(3,80, 5,80, 7,80)	(2,60, 4,60, 6,60)	(3,00, 5,00, 7,00)	(5,40, 7,40, 9,20)	(3,40, 5,40, 7,20)	(2,00, 3,80, 5,80)	(3,80, 5,80, 7,80)	(2,20, 4,20, 6,20)	(3,00, 5,00, 7,00)
K ₅₄	(3,00, 5,00, 6,80)	(2,00, 3,80, 5,60)	(3,00, 4,60, 6,40)	(3,80, 5,80, 7,60)	(3,20, 5,00, 6,80)	(1,80, 3,40, 5,20)	(3,40, 5,40, 7,20)	(2,80, 4,60, 6,40)	(2,20, 3,80, 5,60)
K ₅₅	(2,20, 4,20, 6,20)	(1,00, 3,00, 5,00)	(4,00, 5,80, 7,60)	(2,80, 4,60, 6,60)	(1,60, 3,40, 5,40)	(3,20, 5,00, 6,80)	(2,40, 4,20, 6,20)	(1,40, 3,40, 5,40)	(3,60, 5,40, 7,20)
K ₆₁	(3,40, 5,40, 7,40)	(2,60, 4,60, 6,60)	(2,20, 4,20, 6,20)	(7,00, 9,00, 10,00)	(3,60, 5,40, 7,00)	(0,60, 1,80, 3,80)	(5,00, 7,00, 8,80)	(3,00, 5,00, 7,00)	(2,60, 4,60, 6,60)
K ₆₂	(3,00, 5,00, 7,00)	(2,20, 4,20, 6,20)	(1,60, 3,40, 5,40)	(1,60, 3,40, 5,40)	(0,60, 2,20, 4,20)	(3,20, 5,00, 6,80)	(3,00, 5,00, 7,00)	(2,20, 4,20, 6,20)	(1,60, 3,40, 5,40)
K ₆₃	(3,40, 5,40, 7,40)	(2,20, 4,20, 6,20)	(2,60, 4,60, 6,60)	(2,60, 4,60, 6,60)	(1,40, 3,40, 5,40)	(2,80, 4,60, 6,60)	(2,60, 4,60, 6,60)	(1,40, 3,40, 5,40)	(3,80, 5,80, 7,80)
K ₆₄	(3,40, 5,40, 7,40)	(2,60, 4,60, 6,60)	(2,40, 4,20, 6,20)	(1,60, 3,40, 5,40)	(1,00, 3,00, 5,00)	(3,20, 5,00, 7,00)	(3,00, 5,00, 7,00)	(2,20, 4,20, 6,20)	(2,40, 4,20, 6,20)
K ₆₅	(1,20, 3,00, 5,00)	(0,60, 2,20, 4,20)	(4,00, 5,80, 7,60)	(2,60, 4,60, 6,60)	(2,00, 3,80, 5,80)	(2,40, 4,20, 6,20)	(1,20, 3,00, 5,00)	(0,60, 2,20, 4,20)	(4,00, 5,80, 7,60)
K ₆₆	(2,80, 4,60, 6,60)	(2,20, 4,20, 6,20)	(2,40, 4,20, 6,20)	(1,60, 3,40, 5,40)	(1,00, 3,00, 5,00)	(3,20, 5,00, 7,00)	(3,60, 5,40, 7,40)	(3,00, 5,00, 7,00)	(1,60, 3,40, 5,40)

şöyledir: şiddet (0,469) > fark edilebilirlik (0,274) > olasılık (0,257). Bu bulgu, şiddet risk faktörünün çok daha fazla önem arz ettiğini göstermiştir.

Tablo 4. Bulanık AHP ölçeği (The fuzzy AHP scale)

Dilsel ölçek	Üçgen bulanık ölçek
Eşit önemli	(1,1,1)
Biraz daha önemli	(1,3,5)
Önemli	(3,5,7)
Çok önemli	(5,7,9)
Kesin önemli	(7,9,9)

Risk faktörleri için gerçekleştirilen tüm işlemler değerlendirme kriterleri üzerine de uygulanmıştır. Ardından, kriter önceliklendirme sürecini sonlandırmak için global

önemler tespit edilmiştir. Global önemler, ilgili ana kriterin ve alt kriterlerinin karşılaştırma matrislerinden elde edilen ağırlık değerleri çarpılarak elde edilmiştir. Nihai sonuçları Tablo 6'da görmek mümkündür. Değerlendirme kriterleri için gerçekleştirilen bulanık AHP analizinin sonucunda biyolojik özellikler (0,355) en önemli ana kriter olarak tespit edilmiştir. Alt kriterler için elde edilen yerel ağırlıklara göre, ekonomik özellikler grubunda maliyet (0,344), tasarım ve üretim özellikleri grubunda uyumluluk (0,433), mekanik özellikler grubunda çekme mukavemeti (0,282), fiziksel özellikler grubunda boyutsal kararlılık (0,388), kimyasal özellikler grubunda korozyon direnci (0,337) ve biyolojik özellikler grubunda enfeksiyon (0,266) en önemli elemandır. Global ağırlıklar ise enfeksiyon (0,094), kanserojenlik (0,091) ve çekme mukavemeti (0,077) alt kriterlerinin daha fazla önemli olduğunu göstermiştir.

Tablo 5. Risk faktörlerinin karşılaştırılması (The comparison of the risk factors)

Faktör	Şiddet	Olasılık	Fark edilebilirlik	\tilde{w}	w
Şiddet	(1,00, 1,00, 1,00)	(1,38, 2,29, 2,95)	(1,48, 1,55, 1,55)	(0,34, 0,48, 0,63)	0,469
Olasılık		(1,00, 1,00, 1,00)	(0,72, 0,95, 1,55)	(0,17, 0,24, 0,39)	0,257
Fark edilebilirlik			(1,00, 1,00, 1,00)	(0,20, 0,28, 0,37)	0,274

Tablo 6. Değerlendirme kriterleri için elde edilen sonuçlar (The results obtained for the evaluation criteria)

Ana kriter	\tilde{w}	w	Alt kriter	\tilde{w}	w_L	w_G
K ₁	(0,02, 0,04, 0,08)	0,040	K ₁₁	(0,05, 0,10, 0,25)	0,113	0,005
			K ₁₂	(0,16, 0,33, 0,68)	0,336	0,013
			K ₁₃	(0,19, 0,37, 0,66)	0,344	0,014
			K ₁₄	(0,09, 0,20, 0,44)	0,207	0,008
K ₂	(0,04, 0,07, 0,15)	0,077	K ₂₁	(0,04, 0,07, 0,15)	0,078	0,006
			K ₂₂	(0,03, 0,06, 0,12)	0,063	0,005
			K ₂₃	(0,05, 0,09, 0,18)	0,098	0,008
			K ₂₄	(0,10, 0,19, 0,35)	0,189	0,015
			K ₂₅	(0,07, 0,14, 0,26)	0,139	0,011
			K ₂₆	(0,26, 0,45, 0,75)	0,433	0,033
K ₃	(0,13, 0,28, 0,53)	0,272	K ₃₁	(0,06, 0,12, 0,27)	0,129	0,035
			K ₃₂	(0,12, 0,25, 0,48)	0,243	0,066
			K ₃₃	(0,15, 0,28, 0,55)	0,282	0,077
			K ₃₄	(0,05, 0,11, 0,21)	0,106	0,029
			K ₃₅	(0,03, 0,05, 0,12)	0,058	0,016
			K ₃₆	(0,09, 0,18, 0,36)	0,182	0,049
			K ₃₇	(0,12, 0,26, 0,62)	0,271	0,027
K ₄	(0,05, 0,10, 0,20)	0,100	K ₄₁	(0,12, 0,26, 0,62)	0,271	0,027
			K ₄₂	(0,16, 0,41, 0,87)	0,388	0,039
			K ₄₃	(0,05, 0,10, 0,25)	0,108	0,011
			K ₄₄	(0,11, 0,23, 0,54)	0,233	0,023
K ₅	(0,07, 0,15, 0,32)	0,156	K ₅₁	(0,07, 0,12, 0,25)	0,128	0,020
			K ₅₂	(0,18, 0,36, 0,63)	0,337	0,053
			K ₅₃	(0,08, 0,16, 0,38)	0,177	0,028
			K ₅₄	(0,12, 0,25, 0,47)	0,241	0,038
			K ₅₅	(0,07, 0,12, 0,22)	0,117	0,018
K ₆	(0,20, 0,37, 0,65)	0,355	K ₆₁	(0,10, 0,19, 0,40)	0,191	0,068
			K ₆₂	(0,05, 0,10, 0,23)	0,105	0,037
			K ₆₃	(0,13, 0,28, 0,54)	0,266	0,094
			K ₆₄	(0,06, 0,12, 0,27)	0,123	0,044
			K ₆₅	(0,02, 0,05, 0,14)	0,060	0,021
			K ₆₆	(0,11, 0,27, 0,54)	0,255	0,091

w_L : yerel ağırlık, w_G : global ağırlık

Risk faktörlerinin ve değerlendirme kriterlerinin ağırlıklandırılmasının ardından bulanık EDAS analizi aşamasına geçilmiştir. Tablo 3'te sunulan şiddet, olasılık ve fark edilebilirlik sonuçları kullanılarak bulanık risk öncelik katsayıları hesaplanmıştır. Paslanmaz çelik, titanyum ve kobalt-krom alaşımları için oluşturulan risk karar matrisi Tablo 7'deki gibidir. Risk karar matrisinin oluşturulmasıyla beraber ortalama çözüm değerleri de hesaplanmıştır. Bu değerleri de Tablo 7'nin son iki sütunundan görmek mümkündür.

Ortalama çözüm matrisinin elemanları hesaplandıktan sonra PDA ve NDA değerleri elde edilmiştir. Burada belirtmekte fayda vardır ki, bulanık risk öncelik katsayıları maliyet kriteri olarak dikkate alınmıştır. PDA ve NDA matrisleri Tablo 8'de sunulmuştur.

PDA ve NDA değerleri elde edildikten sonra bunların ağırlıklı toplamları ve ardından normalleştirilmiş değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler doğrultusunda metalik biyomalzemelerin bulanık ve net skorları elde edilmiştir. Bulguları içeren Tablo 9'dan görüldüğü üzere en yüksek skora titanyum (0,766) sahiptir. Bu sonuç, titanyumun en iyi seçenek olduğunu göstermiştir.

Duyarlılık analizi, sonuçların güvenilirliğini ve önerilen yaklaşımların uygulanabilirliğini göstermek için sıklıkla kullanılmaktadır. Bu kapsamda, ana kriterlerin ağırlık değerleri sırasıyla birbiriyle değiştirilmiş ve sonuçlardaki farklılıklar incelenmiştir. Elde edilen bulgular Şekil 4'te sunulmuştur. Bu bulgular, söz konusu bu çalışmanın başarılı ve tutarlı olduğunu göstermiştir.

Her yıl insanlar için kullanılan medikal malzemelerin sayısı artmaktadır. Özellikle, implantlara yönelik artan talep biyomalzemeler üzerindeki çabaları hızlandırmayı gerektirmiştir. Tüm gereksinimleri karşılayabilen bir biyomalzeme bulmak zordur. Günümüzde, yeni teknolojilerin kullanımı ile daha ileri ve fonksiyonel biyomalzemeler geliştirilmeye çalışılmaktadır. Geçmiş, şimdiki ve yeni nesil biyomalzemelerin hangi kriterlere göre nasıl değerlendirileceği hususunda bir belirsizlik olduğu için tüm ihtiyaçlara cevap verebilecek bir seçim mümkün olmamıştır [45]. Biyomedikal uygulamaların başarısı ve karşılaşılabilecek risklerin azaltılması, malzeme özelliklerinin incelenmesi ile ilişkilidir. Önerilen yaklaşım, çalışmadaki biyomalzemelerin güçlü ve zayıf yönlerini geniş kapsamda göstermekte olup, risk yönetimi karar verme sürecine yardımcı olmak için değerli ve etkili bilgiler

Tablo 7. Risk karar matrisi ve ortalama çözümler (The risk decision matrix and average solutions)

Kriter	BRÖ _{PC}	BRÖ _T	BRÖ _{KKA}	$\bar{a}\bar{v}$	av
K ₁₁	(3,11, 5,01, 7,02)	(3,65, 5,58, 7,41)	(3,10, 5,05, 7,03)	(3,28, 5,21, 7,16)	5,22
K ₁₂	(2,88, 4,89, 6,89)	(3,24, 5,12, 6,98)	(3,07, 5,07, 7,02)	(3,06, 5,03, 6,96)	5,02
K ₁₃	(1,82, 3,78, 5,75)	(3,21, 5,11, 7,01)	(2,95, 4,84, 6,79)	(2,66, 4,58, 6,52)	4,58
K ₁₄	(2,45, 4,37, 6,25)	(2,23, 4,14, 6,15)	(2,47, 4,42, 6,37)	(2,38, 4,31, 6,25)	4,31
K ₂₁	(1,61, 3,52, 5,57)	(1,91, 3,83, 5,85)	(1,84, 3,84, 5,79)	(1,78, 3,73, 5,74)	3,74
K ₂₂	(2,47, 4,46, 6,49)	(2,63, 4,81, 6,83)	(2,16, 4,16, 6,19)	(2,42, 4,48, 6,50)	4,47
K ₂₃	(2,46, 4,33, 6,28)	(2,46, 4,33, 6,28)	(2,16, 3,98, 5,98)	(2,36, 4,22, 6,18)	4,24
K ₂₄	(2,08, 3,92, 5,93)	(2,24, 4,24, 6,31)	(2,27, 4,16, 6,19)	(2,20, 4,11, 6,14)	4,14
K ₂₅	(2,14, 4,14, 6,04)	(2,29, 4,39, 6,47)	(2,36, 4,25, 6,20)	(2,26, 4,26, 6,24)	4,26
K ₂₆	(3,53, 5,57, 7,51)	(3,37, 5,50, 7,31)	(3,81, 5,85, 7,73)	(3,57, 5,64, 7,52)	5,59
K ₃₁	(2,96, 5,26, 7,20)	(3,17, 5,46, 7,44)	(2,92, 5,22, 7,05)	(3,02, 5,31, 7,23)	5,22
K ₃₂	(3,35, 5,31, 7,19)	(3,22, 5,17, 7,21)	(3,37, 5,38, 7,36)	(3,32, 5,29, 7,25)	5,29
K ₃₃	(2,85, 4,95, 7,03)	(2,80, 4,87, 6,89)	(2,70, 4,99, 7,07)	(2,78, 4,93, 6,99)	4,91
K ₃₄	(1,90, 4,21, 6,33)	(2,56, 4,68, 6,80)	(2,32, 4,32, 6,33)	(2,26, 4,40, 6,49)	4,39
K ₃₅	(2,19, 4,28, 6,28)	(1,93, 3,85, 5,87)	(2,20, 4,16, 6,19)	(2,11, 4,10, 6,11)	4,10
K ₃₆	(2,08, 4,20, 6,28)	(2,55, 4,53, 6,55)	(3,17, 5,13, 7,14)	(2,60, 4,62, 6,65)	4,62
K ₄₁	(2,36, 4,18, 6,08)	(2,31, 4,24, 6,18)	(2,43, 4,35, 6,25)	(2,37, 4,26, 6,17)	4,26
K ₄₂	(2,55, 4,47, 6,50)	(2,95, 5,05, 7,13)	(2,55, 4,47, 6,50)	(2,68, 4,67, 6,71)	4,68
K ₄₃	(2,13, 4,00, 6,02)	(2,13, 4,00, 6,02)	(1,93, 3,75, 5,76)	(2,07, 3,92, 5,93)	3,96
K ₄₄	(3,27, 5,40, 7,43)	(2,42, 4,43, 6,44)	(2,88, 4,84, 6,85)	(2,86, 4,89, 6,91)	4,89
K ₅₁	(3,22, 5,24, 7,25)	(1,64, 3,74, 5,81)	(2,47, 4,45, 6,47)	(2,44, 4,48, 6,51)	4,48
K ₅₂	(3,72, 5,80, 7,83)	(3,59, 5,60, 7,41)	(3,62, 5,66, 7,54)	(3,64, 5,69, 7,59)	5,65
K ₅₃	(3,23, 5,25, 7,25)	(3,65, 5,69, 7,61)	(3,09, 5,12, 7,14)	(3,33, 5,35, 7,33)	5,34
K ₅₄	(2,70, 4,55, 6,36)	(2,96, 4,82, 6,66)	(2,87, 4,71, 6,52)	(2,85, 4,69, 6,51)	4,69
K ₅₅	(2,12, 4,21, 6,20)	(2,51, 4,35, 6,32)	(2,33, 4,26, 6,23)	(2,32, 4,27, 6,25)	4,28
K ₆₁	(2,82, 4,84, 6,85)	(3,01, 5,08, 7,00)	(3,67, 5,72, 7,67)	(3,16, 5,21, 7,17)	5,19
K ₆₂	(2,33, 4,30, 6,32)	(1,50, 3,38, 5,39)	(2,33, 4,30, 6,32)	(2,06, 3,99, 6,01)	4,01
K ₆₃	(2,82, 4,84, 6,85)	(2,26, 4,26, 6,27)	(2,46, 4,53, 6,56)	(2,52, 4,54, 6,56)	4,54
K ₆₄	(2,88, 4,84, 6,85)	(1,71, 3,66, 5,68)	(2,61, 4,56, 6,56)	(2,40, 4,35, 6,36)	4,37
K ₆₅	(1,40, 3,32, 5,36)	(2,38, 4,27, 6,28)	(1,40, 3,32, 5,36)	(1,72, 3,64, 5,67)	3,67
K ₆₆	(2,52, 4,38, 6,38)	(1,71, 3,66, 5,68)	(2,75, 4,66, 6,69)	(2,33, 4,24, 6,25)	4,26

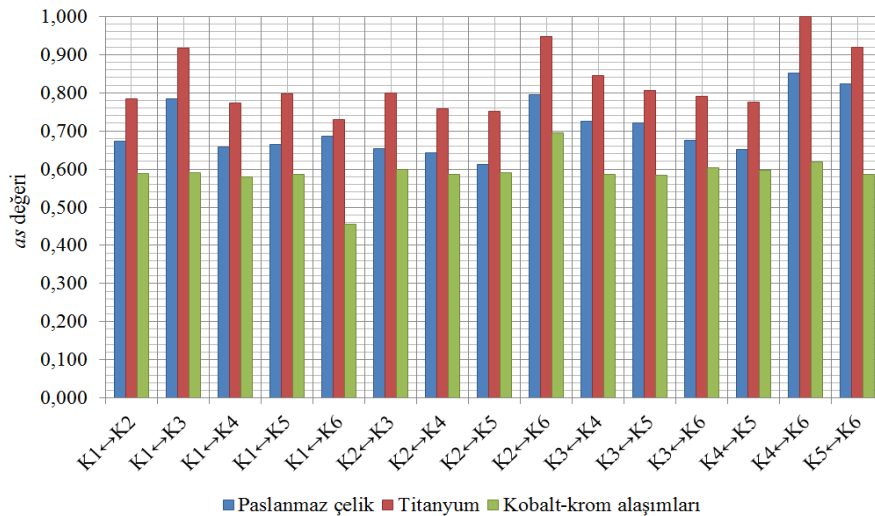
PC: Paslanmaz çelik, T: Titanyum, KKA: Kobalt-krom alaşımları

Tablo 8. PDA ve NDA matrisleri (The PDA and NDA matrices)

Kriter	PDA matrisi			NDA matrisi		
	PDA _{PC}	PDA _T	PDA _{KKA}	NDA _{PC}	NDA _T	NDA _{KKA}
K ₁₁	(-0,72, 0,04, 0,78)	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,72, 0,03, 0,78)	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,67, 0,07, 0,79)	(0,00, 0,00, 0,00)
K ₁₂	(-0,76, 0,03, 0,81)	(0,00, 0,00, 0,00)	(0,00, 0,00, 0,00)	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,74, 0,02, 0,78)	(-0,78, 0,01, 0,79)
K ₁₃	(-0,68, 0,17, 1,03)	(0,00, 0,00, 0,00)	(0,00, 0,00, 0,00)	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,72, 0,12, 0,95)	(-0,78, 0,06, 0,90)
K ₁₄	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,87, 0,04, 0,93)	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,88, 0,01, 0,90)	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,88, 0,03, 0,92)
K ₂₁	(-1,01, 0,06, 1,10)	(0,00, 0,00, 0,00)	(0,00, 0,00, 0,00)	(0,00, 0,00, 0,00)	(-1,02, 0,03, 1,08)	(-1,04, 0,03, 1,07)
K ₂₂	(0,00, 0,00, 0,00)	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,84, 0,07, 0,97)	(-0,90, 0,00, 0,91)	(-0,87, 0,08, 0,99)	(0,00, 0,00, 0,00)
K ₂₃	(0,00, 0,00, 0,00)	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,85, 0,06, 0,95)	(-0,88, 0,03, 0,92)	(-0,88, 0,03, 0,92)	(0,00, 0,00, 0,00)
K ₂₄	(-0,90, 0,05, 0,98)	(0,00, 0,00, 0,00)	(0,00, 0,00, 0,00)	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,94, 0,03, 0,99)	(-0,94, 0,01, 0,96)
K ₂₅	(-0,89, 0,03, 0,96)	(0,00, 0,00, 0,00)	(0,00, 0,00, 0,00)	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,93, 0,03, 0,99)	(-0,91, 0,00, 0,93)
K ₂₆	(-0,70, 0,01, 0,71)	(-0,67, 0,03, 0,74)	(0,00, 0,00, 0,00)	(0,00, 0,00, 0,00)	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,66, 0,04, 0,74)
K ₃₁	(-0,80, 0,01, 0,82)	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,77, 0,02, 0,82)	(0,00, 0,00, 0,00)	(0,00, 0,00, 0,85)	(0,00, 0,00, 0,00)
K ₃₂	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,74, 0,02, 0,76)	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,74, 0,00, 0,73)	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,73, 0,02, 0,76)
K ₃₃	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,84, 0,01, 0,85)	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,84, 0,00, 0,86)	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,87, 0,01, 0,87)
K ₃₄	(-0,93, 0,04, 1,04)	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,93, 0,02, 0,95)	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,90, 0,06, 1,04)	(0,00, 0,00, 0,00)
K ₃₅	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,92, 0,06, 1,02)	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,95, 0,05, 1,02)	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,95, 0,01, 0,99)
K ₃₆	(-0,80, 0,09, 0,99)	(-0,85, 0,02, 0,89)	(0,00, 0,00, 0,00)	(0,00, 0,00, 0,00)	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,75, 0,11, 0,98)
K ₄₁	(-0,87, 0,02, 0,89)	(-0,89, 0,00, 0,90)	(0,00, 0,00, 0,00)	(0,00, 0,00, 0,00)	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,88, 0,02, 0,91)
K ₄₂	(-0,82, 0,04, 0,89)	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,82, 0,04, 0,89)	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,80, 0,08, 0,95)	(0,00, 0,00, 0,00)
K ₄₃	(0,00, 0,00, 0,00)	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,93, 0,04, 1,01)	(-0,96, 0,02, 1,00)	(-0,96, 0,02, 1,00)	(0,00, 0,00, 0,00)
K ₄₄	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,73, 0,09, 0,92)	(-0,82, 0,01, 0,82)	(-0,75, 0,10, 0,94)	(0,00, 0,00, 0,00)	(0,00, 0,00, 0,00)
K ₅₁	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,75, 0,16, 1,09)	(-0,90, 0,01, 0,90)	(-0,73, 0,17, 1,07)	(0,00, 0,00, 0,00)	(0,00, 0,00, 0,00)
K ₅₂	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,67, 0,02, 0,71)	(-0,69, 0,00, 0,70)	(-0,69, 0,02, 0,74)	(0,00, 0,00, 0,00)	(0,00, 0,00, 0,00)
K ₅₃	(-0,74, 0,02, 0,77)	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,71, 0,04, 0,79)	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,69, 0,06, 0,80)	(0,00, 0,00, 0,00)
K ₅₄	(-0,75, 0,03, 0,81)	(0,00, 0,00, 0,00)	(0,00, 0,00, 0,00)	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,76, 0,03, 0,81)	(-0,78, 0,00, 0,78)
K ₅₅	(-0,91, 0,02, 0,97)	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,91, 0,00, 0,92)	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,87, 0,02, 0,93)	(0,00, 0,00, 0,00)
K ₆₁	(-0,71, 0,07, 0,84)	(-0,74, 0,03, 0,80)	(0,00, 0,00, 0,00)	(0,00, 0,00, 0,00)	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,68, 0,10, 0,87)
K ₆₂	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,83, 0,15, 1,12)	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,92, 0,08, 1,06)	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,92, 0,08, 1,06)
K ₆₃	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,83, 0,06, 0,95)	(-0,89, 0,00, 0,90)	(-0,82, 0,07, 0,95)	(0,00, 0,00, 0,00)	(0,00, 0,00, 0,00)
K ₆₄	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,75, 0,16, 1,06)	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,80, 0,11, 1,02)	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,86, 0,05, 0,95)
K ₆₅	(-0,99, 0,09, 1,17)	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,99, 0,09, 1,17)	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,90, 0,17, 1,24)	(0,00, 0,00, 0,00)
K ₆₆	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,79, 0,14, 1,06)	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,88, 0,03, 0,95)	(0,00, 0,00, 0,00)	(-0,82, 0,10, 1,02)

Tablo 9. Bulanık EDAS sonuçları (The fuzzy EDAS results)

Malzeme	\overline{sp}_i ve \overline{sn}_i	$\overline{ns\overline{p}}_i$ ve $\overline{ns\overline{n}}_i$	\overline{as} ve as	Sıra
Paslanmaz çelik	(-0,36, 0,02, 0,40)	(-8,10, 0,49, 9,05)	(-11,27, 0,65, 12,58)	2
	(-0,45, 0,03, 0,50)	(-14,44, 0,82, 16,10)	0,654	
Titanyum	(-0,55, 0,04, 0,64)	(-12,48, 1,01, 14,47)	(-10,10, 0,77, 11,62)	1
	(-0,24, 0,02, 0,27)	(-7,72, 0,54, 8,78)	0,766	
Kobalt-krom alaşımları	(-0,32, 0,01, 0,34)	(-7,31, 0,18, 7,67)	(-11,55, 0,60, 12,71)	3
	(-0,49, 0,03, 0,55)	(-15,79, 1,02, 17,75)	0,590	

**Şekil 4.** Duyarlılık analizi sonuçları (The results of the sensitivity analysis)

sunmaktadır. Bu çalışmanın ana katkıları şunlardır: (1) bu çalışma, metalik biyomalzemeleri karar verme araçları ile

risk perspektifinden değerlendiren ilk girişimdir; (2) paslanmaz çelik, titanyum ve kobalt-krom alaşımları için ilk

kez risk öncelik katsayıları hesaplanmıştır; (3) bulanık ortam altında AHP, HTEA ve EDAS yöntemlerini kullanan bir karar verme yaklaşımı önerilmiştir; (4) farklı bulanık ÇKKV yöntemleri ile bulanık HTEA yönteminin hassasiyeti artırılmıştır. Bu çalışma, mevcut malzemelerin tarafsız değerlendirilmesi ve önceliklendirilmesi için bir temel oluşturmaktadır.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, bulanık AHP, bulanık HTEA ve bulanık EDAS yöntemlerinden oluşan bir karar verme yaklaşımı ile paslanmaz çelik, titanyum ve kobalt-krom alaşımları incelenmiştir. Bulanık AHP yöntemi değerlendirme kriterlerini ve risk faktörlerini analiz etmekte, bulanık HTEA yöntemi malzemelerin risk öncelik katsayılarını hesaplamakta, bulanık EDAS yöntemi ise malzemeleri sıralamaktadır. Elde edilen sonuçların güvenilirliği duyarlılık analizi ile desteklenmiştir. Çalışmanın sonuçları, en iyi seçeneğin titanyum olduğunu göstermiştir. Önerilen yaklaşım şu avantajlara sahiptir: (1) risk karar matrislerine göre karşılaştırma, (2) sıralama amacı için yapılandırılmış farklı bir çerçeve ve (3) riski dâhil eden bir metodoloji. Bu çalışmanın, risklerin sistematik olarak değerlendirmesinde üreticileri, uygulayıcıları ve araştırmacıları desteklemesi ve malzeme bilimi alanındaki ileriki çalışmalar için bir yol haritası sunması beklenmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Hussein M.A., Mohammed A.S., Al-Aqeeli N., Wear characteristics of metallic biomaterials: a review, *Materials*, 8 (5), 2749-2768, 2015.
- Prasad K., Bazaka O., Chua M., Rochford M., Fedrick L., Spoor J., Symes R., Tieppo M., Collins C., Cao A., Markwell D., Ostrikov K., Bazaka K., Metallic biomaterials: current challenges and opportunities, *Materials*, 10 (8), 1-33, 2017.
- Jayabalan M., Biological interactions: causes for risks and failures of biomaterials and devices, *Journal of Biomaterials Applications*, 8 (1), 64-71, 1993.
- Manivasagam G., Dhinasekaran D., Rajamanickam A., Biomedical implants: corrosion and its prevention-a Review, *Recent Patents on Corrosion Science*, 2, 40-54, 2010.
- Turskis Z., Keršulienė V., Vinogradova I., A new fuzzy hybrid multi-criteria decision-making approach to solve personnel assessment problems. case study: director selection for estates and economy office, *Economic Computation and Economic Cybernetics Studies and Research*, 51 (3), 211-229, 2017.
- Stević Ž., Vasiljević M., Puška A., Tanackov I., Junevičius R., Vesković S., Evaluation of suppliers under uncertainty: a multiphase approach based on Fuzzy AHP and Fuzzy EDAS, *Transport*, 34 (1), 52-66, 2019.
- Yürüyen A.A., Ulutaş A., Selection of the third party logistics company with fuzzy AHP and fuzzy EDAS methods, *Journal of Social Sciences of Mus Alparslan University*, 8, 283-294, 2020.
- Singer H., Özşahin Ş., Multicriteria evaluation of structural composite lumber products, *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences*, 5 (5), 807-813, 2020.
- Srivastava P.R., Zhang Z., Eachempati P., Lyu H., An intelligent framework for analyzing the feasible modes of transportation in metropolitan cities: a hybrid multicriteria approach, *Journal of Advanced Transportation*, 2021, 1-22, 2021.
- Ravindran A.R., Bilsel R.U., Wadhwa V., Yang T., Risk adjusted multicriteria supplier selection models with applications, *International Journal of Production Research*, 48 (2), 405-424, 2010.
- Farajiparvar N., Maintenance policy selection using fuzzy FMEA and key performance indicators. Master Thesis, University of Regina, Regina, 2016.
- Zhou Q., Thai V.V., Fuzzy and grey theories in failure mode and effect analysis for tanker equipment failure prediction, *Safety Science*, 83, 74-79, 2016.
- Jahangoshai-Rezaee M., Yousefi S., Valipour M., Dehdar M.M., Risk analysis of sequential processes in food industry integrating multi-stage fuzzy cognitive map and process failure mode and effects analysis, *Computers and Industrial Engineering*, 123, 325-337, 2018.
- Jahangoshai-Rezaee M., Yousefi S., Eshkevari M., Valipour M., Saberi M., Risk analysis of health, safety and environment in chemical industry integrating linguistic FMEA, fuzzy inference system and fuzzy DEA, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 34 (1), 201-218, 2020.
- Hafezalkotob A., Hafezalkotob A., Risk-based material selection process supported on information theory: a case study on industrial gas turbine, *Applied Soft Computing*, 52, 1116-1129, 2017.
- Bahraminasab M., Jahan A., Material selection for femoral component of total knee replacement using comprehensive VIKOR, *Materials and Design*, 32 (8-9), 4471-4477, 2011.
- Kabir G., Lizu A., Material selection for femoral component of total knee replacement integrating fuzzy AHP with PROMETHEE, *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 30 (6), 3481-3493, 2016.
- Jahan A., Edwards K.L., Weighting of dependent and target-based criteria for optimal decision-making in materials selection process: biomedical applications, *Materials and Design*, 49, 1000-1008, 2013.
- Jahan A., Material selection in biomedical applications: comparing the comprehensive VIKOR and goal programming models, *International Journal of Materials and Structural Integrity*, 6 (2-4), 230-240, 2012.
- Petković D., Madić M., Radenković G., Manić M., Trajanović M., Decision support system for selection of the most suitable biomedical material, 5th International Conference on Information Society and Technology, Kopaonik-Serbia, 27-31, 8-11 March, 2015.

21. Chatterjee P., Panchal D., Chakraborty S., A developed meta-model for biomaterials selection, *Trends in Biomaterials and Artificial Organs*, 34 (1), 20-32, 2020.
22. Chowdary Y., Ram V.S., Nikhil E.V.S., Krishna P.N.S.V., Nagaraju D., Evaluation and prioritizing of biomaterials for the application of implantation in human body using fuzzy AHP and TOPSIS, *International Journal of Control Theory and Applications*, 9 (40), 527-533, 2016.
23. 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.
24. Hafezalkotob A., Hafezalkotob A., Interval MULTIMOORA method with target values of attributes based on interval distance and preference degree: biomaterials selection, *Journal of Industrial Engineering International*, 13 (2), 181-198, 2017.
25. Messellek A.C., Ould-Ouali M., Benabid Y., Amrouche A., Beloulla A., Material selection process for femoral component of hip prosthesis using finite element analysis and ranking method, *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 20, 133-134, 2017.
26. Das S.S., Chakraborti P., Bhowmik C., Singh R., Decision-making for selection of most suitable materials for biomedical applications, *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Singapore, 2019.
27. Falchete do Prado R., Esteves G.C., De E.L., Santos S., Griti Bueno D.A., Alves Cairo C.A., Gustavo L., De Vasconcellos O., Sagnori R.S., Bastos F., Tessarin P., Oliveira F.E., De Oliveira L.D., Fernanda M., Villaça-Carvalho L., Rodrigues Henriques V.A., Carvalho Y.R., Reis De Vasconcellos L.M., In vitro and in vivo biological performance of porous Ti alloys prepared by powder metallurgy, *PLoS ONE*, 13 (5), e0196169, 2018.
28. Zhu D., Cockerill I., Su Y., Zhang Z., Fu J., Lee K.W., Ma J., Okpokwasili C., Tang L., Zheng Y., Qin Y.X., Wang Y., Mechanical strength, biodegradation, and in vitro and in vivo biocompatibility of Zn biomaterials, *ACS Applied Materials and Interfaces*, 11 (7), 6809-6819, 2019.
29. Li P., Zhou N., Qiu H., Maitz M.F., Wang J., Huang N., In vitro and in vivo cytocompatibility evaluation of biodegradable magnesium-based stents: a review, *Science China Materials*, 61 (4), 501-515, 2018.
30. Kaya T., Kahraman C., Multicriteria renewable energy planning using an integrated fuzzy VIKOR & AHP methodology: the case of Istanbul, *Energy*, 35 (6), 2517-2527, 2010.
31. Wang Y.M., Chin K.S., Poon G.K K., Yang J.B., Risk evaluation in failure mode and effects analysis using fuzzy weighted geometric mean, *Expert Systems with Applications*, 36, 1195-1207, 2009.
32. Singer H., Özşahin, Ş., Employing an analytic hierarchy process to prioritize factors influencing surface roughness of wood and wood-based materials in the sawing process, *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 42 (5), 364-371, 2018.
33. Ahammed F., Azeem A., Selection of the most appropriate package of solar home system using analytic hierarchy process model in rural areas of Bangladesh, *Renewable Energy*, 55, 6-11, 2013.
34. Öztürk M., Paksoy T., An new interval type-2 hybrid fuzzy rule-based AHP system for supplier selection, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (3), 1519-1535, 2020.
35. Buckley J.J., Fuzzy hierarchical analysis, *Fuzzy Sets and Systems*, 17 (3), 233-247, 1985.
36. Budak A., Ustundag A., Fuzzy decision making model for selection of real time location systems, *Applied Soft Computing*, 36, 177-184, 2015.
37. Carnero M.C., Waste segregation FMEA model integrating intuitionistic fuzzy set and the PAPRIKA method, *Mathematics*, 8 (8), 1-29, 2020.
38. Bozdog E., Asan U., Soyer A., Serdarasan S., Risk prioritization in failure mode and effects analysis using interval type-2 fuzzy sets, *Expert Systems with Applications*, 42 (8), 4000-4015, 2015.
39. Mızrak Özfirat P., A new risk analysis methodology integrating fuzzy prioritization method and failure modes and effects analysis, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29 (4), 755-768, 2014.
40. Li Z., Chen L., A novel evidential FMEA method by integrating fuzzy belief structure and grey relational projection method, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 77, 136-147, 2019.
41. Supçiller A.A., Bayramoğlu S., Wind farm location selection with interval grey numbers based I-GRA and grey EDAS methods, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (4), 1847-1860, 2020.
42. Ghorabae M.K., Zavadskas E.K., Amiri M., Turskis Z., Extended EDAS method for fuzzy multi-criteria decision-making: an application to supplier selection, *International Journal of Computers, Communications and Control*, 11 (3), 358-371, 2016.
43. Hasheminasab H., Zolfani S.H., Bitarafan M., Chatterjee P., Ezabadi A.A., The role of facade materials in blast-resistant buildings: an evaluation based on fuzzy delphi and fuzzy edas, *Algorithms*, 12 (6), 1-15, 2019.
44. Gosain A.K., Chim H., Arneja J.S., Application-specific selection of biomaterials for pediatric craniofacial reconstruction: developing a rational approach to guide clinical use, *Plastic and Reconstructive Surgery*, 123 (1), 319-330, 2009.
45. Haugen H.J., Lyngstadaas S.P., Rossi F., Perale G., Bone grafts: which is the ideal biomaterial?, *Journal of Clinical Periodontology*, 46, 92-102, 2019.