

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**METALİK BİYOMALZEMELERİN DEĞERLENDİRİLMESİNDE
RİSK TEMELLİ BİR KARAR MODELİ ÖNERİSİ**

DOKTORA TEZİ

Hilal SİNGER

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

HAZİRAN 2023

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**METALİK BİYOMALZEMELERİN DEĞERLENDİRİLMESİNDE
RİSK TEMELLİ BİR KARAR MODELİ ÖNERİSİ**

DOKTORA TEZİ

Hilal SİNGER

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Tijen ÖVER ÖZÇELİK

HAZİRAN 2023

Hilal SİNGER tarafından hazırlanan “METALİK BİYOMALZEMELERİN DEĞERLENDİRİLMESİNDE RİSK TEMELLİ BİR KARAR MODELİ ÖNERİSİ” adlı tez çalışması 19.06.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı :

Jüri Üyesi :

Jüri Üyesi :

Jüri Üyesi :

Jüri Üyesi :

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “Biyomalzemelerin Değerlendirilmesinde Risk Temelli Bir Model” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin aboneliği olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(19/06/2023).

Hilal SİNGER

Aileme

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim süresince her konudaki desteği ve yardımlarından dolayı değerli danışman hocam Doç. Dr. Tijen ÖVER ÖZÇELİK'e teşekkürlerimi sunarım. Tez izleme jürimde yer alan ve beni yönlendiren değerli hocalarım Prof. Dr. Cuma BİNDAL ve Doç. Dr. Ayten YILMAZ YALÇINER'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, araştırma konusunun belirlenmesine olan katkılarından dolayı Karadeniz Teknik Üniversitesi öğretim üyelerinden Doç. Dr. Temel VAROL'a, bu zorlu süreçte manevi desteklerini ve anlayışlarını esirgemeyen Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü hocalarım Doç. Dr. Abdullah Cemil İLÇE ve Dr. Öğr. Üyesi Tuğba TUNACAN'a ve tecrübelerini bana aktaran değerli öğretim elemanlarına teşekkürlerimi sunarım. Yüksek lisansa başladığım günden bu güne kadar yardımlarını esirgemeyen, değerli bilgilerinden ve deneyimlerinden yararlandığım Prof. Dr. Şükrü ÖZŞAHİN'e teşekkürlerimi sunarım.

Bugünlere ulaşmamdaki emeklerini hiçbir zaman ödeyemeyeceğim, daima yanımda olan değerli aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hilal SİNGER

İÇİNDEKİLER

Sayfa

| | |
|---|-----------|
| ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ | v |
| TEŞEKKÜR | ix |
| İÇİNDEKİLER | xi |
| KISALTMALAR | xiii |
| SİMGELER | xv |
| TABLO LİSTESİ | xvii |
| ŞEKİL LİSTESİ | xix |
| ÖZET | xxi |
| SUMMARY | xxiii |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI | 5 |
| 2.1. Biyomalzeme Değerlendirme ve Seçme ile İlgili Çalışmalar | 5 |
| 2.2. Çalışmanın Yöntemlerine Yönelik Bir İnceleme | 9 |
| 3. MATERYAL VE YÖNTEM..... | 13 |
| 3.1. Biyomalzemeler..... | 13 |
| 3.1.1. Biyomalzemelerin tanımı | 13 |
| 3.1.2. Biyomalzeme pazar durumu | 14 |
| 3.1.3. Biyomalzemelerin uygulamaları | 15 |
| 3.1.4. Biyomalzemelerin sınıflandırılması | 17 |
| 3.1.4.1. Metalik biyomalzemeler..... | 18 |
| 3.1.4.2. Seramik biyomalzemeler..... | 19 |
| 3.1.4.3. Polimer biyomalzemeler | 20 |
| 3.1.4.4. Kompozit biyomalzemeler | 20 |
| 3.1.5. Biyomalzemelerde istenen özellikler | 20 |
| 3.2. Çok Kriterli Karar Verme | 22 |
| 3.2.1. Karar verme ve türleri | 22 |
| 3.2.2. Çok kriterli karar verme süreci | 25 |
| 3.2.3. Çok kriterli karar verme problemi | 27 |
| 3.2.4. Çok kriterli karar verme yöntemlerinin sınıflandırılması | 28 |
| 3.3. Risk Değerlendirme ve Yönetimi..... | 30 |
| 3.3.1. Risk | 30 |
| 3.3.2. Risk yönetimi | 31 |
| 3.3.3. Sağlık alanında risk ve analizi | 33 |
| 3.3.4. Risk değerlendirme teknikleri..... | 34 |
| 3.4. Bulanık Mantık Yaklaşımı | 36 |
| 3.4.1. Bulanık mantık..... | 36 |
| 3.4.2. Bulanık küme | 37 |
| 3.4.3. Aralıklı tip-2 bulanık küme..... | 39 |
| 3.5. Çalışmanın Yöntemleri..... | 42 |

| | |
|--|------------|
| 3.5.1. Aralıklı tip-2 bulanık analitik hiyerarşi prosesi..... | 42 |
| 3.5.2. Aralıklı tip-2 bulanık hata türleri ve etkileri analizi..... | 45 |
| 3.5.3. Aralıklı tip-2 bulanık ortalama çözüm uzaklığına göre değerlendirme ... | 48 |
| 4. ARAŞTIRMA VE BULGULAR..... | 51 |
| 4.1. Metalik Biyomalzeme İnceleme Problemi ve Değerlendirme Kriterleri | 51 |
| 4.2. Risk Temelli Bir Karar Verme Yaklaşımı..... | 57 |
| 4.3. Aralıklı Tip-2 Bulanık AHP-HTEA-EDAS Uygulaması | 59 |
| 4.4. Karşılaştırma ve Duyarlılık Analizi..... | 85 |
| 5. TARTIŞMA VE SONUÇ..... | 91 |
| KAYNAKLAR..... | 95 |
| ÖZGEÇMİŞ..... | 105 |

KISALTMALAR

| | |
|------------------|--|
| AHP | : Analitik hiyerarşi prosesi |
| ARAS | : Toplanan oran değerlendirme |
| BWM | : En iyi-en kötü yöntemi |
| CODAS | : Birleştirilebilir mesafe bazlı değerlendirme |
| COPRAS | : Karmaşık nisbi değerlendirme |
| ÇKKV | : Çok kriterli karar verme |
| DEMATEL | : Karar verme deneme ve değerlendirme laboratuvarı |
| EDAS | : Ortalama çözüm uzaklığına göre değerlendirme |
| ELECTRE | : Gerçeği açıklayan eleme ve seçim |
| HTEA | : Hata türleri ve etkileri analizi |
| LİNMAP | : Tercihin çok yönlü analizi için doğrusal programlama |
| MARCOS | : Uzlaşma çözümüne göre alternatiflerin ölçülmesi ve sıralaması |
| MOORA | : Oran analizi temeline dayalı çok amaçlı optimizasyon |
| NDA | : Ortalamadan negatif uzaklık |
| ORESTE | : Depolama ve organizasyon ilişkisel özet verisi |
| TOPSİS | : İdeal çözüme benzerliğe göre tercih sıralama tekniği |
| PDA | : Ortalamadan pozitif uzaklık |
| PROMETHEE | : Zenginleştirilmiş değerlendirme için tercih sıralama organizasyonu |
| SAW | : Basit toplamlı ağırlıklandırma |
| VİKOR | : Çok kriterli optimizasyon ve uzlaşık çözüm |
| WASPAS | : Ağırlıklandırılmış bütünsel toplam çarpım değerlendirme |
| WSM | : Ağırlıklı toplam yöntemi |
| WPM | : Ağırlıklı çarpım yöntemi |

SİMGELER

| | |
|----------------------------|--|
| A_i | : Alternatif |
| \tilde{A} | : Bulanık küme |
| $\tilde{\tilde{A}}$ | : Aralıklı tip-2 bulanık küme |
| as_i | : Değerlendirme skoru |
| $\tilde{\tilde{as}}_i$ | : Aralıklı tip-2 bulanık değerlendirme skoru |
| $\tilde{\tilde{av}}_j$ | : Aralıklı tip-2 bulanık ortalama çözüm |
| $BRÖS_i$ | : Bulanık risk öncelik katsayısı |
| K_j | : Kriter |
| $\kappa(\tilde{A})$ | : Durulaştırma fonksiyonu |
| \tilde{M}_i | : Sıradan bulanık sayı |
| n ve m | : Karar elemanı sayısı |
| $\tilde{\tilde{nda}}_{ij}$ | : Aralıklı tip-2 bulanık ortalama çözümden negatif uzaklık |
| $\tilde{\tilde{ns}}_i$ | : Normalize aralıklı tip-2 bulanık pozitif uzaklık |
| $\tilde{\tilde{ns}}_i$ | : Normalize aralıklı tip-2 bulanık negatif uzaklık |
| $\tilde{\tilde{pda}}_{ij}$ | : Aralıklı tip-2 bulanık ortalama çözümden pozitif uzaklık |
| \tilde{r}_i | : Aralıklı tip-2 bulanık geometrik ortalama |
| $\tilde{\tilde{sp}}_i$ | : Ağırlıklı aralıklı tip-2 bulanık pozitif uzaklık |
| $\tilde{\tilde{sn}}_i$ | : Ağırlıklı aralıklı tip-2 bulanık negatif uzaklık |
| x_{ij} | : Alternatifin kriterdeki performans değeri |
| $\tilde{\tilde{x}}_{ij}$ | : Alternatifin kriterdeki aralıklı tip-2 bulanık performans değeri |
| $\mu_{\tilde{A}}$ | : Üyelik fonksiyonu |
| $\mu_{\tilde{\tilde{A}}}$ | : Aralıklı tip-2 üyelik fonksiyonu |
| w | : Net ağırlık |
| \tilde{w} | : Aralıklı tip-2 bulanık ağırlık |
| Z^* ve w'_i | : Durulaştırılmış değer |
| λ_{maks} | : En büyük özdeğer |

TABLO LİSTESİ

Sayfa

| | |
|---|----|
| Tablo 3.1. ÇKKV problemleri için bir karar matrisi. | 27 |
| Tablo 3.2. Bazı durulaştırma yöntemleri ve tanımlamaları. | 39 |
| Tablo 3.3. AHP'nin bir ağırlıklandırma prosedürü. | 44 |
| Tablo 4.1. Aralıklı tip-2 bulanık HTEA ölçeği. | 59 |
| Tablo 4.2. Paslanmaz çelik için şiddet, olasılık ve fark edilebilirlik sonuçları. | 60 |
| Tablo 4.3. Titanyum için şiddet, olasılık ve fark edilebilirlik sonuçları. | 61 |
| Tablo 4.4. Kobalt-krom alaşımları için şiddet, olasılık ve fark edilebilirlik sonuçları | 62 |
| Tablo 4.5. Aralıklı tip-2 bulanık AHP ölçeği. | 63 |
| Tablo 4.6. Risk faktörleri için bulanık karşılaştırma matrisi. | 63 |
| Tablo 4.7. Ana kriterler için bulanık karşılaştırma matrisi. | 64 |
| Tablo 4.8. Ekonomik özellikler kriterinin alt kriterleri için bulanık karşılaştırma matrisi. | 65 |
| Tablo 4.9. Tasarım ve üretim özellikleri kriterinin alt kriterleri için bulanık karşılaştırma matrisi. | 65 |
| Tablo 4.10. Mekanik özellikler kriterinin alt kriterleri için bulanık karşılaştırma matrisi. | 66 |
| Tablo 4.11. Fiziksel özellikler kriterinin alt kriterleri için bulanık karşılaştırma matrisi. | 66 |
| Tablo 4.12. Kimyasal özellikler kriterinin alt kriterleri için bulanık karşılaştırma matrisi. | 67 |
| Tablo 4.13. Biyolojik özellikler kriterinin alt kriterleri için bulanık karşılaştırma matrisi. | 67 |
| Tablo 4.14. Kriter ağırlıklarının özeti. | 68 |
| Tablo 4.15. Risk karar matrisi. | 72 |
| Tablo 4.16. Ortalama çözümler. | 73 |
| Tablo 4.17. PDA matrisi. | 74 |
| Tablo 4.18. NDA matrisi. | 75 |
| Tablo 4.19. Aralıklı tip-2 bulanık EDAS çıktıları. | 76 |
| Tablo 4.20. Paslanmaz çelik için bulanık risk göstergeleri arasındaki benzerlik. | 78 |
| Tablo 4.21. Titanyum için bulanık risk göstergeleri arasındaki benzerlik. | 80 |
| Tablo 4.22. Kobalt-krom alaşımları için bulanık risk göstergeleri arasındaki benzerlik. | 82 |
| Tablo 4.23. Malzemelerin kriter bazındaki bulanık risk göstergeleri için benzerlik ölçüleri. | 84 |

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

| | |
|--|----|
| Şekil 3.1. Biyomalzeme alanının diğer alanlarla etkileşimi. | 14 |
| Şekil 3.2. Ürüne göre 2016-2027 biyomalzeme pazar büyüklüğü..... | 15 |
| Şekil 3.3. Uygulamaya göre 2015-2020 biyomalzeme küresel pazarı..... | 15 |
| Şekil 3.4. Bazı biyomalzemeler ve vücutta uygulanma bölgeleri..... | 16 |
| Şekil 3.5. Doku ile etkileşimlerine göre biyomalzemeler..... | 18 |
| Şekil 3.6. Biyomalzemelerin genel bir sınıflandırması..... | 18 |
| Şekil 3.7. Karar verme süreci..... | 23 |
| Şekil 3.8. Çok kriterli karar modellerinin genel adımları. | 26 |
| Şekil 3.9. ÇKKV yöntemlerinin genel bir sınıflandırması. | 29 |
| Şekil 3.10. Risk yönetim sürecine genel bir bakış. | 32 |
| Şekil 3.11. Koruma ve önleme yaklaşımlarının risk üzerine etkisi. | 32 |
| Şekil 3.12. Risk değerlendirmede kullanılan bazı yöntemler. | 35 |
| Şekil 3.13. Klasik küme (a) ile bulanık küme (b) için üyelik. | 37 |
| Şekil 3.14. Üçgen üyelik fonksiyonu. | 38 |
| Şekil 3.15. Yamuk üyelik fonksiyonu. | 40 |
| Şekil 3.16. Aralıklı tip-2 yamuk üyelik fonksiyonu. | 41 |
| Şekil 3.17. AHP ilkeleri ve adımları. | 43 |
| Şekil 3.18. Bir AHP hiyerarşisi. | 43 |
| Şekil 3.19. Bir HTEA prosedürü. | 46 |
| Şekil 4.1. Çalışmadaki ana ve alt kriterler. | 56 |
| Şekil 4.2. Çalışmanın işleyişi..... | 58 |
| Şekil 4.3. Risk faktörleri için önem ağırlıkları. | 64 |
| Şekil 4.4. Kriterlerin önem ağırlıkları..... | 69 |
| Şekil 4.5. Alt kriterlerin global önemi. | 70 |
| Şekil 4.6. Malzemeler için risk öncelikli endeksler..... | 76 |
| Şekil 4.7. Karşılaştırmalı analiz sonuçları. | 86 |
| Şekil 4.8. Kriter ağırlıklarındaki değişime göre malzemelerin sıralaması..... | 87 |
| Şekil 4.9. Duyarlılık analizi simülasyonu için risk faktörlerinin farklılaştırılmış ağırlıkları..... | 88 |
| Şekil 4.10. Risk faktörlerinin ağırlıklarındaki değişime göre malzemelerin sıralaması | 89 |

METALİK BİYOMALZEMELERİN DEĞERLENDİRİLMESİNDE RİSK TEMELLİ BİR KARAR MODELİ ÖNERİSİ

ÖZET

Metalik biyomalzemeler, ortopedik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu biyomalzemelerin ortopedik cerrahideki ana rolü, kemik ve eklem işlevlerini eski haline getirmek ve mevcut bir ağrıyı gidermektir. Metalik biyomalzemelerin insan vücudunda uzun vadeli etkinliği için metallerin yüksek korozyon direnci, çekme dayanımı ve aşınma direnci gibi arzu edilen özelliklere sahip olması gerekir. Biyomedikal uygulamaların başarısı ve risklerin azaltılması/önlenmesi, malzeme özelliklerinin incelenmesi ile ilişkilidir. Metalik biyomalzemelerin kendine has özellikler içermesi ve maruz kaldıkları biyolojik ortamın agresif ve hassas olması nedeniyle bu malzemelerin doğru bir şekilde değerlendirilmesi ve seçimi önem kazanmıştır.

Diğer karar verme alanlarında olduğu gibi biyomalzeme inceleme sürecinde de bazı sorunlar ve riskler belirir. Bu bağlamda, bilinçli ve doğru kararlar almak bir risk analizini gerektirir. Hata türleri ve etkileri analizi (HTEA), risk analiz araçları arasında en geniş çapta benimsenen etkili yöntemlerdendir. HTEA yöntemi, potansiyel hataları ve zorlukları değerlendirmek ve önlemek için uygulanabilir. HTEA, karar elemanlarını önceliklendirmek için üç risk faktörünün (şiddet, olasılık ve fark edilebilirlik) değerlerini çarparak risk öncelik katsayıları hesaplar. Ancak, klasik HTEA'da belirsiz risk bilgilerinin ifade edilmesi zordur ve hata türlerinin önceliklendirilmesine yönelik bazı sınırlamalar mevcuttur. Çok kriterli karar verme tekniği ve bulanık küme teorisi daha etkin bir risk değerlendirme ve yönetimi sağlama amacıyla HTEA'ya entegre edilebilir.

Bu çalışmada, aralıklı tip-2 bulanık analitik hiyerarşi prosesi (AHP), aralıklı tip-2 bulanık HTEA ve aralıklı tip-2 bulanık ortalama çözüm uzaklığına göre değerlendirme (EDAS) yöntemlerini bütünleştiren bir karar verme yaklaşımı ile metalik biyomalzemeler sınıfı altında yer alan paslanmaz çelik, titanyum ve kobalt-krom alaşımları incelenmektedir. Literatür araştırması ve uzman görüşleri doğrultusunda altı ana kriter, otuz bir alt kriter ve üç risk faktörü belirlenmiştir. Aralıklı tip-2 bulanık AHP kriter ve faktör ağırlıklarını ortaya çıkarırken, aralıklı tip-2 bulanık HTEA'nın sağladığı risk öncelik katsayıları aralıklı tip-2 bulanık EDAS ile analiz edilmektedir. Risk faktörleri için elde edilen sıralama düzeni şiddet > fark edilebilirlik > olasılık şeklindedir. Ana kriterler için elde edilen önem ağırlıklarına göre biyolojik özellikler en öncelikli gruptur. Ayrıca, ekonomik özellikler grubu içerisinde maliyet, tasarım ve üretim özellikleri grubu içerisinde uyumluluk, mekanik özellikler grubu içerisinde çekme mukavemeti, fiziksel özellikler grubu içerisinde boyutsal kararlılık, kimyasal özellikler grubu içerisinde korozyon direnci, biyolojik özellikler grubu içerisinde ise enfeksiyon öncelikli alt kriterlerdir. Global önem ağırlıklarına göre enfeksiyon, kanserojenlik ve çekme mukavemeti en öncelikli karar

kriterleridir. Malzemelerin öncelik sıralaması ise titanyum > paslanmaz çelik > kobalt-krom alaşımları şeklindedir. Bu sıralama sonucuna dayanarak, titanyumun en iyi malzeme seçeneği olduğu söylenebilir.

Bu çalışma, metalik biyomalzemelerin incelenmesi için geniş bir çerçeve ve risk temelli bir karar verme yaklaşımı sunmaktadır. Mevcut çalışma, farklı alternatiflerin değerlendirilmesinde ve seçiminde etkili ve bilinçli kararlar almak için bir yol haritası sunmaktadır.

A RISK-BASED DECISION MODEL PROPOSAL IN THE EVALUATION OF METALLIC BIOMATERIALS

SUMMARY

Metallic biomaterials are widely used in orthopedic applications. The main role of these biomaterials in orthopedic surgery is to restore bone and joint functions and to eliminate an existing pain. For the long-term effectiveness of metallic biomaterials in the human body, metals need to have desired properties such as high corrosion resistance, tensile strength, and wear resistance. Metallic biomaterials have significant effects on various aspects such as human health, medical treatments, and quality of life. The success and risk reduction/prevention in biomedical applications are linked to the examination of material properties. Due to the unique properties of metallic biomaterials and the aggressive and sensitive nature of the biological environment they are exposed to, it has become important to evaluate and select these materials correctly. Biomaterials should be economically reasonable and their development should be supported for long-term service. Additionally, the consideration of design and production requirements is important in the material selection process. On the other hand, materials possess different combinations of physical, mechanical, chemical, and biological properties. Hence, the metallic biomaterial examination problem necessitates the simultaneous consideration of multiple criteria.

In the biomaterial evaluation process, similar to other decision-making areas, some problems and risks may arise. In this context, making informed and accurate decisions requires a risk analysis. The failure modes and effects analysis (FMEA) is one of the most widely adopted and effective methods among risk analysis tools. The FMEA method can be utilized to assess and prevent potential failures and challenges. The FMEA calculates risk priority coefficients by multiplying the values of three risk factors (severity, occurrence, and detectability) to prioritize decision elements. However, the classical FMEA method has faced criticism due to some limitations. It is commonly acknowledged that all risk factors carry equal importance. The use of discrete ordinal scales in calculating risk priority numbers leads to a large number of intervals between these coefficients. Additionally, the assessment of risk levels for decision elements based on risk factors relies on precise numerical judgments. Nevertheless, obtaining exact numerical values can be challenging, and at times even impossible, in many applications due to problem complexity, limitations of human thinking, subjectivity, and data constraints. The multicriteria decision-making technique and fuzzy set theory can be integrated into the FMEA to provide more effective risk assessment and management.

In this study, stainless steel, titanium, and cobalt-chromium alloys, which fall within the category of metallic biomaterials, are examined using a decision-making approach that integrates the interval type-2 fuzzy analytical hierarchy process (AHP),

the interval type-2 fuzzy FMEA, and the interval type-2 fuzzy evaluation based on distance from an average solution (EDAS). Based on the literature review and expert opinions, six main criteria, thirty-one subcriteria, and three risk factors are identified. The risk factors considered in the study are severity, occurrence, and detectability. The material properties are finalized under six groups: (i) economic properties, (ii) design and production properties, (iii) mechanical properties, (iv) physical properties, (v) chemical properties, and (vi) biological properties. The subcriteria of economic properties are identified as funding trend for research, development, and application, longevity, cost, and availability. The subcriteria of design and production properties are determined as ease of production, lightness, machinability, sterilizability, formability, and compatibility. The subcriteria of mechanical properties are specified as wear resistance, fatigue resistance, tensile strength, toughness, hardness, and time-dependent deformation. The subcriteria of physical properties are identified as density, dimensional stability, conductivity, and magnetic susceptibility. The subcriteria of chemical properties are defined as ion release, corrosion resistance, reactivity, biodegradation, and pH changes. Lastly, the subcriteria of biological properties are determined as osseointegration, allergenic effect, infection, toxicity, calcification, and carcinogenicity. While the interval type-2 fuzzy AHP reveals the criterion and factor weights, the risk priority coefficients provided by the interval type-2 fuzzy FMEA are analyzed via the interval type-2 fuzzy EDAS. In the biomaterial evaluation process, many experts are asked to complete a questionnaire consisting of the following items: (i) what is the severity of each material property in relation to human health, medical treatments, and quality of life after an undesired event occurs?, (ii) what is the probability of a failure or risk occurring?, and (iii) how easy is it to detect a failure or risk before it happens?. The experts provide judgments based on their personal knowledge and expertise. The ranking order obtained for the risk factors is as follows: severity > detectability > occurrence. According to the importance weights obtained for the main criteria, the highest priority group is biological properties. Furthermore, the subcriteria possessing the highest local importance are: cost in the economic properties group, compatibility in the design and production properties group, tensile strength in the mechanical properties group, dimensional stability in the physical properties group, corrosion resistance in the chemical properties group, and infection in the biological properties group. According to the global importance weights, infection, carcinogenicity, and tensile strength are the top priority decision criteria. Therefore, in biomaterial evaluation and selection, more importance should be given to these decision criteria. The priority order of the materials is titanium > stainless steel > cobalt-chromium alloys. Based on this ranking result, it can be said that titanium is the best material option.

This study presents a comprehensive framework and a risk-based decision-making approach for the examination of metallic biomaterials. The proposed approach considers the risks associated with the decision-making process. By doing so, it provides a structured framework that facilitates effective decision-making, even in the face of uncertainties. Moreover, it offers an alternative and well-defined framework specifically tailored for ranking decision elements. The key strength of this approach lies in its ability to enable comparisons through the utilization of a risk decision matrix. This matrix allows for a comprehensive evaluation of various options by enabling a thorough assessment of their associated risks. By incorporating

the risk analysis into the decision-making process, this study addresses a crucial aspect of biomaterial examination. This ensures that decision-makers have a holistic understanding of the potential risks associated with each option and enables them to make informed choices. As a result, the current study provides a roadmap for making informed and effective decisions in the evaluation and selection of various alternatives.

1. GİRİŞ

Bilim ve teknolojideki ilerlemeler, tıp ve mühendislik alanlarında disiplinlerarası araştırmalara hız ve yön vermiştir. Bu durum, hastaların tedavisinde uygulanan materyallerin ve metotların gelişmesine büyük katkıda bulunmuştur. İnsan yaşam kalitesi ve ömrü hasarlı, hastalıklı veya yaşlanmış dokuların neden olduğu tıbbi komplikasyonlar dâhil olmak üzere birçok faktörden etkilenir. Günümüzde, insan vücudundaki kusurlu yapıların işlevlerinin onarılması, değiştirilmesi, sürdürülmesi veya artırılması için daha ileri cerrahi teknikler, biyomedikal araçlar ve malzemeler arayışı içerisine girilmiştir.

Medikal bilimlerdeki keşifler, biyolojik sistemle etkileşime girerek kusurlu doku veya organ ile karşılaşılan problemlerin üstesinden gelen birçok biyomalzeme sağlamıştır. İnsanların yaşlanması, teknoloji ile yaşam tarzındaki değişimler, yaşam beklentisinin artması, estetik gereksinim ve daha iyi işlev ihtiyacı gibi birçok faktör biyomalzeme talebini artırmıştır. Biyomalzeme kullanımının sıklaşmasıyla beraber alerji, enfeksiyon, nekroz, ağrı ve dejenerasyon gibi bazı sorunların görülme sıklığı artmıştır. Bu nedenle, biyomalzemelerin değerlendirilmesi ve en uygun seçeneğin belirlenmesi büyük önem kazanmıştır [1].

Metal esaslı biyomalzemeler, yüksek mukavemet ve kolay şekil alabilirlik gibi bazı özellikleri nedeniyle biyomedikal uygulamalarda sıkça tercih edilmektedir. Paslanmaz çelikler, kobalt-krom alaşımları, titanyum ve titanyum alaşımları uygulamalarda yoğun olarak kullanılan metal ve alaşımlarıdır. Metal esaslı biyomalzemeler üstün özelliklere haiz olduğu gibi bazı dezavantajlara da sahiptir. Örneğin, aşınma nedeniyle toksik metal iyonları vücuda salınabilmektedir. Öte yandan, paslanmaz çeliklerin zayıf yorulma dayanımı ve/veya plastik deformasyona uğrama eğilimi nedeniyle ortopedik implantlarda kalıcı arızaları olabilmektedir. Kobalt-krom alaşımları, kanserojen iyonlar salabilir. Titanyumun oksit tabakasının aşınması ile vücuda salınan atık parçacıklar istenmeyen bir doku tepkisine sebep olabilir [2]. Bu ve benzeri durumlar, metalik biyomalzemelerin risk açısından

değerlendirilmesinin ve güçlü ve zayıf yönlerinin geniş bir açıdan ortaya çıkarılmasının önemli olduğunu göstermektedir.

Biyomalzeme değerlendirme ve seçme, biyouyumluluk gibi önemli gereksinimler nedeniyle karmaşık ve zordur. Kullanılan biyomalzeme vücut tarafından kabul görmeli, alerji ve iltihaplanma gibi olumsuz durumlara sebep olmamalı, maruz kalınan kuvvetlere karşı yeterli dayanıma haiz olmalı ve uzun süre bozulmadan kalabilmelidir. Lakin biyolojik sistemle malzeme arasındaki istenmeyen etkileşimler çeşitli risklerin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle, biyomalzemelerin güvenlik ve performans yönlerinin risk yönetimi perspektifinden araştırılması ve incelenmesi önemlidir. Malzeme özellikleri, cerrahi yetkinlik ve hastanın sağlık durumu biyomalzemelerin başarısını etkileyen önemli faktörlerdir [3, 4].

Malzemelerle ilgili karar verme işlemlerinde farklı boyutlardan birçok değerlendirme kriteri dikkate alınır. Biyomalzemeler, her kriter üzerinde kendilerine özgü farklı bir performansa sahiptir. Dolayısıyla, biyomalzemelerin değerlendirilmesi ve seçimi çok kriterli karar verme (ÇKKV) problemi olarak ele alınabilir. ÇKKV, en uygun seçeneğin belirlenmesinde kriterlerin fayda ve maliyet bilgisini dikkate alabilen ve karar vericilerin görüşlerini kullanabilen bir tekniktir. Bazı karar elemanlarının subjektif/nitel olması ve bunların dilsel bilgiler ile tanımlanabilmesi karar vericinin tercihlerini kesin sayısal değerlerle ifade etmesini zorlaştırır. Değerlendirme sürecinin daha esnek ve uygun olabilmesi için bulanık küme teorisini içeren ÇKKV yöntemleri sıkça kullanılmaktadır. Bulanık analitik hiyerarşi prosesi (AHP), bulanık ideal çözüme benzerliğe göre tercih sıralama tekniği (TOPSİS), bulanık çok kriterli optimizasyon ve uzlaşık çözüm (VIKOR) ve bulanık ortalama çözüm uzaklığına göre değerlendirme (EDAS) popüler bulanık ÇKKV yöntemlerinden bazılarıdır.

Bulanık ÇKKV tekniği, risk yönetimi kapsamında incelenen sorunlara çözümler sağlamaya yardımcı olur. Karar modellerindeki risk iki farklı şekilde yorumlanabilir: (i) mevcut bilgiler ile alakalı iyimserlik derecesinin göstergesi ve (ii) olumsuz etkilerin yoğunluğu ve olasılığı. Diğer karar verme alanlarında olduğu gibi malzeme inceleme sürecinde de farklı sorunlar belirir. Nominal ve gerçek değer arasındaki fark ile aşınma ve yorulma gibi durumların dejenerasyona sebebiyet vermesi buna örnektir [5]. Bu bağlamda, bilinçli ve doğru kararlar almak risk analizini gerektirir.

Risk analizi, insan sağlığına ve güvenliğine yönelik risklerin bir tahminini geliştirmeye, çevreyi ve ürün kalitesini etkileyen süreçlerin tehditlerini anlamaya ve önleyici eylemler belirleyip uygulamaya yardımcıdır. Hata türleri ve etkileri analizi (HTEA) bir tasarımdaki, sistemdeki, hizmetteki veya süreçteki hataların ve zorlukların değerlendirilmesi ve yüksek risk arz edenlerin tespit edilip iyileştirilmesi için sıklıkla kullanılan bir risk analiz yöntemidir. Bu yöntem, karar ögelerinin şiddet, olasılık ve fark edilebilirlik derecelerinin çarpımı ile hesaplanan risk öncelik katsayısına göre nceliklendirme işlemine gerçekleştirmektedir. Lakin katsayının hesaplanması ve kullanımı ile ilgili bazı sınırlamalar mevcuttur.  risk faktörü arasındaki önemin dikkate alınmaması, risk faktörlerinin farklı kombinasyonlarının aynı sonucu vermesi ve risk faktörleri için kesin sayısal değerlendirme yapmanın zor olması bu sınırlamalardan birkaçıdır. HTEA'yı daha etkili kılmak için bulanık küme teorisi ile ÇKKV yöntemlerinden faydalanılabilir [6].

Bu çalışmanın amacı; risk temelli bir karar verme yaklaşımının sunulması, metalik biyomalzemelerin özelliklerinin tanımlanması ve ağırlıklarının ortaya çıkarılması, her bir özellik altında risk öncelik katsayılarının hesaplanması suretiyle malzemelerin incelenmesi ve biyomedikal uygulamaların iyileştirilmesine ve insan sağlığının ve güvenliğinin artırılmasına katkıda bulunulmasıdır. Çalışma, biyomalzemelerin düzenlenmesini desteklemek için yeni bilimsel sonuçları entegre edebilecek ve farklı uygulama alanlarına adapte edilebilecek risk temelli model sunmaktadır. Çalışmanın araştırma soruları şu şekilde sıralanabilir:

- Metalik biyomalzemelerin güvenilir ve kullanışlı olarak nitelendirilebilmesi için ne tür gereksinimleri karşılaması gerekir?
- Metalik biyomalzeme değerlendirme ve seçme sürecinde hangi niteliklere daha fazla önem verilmelidir?
- Metalik biyomalzemelerin hangi yönleri daha fazla risk ihtiva etmektedir?
- Metalik biyomalzemeler karşılaştırıldığında hangisi en iyi olarak kabul edilebilir?
- Biyomedikal uygulamalardaki risklerin ve hataların anlaşılıp iyileştirilmesine katkıda bulunabilecek, farklı uygulama alanlarına adapte edilebilecek ve belirsizlikleri ele alabilecek nasıl bir karar verme yaklaşımı sunulabilir?

Literatürdeki çalışmaların aksine, bu çalışma metalik biyomalzemeler sınıfı altında yer alan paslanmaz çelik, titanyum ve kobalt-krom alaşımlarını geniş bir yapı içerisinde risk açısından incelemektedir. Bu amaç için aralıklı tip-2 bulanık AHP, aralıklı tip-2 bulanık HTEA ve aralıklı tip-2 bulanık EDAS yöntemlerini içeren bütünleşik yeni bir karar verme yaklaşımı önerilmektedir. Bu çalışmanın, risk ve hata değerlendirme sürecinde üreticiler, uygulayıcılar ve araştırmacılar için destekleyici olması ve ileriki çalışmalara rehberlik etmesi beklenmektedir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Biyomalzeme Değerlendirme ve Seçme ile İlgili Çalışmalar

Malzeme seçimi, ürünlerin tasarımı ve geliştirilmesi ile üreticilerin rekabet gücü ve başarısı açısından oldukça önemlidir. Seçilen malzemeler nihai tasarımı, kullanıcı memnuniyetini ve üretim verimliliğini büyük ölçüde etkiler. Malzeme seçimindeki yanlışlık ürün performansının azalmasına, maliyet artışlarına ve ürünün veya bileşeninin erkenden eskimesine yol açabilir. Binaenaleyh, malzeme seçimi araştırmacılar arasında büyük ilgi görmeye başlamıştır. Bir dizi ürün gereksiniminin karşılanmasında karar destek araçlarından sıkça faydalanılmaktadır.

Biyomalzemelerin yaygın ve giderek artan medikal uygulamaları göz önüne alındığında, doğru bir şekilde değerlendirilmeleri büyük önem taşımaktadır. Biyomalzemelerin güvenlik ve performans özelliklerinin birlikte ele alınıp incelenmesi gerekir. Biyomalzemelerin biyolojik performansı genellikle *in vitro* ve *in vivo* testler ile incelenmektedir. Diğer malzeme sınıfları ile kıyaslandığında biyomalzemelerin çok kriterli incelenmesine ilişkin karar problemlerine odaklanan az sayıda çalışma mevcuttur. Biyomalzeme değerlendirme ve seçme ile ilgili ÇKKV çalışmaları hakkında aşağıda bilgi verilmiştir.

Bahraminasab ve Jahan [7], insan yaşamının ömrünü ve kalitesini artırma amacıyla total diz protezinin femoral bileşeni için kapsamlı VİKOR yöntemine dayalı bir malzeme seçim stratejisi önermişlerdir. Çalışmalarında yoğunluk, çekme mukavemeti, elastikiyet modülü, uzama, korozyon direnci, aşınma direnci ve kemik bütünleşmesi kriterleri dikkate alınarak farklı bileşimli malzemeler değerlendirilmiştir. Kriterlerin öneminin belirlenmesi için modifiye edilmiş dijital mantık yaklaşımı ve revize edilmiş Simos ağırlıklandırma yöntemi kullanılmıştır. Kapsamlı VİKOR yöntemi ile malzemeler sıralanmış ve sonuçların güvenilirliği duyarlılık analizi ile incelenmiştir.

Jahan [8], biyomalzeme seçiminde farklı türden kriterleri ele almak için kapsamlı VİKOR yönteminin kullanılabileceğini belirtmiş ve eş zamanlı malzeme seçimi ve tasarım optimizasyonu için bir hedef programlama modeli tasarlamıştır. Çalışmada,

doku toleransı, korozyon direnci, çekme mukavemeti, yorulma direnci, tokluk, aşınma direnci, elastikiyet modülü, yoğunluk ve maliyet kriterlerine göre aday malzemeler sıralanmış ve önerilen modelin sonucu karşılaştırmalı analiz ile doğrulanmıştır. Araştırmacının arkadaşlarıyla gerçekleştirdiği daha önceki bir çalışmada da aynı problem üzerine kapsamlı VİKOR yöntemi uygulanmıştır. Araştırmacılar, bu yöntemin biyomedikal uygulamalardaki malzeme seçim sonuçlarının kesinliğini artırabileceğini ifade etmişlerdir [9].

Jahan ve Edwards [10] çalışmalarında, bağımlı bir ağırlıklandırma stratejisi ve farklı tür katsayıların birleştirilebilmesi için bir yaklaşım tasarlamışlardır. Bu yaklaşım biyomedikal uygulamalar üzerinden doğrulanmıştır. Çalışmadaki ilk örnek, amalgam diş dolgu malzemesi seçiminde bağımlı ağırlıklandırmanın önemini ve farklı tür ağırlıklandırma sonuçlarının nasıl birleştirileceğini göstermektedir. İkinci örnek ise kalça eklem protezi malzeme seçim problemi ile ilgilidir. Amalgam diş dolgu malzemesi seçim probleminde kullanılan kriterler şunlardır: 1 saat sonraki basınç dayanımı, 7 gün sonraki basınç dayanımı ve sünme. Diğer problem ise doku toleransı, korozyon direnci, çekme mukavemeti, yorulma direnci, tokluk, aşınma direnci, elastikiyet modülü, özgül ağırlık ve maliyet kriterlerini içermektedir. Kriterlerin objektif ağırlıkları modifiye edilmiş entropi yöntemi uygulanarak, diğer ağırlıkları ise AHP ve modifiye edilmiş dijital mantık yaklaşımı kullanılarak hesaplanmıştır. Sıralama amacı için genişletilmiş TOPSİS ve kapsamlı VİKOR kullanılmıştır.

Petković ve ark. [11], eksik kemik kısımlarının telafisi için uygun biyomalzemenin belirlenmesi üzerine çalışmışlardır. Karar verme sürecini kolaylaştırma gayesiyle karar destek sistemi geliştirmişlerdir. Aday malzemelerin sıralanması için literatürden derlenen veriler TOPSİS, VİKOR ve ağırlıklandırılmış bütünleşik toplam çarpım değerlendirme (WASPAS) analizlerine tabi tutulmuştur. Çalışma sonuçlarının güvenilirliği duyarlılık analizi ve korelasyon analizi gerçekleştirilerek incelenmiştir.

Hafezalkotob ve Hafezalkotob [12], biyomalzeme seçimi için hedef tabanlı bir MULTİMOORA yöntemi önermişlerdir. Önerilen yöntem, literatürdeki kalça ve diz eklemi protez malzemesi seçim problemleri üzerine uygulanmıştır. Bilgi entropisi, standart sapma ve kriterler arası korelasyon etki ölçümleri ile uzmanlarca atanan

önem dereceleri nihai kriter ağırlıklarını belirlemede dikkate alınmıştır. Malzemeler önerilen yöntem ile sıralandıktan sonra, sonuçlar önceki çalışmalar ve farklı yöntemlerin çıktıları ile tartışılmıştır. Araştırmacılar başka bir çalışmada, malzeme özelliklerinin ve bunların hedef değerlerinin aralıklı sayılar şeklinde ifade edildiği problemler için genişletilmiş bir MULTIMOORA yöntemi sunmuşlardır [13].

Chowdary ve ark. [14], biyomedikal implantasyonlara yönelik bazı malzemeleri çekme mukavemeti, deformasyon dayanımı, young modülü, yoğunluk, termal iletkenlik, dielektrik sabiti ve poisson oranı açısından sıralamak için bulanık Chang AHP yöntemi entegreli TOPSİS yaklaşımını kullanmışlardır. Çalışmanın sonuçlarına göre; termal iletkenlik en önemli değerlendirme kriteri, polieter eter keton en uygun seçenektir.

Kabir ve Lizu [15], total diz protezinin femoral bileşenine uygun malzemenin belirlenmesine yönelik bir karar verme yaklaşımı sunmuşlardır. İlk olarak, Delphi yöntemi aracılığıyla karar probleminin yapısı ve içeriği belirlenmiştir. Kriterlerin ağırlıklarını hesaplamak için modifiye bulanık Chang AHP yöntemi kullanılmıştır. Alternatiflerin sıralanması ve duyarlılık analizi için zenginleştirilmiş değerlendirme için tercih sıralama organizasyonu (PROMETHEE) yöntemi uygulanmıştır.

Messellek ve ark. [16], bir femoral komponentin sap ve baş kısımları için en uygun malzemeleri belirlemeye çalışmışlardır. Çalışmada, malzemelerin strese karşı dayanımları, kayma davranışları, temas basınçları ve güvenlik özellikleri çeşitli açılardan incelenmiştir. Sonlu elemanlar analizi uygulanarak on iki malzeme çifti için performans değerleri tahmin edilmiştir. Kapsamlı VİKOR yöntemi, karar kriterlerinin ağırlıklarına ve hesaplanan performans değerlerine göre en uygun seçeneğin tayini için kullanılmıştır. Son aşamada, kriter ağırlıklarının sıralama düzeni üzerindeki etkisini ortaya çıkarmak için duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir.

Aherwar ve ark. [17], farklı yüzdelerde (%0 → %4) molibden içeren bir dizi implant malzemesinin aşınma, fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Yoğunluk, sertlik, basınç dayanımı ve aşınma davranışı değerlendirme kriterleri olarak kabul edilmiştir. Alternatifler kümesi içerisinde en iyi malzemeyi seçmek için gri ilişkisel analiz uygulanmıştır. Çalışma sonuçları, ağırlıkça %4 molibden içeren kobalt-30krom implant malzemesinin en iyi kombinasyonu sağladığını göstermiştir.

Aherwar ve ark. [18] çalışmalarında, molibden, nikel ve tungsten ile modifiye edilmiş kobalt-krom implant malzemelerinin fiziksel, mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Malzeme seçim kriterleri olarak yoğunluk, sertlik, basınç dayanımı, sürtünme katsayısı ve hacimsel aşınma dikkate alınmıştır. Kriterlerin önemi entropi yöntemi ile belirlenirken, alternatifler PROMETHEE yöntemi kullanılarak sıralanmıştır.

Das ve ark. [19], kalça eklem implantları ile ilgili malzeme seçim problemi üzerine odaklanmışlardır. Mekanik gevşeme, aşındırıcı parçacık boyutu ve doğrusal aşınma çalışmanın kriterleri olarak belirlenmiştir. Alternatif malzemeler AHP, ağırlıklı çarpım yöntemi (WPM) ve TOPSİS ile sıralanmış ve sıralama sonuçları mukayese edilmiştir.

Pamucar ve ark. [20], kaba sayılara dayalı AHP ve birleştirilebilir mesafe bazlı değerlendirme (CODAS) yöntemlerini birleştiren bir yaklaşım önermişlerdir. Doku toleransı, korozyon direnci, çekme mukavemeti, yorulma direnci, tokluk ve aşınma direncinin maksimize, elastikiyet modülü, yoğunluk ve maliyetin ise minimize edilmek istendiği bir biyomalzeme seçim problemi üzerine önerilen yaklaşım uygulanmıştır. Duyarlılık analizi ile karşılaştırmalı analiz sonuçları, bütünleşik modelin oldukça iyi bir performans haiz olduğunu göstermiştir.

Chatterjee ve ark. [21], kalça ve diz eklemi protezlerinin femoral bileşenleri için en uygun malzemelerin belirlenmesi üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarında, deney tasarımı ve EDAS yöntemini içeren bir karar verme yaklaşımı önermişlerdir. Araştırmacılar, yoğunluk ve elastikiyet modülünün nihai karara varmada önemli olduğunu ve önerilen yaklaşımın mevcut biyomalzeme seçim yaklaşımlarına göre mükemmel bir performans gösterdiğini öne sürmüşlerdir.

Sofuoğlu [22], referans ideal metodu ile yeni bir biyomalzeme seçim yaklaşımı önermiştir. Önerilen yaklaşımın uygulanabilirliğini göstermek için literatürdeki biyomalzeme seçim problemleri ele alınmıştır. Kriterlerin önem derecelerinin belirlenmesinde modifiye edilmiş dijital mantık, Simos ağırlıklandırma yöntemi, standart sapma ve bağımlı ağırlıklandırma dikkate alınmıştır. Sıralama amacı için referans ideal metodu kullanılmıştır.

Das ve ark. [23] çalışmalarında, kalça implantlarının asetabular astarı için yüksek yoğunluklu polietilen ve hidroksiapatit karışımından üç polimer blend imalatını gerçekleştirmekte ve bunların mekanik test sonuçlarını ve yüzey karakterizasyon işlemlerini sunmaktadırlar. Seçenekler sertlik, pürüzlülük ve aşınma oranı açısından TOPSİS yöntemi ile analiz edilmiştir.

Kumar ve ark. [24], eşit ağırlıklar yöntemi, ağırlıklı toplam yöntemi (WSM), WPM, WASPAS, EDAS ve TOPSİS kullanan bir karar verme yaklaşımı sunmuşlardır. Nihai sıralamalar üyelik derecesi tekniği ile belirlenmiş ve entropi, standart sapma ve bulanık AHP yöntemleri ile farklılaştırılan ağırlıklar kullanılarak mevcut işlemler tekrar edilmiştir. Sonuçlar, önerilen yaklaşımın uygulanabilir olduğunu göstermiştir.

Önceki çalışmalar, genellikle literatürde yer alan biyomalzeme seçim problemleri üzerinden çeşitli karar verme yaklaşımlarını doğrulamaktadır. Kaynak araştırmasına dayanarak; biyomalzeme seçiminde dikkate alınan kriter sayısının yetersiz olduğunu, belirsizlikle başa çıkmada çalışmaların eksiklikler içerdiğini ve problemlerin risk temelinde incelenmediğini söylemek mümkündür. Bu çalışma, literatürdeki çalışmaların aksine, çok sayıda kriter kullanarak aralıklı tip-2 bulanık ortam altında ÇKKV ve risk analizi ile biyomalzemeleri incelemektedir.

2.2. Çalışmanın Yöntemlerine Yönelik Bir İnceleme

Risk değerlendirmesi; hem risklerin boyutunun belirlenmesini sağlar, hem de potansiyel hataların ve zorlukların canlılar, ekipmanlar, çevre ve malzemeler üzerindeki etkilerini incelemeye yardımcı olur. HTEA, risk analiz araçları arasında en geniş çapta benimsenen yöntemlerdendir. Klasik HTEA'daki önemli sorunlardan biri, belirsiz risk bilgilerinin ifade edilmesidir. Bu nedenle, birçok araştırmacı bulanık küme teorisini HTEA'ya entegre etmiştir. Son zamanlarda, aralıklı tip-2 bulanık HTEA yöntemi etkinliği nedeniyle ilgi görmeye başlamıştır. Bu yöntem, iyi bilinen diğer bulanık HTEA versiyonlarından daha yeni olduğu için literatürdeki kullanımı biraz dardır. Bozdağ ve ark. [25], α -kesim ve aralıklı tip-2 bulanık küme tabanlı bir HTEA yöntemi önermişlerdir. Akyuz ve Celik [26], denizcilikteki petrol sızıntısının potansiyel sorunlarını ve etkilerini söz konusu yöntem ile incelemişlerdir. Đurić ve ark. [27], yazılım hata analizi için aralıklı tip-2 bulanık HTEA, aralıklı tip-2 bulanık AHP ve karmaşık nisbi değerlendirme (COPRAS) yöntemlerini içeren bir

metodoloji önermişlerdir. Li ve ark. [28], aralıklı tip-2 bulanık kümeleri ve bulanık Petri ağlarını birleştiren yeni bir HTEA modeli sunmuşlardır. Wang ve ark. [29], aralıklı tip-2 bulanık şartlar altında bütünleşik bir risk önceliklendirme yaklaşımı geliştirmişlerdir. Çalışmalarında, risk değerlendirmesinin belirsizliği ile başa çıkmak için aralıklı tip-2 bulanık kümeler uygulanmış, risk faktörlerinin önemi mesafeye dayalı bir yöntem ile hesaplanmış ve her hata türünün önceliğini sıralamak için genişletilmiş bir MULTIMOORA yöntemi kullanılmıştır. Ma ve ark. [30], ürün tasarım risklerini kestirmek için bir model önermişlerdir. Her hata türüne bir önem katsayısı atamak için aralıklı tip-2 bulanık HTEA yönteminden faydalanılmıştır. Bera ve Jana [31], termik santral kazan borularının hata türlerinin kritikliğini değerlendirmek için ilgili yöntemi probleme adapte etmişlerdir. Qin ve ark. [32], belirsizliklerle daha verimli bir şekilde başa çıkabilme gayesiyle aralıklı tip-2 bulanık kümeyi ve kanıtsal mantık yaklaşımını HTEA yöntemi ile bütünleştirmişlerdir. Zheng ve ark. [33], aralıklı tip-2 bulanık sayılara ve depolama ve organizasyon ilişkisel özet verisi (ORESTE) yöntemine dayalı bütünleşik bir HTEA yaklaşımı önermişlerdir. Boral ve ark. [34], risk faktörlerinin önceliklendirilmesi için aralıklı tip-2 bulanık karar verme deneme ve değerlendirme laboratuvarı (DEMATEL) yöntemini kullanırken, aralıklı tip-2 bulanık yöntemlerden çok faktörlü ideal gerçek karşılaştırmalı analiz, uzlaşma çözümüne göre alternatiflerin ölçülmesi ve sıralaması (MARCOS) ve TOPSİS ile hata türlerini sıralamışlardır. Boral ve Chakraborty [35], CNC işlemedeki insan hatalarını, nedenlerini ve etkilerini tanımlamak için aralıklı tip-2 yöntemlerden AHP, DEMATEL ve MARCOS ile modifiye edilmiş bir HTEA yaklaşımı kullanmışlardır. Komatina ve ark. [36], otomotiv endüstrisindeki bir vaka ile ilgili hata türleri için toplanan uzman değerlendirmelerini aralıklı tip-2 yamuk bulanık sayılar ile modellemişler ve risk faktörlerinin önemini aralıklı tip-2 bulanık en iyi-en kötü (BWM) yöntemi ile tayin etmişlerdir. Gölcük [37], aralıklı tip-2 bulanık ortam altında bulanık çıkarım sistemini, BWM yöntemini ve WASPAS yöntemini bütünleştirerek yeni bir HTEA modeli sunmuştur. Önerilen modelde, hata türlerinin risk öncelik katsayılarını hesaplamak için bulanık çıkarım sistemi kullanılmakta ve aralıklı tip-2 bulanık BWM-WASPAS aracılığıyla çıktılar birleştirilmektedir. Macura ve ark. [38], aralıklı tip-2 bulanık HTEA yöntemini demiryolu altyapı projeleri için önermişlerdir. Zheng ve ark. [39], ORESTE yöntemini, heronian ortalama operatörünü ve aralıklı tip-2 bulanık kümeleri içeren

bir HTEA yaklaşımı sunmuşlardır. Önerilen yaklaşımda, tercihlerin temsil edilmesi için aralıklı tip-2 bulanık kümeden faydalanılmakta, ortalama operatörü ile toplu değerlendirme bilgileri elde edilmekte ve hata türlerinin öncelik sırasını belirlemede genişletilmiş bir ORESTE yöntemi kullanılmaktadır. Literatürdeki çalışmalar, kararların kalitesini artırma amacıyla HTEA'nın bulanık ÇKKV yöntemleri ile entegre edilebileceğini göstermiştir.

ÇKKV, daha etkin bir risk değerlendirme ve yönetimi sağlamada yardımcı olmaktadır. Geçmişte, parça imalatı, inşaat projeleri, enerji santralleri ve raylı ulaşım sistemleri gibi çok çeşitli alanlarda risklerin analizi için ÇKKV yöntemlerinden yararlanılmıştır. Kullanılan bu yöntemlerden biri de AHP'dir [40]. AHP, ölçütlerin ve seçeneklerin önceliklendirilmesinde sıkça kullanılmaktadır. Bu yöntem, güçlü ve esnek bir karar destek aracı olarak görülmektedir. Karmaşık problemlerin çözümü için önerildiği günden bu yana, üretim ve hizmet sektöründeki birçok alana başarıyla uygulanmıştır. Düşünmenin sınırlılığı, belirsizlik ve dilsel dağılım modellerin iyi uygulanabilirliği gibi hususlar nedeniyle, klasik AHP için bazı değişiklikler ve iyileştirmeler sunulmuş ve bulanık küme teorisi entegreli varyantları incelenmiştir. Bulanık AHP yöntemlerinin daha yüksek doğruluk sağladığı ve karar vermede etkili olduğu sıkça vurgulanmaktadır. Aralıklı tip-2 bulanık AHP, bu yöntemlerden biridir. Aralıklı tip-2 bulanık AHP yöntemi, yanıtlayıcıların görüşlerini etkin bir biçimde modelleyebilmekte ve belirsizlikleri oldukça iyi bir şekilde ele alabilmektedir. Bu özellikleri, yöntemi çekici kılmaktadır. Aralıklı tip-2 bulanık AHP'nin literatürdeki uygulamalarına; insani yardım lojistik yönetimi [41], kurumsal bilgi sistemleri proje seçimi [42], sürdürülebilir enerji kaynakları seçimi [43], rüzgar çiftliği yer seçimi [44], mesleki risklerin değerlendirilmesi [45], uygun gemi yükleyici türünün belirlenmesi [46], gayrimenkul yatırım ortaklıklarının performans değerlemesi [47], su arıtma tesislerine ilişkin beklentilerin incelenmesi [48], portföy seçimi [49], şehirlerarası otobüs firmalarına yönelik kalite beklentilerinin analizi [50] ve yeşil tedarikçi seçimi [51] örnek olarak verilebilir.

Son yıllarda, bulanık AHP yöntemlerinin farklı bulanık karar verme yöntemleriyle kombinasyonuna yönelik uygulamalar sıklaşmıştır. Karar verme sürecinin etkinliğini ve kararların kalitesini ve kabul edilebilirliğini artırma gayesiyle uygulanan bu yöntemlerden biri de EDAS'tır. Sıradan bulanık AHP-EDAS entegrasyonu çeşitli

problemlerin çözümünde başarıyla uygulanmıştır [52]; ancak, aralıklı tip-2 bulanık AHP-EDAS entegrasyonu farklı bir konsepttir. Aralıklı tip-2 bulanık EDAS yönteminin uygulamalarına; altyüklenici seçimi [53], tedarikçi değerlendirme [54] ve toplu taşıma hizmet seviyesi ölçümü [55] örnek olarak verilebilir.

Mevcut malzemelerde farklı sorunlardan dolayı riskler ortaya çıkabilir. Binaenaleyh, mevcut malzemelerin risk açısından incelemeye tabi tutulması önemlidir. Lakin bu kapsamda gerçekleştirilen çalışmaların sayısı yetersiz olup, risk analiz araçlarının kullanımını açısından literatürde bir boşluk bulunmaktadır. Bir çalışmada [5], malzeme özelliklerinin sıcaklık değişiminden nasıl etkilendiğini risk perspektifinden incelemek için aksiyomatik tasarım yaklaşımları uygulanmıştır. Fakat söz konusu çalışma, biyomalzeme alanı dışındaki bir konu üzerine odaklanmaktadır. Ayrıca, hata türlerine göre bir dizi alternatifin değerlendirilmesi açısından da literatürde bir boşluk bulunmaktadır. Mevcut risk değerlendirme/analiz çalışmaları, potansiyel hataların ve zorlukların önceliklendirilmesine ve iyileştirme eylemlerinin planlanmasına yoğunlaşmıştır. Bu çalışma, yeni bir risk temelli karar verme yaklaşımı ile farklı biyomalzeme seçeneklerinin değerlendirilmesini sunarak literatüre katkıda bulunmaktadır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

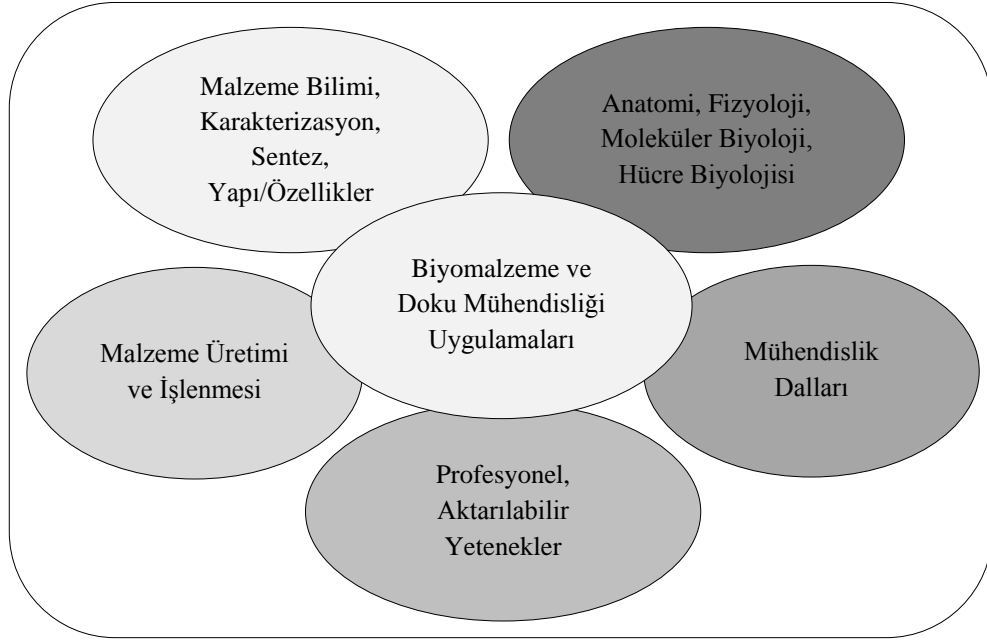
3.1. Biyomalzemeler

3.1.1. Biyomalzemelerin tanımı

Biyomalzemelerin ortak yönü, canlı vücut ile yakın temas içerisinde olmalarıdır. Malzeme bilimindeki tanıma göre biyomalzeme, canlı sistemlerin bileşenleri ile olan etkileşimlerin kontrolü yoluyla herhangi bir terapötik veya tanısal prosedürün seyrini yönlendirmede kullanılan, bir form almak üzere tasarlanmış maddedir. Başka bir ifadeyle, biyomalzeme bir organın veya dokunun bir kısmını değiştirmek veya desteklemek için yakın temas halinde kullanılan doğal veya insan yapımı herhangi bir malzemedir. Biyomedikal malzeme terimi, canlı doku ile temas ederek veya etmeyerek uygulanan herhangi bir materyali temsil etmek için kullanılır. Dolayısıyla, biyomalzemeler implante edilmiş biyomedikal malzemelerdir [56].

Medikal cihaz; teşhis, önleme, izleme, tedavi, yaşamı destekleme veya sürdürme gibi bir veya birkaç amacı gerçekleştirmek üzere insanlığın kullanımına sunulan herhangi bir alet, aparat, makine, kalibratör veya benzer bir nesnedir. Biyomalzeme ise yalnızca canlı dokularla yakın temas içerisinde bulunan malzemeleri belirtir. Bu bağlamda, kontakt lens bir biyomalzeme iken, düzeltici gözlük biyomedikal bir cihazdır [56, 57].

Biyomalzeme alanı, diğer çeşitli bilim dallarının bir sentezidir (Şekil 3.1). Bu alanda çalışan araştırmacılar, farklı disiplinlerden gelen bilgi ve becerileri bir araya getirerek karmaşık problemlere çözümler üretmek için işbirliği yaparlar. Günümüzde, araştırmacılar biyolojik sistem ile etkileştiğinde uyum sağlayabilecek ileri ve fonksiyonel biyomalzemelerin geliştirilmesi için büyük bir çaba içerisindeyler. Geçmişteki uğraşlar, insanların kullanımına yönelik farklı birçok biyomalzeme sağlamıştır. Biyomalzeme alanı, birçok sektörde dikkate alınan çok yönlü bir alandır ve biyolojik sistemlerin doğal özellikleri ve işlevleriyle birleştirilerek daha gelişmiş ve işlevsel malzemelerin geliştirilmesine yönelik potansiyeli vardır. Biyomalzeme alanında yürütülen araştırmalar insan sağlığını ve yaşam kalitesini artırmaya önemli katkıda bulunur.



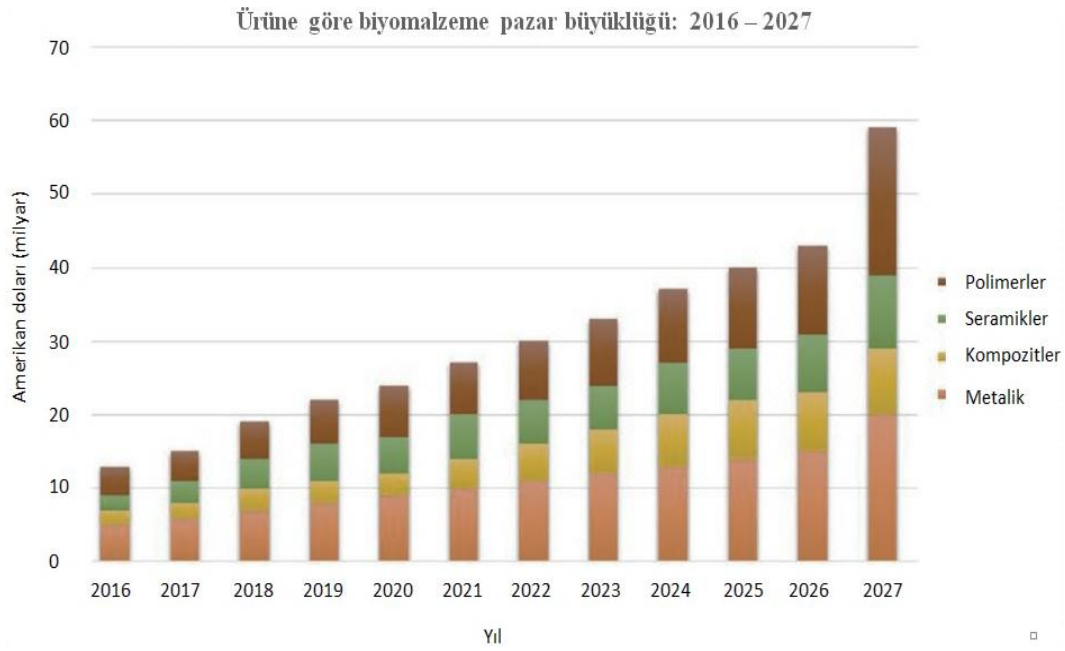
Şekil 3.1. Biyomalzeme alanının diğer alanlarla etkileşimi [58].

3.1.2. Biyomalzeme pazar durumu

Biyomalzeme ve tıbbi cihaz endüstrisi, teknolojik gelişmeler ve klinik talepler nedeniyle hızlı bir büyüme yaşamıştır. Tıbbi uygulamalarda biyomalzemelere olan talep ve kullanım son birkaç yıl içerisinde dünya genelinde önemli ölçüde artmıştır. Biyomalzeme pazarı, coğrafi olarak Kuzey Amerika, Avrupa, Asya Pasifik ve dünyanın geri kalanı şeklinde bölümlere ayrılmıştır. 2020’de biyomalzeme pazarında en büyük payı Kuzey Amerika oluşturmuş, bu coğrafiyi Avrupa ve Asya Pasifik izlemiştir. Kuzey Amerika’nın küresel pazardaki büyük payı, biyomalzeme temelli araştırmalardaki artışa, plastik cerrahilere olan talebin artmasına, kanser vakalarının artışına ve kardiyovasküler hastalıkların artan yaygınlığına bağlanmaktadır. 2020-2025 yılları için küresel biyomalzeme pazar büyüklüğünün 35,5 milyar Amerikan dolarından 47,5 milyar Amerikan dolarına ulaşacağı tahmin edilmektedir [59].

Biyomalzeme pazarı, malzeme türüne göre metaller, polimerler, seramikler ve kompozitler olarak bölümlere ayrılmıştır. Metal esaslı biyomalzemeler, 2020 yılında en büyük pazar payının sahibi olmuştur. Bu biyomalzemelerin %35’in üzerinde bir pazar payına sahip olması, polimer biyomalzemelerin ise talepte en hızlı büyümeye tanıklık etmesi beklenmektedir. Açıktır ki, biyomalzemeler yaşam kalitesinin korunmasına ve iyileştirilmesine katkıda bulunur. Biyomalzemelerin ortopedik uygulamalardaki pazar büyüklüğünün oldukça yüksek olduğu bildirilmiştir.

Biyomalzemelerin pazar büyüklüğü tahminleri ürüne göre Şekil 3.2’de, uygulamaya göre ise Şekil 3.3’te sunulmuştur [60].



Şekil 3.2. Ürüne göre 2016-2027 biyomalzeme pazar büyüklüğü [60].

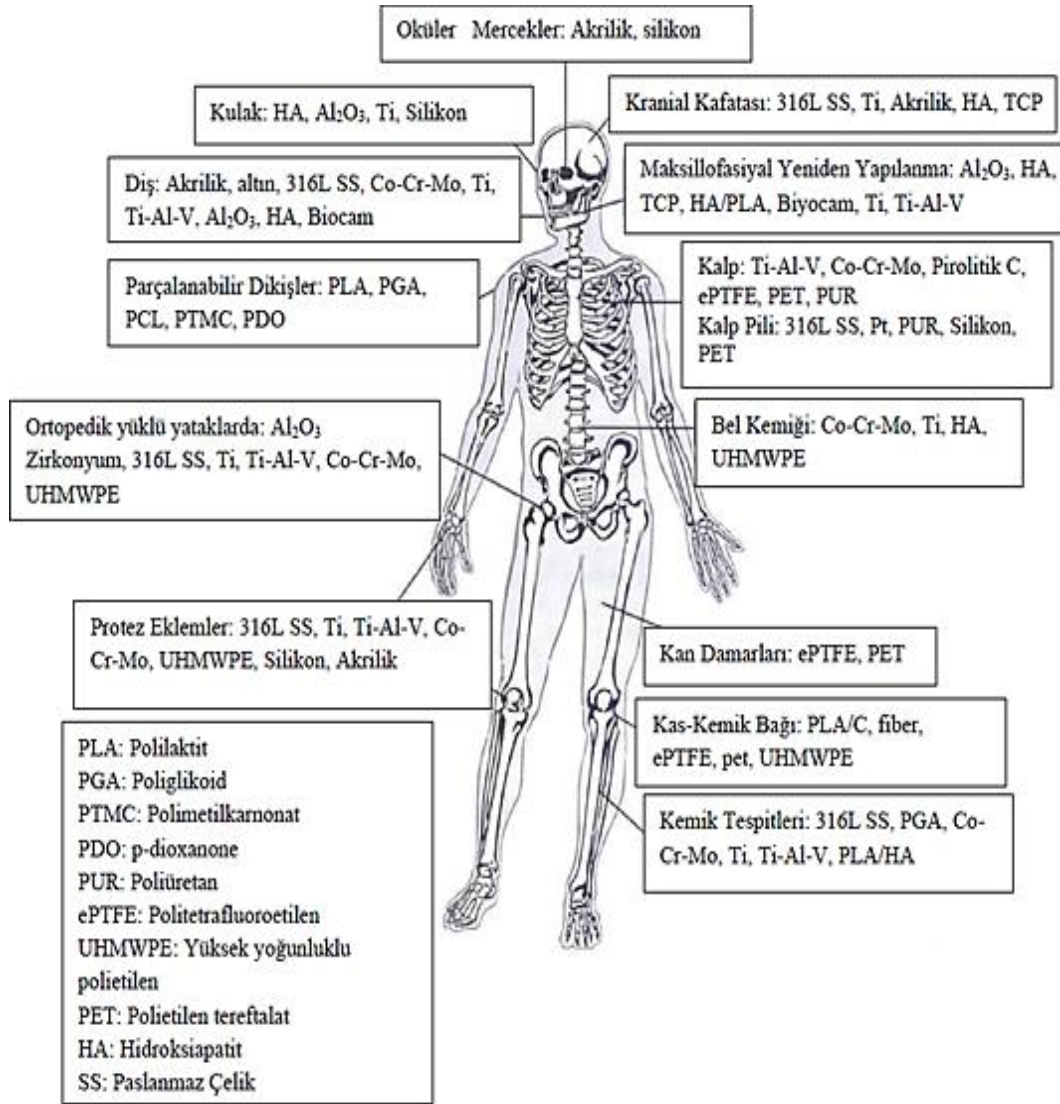


Şekil 3.3. Uygulamaya göre 2015-2020 biyomalzeme küresel pazarı [60].

3.1.3. Biyomalzemelerin uygulamaları

İnsan vücudunun dokuları ve organları işlevlerini uzun süre sorunsuzca yerine getirebilir. Lakin kırık, enfeksiyon ve kanser gibi yıkıcı süreçler ağrı, şekil

bozukluğu, fonksiyon kaybı ve benzeri sorunlara yol açabilmektedir. Bu tarz durumlar, kusurlu kısmın çıkarılmasını ve yerine benzer biyolojik aktivite gerçekleştiren malzemelerin yerleştirilmesini gerekli hale getirir. Biyomalzemeler, kusurlu yapıların işlevlerini onarmak, sürdürmek, değiştirmek veya artırmak için sıkça kullanılmaktadır [61]. Biyomalzemeler, tıptaki uygulama alanlarının geniş olması ve hastalara birçok fayda sağlaması nedeniyle önemli bir malzeme kategorisidir. İnsan vücudunda kullanılan biyomalzemeleri ve uygulanma bölgelerini Şekil 3.4’te görmek mümkündür.



Şekil 3.4. Bazı biyomalzemeler ve vücutta uygulanma bölgeleri [58].

Biyomalzemelerin kullanım amaçları arasında hasarlı/hastalıklı kısımların yerini alma, iyileşmeye/televiyeye yardımcı olma, fonksiyonelliği artırma, kozmetik sorunları tashih etme ve fonksiyon bozukluklarını düzeltme yer almaktadır. Biyomalzemelerin

ortopedik implant olarak kullanılmaları en büyük başarılarından biridir. Kalça, diz ve dirsek gibi eklemlerin yapısı hem osteoartritten hem de romatoid artritten etkilenir. Anestezi, antisepsi ve antibiyotikler, bu eklemlerin protezlerle değiştirilmesini olanaklı kılmıştır [1]. Kardiyovasküler sistemde, kalp kapakçıkları ve arterlerle ilgili sorunlar belirebilir. Bunlar, implantlarla başarılı bir şekilde tedavi edilebilmektedir. Gözün dokuları görme azalmasına veya körlüğe yol açan çeşitli hastalıklardan muzdarip olabilir. Kontakt lens, görüşü eski haline getirme amacıyla kullanılan malzemelere bir örnektir. Bu malzemeler, gözün dokularıyla yakın temasta olduklarından biyomalzeme olarak kabul edilir. En sık gerçekleştirilen tıbbi tedavilerden biri de diş tedavisidir. Bu tedavi, boşlukların doldurulmasından kırık veya çürümüş dişlerin değiştirilmesine kadar uzanır. Protetik tedavi ve ortodontik tedavi gibi çeşitli diş tedavilerinde birçok malzeme kullanılır. Bu malzemeler de genellikle biyomalzeme olarak tanımlanır. Öte yandan, sütürler doku bütünlüğünü sağlama ve iyileşme sürecini hızlandırma amaçlarına yöneliktir. Başka bir önemli yara iyileştirme kategorisi ise vida, çivi ve tel gibi kırıklara yönelik araçları içerir [61]. Biyomalzemelerin diğer uygulamaları arasında organ implantasyonları ve yapay organ geliştirilmesi yer alır [1].

3.1.4. Biyomalzemelerin sınıflandırılması

Tıp alanında kullanılan malzemeler üç sınıfa ayrılabilir. Sınıf I malzemeleri, dokularla direkt temas etmeyen malzemelerdir. Sınıf II malzemeleri, böbrek diyaliz makineleri gibi dokularla bazen temas içerisinde olan malzemelerdir. Sınıf III malzemeleri ise dokularla sürekli temas içerisinde olan malzemelerdir. Ortopedik implantlar bu sınıfın dikkate değer örneklerindedir. Sınıf III içerisinde yer alanlar genellikle biyomalzeme olarak adlandırılır [62, 63].

Biyomalzemeler, biyolojik sistemlerle etkileşime girdiklerinden dolayı farklı biyolojik tepkileri tetikleyebilir. Biyomalzemeler, doku ile etkileşimlerine göre çeşitlendirilebilir. Biyoaktif bir malzeme, uygulandığı bölgede kimyasal bağ oluşumuna izin verir. Biyobozunur bir malzeme, biyolojik olarak parçalanabilir ve bu devam ettikçe doku ile yer değiştirir. Biyoinert malzeme, uygulanan bölgede mekanik bağ yoluyla kalabilir. Biyotolerant bir malzeme, uygulandığı bölgede tolere edilebilecek bir etkileşim gösterir. Bu malzeme türleri, Şekil 3.5'te aydınlatılmıştır [64].

olarak kullanılan metallere bazılaridir. Metaller, diğere metalik elementlerle bir araya gelerek çeşitli alaşımlar oluşturabilir. Alaşımların oluşturulması ile daha gelişmiş özellikler elde edilebilir. Metal malzemeler, polimerler ve seramikler ile karşılaştırıldığında daha üstün mekanik özellikler sergiler. Metallerin mekanik performansının iyi olması uygulamalarda büyük deformasyonların görülme sıklığını azaltır [66].

Metalik biyomalzemeler, yaşam kalitesini korumak ve iyileştirmek için kusurlu sert dokuların yeniden yapılandırılmasında sıkça kullanılmaktadır. Günümüzde, implantların yaklaşık %70-80'i metalik biyomalzemelerdendir. Dünya nüfusunun giderek yaşlanması ve yaşlıların sert doku yetmezliği riskinin daha yüksek olması sebebiyle bu malzemelere olan talep hızla artmaktadır. Metalik biyomalzemeler, ortopedik cerrahide önemli bir yere sahip olduğu için daha fazla incelenmeleri ve geliştirilmeleri gerekir [67].

Biyomedikal uygulamalarda en çok kullanılan metal ve alaşımları paslanmaz çelikler, kobalt-krom alaşımları, titanyum ve titanyum alaşımlarıdır. İlk paslanmaz çelik, ağırlıkça %18 krom ve %8 nikel içeriyordu. Daha sonraları, molibden ilavesi ile korozyon direnci daha da artırılmış ve karbon içeriği ağırlıkça %0,03'e düşürülmüştür. Elde edilen paslanmaz çelik, 316L çeliği olarak adlandırılmıştır. Titanyum 4,5 gr/cm³'lük özgül ağırlığından dolayı diğerlerine kıyasla hafifliği ile öne çıkar [68]. Kobalt-krom alaşımları içerisinden öne çıkanlar kobalt-krom-molibden ve kobalt-nikel-krom-molibdendir. İlk alaşım türü dişçilikte ve yapay eklem üretiminde yaygın olarak kullanılırken, diğere alaşım türü fazla yük altındaki eklemlerde ve protezlerde sıkça tercih edilmektedir [69].

3.1.4.2. Seramik biyomalzemeler

Seramikler, birbirlerine iyonik veya kovalent bağlarla bağlanan metalik ve metalik olmayan elementlerden oluşan inorganik malzemelerdir. Seramikler sert ve kırılğan olarak nitelendirilir. Aşınma kalıntısı üretmemeleri, korozyona ve sıcaklığa karşı iyi bir dirence sahip olmaları ve doğal kemiğin özelliklerine benzer şekilde tasarlanabilmeleri doğal avantajlarından bazılarıdır. Kas-iskelet sisteminin hastalıklı, hasarlı veya eksik kısımlarını desteklemek, onarmak veya değiştirmek için biyoseramikler kullanılabilir. Biyoseramikler yapı iskelesi olarak kullanıldığında genellikle kemik büyümesini uyarır ve eklem protezlerinde sürtünmeyi azaltır [66]. Biyoseramiklerin sağlık sektöründeki uygulamalarına gözlük camları, teşhis

cihazları, termometreler ve doku kültür kapları örnek gösterilebilir. İskeletteki sert bağ dokusunun değiştirilmesinde ve iyileştirilmesinde implant görevini üstlenebilirler ve dişçilikte dolgu malzemesi olarak kullanılabilirler. Alümina, zirkonya, kalsiyum fosfat seramikler ve cam ve cam-seramikler bazı biyoseramik türleridir [69].

3.1.4.3. Polimer biyomalzemeler

Polimerler, monomer adı verilen tekrarlanan küçük ve basit birimlerden oluşan malzeme sınıfını temsil eder. Hâlihazırda, hastalara ve sağlık bakım sistemlerine yönelik çeşitli doğal ve sentetik polimerler mevcuttur. Polimerler tipik olarak iki farklı kategoriye ayrılır: (i) biyobozunur ve (ii) biyokararlı. Kollajen, jelatin, poli(laktik asit) ve poli(laktik-ko-glikolik asit) biyolojik olarak parçalanabilen polimerlerin dikkate değer birkaç örneğidir. Bu tür polimerlerden dolayı bozulan ürünler toksik olmamalı ve herhangi bir yabancı cisim reaksiyonunu tetiklememelidir. Poli(etilen), poli(etilen tereftalat) ve poli(metil metakrilat) biyolojik olarak bozunmaya karşı dirençli polimerlerden birkaçıdır. Polimer malzeme biyouyumluluğu, tasarım esnekliği, yüzey değiştirilebilirliği, hafifliği ve sünek doğası nedeniyle çok çeşitli biyomedikal uygulamalarda kullanılabilir. Polimerler arzu edilen birçok özelliğe haiz olsa da, metallere ve seramiklerle kıyaslandığında düşük mekanik mukavemete sahip olma eğilimindedir. Bu nedenle, polimerler yumuşak doku rekonstrüksiyonunda sıklıkla tercih edilir [63].

3.1.4.4. Kompozit biyomalzemeler

Kompozit; spesifik fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler elde etmek için yapılan, bileşim, morfoloji ve genellikle fiziksel özellikler bakımından farklılık gösteren iki veya daha fazla malzemenin heterojen bir kombinasyonunu belirtir. Kompozit malzeme, matriks içerisine çeşitli takviye malzemelerin ilavesiyle elde edilir. Kompozitlerin ana avantajı bileşenlerinin en iyi özelliklerini göstermesi ve çoğu zaman tek bileşenin sahip olmadığı bazı özellikleri sergilemesidir. Ayrıca, kompozit malzemeler yapıları ve özellikleri optimize edilebildiği ve belirli uygulamalara göre uyarlanabildiği için esnek bir tasarıma izin verir [70].

3.1.5. Biyomalzemelerde istenen özellikler

Bir biyomalzemenin tasarımı ve seçimi tıptaki özel işlevine bağlıdır. Biyomalzemelerin geliştirilmesi disiplinlerarası bir çalışma olup, sıklıkla bilim

insanları, malzeme mühendisleri, patologlar, biyomedikal mühendisleri ve klinisyenler arasında ortak çaba gerektirir. Biyomalzemelerin uzun bir süre güvenle ve doğru bir şekilde hizmet verebilmesi için bazı özelliklere haiz olması gerekmektedir [71]. Biyomalzemelerin önemli özelliklerinden bazıları aşağıdaki gibi kısaca açıklanabilir.

- Mekanik özellikler: Ortopedik implant olarak biyomalzeme, kemiğin temel mekanik işlevlerini üstlenme ve değiştirme görevlerine sahiptir. Dolayısıyla, biyomalzemenin yapısı güçlü ve sağlam olmalıdır. Uygulanan yükün kemiklerden implanta aktarılabilmesi ve revizyon cerrahisi ihtiyacının azaltılabilmesi için güçlü mekanik özellikler gerekir. Çekme mukavemeti ve tokluk önemli mekanik özelliklerinden bazılarıdır. Bir malzeme, yüksek dayanıma sahip olmalı ve ayrıca implantın gevşemesini önleyici nitelikte olmalıdır [72].
- Biyoyumluluk: Bu özellik, malzemenin uygulama yapılan bölgede uygun biyolojik cevap oluşturması ve istenen işlevleri yerine getirmesi ile ilgilidir. Biyomalzemelerin implantasyonunu takiben istenmeyen kan-materyal etkileşimleri, inflamasyon, granülasyon dokusu gelişimi ve yabancı cisim reaksiyonu gibi durumlar ile karşılaşılabilir. Bir biyomalzeme kansere ve olumsuz bir bağışıklık tepkisine yol açmamalı, kanın hücresel unsurlarına zarar vermemeli veya duyarlı hale getirmemeli, toksik ve alerjik tepkilere neden olmamalı ve sterilizasyon işleminden olumsuz etkilenmemelidir. Ayrıca, biyomalzeme önemli özelliklerini kayıp edecek şekilde bozulmamalı ve korozyona uğramamalıdır. Hiçbir malzeme yaşam ortamıyla tamamen uyumlu değildir. Biyoyumlu bir malzeme, normal vücut fonksiyonu üzerinde daha az olumsuz etkiye sahiptir. Biyoyumluluk malzeme bileşimi, yüzey ıslanabilirliği ve yüzey pürüzlülüğü gibi birçok faktörden etkilenir. Konak cevabı ve bozunma, malzeme biyoyumluluğunu belirleyen iki temel faktördür [73].
- Aşınma direnci: Malzemelerin düşük aşınma direncine sahip olması metal iyonlarının vücuda salınmasına neden olmaktadır. Serbest kalan iyonlar toksik ve alerjik reaksiyonları tetikleyebilmektedir. Ayrıca, aşınma direncindeki azalma implantın gevşemesine neden olan sorunlardan

biridir. Dolayısıyla, yüksek aşınma direnci biyomedikal uygulamaların başarısının artması açısından oldukça önemlidir [74].

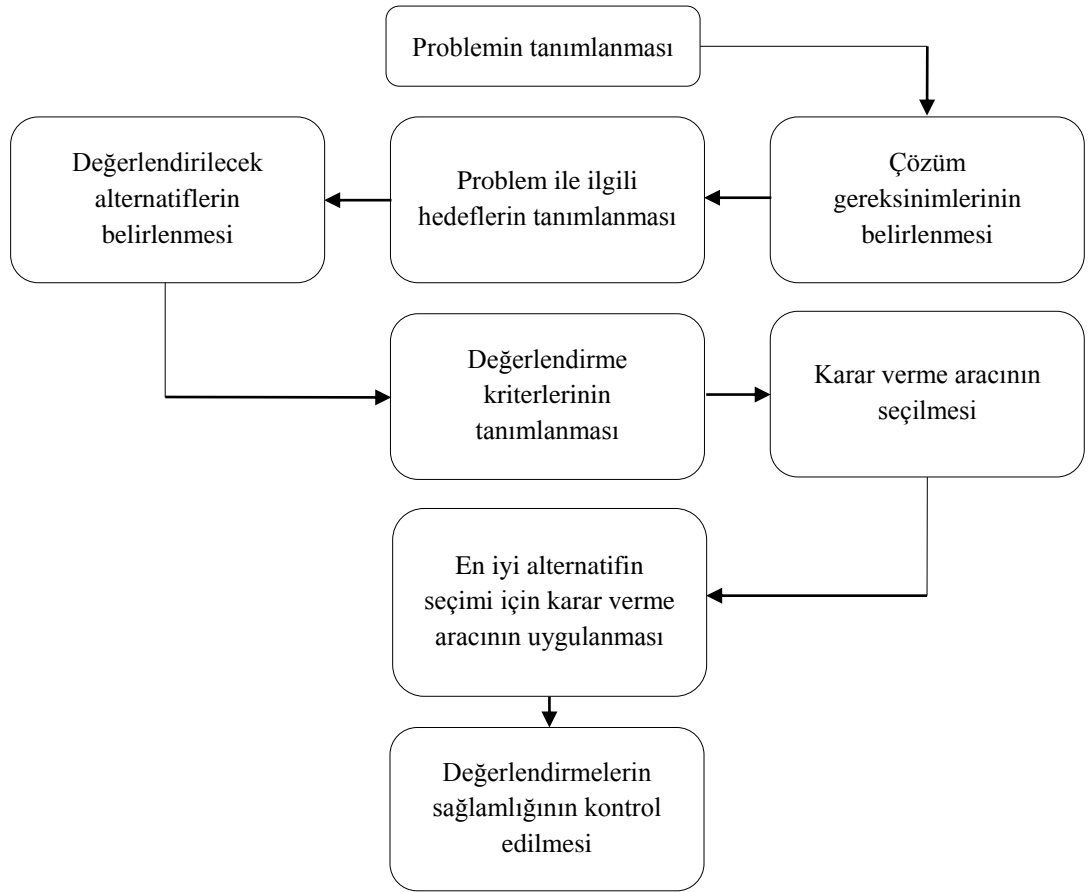
- Korozyon direnci: Metal ve alaşımların değerlendirilmesinde önemli bir faktördür. Korozyon, iki önemli endişenin öne çıkmasına neden olur: (i) tıbbi cihazların işlevselliği ve ömrü üzerindeki negatif etkiler ve (ii) biyouyumluluk üzerindeki olası olumsuz etkiler. Korozyonu azaltmak için endüstride yaygın olarak kullanılan stratejilerin çoğu vücut ortamında uygulanamamaktadır. Korozyon kontrolü şu anda dikkatli tasarım, uygun malzeme seçimi ve yüzey modifikasyonu ile sınırlıdır. Günümüzde, implantlarda ve tıbbi cihazlarda kullanılan metallerin ve alaşımların çoğu yüksek korozyon direnci ile karakterize edilir [73].
- Kemik bütünleşmesi: Bu özellik, implant ile kemik arasında yapısal ve fonksiyonel bağlantıların oluşması ile ilgilidir. İyi bütünleşme, implantların gevşeme oranının azalması açısından oldukça önemlidir. Bütünleşme şansını artırmak için implantların yüksek stabilitesi ile erken iyileşme sürecinin teşvik edilmesi gerekir [72]. Malzemelerin uygun bir yüzeye sahip olması implantın kemik ile iyi bir şekilde bütünleşmesi açısından önemlidir. Yüzey kimyası ve topografyası bütünleşmede önemli bir rol oynar [71].

İdeal yük taşıyıcı biyomalzeme yorulmaya, korozyona ve aşınmaya karşı mükemmel bir dirence, kemiğinkine benzer bir elastikiyete ve kemik ile iyi bir bağ kurma kabiliyetine sahip olmalıdır. Böyle bir biyomalzemenin geliştirilmesi, doku mühendisliğinin karşılamaya çalıştığı bir hedeftir [56].

3.2. Çok Kriterli Karar Verme

3.2.1. Karar verme ve türleri

Karar verme, bir problemin formüle edilmesinden nihai bir çözümün elde edilmesine kadar kademeli olarak ilerleyen, özel olarak belirlenmiş adımlardan ve faaliyetlerden oluşan önemli ve karmaşık bir süreçtir. Burada amaç, en uygun kararın alınmasıdır. Karar verme süreci, yöneticilerin en önemli faaliyetlerinden birisi olduğundan yönetimin özü olarak kabul edilir [75]. Kararların etkili olabilmesi için karar verme sürecinin aşamaları bilinmelidir. Bu aşamalar Şekil 3.7'de aydınlatılmış olup, şöyle açıklanabilir [76]:



Şekil 3.7. Karar verme süreci [76].

- Problemin tanımlanması: Bu süreçte sorunlar, kök nedenler, sınırlayıcı varsayımlar, kısıtlamalar, paydaş sorunları ve benzeri hususlar tanımlanmaktadır. Problem, kısaca ve net bir biçimde izah edilmeli ve herkes tarafından kabul görmelidir.
- Gereksinimlerin belirlenmesi: Gereksinimler, matematiksel olarak bir dizi uygulanabilir çözümü tanımlayan kısıtlayıcı unsurlar olarak açıklanabilir. Farklı tür değerlendirmeler olması durumunda bile, gereksinimlerin nicel ifade edilmesi gerekir.
- Hedeflerin belirlenmesi: Hedefler, niyet ve arzu edilen değerlerin geniş ifadesidir. Hedeflerin çelişkili olması, karar durumlarının doğal bir sonucudur.
- Alternatiflerin belirlenmesi: Alternatifler, başlangıç durumunun istenen duruma dönüştürülmesi amacıyla değerlendirilmeye alınan karar elemanlarıdır. Alternatiflerin gereksinimleri karşılayıp karşılamadığı kontrol edilmelidir.

- Kriterlerin tanımlanması: Alternatiflerin istenen sonuca hangi ölçüde yakın olduğunu belirlemek için karar kriterleri tanımlanmalıdır. Karar kriterleri, alternatifler arasında ayırım yapılmasını sağlar.
- Bir karar verme aracının seçilmesi: Karar verme aracının seçimi zorlu bir süreç olup, karar vericilerin amaçları ve karar problemi ile ilişkilidir. Lahdelma ve ark. [77], bir yöntemin karşılaması gereken özellikleri şöyle açıklamıştır:
 - a. Kolay anlaşılmalı
 - b. Gerekli sayıda karar vericiyi destekleyebilmeli
 - c. Alternatiflerin ve kriterlerin sayısını yönetebilmeli
 - d. Belirsiz bilgileri işleyebilmeli
 - e. Zaman ve maliyet kısıtlamaları nedeniyle tercih bilgisi ihtiyacı mümkün olduğunca az olmalı
- Alternatiflerin kriterlere göre değerlendirilmesi: Alternatifleri, belirlenen kriterlere göre değerlendirmek için veri gerekir. Probleme bağlı olarak değerlendirme objektif veya yargısal olabilir. Bu aşamada, seçilen karar verme aracı uygulanabilir.
- Sonuçların değerlendirilmesi ve doğrulanması: Elde edilen sonuçlar, karar probleminin gereksinimlerine ve hedeflerine göre değerlendirilmeli ve doğrulanmalıdır.

Karar verme, yanıtlayıcı sayısı açısından ikiye ayrılır: (i) bireysel karar verme ve (ii) grup kararı verme. İlk karar verme türünde kararlar daha hızlı alınır ve kolayca revize edilir. Lakin çoğu karar verme problemi birden fazla alandan ve disiplinden özel bilgi ve uzmanlık gerektirdiği için tek bir kişinin değerlendirmeleri yetersiz kalabilmektedir. Grup kararı verme, daha güvenilir kararlar almak için bireysel tercihleri bir araya getirir [78].

Karar verme problemleri, mevcut durum hakkındaki bilgi miktarına bağlı olarak belirlilik altındaki kararlar, risk altındaki kararlar ve belirsizlik altındaki kararlar şeklinde kategorize edilebilir. Karar verici, karar ortamı hakkında tam ve sağlam bilgiye sahip ise kararlar deterministik karar verme olarak bilinen kesinlik koşulları altında alınır. Çoğu gerçek dünya kararları, bilinmeyen veya tahmin edilmesi zor

olan bazı yönler içerir. Bu kararlar, genellikle belirsizlik koşulları altındaki kararlar olarak adlandırılır. Bir karar durumunda ortaya çıkabilecek iki temel belirsizlik türü vardır: (i) karar durumu hakkında sınırlı bilgi ile ilişkili belirsizlik ve (ii) olayların veya ifadelerin semantik anlamının tanımı ile bağlantılı belirsizlik [79]. Risk altında karar vermede ise geçmişteki kayıtlar, ölçümler ve/veya deneyimler sayesinde olasılıklar bilinir.

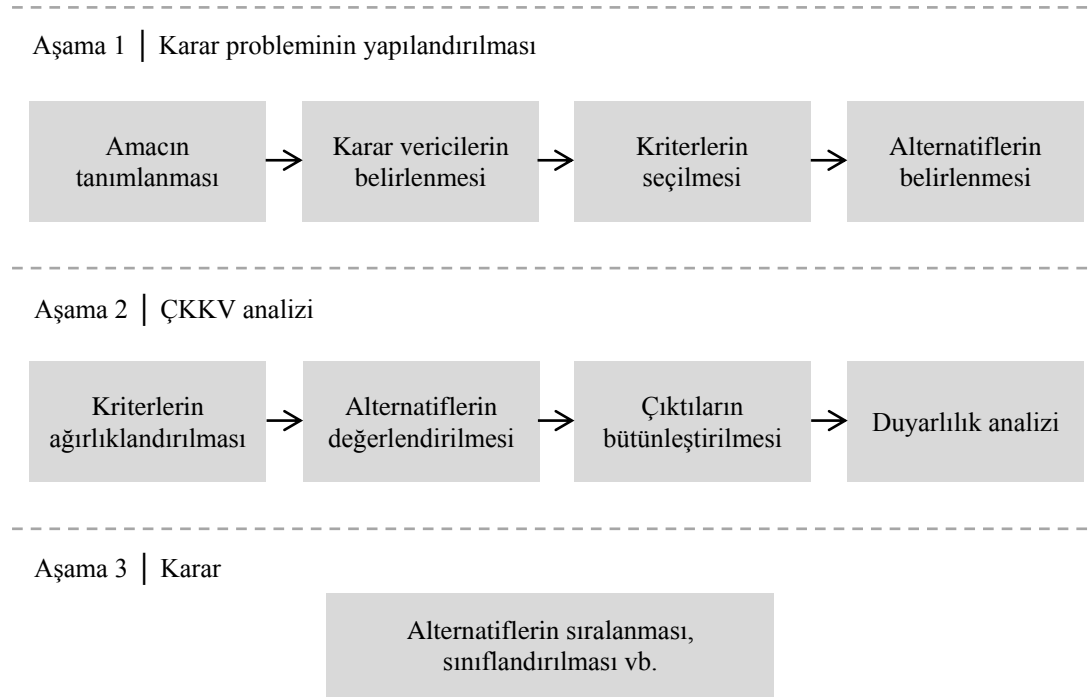
Karar verme, kriter sayısına göre iki farklı gruba ayrılır. Karar, seçeneklerin tek bir kritere göre değerlendirilmesi yoluyla alınıyor ise bu tek kriterli karar verme olarak kabul edilir. Çoğu karar problemi karmaşıktır. Güvenilir sonuçların elde edilebilmesi için seçeneklerin çok sayıda kriter altında incelenmesi gerekir. Karar verme sürecine birden çok kriterin dâhil edilmesiyle değerlendirmeler yapılıyor ise bu ÇKKV olarak adlandırılır.

3.2.2. Çok kriterli karar verme süreci

Hızla gelişen iş, bilim, mühendislik ve teknoloji alanlarının artan karmaşıklığı çeşitli faktörleri hesaba katarak doğru kararlar almayı gerektirir. Yöneylem araştırmasının bir alt disiplini olan ÇKKV, çok sayıda çelişkili ve/veya birbiriyle ilişkili kriterin varlığında karmaşık problemleri ele almada ve incelemede kapsamlı yöntemler koleksiyonuyla karar vericileri destekler. ÇKKV, mevcut seçenekler arasından en uygununu bir dizi kıstasa göre belirlemeyi amaçlar. Kriterlerin farklı ölçü birimi ve ağırlığı olabilir. Bazı kriterlerin sayısal olarak ölçülmesi mümkün iken, diğerleri sadece yargısal olarak tanımlanabilir. Karar problemlerinin iyi yapılandırılması, çok sayıda kriterin kullanılması ve karar elemanlarının dikkatlice değerlendirilmesi daha bilinçli ve doğru kararların alınmasını sağlar. Karar verici, kriterler ve adaylar seti için yapılan değerlendirmelerin ardından karar problemine yönelik uygun seçenekleri belirler [80].

Çok kriterli karar analizi, farklı alternatiflerin artıları ve eksileri arasındaki dengeyi keşfederek karar vermeyi destekler. Bu analiz türü, karar problemlerini çerçeveleme, ortak bir anlayış ve amaç duygusu oluşturma, karar elemanları için değer yargılarını açık hale getirme, kararın sağlamlığını test etme gibi çeşitli amaçlara hizmet eder. Çok kriterli karar analiz süreci, genellikle Şekil 3.8'de gösterilen üç ana aşamayı içerir [81].

Çok Kriterli Karar Analiz Süreci



Şekil 3.8. Çok kriterli karar modellerinin genel adımları [81].

Çok kriterli karar analiz sürecinin ilk aşaması, karar problemini yapılandırmayı amaçlamaktadır. İşlevsel olarak, karar verme sürecinin amacının tanımlanmasını, olası alternatiflerin belirlenmesini ve alternatiflerin performansını değerlendirmek için kriterlerin belirlenmesini içerir. Karar elemanları, hiyerarşik biçimde veya ağ yapısında organize edilebilir [81]. İlk aşamada yer alan faaliyetler ÇKKV yöntemleri arasında genellikle benzerlik göstermekte olup, hangi yöntemin uygulanabileceğini belirlemede ve yeni bir yöntem geliştirmede temel bilgiler sağlar. Bir karar probleminin yapılandırılmasının ardından uygun ÇKKV yöntem(ler)i belirlenmelidir [82].

İkinci aşama, genellikle dört faaliyetten oluşur: (i) kriterlerin ağırlıklandırılması, (ii) alternatiflerin değerlendirilmesi, (iii) çıktıların bütünleştirilmesi ve (iv) duyarlılık analizi. Ağırlık, bir kriterin diğerlerine göre önemini gösteren katsayı olarak tanımlanır. Ağırlıklandırma, karar vericilerin tercihlerini ifade eder ve karar için kriterlerin önem derecesini açıklar [83]. Kriterler ağırlıklandırıldıktan sonra her bir alternatifin tercihi puanlanır. Çıktıların bütünleştirilmesi, kriter ağırlıklarının alternatiflerin performans değerleriyle birleştirilmesi ve genel sonucun elde edilmesi için bir kuralın uygulanmasını ifade eder. Duyarlılık analizi ise sürecin çıktısı ile

girdisi arasındaki ilişkiyi araştırır ve sonuçların sağlamlığını test etmeye yardımcı olur [81].

Çok kriterli karar analiz sürecinin son aşamasında, tüm elde edilen bilgiler bir araya getirilerek nihai bir karara varılır. Sürecin sonunda bir karar elemanının genel ağırlıklı puanı ne kadar yüksek ise öncelik (tercih edilme) düzeyi o kadar yüksek olur [81, 82].

3.2.3. Çok kriterli karar verme problemi

ÇKKV, birbiriyle çelişen birden çok kritere dayalı bir alternatifler kümesinden en uygun çözümlerin bulunması problemleriyle ilgilendir. ÇKKV problemi, en az iki alternatif içeren bir aday kümesinden oluşur. Bu küme, $A = \{A_i \mid i = 1, 2, \dots, m\}$ şeklinde ifade edilebilir. Burada; m , alternatif sayısını belirtmektedir. Alternatifler, $K = \{K_j \mid j = 1, 2, \dots, n\}$ şeklinde gösterilen n adet kritere göre değerlendirilmektedir. Kriterler, problemin yapısına göre maliyet yönlü (minimizasyon) veya fayda yönlü (maksimizasyon) olabilir. Her bir kriterin önemi $W = \{w_j \mid j = 1, 2, \dots, n\}$ ile temsil edilen ve ağırlık olarak adlandırılan katsayılar ile belirtilir. Kriterlerin ağırlıklarının toplamı bire eşittir ($\sum_{j=1}^n w_j = 1$). Karar elemanları genellikle Tablo 3.1'deki gibi bir karar matrisinde organize edilmekte ve ardından probleminin çözümüne başlanmaktadır. Karar matrisindeki her x_{ij} elemanı, K_j kriterine göre alternatif A_i 'nin performans değerini temsil eder. Performans değerleri gerçek sayılar, aralıklar, olasılık dağılımları ve nitel etiketler şeklinde olabilir. Karar matrisi ve kriterlerin önem vektörü karar problemlerinin çözümü gayesiyle ÇKKV yöntemleri için temel girdilerdir [84].

Tablo 3.1. ÇKKV problemleri için bir karar matrisi [84].

| ÇKKV | K_1 | K_2 | ... | K_n |
|-------|----------|----------|----------|----------|
| | w_1 | w_2 | | w_n |
| A_1 | x_{11} | x_{12} | ... | x_{1n} |
| A_2 | x_{21} | x_{22} | ... | x_{2n} |
| ... | ... | ... | x_{ij} | ... |
| A_m | x_{m1} | x_{m2} | ... | x_{mn} |

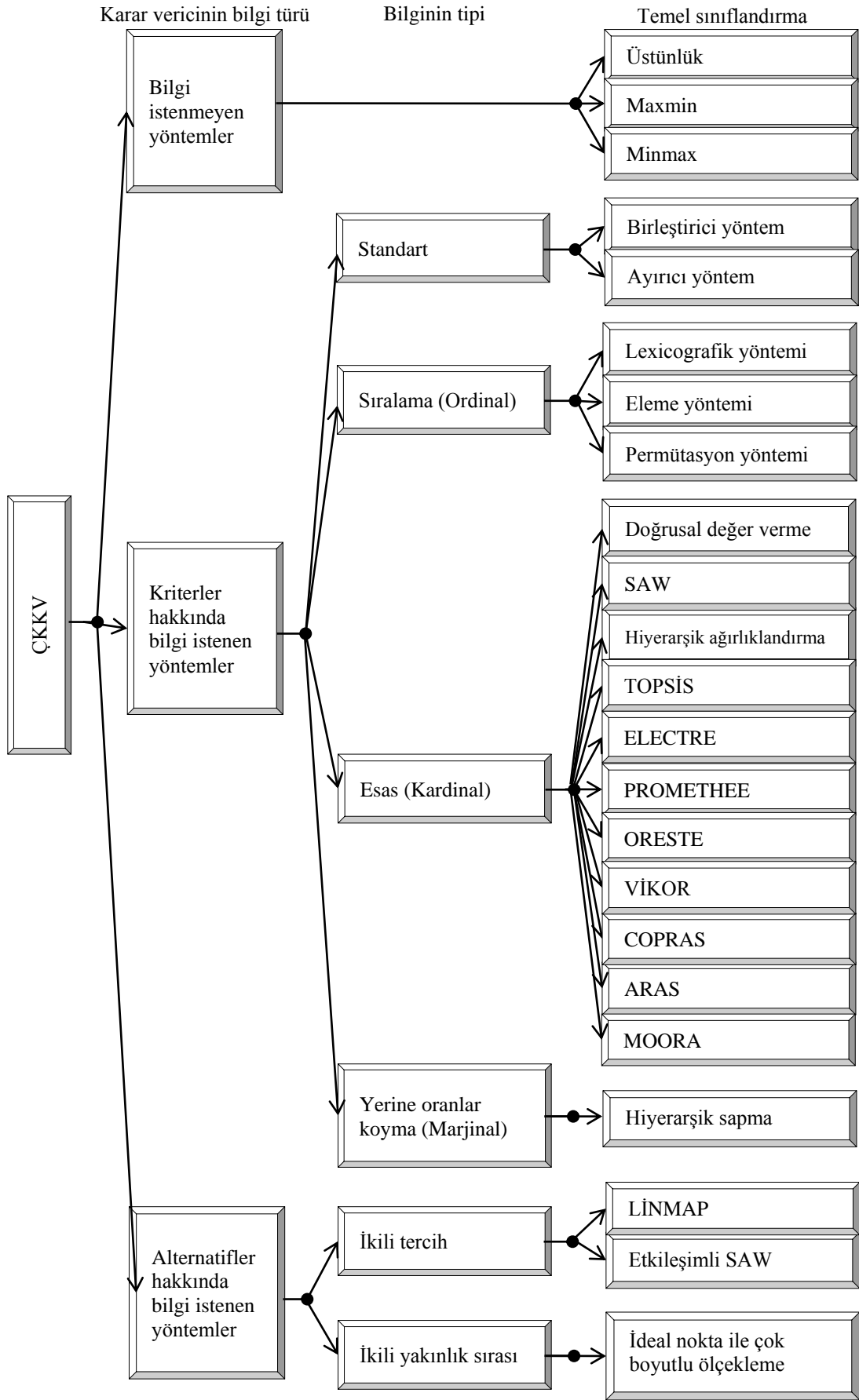
Roy'a [85] göre, ÇKKV dört tür problemi ele almak için tasarlanmıştır: (i) seçim problemi - bir dizi alternatif arasından en iyi olanının seçilmesi, (ii) sınıflandırma problemi - önceden tasarlanmış kategorilere bir dizi alternatifin atanması, (iii) sıralama problemi - karar elemanlarının en iyiden en kötüye doğru sıralanması ve (iv) tanımlama problemi - alternatiflerin detaylandırılması, kriterlerin belirlenmesi ve ek bilgiler doğrultusunda alternatiflerin tümünün veya bazılarının performansının belirlenmesi [82].

3.2.4. Çok kriterli karar verme yöntemlerinin sınıflandırılması

ÇKKV, karmaşık karar durumlarını ve süreçlerini ele almak ve incelemek için çeşitli karar destek yöntemleri kullanır. ÇKKV yöntemleri, bir dizi alternatif ve karar kriteri verildiğinde seçim, sıralama veya sınıflandırma sonuçları sağlayabilir. Karar problemleri niteliksel ve/veya niceliksel özellikte kriterler içerebilir. Nicel özellikteki kriterler uzmandan bağımsız olabilirken, nitel özelliktekiler uzmana bağlı olup ÇKKV yöntemi aracılığıyla uygun nicel birimlere dönüştürülür. Literatür, her biri kendi özelliklerine, değişen karmaşıklık seviyelerine ve farklı uygulama kapsamalarına sahip bir dizi ÇKKV yöntemi sunar [86]. ÇKKV yöntemlerinin temel bir sınıflandırması Şekil 3.9'da sunulmuştur.

ÇKKV yöntemleri, telafi edici olan ve telafi edici olmayan yöntemler şeklinde sınıflandırılabilir. Telafi edici yöntemler, kriterler arasında açık değiş tokuşlara izin verirken, telafi edici olmayan yöntemler temel olarak alternatiflerin bireysel kriterlere göre karşılaştırılmasına dayanmaktadır [86]. Ayrıca, ÇKKV yöntemleri veri ve bilgi türü açısından deterministik, stokastik ve bulanık yöntemler olarak sınıflandırılabilir. Deterministik ÇKKV yöntemleri, tüm bilgi ve veriler tamamen mevcut ve kesin olduğunda kullanılır. Bu nedenle, karar verici karar koşulları hakkında yeterli bilgiye sahiptir. Stokastik ÇKKV, rastgele değişkenler olarak tanımlanan çeşitli kriterlerden alternatiflerin seçimi üzerine odaklanır. Bir durumun stokastik doğası tekrarlanabilirliği ile ilişkilidir. Bulanık ÇKKV yöntemleri ise bilgi ve verilerin bir kısmı veya tamamı net tanımlanamadığında kullanılır [82, 88]. Karar verme uygulamalarında, hangi ÇKKV yönteminin veya yöntemlerinin karar problemine uygulanacağı belirlenirken, ele alınan karar probleminin ve karar elemanlarının özellikleri dikkate alınmalıdır.

ÇKKV yöntemleri, iki farklı kategoride şu şekilde sınıflandırılabilir [82, 89]:



Şekil 3.9. ÇKKV yöntemlerinin genel bir sınıflandırması [87].

- Çok nitelikli karar verme: Çoğunlukla, seçim problemleri için uygulanır. Sınırlı sayıda alternatif ve tercih sıralaması ile ilişkilendirilmiş olup, karar alanı kesiklidir. Sonlu sayıda alternatif, belirlenen farklı ağırlıklı niteliklere göre değerlendirilir ve bir seçim yapılır. Niteliklere göre her bir alternatifin performansını tanımlayan bir tercih sıralaması elde edilir. Bu kategoride, kısıtlar çözümde etkin olmamaktadır.
- Çok amaçlı karar verme: Genellikle, alternatif sayısının sonsuz olduğu (karar uzayının sürekli olduğu) tasarım veya planlama uygulamaları için kullanılır. Buradaki amaç, verilen kısıtlamalar içindeki çeşitli etkileşimleri göz önünde bulundurarak en uygun alternatifi tasarlamaktır. Birkaç amacın tatmin edici seviyelerine ulaşarak en iyi çözüm elde edilir. Bu kategoride, nitelikler net değildir.

ÇKKV yöntemleri, son yıllarda popüler hale gelmiştir. Bu yöntemler, birbiriyle çelişkili ve ilişkili birden çok kriteri, problemin nitel ve nicel yönlerini ve kriterlerin fayda ve maliyet etkisini dikkate alabilir. Birçok ÇKKV yöntemi olmasına rağmen, bunlar her karar verme durumu için uygulanabilir değildir. Bu nedenle, yöntem seçimine önem verilmelidir [86].

3.3. Risk Değerlendirme ve Yönetimi

3.3.1. Risk

Risk kavramı ve risk değerlendirmeleri uzun bir geçmişe sahiptir. Risk değerlendirmesi, riskleri olasılıkları ve etkileriyle anlamak ve bu riskleri önlemek veya hafifletmek için sıkça gerçekleştirilir. Riskin çok çeşitli tanımlamaları mevcuttur. Bazı niteliksel risk tanımları şöyledir [90, 91]:

- Talihsiz bir olay ihtimali
- Bir olayın istenmeyen olumsuz sonuçlarının gerçekleşme potansiyeli
- Belirsiz bir duruma (kayıp oluşumu vb.) maruz kalma
- Belirsizliğin hedefler üzerine olan etkisi
- Bir faaliyetin sonuçlarının belirsizliği ve ciddiyeti
- Bir referans değerden sapma

Literatürde sıkça adı geçen risk türlerinden bazıları şunlardır: finansal riskler, operasyonel riskler, stratejik riskler, yasal riskler, çevresel riskler, teknolojik riskler, hukuki riskler, sosyal riskler ve itibar riskleri [92]. Riskin ne kadar büyük veya küçük olduğuna dair yargılarda bulunmak için riskin tanımlanmasına ve ölçülmesine yönelik çeşitli metrikler mevcuttur. Bu metriklerden bazıları şunlardır [90]:

- Sonuçların şiddeti ile olasılıkların kombinasyonu
- Senaryo, senaryo olasılığı ve senaryo sonucu üçlemesi
- Sonuç için olasılık dağılımı
- Beklenen sonuçlar
 - a. Belirli bir zaman dilimindeki hata/kaza sayısı
 - b. Tehlikenin meydana gelme olasılığı, tehlikeye maruz kalma olasılığı ile beklenen hasarın kombinasyonu

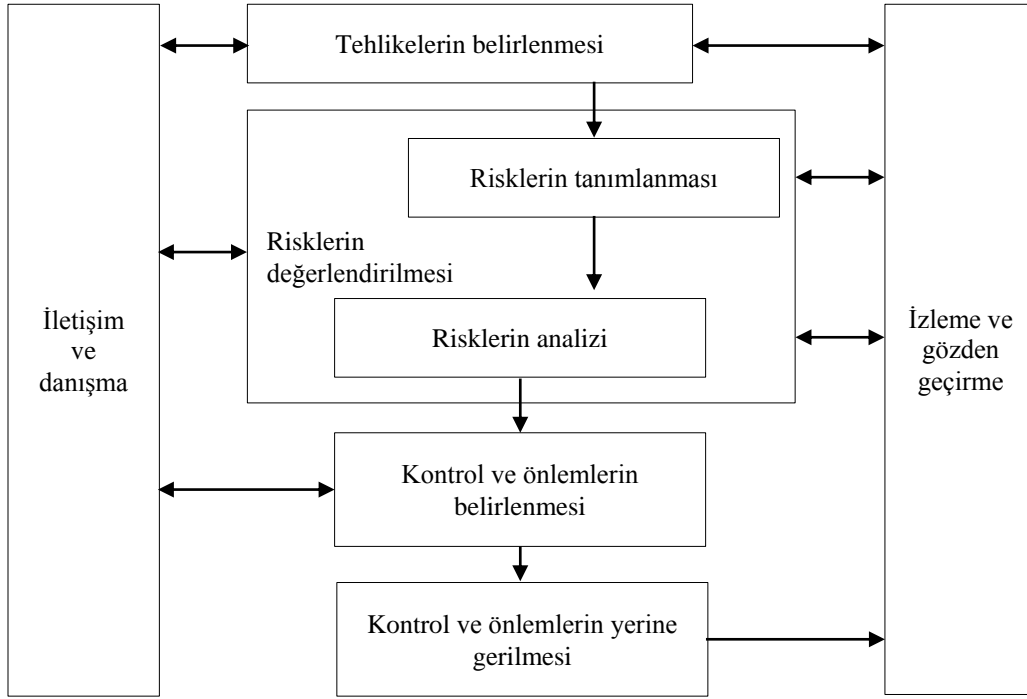
Risk bilimi, çoğunlukla iki temel görevin gerçekleştirilmesi üzerine odaklanmıştır. Bunlardan ilki, belirli faaliyetlerin riskini incelemek ve önlemek veya azaltmak için risk değerlendirmesini ve yönetimini içerir. İkincisi ise riski anlamak, değerlendirmek, karakterize etmek, iletme ve/veya yönetmek için genel bir risk araştırmasının yapılmasıdır [90, 91].

3.3.2. Risk yönetimi

Risk yönetimi, risk değerlendirmesi ile tanımlanmış bir faaliyetin çözüm sürecini içeren aşamalar dizisidir. Risk yönetim süreci, çevre güvenliğini ve insan hayatını ilgilendiren risklerin analizine ve kontrolüne yönelik olarak politikaların, tecrübelerin ve kaynakların tanımlanması, değerlendirilmesi, izlenmesi ve kontrolü gibi işlemlerin bütünüdür. Risk yönetim süreci, Şekil 3.10'da detaylandırılmıştır [93, 94].

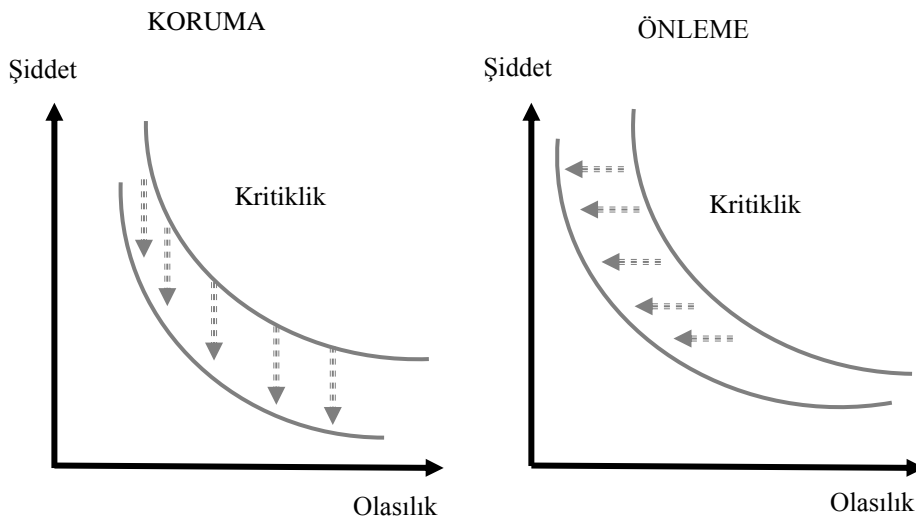
Tehlike kavramı, zarar verme potansiyeli olarak açıklanabilir. Tehlikelerin belirlenmesi, ilgililenen faaliyet ile bağlantılı olarak sağlığa ve güvenliğe yönelik mevcut veya beklenen tehlikelerin tanımlanmasını içerir. Risklerin analizi ve önceliklendirilmesi, her bir risk ögesinin olasılık ve ciddiyet gibi çeşitli yönlerinin değerlendirilmesi ve analiz edilen risk öğelerinin sıralanması ile ilgilidir. Kontrol ve önlemlerin belirlenmesi ile bunların yerine getirilmesi iki ayrı önemli aşamadır. İlk aşamada, riskleri azaltmak veya ortadan kaldırmak için harekete geçilir. Ardından, belirlenen kontrollerin ve önlemlerin uygulanmasına yönelik aktiviteler planlanır ve

bu aktivitelerden sorumlu kişiler belirlenir. İzleme ve gözden geçirme aşamasında ise iyileştirme ve önleme aktivitelerinin ardından yeni risk skorları hesaplanır [93].



Şekil 3.10. Risk yönetim sürecine genel bir bakış [93, 94].

Şiddet ve olasılık, riskin iki temel bileşenidir. Riske yönelik gerçekleştirilen koruma ve önleme aktivitelerinin bu bileşenler üzerine olan etkisi aşağıdaki şekilde sunulmuştur. Koruma amaçlı aktiviteler risk şiddetini düşürmekte, önleme amaçlı olanlar ise riskin olasılığını azaltmaktadır [95].



Şekil 3.11. Koruma ve önleme yaklaşımlarının risk üzerine etkisi [95].

Risk değerlendirmeleri alternatifler arasından seçim yapma, faaliyetlerin ve ürünlerin kabul edilebilirliğini inceleme, risk azaltıcı önlemler uygulama ve benzeri konular için karar desteği sağlar. Risk bilgilerinin üretilmesi genellikle maliyet-fayda analizi, maliyet etkinlik analizi ve çok nitelikli analiz gibi çeşitli karar analiz araçlarıyla desteklenir. Bütün bu yöntemlerin ortak noktası, bir karar elemanının artılarını ve eksilerini anlamak için sistematik yaklaşım sunmalarıdır. Analiz sonuçlarının ötesini öngörebilen, bilgiyi ve bilgi eksikliği ile ilgili hususları dikkate alabilen ve farklı konuları entegre edebilen yönetsel bir sürece her zaman ihtiyaç vardır. Bir analizin tamlık derecesi, uygulanan işlemlerine ve kalitesine bağlıdır [90, 91].

Risk temelli stratejiler, bir dizi değerlendirmelerin kullanımı yoluyla riskin azaltılması, aktarılması, elde tutulması, tedavisi veya savuşturulması gibi amaçları içerir. Risk değerlendirmesi ve yönetimi bilimsel bir alan olup, karar vermeyi desteklemede önemli katkılar sağlar. Günümüzde, bu alan içerisinde çeşitli temel ilkeler, teoriler ve yöntemler mevcuttur. Araştırmacılar, yeni yaklaşımlar sunmak için ayrı bir çaba içerisindeydir [90].

3.3.3. Sağlık alanında risk ve analizi

Sağlık sistemleri, teknolojik değişimlerden normatif değişimlere kadar birçok farklı değişime dâhil olmuştur. Bu durum, sağlık sistemlerinin karmaşıklık düzeyini artmıştır. Özellikle, biyomedikal ilerleme hastaya özgüllük, cerrahi karmaşıklık ve sağlık hizmeti kullanıcısının artışı gibi faktörler ile hastane karmaşıklık düzeyinin artmasına yol açmıştır. Sağlık sektörü, giderek daha karmaşıklaşan bir ortamda en iyi bakım kalitesini sağlamak için bazı klinik ve yönetsel aktivitelere yönelmiştir. Bu aktivitelere biri de risk yönetimidir. Risk yönetimi, olumsuz olayların temel nedenlerini ortaya çıkarmaya yönelik kapsamlı analizler gerçekleştirme gerekliliğini vurgulamaktadır [96]. Sağlık kuruluşlarındaki riskleri klinik riskler, işe ilişkin riskler ve operasyonel riskler olarak sınıflandırmak mümkündür. Ayrıca, riskler tehlikeye maruz kalacak unsur bazında şöyle sınıflandırılabilir [95]:

- Hasta ve hasta bakımı ile ilişkili riskler
- Hasta yakını, refakatçi, ziyaretçi vb. ile ilişkili riskler
- Sağlık personeli ve diğer çalışanlar ile ilişkili riskler
- Hastanede bir süreliğine bulunanlar ile ilişkili riskler

- Bina, tesis, cihaz vb. ile ilişkili riskler
- Kurum ile ilişkili riskler

Risk yönetimi, varlıkların korunması ile ilgilidir. Diğer alanlarda olduğu gibi sağlık alanında da risk yönetimi risklerin tanımlanması, analiz edilmesi, değerlendirilmesi ve yönetilmesi gibi işlemlerden oluşur. Hasta bakım sürecinde çeşitli nedenlerden dolayı sorunlar ortaya çıkabilir. Süreçlerdeki aksaklıklar, makine ve ekipmanlar, çalışma ortamı ve ilaç gibi girdilerdeki değişkenlik bazı önemli hata kaynaklarıdır. Risk yönetimi, risklerle mücadeleye yönelik önemli bir yaklaşımdır [95].

Risk, istenmeyen bir olayın meydana gelme olasılığının bir ölçüsüdür. Medikal uygulamalardaki istenmeyen olaylar genellikle yaralanma veya komplikasyon olarak tanımlanır. Risk analizinin temel amacı, tehlikeleri vurgulamak ve riski azaltmaya yönelik alternatifleri seçmek için bir strateji yapılandırmasıdır. Matematiksel olarak risk, belirsizliğin ve ilgili zararın bir fonksiyonudur [97].

$$\text{Risk} = f(\text{belirsizlik, zarar}) \quad (3.1)$$

Belirsizlik arttıkça zarar potansiyeli artar. Bunun sonucunda, ortaya çıkan risk de artar. Öte yandan, risk analizi tehlikeleri tanımladığı ve çare yolları önerdiği için şu şekilde de temsil edilebilir [97]:

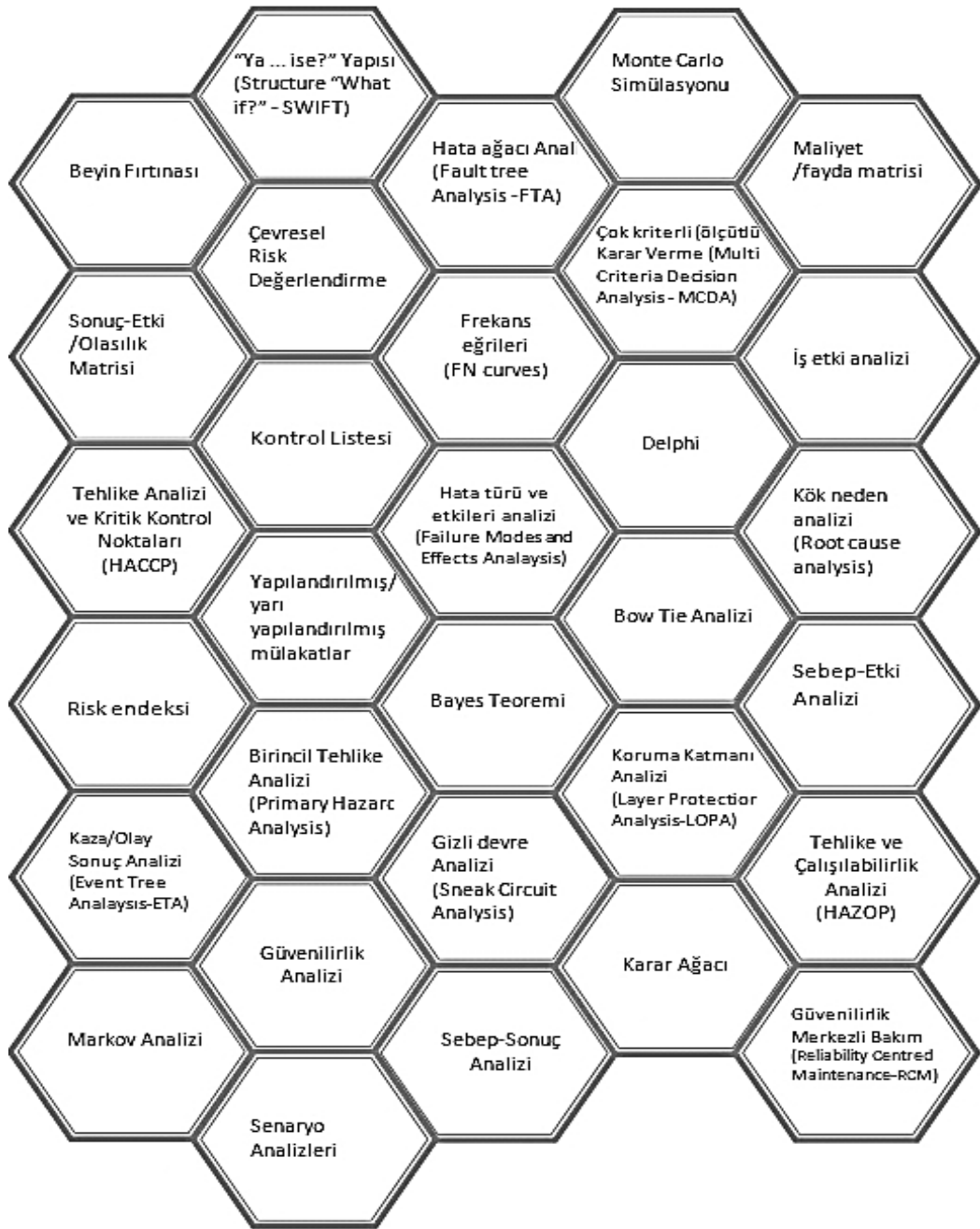
$$\text{Risk} = f(\text{tehlikeler, çareler}) \quad (3.2)$$

Çareler arttıkça tehlikeler azalır ve dolayısıyla risk de azalır. Bu nedenle, biyomedikal uygulamalara yönelik bir risk analizi, belirsizlikleri, olası yaralanmaları ve zararları, tehlikeleri ve olası çareleri tanımlamalıdır.

3.3.4. Risk değerlendirme teknikleri

Risk değerlendirme yöntemleri, süreç güvenliği ve risk yönetimi ile ilişkili sistematik prosedürler içerir. Risk modelleri analitik, ampirik, olasılıksal ve hesaplamalı modelleri kapsar. Her ikisi de dört farklı kategori altında sınıflandırılabilir: (i) nitel, (ii) yarı nicel, (iii) nicel ve (iv) hibrit. Nitel analiz, grafiklerin, akış diyagramlarının ve veri kaynaklarının niteliklerine dayanan sayısal olmayan bir gösterimi ve açıklamayı ifade eder. Yarı nicel analiz, nicel ve nitel analiz arasında yer alır ve yaklaşık sonuçlar üretir. Süreç güvenliği ve riskinin doğrudan ölçülmesinin mümkün

olmadığı, ancak çıkarımın kabul edilebilir olduğu durumlarda yararlıdır. Nicel analizin temel faydası, bilinçli karar vermek ve daha iyi idrak etmek için gerçekçi sayısal tahminler sağlamasıdır. Hibrit analiz ise niteliksel ve niceliksel analizin bir birleşimi olup, daha gerçekçi sonuçlar üretir ve kapsamlı bir analiz sağlar [98]. Olursa ne olur analizi ve kontrol listesi nitel tekniklerden bazılarıdır. Nicel tekniklere Bayes teoremi ve Monte Carlo simülasyonu örnek olarak verilebilir. HTEA ve hata ağacı analizi gibi nitel ve nicel özellik taşıyan teknikler risk değerlendirmede sıkça kullanılmaktadır [92]. Şekil 3.12, bazı risk değerlendirme yöntemleri sunmaktadır.

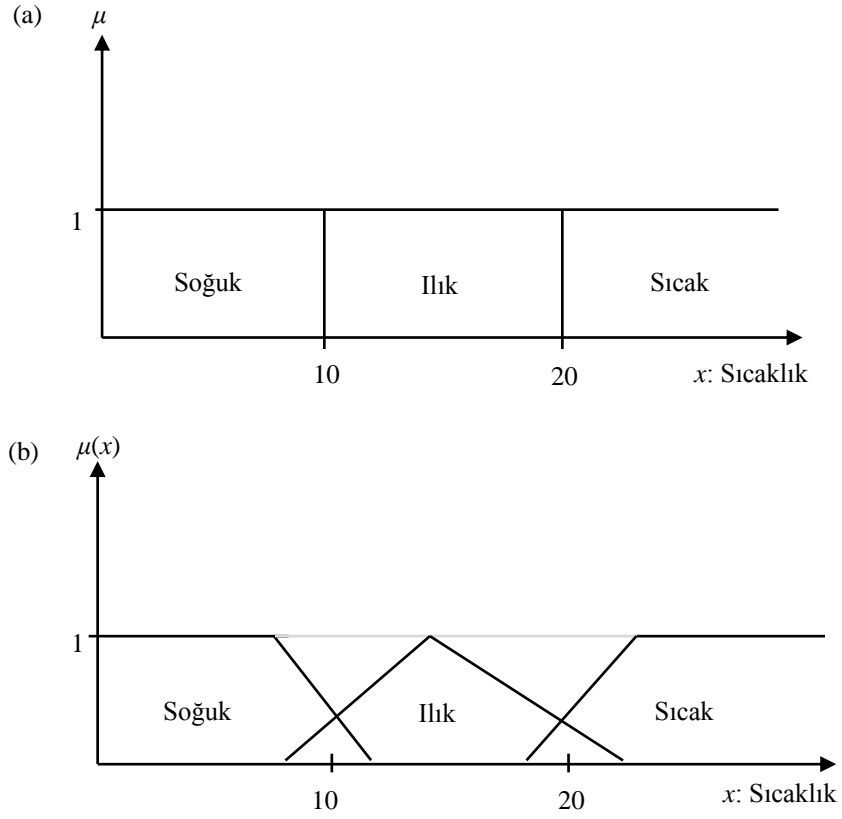


Şekil 3.12. Risk değerlendirmede kullanılan bazı yöntemler [99].

3.4. Bulanık Mantık Yaklaşımı

3.4.1. Bulanık mantık

Bulanık mantık, bilim ve mühendislikteki en temel ve etkili kavramlardan biridir. Bulanık mantık, günlük faaliyetlerin özü haline gelen tüm hususları yakalayabilir. Fiziksel dünyanın ve doğal sistemlerin önemli ve temel bir özelliği, tam aidiyet ve tam dışlanma arası geçişin sürekli olmasıdır. Uygulamalarda, belirli bir kategoriye aitliği her zaman bir derece meselesi olan nesnelere karşı karşıya kalınır. Örneğin, bir iç ortamın sıcaklığı 20 °C civarında tutulduğunda bu ortam ılık olarak nitelendirilebilir. 19,5 °C değeri gözlemlendiğinde de büyük ihtimalla ılık hissedilir. Aynı durum, 20,5 °C ile karşılaşıldığında da geçerlidir. İnsanlar genellikle bir santigrat derece aralığındaki sıcaklık değişiklikleri arasında ayırım yapamazlar. 20 °C değeri ılık sıcaklık kavramıyla tamamen uyumlu iken, 0 °C veya 30 °C için durum farklıdır. Bu sıcaklık değerleri ve bunlara yakın sıcaklıklar sırasıyla soğuk ve sıcak olarak tanımlanır. 25 °C'nin sıcak mı yoksa ılık mı olduğu, benzer şekilde 15 °C'nin ılık mı yoksa soğuk mu olduğu sorgulanabilir. Sezgisel olarak, 25 °C'nin ılık ile sıcak arasında, 15 °C'nin ise ılık ile soğuk arasında olduğu söylenebilir. 25 °C değeri, gözlemcinin algısına bağlı olarak ılık ve sıcak terimiyle kısmen uyumludur. Benzer şekilde, 15 °C ılık ve soğuk sıcaklıkla kısmen uyumlu, diğer sıcaklıkla biraz uyumlu veya uyumsuzdur. Ortam sıcaklıkları soğuk, ılık ve sıcak olmak üzere üç farklı sınıfa sezgisel ve belirgin bir şekilde sınıflandırılabilse de, sınıflar arasındaki geçiş anlık ve keskin değildir. Bir sıcaklık aralığında hareket ederken değerler yavaş yavaş soğuk, ılık veya sıcak olarak algılanır. Dolayısıyla, klasik ikili mantık (1: tam üyelik ve 0: üye olmama) bu tarz kavramları tanımlarken geçerli olamamaktadır. Bulanık mantığın temel fikri, sınıf üyeliğinin ara değerlerini kabul ederek söz konusu gereksinimi gevşetmektir. Bu nedenle, değerlerin sınıf ile ne kadar uyumlu olduğuna dair algıyı ölçmek için 0 ile 1 arasında ara değerler atanabilir. Böylece, evrenin her bir ögesinin sınıfa özgü özelliklerle uyumlu olma derecesi ifade edilir. Bulanık mantık, evet-hayır ve doğru-yanlış gibi klasik etiketler yerine orta-yüksek-düşük gibi ortalama değerleri kullanır. Diğer bir deyişle, keskin tanımlar yerine ortalama tanımları kullanır. Bulanık mantık, belirli bir durumun gerçekleşme derecesini ifade etmeye ve bir kavramın ne kadar belirsiz veya kesin olduğunu belirtmeye çalışır [100]. Şekil 3.13, klasik ve bulanık mantık yaklaşımlarını grafiksel olarak aydınlatmaktadır.



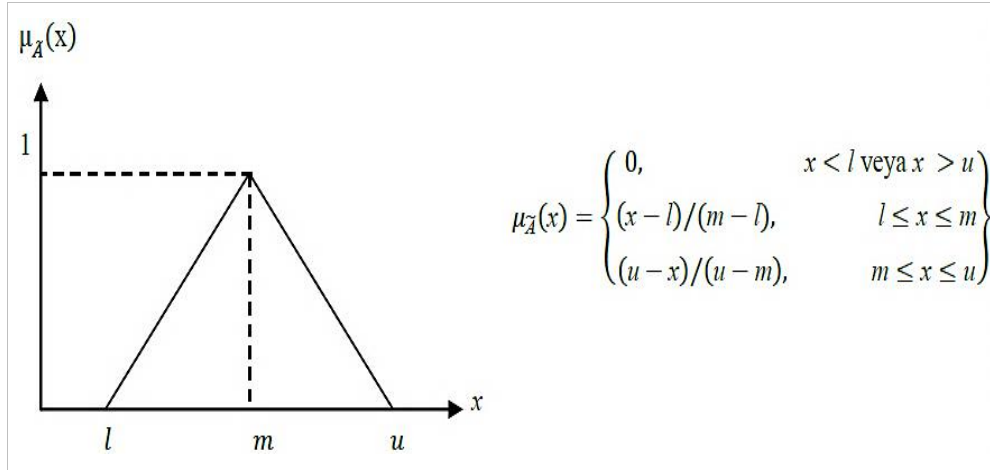
Şekil 3.13. Klasik küme (a) ile bulanık küme (b) için üyelik [94].

3.4.2. Bulanık küme

Çoğu karar, hedefleri, kısıtlamaları ve olası eylemleri anlamadaki güçlük nedeniyle gerçekle tam olarak örtüşmemektedir. Karar sonuçları, belirsiz kişisel yargılardan ve yanlış kaynaklardan büyük ölçüde etkilenir. Karar verme sürecindeki bu sorunların üstesinden gelme maksadıyla Zadeh [101] tarafından bulanık küme teorisi önerilmiştir. O zamandan beri, bulanık küme teorisi daha da geliştirilmiş ve birçok uygulamada başarıyla kullanılmıştır. Klasik küme teorisi ikili mantıkla çalışmakta olup, 0 ve 1 olmak üzere iki üyelik değerini dikkate alır. Bulanık küme teorisinde ise 0 ile 1 arasındaki herhangi bir sayı gerçeğin bir bölümünü temsil eder. Böylece, kusurlu ve kesin olmayan yargılar ifade edilerek matematiksel işlemler uygulanabilir [102].

Geleneksel niceleme, karmaşık durumları makul bir şekilde ifade etmeyi zorlaştırır. Bu gibi durumlarda dilsel değişken kullanmak önemlidir. Dilsel değişken, değeri doğal dilde bir tümce veya tümce biçiminde olan değişkendir. Dilsel değişkenler nicel terimlerle açıklanan durumlar ile başa çıkmada oldukça işlevseldir; çünkü bu değişkenlerin değerleri sayılar yerine sözel ifadelerdir. Literatürdeki çoğu

uygulamada, dilsel değişkenler üçgen bulanık sayılar ile temsil edilmiştir. Bir üçgen bulanık sayı $\tilde{A} = (l, m, u)$ ile açıklanabilir. Burada; l, m ve u , sırasıyla üçgen bulanık sayılar için alt sınır, orta nokta ve üst sınır olarak tanımlanmaktadır. Üyelik fonksiyonu $\mu_{\tilde{A}}(x):R \rightarrow [0,1]$ ile verildiğinde, R üzerindeki A üçgen bulanık sayıdır [102]. Şekil 3.14, üçgen üyelik fonksiyonunu matematiksel ve grafiksel olarak sunmaktadır.



Şekil 3.14. Üçgen üyelik fonksiyonu.

İki üçgen bulanık sayı üzerinde gerçekleştirilebilecek temel aritmetik operasyonlar şöyledir:

$$\tilde{M}_1 \oplus \tilde{M}_2 = (l_1 + l_2, m_1 + m_2, u_1 + u_2) \quad (3.3)$$

$$\tilde{M}_1 \ominus \tilde{M}_2 = (l_1 - u_2, m_1 - m_2, u_1 - l_2) \quad (3.4)$$

$$\tilde{M}_1 \otimes \tilde{M}_2 = (l_1 l_2, m_1 m_2, u_1 u_2) \quad (3.5)$$

$$\tilde{M}_1^{-1} = (1/u_1, 1/m_1, 1/l_1) \quad (3.6)$$

Dilsel değişkenler, bulanık sayılar aracılığıyla temsil edilmekte ve nicelleştirilmektedir. Kesin sayısal değerleri elde etmek için bulanık sonuçlar durulaştırılır. Durulaştırma işlemi için kullanılacak bazı yöntemleri Tablo 3.2'de görmek mümkündür.

Tablo 3.2. Bazı durulaştırma yöntemleri ve tanımlamaları [103].

| Yöntem | Açıklama | Matematiksel ifade | Grafiksel gösterim |
|----------------------------------|---|---|--------------------|
| En büyük üyelik yöntemi | Çıktı fonksiyonları içinden maksimum olanı seçilir. | $\mu_A(z^*) \geq \mu_A(z) \forall z \in Z$ | |
| Ağırlık merkezi yöntemi | Sıkça kullanılır. Sentroid yöntemi olarak da adlandırılır. | $Z^* = \frac{\int \mu_A(z).zdz}{\int \mu_A(z).dz}$ | |
| Ağırlıklı ortalama yöntemi | Simetrik çıktılara sahip üyelik fonksiyonları için uygulanabilir. | $Z^* = \frac{\sum \mu_A(\bar{z}).\bar{z}}{\sum \mu_A(\bar{z})}$ | |
| Ortalama en büyük üyelik yöntemi | Maksimum üyelik derecesi tek bir nokta olmayan sistemler için uygundur. | $Z^* = \frac{a + b}{2}$ | |
| Toplamların merkezi yöntemi | İki bulanık kümenin birleşimi yerine cebirsel toplamları kullanılır. | $Z^* = \frac{\int z \sum \mu_A(z).dz}{\int \sum \mu_A(z).dz}$ | |
| En büyük alanın merkezi yöntemi | Bulanık çıkarım kümesi birden fazla dışbükey alt bulanık küme içeriyorsa, en büyük alanının ağırlık merkezi kullanılır. | $Z^* = \frac{\int \mu_{A_m}(z).zdz}{\int \mu_{A_m}(z).dz}$ | |

Z^* = durulaştırılmış değer

3.4.3. Aralıklı tip-2 bulanık küme

Klasik bulanık kümelerin bir uzantısı olarak, tip-2 bulanık kümeler birden çok kriter ve alternatif içeren problemlerin çözümünde daha esnek ve başarılıdır. Bu kümeler; dilsel ve nümerik belirsizliklerin üstesinden gelebilir, daha iyi bir modelleme ile belirsizliklerin etkisini minimize eder ve biraz karmaşık bir yapıya haizdir. Aralıklı tip-2 bulanık kümeler, tip-2 bulanık kümelerin özel bir durumudur. X evreninde $\mu_{\tilde{A}}$ üyelik fonksiyonlu bir tip-2 bulanık küme, şu eşitliklerle açıklanabilir [51]:

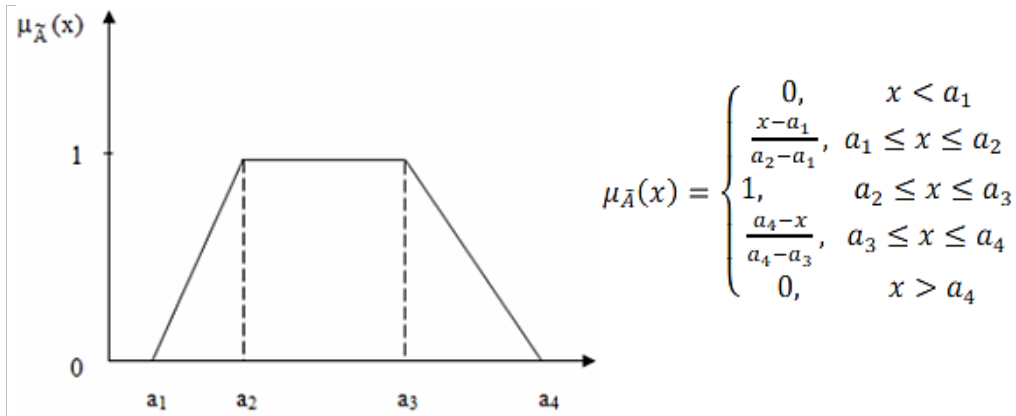
$$\tilde{A} = \left\{ (x,u), \mu_{\tilde{A}}(x,u) \mid \forall x \in X, \forall u \in J_x \subseteq [0,1], 0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x,u) \leq 1 \right\} \quad (3.7)$$

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \int_{u \in J_x} \mu_{\tilde{A}}(x,u) / (x,u); \text{ burada } J_x \subseteq [0,1] \quad (3.8)$$

Denklem 3.7’de, $J_x [0,1]$ aralığını belirtir ve u ile tip-2 sayı temsil edilir. Eğer tüm $\mu_{\tilde{A}}(x,u) = 1$ ise \tilde{A} , aralıklı tip-2 bulanık kümedir. Bu bulanık küme, aşağıdaki eşitlikle açıklanabilir [51].

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \int_{u \in J_x} 1 / (x,u) = \int_{x \in X} \left[\int_{u \in J_x} 1 / u \right] / x \quad (3.9)$$

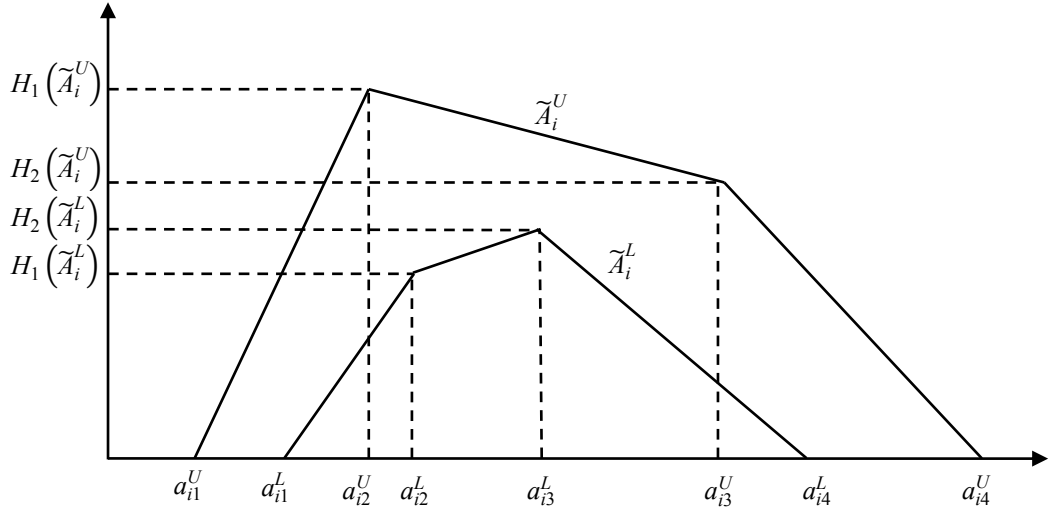
Bu çalışmada, aralıklı tip-2 yamuk bulanık sayılar kullanılmıştır. Klasik yamuk bulanık sayılar, dört noktayla temsil edilir (Şekil 3.15) [104]. Aralıklı tip-2 yamuk bulanık sayılar ise denklem 3.10 ile karakterize edilir.



Şekil 3.15. Yamuk üyelik fonksiyonu [104].

$$\tilde{A}_i = (\tilde{A}_i^U, \tilde{A}_i^L) = \left(\left(a_{i1}^U, a_{i2}^U, a_{i3}^U, a_{i4}^U; H_1(\tilde{A}_i^U), H_2(\tilde{A}_i^U) \right), \left(a_{i1}^L, a_{i2}^L, a_{i3}^L, a_{i4}^L; H_1(\tilde{A}_i^L), H_2(\tilde{A}_i^L) \right) \right) \quad (3.10)$$

Denklem 3.10’da $\tilde{A}_i^U, \tilde{A}_i^L$ tip-1 bulanık kümeler; a_{ik}^U ve a_{ik}^L ($k = 1,2,3,4$) bulanık küme için referans noktaları; $H_1(\tilde{A}_i^U), H_2(\tilde{A}_i^U)$ $a_{i(j+1)}^U$ ’in \tilde{A}_i^U fonksiyonunda yer alan üyeliğinin üst sınırları; $H_1(\tilde{A}_i^L), H_2(\tilde{A}_i^L)$ $a_{i(j+1)}^L$ ’in \tilde{A}_i^L fonksiyonunda yer alan üyeliğinin alt sınırlarıdır. Şekil 3.16, aralıklı tip-2 yamuk üyelik fonksiyonunu sunmaktadır [50].



Şekil 3.16. Aralıklı tip-2 yamuk üyelik fonksiyonu [50].

Aralıklı tip-2 yamuk bulanık sayılar için temel aritmetik operasyonlar şöyledir [51]:

$$\begin{aligned} \tilde{A}_1 \oplus \tilde{A}_2 &= (\tilde{A}_1^U, \tilde{A}_1^L) \oplus (\tilde{A}_2^U, \tilde{A}_2^L) \\ &= \left(\left(\begin{array}{c} a_{11}^U + a_{21}^U, a_{12}^U + a_{22}^U, a_{13}^U + a_{23}^U, a_{14}^U + a_{24}^U; \\ \min(H_1(\tilde{A}_1^U), H_1(\tilde{A}_2^U)), \min(H_2(\tilde{A}_1^U), H_2(\tilde{A}_2^U)) \end{array} \right), \right. \\ &\quad \left. \left(\begin{array}{c} a_{11}^L + a_{21}^L, a_{12}^L + a_{22}^L, a_{13}^L + a_{23}^L, a_{14}^L + a_{24}^L; \\ \min(H_1(\tilde{A}_1^L), H_1(\tilde{A}_2^L)), \min(H_2(\tilde{A}_1^L), H_2(\tilde{A}_2^L)) \end{array} \right) \right) \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} \tilde{A}_1 \ominus \tilde{A}_2 &= (\tilde{A}_1^U, \tilde{A}_1^L) \ominus (\tilde{A}_2^U, \tilde{A}_2^L) \\ &= \left(\left(\begin{array}{c} a_{11}^U - a_{24}^U, a_{12}^U - a_{23}^U, a_{13}^U - a_{22}^U, a_{14}^U - a_{21}^U; \\ \min(H_1(\tilde{A}_1^U), H_1(\tilde{A}_2^U)), \min(H_2(\tilde{A}_1^U), H_2(\tilde{A}_2^U)) \end{array} \right), \right. \\ &\quad \left. \left(\begin{array}{c} a_{11}^L - a_{24}^L, a_{12}^L - a_{23}^L, a_{13}^L - a_{22}^L, a_{14}^L - a_{21}^L; \\ \min(H_1(\tilde{A}_1^L), H_1(\tilde{A}_2^L)), \min(H_2(\tilde{A}_1^L), H_2(\tilde{A}_2^L)) \end{array} \right) \right) \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} \tilde{A}_1 \otimes \tilde{A}_2 &= (\tilde{A}_1^U, \tilde{A}_1^L) \otimes (\tilde{A}_2^U, \tilde{A}_2^L) \\ &= \left(\left(\begin{array}{c} a_{11}^U \times a_{21}^U, a_{12}^U \times a_{22}^U, a_{13}^U \times a_{23}^U, a_{14}^U \times a_{24}^U; \\ \min(H_1(\tilde{A}_1^U), H_1(\tilde{A}_2^U)), \min(H_2(\tilde{A}_1^U), H_2(\tilde{A}_2^U)) \end{array} \right), \right. \\ &\quad \left. \left(\begin{array}{c} a_{11}^L \times a_{21}^L, a_{12}^L \times a_{22}^L, a_{13}^L \times a_{23}^L, a_{14}^L \times a_{24}^L; \\ \min(H_1(\tilde{A}_1^L), H_1(\tilde{A}_2^L)), \min(H_2(\tilde{A}_1^L), H_2(\tilde{A}_2^L)) \end{array} \right) \right) \end{aligned} \quad (3.13)$$

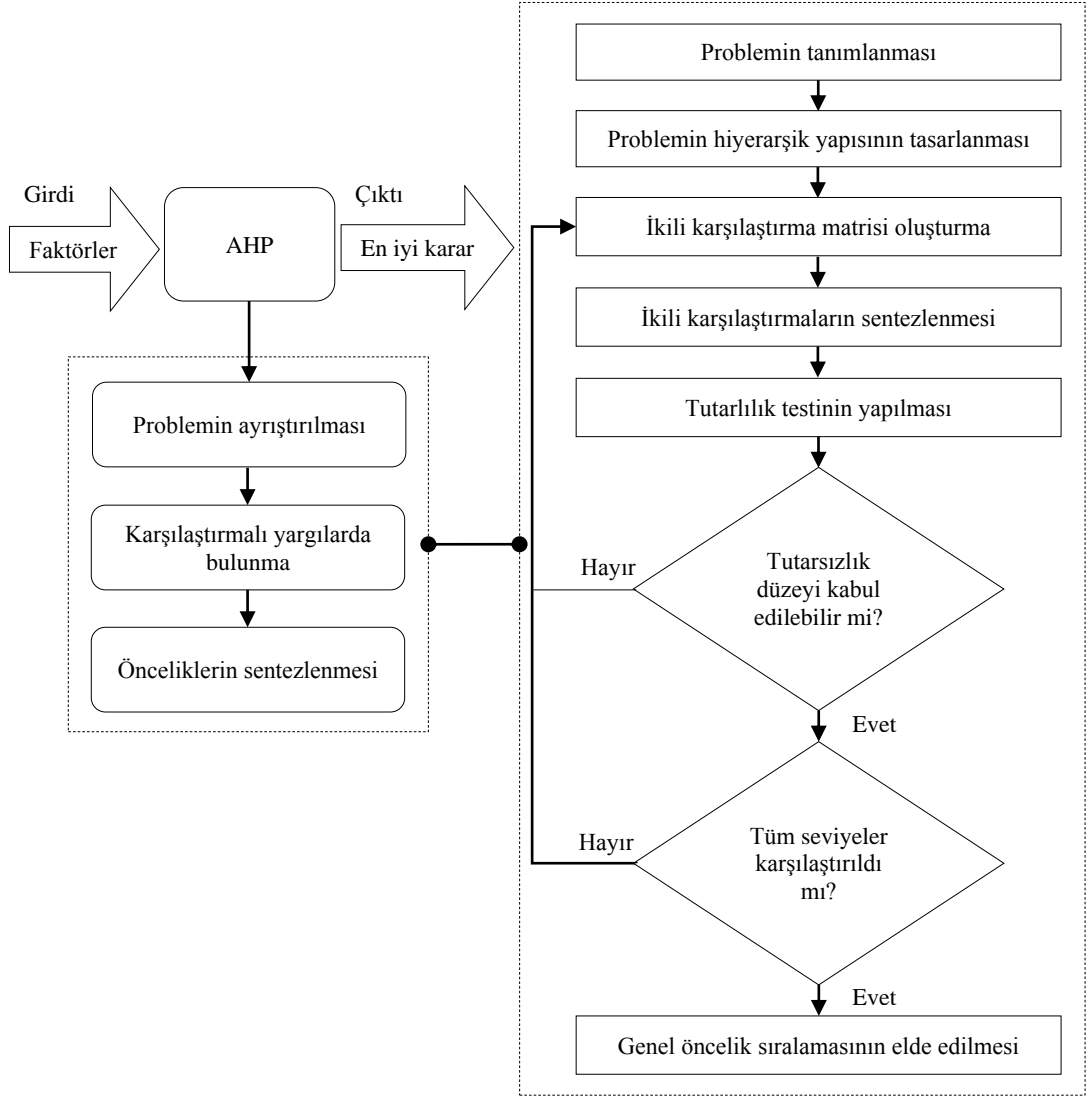
$$k\tilde{A}_1 = \left(\left(k \times a_{11}^U, k \times a_{12}^U, k \times a_{13}^U, k \times a_{14}^U; H_1(\tilde{A}_1^U), H_2(\tilde{A}_1^U) \right), \right. \\ \left. \left(k \times a_{11}^L, k \times a_{12}^L, k \times a_{13}^L, k \times a_{14}^L; H_1(\tilde{A}_1^L), H_2(\tilde{A}_1^L) \right) \right) \quad (3.14)$$

3.5. Çalışmanın Yöntemleri

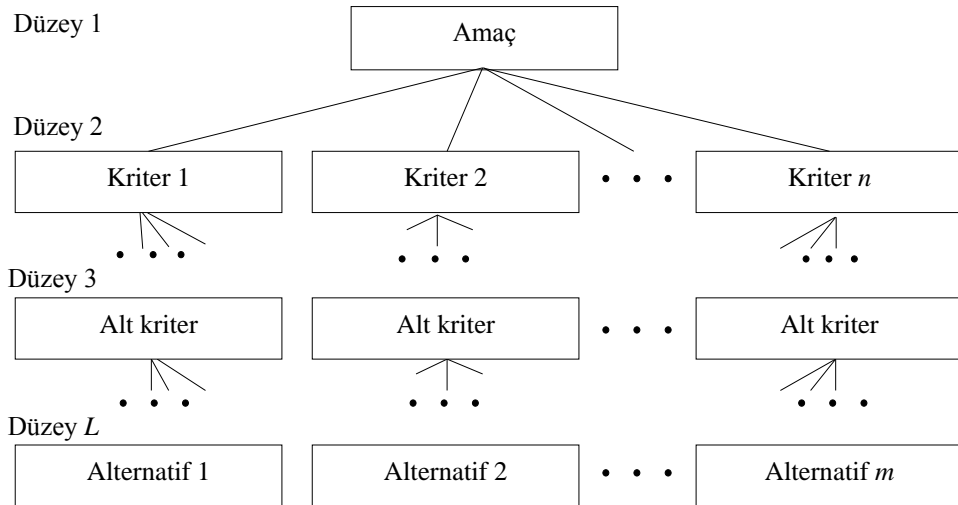
3.5.1. Aralıklı tip-2 bulanık analitik hiyerarşi prosesi

AHP, karmaşık karar problemlerini ayrıştırmayı, organize etmeyi ve analizlemeyi amaçlayan bir ÇKKV yöntemidir. Bu yöntem, karar elemanlarının ikili karşılaştırılması yoluyla önem ağırlıklarını belirlemektedir. Kullanım kolaylığı, sezgisel çekiciliği ve esnekliği nedeniyle birçok alanda seçim, değerlendirme, sınıflandırma ve önceliklendirme amaçları için kullanılmıştır. AHP yönteminin ana avantajları, nitel ve nicel analizin kombinasyonunun yanı sıra bir kararın öznel ve nesnel yönlerinin yakalanabilmesi ve insan yargılarının tutarlılığının kontrol edilebilmesidir [105]. AHP, üç temel ilkedен oluşur: (i) problemin ayrıştırılması, (ii) karşılaştırmalı yargılarda bulunma ve (iii) önceliklerin sentezlenmesi. AHP, Şekil 3.17'deki gibi detaylandırılabilir [106].

AHP yönteminin prosedürü problemin hiyerarşik bir şekilde yapılandırılmasıyla başlar. Bu süreçte, amaç net olarak tanımlanır ve amaca ulaşmada etkili olan kriterler belirlenir. AHP hiyerarşisi çeşitli düzeylerden oluşur. Karar verme sürecinin amacı en üst düzeyde, değerlendirme kriterleri orta düzeylerde ve kriterlere göre incelenecek alternatifler son düzeyde yer alır (Şekil 3.18). Bu yapı, verilen düzeydeki elemanların üst düzeydeki elemanlara göre önemini değerlendirilmesini mümkün kılar. İkili karşılaştırmalara sayısal değerler atamak için 1-9 ölçeği kullanılır. Bu ölçekteki temel maddeler şunlardır: “1: eşit önemli”, “3: orta önemli”, “5: güçlü önemde”, “7: çok güçlü önemde”, “9: mutlak önemli” ve “2-4-6-8: ara önem değerleri”. Karar elemanlarının ikili karşılaştırılmalarına ilişkin yargılar karşılaştırma matrislere aktarılır ve analiz edilir. Karşılaştırma matrislerinin tutarsızlığı bazı tutarlılık göstergeleri aracılığıyla kontrol edilebilir ve azaltılabilir [107]. AHP yönteminde önem katsayılarını ortaya çıkarmadan önce karşılaştırma matrisleri normalize edilir. Her sütun ilgili sütunda yer alan sayıların toplamına bölünür ve ardından öncelik vektörlerini elde etmek için her satırın aritmetik ortalaması alınır. Elde edilen değerler ağırlıklara karşılık gelir. Tablo 3.3, AHP hesaplamalarının bir örneğini sunmaktadır [108].



Şekil 3.17. AHP ilkeleri ve adımları [106].



Şekil 3.18. Bir AHP hiyerarşisi.

Tablo 3.3. AHP'nin bir ağırlıklandırma prosedürü [108].

| | K ₁ | K ₂ | K ₃ | Özvektör | Kriter vektörü |
|----------------|--|-------------------|-----------------|------------------------------------|------------------------|
| K ₁ | 1 | a ₁₂ | a ₁₃ | $V_i = \prod_{i=1}^n a_{ij}^{1/n}$ | $W_i = V_i / \sum V_i$ |
| K ₂ | 1/a ₁₂ | 1 | a ₂₃ | | $W_i = V_i / \sum V_i$ |
| K ₃ | 1/a ₁₃ | 1/a ₂₃ | 1 | | $W_i = V_i / \sum V_i$ |
| | | | | $\sum V_i$ | $\sum W_i = 1$ |
| Tutarlılık | $(\lambda_{\text{maks}} - n)/(n - 1)/\text{rastgele tutarlılık indeksi}$ | | | | |

λ_{maks} : $n \times n$ matrisin en büyük özdeğeri

AHP, karar vericilerin görüşlerine ve değerlendirmelerine dayanan bir yöntemdir. Karşılaştırma sürecinin bulanık doğası nedeniyle karar elemanlarının doğru ve net derecelendirmelerinin yapılması zordur. İnsan yargıları, çoğunlukla kesin değildir ve kesin sayısal değerler ile yeterince temsil edilemez. Karar vermede, genellikle sözel etiketler tercih edilir. Bu bağlamda, bulanık kümeleri AHP ile bütünleştirmek mantıklıdır. Bulanık kümeler, değerlendirmelerin gerçek görüşler ile yakından eşleşmesine yardımcı olur. Bu çalışmada, aralıklı tip-2 bulanık AHP yöntemi etkinliği ve güvenilirliği nedeniyle tercih edilmiştir. Bu yöntemin adımları şöyledir [46]:

Adım 1: Karar elemanlarının tercih derecelerini (\tilde{a}_{ij}) içeren ikili karşılaştırma matris(ler)i bir değerlendirme ölçeğine göre oluşturulur.

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} \tilde{a}_{11} & \tilde{a}_{12} & \cdots & \tilde{a}_{1n} \\ \tilde{a}_{21} & \tilde{a}_{22} & \cdots & \tilde{a}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{a}_{n1} & \tilde{a}_{n2} & \cdots & \tilde{a}_{nn} \end{bmatrix}_{n \times n} = \begin{bmatrix} \tilde{a}_{11} & \tilde{a}_{12} & \cdots & \tilde{a}_{1n} \\ 1/\tilde{a}_{12} & \tilde{a}_{22} & \cdots & \tilde{a}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/\tilde{a}_{1n} & 1/\tilde{a}_{2n} & \cdots & \tilde{a}_{nn} \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (3.15)$$

Burada;

$$\frac{1}{\tilde{a}_{ij}} = \left(\left(\frac{1}{a_{ij4}^U}, \frac{1}{a_{ij3}^U}, \frac{1}{a_{ij2}^U}, \frac{1}{a_{ij1}^U}; H_1(a_{ij}^U), H_2(a_{ij}^U) \right), \left(\frac{1}{a_{ij4}^L}, \frac{1}{a_{ij3}^L}, \frac{1}{a_{ij2}^L}, \frac{1}{a_{ij1}^L}; H_1(a_{ij}^L), H_2(a_{ij}^L) \right) \right) \quad (3.16)$$

Adım 2: Matris satırlarının geometrik ortalamaları saptanır.

$$\tilde{r}_i = (\tilde{a}_{i1} \otimes \tilde{a}_{i2} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{in})^{1/n} \quad (3.17)$$

Burada;

$$\sqrt[n]{\tilde{a}_{ij}} = \left(\begin{array}{c} \left(\sqrt[n]{a_{ij1}^U}, \sqrt[n]{a_{ij2}^U}, \sqrt[n]{a_{ij3}^U}, \sqrt[n]{a_{ij4}^U}; H_1(a_{ij}^U), H_2(a_{ij}^U) \right), \\ \left(\sqrt[n]{a_{ij1}^L}, \sqrt[n]{a_{ij2}^L}, \sqrt[n]{a_{ij3}^L}, \sqrt[n]{a_{ij4}^L}; H_1(a_{ij}^L), H_2(a_{ij}^L) \right) \end{array} \right) \quad (3.18)$$

Adım 3: Aralıklı tip-2 bulanık ağırlıklar tespit edilir.

$$\tilde{w}_i = \tilde{r}_i \otimes (\tilde{r}_1 \oplus \tilde{r}_2 \oplus \dots \oplus \tilde{r}_n)^{-1} \quad (3.19)$$

Adım 4: Durulaştırma işlemi uygulanır.

$$w'_i = \frac{\left(\begin{array}{c} \left[\frac{(a_{i4}^U - a_{i1}^U) + (H_1(\tilde{A}_i^U) \cdot a_{i2}^U - a_{i1}^U) + (H_2(\tilde{A}_i^U) \cdot a_{i3}^U - a_{i1}^U)}{4} \right] + a_{i1}^{U+} \\ \left[\frac{(a_{i4}^L - a_{i1}^L) + (H_1(\tilde{A}_i^L) \cdot a_{i2}^L - a_{i1}^L) + (H_2(\tilde{A}_i^L) \cdot a_{i3}^L - a_{i1}^L)}{4} \right] + a_{i1}^L \end{array} \right)}{2} \quad (3.20)$$

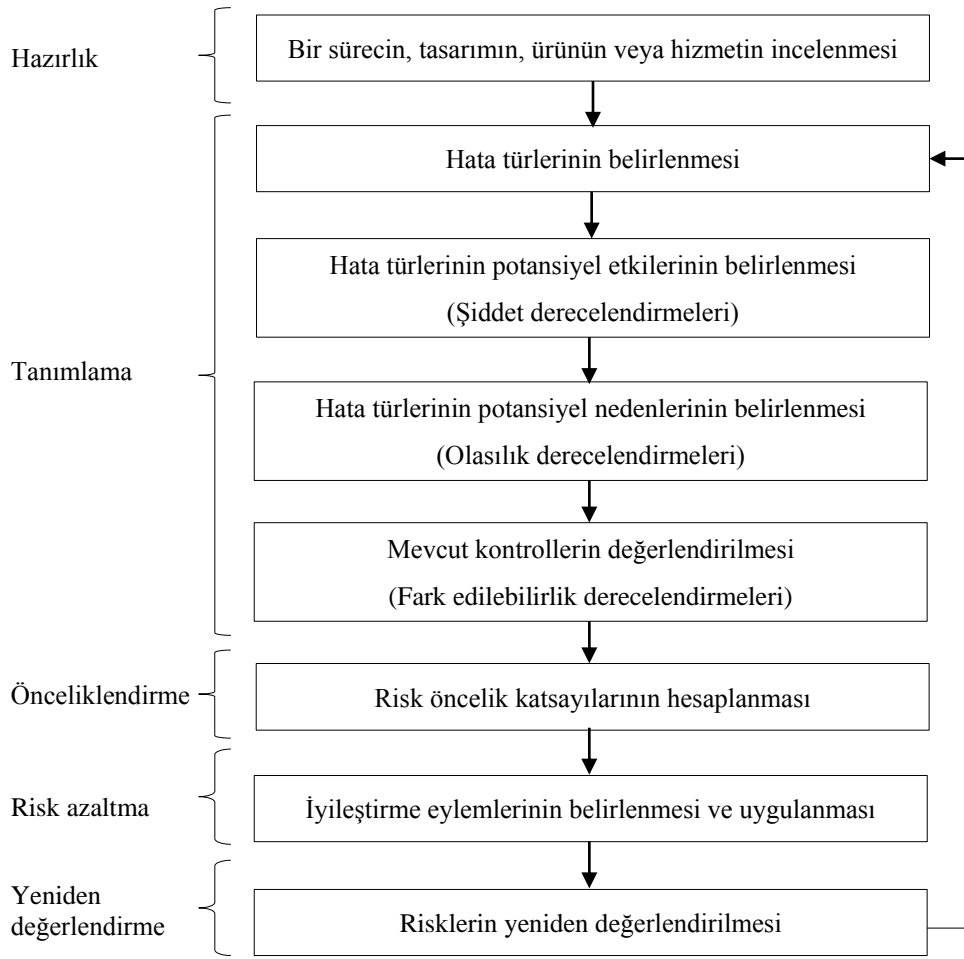
Adım 5: Net ağırlıklar hesaplanır.

$$w_i = \frac{w'_i}{\sum_{i=1}^n w'_i} \quad (3.21)$$

3.5.2. Aralıklı tip-2 bulanık hata türleri ve etkileri analizi

HTEA, bir grup uzman kişinin potansiyel hataların, kusurların ve sorunların ortaya çıkabileceği alanları belirlemek için ürün yapısını ve üretim/hizmet sürecini incelediği ve bunların nedenleri ile etkilerini tanımlayıp analiz ederek önleyici ve iyileştirici eylemler belirlediği bir risk yönetim tekniğidir. Bu yöntem, risk değerlendirmesi ve hata türlerinin analizi yoluyla tekrarlanan sorunların önlenmesine, kayıpların azaltılmasına, ürünlerin kalitesinin ve güvenilirliğinin artırılmasına, maliyet tasarrufuna ve rekabet gücünün artırılmasına katkıda bulunur [109]. HTEA yöntemi, beş ana aşamadan oluşur: (i) hazırlık, (ii) tanımlama, (iii)

önceliklendirme, (iv) risk azaltma ve (v) yeniden değerlendirme. Bu aşamalar, Şekil 3.19'da detaylandırılmıştır [25].



Şekil 3.19. Bir HTEA prosedürü [25].

HTEA'da, girdi olarak şiddet, olasılık ve fark edilebilirlik faktörleri kullanılır ve çıktı olarak risk öncelik katsayıları üretilir. Hata türlerinin meydana gelişinin ciddiyetini, ortaya çıkma olasılığını ve tespit edilme zorluğunu yansıtmak için uzmanlar 1-10 ölçeği ile değerlendirmelerde bulunur [110].

- 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

Risk öncelik katsayısı, üç risk faktörünün sayısal değerlerinin çarpımı (şiddet × olasılık × fark edilebilirlik) ile elde edilir. Bu katsayı, hata türlerinin önceliklendirilmesine ve eylem planlarının belirlenmesine yardımcı olur. Katsayı

değeri 100'ü aşar ise önlem alınmalıdır. Eylem planının uygulamaya geçirilmesinin ardından sorunun ortadan kalkıp kalkmadığını veya azalıp azalmadığını kontrol etmek için risk faktörlerinin yeniden puanlanması gerekir. Risk öncelik katsayısı istenilen düzeye kadar azaltılamamış ise amaç karşılanana kadar yeni düzeltici faaliyetler planlanır [111].

HTEA yöntemi havacılık, kimya, denizcilik, atık yönetimi ve gıda endüstrisi dâhil birçok alanda kullanılmıştır. HTEA'nın en etkili ve güçlü risk yönetim tekniklerinden biri olduğu literatürde vurgulanmıştır. Ancak, klasik HTEA yöntemi bazı eksiklikleri nedeniyle eleştirilmektedir. HTEA'nın bazı önemli eksiklikleri şunlardır [112]:

- Risk faktörlerinin öneminin aynı olduğu kabul edilir.
- Her hata türü için üç risk faktörünün sayısal değerinin belirlenmesi genellikle zordur.
- Farklı faktör kombinasyonları aynı risk öncelik katsayısını verebilir.
- Risk öncelik katsayılarının hesabı için kesikli sıralı ölçekler kullanılır. Bu nedenle, katsayılar arasında çok sayıda aralık meydana gelebilir.
- Bir risk faktörünün değerindeki küçük değişiklik risk öncelik katsayısı üzerinde önemli değişikliklere yol açabilir.
- Risk faktörlerine göre hata türlerinin risk seviyelerini değerlendirmek için kesin değerler kullanılır. Ancak, kesin sayısal yargılar elde etmek problemin karmaşıklığı, düşünmenin sınırlılığı, öznellik ve verilerdeki sınırlamalar nedeniyle birçok uygulamada zor ve hatta bazen imkânsızdır. Dolayısıyla, klasik HTEA değerlendirme sürecindeki belirsizliğin ve anlam bulanıklığının üstesinden gelemez.

Bulanık yaklaşım, klasik HTEA'nın eksikliklerinin üstesinden gelme yollarından biridir. Aralıklı tip-2 bulanık HTEA, dilsel değişkenler aracılığıyla hata türlerinin temsil edilmesi ve kesin sayılar yerine aralıklı tip-2 bulanık sayılar ile incelenmesi üzerine kuruludur. Bu yöntemde, değerlendirme ölçekleri bulanıklaştırılmakta ve karar elemanları dilsel bilgiler ile tanımlanmaktadır. Durulaştırma yöntemleri, kesin değerler elde etmek için uygulanabilir.

Literatürde, bulanık risk öncelik katsayısı ($BRÖS_i$) hesabı için araştırmacılar tarafından çeşitli yaklaşımlar önerilmiştir. Bu amaç için denklem 3.22 problemlere adapte edilebilir [113].

$$BRÖS_i = (\tilde{M}_i^O)^{\frac{\tilde{W}^O}{\tilde{W}^O + \tilde{W}^S + \tilde{W}^F}} \times (\tilde{M}_i^S)^{\frac{\tilde{W}^S}{\tilde{W}^O + \tilde{W}^S + \tilde{W}^F}} \times (\tilde{M}_i^F)^{\frac{\tilde{W}^F}{\tilde{W}^O + \tilde{W}^S + \tilde{W}^F}} \quad (3.22)$$

Burada; \tilde{M}_i^O , \tilde{M}_i^S ve \tilde{M}_i^F sırasıyla olasılık, şiddet ve fark edilebilirlik değeri, \tilde{W}^O , \tilde{W}^S ve \tilde{W}^F ise sırasıyla bu risk faktörleri için ağırlık değeridir [113].

3.5.3. Aralıklı tip-2 bulanık ortalama çözüm uzaklığına göre değerlendirme

EDAS yöntemi, birbiriyle çelişen kıstasların varlığında alternatiflerin incelendiği ÇKKV problemlerinin çözümü için etkili bir karar verme aracıdır. Alternatiflerin incelenmesinde ortalama çözüm değerleri dikkate alınır. Bu yöntem, ortalamadan pozitif uzaklık (PDA) ve ortalamadan negatif uzaklık (NDA) ölçüleri ile alternatifler arasında ayırım yapılmasına olanak tanır. Kesin sayısal değerlerin tercihleri ifade etmede yetersiz olduğu durumlarda dilsel bilgiden faydalanmak şart olur. Bu sebeple, bulanık kümeler ile EDAS yöntemi sıkça birleştirilmektedir. Bu çalışmada kullanılan aralıklı tip-2 bulanık EDAS yöntemi şu adımlardan oluşur [53]:

Adım 1: Karar matrisine göre ortalama çözümler ($\tilde{a}v_j$) belirlenir.

$$\tilde{a}v_j = \frac{1}{m} \bigoplus_{i=1}^m \tilde{x}_{ij} \quad (3.23)$$

Burada; \tilde{x}_{ij} i . alternatfin j . kriterdeki performansını, m ise alternatif sayısını belirtir.

Adım 2: PDA ve NDA matrisleri inşa edilir.

$$\tilde{p}da_{ij} = \begin{cases} \frac{\psi(\tilde{x}_{ij} \ominus \tilde{a}v_j)}{\kappa(\tilde{a}v_j)} & \text{eğer } j \in \text{fayda kriteri kümesi} \\ \frac{\psi(\tilde{a}v_j \ominus \tilde{x}_{ij})}{\kappa(\tilde{a}v_j)} & \text{eğer } j \in \text{maliyet kriteri kümesi} \end{cases} \quad (3.24)$$

$$\tilde{n}da_{ij} = \begin{cases} \frac{\psi(\tilde{a}v_j \ominus \tilde{x}_{ij})}{\kappa(\tilde{a}v_j)} & \text{eğer } j \in \text{fayda kriteri kümesi} \\ \frac{\psi(\tilde{x}_{ij} \ominus \tilde{a}v_j)}{\kappa(\tilde{a}v_j)} & \text{eğer } j \in \text{maliyet kriteri kümesi} \end{cases} \quad (3.25)$$

Burada; \widetilde{pda}_{ij} ve \widetilde{nda}_{ij} , sırasıyla \widetilde{av}_j 'den pozitif ve negatif mesafeleri belirtir. $\kappa(\widetilde{A})$ ve $\psi(\widetilde{A})$ fonksiyonları ise sırasıyla durulaştırılmış değerleri ve aralıklı tip-2 bulanık sayı ile sıfır arasındaki en yüksek değeri belirleme amacına yöneliktir. $\kappa(\widetilde{A})$ için denklem 3.20'den, $\psi(\widetilde{A})$ için ise denklem 3.26'dan faydalanılabilir.

$$\psi(\widetilde{A}) = \begin{cases} \widetilde{A} & \text{eğer } \kappa(\widetilde{A}) > 0 \\ (0,0,0,0;1,1),(0,0,0,0;1,1) & \text{eğer } \kappa(\widetilde{A}) \leq 0 \end{cases} \quad (3.26)$$

Adım 3: Ağırlıklı pozitif uzaklıklar (\widetilde{sp}_i) ile negatif uzaklıklar (\widetilde{sn}_i) saptanır.

$$\widetilde{sp}_i = \bigoplus_{j=1}^n (w_j \otimes \widetilde{pda}_{ij}) \quad (3.27)$$

$$\widetilde{sn}_i = \bigoplus_{j=1}^n (w_j \otimes \widetilde{nda}_{ij}) \quad (3.28)$$

Adım 4: Normalize \widetilde{sp}_i (\widetilde{nsp}_i) ve \widetilde{sn}_i (\widetilde{nsn}_i) değerleri elde edilir.

$$\widetilde{nsp}_i = \frac{\widetilde{sp}_i}{\text{maks}_i(\kappa(\widetilde{sp}_i))} \quad (3.29)$$

$$\widetilde{nsn}_i = 1 - \frac{\widetilde{sn}_i}{\text{maks}_i(\kappa(\widetilde{sn}_i))} \quad (3.30)$$

Adım 5: Aralıklı tip-2 bulanık değerlendirme skorları (\widetilde{as}_i) hesaplanır.

$$\widetilde{as}_i = (\widetilde{nsp}_i \oplus \widetilde{nsn}_i) / 2 \quad (3.31)$$

Adım 6: Net değerlendirme skorları (as_i), denklem 3.20 ile belirlenir ve azalan düzende sıralanır. En yüksek skorlu seçenek, en uygun sonuçtur.

4. ARAŞTIRMA VE BULGULAR

4.1. Biyomalzeme İnceleme Problemi ve Değerlendirme Kriterleri

Metalik biyomalzemeler yüksek mukavemet, şekillendirilebilme kolaylığı ve iyi yorulma performansı gibi bazı üstün özellikleri nedeniyle kalça ve diz protezleri, kırık tespit telleri, vidalar, plakalar ve benzeri ortopedik uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ortopedik kusurlar yaşlanma, travma, doğuştan gelen eksiklik ve enfeksiyon gibi çeşitli faktörler nedeniyle ortaya çıkan ve sıklıkla karşılaşılan sorunlardır. Ortopedik cerrahide metalik biyomalzemelerin ana rolü, kemik ve eklem işlevini eski haline getirmek ve mevcut ağrıyı gidermektir. Biyomalzemenin insan vücudunda uzun vadeli etkinliği için metalin yüksek korozyon direnci, çekme dayanımı ve aşınma direnci gibi arzu edilen özelliklere haiz olması gerekir.

Metalik biyomalzemeler insan sağlığı, tedavi ve yaşam kalitesi gibi çeşitli hususlar üzerinde önemli etkilere sahiptir. Biyomedikal uygulamaların başarısı ve risklerin azaltılması/önlenmesi, malzeme özelliklerinin incelenmesi ile ilişkilidir. Metalik biyomalzemelerin kendine has özellikler içermesi ve maruz kaldıkları biyolojik ortamın agresif ve hassas olması nedeniyle bu malzemelerin doğru bir şekilde değerlendirilmesi ve seçimi önem kazanmıştır. Ayrıca, biyomalzemelerin avantajları, sınırlamaları, performansları, potansiyelleri ve faydaları ile ilgili farkındalık düzeyinin artırılması gerekli olmuştur. Biyomalzemeler ekonomik açıdan makul olmalı ve uzun vadeli hizmet için gelişimleri desteklenmelidir. Ayrıca, tasarım ve üretim gereksinimlerinin malzeme seçiminde dikkate alınması önemlidir. Öte yandan, malzemeler farklı fiziksel, mekanik, kimyasal ve biyolojik özellikler kombinasyonuna sahiptir. Dolayısıyla, metalik biyomalzeme inceleme problemi birçok kriterin aynı anda dikkate alınmasını gerektirir.

Bu çalışma, metalik biyomalzemeler sınıfı altında yer alan paslanmaz çelik, titanyum ve kobalt-krom alaşımlarının risk açısından incelenmesi için yeni bir karar verme yaklaşımı sunmaktadır. Tıbbi uygulamalarda birçok biyomalzeme kullanıldığı halde, biyomalzeme değerlendirme kriterleri tam olarak tayin edilmemiştir. Başka bir

deyişle, biyomalzemelerin incelenmesine yönelik karar kriterleri literatürde detaylıca belirtilmemiş ve sınıflandırılmamıştır. Bu çalışma, metal esaslı biyomalzemelerin değerlendirilmesine ve seçilmesine yönelik geniş bir yapının inşa edilmesine odaklanmıştır.

Öncelikle, metalik biyomalzemelerin incelenmesi ile ilgili kriterlerin bir ön listesi literatür taraması yoluyla hazırlanmıştır. Ardından, uzmanların görüşlerine başvurulmuştur. Kriterler, uygunluk ve anlamsal doğruluk bakımından bir dizi incelemelere tabi tutulmuştur. Literatürdeki geçmiş çalışmalarda dikkate alınmayan çok sayıda yeni kriter çalışmaya eklenmiştir. Tüm kriterler, çeşitli gruplar altında kategorize edilmiştir. Sonuç olarak, çalışmaya altı ana kriter ve otuz bir alt kriter dâhil edilmiştir. Belirlenen ana kriterler şunlardır: (i) ekonomik özellikler, (ii) tasarım ve üretim özellikleri, (iii) mekanik özellikler, (iv) fiziksel özellikler, (v) kimyasal özellikler ve (vi) biyolojik özellikler.

Ekonomik özellik, malzemelerin ekonomik yönlerini, etkilerini ve potansiyellerini tanımlar. Çalışmanın ekonomik özellikler ana kriteri dört alt kriterden oluşmaktadır. Bu alt kriterler ve açıklamaları şöyledir:

- Araştırma, geliştirme ve uygulamalar için yatırım eğilimi: Malzemelerin iyileştirilmesi ve uygulanması açısından olumlu yönde neticeler sağlamaya yönelik sarf edilen çabaları belirtmektedir. Bu kapsamda harcanan çabanın az olmaması istenir.
- Uzun ömürlülük: Malzemenin tahmini en uzun kullanım süresi ile ilgilidir. Biyomalzemelerin hizmet ömrünün uzun olması beklenir.
- Maliyet: Malzeme ve üretim maliyetini içerir. Maliyetin ve maliyetteki değişimin yüksek olmaması istenir.
- Bulunabilirlik: Malzemeye çeşitli kanallar aracılığıyla kolayca erişilebilmeyi ifade eder. Bulunabilirlik, fayda yönlü bir alt kriterdir.

Tasarım ve üretim özellikleri, tasarlama ve üretim sürecinde önemli etkilere sahip olan malzeme özelliklerini belirtir. Çalışmadaki tasarım ve üretim özellikleri ana kriteri altında altı alt kriter bulunmaktadır. Bu alt kriterler şu şekilde kısaca izah edilebilir:

- Üretim kolaylığı: Bir ürünün tasarlanmasının veya mühendislik sürecinin kolaylığı ile ilgilidir. Üretim kolaylığı, fayda yönlü bir değerlendirme kriteridir.
- Hafiflik: Normal ağırlığın altında veya çok az ağırlığa sahip olunması olarak tanımlanır. Biyomalzemenin ağır olması istenmeyen bir durum olarak kabul edilmektedir.
- İşlenebilirlik: Kabul edilebilir bir yüzey kalitesine kadar işleme kolaylığıdır. Malzemenin işlenebilirlik yönünün yüksek olması istenir.
- Sterilize edilebilirlik: Canlı bakteri veya diğer mikroorganizmalardan arındırılabilme kabiliyetidir. Malzemenin kolay sterilize edilebilmesi ve sterilizasyon işleminden olumsuz etkilenmemesi gerekir.
- Şekillendirilebilirlik: İş parçasının hasar görmeden plastik deformasyona uğrama kabiliyetidir. Şekillendirilmenin kolay olması malzemenin tercih düzeyinin artmasına katkıda bulunur.
- Uyumluluk: Malzemenin yapısal ve yüzeysel uygunluğu ile ilgilidir. Yüksek uyumluluk, biyomedikal uygulamalarda arzu edilen özellikler arasında yer almaktadır.

Mekanik özellik, değişik tür zorlamalar altında malzemede meydana gelen değişimler ve malzemenin uygulanan yüklere tepkisini etkileyen özellikler ile ilgilidir. Çalışmadaki mekanik özellikler ana kriteri altında altı alt kriter mevcuttur. Bu alt kriterler aşağıda listelenmiş ve açıklanmıştır.

- Aşınma direnci: Aşınma ortamının agresifliğine direnme yeteneğidir. Malzemelerin yüksek aşınma direncine sahip olması istenir.
- Yorulma direnci: Bir malzemenin tekrarlı gerilme etkisi altında oluşacak deformasyona karşı gösterdiği dirençtir. Yorulmaya karşı direncin düşük olmaması istenir.
- Çekme mukavemeti: Çekme etkisi altında elde edilebilecek en yüksek gerilme değeri ile ilgilidir. Uygulamalarda, çekme mukavemetinin yüksek olması beklenir.
- Tokluk: Malzemenin kopuncaya kadar absorbe edebildiği enerji ile ilgili olup, fayda yönlü bir alt kriterdir.

- Sertlik: Lokal plastik deformasyona karşı direncin ölçülerindedir. Biyomalzemenin sertliğinin, sert dokununkine eşit veya uygun değerde olması önemlidir.
- Zamana bağlı deformasyon: Belirli bir zaman içerisinde oluşan biçimsel bozukluğu belirtir. Uygulanan biyomalzemenin özelliklerini yitirecek şekilde deformasyona uğramaması esastır.

Fiziksel özellik, malzemenin gözlenebilen veya ölçülebilen özelliklerini kapsar. Çalışmadaki fiziksel özellikler ana kriteri için belirlenen alt kriterler ve açıklamaları şöyledir:

- Yoğunluk: Birim hacimdeki madde miktarı olarak tanımlanabilir. Malzemenin çok yüksek yoğunluklu olmaması istenir.
- Boyutsal kararlılık: Kullanımdaki malzemenin orijinal boyutlarını koruyabilme becerisidir. Malzemenin boyutsal kararlılığının yüksek olması arzu edilir.
- İletkenlik: Akım iletim kabiliyetidir. İletkenliğin yüksek olması istenmeyen bir durumdur.
- Manyetik hassasiyet: Bir malzemenin manyetik alana tepkisidir. Malzemelerin antimagnetik olma yeteneğinin düşük olması sorun teşkil edebilmektedir.

Kimyasal özellik, kimyasal değişime veya reaksiyona maruziyet esnasında veya sonrasında ilgili malzemenin nasıl davrandığını tanımlar. Çalışmadaki kimyasal özellikler ana kriteri için beş alt kriter belirlenmiştir. Bu alt kriterler ve açıklamaları şöyledir:

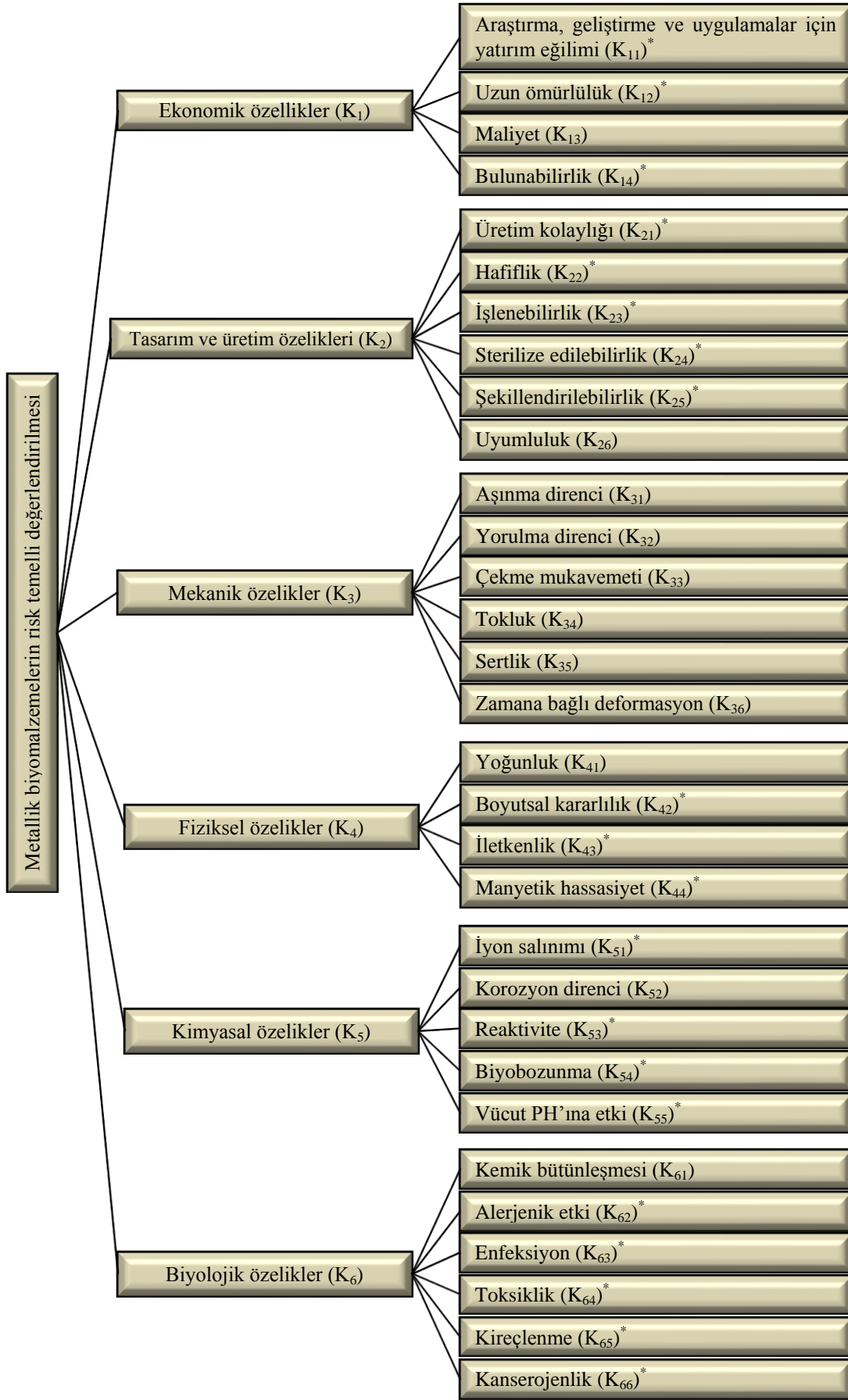
- İyon salınımı: Metal iyonların vücut içerisine serbest bırakılmasıdır. İyon salınımı, maliyet yönlü bir alt kriterdir.
- Korozyon direnci: Oksitlenme veya diğer kimyasal etkilerle aşınma ile ilgilidir. Korozyona karşı direncin yüksek olması istenir.
- Reaktivite: Malzemenin biyolojik sistemle etkileşime girme derecesidir. Reaktivitenin kontrol altında tutulması önemlidir.

- Biyobozunma: Malzemenin vücutta bozunmaya uğramasıdır. Biyobozunma kontrol altında tutulması gereken bir durumdur.
- Vücut PH'ına etki: İnsan vücudunun en iyi şekilde çalıştığı asit-baz seviyesi üzerine olan etkidir. Uygulanan biyomalzeme vücut PH dengesini tehdit etmemelidir.

Biyolojik özellik, malzemenin herhangi bir istenmeyen olumsuz etkiye sebebiyet vermeden kendisinden beklenen işlev(ler)i yerine getirme yeteneği ile ilgilidir. Biyolojik özellikler ana kriteri aşağıda sunulan ve açıklanan altı alt kriterden oluşmaktadır.

- Kemik bütünleşmesi: Kemik ile implant arasındaki bağlantı ile ilgilidir. Yüksek kemik bütünleşmesi, biyomedikal uygulamalarda gerçekleşmesi arzu edilen durumlardandır.
- Alerjenik etki: Alerjenik yanıtı indüklemeye kapasitesidir. Malzemenin alerji oluşturma potansiyelinin düşük olması istenir.
- Enfeksiyon: Vücut içerisinde esasen mevcut olmayan bakteri, virüs ve parazit gibi mikroorganizmaların istilasidir. Malzemenin enfeksiyona neden olma potansiyelinin yüksek olması bir tehdittir.
- Toksiklik: Zehirli olma veya istenmeyen sağlık etkilerine neden olma eğilimi olarak açıklanır. Malzemenin toksik olma potansiyelinin düşük olması gerekir.
- Kireçlenme: Kalsiyum karbonat ve yahut diğer bazı çözünmeyen kalsiyum bileşiklerinin birikimi veya dönüşümü sonucunda dokunun veya materyalin sertleşmesi olarak açıklanabilir. Kireçlenme, maliyet yönlü bir değerlendirme kriteridir.
- Kanserojenlik: Kansere üretme eğilimidir. Malzemenin kansere neden olma potansiyelinin düşük olması gerekir.

Çalışmada dikkate alınan ana ve alt kriterler Şekil 4.1'de hiyerarşik bir düzende sunulmuştur. Bu şekilde, biyomalzeme seçimi ile ilgili literatüre kazandırılan farklı değerlendirme kriterleri * işareti ile belirtilmiştir.

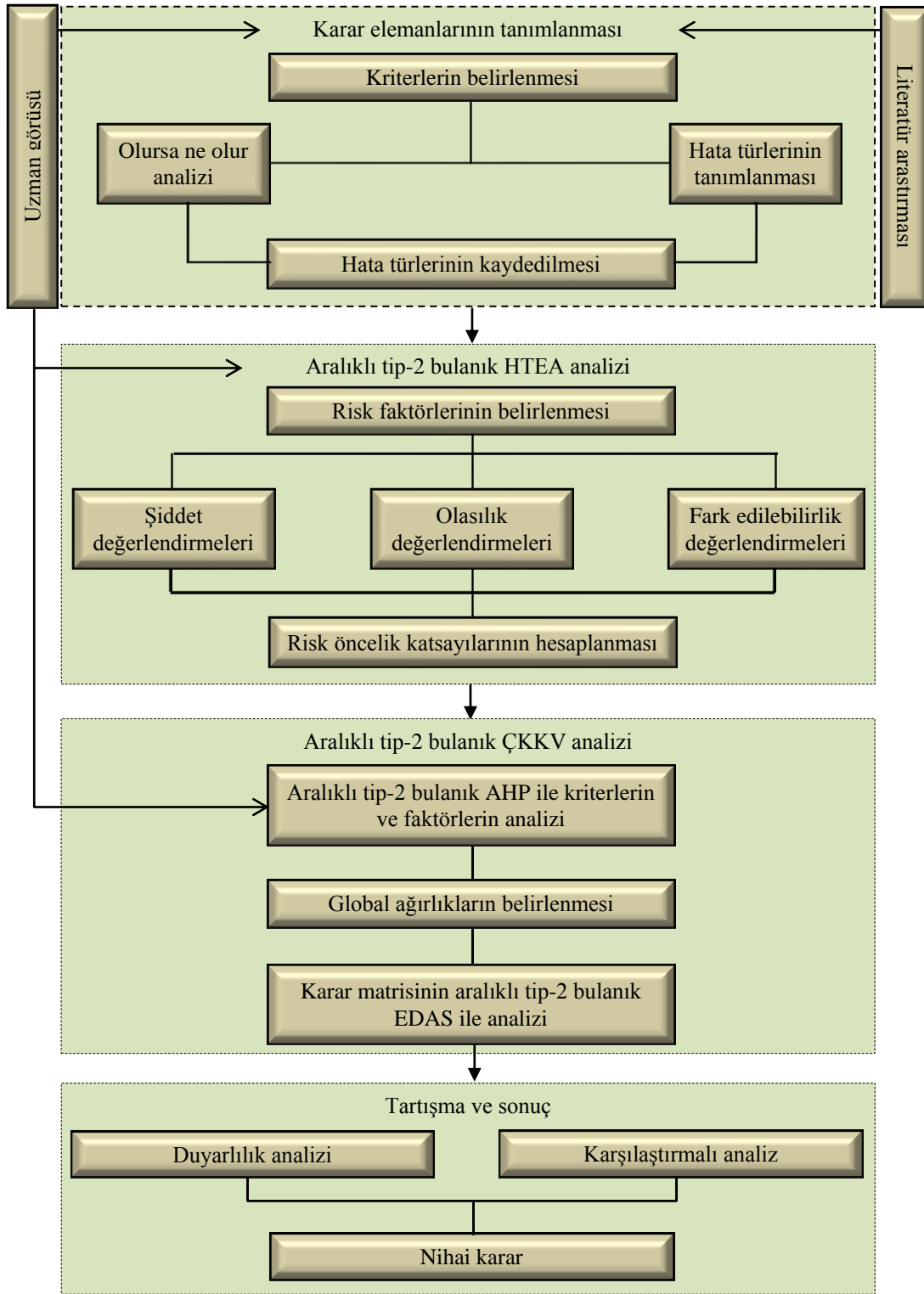


Şekil 4.1. Çalışmadaki ana ve alt kriterler.

4.2. Risk Temelli Bir Karar Verme Yaklaşımı

Biyomalzemelerin incelenmesi; nitel ve nicel verileri içeren, malzeme özelliklerinin insan sağlığı/yaşam kalitesi/tedavi üzerindeki etkisi ve risk oluşturma olasılığı ile fark edilme durumu gibi bilgilerin dikkate alınmasını gerektiren bir problemdir. Karar verme süreci, belirsizlikten ve karmaşıklıktan etkilenir. Bulanık teorinin kullanımı bu zorluğun üstesinden gelmede kilit rol oynar. Bu teori, dilsel değişkenler ve yaklaşık akıl yürütme yoluyla karar vermeyi kolaylaştırır. Risk temelli karar verme genellikle uzmanların bilgi ve deneyimlerine dayanır. Uzmanlar görüşlerini çoğunlukla dilsel etiketleri kullanarak ifade etmeyi tercih eder. Tip-2 bulanık küme, gerçek dünya problemlerindeki belirsizlik ve karmaşıklık durumlarında oldukça esnek ve başarılıdır. Aralıklı tip-2 bulanık küme, karar vericilerin ifadeleri için bir aralık alanı sağladığından dolayı karar verme uygulamalarında daha fazla tercih edilmektedir [114].

Aralıklı tip-2 bulanık kümenin belirsizlik unsurlarını iyi bir şekilde ele alması, kullanılabilirliği ve popülerliği gibi yönleri göz önünde bulundurularak, çalışmadaki malzemelerin incelenmesi için aralıklı tip-2 bulanık ortam altında bütünleşik yeni bir risk temelli karar verme yaklaşımı sunulmaktadır. Bu yaklaşım, AHP, HTEA ve EDAS yöntemlerini içermektedir. Aralıklı tip-2 bulanık HTEA ile malzemeler için risk öncelik katsayıları elde edilmekte ve bir risk karar matrisi oluşturulmaktadır. Risk öncelik katsayılarının hesaplanmasında üç faktörden faydalanılmaktadır: (i) şiddet, (ii) olasılık ve (iii) fark edilebilirlik. HTEA'nın etkili, güvenilir ve pratik olması ve ele alınan problemin doğasına uygunluğu yani risk analizine dayanması yöntemin tercih edilme sebepleri arasında yer almaktadır. Malzemelerin incelenmesi için belirlenen kriterler ve risk faktörleri eşit derecede öneme sahip değildir. Bu nedenle, kriterlerin ve risk faktörlerinin önemini ifade etmek için her birinin ağırlığının tespit edilmesi gerekir. Bu amaç için başarılı ve popüler yöntemlerden biri olan aralıklı tip-2 bulanık AHP tercih edilmiştir. Aralıklı tip-2 bulanık HTEA aracılığıyla elde edilen risk öncelik katsayılarını kullanan aralıklı tip-2 bulanık EDAS ile malzemeler analiz edilmektedir. Bu yöntemin tercihinde, hesaplama prosedürünün yenilikçiliği ve TOPSİS ve VİKOR gibi seçkin ÇKKV yöntemlerinin etkin stratejilerine dayanırılığı önemli rol oynamıştır. Mevcut çalışmanın işleyişi Şekil 4.2'de aydınlatılmıştır.



Şekil 4.2. Çalışmanın işleyişi.

Öncelikle, literatür araştırması ve uzman görüşleri doğrultusunda karar elemanları tanımlanır. Ardından, aralıklı tip-2 bulanık AHP-HTEA-EDAS ile karar elemanları değerlendirilir. Son aşamada, önerilen yaklaşımın sağladığı çıktıları tartışmak için karşılaştırmalı analiz ile duyarlılık analizi gerçekleştirilir.

4.3. Aralıklı Tip-2 Bulanık AHP-HTEA-EDAS Uygulaması

Bu bölümde, paslanmaz çelik, titanyum ve kobalt-krom alaşımları aralıklı tip-2 bulanık AHP-HTEA-EDAS yaklaşımı aracılığıyla incelenmektedir. Çalışmada dikkate alınan altı ana kriter, otuz bir alt kriter, üç risk faktörü ve üç malzeme seçeneği, Biyomedikal Mühendisliği ile Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümlerinde çalışan, biyomalzemeler üzerine çeşitli ulusal ve uluslararası çalışmaları olan ve alanında en az on yıllık deneyime sahip on uzman tarafından değerlendirilmiştir. Uzmanlar, araştırma konusuyla ilgili deneyimleri, bilgileri ve yayınları dikkate alınarak seçilmiştir. Yanıtlayıcılar, kişisel bilgi ve uzmanlık temelinde yargılarda bulunmuştur.

Malzeme seçenekleri, aralıklı tip-2 bulanık HTEA prosedürü göz önünde bulundurularak risk faktörlerine göre değerlendirilmiştir. Bu aşamada, malzemenin ilgili niteliğinin insan sağlığı/yaşam kalitesi/tedavi üzerindeki etkisi, söz konusu nitelikte risk oluşturma olasılığı ve fark edilme durumu dikkate alınmıştır. Uzmanlar derecelendirmeleri yaparken aşağıdaki aralıklı tip-2 bulanık HTEA ölçeğinden faydalanmışlardır.

Tablo 4.1. Aralıklı tip-2 bulanık HTEA ölçeği [26].

| Şiddet ve olasılık dilsel ölçeği | Fark edilebilirlik dilsel ölçeği | Aralıklı tip-2 bulanık ölçek |
|----------------------------------|----------------------------------|--|
| Çok düşük | Çok yüksek | (0, 0, 0, 0,1; 1, 1), (0, 0, 0, 0,05; 0,9, 0,9) |
| Düşük | Yüksek | (0,1, 0,3, 0,3, 0,5; 1, 1), (0,2, 0,3, 0,3, 0,4; 0,9, 0,9) |
| Orta | Orta | (0,4, 0,6, 0,6, 0,8; 1, 1), (0,5, 0,6, 0,6, 0,7; 0,9, 0,9) |
| Yüksek | Düşük | (0,8, 0,95, 0,95, 1; 1, 1), (0,9, 0,95, 0,95, 1; 0,9, 0,9) |
| Çok yüksek | Çok düşük | (0,9, 1, 1, 1; 1, 1), (0,95, 1, 1, 1; 0,9, 0,9) |

Uzmanlar görüşlerini dilsel etiketler ile ifade etmişlerdir. Matematiksel işlemlerin gerçekleştirilebilmesi için sözel yargılar ölçekteki karşılık gelen aralıklı tip-2 yamuk bulanık sayılara dönüştürülmüştür. Uzmanların görüşleri, malzemelerin risk faktörleri açısından nihai değerlendirme sonuçlarının elde edilebilmesi için birleştirilmiştir. Paslanmaz çelik, titanyum ve kobalt-krom alaşımlarının her bir değerlendirme kriteri altındaki nihai şiddet, olasılık ve fark edilebilirlik sonuçları sırasıyla Tablo 4.2, Tablo 4.3 ve Tablo 4.4'te sunulmuştur.

Tablo 4.2. Paslanmaz çelik için şiddet, olasılık ve fark edilebilirlik sonuçları.

| Kriter | Şiddet | Olasılık | Fark edilebilirlik |
|-----------------|---|---|---|
| K ₁₁ | (0,56, 0,74, 0,74, 0,88; 1, 1), (0,66, 0,74, 0,74, 0,82; 0,9, 0,9) | (0,34, 0,49, 0,49, 0,64; 1, 1), (0,42, 0,49, 0,49, 0,57; 0,9, 0,9) | (0,42, 0,56, 0,56, 0,68; 1, 1), (0,50, 0,56, 0,56, 0,63; 0,9, 0,9) |
| K ₁₂ | (0,44, 0,62, 0,62, 0,76; 1, 1), (0,54, 0,62, 0,62, 0,70; 0,9, 0,9) | (0,42, 0,61, 0,61, 0,78; 1, 1), (0,52, 0,61, 0,61, 0,70; 0,9, 0,9) | (0,36, 0,55, 0,55, 0,72; 1, 1), (0,46, 0,55, 0,55, 0,64; 0,9, 0,9) |
| K ₁₃ | (0,16, 0,36, 0,36, 0,56; 1, 1), (0,26, 0,36, 0,36, 0,46; 0,9, 0,9) | (0,20, 0,36, 0,36, 0,54; 1, 1), (0,28, 0,36, 0,36, 0,45; 0,9, 0,9) | (0,42, 0,56, 0,56, 0,70; 1, 1), (0,49, 0,56, 0,56, 0,63; 0,9, 0,9) |
| K ₁₄ | (0,48, 0,64, 0,64, 0,76; 1, 1), (0,56, 0,64, 0,64, 0,70; 0,9, 0,9) | (0,46, 0,58, 0,58, 0,68; 1, 1), (0,52, 0,58, 0,58, 0,63; 0,9, 0,9) | (0,10, 0,18, 0,18, 0,32; 1, 1), (0,14, 0,18, 0,18, 0,25; 0,9, 0,9) |
| K ₂₁ | (0,30, 0,49, 0,49, 0,66; 1, 1), (0,40, 0,49, 0,49, 0,58; 0,9, 0,9) | (0,40, 0,50, 0,50, 0,60; 1, 1), (0,46, 0,50, 0,50, 0,56; 0,9, 0,9) | (0,06, 0,18, 0,18, 0,34; 1, 1), (0,12, 0,18, 0,18, 0,26; 0,9, 0,9) |
| K ₂₂ | (0,48, 0,67, 0,67, 0,84; 1, 1), (0,58, 0,67, 0,67, 0,76; 0,9, 0,9) | (0,28, 0,48, 0,48, 0,68; 1, 1), (0,38, 0,48, 0,48, 0,58; 0,9, 0,9) | (0,20, 0,36, 0,36, 0,54; 1, 1), (0,28, 0,36, 0,36, 0,45; 0,9, 0,9) |
| K ₂₃ | (0,50, 0,63, 0,63, 0,74; 1, 1), (0,57, 0,63, 0,63, 0,69; 0,9, 0,9) | (0,42, 0,56, 0,56, 0,70; 1, 1), (0,49, 0,56, 0,56, 0,63; 0,9, 0,9) | (0,12, 0,24, 0,24, 0,40; 1, 1), (0,18, 0,24, 0,24, 0,32; 0,9, 0,9) |
| K ₂₄ | (0,42, 0,56, 0,56, 0,68; 1, 1), (0,50, 0,56, 0,56, 0,63; 0,9, 0,9) | (0,22, 0,37, 0,37, 0,52; 1, 1), (0,30, 0,37, 0,37, 0,45; 0,9, 0,9) | (0,22, 0,37, 0,37, 0,52; 1, 1), (0,30, 0,37, 0,37, 0,45; 0,9, 0,9) |
| K ₂₅ | (0,46, 0,58, 0,58, 0,68; 1, 1), (0,52, 0,58, 0,58, 0,63; 0,9, 0,9) | (0,44, 0,57, 0,57, 0,68; 1, 1), (0,51, 0,57, 0,57, 0,63; 0,9, 0,9) | (0,06, 0,18, 0,18, 0,34; 1, 1), (0,12, 0,18, 0,18, 0,26; 0,9, 0,9) |
| K ₂₆ | (0,68, 0,83, 0,83, 0,90; 1, 1), (0,77, 0,83, 0,83, 0,88; 0,9, 0,9) | (0,36, 0,55, 0,55, 0,72; 1, 1), (0,46, 0,55, 0,55, 0,64; 0,9, 0,9) | (0,44, 0,62, 0,62, 0,76; 1, 1), (0,54, 0,62, 0,62, 0,70; 0,9, 0,9) |
| K ₃₁ | (0,70, 0,84, 0,84, 0,90; 1, 1), (0,78, 0,84, 0,84, 0,88; 0,9, 0,9) | (0,66, 0,82, 0,82, 0,92; 1, 1), (0,75, 0,82, 0,82, 0,88; 0,9, 0,9) | (0,08, 0,24, 0,24, 0,42; 1, 1), (0,16, 0,24, 0,24, 0,33; 0,9, 0,9) |
| K ₃₂ | (0,52, 0,69, 0,69, 0,82; 1, 1), (0,61, 0,69, 0,69, 0,76; 0,9, 0,9) | (0,50, 0,68, 0,68, 0,84; 1, 1), (0,59, 0,68, 0,68, 0,76; 0,9, 0,9) | (0,34, 0,49, 0,49, 0,64; 1, 1), (0,42, 0,49, 0,49, 0,57; 0,9, 0,9) |
| K ₃₃ | (0,72, 0,88, 0,88, 0,96; 1, 1), (0,82, 0,88, 0,88, 0,94; 0,9, 0,9) | (0,42, 0,61, 0,61, 0,78; 1, 1), (0,52, 0,61, 0,61, 0,70; 0,9, 0,9) | (0,14, 0,30, 0,30, 0,48; 1, 1), (0,22, 0,30, 0,30, 0,39; 0,9, 0,9) |
| K ₃₄ | (0,70, 0,84, 0,84, 0,90; 1, 1), (0,78, 0,84, 0,84, 0,88; 0,9, 0,9) | (0,46, 0,58, 0,58, 0,68; 1, 1), (0,52, 0,58, 0,58, 0,63; 0,9, 0,9) | (0,02, 0,06, 0,06, 0,18; 1, 1), (0,04, 0,06, 0,06, 0,12; 0,9, 0,9) |
| K ₃₅ | (0,52, 0,69, 0,69, 0,82; 1, 1), (0,61, 0,69, 0,69, 0,76; 0,9, 0,9) | (0,44, 0,57, 0,57, 0,68; 1, 1), (0,51, 0,57, 0,57, 0,63; 0,9, 0,9) | (0,06, 0,18, 0,18, 0,34; 1, 1), (0,12, 0,18, 0,18, 0,26; 0,9, 0,9) |
| K ₃₆ | (0,30, 0,49, 0,49, 0,66; 1, 1), (0,40, 0,49, 0,49, 0,58; 0,9, 0,9) | (0,08, 0,24, 0,24, 0,42; 1, 1), (0,16, 0,24, 0,24, 0,33; 0,9, 0,9) | (0,72, 0,88, 0,88, 0,96; 1, 1), (0,82, 0,88, 0,88, 0,94; 0,9, 0,9) |
| K ₄₁ | (0,36, 0,50, 0,50, 0,64; 1, 1), (0,43, 0,50, 0,50, 0,57; 0,9, 0,9) | (0,38, 0,56, 0,56, 0,72; 1, 1), (0,47, 0,56, 0,56, 0,64; 0,9, 0,9) | (0,20, 0,31, 0,31, 0,44; 1, 1), (0,26, 0,31, 0,31, 0,38; 0,9, 0,9) |
| K ₄₂ | (0,48, 0,67, 0,67, 0,84; 1, 1), (0,58, 0,67, 0,67, 0,76; 0,9, 0,9) | (0,20, 0,36, 0,36, 0,54; 1, 1), (0,28, 0,36, 0,36, 0,45; 0,9, 0,9) | (0,32, 0,48, 0,48, 0,66; 1, 1), (0,40, 0,48, 0,48, 0,57; 0,9, 0,9) |
| K ₄₃ | (0,40, 0,55, 0,55, 0,70; 1, 1), (0,48, 0,55, 0,55, 0,63; 0,9, 0,9) | (0,34, 0,49, 0,49, 0,64; 1, 1), (0,42, 0,49, 0,49, 0,57; 0,9, 0,9) | (0,14, 0,30, 0,30, 0,48; 1, 1), (0,22, 0,30, 0,30, 0,39; 0,9, 0,9) |
| K ₄₄ | (0,82, 0,96, 0,96, 1,00; 1, 1), (0,91, 0,96, 0,96, 1,00; 0,9, 0,9) | (0,66, 0,82, 0,82, 0,92; 1, 1), (0,75, 0,82, 0,82, 0,88; 0,9, 0,9) | (0,12, 0,24, 0,24, 0,40; 1, 1), (0,18, 0,24, 0,24, 0,32; 0,9, 0,9) |
| K ₅₁ | (0,56, 0,74, 0,74, 0,88; 1, 1), (0,66, 0,74, 0,74, 0,82; 0,9, 0,9) | (0,44, 0,62, 0,62, 0,76; 1, 1), (0,54, 0,62, 0,62, 0,70; 0,9, 0,9) | (0,36, 0,55, 0,55, 0,72; 1, 1), (0,46, 0,55, 0,55, 0,64; 0,9, 0,9) |
| K ₅₂ | (0,80, 0,95, 0,95, 1,00; 1, 1), (0,90, 0,95, 0,95, 1,00; 0,9, 0,9) | (0,56, 0,74, 0,74, 0,88; 1, 1), (0,66, 0,74, 0,74, 0,82; 0,9, 0,9) | (0,30, 0,49, 0,49, 0,66; 1, 1), (0,40, 0,49, 0,49, 0,58; 0,9, 0,9) |
| K ₅₃ | (0,58, 0,75, 0,75, 0,86; 1, 1), (0,68, 0,75, 0,75, 0,82; 0,9, 0,9) | (0,36, 0,55, 0,55, 0,72; 1, 1), (0,46, 0,55, 0,55, 0,64; 0,9, 0,9) | (0,44, 0,62, 0,62, 0,76; 1, 1), (0,54, 0,62, 0,62, 0,70; 0,9, 0,9) |
| K ₅₄ | (0,38, 0,56, 0,56, 0,72; 1, 1), (0,47, 0,56, 0,56, 0,64; 0,9, 0,9) | (0,24, 0,38, 0,38, 0,52; 1, 1), (0,31, 0,38, 0,38, 0,45; 0,9, 0,9) | (0,42, 0,51, 0,51, 0,60; 1, 1), (0,47, 0,51, 0,51, 0,56; 0,9, 0,9) |
| K ₅₅ | (0,30, 0,49, 0,49, 0,66; 1, 1), (0,40, 0,49, 0,49, 0,58; 0,9, 0,9) | (0,10, 0,30, 0,30, 0,50; 1, 1), (0,20, 0,30, 0,30, 0,40; 0,9, 0,9) | (0,58, 0,70, 0,70, 0,78; 1, 1), (0,65, 0,70, 0,70, 0,75; 0,9, 0,9) |
| K ₆₁ | (0,50, 0,68, 0,68, 0,82; 1, 1), (0,60, 0,68, 0,68, 0,76; 0,9, 0,9) | (0,36, 0,55, 0,55, 0,72; 1, 1), (0,46, 0,55, 0,55, 0,64; 0,9, 0,9) | (0,28, 0,48, 0,48, 0,68; 1, 1), (0,38, 0,48, 0,48, 0,58; 0,9, 0,9) |
| K ₆₂ | (0,42, 0,61, 0,61, 0,78; 1, 1), (0,52, 0,61, 0,61, 0,70; 0,9, 0,9) | (0,28, 0,48, 0,48, 0,68; 1, 1), (0,38, 0,48, 0,48, 0,58; 0,9, 0,9) | (0,20, 0,36, 0,36, 0,54; 1, 1), (0,28, 0,36, 0,36, 0,45; 0,9, 0,9) |
| K ₆₃ | (0,48, 0,67, 0,67, 0,84; 1, 1), (0,58, 0,67, 0,67, 0,76; 0,9, 0,9) | (0,28, 0,48, 0,48, 0,68; 1, 1), (0,38, 0,48, 0,48, 0,58; 0,9, 0,9) | (0,34, 0,54, 0,54, 0,74; 1, 1), (0,44, 0,54, 0,54, 0,64; 0,9, 0,9) |
| K ₆₄ | (0,48, 0,67, 0,67, 0,84; 1, 1), (0,58, 0,67, 0,67, 0,76; 0,9, 0,9) | (0,34, 0,54, 0,54, 0,74; 1, 1), (0,44, 0,54, 0,54, 0,64; 0,9, 0,9) | (0,32, 0,48, 0,48, 0,66; 1, 1), (0,40, 0,48, 0,48, 0,57; 0,9, 0,9) |
| K ₆₅ | (0,14, 0,30, 0,30, 0,48; 1, 1), (0,22, 0,30, 0,30, 0,39; 0,9, 0,9) | (0,06, 0,18, 0,18, 0,34; 1, 1), (0,12, 0,18, 0,18, 0,26; 0,9, 0,9) | (0,58, 0,70, 0,70, 0,78; 1, 1), (0,65, 0,70, 0,70, 0,75; 0,9, 0,9) |
| K ₆₆ | (0,40, 0,55, 0,55, 0,70; 1, 1), (0,48, 0,55, 0,55, 0,63; 0,9, 0,9) | (0,28, 0,48, 0,48, 0,68; 1, 1), (0,38, 0,48, 0,48, 0,58; 0,9, 0,9) | (0,32, 0,48, 0,48, 0,66; 1, 1), (0,40, 0,48, 0,48, 0,57; 0,9, 0,9) |

Tablo 4.3. Titanyum için şiddet, olasılık ve fark edilebilirlik sonuçları.

| Kriter | Şiddet | Olasılık | Fark edilebilirlik |
|-----------------|---|---|---|
| K ₁₁ | (0,74, 0,89, 0,89, 0,96; 1, 1), (0,83, 0,89, 0,89, 0,94; 0,9, 0,9) | (0,44, 0,57, 0,57, 0,68; 1, 1), (0,51, 0,57, 0,57, 0,63; 0,9, 0,9) | (0,30, 0,44, 0,44, 0,58; 1, 1), (0,37, 0,44, 0,44, 0,51; 0,9, 0,9) |
| K ₁₂ | (0,68, 0,83, 0,83, 0,90; 1, 1), (0,77, 0,83, 0,83, 0,88; 0,9, 0,9) | (0,44, 0,57, 0,57, 0,68; 1, 1), (0,51, 0,57, 0,57, 0,63; 0,9, 0,9) | (0,22, 0,32, 0,32, 0,44; 1, 1), (0,27, 0,32, 0,32, 0,38; 0,9, 0,9) |
| K ₁₃ | (0,58, 0,75, 0,75, 0,86; 1, 1), (0,68, 0,75, 0,75, 0,82; 0,9, 0,9) | (0,44, 0,57, 0,57, 0,68; 1, 1), (0,51, 0,57, 0,57, 0,63; 0,9, 0,9) | (0,30, 0,44, 0,44, 0,58; 1, 1), (0,37, 0,44, 0,44, 0,51; 0,9, 0,9) |
| K ₁₄ | (0,36, 0,55, 0,55, 0,72; 1, 1), (0,46, 0,55, 0,55, 0,64; 0,9, 0,9) | (0,34, 0,49, 0,49, 0,64; 1, 1), (0,42, 0,49, 0,49, 0,57; 0,9, 0,9) | (0,20, 0,36, 0,36, 0,54; 1, 1), (0,28, 0,36, 0,36, 0,45; 0,9, 0,9) |
| K ₂₁ | (0,28, 0,48, 0,48, 0,68; 1, 1), (0,38, 0,48, 0,48, 0,58; 0,9, 0,9) | (0,34, 0,49, 0,49, 0,64; 1, 1), (0,42, 0,49, 0,49, 0,57; 0,9, 0,9) | (0,14, 0,30, 0,30, 0,48; 1, 1), (0,22, 0,30, 0,30, 0,39; 0,9, 0,9) |
| K ₂₂ | (0,84, 0,97, 0,97, 1,00; 1, 1), (0,92, 0,97, 0,97, 1,00; 0,9, 0,9) | (0,42, 0,51, 0,51, 0,60; 1, 1), (0,47, 0,51, 0,51, 0,56; 0,9, 0,9) | (0,06, 0,18, 0,18, 0,34; 1, 1), (0,12, 0,18, 0,18, 0,26; 0,9, 0,9) |
| K ₂₃ | (0,50, 0,63, 0,63, 0,74; 1, 1), (0,57, 0,63, 0,63, 0,69; 0,9, 0,9) | (0,42, 0,56, 0,56, 0,70; 1, 1), (0,49, 0,56, 0,56, 0,63; 0,9, 0,9) | (0,12, 0,24, 0,24, 0,40; 1, 1), (0,18, 0,24, 0,24, 0,32; 0,9, 0,9) |
| K ₂₄ | (0,56, 0,69, 0,69, 0,78; 1, 1), (0,64, 0,69, 0,69, 0,75; 0,9, 0,9) | (0,42, 0,56, 0,56, 0,68; 1, 1), (0,50, 0,56, 0,56, 0,63; 0,9, 0,9) | (0,08, 0,24, 0,24, 0,42; 1, 1), (0,16, 0,24, 0,24, 0,33; 0,9, 0,9) |
| K ₂₅ | (0,58, 0,75, 0,75, 0,86; 1, 1), (0,68, 0,75, 0,75, 0,82; 0,9, 0,9) | (0,42, 0,56, 0,56, 0,68; 1, 1), (0,50, 0,56, 0,56, 0,63; 0,9, 0,9) | (0,08, 0,24, 0,24, 0,42; 1, 1), (0,16, 0,24, 0,24, 0,33; 0,9, 0,9) |
| K ₂₆ | (0,88, 0,99, 0,99, 1,00; 1, 1), (0,94, 0,99, 0,99, 1,00; 0,9, 0,9) | (0,46, 0,58, 0,58, 0,68; 1, 1), (0,52, 0,58, 0,58, 0,63; 0,9, 0,9) | (0,12, 0,24, 0,24, 0,40; 1, 1), (0,18, 0,24, 0,24, 0,32; 0,9, 0,9) |
| K ₃₁ | (0,84, 0,97, 0,97, 1,00; 1, 1), (0,92, 0,97, 0,97, 1,00; 0,9, 0,9) | (0,56, 0,69, 0,69, 0,78; 1, 1), (0,64, 0,69, 0,69, 0,75; 0,9, 0,9) | (0,10, 0,30, 0,30, 0,50; 1, 1), (0,20, 0,30, 0,30, 0,40; 0,9, 0,9) |
| K ₃₂ | (0,72, 0,88, 0,88, 0,96; 1, 1), (0,82, 0,88, 0,88, 0,94; 0,9, 0,9) | (0,40, 0,55, 0,55, 0,70; 1, 1), (0,48, 0,55, 0,55, 0,63; 0,9, 0,9) | (0,28, 0,43, 0,43, 0,58; 1, 1), (0,36, 0,43, 0,43, 0,51; 0,9, 0,9) |
| K ₃₃ | (0,74, 0,89, 0,89, 0,96; 1, 1), (0,83, 0,89, 0,89, 0,94; 0,9, 0,9) | (0,34, 0,49, 0,49, 0,64; 1, 1), (0,42, 0,49, 0,49, 0,57; 0,9, 0,9) | (0,14, 0,30, 0,30, 0,48; 1, 1), (0,22, 0,30, 0,30, 0,39; 0,9, 0,9) |
| K ₃₄ | (0,80, 0,95, 0,95, 1,00; 1, 1), (0,90, 0,95, 0,95, 1,00; 0,9, 0,9) | (0,40, 0,50, 0,50, 0,60; 1, 1), (0,46, 0,50, 0,50, 0,56; 0,9, 0,9) | (0,08, 0,24, 0,24, 0,42; 1, 1), (0,16, 0,24, 0,24, 0,33; 0,9, 0,9) |
| K ₃₅ | (0,28, 0,48, 0,48, 0,68; 1, 1), (0,38, 0,48, 0,48, 0,58; 0,9, 0,9) | (0,14, 0,30, 0,30, 0,48; 1, 1), (0,22, 0,30, 0,30, 0,39; 0,9, 0,9) | (0,34, 0,49, 0,49, 0,64; 1, 1), (0,42, 0,49, 0,49, 0,57; 0,9, 0,9) |
| K ₃₆ | (0,42, 0,61, 0,61, 0,78; 1, 1), (0,52, 0,61, 0,61, 0,70; 0,9, 0,9) | (0,20, 0,36, 0,36, 0,54; 1, 1), (0,28, 0,36, 0,36, 0,45; 0,9, 0,9) | (0,42, 0,61, 0,61, 0,78; 1, 1), (0,52, 0,61, 0,61, 0,70; 0,9, 0,9) |
| K ₄₁ | (0,44, 0,62, 0,62, 0,78; 1, 1), (0,53, 0,62, 0,62, 0,70; 0,9, 0,9) | (0,36, 0,50, 0,50, 0,64; 1, 1), (0,43, 0,50, 0,50, 0,57; 0,9, 0,9) | (0,12, 0,24, 0,24, 0,40; 1, 1), (0,18, 0,24, 0,24, 0,32; 0,9, 0,9) |
| K ₄₂ | (0,72, 0,88, 0,88, 0,96; 1, 1), (0,82, 0,88, 0,88, 0,94; 0,9, 0,9) | (0,50, 0,68, 0,68, 0,82; 1, 1), (0,60, 0,68, 0,68, 0,76; 0,9, 0,9) | (0,14, 0,30, 0,30, 0,48; 1, 1), (0,22, 0,30, 0,30, 0,39; 0,9, 0,9) |
| K ₄₃ | (0,40, 0,55, 0,55, 0,70; 1, 1), (0,48, 0,55, 0,55, 0,63; 0,9, 0,9) | (0,34, 0,49, 0,49, 0,64; 1, 1), (0,42, 0,49, 0,49, 0,57; 0,9, 0,9) | (0,14, 0,30, 0,30, 0,48; 1, 1), (0,22, 0,30, 0,30, 0,39; 0,9, 0,9) |
| K ₄₄ | (0,42, 0,61, 0,61, 0,78; 1, 1), (0,52, 0,61, 0,61, 0,70; 0,9, 0,9) | (0,16, 0,36, 0,36, 0,56; 1, 1), (0,26, 0,36, 0,36, 0,46; 0,9, 0,9) | (0,40, 0,55, 0,55, 0,70; 1, 1), (0,48, 0,55, 0,55, 0,63; 0,9, 0,9) |
| K ₅₁ | (0,16, 0,36, 0,36, 0,56; 1, 1), (0,26, 0,36, 0,36, 0,46; 0,9, 0,9) | (0,08, 0,24, 0,24, 0,42; 1, 1), (0,16, 0,24, 0,24, 0,33; 0,9, 0,9) | (0,64, 0,81, 0,81, 0,92; 1, 1), (0,74, 0,81, 0,81, 0,88; 0,9, 0,9) |
| K ₅₂ | (0,88, 0,99, 0,99, 1,00; 1, 1), (0,94, 0,99, 0,99, 1,00; 0,9, 0,9) | (0,48, 0,64, 0,64, 0,76; 1, 1), (0,56, 0,64, 0,64, 0,70; 0,9, 0,9) | (0,18, 0,25, 0,25, 0,36; 1, 1), (0,22, 0,25, 0,25, 0,31; 0,9, 0,9) |
| K ₅₃ | (0,82, 0,96, 0,96, 1,00; 1, 1), (0,91, 0,96, 0,96, 1,00; 0,9, 0,9) | (0,46, 0,63, 0,63, 0,76; 1, 1), (0,55, 0,63, 0,63, 0,70; 0,9, 0,9) | (0,28, 0,43, 0,43, 0,58; 1, 1), (0,36, 0,43, 0,43, 0,51; 0,9, 0,9) |
| K ₅₄ | (0,52, 0,69, 0,69, 0,82; 1, 1), (0,61, 0,69, 0,69, 0,76; 0,9, 0,9) | (0,44, 0,57, 0,57, 0,68; 1, 1), (0,51, 0,57, 0,57, 0,63; 0,9, 0,9) | (0,22, 0,32, 0,32, 0,44; 1, 1), (0,27, 0,32, 0,32, 0,38; 0,9, 0,9) |
| K ₅₅ | (0,42, 0,56, 0,56, 0,68; 1, 1), (0,50, 0,56, 0,56, 0,63; 0,9, 0,9) | (0,22, 0,37, 0,37, 0,52; 1, 1), (0,30, 0,37, 0,37, 0,45; 0,9, 0,9) | (0,44, 0,57, 0,57, 0,68; 1, 1), (0,51, 0,57, 0,57, 0,63; 0,9, 0,9) |
| K ₆₁ | (0,90, 1,00, 1,00, 1,00; 1, 1), (0,95, 1,00, 1,00, 1,00; 0,9, 0,9) | (0,46, 0,58, 0,58, 0,68; 1, 1), (0,52, 0,58, 0,58, 0,63; 0,9, 0,9) | (0,08, 0,12, 0,12, 0,24; 1, 1), (0,10, 0,12, 0,12, 0,18; 0,9, 0,9) |
| K ₆₂ | (0,22, 0,37, 0,37, 0,52; 1, 1), (0,30, 0,37, 0,37, 0,45; 0,9, 0,9) | (0,06, 0,18, 0,18, 0,34; 1, 1), (0,12, 0,18, 0,18, 0,26; 0,9, 0,9) | (0,44, 0,57, 0,57, 0,68; 1, 1), (0,51, 0,57, 0,57, 0,63; 0,9, 0,9) |
| K ₆₃ | (0,36, 0,55, 0,55, 0,72; 1, 1), (0,46, 0,55, 0,55, 0,64; 0,9, 0,9) | (0,16, 0,36, 0,36, 0,56; 1, 1), (0,26, 0,36, 0,36, 0,46; 0,9, 0,9) | (0,40, 0,55, 0,55, 0,70; 1, 1), (0,48, 0,55, 0,55, 0,63; 0,9, 0,9) |
| K ₆₄ | (0,22, 0,37, 0,37, 0,52; 1, 1), (0,30, 0,37, 0,37, 0,45; 0,9, 0,9) | (0,10, 0,30, 0,30, 0,50; 1, 1), (0,20, 0,30, 0,30, 0,40; 0,9, 0,9) | (0,48, 0,62, 0,62, 0,74; 1, 1), (0,56, 0,62, 0,62, 0,69; 0,9, 0,9) |
| K ₆₅ | (0,36, 0,55, 0,55, 0,72; 1, 1), (0,46, 0,55, 0,55, 0,64; 0,9, 0,9) | (0,28, 0,43, 0,43, 0,58; 1, 1), (0,36, 0,43, 0,43, 0,51; 0,9, 0,9) | (0,36, 0,50, 0,50, 0,62; 1, 1), (0,44, 0,50, 0,50, 0,57; 0,9, 0,9) |
| K ₆₆ | (0,22, 0,37, 0,37, 0,52; 1, 1), (0,30, 0,37, 0,37, 0,45; 0,9, 0,9) | (0,10, 0,30, 0,30, 0,50; 1, 1), (0,20, 0,30, 0,30, 0,40; 0,9, 0,9) | (0,48, 0,62, 0,62, 0,74; 1, 1), (0,56, 0,62, 0,62, 0,69; 0,9, 0,9) |

Tablo 4.4. Kobalt-krom alaşımları için şiddet, olasılık ve fark edilebilirlik sonuçları.

| Kriter | Şiddet | Olasılık | Fark edilebilirlik |
|-----------------|---|---|---|
| K ₁₁ | (0,72, 0,88, 0,88, 0,96; 1, 1), (0,82, 0,88, 0,88, 0,94; 0,9, 0,9) | (0,34, 0,49, 0,49, 0,64; 1, 1), (0,42, 0,49, 0,49, 0,57; 0,9, 0,9) | (0,24, 0,38, 0,38, 0,52; 1, 1), (0,31, 0,38, 0,38, 0,45; 0,9, 0,9) |
| K ₁₂ | (0,50, 0,68, 0,68, 0,82; 1, 1), (0,60, 0,68, 0,68, 0,76; 0,9, 0,9) | (0,36, 0,55, 0,55, 0,72; 1, 1), (0,46, 0,55, 0,55, 0,64; 0,9, 0,9) | (0,38, 0,56, 0,56, 0,72; 1, 1), (0,47, 0,56, 0,56, 0,64; 0,9, 0,9) |
| K ₁₃ | (0,50, 0,68, 0,68, 0,82; 1, 1), (0,60, 0,68, 0,68, 0,76; 0,9, 0,9) | (0,34, 0,49, 0,49, 0,64; 1, 1), (0,42, 0,49, 0,49, 0,57; 0,9, 0,9) | (0,36, 0,50, 0,50, 0,64; 1, 1), (0,43, 0,50, 0,50, 0,57; 0,9, 0,9) |
| K ₁₄ | (0,46, 0,63, 0,63, 0,76; 1, 1), (0,55, 0,63, 0,63, 0,70; 0,9, 0,9) | (0,50, 0,63, 0,63, 0,74; 1, 1), (0,57, 0,63, 0,63, 0,69; 0,9, 0,9) | (0,12, 0,24, 0,24, 0,40; 1, 1), (0,18, 0,24, 0,24, 0,32; 0,9, 0,9) |
| K ₂₁ | (0,32, 0,50, 0,50, 0,66; 1, 1), (0,41, 0,50, 0,50, 0,58; 0,9, 0,9) | (0,44, 0,57, 0,57, 0,68; 1, 1), (0,51, 0,57, 0,57, 0,63; 0,9, 0,9) | (0,06, 0,18, 0,18, 0,34; 1, 1), (0,12, 0,18, 0,18, 0,26; 0,9, 0,9) |
| K ₂₂ | (0,40, 0,60, 0,60, 0,80; 1, 1), (0,50, 0,60, 0,60, 0,70; 0,9, 0,9) | (0,28, 0,48, 0,48, 0,68; 1, 1), (0,38, 0,48, 0,48, 0,58; 0,9, 0,9) | (0,14, 0,30, 0,30, 0,48; 1, 1), (0,22, 0,30, 0,30, 0,39; 0,9, 0,9) |
| K ₂₃ | (0,34, 0,49, 0,49, 0,64; 1, 1), (0,42, 0,49, 0,49, 0,57; 0,9, 0,9) | (0,20, 0,36, 0,36, 0,54; 1, 1), (0,28, 0,36, 0,36, 0,45; 0,9, 0,9) | (0,34, 0,49, 0,49, 0,64; 1, 1), (0,42, 0,49, 0,49, 0,57; 0,9, 0,9) |
| K ₂₄ | (0,48, 0,62, 0,62, 0,74; 1, 1), (0,56, 0,62, 0,62, 0,69; 0,9, 0,9) | (0,34, 0,49, 0,49, 0,64; 1, 1), (0,42, 0,49, 0,49, 0,57; 0,9, 0,9) | (0,14, 0,30, 0,30, 0,48; 1, 1), (0,22, 0,30, 0,30, 0,39; 0,9, 0,9) |
| K ₂₅ | (0,42, 0,56, 0,56, 0,70; 1, 1), (0,49, 0,56, 0,56, 0,63; 0,9, 0,9) | (0,40, 0,55, 0,55, 0,70; 1, 1), (0,48, 0,55, 0,55, 0,63; 0,9, 0,9) | (0,14, 0,30, 0,30, 0,48; 1, 1), (0,22, 0,30, 0,30, 0,39; 0,9, 0,9) |
| K ₂₆ | (0,74, 0,89, 0,89, 0,96; 1, 1), (0,83, 0,89, 0,89, 0,94; 0,9, 0,9) | (0,42, 0,61, 0,61, 0,78; 1, 1), (0,52, 0,61, 0,61, 0,70; 0,9, 0,9) | (0,38, 0,56, 0,56, 0,72; 1, 1), (0,47, 0,56, 0,56, 0,64; 0,9, 0,9) |
| K ₃₁ | (0,72, 0,85, 0,85, 0,90; 1, 1), (0,79, 0,85, 0,85, 0,88; 0,9, 0,9) | (0,48, 0,64, 0,64, 0,76; 1, 1), (0,56, 0,64, 0,64, 0,70; 0,9, 0,9) | (0,08, 0,24, 0,24, 0,42; 1, 1), (0,16, 0,24, 0,24, 0,33; 0,9, 0,9) |
| K ₃₂ | (0,74, 0,89, 0,89, 0,96; 1, 1), (0,83, 0,89, 0,89, 0,94; 0,9, 0,9) | (0,58, 0,75, 0,75, 0,88; 1, 1), (0,67, 0,75, 0,75, 0,82; 0,9, 0,9) | (0,20, 0,31, 0,31, 0,44; 1, 1), (0,26, 0,31, 0,31, 0,38; 0,9, 0,9) |
| K ₃₃ | (0,82, 0,96, 0,96, 1,00; 1, 1), (0,91, 0,96, 0,96, 1,00; 0,9, 0,9) | (0,52, 0,69, 0,69, 0,82; 1, 1), (0,61, 0,69, 0,69, 0,76; 0,9, 0,9) | (0,06, 0,18, 0,18, 0,34; 1, 1), (0,12, 0,18, 0,18, 0,26; 0,9, 0,9) |
| K ₃₄ | (0,42, 0,61, 0,61, 0,78; 1, 1), (0,52, 0,61, 0,61, 0,70; 0,9, 0,9) | (0,16, 0,36, 0,36, 0,56; 1, 1), (0,26, 0,36, 0,36, 0,46; 0,9, 0,9) | (0,34, 0,49, 0,49, 0,64; 1, 1), (0,42, 0,49, 0,49, 0,57; 0,9, 0,9) |
| K ₃₅ | (0,42, 0,61, 0,61, 0,78; 1, 1), (0,52, 0,61, 0,61, 0,70; 0,9, 0,9) | (0,34, 0,49, 0,49, 0,64; 1, 1), (0,42, 0,49, 0,49, 0,57; 0,9, 0,9) | (0,14, 0,30, 0,30, 0,48; 1, 1), (0,22, 0,30, 0,30, 0,39; 0,9, 0,9) |
| K ₃₆ | (0,58, 0,75, 0,75, 0,86; 1, 1), (0,68, 0,75, 0,75, 0,82; 0,9, 0,9) | (0,42, 0,56, 0,56, 0,68; 1, 1), (0,50, 0,56, 0,56, 0,63; 0,9, 0,9) | (0,36, 0,55, 0,55, 0,72; 1, 1), (0,46, 0,55, 0,55, 0,64; 0,9, 0,9) |
| K ₄₁ | (0,38, 0,56, 0,56, 0,72; 1, 1), (0,47, 0,56, 0,56, 0,64; 0,9, 0,9) | (0,38, 0,56, 0,56, 0,72; 1, 1), (0,47, 0,56, 0,56, 0,64; 0,9, 0,9) | (0,20, 0,31, 0,31, 0,44; 1, 1), (0,26, 0,31, 0,31, 0,38; 0,9, 0,9) |
| K ₄₂ | (0,48, 0,67, 0,67, 0,84; 1, 1), (0,58, 0,67, 0,67, 0,76; 0,9, 0,9) | (0,20, 0,36, 0,36, 0,54; 1, 1), (0,28, 0,36, 0,36, 0,45; 0,9, 0,9) | (0,32, 0,48, 0,48, 0,66; 1, 1), (0,40, 0,48, 0,48, 0,57; 0,9, 0,9) |
| K ₄₃ | (0,34, 0,49, 0,49, 0,64; 1, 1), (0,42, 0,49, 0,49, 0,57; 0,9, 0,9) | (0,22, 0,37, 0,37, 0,52; 1, 1), (0,30, 0,37, 0,37, 0,45; 0,9, 0,9) | (0,22, 0,37, 0,37, 0,52; 1, 1), (0,30, 0,37, 0,37, 0,45; 0,9, 0,9) |
| K ₄₄ | (0,50, 0,68, 0,68, 0,82; 1, 1), (0,60, 0,68, 0,68, 0,76; 0,9, 0,9) | (0,28, 0,48, 0,48, 0,68; 1, 1), (0,38, 0,48, 0,48, 0,58; 0,9, 0,9) | (0,40, 0,55, 0,55, 0,70; 1, 1), (0,48, 0,55, 0,55, 0,63; 0,9, 0,9) |
| K ₅₁ | (0,34, 0,54, 0,54, 0,74; 1, 1), (0,44, 0,54, 0,54, 0,64; 0,9, 0,9) | (0,20, 0,36, 0,36, 0,54; 1, 1), (0,28, 0,36, 0,36, 0,45; 0,9, 0,9) | (0,48, 0,67, 0,67, 0,84; 1, 1), (0,58, 0,67, 0,67, 0,76; 0,9, 0,9) |
| K ₅₂ | (0,84, 0,97, 0,97, 1,00; 1, 1), (0,92, 0,97, 0,97, 1,00; 0,9, 0,9) | (0,54, 0,70, 0,70, 0,82; 1, 1), (0,62, 0,70, 0,70, 0,76; 0,9, 0,9) | (0,20, 0,31, 0,31, 0,44; 1, 1), (0,26, 0,31, 0,31, 0,38; 0,9, 0,9) |
| K ₅₃ | (0,56, 0,74, 0,74, 0,88; 1, 1), (0,66, 0,74, 0,74, 0,82; 0,9, 0,9) | (0,28, 0,48, 0,48, 0,68; 1, 1), (0,38, 0,48, 0,48, 0,58; 0,9, 0,9) | (0,42, 0,61, 0,61, 0,78; 1, 1), (0,52, 0,61, 0,61, 0,70; 0,9, 0,9) |
| K ₅₄ | (0,44, 0,62, 0,62, 0,78; 1, 1), (0,53, 0,62, 0,62, 0,70; 0,9, 0,9) | (0,36, 0,50, 0,50, 0,64; 1, 1), (0,43, 0,50, 0,50, 0,57; 0,9, 0,9) | (0,28, 0,38, 0,38, 0,50; 1, 1), (0,33, 0,38, 0,38, 0,44; 0,9, 0,9) |
| K ₅₅ | (0,34, 0,49, 0,49, 0,64; 1, 1), (0,42, 0,49, 0,49, 0,57; 0,9, 0,9) | (0,16, 0,36, 0,36, 0,56; 1, 1), (0,26, 0,36, 0,36, 0,46; 0,9, 0,9) | (0,50, 0,63, 0,63, 0,74; 1, 1), (0,57, 0,63, 0,63, 0,69; 0,9, 0,9) |
| K ₆₁ | (0,74, 0,89, 0,89, 0,96; 1, 1), (0,83, 0,89, 0,89, 0,94; 0,9, 0,9) | (0,44, 0,62, 0,62, 0,76; 1, 1), (0,54, 0,62, 0,62, 0,70; 0,9, 0,9) | (0,36, 0,55, 0,55, 0,72; 1, 1), (0,46, 0,55, 0,55, 0,64; 0,9, 0,9) |
| K ₆₂ | (0,42, 0,61, 0,61, 0,78; 1, 1), (0,52, 0,61, 0,61, 0,70; 0,9, 0,9) | (0,28, 0,48, 0,48, 0,68; 1, 1), (0,38, 0,48, 0,48, 0,58; 0,9, 0,9) | (0,20, 0,36, 0,36, 0,54; 1, 1), (0,28, 0,36, 0,36, 0,45; 0,9, 0,9) |
| K ₆₃ | (0,36, 0,55, 0,55, 0,72; 1, 1), (0,46, 0,55, 0,55, 0,64; 0,9, 0,9) | (0,16, 0,36, 0,36, 0,56; 1, 1), (0,26, 0,36, 0,36, 0,46; 0,9, 0,9) | (0,56, 0,74, 0,74, 0,88; 1, 1), (0,66, 0,74, 0,74, 0,82; 0,9, 0,9) |
| K ₆₄ | (0,42, 0,61, 0,61, 0,78; 1, 1), (0,52, 0,61, 0,61, 0,70; 0,9, 0,9) | (0,28, 0,48, 0,48, 0,68; 1, 1), (0,38, 0,48, 0,48, 0,58; 0,9, 0,9) | (0,32, 0,48, 0,48, 0,66; 1, 1), (0,40, 0,48, 0,48, 0,57; 0,9, 0,9) |
| K ₆₅ | (0,14, 0,30, 0,30, 0,48; 1, 1), (0,22, 0,30, 0,30, 0,39; 0,9, 0,9) | (0,06, 0,18, 0,18, 0,34; 1, 1), (0,12, 0,18, 0,18, 0,26; 0,9, 0,9) | (0,58, 0,70, 0,70, 0,78; 1, 1), (0,65, 0,70, 0,70, 0,75; 0,9, 0,9) |
| K ₆₆ | (0,56, 0,69, 0,69, 0,78; 1, 1), (0,64, 0,69, 0,69, 0,75; 0,9, 0,9) | (0,44, 0,62, 0,62, 0,76; 1, 1), (0,54, 0,62, 0,62, 0,70; 0,9, 0,9) | (0,20, 0,36, 0,36, 0,54; 1, 1), (0,28, 0,36, 0,36, 0,45; 0,9, 0,9) |

AHP hiyerarşisi, aynı seviyedeki karar elemanlarının anlaşılmasına ve ikili karşılaştırılmasına yardımcı olmaktadır. Bu kapsamda, mevcut problemin kriterlerini aydınlatan ardışık seviyeli hiyerarşik bir yapı tasarlanmıştır (Şekil 4.1). Risk faktörlerinin ve değerlendirme kriterlerinin ikili mukayeseleri Tablo 4.5'teki ölçeğe göre gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4.5. Aralıklı tip-2 bulanık AHP ölçeği [48].

| Dilsel ölçek | Aralıklı tip-2 bulanık ölçek | Ters aralıklı tip-2 bulanık ölçek |
|-------------------|--|---|
| Kesin önemli | (8, 9, 9, 10; 1, 1), (8,5, 9, 9, 9,5; 0,9, 0,9) | (0,10, 0,11, 0,11, 0,13; 1, 1), (0,11, 0,11, 0,11, 0,12; 0,9, 0,9) |
| Çok önemli | (6, 7, 7, 8; 1, 1), (6,5, 7, 7, 7,5; 0,9, 0,9) | (0,13, 0,14, 0,14, 0,17; 1, 1), (0,13, 0,14, 0,14, 0,15; 0,9, 0,9) |
| Önemli | (4, 5, 5, 6; 1, 1), (4,5, 5, 5, 5,5; 0,9, 0,9) | (0,17, 0,20, 0,20, 0,25; 1, 1), (0,18, 0,20, 0,20, 0,22; 0,9, 0,9) |
| Biraz daha önemli | (2, 3, 3, 4; 1, 1), (2,5, 3, 3, 4,5; 0,9, 0,9) | (0,25, 0,33, 0,33, 0,50; 1, 1), (0,22, 0,33, 0,33, 0,40; 0,9, 0,9) |
| Eşit önemli | (1, 1, 1, 1; 1, 1), (1, 1, 1, 1; 0,9, 0,9) | (1, 1, 1, 1; 1, 1), (1, 1, 1, 1; 0,9, 0,9) |

Uzmanlar, dilsel etiketleri kullanarak iki faktör ve iki kriter arasındaki karşılaştırma tercihlerini ifade etmişlerdir. Uzmanların görüşleri ilgili aralıklı tip-2 yamuk bulanık sayılara dönüştürülmüş ve birleştirilmiştir. Ardından, yöntemin prosedürüne dayanarak faktörlere ve kriterlere ağırlıklar tayin edilmiştir. Risk faktörleri için nihai bulanık karşılaştırma matrisini Tablo 4.6'da, uygulanan yöntemin net çıktılarını ise grafiksel olarak Şekil 4.3'te görmek mümkündür. Bu şekilde görülebileceği üzere, en yüksek öncelikli risk faktörü şiddet ($w = 0,485$) olarak tespit edilmiştir.

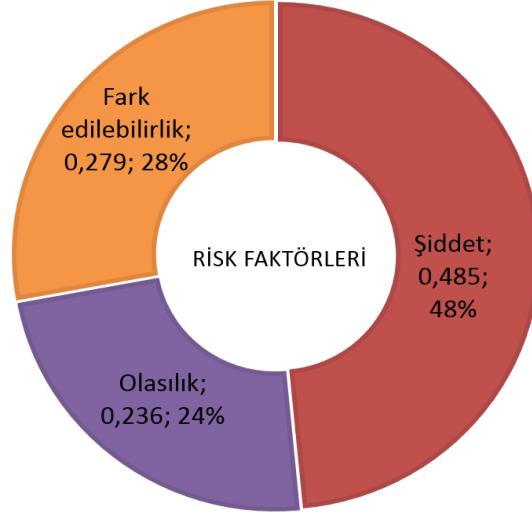
Tablo 4.6. Risk faktörleri için bulanık karşılaştırma matrisi.

| Faktör | Şiddet | Olasılık | Fark edilebilirlik |
|--------------------|---|---|--|
| Şiddet | (1, 1, 1, 1; 1, 1), (1, 1, 1, 1; 0,9, 0,9) | (1,89, 2,29, 2,29, 2,64; 1, 1), (2,10, 2,29, 2,29, 2,73; 0,9, 0,9) | (1,52, 1,55, 1,55, 1,58; 1, 1), (1,53, 1,55, 1,55, 1,57; 0,9, 0,9) (0,82, 0,95, 0,95, 1,15; 1, 1), |
| Olasılık | | (1, 1, 1, 1; 1, 1), (1, 1, 1, 1; 0,9, 0,9) | (0,79, 0,95, 0,95, 1,04; 0,9, 0,9) |
| Fark edilebilirlik | | | (1, 1, 1, 1; 1, 1), (1, 1, 1, 1; 0,9, 0,9) |

$$\tilde{w}_{\text{şiddet}} = (0,42, 0,49, 0,49, 0,55; 1, 1), (0,44, 0,49, 0,49, 0,54; 0,9, 0,9)$$

$$\tilde{w}_{\text{olasılık}} = (0,20, 0,24, 0,24, 0,29; 1, 1), (0,20, 0,24, 0,24, 0,26; 0,9, 0,9)$$

$$\tilde{w}_{\text{fark_edilebilirlik}} = (0,24, 0,28, 0,28, 0,32; 1, 1), (0,25, 0,28, 0,28, 0,31; 0,9, 0,9)$$



Şekil 4.3. Risk faktörleri için önem ağırlıkları.

Risk faktörlerinin önem ağırlıklarının elde edilebilmesi gayesiyle gerçekleştirilen tüm işlemler ana ve alt kriterler için de uygulanmıştır. Değerlendirme kriterleri için oluşturulan bulanık karşılaştırma matrisleri Tablo 4.7 - Tablo 4.13'te sunulmuştur.

Tablo 4.7. Ana kriterler için bulanık karşılaştırma matrisi.

| Kriter | K ₁ | K ₂ | K ₃ | K ₄ | K ₅ | K ₆ |
|----------------|--------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| K ₁ | (1, 1, 1; 1, 1, 1) | (0,25, 0,28, 0,28, 0,35; 1, 1) | (0,16, 0,18, 0,18, 0,23; 1, 1) | (0,20, 0,25, 0,25, 0,35; 1, 1) | (0,20, 0,25, 0,25, 0,35; 1, 1) | (0,14, 0,15, 0,15, 0,18; 1, 1) |
| K ₂ | (1, 1, 1; 1, 1, 1) | (1, 1, 1, 1; 1, 1, 1, 1) | (0,16, 0,19, 0,19, 0,25; 1, 1) | (0,55, 0,64, 0,64, 0,81; 1, 1) | (0,33, 0,39, 0,39, 0,50; 1, 1) | (0,21, 0,22, 0,22, 0,26; 1, 1) |
| K ₃ | (1, 1, 1; 1, 1, 1) | (1, 1, 1, 1; 1, 1, 1, 1) | (1, 1, 1, 1; 1, 1, 1, 1) | (2,30, 2,95, 2,95, 3,57; 1, 1) | (2,00, 2,67, 2,67, 3,29; 1, 1) | (0,50, 0,54, 0,54, 0,61; 1, 1) |
| K ₄ | (1, 1, 1; 1, 1, 1) | (1, 1, 1, 1; 1, 1, 1, 1) | (1, 1, 1, 1; 1, 1, 1, 1) | (1, 1, 1, 1; 1, 1, 1, 1) | (0,35, 0,39, 0,39, 0,46; 1, 1) | (0,22, 0,25, 0,25, 0,31; 1, 1) |
| K ₅ | (1, 1, 1; 1, 1, 1) | (1, 1, 1, 1; 1, 1, 1, 1) | (1, 1, 1, 1; 1, 1, 1, 1) | (1, 1, 1, 1; 1, 1, 1, 1) | (1, 1, 1, 1; 1, 1, 1, 1) | (0,29, 0,37, 0,37, 0,42; 1, 1) |
| K ₆ | (1, 1, 1; 1, 1, 1) | (1, 1, 1, 1; 1, 1, 1, 1) | (1, 1, 1, 1; 1, 1, 1, 1) | (1, 1, 1, 1; 1, 1, 1, 1) | (1, 1, 1, 1; 1, 1, 1, 1) | (1, 1, 1, 1; 1, 1, 1, 1) |

Tablo 4.8. Ekonomik özellikler kriterinin alt kriterleri için bulanık karşılaştırma matrisi.

| Kriter | K ₁₁ | K ₁₂ | K ₁₃ | K ₁₄ |
|-----------------|--|--|--|--|
| K ₁₁ | (1, 1, 1, 1; 1, 1), (1, 1, 1, 1; 0,9, 0,9) | (0,29, 0,37, 0,37, 0,50; 1, 1), (0,30, 0,37, 0,37, 0,45; 0,9, 0,9) | (0,18, 0,22, 0,22, 0,29; 1, 1), (0,18, 0,22, 0,22, 0,25; 0,9, 0,9) | (0,38, 0,48, 0,48, 0,66; 1, 1), (0,36, 0,48, 0,48, 0,56; 0,9, 0,9) |
| K ₁₂ | | (1, 1, 1, 1; 1, 1), (1, 1, 1, 1; 0,9, 0,9) | (1,15, 1,24, 1,24, 1,38; 1, 1), (1,13, 1,24, 1,24, 1,31; 0,9, 0,9) | (1,15, 1,55, 1,55, 2,09; 1, 1), (1,21, 1,55, 1,55, 1,98; 0,9, 0,9) |
| K ₁₃ | | | (1, 1, 1, 1; 1, 1), (1, 1, 1, 1; 0,9, 0,9) | (1,74, 2,14, 2,14, 2,49; 1, 1), (1,95, 2,14, 2,14, 2,57; 0,9, 0,9) |
| K ₁₄ | | | | (1, 1, 1, 1; 1, 1), (1, 1, 1, 1; 0,9, 0,9) |

Tablo 4.9. Tasarım ve üretim özellikleri kriterinin alt kriterleri için bulanık karşılaştırma matrisi.

| Kriter | K ₂₁ | K ₂₂ | K ₂₃ | K ₂₄ | K ₂₅ | K ₂₆ |
|-----------------|--|--|--|--|--|--|
| K ₂₁ | (1, 1, 1, 1; 1, 1), (1, 1, 1, 1; 0,9, 0,9) | (0,76, 0,84, 0,84, 0,93; 1, 1), (0,80, 0,84, 0,84, 0,92; 0,9, 0,9) | (0,87, 1,00, 1,00, 1,15; 1, 1), (0,89, 1,00, 1,00, 1,12; 0,9, 0,9) | (0,34, 0,41, 0,41, 0,55; 1, 1), (0,33, 0,41, 0,41, 0,47; 0,9, 0,9) | (0,35, 0,46, 0,46, 0,66; 1, 1), (0,34, 0,46, 0,46, 0,58; 0,9, 0,9) | (0,15, 0,17, 0,17, 0,22; 1, 1), (0,15, 0,17, 0,17, 0,19; 0,9, 0,9) |
| K ₂₂ | | (1, 1, 1, 1; 1, 1), (1, 1, 1, 1; 0,9, 0,9) | 0,35, 0,46; 1, 1), (0,27, 0,35, 0,35, 0,39; 0,9, 0,9) | 0,35, 0,44; 1, 1), (0,30, 0,35, 0,35, 0,39; 0,9, 0,9) | 0,34, 0,44; 1, 1), (0,27, 0,34, 0,34, 0,38; 0,9, 0,9) | 0,15, 0,19; 1, 1), (0,14, 0,15, 0,15, 0,17; 0,9, 0,9) |
| K ₂₃ | | | (1, 1, 1, 1; 1, 1), (1, 1, 1, 1; 0,9, 0,9) | 0,35, 0,44; 1, 1), (0,30, 0,35, 0,35, 0,39; 0,9, 0,9) | 0,89, 1,08; 1, 1), (0,74, 0,89, 0,89, 0,97; 0,9, 0,9) | 0,17, 0,20; 1, 1), (0,15, 0,17, 0,17, 0,18; 0,9, 0,9) |
| K ₂₄ | | | | (1, 1, 1, 1; 1, 1), (1, 1, 1, 1; 0,9, 0,9) | 1,12, 1,38; 1, 1), (0,97, 1,12, 1,12, 1,30; 0,9, 0,9) | 0,49, 0,53; 1, 1), (0,47, 0,49, 0,49, 0,51; 0,9, 0,9) |
| K ₂₅ | | | | | (1, 1, 1, 1; 1, 1), (1, 1, 1, 1; 0,9, 0,9) | 0,23, 0,27; 1, 1), (0,21, 0,23, 0,23, 0,24; 0,9, 0,9) |
| K ₂₆ | | | | | | (1, 1, 1, 1; 1, 1), (1, 1, 1, 1; 0,9, 0,9) |

Tablo 4.10. Mekanik özellikler kriterinin alt kriterleri için bulanık karşılaştırma matrisi.

| Kriter | K ₃₁ | K ₃₂ | K ₃₃ | K ₃₄ | K ₃₅ | K ₃₆ |
|-----------------|---|---|---|---|---|---|
| K ₃₁ | (1, 1, 1, 1; 1, 1), (1, 1, 1, 1; 0,9, 0,9) | (0,50, 0,54, 0,54, 0,61; 1, 1), (0,49, 0,54, 0,54, 0,57; 0,9, 0,9) | (0,28, 0,35, 0,35, 0,46; 1, 1), (0,30, 0,35, 0,35, 0,42; 0,9, 0,9) | (0,94, 1,18, 1,18, 1,52; 1, 1), (0,95, 1,18, 1,18, 1,40; 0,9, 0,9) | (2,49, 3,16, 3,16, 3,78; 1, 1), (2,83, 3,16, 3,16, 3,84; 0,9, 0,9) | (0,44, 0,54, 0,54, 0,70; 1, 1), (0,44, 0,54, 0,54, 0,64; 0,9, 0,9) |
| K ₃₂ | | (1, 1, 1, 1; 1), (1, 1, 1, 1; 0,9, 0,9) | (0,76, 0,93; 1, 1), (0,68, 0,76, 0,76, 0,92; 0,9, 0,9) | (2,63, 2,93; 1, 1), (2,47, 2,63, 2,63, 2,78; 0,9, 0,9) | (4,36, 5,40; 1, 1), (3,83, 4,36, 4,36, 5,40; 0,9, 0,9) | (1,83, 2,30; 1, 1), (1,55, 1,83, 1,83, 2,27; 0,9, 0,9) |
| K ₃₃ | | | (1, 1, 1, 1; 1), (1, 1, 1, 1; 0,9, 0,9) | (2,25, 2,70; 1, 1), (1,96, 2,25, 2,25, 2,46; 0,9, 0,9) | (2,95, 3,25; 1, 1), (2,80, 2,95, 2,95, 3,10; 0,9, 0,9) | (2,41, 2,76; 1, 1), (2,21, 2,41, 2,41, 2,86; 0,9, 0,9) |
| K ₃₄ | | | | (1, 1, 1, 1; 1), (1, 1, 1, 1; 0,9, 0,9) | (2,85, 3,48; 1, 1), (2,52, 2,85, 2,85, 3,69; 0,9, 0,9) | (0,39, 0,46; 1, 1), (0,35, 0,39, 0,39, 0,42; 0,9, 0,9) |
| K ₃₅ | | | | | (1, 1, 1, 1; 1), (1, 1, 1, 1; 0,9, 0,9) | (0,28, 0,35; 1, 1), (0,25, 0,28, 0,28, 0,31; 0,9, 0,9) |
| K ₃₆ | | | | | | (1, 1, 1, 1; 1), (1, 1, 1, 1; 0,9, 0,9) |

Tablo 4.11. Fiziksel özellikler kriterinin alt kriterleri için bulanık karşılaştırma matrisi.

| Kriter | K ₄₁ | K ₄₂ | K ₄₃ | K ₄₄ |
|-----------------|--|---|---|---|
| K ₄₁ | (1, 1, 1, 1; 1), (1, 1, 1, 1; 0,9, 0,9) | (0,38, 0,48, 0,48, 0,66; 1, 1), (0,36, 0,48, 0,48, 0,56; 0,9, 0,9) | (2,70, 3,38, 3,38, 4,00; 1, 1), (3,05, 3,38, 3,38, 4,09; 0,9, 0,9) | (0,95, 1,24, 1,24, 1,61; 1, 1), (1,03, 1,24, 1,24, 1,56; 0,9, 0,9) |
| K ₄₂ | | (1, 1, 1, 1; 1, 1), (1, 1, 1, 1; 0,9, 0,9) | (2,86, 3,94, 3,94, 4,98; 1, 1), (3,40, 3,94, 3,94, 5,19; 0,9, 0,9) | (1,16, 1,45, 1,45, 1,75; 1, 1), (1,30, 1,45, 1,45, 1,76; 0,9, 0,9) |
| K ₄₃ | | | (1, 1, 1, 1; 1, 1), (1, 1, 1, 1; 0,9, 0,9) | (0,42, 0,51, 0,51, 0,66; 1, 1), (0,42, 0,51, 0,51, 0,61; 0,9, 0,9) |
| K ₄₄ | | | | (1, 1, 1, 1; 1, 1), (1, 1, 1, 1; 0,9, 0,9) |

Tablo 4.12. Kimyasal özellikler kriterinin alt kriterleri için bulanık karşılaştırma matrisi.

| Kriter | K ₅₁ | K ₅₂ | K ₅₃ | K ₅₄ | K ₅₅ |
|-----------------|--|--|--|--|--|
| K ₅₁ | (1, 1, 1, 1; 1, 1), (1, 1, 1, 1; 0,9, 0,9) | (0,35, 0,39, 0,39, 0,46; 1, 1), (0,35, 0,39, 0,39, 0,42; 0,9, 0,9) | (0,46, 0,58, 0,58, 0,76; 1, 1), (0,47, 0,58, 0,58, 0,69; 0,9, 0,9) | (0,51, 0,58, 0,58, 0,70; 1, 1), (0,51, 0,58, 0,58, 0,63; 0,9, 0,9) | (0,82, 0,95, 0,95, 1,15; 1, 1), (0,79, 0,95, 0,95, 1,04; 0,9, 0,9) |
| K ₅₂ | | (1, 1, 1, 1; 1, 1), (1, 1, 1, 1; 0,9, 0,9) | (2,49, 3,55, 3,55, 4,59; 1, 1), (3,03, 3,55, 3,55, 4,98; 0,9, 0,9) | (1,25, 1,47, 1,47, 1,74; 1, 1), (1,29, 1,47, 1,47, 1,68; 0,9, 0,9) | (2,00, 2,14, 2,14, 2,27; 1, 1), (2,07, 2,14, 2,14, 2,21; 0,9, 0,9) |
| K ₅₃ | | | (1, 1, 1, 1; 1, 1), (1, 1, 1, 1; 0,9, 0,9) | (0,47, 0,61, 0,61, 0,87; 1, 1), (0,43, 0,61, 0,61, 0,72; 0,9, 0,9) | (1,32, 1,55, 1,55, 1,82; 1, 1), (1,36, 1,55, 1,55, 1,76; 0,9, 0,9) |
| K ₅₄ | | | | (1, 1, 1, 1; 1, 1), (1, 1, 1, 1; 0,9, 0,9) | (2,17, 2,54, 2,54, 2,86; 1, 1), (2,36, 2,54, 2,54, 2,84; 0,9, 0,9) |
| K ₅₅ | | | | | (1, 1, 1, 1; 1, 1), (1, 1, 1, 1; 0,9, 0,9) |

Tablo 4.13. Biyolojik özellikler kriterinin alt kriterleri için bulanık karşılaştırma matrisi.

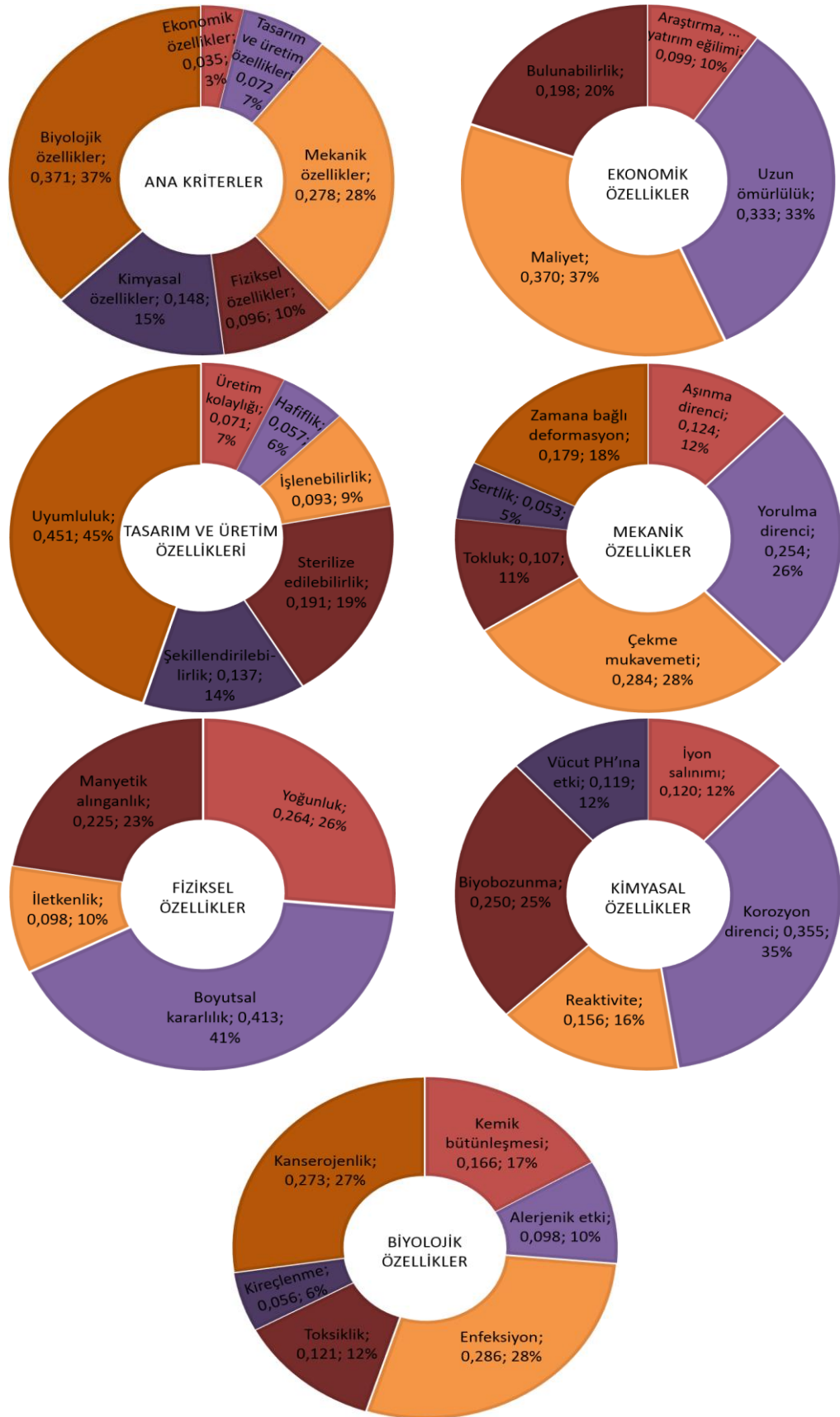
| Kriter | K ₆₁ | K ₆₂ | K ₆₃ | K ₆₄ | K ₆₅ | K ₆₆ |
|-----------------|---|--|--|--|--|--|
| K ₆₁ | (1, 1, 1, 1; 1, 1), (1, 1, 1, 1; 1; 0,9, 0,9) | (2,49, 3,16, 3,16, 3,78; 1, 1), (2,83, 3,16, 3,16, 3,84; 0,9, 0,9) | (0,48, 0,52, 0,52, 0,58; 1, 1), (0,47, 0,52, 0,52, 0,54; 0,9, 0,9) | (1,25, 1,47, 1,47, 1,74; 1, 1), (1,29, 1,47, 1,47, 1,68; 0,9, 0,9) | (1,10, 1,38, 1,38, 1,66; 1, 1), (1,24, 1,38, 1,38, 1,68; 0,9, 0,9) | (0,62, 0,76, 0,76, 1,00; 1, 1), (0,59, 0,76, 0,76, 0,86; 0,9, 0,9) |
| K ₆₂ | | (1, 1, 1, 1; 1, 1), (1, 1, 1, 1; 0,9, 0,9) | (0,30, 0,38; 1, 1), (0,25, 0,30, 0,30, 0,34; 0,9, 0,9) | (0,82, 0,95, 0,95, 1,15; 1, 1), (0,79, 0,95, 0,95, 1,04; 0,9, 0,9) | (2,49, 3,55, 3,55, 4,59; 1, 1), (3,03, 3,55, 3,55, 4,98; 0,9, 0,9) | (0,27, 0,31, 0,31, 0,40; 1, 1), (0,26, 0,31, 0,31, 0,35; 0,9, 0,9) |
| K ₆₃ | | | (1, 1, 1, 1; 1, 1), (1, 1, 1, 1; 0,9, 0,9) | (2,00, 2,41, 2,41, 2,76; 1, 1), (2,21, 2,41, 2,41, 2,86; 0,9, 0,9) | (3,03, 4,14, 4,14, 5,21; 1, 1), (3,59, 4,14, 4,14, 5,44; 0,9, 0,9) | (0,87, 1,00, 1,00, 1,20; 1, 1), (0,84, 1,00, 1,00, 1,09; 0,9, 0,9) |
| K ₆₄ | | | | (1, 1, 1, 1; 1, 1), (1, 1, 1, 1; 0,9, 0,9) | (2,49, 3,55, 3,55, 4,59; 1, 1), (3,03, 3,55, 3,55, 4,98; 0,9, 0,9) | (0,29, 0,35, 0,35, 0,46; 1, 1), (0,27, 0,35, 0,35, 0,39; 0,9, 0,9) |
| K ₆₅ | | | | | (1, 1, 1, 1; 1, 1), (1, 1, 1, 1; 0,9, 0,9) | (0,20, 0,25, 0,25, 0,35; 1, 1), (0,19, 0,25, 0,25, 0,29; 0,9, 0,9) |
| K ₆₆ | | | | | | (1, 1, 1, 1; 1, 1), (1, 1, 1, 1; 0,9, 0,9) |

Ana ve alt kriter ağırlıklarının çarpımı global önemler (w_G) Tablo 4.14'teki gibidir.

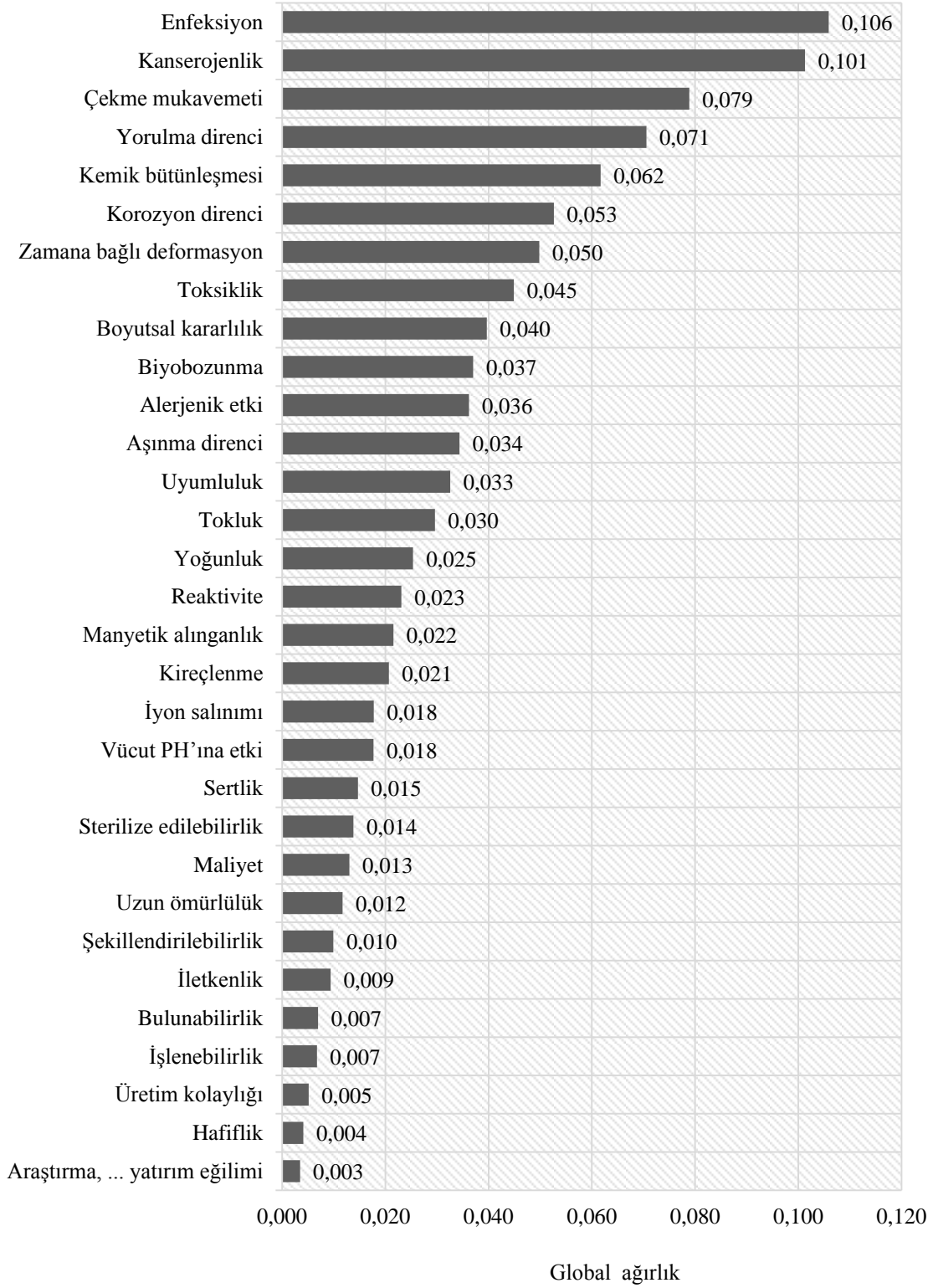
Tablo 4.14. Kriter ağırlıklarının özeti.

| Ana kriter | \tilde{w} | w | Alt kriter | \tilde{w} | w | w_G | | | |
|-----------------|---|-------|-----------------|---|-------|-----------------|---|-------|-------|
| K ₁ | (0,03, 0,03, 0,03, 0,05; 1, 1), (0,03, 0,03, 0,03, 0,04; 0,9, 0,9) | 0,035 | K ₁₁ | (0,07, 0,10, 0,10, 0,15; 1, 1), (0,07, 0,10, 0,10, 0,12; 0,9, 0,9) | 0,099 | 0,003 | | | |
| | | | K ₁₂ | (0,24, 0,33, 0,33, 0,46; 1, 1), (0,26, 0,33, 0,33, 0,43; 0,9, 0,9) | 0,333 | 0,012 | | | |
| | | | K ₁₃ | (0,27, 0,37, 0,37, 0,49; 1, 1), (0,30, 0,37, 0,37, 0,47; 0,9, 0,9) | 0,370 | 0,013 | | | |
| | | | K ₁₄ | (0,14, 0,20, 0,20, 0,28; 1, 1), (0,15, 0,20, 0,20, 0,26; 0,9, 0,9) | 0,198 | 0,007 | | | |
| K ₂ | (0,05, 0,07, 0,07, 0,10; 1, 1), (0,06, 0,07, 0,07, 0,09; 0,9, 0,9) | 0,072 | K ₂₁ | (0,05, 0,07, 0,07, 0,10; 1, 1), (0,06, 0,07, 0,07, 0,09; 0,9, 0,9) | 0,071 | 0,005 | | | |
| | | | K ₂₂ | (0,04, 0,06, 0,06, 0,08; 1, 1), (0,05, 0,06, 0,06, 0,07; 0,9, 0,9) | 0,057 | 0,004 | | | |
| | | | K ₂₃ | (0,07, 0,09, 0,09, 0,13; 1, 1), (0,08, 0,09, 0,09, 0,11; 0,9, 0,9) | 0,093 | 0,007 | | | |
| | | | K ₂₄ | (0,14, 0,19, 0,19, 0,25; 1, 1), (0,16, 0,19, 0,19, 0,23; 0,9, 0,9) | 0,191 | 0,014 | | | |
| | | | K ₂₅ | (0,10, 0,14, 0,14, 0,19; 1, 1), (0,11, 0,14, 0,14, 0,17; 0,9, 0,9) | 0,137 | 0,010 | | | |
| | | | K ₂₆ | (0,35, 0,45, 0,45, 0,59; 1, 1), (0,39, 0,45, 0,45, 0,53; 0,9, 0,9) | 0,451 | 0,033 | | | |
| | | | K ₃ | (0,20, 0,28, 0,28, 0,37; 1, 1), (0,23, 0,28, 0,28, 0,35; 0,9, 0,9) | 0,278 | K ₃₁ | (0,09, 0,12, 0,12, 0,17; 1, 1), (0,10, 0,12, 0,12, 0,16; 0,9, 0,9) | 0,124 | 0,034 |
| | | | | | | K ₃₂ | (0,18, 0,25, 0,25, 0,34; 1, 1), (0,21, 0,25, 0,25, 0,32; 0,9, 0,9) | 0,254 | 0,071 |
| K ₃₃ | (0,21, 0,28, 0,28, 0,39; 1, 1), (0,23, 0,28, 0,28, 0,35; 0,9, 0,9) | 0,284 | | | | 0,079 | | | |
| K ₃₄ | (0,08, 0,11, 0,11, 0,14; 1, 1), (0,09, 0,11, 0,11, 0,13; 0,9, 0,9) | 0,107 | | | | 0,030 | | | |
| K ₃₅ | (0,04, 0,05, 0,05, 0,07; 1, 1), (0,04, 0,05, 0,05, 0,06; 0,9, 0,9) | 0,053 | | | | 0,015 | | | |
| K ₃₆ | (0,13, 0,18, 0,18, 0,25; 1, 1), (0,14, 0,18, 0,18, 0,23; 0,9, 0,9) | 0,179 | | | | 0,050 | | | |
| K ₄ | (0,07, 0,10, 0,10, 0,13; 1, 1), (0,08, 0,10, 0,10, 0,12; 0,9, 0,9) | 0,096 | | | | K ₄₁ | (0,18, 0,26, 0,26, 0,38; 1, 1), (0,20, 0,26, 0,26, 0,35; 0,9, 0,9) | 0,264 | 0,025 |
| | | | | | | K ₄₂ | (0,28, 0,41, 0,41, 0,59; 1, 1), (0,32, 0,41, 0,41, 0,56; 0,9, 0,9) | 0,413 | 0,040 |
| | | | K ₄₃ | (0,07, 0,10, 0,10, 0,15; 1, 1), (0,07, 0,10, 0,10, 0,12; 0,9, 0,9) | 0,098 | 0,009 | | | |
| | | | K ₄₄ | (0,16, 0,23, 0,23, 0,33; 1, 1), (0,17, 0,23, 0,23, 0,29; 0,9, 0,9) | 0,225 | 0,022 | | | |
| K ₅ | (0,11, 0,15, 0,15, 0,21; 1, 1), (0,12, 0,15, 0,15, 0,18; 0,9, 0,9) | 0,148 | K ₅₁ | (0,09, 0,12, 0,12, 0,16; 1, 1), (0,09, 0,12, 0,12, 0,15; 0,9, 0,9) | 0,120 | 0,018 | | | |
| | | | K ₅₂ | (0,26, 0,36, 0,36, 0,47; 1, 1), (0,29, 0,36, 0,36, 0,45; 0,9, 0,9) | 0,355 | 0,053 | | | |
| | | | K ₅₃ | (0,11, 0,16, 0,16, 0,23; 1, 1), (0,11, 0,16, 0,16, 0,20; 0,9, 0,9) | 0,156 | 0,023 | | | |
| | | | K ₅₄ | (0,18, 0,25, 0,25, 0,33; 1, 1), (0,20, 0,25, 0,25, 0,32; 0,9, 0,9) | 0,250 | 0,037 | | | |
| | | | K ₅₅ | (0,09, 0,12, 0,12, 0,16; 1, 1), (0,10, 0,12, 0,12, 0,14; 0,9, 0,9) | 0,119 | 0,018 | | | |
| K ₆ | (0,28, 0,37, 0,37, 0,48; 1, 1), (0,31, 0,37, 0,37, 0,45; 0,9, 0,9) | 0,371 | K ₆₁ | (0,12, 0,17, 0,17, 0,23; 1, 1), (0,13, 0,17, 0,17, 0,21; 0,9, 0,9) | 0,166 | 0,062 | | | |
| | | | K ₆₂ | (0,07, 0,10, 0,10, 0,14; 1, 1), (0,07, 0,10, 0,10, 0,12; 0,9, 0,9) | 0,098 | 0,036 | | | |
| | | | K ₆₃ | (0,21, 0,29, 0,29, 0,39; 1, 1), (0,23, 0,29, 0,29, 0,37; 0,9, 0,9) | 0,286 | 0,106 | | | |
| | | | K ₆₄ | (0,09, 0,12, 0,12, 0,17; 1, 1), (0,09, 0,12, 0,12, 0,16; 0,9, 0,9) | 0,121 | 0,045 | | | |
| | | | K ₆₅ | (0,04, 0,06, 0,06, 0,09; 1, 1), (0,04, 0,06, 0,06, 0,07; 0,9, 0,9) | 0,056 | 0,021 | | | |
| | | | K ₆₆ | (0,19, 0,27, 0,27, 0,38; 1, 1), (0,21, 0,27, 0,27, 0,37; 0,9, 0,9) | 0,273 | K ₆₆ | (0,19, 0,27, 0,27, 0,38; 1, 1), (0,21, 0,27, 0,27, 0,37; 0,9, 0,9) | 0,273 | 0,101 |

Net yerel ve global değerler, sırasıyla Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te aydınlatılmıştır.



Şekil 4.4. Kriterlerin önem ağırlıkları.



Şekil 4.5. Alt kriterlerin global önemi.

Ana kriterlerin hesaplanan ağırlıklara göre azalan düzende sıralaması; biyolojik özellikler ($w_{K_6} = 0,371$) > mekanik özellikler ($w_{K_3} = 0,278$) > kimyasal özellikler ($w_{K_5} = 0,148$) > fiziksel özellikler ($w_{K_4} = 0,096$) > tasarım ve üretim özellikleri (w_{K_2}

= 0,072) > ekonomik özellikler ($w_{K_1} = 0,035$) olmuştur. Bu sıralama sonucu, biyolojik özellikler grubunun en yüksek önceliğe haiz olduğunu göstermiştir. Ekonomik özellikler grubunda, en önemli derece maliyete ($w_{K_{13}} = 0,370$) ayrılmıştır. Uzun ömürlülük, 0,333'lük ağırlık değeri ile ikinci sırada yer almaktadır. Bulunabilirlik ($w_{K_{14}} = 0,198$) ve yatırım eğilimi ($w_{K_{11}} = 0,099$), sırasıyla üçüncü ve dördüncü sıraya yerleşmiştir. Tasarım ve üretim özelliklerinin alt kriterlerinin sıralaması şu şekildedir: uyumluluk ($w_{K_{26}} = 0,451$) > sterilize edilebilirlik ($w_{K_{24}} = 0,191$) > şekillendirilebilirlik ($w_{K_{25}} = 0,137$) > işlenebilirlik ($w_{K_{23}} = 0,093$) > üretim kolaylığı ($w_{K_{21}} = 0,071$) > hafiflik ($w_{K_{22}} = 0,057$). Dolayısıyla, uyumluluk ve sterilize edilebilirlik en yüksek öneme sahip alt kriterlerdir. Mekanik özelliklerin alt kriterleri şu şekilde sıralanabilir: çekme mukavemeti ($w_{K_{33}} = 0,284$) > yorulma direnci ($w_{K_{32}} = 0,254$) > zamana bağlı deformasyon ($w_{K_{36}} = 0,179$) > aşınma direnci ($w_{K_{31}} = 0,124$) > tokluk ($w_{K_{34}} = 0,107$) > sertlik ($w_{K_{35}} = 0,053$). Bu sıralama sonucu, mekanik özellikler içerisinde çekme mukavemeti ve yorulma direncinin en önemli alt kriterler olduğunu göstermektedir. Fiziksel özelliklerin alt kriterleri için elde edilen ağırlıklara göre boyutsal kararlılık ($w_{K_{42}} = 0,413$) en önemli alt kriterdir. Yoğunluk ($w_{K_{41}} = 0,264$) ikinci sırada yer almaktadır. İletkenlik ($w_{K_{33}} = 0,098$) en az önemli alt kriterdir. Kimyasal özellikler grubunun karşılaştırma sonuçlarına göre, ilk iki önemli alt kriter korozyon direnci ($w_{K_{52}} = 0,355$) ve biyobozunma ($w_{K_{54}} = 0,250$) olmuştur. En düşük öncelik değeri, vücut PH'ına etki ($w_{K_{55}} = 0,119$) alt kriterine aittir. Son olarak, biyolojik özelliklerin alt kriterlerinin sıralama düzeni şu şekildedir: enfeksiyon ($w_{K_{63}} = 0,286$) > kanserojenlik ($w_{K_{66}} = 0,273$) > kemik bütünleşmesi ($w_{K_{61}} = 0,166$) > toksiklik ($w_{K_{64}} = 0,121$) > alerjenik etki ($w_{K_{62}} = 0,098$) > kireçlenme ($w_{K_{65}} = 0,056$). Bu sıralama sonucu, biyolojik özellikler grubunun en önemli alt kriterlerinin enfeksiyon ve kanserojenlik olduğunu göstermektedir. Global ağırlıklara göre enfeksiyon ($w_{gK_{63}} = 0,106$), kanserojenlik ($w_{gK_{66}} = 0,101$) ve çekme mukavemeti ($w_{gK_{33}} = 0,079$) en önemli alt kriterlerdir. Bu alt kriterlerin, biyomalzeme değerlendirme ve seçme sürecinde önemli rol oynadığı söylenebilir.

Aralıklı tip-2 bulanık EDAS analizi için şiddet, olasılık ve fark edilebilirlik çıktıları denklem 3.22'nin probleme adaptesiyle risk öncelik katsayılarına dönüştürülmüştür. Sonuç olarak, risk karar matrisi Tablo 4.15'teki gibi elde edilmiştir.

Tablo 4.15. Risk karar matrisi.

| Kriter | Paslanmaz çelik | Titanyum | Kobalt-krom alaşımları |
|-----------------|---|---|---|
| K ₁₁ | (0,46, 0,62, 0,62, 0,76; 1, 1), (0,55, 0,62, 0,62, 0,70; 0,9, 0,9) | (0,51, 0,66, 0,66, 0,77; 1, 1), (0,59, 0,66, 0,66, 0,72; 0,9, 0,9) | (0,44, 0,61, 0,61, 0,74; 1, 1), (0,53, 0,61, 0,61, 0,68; 0,9, 0,9) |
| K ₁₂ | (0,41, 0,60, 0,60, 0,75; 1, 1), (0,51, 0,60, 0,60, 0,68; 0,9, 0,9) | (0,45, 0,58, 0,58, 0,69; 1, 1), (0,52, 0,58, 0,58, 0,64; 0,9, 0,9) | (0,43, 0,61, 0,61, 0,77; 1, 1), (0,53, 0,61, 0,61, 0,70; 0,9, 0,9) |
| K ₁₃ | (0,22, 0,41, 0,41, 0,59; 1, 1), (0,32, 0,41, 0,41, 0,50; 0,9, 0,9) | (0,45, 0,61, 0,61, 0,73; 1, 1), (0,54, 0,61, 0,61, 0,67; 0,9, 0,9) | (0,42, 0,58, 0,58, 0,72; 1, 1), (0,50, 0,58, 0,58, 0,66; 0,9, 0,9) |
| K ₁₄ | (0,31, 0,44, 0,44, 0,58; 1, 1), (0,37, 0,44, 0,44, 0,51; 0,9, 0,9) | (0,30, 0,48, 0,48, 0,65; 1, 1), (0,39, 0,48, 0,48, 0,56; 0,9, 0,9) | (0,32, 0,48, 0,48, 0,63; 1, 1), (0,41, 0,48, 0,48, 0,56; 0,9, 0,9) |
| K ₂₁ | (0,20, 0,37, 0,37, 0,54; 1, 1), (0,30, 0,37, 0,37, 0,46; 0,9, 0,9) | (0,24, 0,42, 0,42, 0,61; 1, 1), (0,33, 0,42, 0,42, 0,52; 0,9, 0,9) | (0,22, 0,39, 0,39, 0,55; 1, 1), (0,31, 0,39, 0,39, 0,47; 0,9, 0,9) |
| K ₂₂ | (0,33, 0,52, 0,52, 0,71; 1, 1), (0,43, 0,52, 0,52, 0,62; 0,9, 0,9) | (0,34, 0,52, 0,52, 0,66; 1, 1), (0,44, 0,52, 0,52, 0,60; 0,9, 0,9) | (0,27, 0,47, 0,47, 0,67; 1, 1), (0,37, 0,47, 0,47, 0,57; 0,9, 0,9) |
| K ₂₃ | (0,32, 0,47, 0,47, 0,62; 1, 1), (0,40, 0,47, 0,47, 0,54; 0,9, 0,9) | (0,32, 0,47, 0,47, 0,62; 1, 1), (0,40, 0,47, 0,47, 0,54; 0,9, 0,9) | (0,30, 0,46, 0,46, 0,61; 1, 1), (0,38, 0,46, 0,46, 0,54; 0,9, 0,9) |
| K ₂₄ | (0,30, 0,45, 0,45, 0,59; 1, 1), (0,38, 0,45, 0,45, 0,53; 0,9, 0,9) | (0,30, 0,49, 0,49, 0,64; 1, 1), (0,41, 0,49, 0,49, 0,57; 0,9, 0,9) | (0,31, 0,48, 0,48, 0,58; 1, 1), (0,40, 0,48, 0,48, 0,56; 0,9, 0,9) |
| K ₂₅ | (0,26, 0,42, 0,42, 0,56; 1, 1), (0,34, 0,42, 0,42, 0,49; 0,9, 0,9) | (0,31, 0,51, 0,51, 0,67; 1, 1), (0,42, 0,51, 0,51, 0,60; 0,9, 0,9) | (0,31, 0,47, 0,47, 0,63; 1, 1), (0,39, 0,47, 0,47, 0,55; 0,9, 0,9) |
| K ₂₆ | (0,52, 0,69, 0,69, 0,81; 1, 1), (0,62, 0,69, 0,69, 0,77; 0,9, 0,9) | (0,43, 0,59, 0,59, 0,71; 1, 1), (0,52, 0,59, 0,59, 0,65; 0,9, 0,9) | (0,54, 0,72, 0,72, 0,84; 1, 1), (0,63, 0,72, 0,72, 0,79; 0,9, 0,9) |
| K ₃₁ | (0,38, 0,59, 0,59, 0,73; 1, 1), (0,50, 0,59, 0,59, 0,67; 0,9, 0,9) | (0,42, 0,65, 0,65, 0,78; 1, 1), (0,55, 0,65, 0,65, 0,72; 0,9, 0,9) | (0,35, 0,56, 0,56, 0,70; 1, 1), (0,47, 0,56, 0,56, 0,63; 0,9, 0,9) |
| K ₃₂ | (0,46, 0,62, 0,62, 0,77; 1, 1), (0,55, 0,62, 0,62, 0,70; 0,9, 0,9) | (0,48, 0,64, 0,64, 0,77; 1, 1), (0,57, 0,64, 0,64, 0,72; 0,9, 0,9) | (0,48, 0,64, 0,64, 0,76; 1, 1), (0,57, 0,64, 0,64, 0,71; 0,9, 0,9) |
| K ₃₃ | (0,40, 0,60, 0,60, 0,75; 1, 1), (0,51, 0,60, 0,60, 0,69; 0,9, 0,9) | (0,39, 0,57, 0,57, 0,72; 1, 1), (0,49, 0,57, 0,57, 0,65; 0,9, 0,9) | (0,35, 0,56, 0,56, 0,71; 1, 1), (0,47, 0,56, 0,56, 0,64; 0,9, 0,9) |
| K ₃₄ | (0,24, 0,37, 0,37, 0,54; 1, 1), (0,31, 0,37, 0,37, 0,47; 0,9, 0,9) | (0,36, 0,56, 0,56, 0,70; 1, 1), (0,47, 0,56, 0,56, 0,64; 0,9, 0,9) | (0,32, 0,51, 0,51, 0,68; 1, 1), (0,42, 0,51, 0,51, 0,60; 0,9, 0,9) |
| K ₃₅ | (0,27, 0,45, 0,45, 0,61; 1, 1), (0,37, 0,45, 0,45, 0,54; 0,9, 0,9) | (0,25, 0,43, 0,43, 0,62; 1, 1), (0,34, 0,43, 0,43, 0,53; 0,9, 0,9) | (0,29, 0,48, 0,48, 0,65; 1, 1), (0,39, 0,48, 0,48, 0,57; 0,9, 0,9) |
| K ₃₆ | (0,28, 0,49, 0,49, 0,66; 1, 1), (0,39, 0,49, 0,49, 0,58; 0,9, 0,9) | (0,35, 0,54, 0,54, 0,72; 1, 1), (0,45, 0,54, 0,54, 0,63; 0,9, 0,9) | (0,47, 0,64, 0,64, 0,77; 1, 1), (0,57, 0,64, 0,64, 0,72; 0,9, 0,9) |
| K ₄₁ | (0,31, 0,45, 0,45, 0,59; 1, 1), (0,38, 0,45, 0,45, 0,52; 0,9, 0,9) | (0,29, 0,45, 0,45, 0,62; 1, 1), (0,37, 0,45, 0,45, 0,54; 0,9, 0,9) | (0,32, 0,47, 0,47, 0,63; 1, 1), (0,40, 0,47, 0,47, 0,55; 0,9, 0,9) |
| K ₄₂ | (0,35, 0,53, 0,53, 0,71; 1, 1), (0,44, 0,53, 0,53, 0,62; 0,9, 0,9) | (0,42, 0,61, 0,61, 0,76; 1, 1), (0,53, 0,61, 0,61, 0,70; 0,9, 0,9) | (0,35, 0,53, 0,53, 0,71; 1, 1), (0,44, 0,53, 0,53, 0,62; 0,9, 0,9) |
| K ₄₃ | (0,29, 0,45, 0,45, 0,62; 1, 1), (0,37, 0,45, 0,45, 0,54; 0,9, 0,9) | (0,29, 0,45, 0,45, 0,62; 1, 1), (0,37, 0,45, 0,45, 0,54; 0,9, 0,9) | (0,27, 0,42, 0,42, 0,58; 1, 1), (0,35, 0,42, 0,42, 0,50; 0,9, 0,9) |
| K ₄₄ | (0,46, 0,63, 0,63, 0,76; 1, 1), (0,55, 0,63, 0,63, 0,71; 0,9, 0,9) | (0,33, 0,52, 0,52, 0,70; 1, 1), (0,43, 0,52, 0,52, 0,62; 0,9, 0,9) | (0,41, 0,59, 0,59, 0,75; 1, 1), (0,51, 0,59, 0,59, 0,68; 0,9, 0,9) |
| K ₅₁ | (0,47, 0,65, 0,65, 0,80; 1, 1), (0,57, 0,65, 0,65, 0,74; 0,9, 0,9) | (0,20, 0,41, 0,41, 0,60; 1, 1), (0,31, 0,41, 0,41, 0,51; 0,9, 0,9) | (0,33, 0,52, 0,52, 0,71; 1, 1), (0,43, 0,52, 0,52, 0,62; 0,9, 0,9) |
| K ₅₂ | (0,56, 0,74, 0,74, 0,86; 1, 1), (0,67, 0,74, 0,74, 0,82; 0,9, 0,9) | (0,49, 0,61, 0,61, 0,70; 1, 1), (0,55, 0,61, 0,61, 0,66; 0,9, 0,9) | (0,51, 0,65, 0,65, 0,76; 1, 1), (0,59, 0,65, 0,65, 0,72; 0,9, 0,9) |
| K ₅₃ | (0,48, 0,66, 0,66, 0,80; 1, 1), (0,58, 0,66, 0,66, 0,74; 0,9, 0,9) | (0,53, 0,69, 0,69, 0,81; 1, 1), (0,62, 0,69, 0,69, 0,76; 0,9, 0,9) | (0,44, 0,63, 0,63, 0,80; 1, 1), (0,54, 0,63, 0,63, 0,72; 0,9, 0,9) |
| K ₅₄ | (0,35, 0,50, 0,50, 0,63; 1, 1), (0,43, 0,50, 0,50, 0,57; 0,9, 0,9) | (0,39, 0,53, 0,53, 0,66; 1, 1), (0,47, 0,53, 0,53, 0,60; 0,9, 0,9) | (0,37, 0,51, 0,51, 0,66; 1, 1), (0,44, 0,51, 0,51, 0,59; 0,9, 0,9) |
| K ₅₅ | (0,28, 0,48, 0,48, 0,65; 1, 1), (0,39, 0,48, 0,48, 0,57; 0,9, 0,9) | (0,37, 0,51, 0,51, 0,64; 1, 1), (0,45, 0,51, 0,51, 0,58; 0,9, 0,9) | (0,32, 0,49, 0,49, 0,65; 1, 1), (0,41, 0,49, 0,49, 0,57; 0,9, 0,9) |
| K ₆₁ | (0,39, 0,59, 0,59, 0,75; 1, 1), (0,50, 0,59, 0,59, 0,68; 0,9, 0,9) | (0,39, 0,49, 0,49, 0,61; 1, 1), (0,44, 0,49, 0,49, 0,56; 0,9, 0,9) | (0,54, 0,71, 0,71, 0,84; 1, 1), (0,64, 0,71, 0,71, 0,79; 0,9, 0,9) |
| K ₆₂ | (0,31, 0,50, 0,50, 0,68; 1, 1), (0,41, 0,50, 0,50, 0,59; 0,9, 0,9) | (0,20, 0,35, 0,35, 0,51; 1, 1), (0,28, 0,35, 0,35, 0,43; 0,9, 0,9) | (0,31, 0,50, 0,50, 0,68; 1, 1), (0,41, 0,50, 0,50, 0,59; 0,9, 0,9) |
| K ₆₃ | (0,38, 0,58, 0,58, 0,77; 1, 1), (0,49, 0,58, 0,58, 0,68; 0,9, 0,9) | (0,31, 0,50, 0,50, 0,67; 1, 1), (0,41, 0,50, 0,50, 0,59; 0,9, 0,9) | (0,34, 0,54, 0,54, 0,72; 1, 1), (0,44, 0,54, 0,54, 0,63; 0,9, 0,9) |
| K ₆₄ | (0,40, 0,58, 0,58, 0,76; 1, 1), (0,49, 0,58, 0,58, 0,67; 0,9, 0,9) | (0,23, 0,41, 0,41, 0,57; 1, 1), (0,32, 0,41, 0,41, 0,49; 0,9, 0,9) | (0,35, 0,54, 0,54, 0,72; 1, 1), (0,45, 0,54, 0,54, 0,63; 0,9, 0,9) |
| K ₆₅ | (0,17, 0,34, 0,34, 0,51; 1, 1), (0,26, 0,34, 0,34, 0,43; 0,9, 0,9) | (0,34, 0,51, 0,51, 0,66; 1, 1), (0,43, 0,51, 0,51, 0,59; 0,9, 0,9) | (0,17, 0,34, 0,34, 0,51; 1, 1), (0,26, 0,34, 0,34, 0,43; 0,9, 0,9) |
| K ₆₆ | (0,35, 0,51, 0,51, 0,68; 1, 1), (0,43, 0,51, 0,51, 0,60; 0,9, 0,9) | (0,23, 0,41, 0,41, 0,57; 1, 1), (0,32, 0,41, 0,41, 0,49; 0,9, 0,9) | (0,40, 0,56, 0,56, 0,70; 1, 1), (0,49, 0,56, 0,56, 0,64; 0,9, 0,9) |

Ortalama çözümler, risk karar matrisi doğrultusunda Tablo 4.16'daki gibi hesaplanmıştır.

Tablo 4.16. Ortalama çözümler.

| Kriter | \widetilde{av} | av | Kriter | \widetilde{av} | av |
|-----------------|---|-------|-----------------|---|-------|
| K ₁₁ | (0,47, 0,63, 0,63, 0,75; 1, 1), (0,56, 0,63, 0,63, 0,70; 0,9, 0,9) | 0,609 | K ₄₁ | (0,31, 0,46, 0,46, 0,61; 1, 1), (0,38, 0,46, 0,46, 0,54; 0,9, 0,9) | 0,448 |
| K ₁₂ | (0,43, 0,60, 0,60, 0,74; 1, 1), (0,52, 0,60, 0,60, 0,67; 0,9, 0,9) | 0,579 | K ₄₂ | (0,37, 0,56, 0,56, 0,73; 1, 1), (0,47, 0,56, 0,56, 0,65; 0,9, 0,9) | 0,541 |
| K ₁₃ | (0,36, 0,53, 0,53, 0,68; 1, 1), (0,45, 0,53, 0,53, 0,61; 0,9, 0,9) | 0,515 | K ₄₃ | (0,28, 0,44, 0,44, 0,60; 1, 1), (0,37, 0,44, 0,44, 0,53; 0,9, 0,9) | 0,433 |
| K ₁₄ | (0,31, 0,47, 0,47, 0,62; 1, 1), (0,39, 0,47, 0,47, 0,55; 0,9, 0,9) | 0,454 | K ₄₄ | (0,40, 0,58, 0,58, 0,74; 1, 1), (0,50, 0,58, 0,58, 0,67; 0,9, 0,9) | 0,563 |
| K ₂₁ | (0,22, 0,39, 0,39, 0,57; 1, 1), (0,31, 0,39, 0,39, 0,48; 0,9, 0,9) | 0,385 | K ₅₁ | (0,33, 0,53, 0,53, 0,71; 1, 1), (0,44, 0,53, 0,53, 0,62; 0,9, 0,9) | 0,513 |
| K ₂₂ | (0,32, 0,50, 0,50, 0,68; 1, 1), (0,42, 0,50, 0,50, 0,59; 0,9, 0,9) | 0,489 | K ₅₂ | (0,52, 0,67, 0,67, 0,78; 1, 1), (0,60, 0,67, 0,67, 0,73; 0,9, 0,9) | 0,646 |
| K ₂₃ | (0,31, 0,46, 0,46, 0,62; 1, 1), (0,39, 0,46, 0,46, 0,54; 0,9, 0,9) | 0,454 | K ₅₃ | (0,48, 0,66, 0,66, 0,80; 1, 1), (0,58, 0,66, 0,66, 0,74; 0,9, 0,9) | 0,641 |
| K ₂₄ | (0,31, 0,47, 0,47, 0,62; 1, 1), (0,40, 0,47, 0,47, 0,55; 0,9, 0,9) | 0,460 | K ₅₄ | (0,37, 0,51, 0,51, 0,65; 1, 1), (0,44, 0,51, 0,51, 0,58; 0,9, 0,9) | 0,501 |
| K ₂₅ | (0,29, 0,46, 0,46, 0,62; 1, 1), (0,39, 0,46, 0,46, 0,55; 0,9, 0,9) | 0,451 | K ₅₅ | (0,32, 0,49, 0,49, 0,64; 1, 1), (0,41, 0,49, 0,49, 0,57; 0,9, 0,9) | 0,479 |
| K ₂₆ | (0,50, 0,67, 0,67, 0,79; 1, 1), (0,59, 0,67, 0,67, 0,74; 0,9, 0,9) | 0,642 | K ₆₁ | (0,44, 0,60, 0,60, 0,74; 1, 1), (0,52, 0,60, 0,60, 0,67; 0,9, 0,9) | 0,580 |
| K ₃₁ | (0,38, 0,60, 0,60, 0,74; 1, 1), (0,50, 0,60, 0,60, 0,68; 0,9, 0,9) | 0,571 | K ₆₂ | (0,27, 0,45, 0,45, 0,62; 1, 1), (0,36, 0,45, 0,45, 0,54; 0,9, 0,9) | 0,438 |
| K ₃₂ | (0,47, 0,64, 0,64, 0,77; 1, 1), (0,56, 0,64, 0,64, 0,71; 0,9, 0,9) | 0,616 | K ₆₃ | (0,34, 0,54, 0,54, 0,72; 1, 1), (0,45, 0,54, 0,54, 0,63; 0,9, 0,9) | 0,525 |
| K ₃₃ | (0,38, 0,57, 0,57, 0,73; 1, 1), (0,49, 0,57, 0,57, 0,66; 0,9, 0,9) | 0,555 | K ₆₄ | (0,33, 0,51, 0,51, 0,68; 1, 1), (0,42, 0,51, 0,51, 0,60; 0,9, 0,9) | 0,495 |
| K ₃₄ | (0,30, 0,48, 0,48, 0,64; 1, 1), (0,40, 0,48, 0,48, 0,57; 0,9, 0,9) | 0,465 | K ₆₅ | (0,23, 0,39, 0,39, 0,56; 1, 1), (0,31, 0,39, 0,39, 0,48; 0,9, 0,9) | 0,384 |
| K ₃₅ | (0,27, 0,45, 0,45, 0,63; 1, 1), (0,37, 0,45, 0,45, 0,54; 0,9, 0,9) | 0,442 | K ₆₆ | (0,32, 0,49, 0,49, 0,65; 1, 1), (0,41, 0,49, 0,49, 0,58; 0,9, 0,9) | 0,480 |
| K ₃₆ | (0,37, 0,56, 0,56, 0,72; 1, 1), (0,47, 0,56, 0,56, 0,64; 0,9, 0,9) | 0,539 | | | |

Ortalama çözüm değerlerinin elde edilmesinin ardından PDA matrisi (Tablo 4.17) ile NDA matrisi (Tablo 4.18) oluşturulmuştur. Matrislerin oluşturulması sürecince risk öncelik katsayılarının maliyet kriteri kümesine dâhil olduğu kabul edilmiştir. Çünkü HTEA yönteminde risk öncelik katsayısı düşük olan bir karar elemanı en az risk ihtiva eden, yani en iyi elemandır. Dolayısıyla, HTEA risk çıktıları minimizasyon yönlüdür. Bir sonraki aşamada, PDA ve NDA değerlerinin ağırlıklı toplamları elde edilmiş ve bunların normalize değerleri hesap edilmiştir. Ardından, mevcut malzemeler için değerlendirme skorları saptanmıştır. Tablo 4.19'da görüldüğü üzere, en yüksek skora titanyum sahiptir. Bu sonuç, titanyumun en iyi malzeme seçeneği olduğunu göstermiştir.

Tablo 4.17. PDA matrisi.

| Kriter | PDA _{paslanmaz_çelik} | PDA _{titanyum} | PDA _{kobalt-krom_alaşımınlar} |
|-----------------|--|--|--|
| K ₁₁ | (-0,47, 0,01, 0,01, 0,48; 1, 1), (-0,23, 0,01, 0,01, 0,25; 0,9, 0,9) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (-0,43, 0,04, 0,04, 0,51; 1, 1), (-0,20, 0,04, 0,04, 0,27; 0,9, 0,9) |
| K ₁₂ | (-0,56, 0,00, 0,00, 0,56; 1, 1), (-0,28, 0,00, 0,00, 0,28; 0,9, 0,9) | (-0,45, 0,03, 0,03, 0,50; 1, 1), (-0,21, 0,03, 0,03, 0,26; 0,9, 0,9) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) |
| K ₁₃ | (-0,44, 0,24, 0,24, 0,89; 1, 1), (-0,09, 0,24, 0,24, 0,57; 0,9, 0,9) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) |
| K ₁₄ | (-0,60, 0,06, 0,06, 0,69; 1, 1), (-0,27, 0,06, 0,06, 0,38; 0,9, 0,9) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) |
| K ₂₁ | (-0,82, 0,06, 0,06, 0,94; 1, 1), (-0,38, 0,06, 0,06, 0,49; 0,9, 0,9) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (-0,86, 0,02, 0,02, 0,91; 1, 1), (-0,42, 0,02, 0,02, 0,46; 0,9, 0,9) |
| K ₂₂ | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (-0,72, 0,07, 0,07, 0,82; 1, 1), (-0,31, 0,07, 0,07, 0,45; 0,9, 0,9) |
| K ₂₃ | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (-0,66, 0,02, 0,02, 0,69; 1, 1), (-0,32, 0,02, 0,02, 0,36; 0,9, 0,9) |
| K ₂₄ | (-0,62, 0,05, 0,05, 0,69; 1, 1), (-0,28, 0,05, 0,05, 0,37; 0,9, 0,9) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) |
| K ₂₅ | (-0,60, 0,11, 0,11, 0,80; 1, 1), (-0,24, 0,11, 0,11, 0,45; 0,9, 0,9) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) |
| K ₂₆ | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (-0,33, 0,12, 0,12, 0,55; 1, 1), (-0,10, 0,12, 0,12, 0,34; 0,9, 0,9) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) |
| K ₃₁ | (-0,61, 0,02, 0,02, 0,63; 1, 1), (-0,29, 0,02, 0,02, 0,31; 0,9, 0,9) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (-0,55, 0,07, 0,07, 0,67; 1, 1), (-0,23, 0,07, 0,07, 0,37; 0,9, 0,9) |
| K ₃₂ | (-0,48, 0,02, 0,02, 0,50; 1, 1), (-0,22, 0,02, 0,02, 0,27; 0,9, 0,9) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) |
| K ₃₃ | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (-0,61, 0,01, 0,01, 0,61; 1, 1), (-0,30, 0,01, 0,01, 0,31; 0,9, 0,9) | (-0,59, 0,03, 0,03, 0,67; 1, 1), (-0,28, 0,03, 0,03, 0,34; 0,9, 0,9) |
| K ₃₄ | (-0,51, 0,23, 0,23, 0,87; 1, 1), (-0,14, 0,23, 0,23, 0,56; 0,9, 0,9) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) |
| K ₃₅ | (-0,77, 0,00, 0,00, 0,80; 1, 1), (-0,39, 0,00, 0,00, 0,39; 0,9, 0,9) | (-0,78, 0,05, 0,05, 0,85; 1, 1), (-0,36, 0,05, 0,05, 0,45; 0,9, 0,9) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) |
| K ₃₆ | (-0,54, 0,13, 0,13, 0,81; 1, 1), (-0,21, 0,13, 0,13, 0,46; 0,9, 0,9) | (-0,64, 0,03, 0,03, 0,67; 1, 1), (-0,30, 0,03, 0,03, 0,36; 0,9, 0,9) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) |
| K ₄₁ | (-0,64, 0,02, 0,02, 0,68; 1, 1), (-0,31, 0,02, 0,02, 0,35; 0,9, 0,9) | (-0,70, 0,01, 0,01, 0,72; 1, 1), (-0,34, 0,01, 0,01, 0,37; 0,9, 0,9) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) |
| K ₄₂ | (-0,62, 0,05, 0,05, 0,70; 1, 1), (-0,28, 0,05, 0,05, 0,38; 0,9, 0,9) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (-0,62, 0,05, 0,05, 0,70; 1, 1), (-0,28, 0,05, 0,05, 0,38; 0,9, 0,9) |
| K ₄₃ | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (-0,68, 0,04, 0,04, 0,77; 1, 1), (-0,32, 0,04, 0,04, 0,40; 0,9, 0,9) |
| K ₄₄ | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (-0,54, 0,10, 0,10, 0,72; 1, 1), (-0,21, 0,10, 0,10, 0,42; 0,9, 0,9) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) |
| K ₅₁ | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (-0,52, 0,23, 0,23, 0,99; 1, 1), (-0,14, 0,23, 0,23, 0,61; 0,9, 0,9) | (-0,74, 0,01, 0,01, 0,73; 1, 1), (-0,36, 0,01, 0,01, 0,38; 0,9, 0,9) |
| K ₅₂ | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (-0,29, 0,09, 0,09, 0,44; 1, 1), (-0,09, 0,09, 0,09, 0,28; 0,9, 0,9) | (-0,37, 0,02, 0,02, 0,42; 1, 1), (-0,17, 0,02, 0,02, 0,22; 0,9, 0,9) |
| K ₅₃ | (-0,49, 0,00, 0,00, 0,50; 1, 1), (-0,25, 0,00, 0,00, 0,25; 0,9, 0,9) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (-0,50, 0,05, 0,05, 0,56; 1, 1), (-0,22, 0,05, 0,05, 0,31; 0,9, 0,9) |
| K ₅₄ | (-0,52, 0,03, 0,03, 0,60; 1, 1), (-0,25, 0,03, 0,03, 0,32; 0,9, 0,9) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) |
| K ₅₅ | (-0,68, 0,02, 0,02, 0,76; 1, 1), (-0,33, 0,02, 0,02, 0,39; 0,9, 0,9) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (-0,68, 0,01, 0,01, 0,68; 1, 1), (-0,33, 0,01, 0,01, 0,35; 0,9, 0,9) |
| K ₆₁ | (-0,54, 0,02, 0,02, 0,59; 1, 1), (-0,26, 0,02, 0,02, 0,31; 0,9, 0,9) | (-0,30, 0,19, 0,19, 0,59; 1, 1), (-0,05, 0,19, 0,19, 0,40; 0,9, 0,9) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) |
| K ₆₂ | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (-0,54, 0,22, 0,22, 0,97; 1, 1), (-0,16, 0,22, 0,22, 0,59; 0,9, 0,9) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) |
| K ₆₃ | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (-0,63, 0,08, 0,08, 0,79; 1, 1), (-0,27, 0,08, 0,08, 0,43; 0,9, 0,9) | (-0,72, 0,00, 0,00, 0,73; 1, 1), (-0,36, 0,00, 0,00, 0,36; 0,9, 0,9) |
| K ₆₄ | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (-0,49, 0,21, 0,21, 0,92; 1, 1), (-0,15, 0,21, 0,21, 0,56; 0,9, 0,9) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) |
| K ₆₅ | (-0,73, 0,15, 0,15, 1,01; 1, 1), (-0,29, 0,15, 0,15, 0,58; 0,9, 0,9) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (-0,73, 0,15, 0,15, 1,01; 1, 1), (-0,29, 0,15, 0,15, 0,58; 0,9, 0,9) |
| K ₆₆ | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (-0,51, 0,18, 0,18, 0,88; 1, 1), (-0,16, 0,18, 0,18, 0,53; 0,9, 0,9) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) |

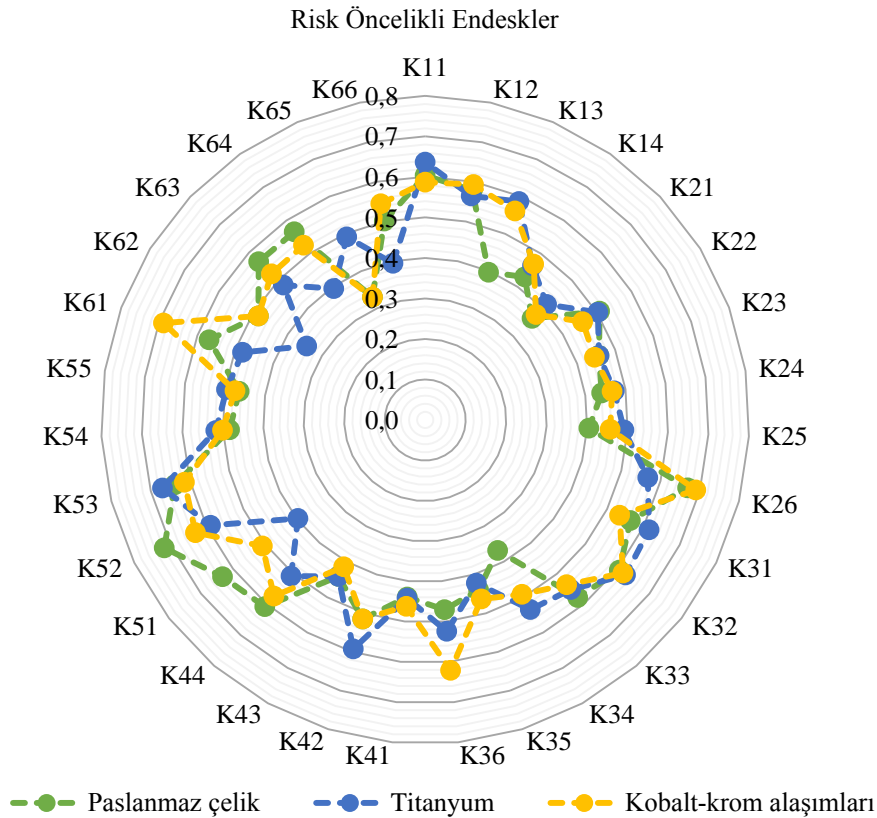
Tablo 4.18. NDA matrisi.

| Kriter | NDA _{paslanmaz_çelik} | NDA _{titanyum} | NDA _{kobalt-krom_alaşım} |
|-----------------|--|--|--|
| K ₁₁ | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (-0,40, 0,05, 0,05, 0,49; 1, 1), (- 0,18, 0,05, 0,05, 0,27; 0,9, 0,9) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) |
| K ₁₂ | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (-0,53, 0,03, 0,03, 0,58; 1, 1), (- 0,25, 0,03, 0,03, 0,30; 0,9, 0,9) |
| K ₁₃ | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (-0,44, 0,15, 0,15, 0,71; 1, 1), (- 0,14, 0,15, 0,15, 0,43; 0,9, 0,9) | (-0,51, 0,09, 0,09, 0,70; 1, 1), (- 0,21, 0,09, 0,09, 0,40; 0,9, 0,9) |
| K ₁₄ | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (-0,70, 0,02, 0,02, 0,74; 1, 1), (- 0,34, 0,02, 0,02, 0,38; 0,9, 0,9) | (-0,65, 0,04, 0,04, 0,71; 1, 1), (- 0,31, 0,04, 0,04, 0,37; 0,9, 0,9) |
| K ₂₁ | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (-0,84, 0,07, 0,07, 1,01; 1, 1), (- 0,39, 0,07, 0,07, 0,53; 0,9, 0,9) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) |
| K ₂₂ | (-0,71, 0,04, 0,04, 0,80; 1, 1), (- 0,34, 0,04, 0,04, 0,41; 0,9, 0,9) | (-0,68, 0,04, 0,04, 0,70; 1, 1), (- 0,31, 0,04, 0,04, 0,38; 0,9, 0,9) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) |
| K ₂₃ | (-0,65, 0,01, 0,01, 0,66; 1, 1), (- 0,32, 0,01, 0,01, 0,34; 0,9, 0,9) | (-0,65, 0,01, 0,01, 0,66; 1, 1), (- 0,32, 0,01, 0,01, 0,34; 0,9, 0,9) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) |
| K ₂₄ | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (-0,69, 0,03, 0,03, 0,72; 1, 1), (- 0,31, 0,03, 0,03, 0,38; 0,9, 0,9) | (-0,67, 0,01, 0,01, 0,71; 1, 1), (- 0,33, 0,01, 0,01, 0,36; 0,9, 0,9) |
| K ₂₅ | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (-0,69, 0,10, 0,10, 0,83; 1, 1), (- 0,28, 0,10, 0,10, 0,47; 0,9, 0,9) | (-0,69, 0,01, 0,01, 0,75; 1, 1), (- 0,35, 0,01, 0,01, 0,37; 0,9, 0,9) |
| K ₂₆ | (-0,42, 0,04, 0,04, 0,50; 1, 1), (- 0,18, 0,04, 0,04, 0,28; 0,9, 0,9) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (-0,39, 0,08, 0,08, 0,54; 1, 1), (- 0,16, 0,08, 0,08, 0,31; 0,9, 0,9) |
| K ₃₁ | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (-0,55, 0,08, 0,08, 0,69; 1, 1), (- 0,22, 0,08, 0,08, 0,38; 0,9, 0,9) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) |
| K ₃₂ | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (-0,46, 0,02, 0,02, 0,49; 1, 1), (- 0,22, 0,02, 0,02, 0,26; 0,9, 0,9) | (-0,46, 0,00, 0,00, 0,46; 1, 1), (- 0,23, 0,00, 0,00, 0,23; 0,9, 0,9) |
| K ₃₃ | (-0,58, 0,04, 0,04, 0,67; 1, 1), (- 0,27, 0,04, 0,04, 0,35; 0,9, 0,9) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) |
| K ₃₄ | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (-0,60, 0,17, 0,17, 0,85; 1, 1), (- 0,20, 0,17, 0,17, 0,52; 0,9, 0,9) | (-0,69, 0,06, 0,06, 0,82; 1, 1), (- 0,33, 0,06, 0,06, 0,43; 0,9, 0,9) |
| K ₃₅ | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (-0,75, 0,05, 0,05, 0,85; 1, 1), (- 0,35, 0,05, 0,05, 0,45; 0,9, 0,9) |
| K ₃₆ | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (-0,46, 0,16, 0,16, 0,75; 1, 1), (- 0,14, 0,16, 0,16, 0,46; 0,9, 0,9) |
| K ₄₁ | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (-0,66, 0,04, 0,04, 0,72; 1, 1), (- 0,31, 0,04, 0,04, 0,38; 0,9, 0,9) |
| K ₄₂ | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (-0,57, 0,11, 0,11, 0,72; 1, 1), (- 0,22, 0,11, 0,11, 0,43; 0,9, 0,9) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) |
| K ₄₃ | (-0,73, 0,02, 0,02, 0,77; 1, 1), (- 0,35, 0,02, 0,02, 0,40; 0,9, 0,9) | (-0,73, 0,02, 0,02, 0,77; 1, 1), (- 0,35, 0,02, 0,02, 0,40; 0,9, 0,9) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) |
| K ₄₄ | (-0,50, 0,08, 0,08, 0,64; 1, 1), (- 0,20, 0,08, 0,08, 0,37; 0,9, 0,9) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (-0,58, 0,02, 0,02, 0,63; 1, 1), (- 0,28, 0,02, 0,02, 0,32; 0,9, 0,9) |
| K ₅₁ | (-0,46, 0,24, 0,24, 0,92; 1, 1), (- 0,10, 0,24, 0,24, 0,59; 0,9, 0,9) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) |
| K ₅₂ | (-0,34, 0,12, 0,12, 0,53; 1, 1), (- 0,10, 0,12, 0,12, 0,33; 0,9, 0,9) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) |
| K ₅₃ | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (-0,42, 0,05, 0,05, 0,50; 1, 1), (- 0,18, 0,05, 0,05, 0,28; 0,9, 0,9) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) |
| K ₅₄ | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (-0,51, 0,04, 0,04, 0,58; 1, 1), (- 0,24, 0,04, 0,04, 0,31; 0,9, 0,9) | (-0,56, 0,00, 0,00, 0,57; 1, 1), (- 0,28, 0,00, 0,00, 0,28; 0,9, 0,9) |
| K ₅₅ | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (-0,58, 0,03, 0,03, 0,66; 1, 1), (- 0,27, 0,03, 0,03, 0,35; 0,9, 0,9) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) |
| K ₆₁ | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (-0,35, 0,20, 0,20, 0,69; 1, 1), (- 0,06, 0,20, 0,20, 0,45; 0,9, 0,9) |
| K ₆₂ | (-0,71, 0,11, 0,11, 0,93; 1, 1), (- 0,30, 0,11, 0,11, 0,52; 0,9, 0,9) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (-0,71, 0,11, 0,11, 0,93; 1, 1), (- 0,30, 0,11, 0,11, 0,52; 0,9, 0,9) |
| K ₆₃ | (-0,64, 0,08, 0,08, 0,82; 1, 1), (- 0,28, 0,08, 0,08, 0,45; 0,9, 0,9) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) |
| K ₆₄ | (-0,58, 0,14, 0,14, 0,88; 1, 1), (- 0,22, 0,14, 0,14, 0,51; 0,9, 0,9) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (-0,67, 0,06, 0,06, 0,80; 1, 1), (- 0,30, 0,06, 0,06, 0,43; 0,9, 0,9) |
| K ₆₅ | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (-0,57, 0,29, 0,29, 1,12; 1, 1), (- 0,13, 0,29, 0,29, 0,71; 0,9, 0,9) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) |
| K ₆₆ | (-0,64, 0,04, 0,04, 0,75; 1, 1), (- 0,30, 0,04, 0,04, 0,39; 0,9, 0,9) | (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1), (0,00, 0,00, 0,00, 0,00; 1, 1) | (-0,53, 0,14, 0,14, 0,78; 1, 1), (- 0,19, 0,14, 0,14, 0,47; 0,9, 0,9) |

Tablo 4.19. Aralıklı tip-2 bulanık EDAS çıktıları.

| Malzeme | \widetilde{sp}_i ve \widetilde{sn}_i | $\widetilde{ns\tilde{p}}_i$ ve $\widetilde{ns\tilde{n}}_i$ | \widetilde{as}_i ve as_i |
|------------------------|--|--|--|
| Paslanmaz çelik | (-0,28, 0,03, 0,03, 0,33; 1, 1), (-0,12, 0,03, 0,03, 0,18; 0,9, 0,9) | (-3,89, 0,41, 0,41, 4,65; 1, 1), (-1,73, 0,41, 0,41, 2,53; 0,9, 0,9) | (-5,04, 0,63, 0,63, 6,29; 1, 1), (-2,20, 0,63, 0,63, 3,45; 0,9, 0,9) |
| | (-0,29, 0,04, 0,04, 0,38; 1, 1), (-0,13, 0,04, 0,04, 0,21; 0,9, 0,9) | (-6,18, 0,85, 0,85, 7,93; 1, 1), (-2,67, 0,85, 0,85, 4,38; 0,9, 0,9) | 0,612 |
| Titanyum | (-0,34, 0,07, 0,07, 0,48; 1, 1), (-0,13, 0,07, 0,07, 0,28; 0,9, 0,9) | (-4,77, 1,05, 1,05, 6,72; 1, 1), (-1,84, 1,05, 1,05, 3,90; 0,9, 0,9) | (-4,37, 0,80, 0,80, 5,81; 1, 1), (-1,74, 0,80, 0,80, 3,33; 0,9, 0,9) |
| | (-0,19, 0,03, 0,03, 0,23; 1, 1), (-0,08, 0,03, 0,03, 0,13; 0,9, 0,9) | (-3,97, 0,56, 0,56, 4,89; 1, 1), (-1,65, 0,56, 0,56, 2,76; 0,9, 0,9) | 0,760 |
| Kobalt-krom alaşımları | (-0,26, 0,01, 0,01, 0,28; 1, 1), (-0,12, 0,01, 0,01, 0,15; 0,9, 0,9) | (-3,60, 0,19, 0,19, 3,98; 1, 1), (-1,69, 0,19, 0,19, 2,08; 0,9, 0,9) | (-5,09, 0,62, 0,62, 6,25; 1, 1), (-2,22, 0,62, 0,62, 3,44; 0,9, 0,9) |
| | (-0,31, 0,05, 0,05, 0,41; 1, 1), (-0,13, 0,05, 0,05, 0,23; 0,9, 0,9) | (-6,57, 1,05, 1,05, 8,52; 1, 1), (-2,74, 1,05, 1,05, 4,80; 0,9, 0,9) | 0,594 |

Risk faktörlerinin ağırlıklı çarpımlarının paslanmaz çelik, titanyum ve kobalt-krom alaşımları için ortalamaları şöyledir: [(0,35, 0,53, 0,53, 0,68; 1, 1), (0,44, 0,53, 0,53, 0,61; 0,9, 0,9)] - 0,511, [(0,35, 0,52, 0,52, 0,67; 1, 1), (0,44, 0,52, 0,52, 0,60; 0,9, 0,9)] - 0,506 ve [(0,36, 0,54, 0,54, 0,69; 1, 1), (0,46, 0,54, 0,54, 0,62; 0,9, 0,9)] - 0,521. Bu değerler, titanyumun daha az risk ihtiva ettiğini destekleyici niteliktedir. Malzemelerin kriter bazındaki risk öncelikli endekslere göre analizi ise Şekil 4.6'ya göre yapılabilir.



Şekil 4.6. Malzemeler için risk öncelikli endeksler.

Aralıklı tip-2 bulanık HTEA yöntemi, birçok farklı kriter altında malzemelerin değerlendirilmesiyle risk öncelikli endekslerin belirlenmesine olanak tanır. Bu yöntemde, risk öncelik katsayıları 0 ile 1 arasında değişebilir. Endeksler, malzemelerin farklı özelliklerinin karşılaştırılmasına yardımcı olur ve belirli özelliklerin iyileştirilmesi için bir yol gösterir. Risk öncelikli endekslerin yüksek olması durumunda, malzemelerin ilgili özelliklerinin iyileştirilmesi önem kazanır. Yüksek endeks, malzeme özelliğinin daha yüksek bir önceliğe sahip olduğunu gösterir. İyileştirme çalışmaları, bu özellik üzerine odaklanabilir. Malzeme seçiminde endekslerin dikkate alınması, malzeme performansının artırılması için önemlidir. Şekil 4.6'ya göre paslanmaz çelik için korozyon direnci, uyumluluk ve reaktivite; titanyum için reaktivite, yatırım eğilimi ve yorulma direnci; kobalt-krom alaşımları için ise uyumluluk, kemik bütünleşmesi ve korozyon direnci üzerine durulması gereken önemli özelliklerdir. Söz konusu bu özellikler, en yüksek risk öncelikli endekslere sahiptir. Dolayısıyla, bu özellikler malzemelerin performansının geliştirilmesi açısından önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca, malzemelerin kendi aralarında da bir mukayese yapılabilir. Örneğin, kemik bütünleşmesi açısından paslanmaz çelik 0,569 değerini, titanyum 0,481 değerini ve kobalt-krom alaşımları 0,689 değerini almıştır. Titanyumun kemik bütünleşmesi özelliği diğer malzemelerinkine göre daha düşük değere sahiptir. Bu sonuç, titanyumun kemik bütünleşmesi özelliğinin daha iyi olduğunun ve daha az risk ihtiva ettiğinin bir göstergesidir. Dolayısıyla, kemik bütünleşmesi özelliği çok önemli olan uygulamalarda titanyumun tercih edilebilirliği yüksek olmaktadır. Kobalt-krom alaşımları ise kemik bütünleşmesi için en yüksek risk öncelikli endekse sahiptir. Sonuç olarak, malzeme performansını iyileştirmek için risk öncelikli endeksleri yüksek olan özelliklere daha fazla önem verilmelidir. Bu sayede, malzemelerin özellikleri daha uygun hale getirilerek, daha iyi sonuçlar elde edilebilir.

Öte yandan, malzemelerin bulanık risk göstergeleri için verteks uzaklığı (denklem 4.1) [115] hesaplanmış ve Tablo 4.20 - Tablo 4.23'te sunulmuştur.

$$d(\tilde{A}, \tilde{B}) = \sqrt{\frac{1}{8} \left[\begin{aligned} &(a_1^L - b_1^L)^2 + (a_2^L - b_2^L)^2 + (a_3^L - b_3^L)^2 + (a_4^L - b_4^L)^2 + \\ &(a_1^U - b_1^U)^2 + (a_2^U - b_2^U)^2 + (a_3^U - b_3^U)^2 + (a_4^U - b_4^U)^2 + \\ &(h_{1\tilde{A}}^L - h_{1\tilde{B}}^L)^2 + (h_{2\tilde{A}}^L - h_{2\tilde{B}}^L)^2 + (h_{1\tilde{A}}^U - h_{1\tilde{B}}^U)^2 + (h_{2\tilde{A}}^U - h_{2\tilde{B}}^U)^2 \end{aligned} \right]} \quad (4.1)$$

Tablo 4.20. Paslanmaz çelik için bulanık risk göstergeleri arasındaki benzerlik.

| | K ₁₁ | K ₁₂ | K ₁₃ | K ₁₄ | K ₂₁ | K ₂₂ | K ₂₃ | K ₂₄ | K ₂₅ | K ₂₆ | K ₃₁ | K ₃₂ | K ₃₃ | K ₃₄ | K ₃₅ | K ₃₆ | K ₄₁ | K ₄₂ | K ₄₃ | K ₄₄ | K ₅₁ | K ₅₂ | K ₅₃ | K ₅₄ | K ₅₅ | K ₆₁ | K ₆₂ | K ₆₃ | K ₆₄ | K ₆₅ | K ₆₆ |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| K ₁₁ | - | ,028 | ,213 | ,178 | ,246 | ,101 | ,150 | ,167 | ,204 | ,068 | ,044 | ,005 | ,030 | ,241 | ,168 | ,138 | ,169 | ,092 | ,166 | ,006 | ,032 | ,117 | ,037 | ,123 | ,144 | ,039 | ,123 | ,045 | ,043 | ,281 | ,106 |
| K ₁₂ | | - | ,187 | ,154 | ,220 | ,074 | ,125 | ,142 | ,179 | ,094 | ,017 | ,029 | ,004 | ,216 | ,142 | ,111 | ,144 | ,066 | ,141 | ,032 | ,055 | ,143 | ,062 | ,099 | ,117 | ,011 | ,097 | ,018 | ,016 | ,255 | ,080 |
| K ₁₃ | | | - | ,043 | ,036 | ,114 | ,066 | ,050 | ,021 | ,281 | ,172 | ,215 | ,186 | ,036 | ,045 | ,076 | ,050 | ,121 | ,047 | ,217 | ,242 | ,330 | ,249 | ,092 | ,070 | ,177 | ,091 | ,175 | ,173 | ,069 | ,107 |
| K ₁₄ | | | | - | ,070 | ,084 | ,028 | ,013 | ,028 | ,246 | ,140 | ,181 | ,153 | ,064 | ,021 | ,052 | ,010 | ,090 | ,019 | ,183 | ,209 | ,295 | ,215 | ,055 | ,045 | ,145 | ,062 | ,144 | ,141 | ,104 | ,075 |
| K ₂₁ | | | | | - | ,148 | ,097 | ,080 | ,043 | ,314 | ,206 | ,249 | ,220 | ,012 | ,078 | ,111 | ,079 | ,155 | ,080 | ,250 | ,276 | ,363 | ,282 | ,124 | ,104 | ,211 | ,125 | ,209 | ,207 | ,035 | ,141 |
| K ₂₂ | | | | | | - | ,056 | ,072 | ,107 | ,168 | ,060 | ,103 | ,073 | ,144 | ,070 | ,038 | ,075 | ,009 | ,069 | ,105 | ,129 | ,217 | ,136 | ,036 | ,044 | ,063 | ,023 | ,061 | ,060 | ,182 | ,012 |
| K ₂₃ | | | | | | | - | ,017 | ,054 | ,218 | ,112 | ,153 | ,125 | ,092 | ,022 | ,028 | ,019 | ,062 | ,019 | ,154 | ,180 | ,267 | ,186 | ,027 | ,024 | ,116 | ,036 | ,116 | ,113 | ,131 | ,047 |
| K ₂₄ | | | | | | | | - | ,037 | ,235 | ,128 | ,170 | ,142 | ,075 | ,014 | ,040 | ,004 | ,078 | ,011 | ,171 | ,197 | ,284 | ,203 | ,044 | ,033 | ,133 | ,051 | ,132 | ,130 | ,114 | ,064 |
| K ₂₅ | | | | | | | | | - | ,272 | ,165 | ,207 | ,178 | ,039 | ,038 | ,071 | ,036 | ,114 | ,039 | ,208 | ,234 | ,321 | ,240 | ,081 | ,065 | ,169 | ,085 | ,168 | ,166 | ,077 | ,100 |
| K ₂₆ | | | | | | | | | | - | ,109 | ,065 | ,095 | ,309 | ,236 | ,205 | ,236 | ,160 | ,234 | ,063 | ,040 | ,049 | ,032 | ,191 | ,211 | ,105 | ,191 | ,108 | ,109 | ,349 | ,173 |
| K ₃₁ | | | | | | | | | | | - | ,046 | ,015 | ,203 | ,128 | ,096 | ,130 | ,053 | ,127 | ,047 | ,071 | ,158 | ,077 | ,086 | ,102 | ,011 | ,082 | ,016 | ,014 | ,241 | ,066 |
| K ₃₂ | | | | | | | | | | | | - | ,031 | ,244 | ,171 | ,140 | ,171 | ,095 | ,169 | ,005 | ,028 | ,115 | ,034 | ,126 | ,146 | ,041 | ,125 | ,045 | ,045 | ,283 | ,108 |
| K ₃₃ | | | | | | | | | | | | | - | ,216 | ,141 | ,110 | ,144 | ,065 | ,140 | ,033 | ,056 | ,144 | ,063 | ,099 | ,116 | ,010 | ,096 | ,016 | ,015 | ,254 | ,079 |
| K ₃₄ | | | | | | | | | | | | | | - | ,075 | ,108 | ,074 | ,151 | ,076 | ,246 | ,272 | ,359 | ,278 | ,119 | ,102 | ,207 | ,122 | ,205 | ,203 | ,041 | ,137 |
| K ₃₅ | | | | | | | | | | | | | | | - | ,034 | ,016 | ,077 | ,005 | ,172 | ,198 | ,285 | ,204 | ,048 | ,027 | ,132 | ,047 | ,131 | ,129 | ,113 | ,063 |
| K ₃₆ | | | | | | | | | | | | | | | | - | ,043 | ,046 | ,034 | ,142 | ,166 | ,254 | ,173 | ,030 | ,007 | ,101 | ,016 | ,099 | ,097 | ,145 | ,034 |

Tablo 4.20. (Devamı) Paslanmaz çelik için bulanık risk göstergeleri arasındaki benzerlik.

| | K ₁₁ | K ₁₂ | K ₁₃ | K ₁₄ | K ₂₁ | K ₂₂ | K ₂₃ | K ₂₄ | K ₂₅ | K ₂₆ | K ₃₁ | K ₃₂ | K ₃₃ | K ₃₄ | K ₃₅ | K ₃₆ | K ₄₁ | K ₄₂ | K ₄₃ | K ₄₄ | K ₅₁ | K ₅₂ | K ₅₃ | K ₅₄ | K ₅₅ | K ₆₁ | K ₆₂ | K ₆₃ | K ₆₄ | K ₆₅ | K ₆₆ |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| K ₄₁ | | | | | | | | | | | | | | | | | - | ,080 | ,013 | ,173 | ,199 | ,286 | ,205 | ,046 | ,036 | ,135 | ,053 | ,134 | ,132 | ,113 | ,065 |
| K ₄₂ | | | | | | | | | | | | | | | | | | - | ,076 | ,097 | ,121 | ,209 | ,128 | ,038 | ,052 | ,056 | ,031 | ,054 | ,052 | ,190 | ,015 |
| K ₄₃ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | - | ,171 | ,196 | ,283 | ,202 | ,045 | ,027 | ,131 | ,046 | ,130 | ,128 | ,115 | ,061 |
| K ₄₄ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | - | ,027 | ,113 | ,032 | ,128 | ,148 | ,043 | ,127 | ,048 | ,047 | ,285 | ,110 |
| K ₅₁ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | - | ,088 | ,009 | ,154 | ,172 | ,066 | ,152 | ,069 | ,070 | ,310 | ,135 |
| K ₅₂ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | - | ,081 | ,240 | ,260 | ,153 | ,240 | ,157 | ,157 | ,398 | ,223 |
| K ₅₃ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | - | ,160 | ,179 | ,073 | ,159 | ,077 | ,077 | ,317 | ,142 |
| K ₅₄ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | - | ,031 | ,090 | ,025 | ,090 | ,087 | ,158 | ,024 |
| K ₅₅ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | - | ,107 | ,022 | ,105 | ,104 | ,139 | ,039 |
| K ₆₁ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | - | ,086 | ,008 | ,006 | ,245 | ,070 |
| K ₆₂ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | - | ,084 | ,083 | ,159 | ,019 |
| K ₆₃ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | - | ,006 | ,244 | ,069 |
| K ₆₄ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | - | ,242 | ,067 |
| K ₆₅ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | - | ,176 |
| K ₆₆ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | - |

Tablo 4.21. Titanyum için bulanık risk göstergeleri arasındaki benzerlik.

| | K ₁₁ | K ₁₂ | K ₁₃ | K ₁₄ | K ₂₁ | K ₂₂ | K ₂₃ | K ₂₄ | K ₂₅ | K ₂₆ | K ₃₁ | K ₃₂ | K ₃₃ | K ₃₄ | K ₃₅ | K ₃₆ | K ₄₁ | K ₄₂ | K ₄₃ | K ₄₄ | K ₅₁ | K ₅₂ | K ₅₃ | K ₅₄ | K ₅₅ | K ₆₁ | K ₆₂ | K ₆₃ | K ₆₄ | K ₆₅ | K ₆₆ |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| K ₁₁ | - | ,074 | ,051 | ,179 | ,231 | ,138 | ,184 | ,169 | ,151 | ,071 | ,035 | ,015 | ,089 | ,106 | ,222 | ,119 | ,200 | ,051 | ,201 | ,135 | ,248 | ,049 | ,035 | ,122 | ,144 | ,160 | ,300 | ,160 | ,249 | ,150 | ,249 |
| K ₁₂ | | - | ,025 | ,107 | ,159 | ,067 | ,111 | ,097 | ,081 | ,010 | ,063 | ,064 | ,028 | ,041 | ,150 | ,053 | ,128 | ,041 | ,128 | ,068 | ,177 | ,028 | ,109 | ,049 | ,070 | ,087 | ,226 | ,090 | ,176 | ,078 | ,176 |
| K ₁₃ | | | - | ,128 | ,180 | ,087 | ,133 | ,118 | ,100 | ,020 | ,039 | ,040 | ,039 | ,056 | ,171 | ,069 | ,149 | ,020 | ,150 | ,085 | ,197 | ,018 | ,086 | ,071 | ,093 | ,110 | ,249 | ,109 | ,198 | ,098 | ,198 |
| K ₁₄ | | | | - | ,052 | ,042 | ,016 | ,013 | ,030 | ,108 | ,157 | ,166 | ,091 | ,074 | ,043 | ,062 | ,023 | ,132 | ,023 | ,046 | ,070 | ,135 | ,213 | ,059 | ,039 | ,039 | ,123 | ,021 | ,071 | ,030 | ,071 |
| K ₂₁ | | | | | - | ,093 | ,050 | ,062 | ,081 | ,160 | ,209 | ,218 | ,143 | ,126 | ,009 | ,114 | ,031 | ,184 | ,031 | ,097 | ,020 | ,186 | ,265 | ,110 | ,089 | ,080 | ,073 | ,072 | ,021 | ,081 | ,021 |
| K ₂₂ | | | | | | - | ,048 | ,031 | ,016 | ,068 | ,117 | ,126 | ,051 | ,034 | ,084 | ,027 | ,063 | ,092 | ,063 | ,018 | ,111 | ,094 | ,172 | ,021 | ,014 | ,037 | ,162 | ,026 | ,111 | ,013 | ,111 |
| K ₂₃ | | | | | | | - | ,021 | ,040 | ,113 | ,165 | ,172 | ,098 | ,082 | ,041 | ,071 | ,018 | ,139 | ,019 | ,056 | ,068 | ,138 | ,219 | ,062 | ,040 | ,031 | ,116 | ,034 | ,066 | ,036 | ,066 |
| K ₂₄ | | | | | | | | - | ,021 | ,099 | ,147 | ,157 | ,081 | ,064 | ,053 | ,054 | ,033 | ,123 | ,033 | ,038 | ,080 | ,125 | ,203 | ,050 | ,029 | ,034 | ,132 | ,016 | ,080 | ,020 | ,080 |
| K ₂₅ | | | | | | | | | - | ,081 | ,128 | ,138 | ,063 | ,045 | ,072 | ,035 | ,052 | ,104 | ,052 | ,019 | ,097 | ,109 | ,185 | ,037 | ,024 | ,041 | ,152 | ,011 | ,099 | ,012 | ,099 |
| K ₂₆ | | | | | | | | | | - | ,056 | ,059 | ,023 | ,038 | ,152 | ,051 | ,130 | ,032 | ,130 | ,067 | ,178 | ,029 | ,105 | ,052 | ,073 | ,091 | ,229 | ,090 | ,178 | ,079 | ,178 |
| K ₃₁ | | | | | | | | | | | - | ,023 | ,067 | ,083 | ,200 | ,096 | ,180 | ,026 | ,180 | ,112 | ,225 | ,049 | ,060 | ,105 | ,126 | ,145 | ,279 | ,137 | ,227 | ,129 | ,227 |
| K ₃₂ | | | | | | | | | | | | - | ,076 | ,093 | ,209 | ,106 | ,188 | ,037 | ,189 | ,122 | ,236 | ,042 | ,046 | ,111 | ,132 | ,150 | ,288 | ,147 | ,237 | ,137 | ,237 |
| K ₃₃ | | | | | | | | | | | | | - | ,018 | ,134 | ,030 | ,113 | ,042 | ,113 | ,046 | ,160 | ,051 | ,122 | ,040 | ,060 | ,080 | ,213 | ,071 | ,161 | ,062 | ,161 |
| K ₃₄ | | | | | | | | | | | | | | - | ,117 | ,017 | ,097 | ,059 | ,097 | ,031 | ,143 | ,067 | ,140 | ,029 | ,045 | ,067 | ,196 | ,055 | ,144 | ,046 | ,144 |
| K ₃₅ | | | | | | | | | | | | | | | - | ,105 | ,023 | ,175 | ,022 | ,088 | ,028 | ,178 | ,256 | ,102 | ,080 | ,072 | ,081 | ,063 | ,029 | ,072 | ,029 |
| K ₃₆ | | | | | | | | | | | | | | | | - | ,085 | ,070 | ,085 | ,017 | ,130 | ,079 | ,152 | ,028 | ,038 | ,060 | ,185 | ,042 | ,133 | ,036 | ,133 |

Tablo 4.21. (Devamı) Titanyum için bulanık risk göstergeleri arasındaki benzerlik.

| | K ₁₁ | K ₁₂ | K ₁₃ | K ₁₄ | K ₂₁ | K ₂₂ | K ₂₃ | K ₂₄ | K ₂₅ | K ₂₆ | K ₃₁ | K ₃₂ | K ₃₃ | K ₃₄ | K ₃₅ | K ₃₆ | K ₄₁ | K ₄₂ | K ₄₃ | K ₄₄ | K ₅₁ | K ₅₂ | K ₅₃ | K ₅₄ | K ₅₅ | K ₆₁ | K ₆₂ | K ₆₃ | K ₆₄ | K ₆₅ | K ₆₆ |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| K ₄₁ | | | | | | | | | | | | | | | | | - | ,155 | ,002 | ,069 | ,051 | ,155 | ,235 | ,079 | ,058 | ,049 | ,100 | ,044 | ,049 | ,051 | ,049 |
| K ₄₂ | | | | | | | | | | | | | | | | | | - | ,155 | ,087 | ,200 | ,036 | ,082 | ,080 | ,101 | ,120 | ,255 | ,112 | ,203 | ,104 | ,203 |
| K ₄₃ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | - | ,069 | ,050 | ,156 | ,235 | ,080 | ,058 | ,050 | ,100 | ,044 | ,048 | ,051 | ,048 |
| K ₄₄ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | - | ,114 | ,095 | ,168 | ,030 | ,030 | ,050 | ,169 | ,026 | ,117 | ,023 | ,117 |
| K ₅₁ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | - | ,205 | ,282 | ,129 | ,107 | ,099 | ,060 | ,089 | ,017 | ,099 | ,017 |
| K ₅₂ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | - | ,084 | ,076 | ,098 | ,113 | ,254 | ,118 | ,204 | ,105 | ,204 |
| K ₅₃ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | - | ,157 | ,178 | ,195 | ,334 | ,193 | ,283 | ,184 | ,283 |
| K ₅₄ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | - | ,022 | ,040 | ,178 | ,045 | ,128 | ,030 | ,128 |
| K ₅₅ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | - | ,023 | ,156 | ,029 | ,106 | ,013 | ,106 |
| K ₆₁ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | - | ,142 | ,041 | ,095 | ,030 | ,095 |
| K ₆₂ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | - | ,143 | ,053 | ,151 | ,053 |
| K ₆₃ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | - | ,091 | ,016 | ,091 |
| K ₆₄ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | - | ,099 | ,000 |
| K ₆₅ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | - | ,099 |
| K ₆₆ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | - |

Tablo 4.22. Kobalt-krom alaşımları için bulanık risk göstergeleri arasındaki benzerlik.

| | K ₁₁ | K ₁₂ | K ₁₃ | K ₁₄ | K ₂₁ | K ₂₂ | K ₂₃ | K ₂₄ | K ₂₅ | K ₂₆ | K ₃₁ | K ₃₂ | K ₃₃ | K ₃₄ | K ₃₅ | K ₃₆ | K ₄₁ | K ₄₂ | K ₄₃ | K ₄₄ | K ₅₁ | K ₅₂ | K ₅₃ | K ₅₄ | K ₅₅ | K ₆₁ | K ₆₂ | K ₆₃ | K ₆₄ | K ₆₅ | K ₆₆ |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| K ₁₁ | - | ,015 | ,027 | ,122 | ,215 | ,136 | ,145 | ,124 | ,134 | ,106 | ,056 | ,032 | ,055 | ,100 | ,129 | ,035 | ,128 | ,077 | ,177 | ,020 | ,085 | ,047 | ,034 | ,089 | ,116 | ,105 | ,107 | ,070 | ,067 | ,264 | ,044 |
| K ₁₂ | | - | ,034 | ,128 | ,221 | ,140 | ,152 | ,130 | ,140 | ,100 | ,060 | ,031 | ,059 | ,104 | ,134 | ,031 | ,134 | ,081 | ,184 | ,021 | ,088 | ,046 | ,022 | ,096 | ,121 | ,099 | ,112 | ,073 | ,070 | ,270 | ,051 |
| K ₁₃ | | | - | ,095 | ,189 | ,109 | ,119 | ,097 | ,107 | ,132 | ,031 | ,058 | ,030 | ,073 | ,102 | ,062 | ,101 | ,050 | ,151 | ,016 | ,058 | ,074 | ,056 | ,062 | ,089 | ,131 | ,080 | ,044 | ,041 | ,238 | ,017 |
| K ₁₄ | | | | - | ,094 | ,026 | ,024 | ,004 | ,013 | ,227 | ,069 | ,153 | ,071 | ,029 | ,014 | ,157 | ,006 | ,049 | ,056 | ,108 | ,046 | ,168 | ,150 | ,034 | ,009 | ,226 | ,024 | ,060 | ,061 | ,142 | ,078 |
| K ₂₁ | | | | | - | ,084 | ,070 | ,091 | ,082 | ,321 | ,162 | ,247 | ,163 | ,118 | ,088 | ,250 | ,087 | ,141 | ,039 | ,201 | ,135 | ,262 | ,242 | ,127 | ,100 | ,320 | ,111 | ,150 | ,152 | ,049 | ,172 |
| K ₂₂ | | | | | | - | ,025 | ,023 | ,019 | ,240 | ,081 | ,167 | ,082 | ,036 | ,012 | ,169 | ,024 | ,059 | ,051 | ,119 | ,052 | ,182 | ,160 | ,053 | ,025 | ,239 | ,028 | ,067 | ,069 | ,132 | ,092 |
| K ₂₃ | | | | | | | - | ,022 | ,012 | ,251 | ,093 | ,177 | ,094 | ,050 | ,021 | ,180 | ,017 | ,072 | ,032 | ,131 | ,067 | ,192 | ,173 | ,057 | ,030 | ,250 | ,043 | ,082 | ,083 | ,119 | ,102 |
| K ₂₄ | | | | | | | | - | ,010 | ,230 | ,071 | ,155 | ,073 | ,029 | ,011 | ,159 | ,005 | ,051 | ,054 | ,110 | ,046 | ,170 | ,151 | ,037 | ,009 | ,229 | ,024 | ,061 | ,062 | ,140 | ,080 |
| K ₂₅ | | | | | | | | | - | ,239 | ,081 | ,165 | ,082 | ,038 | ,011 | ,169 | ,007 | ,060 | ,044 | ,119 | ,055 | ,180 | ,161 | ,046 | ,019 | ,238 | ,032 | ,070 | ,071 | ,130 | ,090 |
| K ₂₆ | | | | | | | | | | - | ,160 | ,075 | ,158 | ,204 | ,234 | ,071 | ,234 | ,181 | ,283 | ,121 | ,188 | ,062 | ,080 | ,194 | ,221 | ,002 | ,211 | ,172 | ,170 | ,370 | ,149 |
| K ₃₁ | | | | | | | | | | | - | ,087 | ,005 | ,045 | ,075 | ,090 | ,076 | ,025 | ,125 | ,041 | ,032 | ,103 | ,082 | ,040 | ,062 | ,159 | ,053 | ,017 | ,017 | ,210 | ,017 |
| K ₃₂ | | | | | | | | | | | | - | ,086 | ,131 | ,160 | ,010 | ,159 | ,108 | ,208 | ,049 | ,116 | ,016 | ,026 | ,120 | ,147 | ,074 | ,139 | ,101 | ,098 | ,295 | ,075 |
| K ₃₃ | | | | | | | | | | | | | - | ,046 | ,076 | ,088 | ,077 | ,025 | ,126 | ,039 | ,032 | ,102 | ,080 | ,042 | ,064 | ,157 | ,054 | ,017 | ,016 | ,212 | ,017 |
| K ₃₄ | | | | | | | | | | | | | | - | ,030 | ,134 | ,034 | ,024 | ,082 | ,083 | ,017 | ,147 | ,125 | ,024 | ,021 | ,203 | ,008 | ,032 | ,034 | ,167 | ,057 |
| K ₃₅ | | | | | | | | | | | | | | | - | ,163 | ,013 | ,053 | ,052 | ,113 | ,047 | ,175 | ,155 | ,043 | ,014 | ,233 | ,023 | ,062 | ,064 | ,137 | ,085 |
| K ₃₆ | | | | | | | | | | | | | | | | - | ,163 | ,111 | ,212 | ,051 | ,118 | ,018 | ,018 | ,124 | ,150 | ,070 | ,141 | ,103 | ,100 | ,299 | ,079 |

Tablo 4.22. (Devamı) Kobalt-krom alaşımları için bulanık risk göstergeleri arasındaki benzerlik.

| | K ₁₁ | K ₁₂ | K ₁₃ | K ₁₄ | K ₂₁ | K ₂₂ | K ₂₃ | K ₂₄ | K ₂₅ | K ₂₆ | K ₃₁ | K ₃₂ | K ₃₃ | K ₃₄ | K ₃₅ | K ₃₆ | K ₄₁ | K ₄₂ | K ₄₃ | K ₄₄ | K ₅₁ | K ₅₂ | K ₅₃ | K ₅₄ | K ₅₅ | K ₆₁ | K ₆₂ | K ₆₃ | K ₆₄ | K ₆₅ | K ₆₆ |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| K ₄₁ | | | | | | | | | | | | | | | | | - | ,055 | ,050 | ,114 | ,051 | ,174 | ,156 | ,040 | ,014 | ,233 | ,029 | ,066 | ,066 | ,136 | ,084 |
| K ₄₂ | | | | | | | | | | | | | | | | | | - | ,104 | ,060 | ,009 | ,124 | ,102 | ,024 | ,042 | ,180 | ,031 | ,012 | ,011 | ,190 | ,035 |
| K ₄₃ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | - | ,163 | ,099 | ,223 | ,205 | ,089 | ,063 | ,282 | ,075 | ,114 | ,115 | ,087 | ,134 |
| K ₄₄ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | - | ,068 | ,065 | ,042 | ,076 | ,101 | ,120 | ,091 | ,052 | ,050 | ,250 | ,031 |
| K ₅₁ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | - | ,132 | ,108 | ,027 | ,037 | ,187 | ,024 | ,016 | ,018 | ,183 | ,044 |
| K ₅₂ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | - | ,036 | ,135 | ,162 | ,061 | ,154 | ,117 | ,114 | ,310 | ,090 |
| K ₅₃ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | - | ,118 | ,143 | ,079 | ,132 | ,093 | ,091 | ,291 | ,073 |
| K ₅₄ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | - | ,029 | ,193 | ,029 | ,035 | ,034 | ,176 | ,045 |
| K ₅₅ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | - | ,220 | ,016 | ,052 | ,053 | ,149 | ,072 |
| K ₆₁ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | - | ,211 | ,171 | ,169 | ,369 | ,148 |
| K ₆₂ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | - | ,040 | ,042 | ,159 | ,064 |
| K ₆₃ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | - | ,007 | ,199 | ,031 |
| K ₆₄ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | - | ,201 | ,027 |
| K ₆₅ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | - | ,220 |
| K ₆₆ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | - |

Tablo 4.23. Malzemelerin kriter bazındaki bulanık risk göstergeleri için benzerlik ölçüleri.

| Malzemeler | K ₁₁ | K ₁₂ | K ₁₃ | K ₁₄ | K ₂₁ | K ₂₂ | K ₂₃ | K ₂₄ | K ₂₅ | K ₂₆ | K ₃₁ |
|------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| PÇ - Tİ | ,036 | ,031 | ,197 | ,040 | ,052 | ,020 | ,000 | ,035 | ,090 | ,105 | ,053 |
| PÇ - KKA | ,017 | ,015 | ,170 | ,041 | ,014 | ,051 | ,013 | ,028 | ,054 | ,022 | ,030 |
| Tİ - KKA | ,051 | ,040 | ,027 | ,011 | ,038 | ,052 | ,013 | ,009 | ,037 | ,126 | ,084 |
| Malzemeler | K ₃₂ | K ₃₃ | K ₃₄ | K ₃₅ | K ₃₆ | K ₄₁ | K ₄₂ | K ₄₃ | K ₄₄ | K ₅₁ | K ₅₂ |
| PÇ - Tİ | ,021 | ,027 | ,173 | ,020 | ,055 | ,012 | ,080 | ,000 | ,104 | ,242 | ,133 |
| PÇ - KKA | ,016 | ,043 | ,129 | ,024 | ,156 | ,025 | ,000 | ,029 | ,037 | ,128 | ,089 |
| Tİ - KKA | ,010 | ,017 | ,046 | ,042 | ,101 | ,022 | ,080 | ,029 | ,067 | ,114 | ,044 |
| Malzemeler | K ₅₃ | K ₅₄ | K ₅₅ | K ₆₁ | K ₆₂ | K ₆₃ | K ₆₄ | K ₆₅ | K ₆₆ | | |
| PÇ - Tİ | ,034 | ,035 | ,042 | ,099 | ,145 | ,086 | ,175 | ,166 | ,109 | | |
| PÇ - KKA | ,029 | ,018 | ,016 | ,125 | ,000 | ,045 | ,041 | ,000 | ,046 | | |
| Tİ - KKA | ,063 | ,018 | ,027 | ,216 | ,145 | ,041 | ,134 | ,166 | ,154 | | |

PÇ: Paslanmaz çelik, Tİ: Titanyum, KKA: Kobalt-krom alaşımları

Verteks uzaklığına dayalı benzerlik ölçüsü, risk göstergeleri arasındaki benzerliğin nicel olarak belirlenmesini sağlamıştır. Bu benzerlik ölçüsü, malzemelerin kendi özellikleri ile iki malzemenin aynı özellikleri arasındaki risk farkını ölçer. Diğer bir deyişle, malzemelerin ve özelliklerinin risk durumlarının birbirine ne kadar yakın veya uzak olduğu belirlenmektedir. Uzaklık skoru 0'a yaklaştıkça, risk benzerliği artmaktadır.

Öncelikle, paslanmaz çelik, titanyum ve kobalt-krom alaşımlarının kendi özellikleri için risk öncelik göstergeleri arasındaki benzerlik skorları incelenmiştir. Minimum ve maksimum benzerlik skorları paslanmaz çelik için sırasıyla uzun ömürlülük - çekme mukavemeti ve korozyon direnci - kireçlenme ikilileri; titanyum için sırasıyla toksiklik - kanserojenlik ve reaktivite - alerjenik etki ikilileri; kobalt-krom alaşımları için ise sırasıyla uyumluluk - kemik bütünleşmesi ve uyumluluk - kireçlenme ikilileri için elde edilmiştir. Aynı şekilde, verteks uzaklığına göre diğer malzeme özellikleri de karşılaştırılabilir. Örneğin, titanyum için aşınma direnci-yorulma direnci ikilileri arasındaki benzerlik skoru 0,023 iken, aşınma direnci-alerjenik etki ikilileri arasındaki benzerlik skoru 0,279 olmuştur. Bu sonuç, titanyumun aşınma direnci özelliğinin yorulma direnci özelliği ile yakın ölçüde risk ihtiva ettiğini, alerjenik etki ile risk durumlarının daha farklılaştığını göstermektedir. Verteks uzaklık sonuçları,

malzeme özelliklerinin riskleri arasındaki farklılıkların ve benzerliklerin net bir şekilde belirlenmesine yardımcı olmaktadır.

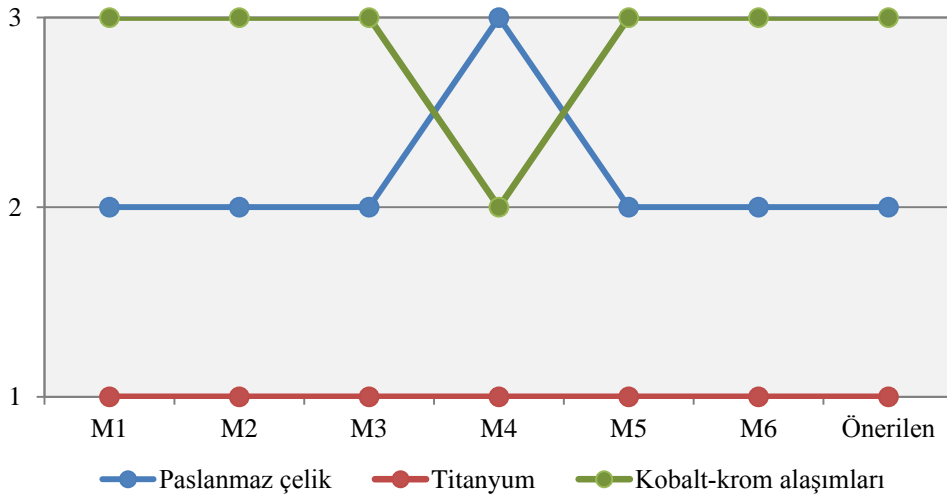
Paslanmaz çelik, titanyum ve kobalt-krom alaşımlarının özelliklerinin birbirleriyle mukayesesi için risk öncelik göstergeleri arasındaki benzerlik skorları da incelenmiştir. Tablo 4.23'e göre paslanmaz çelik ve titanyum işlenebilirlik ile iletkenlik kriterlerinde yakınlık, iyon salınımı kriterinde uzaklık göstermektedir. Paslanmaz çelik ve kobalt-krom alaşımları ise boyutsal kararlılık, alerjenik etki ve kireçlenme kriterlerinde yakınlık, maliyet kriterinde uzaklık göstermektedir. Son olarak, titanyum ve kobalt-krom alaşımları sterilize edilebilirlik kriterinde yakınlık, kemik bütünleşmesi kriterinde uzaklık göstermektedir. Daha öncede belirtildiği üzere, uzaklık skorunun 0'a yaklaşması risk benzerliğini artırmaktadır. Dolayısıyla, birbirine yakınlık gösteren özelliklerin oldukça benzer riske haiz olduğu sonucuna varılır. Uzaklık sonuçları, malzemelerin hangi özellikleri arasında benzerlik veya farklılık olduğunu belirleyerek, malzemelerin karşılaştırılması ve tercih edilmesi açısından önemli bir rol oynamaktadır.

4.4. Karşılaştırma ve Duyarlılık Analizi

Karar verme uygulamalarında genellikle önerilen yaklaşımların sağlamlığını incelemek için çeşitli ilave işlemler gerçekleştirilmektedir. Karşılaştırmalı analizler ve duyarlılık analizleri elde edilen sonuçların doğrulanması ve çıktılardaki değişimlerin gözlemlenmesi için sıkça kullanılmaktadır. Bu bölümde, önerilen yaklaşımın sonuçları karşılaştırma ve duyarlılık analizine dayalı olarak incelenmektedir.

Öncelikle, önerilen yaklaşımın kullanılmasıyla bulunan malzeme sıralamasının güvenilirliğini belirlemek için karşılaştırmalı analizler yapılmıştır. Aralıklı tip-2 bulanık ÇKKV yöntemleri kendilerine has özellikler, diğer bir ifadeyle farklı adımlar ve ilkeler içermektedir. Bu bağlamda, çalışmadaki sıralama sonuçlarını mukayese etmek için etkinliği kanıtlanmış diğer aralıklı tip-2 bulanık ÇKKV yöntemlerinden TOPSİS (M_1) [116] ve WASPAS (M_2) [117] kullanılmıştır. Aralıklı tip-2 bulanık AHP yöntemi aracılığıyla belirlenen aynı kriter ağırlık seti kullanılmış ve aralıklı tip-2 bulanık EDAS yönteminin çıktılarını incelemek için aralıklı tip-2 bulanık TOPSİS ve aralıklı tip-2 bulanık WASPAS yöntemleri ile malzemeler değerlendirilmiştir. Ayrıca, sıradan bulanık AHP-HTEA-EDAS (M_3) yaklaşımı da karşılaştırmalara dâhil

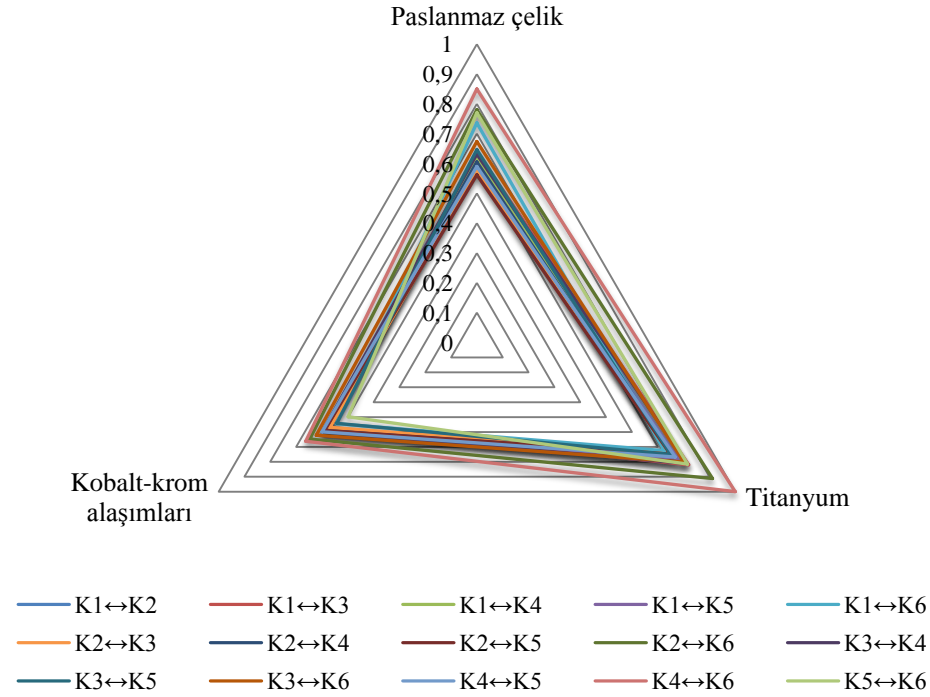
edilmiştir. Bu doğrulama analizi ile farklı bulanık küme yaklaşımının sonuçları nasıl etkilediği araştırılmıştır. Bu kapsamda, AHP, HTEA ve EDAS yöntemleri sıradan bulanık ortam altında bütünleştirilerek karar problemi tekrar çözülmüştür. Öte yandan, alfa kesim temelli bir HTEA (M₄) [118], bütünleşik FUCOM-MARCOS (M₅) [119-120] ve hedef programlama (M₆) kullanılarak bir HTEA varyantının, farklı entegre bir karar verme metodolojisinin ve matematiksel programlamanın sonuçlar üzerindeki etkileri incelenmiştir. Karşılaştırmalı analiz sonuçları, Şekil 4.7’de sunulmuştur.



Şekil 4.7. Karşılaştırmalı analiz sonuçları.

Karşılaştırma sonuçlarına göre, önerilen yaklaşımla elde edilen malzeme sıralaması diğer yöntemlerin sağladığı sıralama düzeni ile oldukça benzerdir. Sonuçlardaki küçük farklılık, teori varsayımlarına ve kriter ağırlıklarının ihmal edilmesine atfedilebilir. Çalışmadaki aralıklı tip-2 bulanık HTEA yöntemi; bulanık ÇKKV tekniği ile güçlendirildiği, tüm karar elemanlarının ağırlığını dâhil ettiği, risk karar matrisi oluşturduğu ve alternatiflerin sıralanmasına yönelik yapılandırıldığı için üstün niteliktedir.

Duyarlılık analizi, elde edilen sonuçların güvenilirliğini ve önerilen karar verme yaklaşımlarının kullanılabilirliğini ve uygulanabilirliğini gözlemleme gayesiyle sıklıkla gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada, öncelikle, mevcut ana kriterlerin ağırlıkları sırasıyla birbiriyle değiştirilmiştir. Diğer bir ifadeyle, iki ana kriterin ağırlığı diğer ana kriterlerin ağırlıkları sabit tutularak ikili değiştirilmiştir. Bu prosedürün tüm ana kriterler üzerine uygulanmasının ardından, elde edilen sonuçlardaki farklılıklar incelenmiştir. Şekil 4.8, ilgili sonuçları grafiksel olarak göstermektedir.



Şekil 4.8. Kriter ağırlıklarındaki değişime göre malzemelerin sıralaması.

Ana kriterler bazında gerçekleştirilen duyarlılık analizine ek olarak risk faktörleri kapsamında da bir duyarlılık analizi yapılmıştır. Risk faktörlerinin önemi sırasıyla 0'dan 1'e kadar değiştirilerek malzeme sıralaması incelenmiştir. Diğer bir ifadeyle, herhangi bir risk faktörünün önemine 0 ve 1 arasında sayı atandığında diğer iki risk faktörünün önemi ağırlıklar toplamı 1 olacak şekilde yeniden hesaplanmıştır. Belirli bir yüzde değişimi (k) altında bir risk faktörünün yeni ağırlığı (w_i) denklem 4.2 ile açıklanabilir. Bu denklemde, w_{i0} incelenen faktörün başlangıçtaki ağırlık değerini belirtmektedir [121].

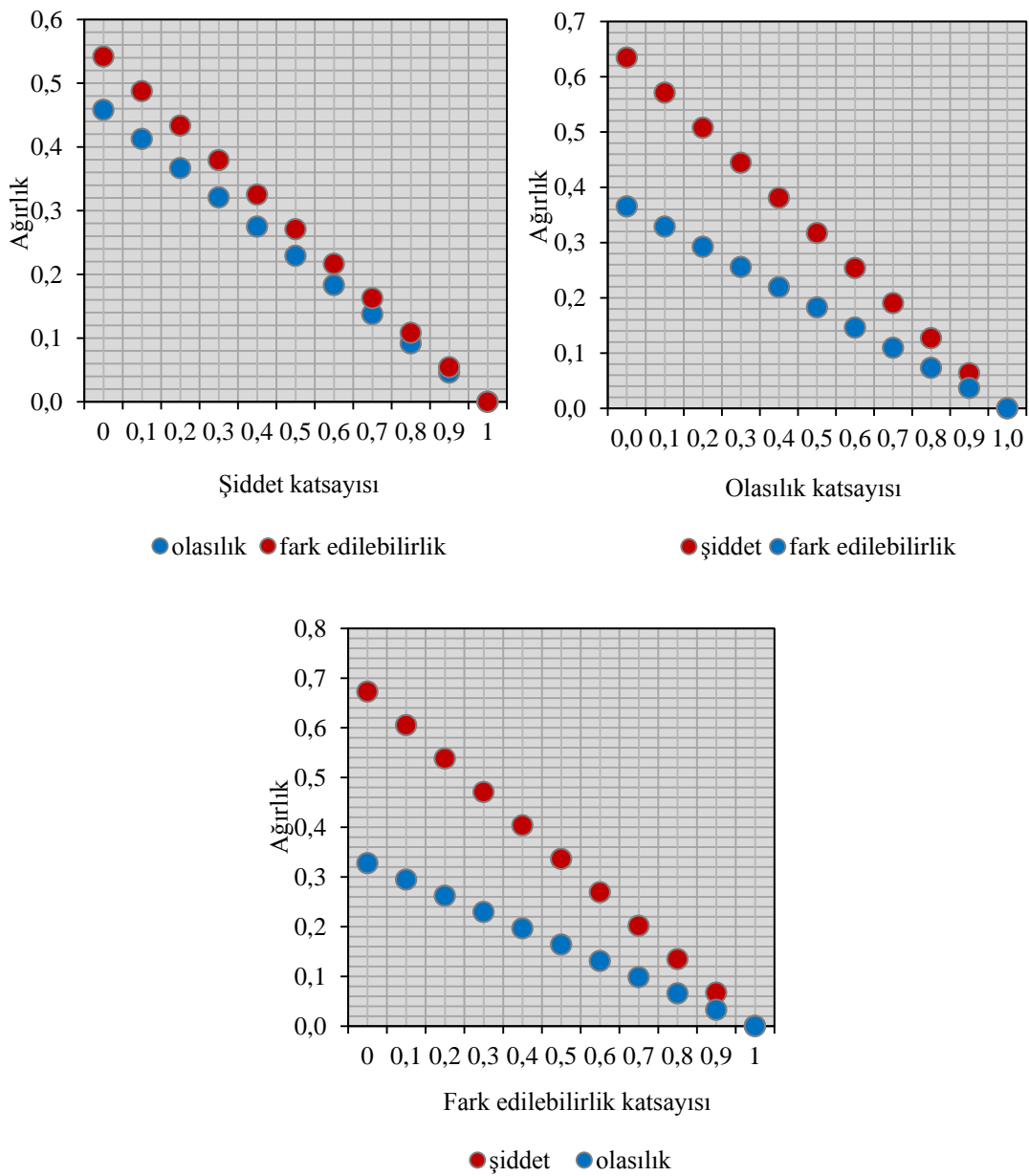
$$w_i = w_{i0} \mp w_{i0} \times k \quad (4.2)$$

Diğer risk faktörlerinin yeni ağırlıkları (w_j) türetilen w_i 'ye ve ayrıca kendi başlangıç ağırlık değerine (w_{j0}) dayalı olarak hesaplanır. Bu ağırlık hesaplama süreci aşağıdaki eşitliğe göre gerçekleştirilir [121].

$$w_j = (1 - w_i) \times \frac{w_{j0}}{(1 - w_{i0})} \quad (4.3)$$

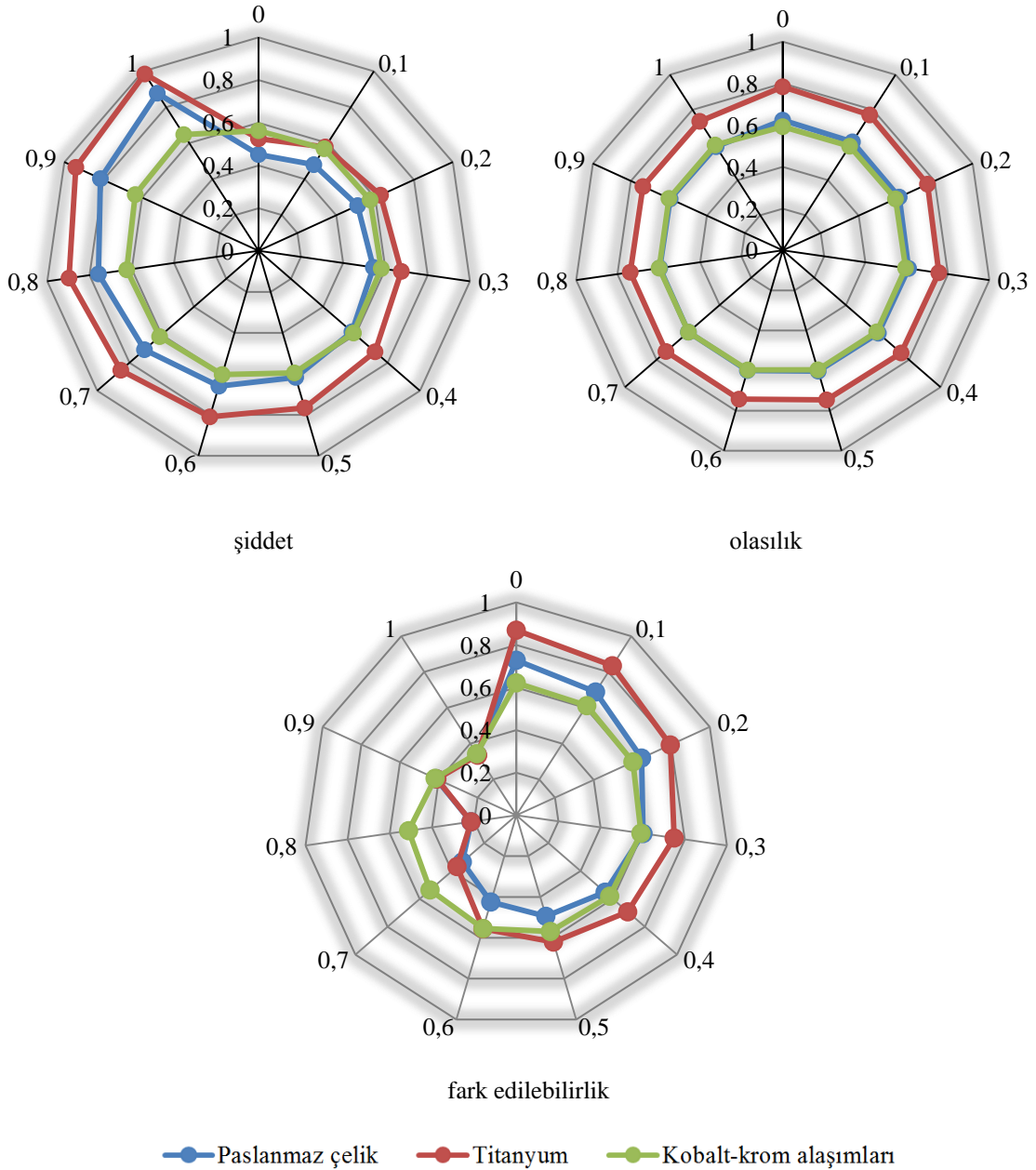
Duyarlılık analizi simülasyonu, her bir risk faktörünün ağırlığına %0 ve %100 arasında aralarında %10 fark bulunan önem derecelerinin sırasıyla atanması yoluyla

gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla, şiddet, olasılık ve fark edilebilirlik faktörlerinin her biri için 11 farklı durum, toplamda ise 33 farklı durum incelemeye tabi tutulmuştur. Örneğin, şiddet faktörünün ağırlık değeri 0,5 olarak değiştirilirse, ardından olasılık faktörünün ağırlık değeri tüm risk faktörlerinin ağırlıklarının toplamının 1'i geçmemesi kısıtlaması altında şu hesaplama ile elde edilir: $(0,236/(1-0,485)) \times (1-0,5) = 0,229$. Şekil 4.9, ağırlığı farklılaştırılan risk faktörüne göre diğer iki risk faktörünün ağırlıklarının değişimini göstermektedir. Risk faktörleri için oluşturulan farklı senaryolar ile yeni faktör ağırlıkları hesaplanmış ve bunlar aralıklı tip-2 bulanık HTEA yöntemine yeniden girdi olarak aktarılmıştır.



Şekil 4.9. Duyarlılık analizi simülasyonu için risk faktörlerinin farklılaştırılmış ağırlıkları.

Risk faktörleri için elde edilen yeni ağırlıklar ile hesaplanan aralıklı tip-2 bulanık risk öncelik katsayıları kullanılarak risk karar matrisi oluşturulmuştur. Ardından, bu matris üzerine aralıklı tip-2 bulanık EDAS yönteminin hesaplama prosedürü uygulanmıştır. Risk faktörlerinin farklılaştırılan ağırlıklarının önerilen yaklaşıma girdi olarak sunulması sonucunda elde edilen malzeme sıralamaları Şekil 4.10'da sunulmuştur.



Şekil 4.10. Risk faktörlerinin ağırlıklarındaki değişime göre malzemelerin sıralaması.

Duyarlılık analizi sonuçları incelendiğinde, mevcut kriterlerin ve risk faktörlerinin ağırlıklarında meydana gelen değişimlerin elde edilen sonuçları büyük ölçüde farklılaştırmadığı gözlemlenmiştir. Fark edilebilirlik faktörünün ağırlık değerinin

yükselmesi kobalt-krom alaşımlarının bir adım öne çıkmasına neden olmuştur. Bu sonuç, ilgili malzemenin bazı özelliklerine bağlı olarak kaynaklanabilecek olumsuz durumların fark edilebilirliğine uzmanlar tarafından çok yüksek performans skorları atandığının göstergesidir. Genel olarak, alternatif sıralama metodolojileri ve kriter/faktör ağırlık değerleri değiştirilmiş olsa da, malzemelerin sıralama düzeninde önemli bir benzeşmezlik görülmemiştir. Sonuç olarak, önerilen aralıklı tip-2 bulanık AHP-HTEA-EDAS yaklaşımının ve ek analizlerin çıktıları oldukça yakındır. Önerilen yaklaşım, farklı alternatiflerin değerlendirilmesi ve seçimi sürecinde etkili ve bilinçli kararlar almaya yardımcı olabilecek niteliktedir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Medikal malzemeler, sağlık sorunlarına çözümler sağlamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Günümüzde, hastalık veya kaza nedeniyle zarar görmüş dokuların değiştirilmesi ve iyileştirilmesi için modern klinik işlemler önem kazanmıştır. Buna paralel artan tıbbi talepler, çeşitli biyoalternatiflerin geliştirilmesine neden olmuştur. Hasarlı, hastalıklı veya yaşlanmış dokuların aktivitelerini gerçekleştirebilen biyoalternatiflere olan ihtiyaç, araştırmacıların biyomalzeme geliştirmeye ve incelemeye olan ilgisini artırmıştır. Biyomalzemeler, her gün binlerce insanın yaşam kalitesini ve ömrünü iyileştirmektedir. Metal esaslı biyomalzemeler, özellikle mekanik performansları nedeniyle ortopedik cerrahide yaygın hale gelmiştir. Medikal implantların uygulamalardaki kullanımının sıklaşması biyomalzemeler üzerindeki çabaların hızlandırılmasını gerektirmiştir. İdeal bir biyomalzeme yüksek bir biyouyumluluk sergilemeli ve yüksek mukavemet ve iyi aşınma direnci gibi önemli birçok özelliğe sahip olmalıdır. Lakin her gereksinimi yerine getirebilen bir biyomalzemenin bulunması güçtür. Biyomalzeme seçiminde hangi kriterlerle nasıl bir inceleme yapılacağı konusunda bir belirsizlik hâkim olduğundan ihtiyaçlara yönelik kapsamlı bir seçim henüz gerçekleştirilememiştir. Bu çalışma, biyomalzemelerin incelenmesi için geniş bir çerçeve ve risk temelli bir karar verme yaklaşımı sunmaktadır.

Çalışmada, metalik biyomalzemeler sınıfı altında yer alan paslanmaz çelik, titanyum ve kobalt-krom alaşımları geliştirilen aralıklı tip-2 bulanık AHP-HTEA-EDAS yaklaşımı aracılığıyla değerlendirilmektedir. Aralıklı tip-2 bulanık AHP yöntemiyle HTEA risk faktörlerinin ve biyomalzeme değerlendirme kriterlerinin önemi tayin edilmekte, aralıklı tip-2 bulanık HTEA yöntemiyle malzemeler için risk öncelik katsayıları elde edilip bir risk karar matrisi oluşturulmakta ve aralıklı tip-2 bulanık EDAS yöntemiyle malzemelerin sıralaması belirlenmektedir. Bütünleşik yaklaşımın sağladığı çıktılar, karşılaştırma ve duyarlılık analizleri ile desteklenmektedir.

Aralıklı tip-2 bulanık AHP yönteminin çıktıklarına göre risk faktörlerinin azalan düzende sıralaması şiddet, fark edilebilirlik, olasılık şeklindedir. Kriterler için elde

edilen önem ağırlıklarına göre biyolojik özellikler ana kriteri en öncelikli gruptur. Ayrıca, ekonomik özellikler grubu içerisinde maliyet, tasarım-üretim özellikleri grubu içerisinde uyumluluk, mekanik özellikler grubu içerisinde çekme mukavemeti, fiziksel özellikler grubu içerisinde boyutsal kararlılık, kimyasal özellikler grubu içerisinde korozyon direnci, biyolojik özellikler grubu içerisinde ise enfeksiyon öncelikli alt kriterlerdir. Enfeksiyon, kanserojenlik ve çekme mukavemeti, en yüksek global ağırlıklara sahiptir. Dolayısıyla, biyomalzeme değerlendirme ve seçme sürecinde bu alt kriterlere daha fazla önem verilmelidir. Aralıklı tip-2 bulanık HTEA'nın çıktılarını kullanan aralıklı tip-2 bulanık EDAS'ın sonuçlarına göre malzemelerin sıralaması titanyum, paslanmaz çelik, kobalt-krom alaşımları şeklindedir. Bu sonuca dayanarak, en iyi malzeme seçeneğinin titanyum olduğu söylenebilir. Yapılan ek analizler, sonuçların güvenilirliğini ve kabul edilebilirliğini desteklemiştir.

Bu çalışma, gerçekleştirilen önceki çalışmalardan önemli ölçüde farklılıklar göstermektedir. Çalışmanın orijinalliği ve mevcut literatüre katkıları aşağıdaki gibi listelenebilir:

- Biyomalzemelerin çok kriterli incelenmesi problemi ilk kez risk açısından ele alınmıştır.
- Metal esaslı biyomalzemelerin değerlendirilmesinde ve seçiminde önemli olan kriterler ortaya çıkarılmış, farklı gruplar altında sınıflandırılmış ve her birinin önemini temsil eden katsayılar literatüre sunulmuştur. Geçmişteki çalışmalardan farklı olarak, karar problemi için ekonomik, tasarım ve üretim, mekanik, fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerden oluşan geniş bir yapı inşa edilmiştir. Biyomalzeme seçimi ile ilgili literatüre kazandırılan farklı değerlendirme kriterleri şunlardır: araştırma, geliştirme ve uygulamalar için yatırım eğilimi, uzun ömürlülük, bulunabilirlik, üretim kolaylığı, hafiflik, işlenebilirlik, sterilize edilebilirlik, şekillendirilebilirlik, boyutsal kararlılık, iletkenlik, manyetik hassasiyet, iyon salınımı, reaktivite, biyobozunma, vücut PH'ına etki, alerjenik etki, enfeksiyon, toksiklik, kireçlenme ve kanserojenlik. Kriterlerin bir araya getirilerek biyomalzeme seçimi ve değerlendirmesi yapılması, malzemenin performansını, biyolojik uyumluluğunu ve kullanılabilirliğini en iyi şekilde sağlamak için daha kapsamlı, bilimsel ve çok boyutlu yaklaşımı temsil eder.

- Aralıklı tip-2 bulanık ortam altında AHP, HTEA ve EDAS yöntemlerini bütünleştiren bir karar verme yaklaşımı önerilmiştir.
- Aralıklı tip-2 bulanık HTEA'nın hassasiyeti aralıklı tip-2 bulanık AHP, aralıklı tip-2 bulanık EDAS ve bir risk öncelik katsayısı hesaplama formülü ile artırılmıştır.
- Aralıklı tip-2 HTEA uygulamasında bir verteks uzaklığına dayalı benzerlik ölçüsünün kullanımı sunulmuştur.
- HTEA yöntemi, biyomalzemelerin incelenmesi için ilk kez bir karar verme çerçevesine entegre edilmiştir.
- Biyomalzemelerin değerlendirilmesi ve seçilmesi için ilk kez risk öncelik katsayıları hesaplanmıştır. Bu açıdan, biyomalzeme seçimi ile ilgili literatürdeki çalışmalarda dikkate alınmayan birçok kriter altında mevcut malzeme seçeneklerinin güçlü ve zayıf yönleri araştırılmıştır.
- Malzeme özelliklerini daha iyi kavrayıp analiz edebilecek ve farklı araştırma konularına adapte edilebilecek sağlam bir risk temelli karar verme yaklaşımı sunulmuştur.
- İlgili yaklaşım, risk yönetimi karar verme sürecine yönelik değerli ve etkili bilgiler sunmaktadır.
- Mevcut malzemelerin tarafsız bir şekilde değerlendirilebilmesi ve önceliklendirilebilmesi için bir temel oluşturulmuştur.

Aralıklı tip-2 bulanık AHP-HTEA-EDAS yaklaşımının avantajları dört başlık altında özetlenebilir:

- Riski dikkate alan bir metodoloji
- Belirsizlik ortamında etkili karar verme imkânı
- Sıralama amacına yönelik yapılandırılmış farklı bir çerçeve
- Risk karar matrisine göre mukayese

Sonuç olarak, bu çalışma risklerin/hataların sistematik olarak değerlendirilmesi ve farklı seçeneklerin çok boyutlu incelenmesi için bir yol haritası sağlamaktadır. İleriki araştırma çalışmalarında; malzeme seçeneklerinin sayısı artırılabilir, sonuçların mukayesesi için deneysel değerler dikkate alınabilir, tasarlanan karar hiyerarşisi

diğer biyomalzeme türleri için adapte edilip malzeme seçenekleri değerlendirilebilir, farklı bulanık ÇKKV yöntemleri veyahut sezgisel yaklaşımlar probleme dâhil edilebilir ve önerilen aralıklı tip-2 bulanık AHP-HTEA-EDAS yaklaşımı biyomalzeme alanı dışındaki farklı bir konu üzerine uygulanabilir. Çalışma, üreticiler, uygulayıcılar ve araştırmacılar için faydalı bir rehber ve karar destek modeli sunmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Raghavendra, G. M., Varaprasad, K., & Jayaramudu, T. (2015). Biomaterials: design, development and biomedical applications. In S. Thomas, Y. Grohens & N. Ninan (Eds.), *Nanotechnology applications for tissue engineering* (pp. 21–44). William Andrew Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-32889-0.00002-9>
- [2] Kumar, S., Nehra, M., Kedia, D., Dilbaghi, N., Tankeshwar, K., & Kim, K. H. (2020). Nanotechnology-based biomaterials for orthopaedic applications: recent advances and future prospects. *Materials Science and Engineering: C*, 106, 1–25. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.110154>
- [3] Jayabalan, M. (1993). Biological interactions: causes for risks and failures of biomaterials and devices. *Journal of Biomaterials Applications*, 8(1), 64–71. <https://doi.org/10.1177/088532829300800104>
- [4] Manivasagam, G., Dhinasekaran, D., & Rajamanickam, A. (2010). Biomedical implants: corrosion and its prevention—a review. *Recent Patents on Corrosion Science*, 2(1), 40–54. <https://doi.org/10.2174/1877610801002010040>
- [5] Hafezalkotob, A., & Hafezalkotob, A. (2017). Risk-based material selection process supported on information theory: a case study on industrial gas turbine. *Applied Soft Computing*, 52, 1116–1129. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.09.018>
- [6] Liu, H. C., Liu, L., & Liu, N. (2013). Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: a literature review. *Expert Systems with Applications*, 40(2), 828–838. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.08.010>
- [7] Bahraminasab, M., & Jahan, A. (2011). Material selection for femoral component of total knee replacement using comprehensive VIKOR. *Materials and Design*, 32(8–9), 4471–4477. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.03.046>
- [8] Jahan, A. (2012). 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. <https://doi.org/10.1504/IJMSI.2012.049957>
- [9] Jahan, A., Mustapha, F., Ismail, M. Y., Sapuan, S. M., & Bahraminasab, M. (2011). A comprehensive VIKOR method for material selection. *Materials and Design*, 32(3), 1215–1221. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.10.015>
- [10] Jahan, A., & Edwards, K. L. (2013). Weighting of dependent and target-based criteria for optimal decision-making in materials selection process: biomedical applications. *Materials and Design*, 49, 1000–1008. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.02.064>

- [11] Petković, D., Madić, M., Radenković, G., Manić, M., & Trajanović, M. (2015, March, 8–11). Decision support system for selection of the most suitable biomedical material [Oral presentation]. 5th International Conference on Information Society and Technology, Serbia.
- [12] Hafezalkotob, A., & Hafezalkotob, A. (2015). Comprehensive MULTIMOORA method with target-based attributes and integrated significant coefficients for materials selection in biomedical applications. *Materials and Design*, 87, 949–959. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.08.087>
- [13] Hafezalkotob, A., & Hafezalkotob, A. (2017). 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. <https://doi.org/10.1007/s40092-016-0176-4>
- [14] Chowdary, Y., Ram, V. S., Nikhil, E. V. S., Krishna, P. N. S. V., & Nagaraju, D. (2016). 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.
- [15] Kabir, G., & Lizu, A. (2016). Material selection for femoral component of total knee replacement integrating fuzzy AHP with PROMETHEE. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 30(6), 3481–3493. <https://doi.org/10.3233/IFS-162094>
- [16] Messellek, A. C., Ould-Ouali, M., Benabid, Y., Amrouche, A., & Beloulla, A. (2017). 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. <https://doi.org/10.1080/10255842.2017.1382897>
- [17] Aherwar, A., Singh, A., Patnaik, A., & Unune, D. (2018). Selection of molybdenum-filled hip implant material using grey relational analysis method. In P. Vasant, S. Z. Alparslan-Gok & G. Weber (Eds.), *Handbook of research on emergent applications of optimization algorithms* (pp. 675–692). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-2990-3.ch029>
- [18] Aherwar, A., Singh, T., Singh, A., Patnaik, A., & Fekete, G. (2019). Optimum selection of novel developed implant material using hybrid entropy-PROMETHEE approach. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 50(10), 1232–1241. <https://doi.org/10.1002/mawe.201800088>
- [19] Das, S. S., Chakraborti, P., Bhowmik, C., & Singh, R. (2019). Decision-making for selection of most suitable materials for biomedical applications. In M. Kumar, R. Pandey & V. Kumar (Eds.), *Advances in interdisciplinary engineering: select proceedings of FLAME 2018* (pp. 901–917). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-13-6577-5_87
- [20] Pamucar, D., Chatterjee, P., Yazdani, M., & Chakraborty, S. (2019). A rough decision-making model for biomaterial selection. In P. Bains, S. Sidhu, M. Bahraminasab & C. Prakash (Eds.), *Biomaterials in orthopaedics and bone regeneration* (pp. 227–256). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-13-9977-0_15

- [21] Chatterjee, P., Panchal, D., & Chakraborty, S. (2020). A developed meta-model for biomaterials selection. *Trends in Biomaterials and Artificial Organs*, 34(1), 20–32.
- [22] Sofuoğlu, M. A. (2021). A new biomaterial selection approach using reference ideal method. *Sādhanā*, 46(1), 1–8. <https://doi.org/10.1007/s12046-021-01559-7>
- [23] Das, S. S., Chakraborti, P., & Sarangi, P. K. (2021). Fabrication and selection of suitable biomaterials for acetabular liner of hip implants by using TOPSIS method. *Materials Today: Proceedings*, 47(5), 1167–1172. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.403>
- [24] Kumar, R., Dubey, R., Singh, S., Singh, S., Prakash, C., Nirsanametla, Y., Królczyk, G., & Chudy, R. (2021). Multiple-criteria decision-making and sensitivity analysis for selection of materials for knee implant femoral component. *Materials*, 14(8), 1–21. <https://doi.org/10.3390/ma14082084>
- [25] Bozdag, E., Asan, U., Soyer, A., & Serdarasan, S. (2015). Risk prioritization in failure mode and effects analysis using interval type-2 fuzzy sets. *Expert Systems with Applications*, 42(8), 4000–4015. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.01.015>
- [26] Akyuz, E., & Celik, E. (2018). A quantitative risk analysis by using interval type-2 fuzzy FMEA approach: the case of oil spill. *Maritime Policy & Management*, 45(8), 979–994. <https://doi.org/10.1080/03088839.2018.1520401>
- [27] Đurić, G., Mitrović, Č., Komatina, N., Tadić, D., & Vorotović, G. (2019). The hybrid MCDM model with the interval type-2 fuzzy sets for the software failure analysis. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 37(6), 7747–7759. <https://doi.org/10.3233/JIFS-182541>
- [28] Li, X. Y., Xiong, Y., Duan, C. Y., & Liu, H. C. (2019). Failure mode and effect analysis using interval type-2 fuzzy sets and fuzzy Petri nets. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 37(1), 693–709. <https://doi.org/10.3233/JIFS-181133>
- [29] Wang, W., Liu, X., & Qin, J. (2019). Risk prioritization for failure modes with extended MULTIMOORA method under interval type-2 fuzzy environment. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 36(2), 1417–1429. <https://doi.org/10.3233/JIFS-181007>
- [30] Ma, H., Chu, X., Wang, W., Liu, X., & Xue, D. (2019). A directed failure causality network (DFCN) based method for function components risk prioritization under interval type-2 fuzzy environment. *Advanced Engineering Informatics*, 41, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2019.100920>
- [31] Bera, A. K., & Jana, D. K. (2019). A multiple-criteria decision analysis for criticality of boiler tube failures in interval type-2 fuzzy environment. *International Journal of Operational Research*, 36(2), 209–231. <https://doi.org/10.1504/IJOR.2019.10024198>

- [32] Qin, J., Xi, Y., & Pedrycz, W. (2020). Failure mode and effects analysis (FMEA) for risk assessment based on interval type-2 fuzzy evidential reasoning method. *Applied Soft Computing*, 89, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106134>
- [33] Zheng, Q., Liu, X., & Wang, W. (2021). An extended interval type-2 fuzzy ORESTE method for risk analysis in FMEA. *International Journal of Fuzzy Systems*, 23(5), 1379–1395. <https://doi.org/10.1007/s40815-020-01034-1>
- [34] Boral, S., Chaturvedi, S. K., Howard, I., Naikan, V. N. A., & McKee, K. (2021). An integrated interval type-2 fuzzy sets and multiplicative half quadratic programming-based MCDM framework for calculating aggregated risk ranking results of failure modes in FMECA. *Process Safety and Environmental Protection*, 150, 194–222. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.04.006>
- [35] Boral, S., & Chakraborty, S. (2021). Failure analysis of CNC machines due to human errors: an integrated IT2F-MCDM-based FMEA approach. *Engineering Failure Analysis*, 130, 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105768>
- [36] Komatina, N., Tadić, D., Aleksić, A., & Banduka, N. (2022). The integrated PFMEA approach with interval type-2 fuzzy sets and FBWM: a case study in the automotive industry. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 236(6), 1201–1212. <https://doi.org/10.1177/09544070211034799>
- [37] Gölcük, İ. (2022). Interval type-2 fuzzy inference-based failure mode and effect analysis model in a group decision-making setting. *Kybernetes*, 51(8), 2603–2635. <https://doi.org/10.1108/K-02-2021-0152>
- [38] Macura, D., Laketić, M., Pamučar, D., & Marinković, D. (2022). Risk analysis model with interval type-2 fuzzy FMEA - case study of railway infrastructure projects in the Republic of Serbia. *Acta Polytechnica Hungarica*, 19(3), 103–118. <https://doi.org/10.12700/APH.19.3.2022.3.9>
- [39] Zheng, Q., Liu, X., & Wang, W. (2022). A likelihood-based ORESTE method for failure mode and effect analysis (FMEA) based risk analysis problem under interval type-2 fuzzy environment. *Quality and Reliability Engineering International*, 38(1), 304–325. <https://doi.org/10.1002/qre.2978>
- [40] Moloudi, A., Khaloo, S. S., Gholamnia, R., & Saeedi, R. (2022). Prioritizing health, safety and environmental hazards by integrating risk assessment and analytic hierarchy process techniques in solid waste management facilities. *Archives of Environmental & Occupational Health*, 77(7), 598–609. <https://doi.org/10.1080/19338244.2021.1977907>
- [41] Celik, E., Gumus, A. T., & Alegoz, M. (2014). A trapezoidal type-2 fuzzy MCDM method to identify and evaluate critical success factors for humanitarian relief logistics management. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 27(6), 2847–2855. <https://doi.org/10.3233/IFS-141246>
- [42] Oztaysi, B. (2015). A group decision making approach using interval type-2 fuzzy AHP for enterprise information systems project selection. *Journal of Multiple-valued Logic and Soft Computing*, 24(5–6), 475–500.

- [43] Abdullah, L., & Najib, L. (2017). Interval type-2 fuzzy analytic hierarchy process for sustainable energy sources selection. *International Journal of Fuzzy System Applications*, 6(3), 124–137. <https://doi.org/10.4018/IJFSA.2017070106>
- [44] Ayodele, T. R., Ogunjuyigbe, A. S. O., Odigie, O., & Munda, J. L. (2018). A multi-criteria GIS based model for wind farm site selection using interval type-2 fuzzy analytic hierarchy process: the case study of Nigeria. *Applied Energy*, 228, 1853–1869. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.051>
- [45] Debnath, J., & Biswas, A. (2018). Assessment of occupational risks in construction sites using interval type-2 fuzzy analytic hierarchy process. In S. Bhattacharyya, S. Sen, M. Dutta, P. Biswas & H. Chattopadhyay (Eds.), *Industry interactive innovations in science, engineering and technology* (pp. 283–297). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3953-9_28
- [46] Celik, E., & Akyuz, E. (2018). An interval type-2 fuzzy AHP and TOPSIS methods for decision-making problems in maritime transportation engineering: the case of ship loader. *Ocean Engineering*, 155, 371–381. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.01.039>
- [47] Yilmaz, M. K., Kusakci, A. O., Tatoglu, E., Icten, O., & Yetgin, F. (2019). Performance evaluation of real estate investment trusts using a hybridized interval type-2 fuzzy AHP-DEA approach: the case of Borsa Istanbul. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 18(6), 1785–1820. <https://doi.org/10.1142/S0219622019500354>
- [48] Yildiz, A., Ayyildiz, E., Taskin Gumus, A., & Ozkan, C. (2021). A framework to prioritize the public expectations from water treatment plants based on trapezoidal type-2 fuzzy AHP method. *Environmental Management*, 67(3), 439–448. <https://doi.org/10.1007/s00267-020-01367-5>
- [49] Meniz, B., Bas, S. A., Ozkok, B. A., & Tiryaki, F. (2021). Multilevel AHP approach with interval type-2 fuzzy sets to portfolio selection problem. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 40(5), 8819–8829. <https://doi.org/10.3233/JIFS-200512>
- [50] Yıldız, A., Ayyıldız, E., Taşkın Gümü, A., & Özkan, C. (2022). Şehirlerarası otobüs firmalarına yönelik kalite beklentilerinin aralıklı tip-2 yamuk bulanık AHP ile değerlendirilmesi ve firma seçimi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 37(2), 757–770. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.625921>
- [51] Ecer, F. (2022). Multi-criteria decision making for green supplier selection using interval type-2 fuzzy AHP: a case study of a home appliance manufacturer. *Operational Research*, 22(1), 199–233. <https://doi.org/10.1007/s12351-020-00552-y>
- [52] Yürüyen, A. A., & Ulutaş, A. (2020). Bulanık AHP ve bulanık EDAS yöntemleri ile üçüncü parti lojistik firması seçimi. *Anemon Muş Alparslan Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 8, 283–294. <https://doi.org/10.18506/anemon.767354>

- [53] Keshavarz Ghorabae, M., Amiri, M., Zavadskas, E. K., & Turskis, Z. (2017). Multi-criteria group decision-making using an extended EDAS method with interval type-2 fuzzy sets. *Economics and Management*, 20(1), 48–68. <https://doi.org/10.15240/tul/001/2017-1-004>
- [54] Keshavarz Ghorabae, M., Amiri, M., Zavadskas, E. K., Turskis, Z., & Antucheviciene, J. (2017). A new multi-criteria model based on interval type-2 fuzzy sets and EDAS method for supplier evaluation and order allocation with environmental considerations. *Computers & Industrial Engineering*, 112, 156–174. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.08.017>
- [55] Demircan, M. L., & Tunc, S. (2020). A proposed service level improvement methodology for public transportation using interval type-2 fuzzy EDAS based on customer satisfaction data. In C. Kahraman, S. Cebi, S. Cevik Onar, B. Oztaysi, A. Tolga & I. Sari (Eds.), *INFUS 2019 - intelligent and fuzzy techniques in big data analytics and decision making* (pp. 1351–1359). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23756-1_158
- [56] Chen, Q., & Thouas, G. A. (2015). Metallic implant biomaterials. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 87, 1–57. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2014.10.001>
- [57] von Recum, A. F., & Jacobi, J. E. (1999). *Handbook of biomaterials evaluation: scientific, technical, and clinical testing of implant materials*. Taylor & Francis.
- [58] Massachusetts Institute of Technology (2021). Biomaterials. <https://www.ocw.mit.edu/courses> adresinden 4 Ocak 2022 tarihinde alınmıştır.
- [59] MarketsandMarkets (2021). Biomaterials market. <https://www.marketsandmarkets.com/> adresinden 9 Ocak 2022 tarihinde alınmıştır.
- [60] Grand View Research (2021). Biomaterials market size, share & trends analysis report. <https://www.grandviewresearch.com/> adresinden 9 Ocak 2022 tarihinde alınmıştır.
- [61] Davis, J. R. (2003). *Handbook of materials for medical devices*. ASM International.
- [62] Suh, H. (1998). Recent advances in biomaterials. *Yonsei Medical Journal*, 39(2), 87–96. <https://doi.org/10.3349/ymj.1998.39.2.87>
- [63] Ramakrishna, S., Ramalingam, M., Kumar, T. S. S., & Soboyejo, W. O. (2010). *Biomaterials: a nano approach*. CRC Press.
- [64] Ødegaard, K. S., Torgersen, J., & Elverum, C. W. (2020). Structural and biomedical properties of common additively manufactured biomaterials: a concise review. *Metals*, 10(12), 1–23. <https://doi.org/10.3390/met10121677>
- [65] Vallet-Regí, M. (2001). Ceramics for medical applications. *Journal of Chemical Society-Dalton Transactions*, 2(2), 97–108. <https://doi.org/10.1039/B007852M>
- [66] Hasirci, V., & Hasirci, N. (2018). *Fundamentals of biomaterials*. Springer.

- [67] Niinomi, M., Nakai, M., & Hieda, J. (2012). Development of new metallic alloys for biomedical applications. *Acta Biomaterialia*, 8(11), 3888–3903. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2012.06.037>
- [68] Hermawan, H. (2012). *Biodegradable metals: from concept to applications*. Springer.
- [69] Pasinli, A. (2004). Biyomedikal uygulamalarda kullanılan biyomalzemeler. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 4, 25–34.
- [70] Salernitano, E., & Migliaresi, C. (2003). Composite materials for biomedical applications: a review. *Journal of Applied Biomaterials and Biomechanics*, 1(1), 3–18.
- [71] Geetha, M., Singh, A. K., Asokamani, R., & Gogia, A. K. (2009). Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants - a review. *Progress in Materials Science*, 54(3), 397–425. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2008.06.004>
- [72] Rahyussalim, A. J., Marsetio, A. F., Saleh, I., Kurniawati, T., & Whulanza, Y. (2016). The needs of current implant technology in orthopaedic prosthesis biomaterials application to reduce prosthesis failure rate. *Journal of Nanomaterials*, 2016, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2016/5386924>
- [73] Eliaz, N. (2019). Corrosion of metallic biomaterials: a review. *Materials*, 12(3), 1–91. <https://doi.org/10.3390/ma12030407>
- [74] Narnaware, V. S. (2017). Metallic biomaterials for human body implant: a review study. *International Journal of Science & Engineering Development Research*, 2(6), 220–229.
- [75] Litvaj, I., & Stancekova, D. (2015). Decision-making, and their relation to the knowledge management, use of knowledge management in decision-making. *Procedia Economics and Finance*, 23, 467–472. [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(15\)00547-X](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(15)00547-X)
- [76] Mofarrah, A. (2008). *Decision making tool for produced water management: an application of multicriteria decision making approach* [Yüksek lisans tezi] Newfoundland Memorial University.
- [77] Lahdelma, R., Salminen, P., & Hokkanen, J. (2000). Using multicriteria methods in environmental planning and management. *Environmental Management*, 26(6), 595–605. <https://doi.org/10.1007/s002670010118>
- [78] Banaeian, N., Mobli, H., Fahimnia, B., Nielsen, I. E., & Omid, M. (2018). Green supplier selection using fuzzy group decision making methods: a case study from the agri-food industry. *Computers & Operations Research*, 89, 337–347. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.02.015>
- [79] Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7), 703–726. <https://doi.org/10.1080/13658810600661508>
- [80] Zavadskas, E. K., Mardani, A., Turskis, Z., Jusoh, A., & Nor, K. M. (2016). Development of TOPSIS method to solve complicated decision-making problems: an overview on developments from 2000 to 2015. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 15(3), 645–682. <https://doi.org/10.1142/S0219622016300019>

- [81] Esmail, B. A., & Geneletti, D. (2018). Multi-criteria decision analysis for nature conservation: a review of 20 years of applications. *Methods in Ecology and Evolution*, 9(1), 42–53. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12899>
- [82] Sitorus, F., Cilliers, J. J., & Brito-Parada, P. R. (2019). Multi-criteria decision making for the choice problem in mining and mineral processing: applications and trends. *Expert Systems with Applications*, 121, 393–417. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.12.001>
- [83] Malczewski, J. (1999). *GIS and multicriteria decision analysis*. John Wiley & Sons.
- [84] Ceballos, B., Lamata, M. T., & Pelta, D. A. (2016). A comparative analysis of multi-criteria decision-making methods. *Progress in Artificial Intelligence*, 5(4), 315–322. <https://doi.org/10.1007/s13748-016-0093-1>
- [85] Roy, B. (1996). *Multicriteria methodology for decision aiding*. Springer.
- [86] Mulliner, E., Malys, N., & Maliene, V. (2016). Comparative analysis of MCDM methods for the assessment of sustainable housing affordability. *Omega*, 59, 146–156. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.05.013>
- [87] Zavadskas, E. K., & Turskis, Z. (2011). Multiple criteria decision making (MCDM) methods in economics: an overview. *Technological and Economic Development of Economy*, 17(2), 397–427. <https://doi.org/10.3846/20294913.2011.593291>
- [88] Kahraman, C. (2008). *Fuzzy multi-criteria decision making: theory and applications with recent developments*. Springer.
- [89] Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). *Multiple attribute decision making: methods and applications*. Springer.
- [90] Aven, T. (2016). Risk assessment and risk management: review of recent advances on their foundation. *European Journal of Operational Research*, 253(1), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.12.023>
- [91] Society for Risk Analysis (2015). Glossary society for risk analysis. <https://www.sra.org/> adresinden 27 Aralık 2021 tarihinde alınmıştır.
- [92] Arıkan, R. (2014). *Stratejik yönetim için bulanık risk değerlendirme modelleri ve karşılaştırmalı analizi* [Doktora tezi] Gazi Üniversitesi.
- [93] Özkılıç, Ö. (2005). *İş sağlığı ve güvenliği yönetim sistemleri ve risk değerlendirme metodolojileri*. Türkiye İşveren Sendikaları Konfederasyonu Yayınları.
- [94] Acuner, Ö. (2014). *Tersane iş kazalarının önlenmesi için bulanık çıkarım tabanlı bir risk değerlendirme modeli önerisi* [Yüksek lisans tezi] Karadeniz Teknik Üniversitesi.
- [95] Aydın, C. (2010). *Sağlık kuruluşlarında risk değerlendirme ve bir üniversite hastanesinde risk azaltma çalışması* [Yüksek lisans tezi] Uludağ Üniversitesi.
- [96] Cagliano, A. C., Grimaldi, S., & Rafele, C. (2011). A systemic methodology for risk management in healthcare sector. *Safety Science*, 49(5), 695–708. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2011.01.006>

- [97] Sogal, A., & Tofe, A. J. (1999). Risk assessment of bovine spongiform encephalopathy transmission through bone graft material derived from bovine bone used for dental applications. *Journal of Periodontology*, 70(9), 1053–1063. <https://doi.org/10.1902/jop.1999.70.9.1053>
- [98] Khan, F., Rathnayaka, S., & Ahmed, S. (2015). Methods and models in process safety and risk management: past, present and future. *Process Safety and Environmental Protection*, 98, 116–147. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2015.07.005>
- [99] Canbolat, R. (2011). *Kamu idarelerinde iç kontrol sistemine geçiş ve risk yönetimi: sorunlar ve çözüm önerileri* [Hazine uzmanlığı yeterlik tezi] Hazine Müsteşarlığı.
- [100] Pedrycz, W. (2021). *An introduction to computing with fuzzy sets: analysis, design, and applications*. Springer.
- [101] Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338–353. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
- [102] Nozari, H., Najafi, E., Fallah, M., & Hosseinzadeh Lotfi, F. (2019). Quantitative analysis of key performance indicators of green supply chain in FMCG industries using non-linear fuzzy method. *Mathematics*, 7(11), 1–19. <https://doi.org/10.3390/math7111020>
- [103] Pala, O. (2013). *Bulanık mantık ve çok kriterli karar verme uygulaması* [Yüksek lisans tezi] Dokuz Eylül Üniversitesi.
- [104] Baskaya, Z., & Ozturk, B. (2011). Bulanık TOPSİS algoritması ile yamuk bulanık sayıların satış elemanı seçiminde kullanılması. *Business and Economics Research Journal*, 2(2), 77–100.
- [105] Krmac, E., & Djordjević, B. (2017). An evaluation of train control information systems for sustainable railway using the analytic hierarchy process (AHP) model. *European Transport Research Review*, 9, 1–17. <https://doi.org/10.1007/s12544-017-0253-9>
- [106] Hambali, A., Sapuan, S. M., Ismail, N., & Nukman, Y. (2009). Application of analytical hierarchy process in the design concept selection of automotive composite bumper beam during the conceptual design stage. *Scientific Research and Essay*, 4(4), 198–211.
- [107] Zhu, B., Xu, Z., Zhang, R., & Hong, M. (2016). Hesitant analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 250(2), 602–614. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.09.063>
- [108] Dos Santos, P. H., Neves, S. M., SantAnna, D. O., Oliveira, C. H. D., & Carvalho, H. D. (2019). The analytic hierarchy process supporting decision making for sustainable development: an overview of applications. *Journal of Cleaner Production*, 212, 119–138. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.270>
- [109] Jiang, W., Zhang, Z., & Deng, X. (2019). A novel failure mode and effects analysis method based on fuzzy evidential reasoning rules. *IEEE Access*, 7, 113605–113615. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2934495>

- [110] Khorshidi, H. A., Gunawan, I., & Ibrahim, M. Y. (2016). Applying UGF concept to enhance the assessment capability of FMEA. *Quality and Reliability Engineering International*, 32(3), 1085–1093. <https://doi.org/10.1002/qre.1817>
- [111] Rah, J. E., Manger, R. P., Yock, A. D., & Kim, G. Y. (2016). A comparison of two prospective risk analysis methods: traditional FMEA and a modified healthcare FMEA. *Medical Physics*, 43(12), 6347–6353. <https://doi.org/10.1118/1.4966129>
- [112] Daneshvar, S., Yazdi, M., & Adesina, K. A. (2020). Fuzzy smart failure modes and effects analysis to improve safety performance of system: case study of an aircraft landing system. *Quality and Reliability Engineering International*, 36(3), 890–909. <https://doi.org/10.1002/qre.2607>
- [113] Wang, Y. M., Chin, K. S., Poon, G. K. K., & Yang, J. B. (2009). Risk evaluation in failure mode and effects analysis using fuzzy weighted geometric mean. *Expert Systems with Applications*, 36, 1195–1207. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2007.11.028>
- [114] Keshavarz Ghorabae, M. (2016). Developing an MCDM method for robot selection with interval type-2 fuzzy sets. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 37, 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.04.007>
- [115] Sharaf, I. M. (2020). An interval type-2 fuzzy TOPSIS using the extended vertex method for MAGDM. *SN Applied Sciences*, 2(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1825-1>
- [116] Chen, S. M., & Lee, L. W. (2010). Fuzzy multiple attributes group decision-making based on the interval type-2 TOPSIS method. *Expert Systems with Applications*, 37(4), 2790–2798. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.09.012>
- [117] Keshavarz Ghorabae, M., Zavadskas, E. K., Amiri, M., & Esmaeili, A. (2016). Multi-criteria evaluation of green suppliers using an extended WASPAS method with interval type-2 fuzzy sets. *Journal of Cleaner Production*, 137, 213–229. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.031>
- [118] Gupta, G., & Mishra, R. P. (2017). A failure mode effect and criticality analysis of conventional milling machine using fuzzy logic: case study of RCM. *Quality and Reliability Engineering International*, 33(2), 347–356. <https://doi.org/10.1002/qre.2011>
- [119] Pamučar, D., Stević, Ž., & Sremac, S. (2018). A new model for determining weight coefficients of criteria in MCDM models: full consistency method (FUCOM). *Symmetry*, 10(9), 1–22. <https://doi.org/10.3390/sym10090393>
- [120] Stević, Ž., Pamučar, D., Puška, A., & Chatterjee, P. (2020). Sustainable supplier selection in healthcare industries using a new MCDM method: Measurement of alternatives and ranking according to compromise solution (MARCOS). *Computers & Industrial Engineering*, 140, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106231>
- [121] Selçuk, L. (2013). An avalanche hazard model for Bitlis Province, Turkey, using GIS based multicriteria decision analysis. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 22(4), 523–535. <https://doi.org/10.3906/yer-1201-10>

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Hilal SİNGER

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2016, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : 2019, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

MESLEKİ DENEYİM:

- 2019 yılından beri Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesinde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Singer, H., & Över Özçelik, T. (2022). Metallic biomaterial assessment via a risk-based decision-making approach. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37(2), 641–654.