



Savunma sanayinde bor kullanımının çok kriterli bir yaklaşımla değerlendirilmesi

Seyyide Öztürk¹ , Beril Su Taş¹ , Yusuf Bera Sanlı¹ , Tamer Eren^{1*}

¹ Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Yenışehir/Kırıkkale, 71450, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Makale Geçmişi:

İlk gönderi 6 Şubat 2025

Kabul 17 Mayıs 2026

Online 30 Haziran 2026

Derleme Makalesi

DOI: 10.30728/boron.1883171

Anahtar kelimeler:

Bor madeni
Ekonomik ve teknolojik önem
Savunma sanayi
Yerli üretim

ÖZET

Bu çalışma, Türkiye'nin en değerli doğal kaynaklarından biri olan borun ekonomik, teknolojik ve stratejik önemini incelemektedir. Çalışmanın temel amacı, borun farklı sektörlerdeki kullanım alanlarını araştırmak ve özellikle savunma sanayindeki rolünü bilimsel bir perspektiften değerlendirmektir. Dünya bor rezervlerinin yaklaşık %70'ine sahip olan Türkiye, katma değerli üretim ve teknoloji geliştirme kapasitesini artırma açısından büyük bir stratejik potansiyele sahiptir. Süreç boyunca bilimsel kaynakların güvenilirliği, veri doğrulama süreçleri ve kaynak çeşitliliği ön planda tutulmuştur. Sonuç olarak, borun sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda değerlendirilmesinin, yerli üretimin ve savunma teknolojilerinin güçlendirilmesine doğrudan katkı sağlayacağı sonucuna ulaşılmıştır. Bu projenin geniş kapsamlı etkisi, borun yalnızca ekonomik bir değer olmadığını, aynı zamanda Türkiye'nin bilimsel, teknolojik ve savunma alanlarındaki ilerlemesinde belirleyici bir unsur olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, yerli kaynakların etkin kullanımının ülke ekonomisine, çevresel sürdürülebilirliğe ve ulusal güvenliğe katkı sağlayacağını ortaya koymaktadır. Çalışma kapsamında yedi değerlendirme kriteri belirlenmiştir. Tanımlanan kriterlerin göreceli önem düzeylerini belirlemek amacıyla, Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerinden Pisagor Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ve En İyi-En Kötü Yöntemi (BWM) kullanılmıştır. Bulgular, borun yalnızca ekonomik bir kaynak değil, aynı zamanda Türkiye'nin bilimsel, teknolojik ve stratejik gelişiminde kritik bir unsur olduğunu ortaya koymaktadır. Bu çalışmanın, borun kullanım alanlarına ilişkin akademik araştırmalara ve uygulama süreçlerine yönelik planlama ile karar verme mekanizmalarına katkı sağlaması beklenmektedir.

Evaluation of boron usage in the defense industry using a multi-criteria approach

ARTICLE INFO

Article History:

Received February 6, 2025

Accepted May 17, 2026

Available online June 30, 2026

Review Article

DOI: 10.30728/boron.1883171

Keywords:

Boron mineral
Economic and technological importance
Defense industry
Domestic production

ABSTRACT

This study examines the economic, technological, and strategic importance of boron, one of Türkiye's most valuable natural resources. The main objective is to investigate boron's uses in different sectors and, in particular, to evaluate its role in the defense industry from a scientific perspective. Possessing approximately 70% of the world's boron reserves, Türkiye holds great strategic potential to increase its capacity for value-added production and technology development. Throughout the process, the reliability of scientific sources, data verification, and source diversity were prioritized. Ultimately, it was concluded that the evaluation of boron in line with sustainable development goals will directly contribute to the strengthening of domestic production and defense technologies. The widespread impact of this project demonstrates that boron is not only an economic asset but also a decisive element in Türkiye's progress in scientific, technological, and defense fields. The results reveal that the effective utilization of domestic resources will contribute to the country's economy, environmental sustainability, and national security. Within the scope of the study, seven evaluation criteria were determined. To determine the relative importance levels of the defined criteria, the Pythagorean Fuzzy Analytical Hierarchy Process (AHP) and the Best-Worst Method (BWM), both Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) methods, were used. The findings reveal that boron is not only an economic resource but also a critical element in Türkiye's scientific, technological, and strategic development. This study is expected to contribute to academic research on the uses of boron and to planning and decision-making processes related to its application.

1. Giriş (Introduction)

Bor, periyodik tabloda atom numarası beş olan, yarı metalik özellikler gösteren bir elementtir. Kimyasal olarak yüksek reaktiviteye sahip olması ve güçlü bağlar kurarak kararlı bileşikler oluşturabilmesi, boru diğer elementlerden ayıran temel özelliklerdendir.

Hafiflik, yüksek mukavemet, üstün ısı direnci ve nötron soğurma yeteneği gibi nitelikler, bor bileşiklerini modern teknolojilerde vazgeçilmez kılmaktadır. Türkiye, dünya bor rezervlerinin büyük bir bölümüne sahip olması nedeniyle bu stratejik hammaddeyi üretim ve tedarik

*Corresponding author: tamereren@gmail.com

zincirinde önemli bir konuma sahiptir. Türkiye'nin bor rezervleri üzerindeki küresel hâkimiyetinin ülkeye jeopolitik ve ekonomik avantaj sağladığı literatürde vurgulanmaktadır [1].

Bor; cam, seramik ve temizlik ürünleri gibi geleneksel endüstrilerde yaygın olarak kullanılmasının yanı sıra cam elyafı üretiminde mukavemet artırıcı, tarım sektöründe ise mikro besin elementi olarak önemli roller üstlenmektedir. Borun tarımsal verimlilik üzerindeki olumlu etkileri, özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde gıda güvenliği açısından kritik bir unsur olarak değerlendirilmektedir [2]. Bunun yanında, bor bileşikleri enerji ve nükleer sektörlerde de stratejik bir öneme sahiptir. Bor türevlerinin lityum iyon bataryaların enerji yoğunluğunu artırması ve nötron soğurma yeteneği sayesinde ise nükleer reaktörlerde güvenlik ve kontrol amacıyla kullanılması, borun enerji güvenliği açısından değerini artırmaktadır [3, 4].

Savunma sanayisi uygulamalarında yüksek performanslı çözümler sunan bor ve bor bileşikleri, balistik koruma sistemleri, askeri araçlar ve havacılık uygulamalarında önemli bir rol üstlenmektedir. Özellikle bor karbür seramiklerinin hafiflik ve üstün dayanım özellikleri sayesinde balistik zırhlarda etkin biçimde kullanıldığı ifade edilmektedir [5]. Bu özellikler, Türkiye'nin savunma sanayisinde yerli ve milli teknolojiler geliştirme hedefleriyle doğrudan örtüşmektedir. Ayrıca borun savunma sanayisinde kullanımı yalnızca teknik üstünlük sağlamamakta, aynı zamanda stratejik bağımsızlık, maliyet etkinliği ve dışa bağımlılığın azaltılması açısından da kritik bir değer taşımaktadır. Bu nedenle bor, Türkiye'nin savunma sanayisinde öncelikli hammaddeleden biri olarak görülmektedir.

Borun farklı kullanım alanlarının stratejik açıdan değerlendirilmesi, çok sayıda kriterin eş zamanlı olarak dikkate alınmasını gerektirmektedir. Bu nedenle çalışmada, belirsizlik içeren uzman değerlendirmelerini daha gerçekçi biçimde ele alabilen Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yaklaşımları tercih edilmiştir. Bu kapsamda, kriter ağırlıklarının belirlenmesinde Pisagor Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ve En İyi-En Kötü (BWM) yöntemleri kullanılmıştır. Pisagor bulanık yapı, karar vericilerin tereddütlerini ve belirsizliklerini modelleme avantajı sağlarken; BWM, daha az karşılaştırma ile tutarlı ve güvenilir sonuçlar elde edilmesine olanak tanımaktadır.

Bu bağlamda çalışma şu soruya odaklanmaktadır: Savunma sanayisinde bor ve bor bileşiklerinin kullanım alanları hangi kriterler doğrultusunda önceliklendirilmeli ve bu öncelikler belirsizlik içeren uzman görüşleri dikkate alınarak nasıl belirlenmelidir? Bu çalışma, bor madeninin Türkiye açısından taşıdığı stratejik önemi çok boyutlu bir bakış açısıyla analiz etmeyi amaçlamaktadır. Bu doğrultuda çalışmanın ikinci bölümünde bor madeninin kullanım alanları ve stratejik önemi literatür çerçevesinde ele alınmaktadır.

Üçüncü bölümde kullanılan yöntemler ayrıntılı olarak açıklanmakta; dördüncü bölümde Pisagor Bulanık AHP ve BWM kullanılarak kriter ağırlıkları hesaplanmaktadır. Son bölümde ise elde edilen bulgular değerlendirilerek sonuç ve önerilere yer verilmektedir.

2. Literatür Taraması (Literature Review)

Bor mineralleri üzerine yapılan akademik çalışmalar, ekonomik, teknolojik, çevresel ve stratejik boyutlarda geniş bir yelpazeye sahiptir. Bu çalışmalar farklı yöntemlerle borun kullanım alanlarını ve etkilerini incelemiştir. Yenmez [1], bor minerallerini Türkiye için stratejik bir maden olarak ele almış ve betimsel analiz yöntemiyle ekonomik önemini ortaya koymuştur. Tokcan ve Gülmez [6], borun enerji sektöründe petrol ikamesi olarak kullanılabilirliğini kavramsal analizle incelemiş, Tokcan [7] ise bor madenini alternatif enerji kaynağı olarak değerlendirmiştir. Eti Maden'in sektör raporu [8], borun güncel ekonomik, üretim ve ihracat verilerini resmi istatistiklerle sunarak sektörel gelişmeleri kapsamlı biçimde ortaya koymaktadır.

Çevresel etkiler ve sürdürülebilirlik bağlamında Demirtaş [2], bor bileşiklerinin tarımda kullanımını ve çevresel etkilerini deneysel analizle incelemiştir. Coşkun ve Sarışık [9], bor atıklarının hafif harçlarda mineralojik ve termal özelliklere etkisini uygulamalı analizle değerlendirmiştir. Şanal [10], bor madenciliğinin çevresel etkilerini yaşam döngüsü analizi yöntemiyle ele alırken, Tunçbilek ve Nas [11] bor hidritlerinin hidrojen depolama teknolojilerindeki rolünü ve çevresel etkilerini literatür incelemesiyle tartışmıştır.

Endüstriyel ve teknolojik uygulamalara odaklanan çalışmalarda Zengin vd. [12], bor elementi ve türevlerinin endüstriyel kullanımını literatür incelemesiyle ortaya koymuştur. Polat [13], bor bileşiklerinin elektrokimyasal yöntemlerle giderimini deneysel çalışma ile analiz etmiştir. Aksu vd. [14], bor katkılı piezoelektrik seramiklerin üretimini ve özelliklerini deneysel yöntemle incelemiş, Özkan vd. [3] ise bor bileşiklerinin üretimi ve nükleer reaktör teknolojisindeki önemini teknik ve kinetik analizlerle değerlendirmiştir.

Bor madenciliğinin iş sağlığı ve güvenliği boyutunu ele alan Boylu ve Uslu [15], saha analizi yöntemiyle sektördeki riskleri ve önlemleri incelemiştir. Savunma ve stratejik teknolojiler bağlamında Bilgiç vd. [5], bor karbürün fizikokimyasal özelliklerini ve savunma teknolojilerindeki uygulamalarını teknoloji ve performans kriter analiziyle değerlendirmiştir. Tokcan [7], bor temelli teknolojileri bulanık AHP yöntemiyle stratejik karar verme bağlamında analiz etmiştir. Bu literatür taraması, bor minerallerinin çok boyutlu önemini ortaya koymakta; ekonomik, çevresel, teknolojik ve stratejik alanlarda farklı yöntemlerle yapılan çalışmaların birbirini tamamladığını göstermektedir.

Tablo 1. Literatür özeti (Literature review).

Uygulama Yeri	Yöntem	Kaynak
Türkiye için borun stratejik ve ekonomik önemi	Betimsel analiz	[1]
Tarım ve çevresel etkiler	Deneyisel analiz	[2]
Bor bileşikler - nükleer reaktör teknolojisi	Kinetik/teknik analiz	[3]
Bor giderimi - elektrokimyasal süreçler	Deneyisel çalışma	[4]
Bor karbür - savunma teknolojileri	Teknoloji ve performans kriter analizi	[5]
Enerji sektörü - petrol ikamesi	Kavramsal analiz	[6]
Bor temelli teknolojiler - enerji ve stratejik karar verme	Bulanık AHP yöntemi	[7]
Bor sektörü - üretim, ihracat, ekonomik veriler	Resmi sektör raporu / istatistiksel değerlendirme	[8]
Bor atıkları - seramik ve harç sektörü	Uygulamalı analiz	[9]
Bor madenciliği - çevresel etkiler	Yaşam döngüsü analizi	[10]
Bor hidritleri - enerji teknolojileri	Literatür incelemesi	[11]
Endüstriyel uygulamalar	Literatür incelemesi	[12]
Bor madeninden üretilen bileşiklerin giderimi (laboratuvar ölçekli deneyisel çalışma)	Elektrokimyasal yöntem (elektrokoagülasyon/ayırma)	[13]
Bor katkılı piezoelektrik seramikler	Deneyisel yöntem	[14]
Bor madenciliği - iş sağlığı ve güvenliği	Saha analizi	[15]
Türkiye bor madenciliği ve kritik mineraller	Sektörel değerlendirme raporu	[16]
Türk savunma sanayisinde Ar-Ge ve yenilik sistemleri	Betimsel/analitik inceleme	[17]

Literatür taraması incelendiğinde, bor madeninin ekonomik, endüstriyel ve çevresel boyutlarının ağırlıklı olarak ele alındığı; savunma sanayisine yönelik çalışmaların ise çoğunlukla betimsel analizlerle sınırlı kaldığı görülmektedir [5, 7]. Güncel çalışmalarda borun stratejik bir kaynak olarak konumlandırıldığı vurgulanmakla birlikte, bu değerlendirmelerin analitik karar modelleri ile desteklenmediği dikkat çekmektedir [16, 17].

Bu çalışma, bor madeninin savunma sanayisindeki kullanım alanlarını Pisagor Bulanık AHP ve BWM birlikte kullanarak değerlendirmesi bakımından literatüre özgün bir katkı sunmaktadır. Belirsizlik içeren uzman görüşlerinin matematiksel modellerle bütüncül biçimde ele alınması, çalışmayı mevcut Türkçe literatürdeki betimsel yaklaşımlardan ayırmakta ve gelecekte yapılacak akademik ve uygulamalı çalışmalara analitik bir referans zemini oluşturmaktadır.

Bor madeni üzerine yapılan çalışmaların bütününe bakıldığında, her bir araştırmanın farklı boyutlara odaklandığı ancak ortak bir stratejik çerçeveye hizmet ettiği görülmektedir. Ekonomik ve çevresel araştırmalar, borun sürdürülebilir kalkınma ve kaynak yönetimi açısından önemini öne çıkarırken; teknolojik çalışmalar, borun endüstriyel ve enerji alanındaki somut katkılarını deneyisel yöntemlerle ortaya koymuştur. Savunma sanayisi bağlamındaki araştırmalar ise bor karbür ve türevlerinin üstün fiziksel özelliklerini tanımlamış, ancak bu bulguların diğer alanlardaki ekonomik ve çevresel değerlendirmelerle sistematik biçimde ilişkilendirilmediği dikkat çekmektedir. Bu durum, literatürde parçalı bir yaklaşımın hâkim olduğunu göstermektedir. Çalışmamız, bu parçalı yapıyı bütünleştirerek savunma sanayisinde bor

kullanımını çok kriterli bir karar verme modeliyle değerlendirmekte; böylece ekonomik, çevresel ve teknolojik boyutlarla stratejik boyut arasında kavramsal bir köprü kurmaktadır.

3. Yöntemler (Methods)

Bu bölümde, ÇKKV problemlerinin çözümünde kullanılan yöntemler ve bu yöntemlerin uygulama adımları ayrıntılı biçimde açıklanmaktadır. ÇKKV problemleri, birden fazla ve çoğu zaman birbiriyle çelişen kriterin aynı anda değerlendirilmesini gerektirdiğinden, sistematik ve analitik yöntemlerin kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu kapsamda, belirsizlik içeren uzman değerlendirmelerinin daha gerçekçi biçimde ele alınabilmesi ve kriterler arasındaki göreceli önemlerin tutarlı şekilde belirlenebilmesi amacıyla Pisagor Bulanık AHP ve BWM açıklanmaktadır.

Bu çalışmada iki farklı ÇKKV yönteminin birlikte kullanılmasının temel nedeni, yöntemlerin birbirini tamamlayan özelliklere sahip olmasıdır. Pisagor Bulanık AHP yöntemi, uzman değerlendirmelerinde bulunan belirsizliği modelleyerek kriter ağırlıklarının daha gerçekçi biçimde belirlenmesine olanak sağlamaktadır. BWM yöntemi ise daha az sayıda karşılaştırma gerektirmesi ve yüksek tutarlılık sağlaması nedeniyle alternatiflerin sıralanmasında avantaj sunmaktadır. Bu nedenle çalışmada kriter ağırlıklarının belirlenmesinde Pisagor Bulanık AHP, alternatiflerin sıralanmasında ise BWM yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntemler, karar vericilerin öznel yargılarını matematiksel bir yapı içerisinde ifade etmeye olanak tanımakta ve karar verme sürecinin daha şeffaf, tutarlı ve tekrarlanabilir olmasını sağlamaktadır.

3.1. Pisagor Bulanık AHP (Pythagoras Fuzzy AHP)

AHP, çok kişili ve karmaşık çok kriterli problemlerin çözümünde ikili karşılaştırmalara dayalı bir yöntem olarak kullanılmaktadır [18]. Bu yöntem sayesinde karar vericiler arasında tutarlılık sağlanırken, basit karşılaştırmalar yoluyla karar verme süreci daha anlaşılır hale gelmektedir [19]. Bununla birlikte, AHP kişilerin dilsel ifadelerini ve öznel düşüncelerini tam olarak yansıtamamaktadır. Bu eksikliği gidermek amacıyla bulanık mantık ile AHP birleştirilmiş ve Bulanık AHP yaklaşımı geliştirilmiştir.

Pisagor Bulanık AHP yönteminde, karar vericilerin değerlendirmeleri genellikle dilsel ifadeler aracılığıyla alınmaktadır. Bu dilsel ifadelerin matematiksel olarak işlenebilmesi için, her bir ifade Pisagor bulanık sayılarla temsil edilmektedir. Bu kapsamda kullanılan dilsel değişkenler ve bu değişkenlere karşılık gelen Pisagor bulanık ölçekler Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Dilsel değişkenlerin tanımı ve Pisagor bulanık ölçekleri (Definition of linguistic variables and pythagorean Fuzzy Scales) [21].

Dilsel Değişkenler	Aralıklı Pisagor Bulanık Sayılar			
	μ_L	μ_U	ν_L	ν_U
Kesinlikle Düşük (KD)	0.0000	0.0000	0.9000	1.0000
Çok Düşük (ÇD)	0.1000	0.2000	0.8000	0.9000
Düşük (D)	0.2000	0.3500	0.6500	0.8000
Ortalamanın Altı (OA)	0.3000	0.4500	0.5500	0.6500
Eşit (E)	0.1965	0.1965	0.1965	0.1965
Ortalama (O)	0.4000	0.5500	0.4500	0.5500
Ortalamanın Üstü (OÜ)	0.5500	0.6500	0.3500	0.4500

Klasik AHP'den farklı olarak, karşılaştırmalarda tek bir kesin değer yerine değer aralıkları kullanılmaktadır [20]. Sezgisel bulanık kümelerin ortaya çıkmasıyla birlikte geliştirilen uzantılardan biri de Pisagor bulanık kümeleridir [21]. Bu kümeler, belirsizliklerin daha yüksek güvenilirlik düzeyinde açıklığa kavuşturulmasını hedeflemektedir [22]. Şekil 1'de Pisagor AHP aşamaları verilmiştir.

Çok kriterli karar verme süreçlerinde, karar vericilerin öznel yargılarını sayısal verilere dönüştürebilmek amacıyla dilsel ölçeklerden yararlanılmaktadır. Bu kapsamda, Pisagor Bulanık AHP ve klasik AHP yöntemlerinde kullanılan dilsel terimler ile bu terimlerin AHP ölçeğindeki sayısal karşılıkları arasındaki ilişki Tablo 3'te sunulmuştur. Söz konusu tablo, değerlendirme sürecinde kullanılan sözel ifadelerin matematiksel modele nasıl dönüştürüldüğünü açık bir biçimde ortaya koymaktadır. Pisagor Bulanık AHP yönteminde, karar vericilerin öznel değerlendirmelerinin tutarlılığını belirlemek amacıyla Tutarlılık Oranı (CR) hesaplanmaktadır. Bu doğrultuda, Pisagor Bulanık AHP yöntemi ile elde edilen ikili karşılaştırma matrisleri, Tablo 3'te verilen AHP ölçeğine göre sayısal değerlere dönüştürülmektedir. Ardından, bu sayısal değerlere dayalı olarak oluşturulan ikili karşılaştırma matrisine

Adım 1: Dilsel değişkenlere dayalı ikili karşılaştırma matrisi $A=(a_{ij})_{m \times m}$ oluşturulur.

Adım 2: Eşitlik 1 ve Eşitlik 2 kullanılarak farklar matrisi $D=(d_{ij})_{m \times m}$ oluşturulur.

$$d_{ijL} = \mu_{ijL}^2 - \nu_{ijL}^2 \quad (1)$$

$$d_{ijU} = \mu_{ijU}^2 - \nu_{ijU}^2 \quad (2)$$

Adım 3: Çarpımsal matris $S=(s_{ij})_{m \times m}$ Eşitlik 3 ve Eşitlik 4 kullanılarak hesaplanır.

$$s_{ijL} = \sqrt{1000d_{ijL}} \quad (3)$$

$$s_{ijU} = \sqrt{1000d_{ijU}} \quad (4)$$

Adım 4: Tereddüt dereceleri $H=(h_{ij})_{m \times m}$ Eşitlik 5 kullanılarak belirlenir.

$$h_{ij} = 1 - (\mu_{ijU}^2 - \mu_{ijL}^2) - (\nu_{ijU}^2 - \nu_{ijL}^2) \quad (5)$$

Adım 5: Normalize edilmemiş ağırlıklar $T=(t_{ij})_{m \times m}$ Eşitlik 6 yardımıyla hesaplanır.

$$t_{ij} = \left(\frac{s_{ijL} + s_{ijU}}{2} \right) h_{ij} \quad (6)$$

Adım 6: Kriter ağırlıkları w_i Eşitlik 7 kullanılarak belirlenir.

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^m w_i}{\left(\sum_{i=1}^m w_i \cdot \sum_{j=1}^m w_i \right)} \quad (7)$$

Şekil 1. Pisagor Bulanık AHP aşamaları (Steps of the Pythagorean Fuzzy AHP).

klasik AHP yönteminin adımları uygulanmakta ve tutarlılık oranı hesaplanmaktadır. Tutarlılık oranının 0,10'un altında olması, değerlendirmelerin tutarlı olduğunu ve analiz sürecine devam edilebileceğini kanıtlamaktadır.

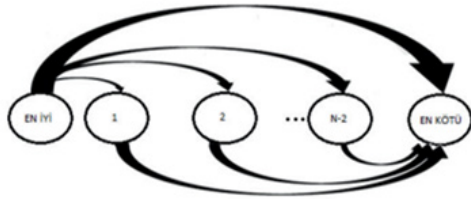
3.2. BWM Yöntemi (BWM Method)

BWM, işletme, ekonomi, sağlık, bilişim, mühendislik ve tarım gibi farklı karar verme alanlarında

Tablo 3. Pisagor Bulanık AHP ve klasik AHP tutarlılık oranı için dilsel uygunluk tablosu [38]. (Linguistic suitability table for Pythagorean Fuzzy AHP and Classical AHP consistency ratio.)

Dilsel Terim	AHP Ölçeği	Karşılık Gelen Değer
Kesinlikle Çok Düşük	Aşırı Önemlinin Tersi	1/9
Çok Düşük Önemli	Çok Güçlü Önemlinin Tersi	1/7
Düşük Önemli	Güçlü Önemlinin Tersi	1/5
Ortalamanın Altında Önemli	Ortalama Önemlinin Tersi	1/3
Ortalama Önemli	Eşit Önemli	1
Ortalamanın Üstünde Önemli	Ortalama Önemli	3
Yüksek Önemli	Güçlü Önemli	5
Çok Yüksek Önemli	Çok Güçlü Önemli	7
Kesinlikle Yüksek Önemli	Aşırı Önemli	9
Eşit	Eşit	1

uygulanabilmektedir. Temel olarak, bir grup karar verici ya da tek bir karar verici tarafından, mevcut alternatifler arasından en uygun seçeneğin veya seçenekler grubunun belirlenmesi amacıyla kullanılmaktadır [24]. Bu yöntemin öne çıkan avantajları, pek çok ÇKKV yöntemine kıyasla; (i) daha az sayıda karşılaştırma verisine ihtiyaç duyması ve (ii) daha tutarlı, güvenilir sonuçlar ortaya koymasındır [25]. Bir ÇKKV probleminde, alternatiflerin değerlendirilmesi belirlenen kriterler üzerinden yapılır. BWM yaklaşımında, karar verici öncelikle en iyi (örneğin en çok tercih edilen, en önemli) ve en kötü (örneğin en az tercih edilen, en az önemli) kriterleri belirler. Ardından bu iki kriter ile diğer kriterler arasında ikili karşılaştırmalar gerçekleştirilir. Son aşamada, kriterlere ve alternatiflere verilen ağırlıklar doğrultusunda nihai puanlar hesaplanır ve en uygun alternatif seçilir [25]. BWM Referans Karşılaştırma şekli Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. BWM referans karşılaştırma (BWM reference comparison).

BWM, kriterlerin ağırlıklandırılması sürecinde belirli bir sistematik çerçeveye dayanmaktadır. Bu çerçevede yöntemin uygulanış süreci, temel aşamalarıyla birlikte görsel bir yapı altında ifade edilmektedir. BWM yönteminin uygulama adımları Şekil 3'te gösterilmiştir.

BWM yönteminde elde edilen sonuçların güvenilirliğini teyit etmek amacıyla tutarlılık analizi yapılması gerekmektedir. Karar verici tarafından sunulan ikili karşılaştırmaların mantıksal çerçevede ne ölçüde tutarlı olduğu, hesaplanan ξ^* (hata payı) değerinin, kriter sayısına bağlı olarak belirlenen 'Tutarlılık İndeksi' ne oranlanmasıyla (Denklem 9) elde edilir.

$$\text{Tutarlılık Oranı} = \frac{\xi^*}{\text{Tutarlılık İndeksi}} \quad (9)$$

Bu hesaplamada temel alınan ve kriter sayısına göre değişkenlik gösteren maksimum tutarlılık indeksi değerleri Tablo 4'te verilmiştir.

4. Uygulama (Implementation)

Türkiye, dünyanın en büyük bor rezervlerine sahip olması nedeniyle bor madenini stratejik bir kaynak olarak değerlendirmektedir. Borun savunma sanayii, enerji depolama, ileri kompozit malzemeler, tarım ve cam sanayi gibi alanlarda kullanımının artması, bor temelli katma değerli ürün geliştirme çalışmalarını hızlandırmıştır [20]. Bu süreçte, belirsizlik içeren uzman görüşlerinin doğru modellenmesi karar verme açısından kritik önem taşımaktadır [21]. Bu çalışmada, Türkiye'de bor madeni kullanımına yönelik alternatif

Adım 1: Bir dizi karar kriteri belirlenir. Karar problemine etkisi olan kriterler $c_1, c_2, \dots, c_n$ belirlenir.

Adım 2: N adet kriter arasından en iyi (en önemli, en çok istenen) ve en kötü (en önemsiz, en az istenen) kriterler belirlenir. Bu aşamada, karar vericiler en iyi ve en kötü kriterleri tanımlarlar. Ancak bu adımda karşılaştırma yapılmaz.

Adım 3: Bu adımda belirlenen en iyi kriterin diğer kriterlere göre tercihi 1 ile 9 arasında bir sayı kullanılarak belirlenir. Eşit öneme sahip olan 1 ile, çok önemli olan ise 9 ile belirtilmektedir. En iyi kriterlere göre Diğerleri Vektörü: $A_B = (a_{B1}, a_{B2}, \dots, a_{Bn})$ burada, a_{Bj} kriter j üzerinde en iyi kriterin B tercihi belirler. $a_{BB} = 1$ 'dir.

Adım 4: Bu aşamada ise en kötü kriterin diğer kriterlerle 1 ile 9 arasında bir sayı kullanılarak karşılaştırılması yapılır. Diğerlerine göre En Kötü Vektörü: $A_W = (a_{W1}, a_{W2}, \dots, a_{Wn})$ burada, a_{Wj} ölçüt j'nin en kötü kriter W üzerindeki tercihi belirler. $a_{WW} = 1$ 'dir.

Adım 5: En iyi ağırlıklar bulunur ($W_1^*, W_2^*, \dots, W_n^*$). Kriterler için en uygun ağırlık, her bir $W_B = W_j$ ve $W_j = W_W$ çifti için $W_B/W_j = a_{Bj}$ ve $W_j/W_W = a_{Wj}$

Tüm j için bu koşulları yerine getirmek için burada en büyük mutlak farklılıkların en küçükleştiği bir çözüm bulunmalıdır:

$$\left| \frac{W_B}{W_j} - a_{Bj} \right|, \left| \frac{W_j}{W_W} - a_{Wj} \right|$$

Ağırlıkların negatif olmamasına ve toplam koşuluna bakıldığında, aşağıdaki problem modeli ortaya çıkmaktadır. (Model 1):

$$\min \max \{ |W_B - W_j a_{Bj}|, |W_j - W_W a_{Wj}| \} \quad (1)$$

$$\sum_j W_j = 1 \quad (2)$$

$$W_j \geq 0, \forall j, j = 1, 2, \dots, J \quad (3)$$

Model (1) doğrusal hali aşağıdaki gibi çevrilebilir (Model 2):

$$\min \xi \quad (4)$$

$$|W_B - W_j a_{Bj}| \leq \xi \quad (5)$$

$$|W_j - W_W a_{Wj}| \leq \xi \quad (6)$$

$$\sum_j W_j = 1 \quad (7)$$

$$W_j \geq 0, \forall j, j = 1, 2, \dots, J \quad (8)$$

Model 2'nin çözümü ile kriter ağırlıkları ve ξ elde edilir.

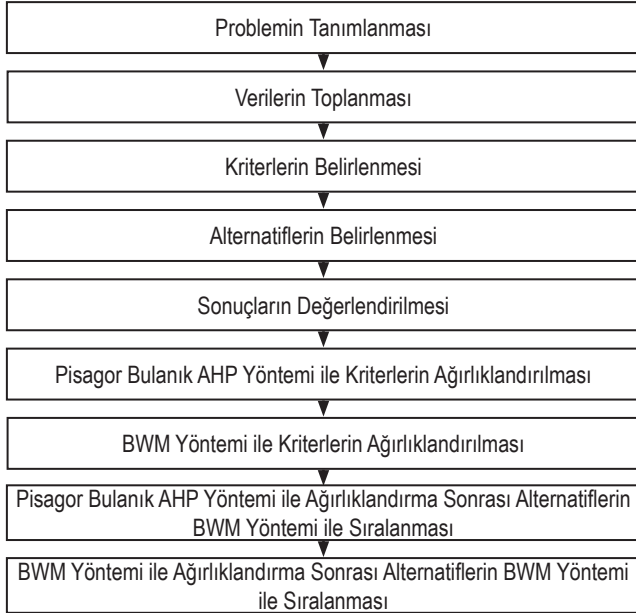
Şekil 3. BWM adımları (BWM steps).

ürün ve uygulama alanları arasından en uygun seçimin yapılması amaçlanmıştır. Literatür ve uzman görüşleri doğrultusunda belirlenen yedi değerlendirme kriterinin ağırlıkları, belirsizliği daha esnek bir biçimde temsil edebilme yeteneği nedeniyle Pisagor bulanık yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır [21]. Alternatiflerin sıralanmasında ise daha az karşılaştırma gerektirmesi ve yüksek tutarlılık sağlanması nedeniyle BWM tercih edilmiştir [25]. Böylece bor temelli alternatifler hem kriterlerin göreceli önemleri hem de belirsizlik içeren uzman değerlendirmeleri dikkate alınarak bütüncül

Tablo 4. Tutarlılık indeksi (Consistency index.) [24].

aBw	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Tutarlılık İndeksi (max ξ)	0,00	0,44	1,00	1,63	2,30	3,00	3,73	4,47	5,23

bir karar verme çerçevesinde analiz edilmiştir. Bu çalışmada izlenen uygulama süreci, problemin tanımlanmasından sonuçların değerlendirilmesine kadar uzanan aşamalardan oluşmaktadır. Çalışmanın genel iş akışı, izlenen adımların daha açık biçimde gösterilebilmesi amacıyla şematik olarak sunulmuştur. Uygulama sürecine ait aşamalar Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 4. Uygulama süreci (Implementation process).

4.1. Problemin Tanımlanması (Defining the Problem)

Türkiye, dünya bor rezervlerinin önemli bir bölümüne sahip olmasına rağmen, bu stratejik kaynağın hangi kullanım alanlarında daha yüksek ekonomik ve stratejik fayda sağlayacağına ilişkin sistematik ve analitik bir önceliklendirme yaklaşımına sahip değildir. Bor madeninin savunma sanayisi, enerji sistemleri ve ileri malzemeler gibi yüksek katma değerli sektörlerde kullanım potansiyeli bulunmasına karşın, bu alanlar arasında rasyonel bir tercih yapılmasını zorlaştıran çok sayıda kriter söz konusudur. Söz konusu kriterler; ekonomik getiri, stratejik önem, teknolojik uygulanabilirlik ve sürdürülebilirlik gibi birbirleriyle etkileşimli ve çoğu zaman çelişen unsurlardan oluşmaktadır.

Bor madeninin stratejik kullanım alanlarının değerlendirilmesi süreci büyük ölçüde uzman görüşlerine dayanmaktadır. Ancak bu görüşler, belirsizlik ve öznel yargılar içermekte olup, karar verme sürecinde kesin sayısal ifadelerle temsil edilmesi güçtür. Bu durum, özellikle uzun vadeli ve stratejik sonuçlar doğurabilecek sektör seçimlerinde karar kalitesini doğrudan etkilemektedir. Dolayısıyla, bor madeninin kullanım alanlarının değerlendirilmesinde belirsizliğin karar sürecine daha esnek ve gerçekçi biçimde dâhil edilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmanın temel problemi; bor madeninin farklı stratejik kullanım alanlarının, belirsizlik içeren ÇKKV yapısı altında, kriterlerin göreceli önemleri ve alternatiflerin öncelik sıralamaları dikkate alınarak tutarlı ve analitik bir biçimde değerlendirilmesidir. Bu kapsamda, hem belirsizliği daha etkin temsil edebilen hem de karar vericiden daha az karşılaştırma talep ederek tutarlılığı yüksek sonuçlar üreten yöntemlere dayalı bir değerlendirme çerçevesinin oluşturulması amaçlanmaktadır.

4.2. Verilerin Toplanması (Collection of Data)

Bu çalışmada kullanılan veriler, bor madeninin stratejik kullanım alanlarına ilişkin literatür incelemesi ve alanında deneyimli uzmanlardan elde edilen görüşler doğrultusunda oluşturulmuştur. Literatür incelemesi, borun savunma sanayisi, enerji ve ileri teknoloji alanlarındaki kullanım potansiyelinin belirlenmesine yönelik bir çerçeve oluşturmak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Karar problemine ilişkin değerlendirmeler, ilgili alanlarda uzman kişilerin sunduğu dilsel yargılara dayanmaktadır. Uzman görüşlerinde yer alan belirsizliğin karar verme sürecine daha etkin biçimde yansıtılabilmesi amacıyla, elde edilen veriler Pisagor bulanık yaklaşım kapsamında modellenmiştir. Alternatiflerin önceliklendirilmesine yönelik karşılaştırmalar, BWM kapsamında gerekli olan veri yapısına uygun şekilde araştırmacı tarafından oluşturulmuştur. Bu çalışmada kriterlerin değerlendirilmesi ve karşılaştırma matrislerinin oluşturulması amacıyla alanında deneyime sahip uzman görüşlerinden yararlanılmıştır. Uzmanlar savunma sanayisi, malzeme mühendisliği ve endüstri mühendisliği alanlarında deneyime sahip kişiler arasından seçilmiştir. Uzmanlardan elde edilen bilgiler yapılandırılmış ve elde edilen dilsel ifadeler Pisagor bulanık sayılar kullanılarak modele aktarılmıştır. Bu sayede karar vericilerin belirsizlik içeren yargıları daha gerçekçi bir şekilde analiz sürecine dahil edilmiştir.

4.3. Kriterlerin Belirlenmesi (Defining the Criteria)

Bu çalışmada kullanılan değerlendirme kriterleri literatür incelemesi ve uzman görüşleri doğrultusunda belirlenmiştir. Bor madeninin stratejik kullanım alanlarının çok kriterli ve belirsizlik içeren bir yapıya sahip olması nedeniyle, belirlenen kriterlerin göreceli önemlerinin hesaplanmasında Pisagor Bulanık AHP ve BWM yöntemlerinden yararlanılmıştır. Kriterler Tablo 5'te sunulmaktadır.

4.4. Alternatiflerin Belirlenmesi (Identifying Alternatives)

Bu çalışmada değerlendirilecek alternatifler, bor madeninin ileri teknoloji savunma sistemlerindeki kullanım potansiyeli ve literatürde yer alan zırh malzemesi geliştirme çalışmaları dikkate alınarak belirlenmiştir. Seçilen alternatifler Tablo 6'da detaylandırılmıştır.

Tablo 5. Kriterler tablosu (Criteria table).

Kriterler	Açıklamalar
Yerli Üretim Oranı / Stratejik Bağımsızlık (K1)	Savunma sanayinde dışa bağımlılığın azaltılması; borun yerli kaynaklarla üretilme imkânı nedeniyle önemli bir karar kriteridir [26].
Üretim Maliyeti (K2)	Malzemenin hammaddeden nihai ürüne dönüşüm maliyeti; enerji, ekipman ve işçilik maliyetlerini içerir ve toplam yatırım kararını etkiler [27].
İşlenebilirlik (K3)	Bor türevleri genelde yüksek sertlik nedeniyle işlenmesi zor malzemelerdir. Üretim süreci için şekillendirilebilirlik önemli bir parametredir (Uzman görüşü).
Isıl Dayanım (K4)	Yüksek sıcaklıklarda dayanım; roket motoru parçaları, nükleer uygulamalar ve termal koruma sistemleri için belirleyici bir özelliktir [28].
Hammadde Erişilebilirliği (K5)	Bor oksit, bor karbür tozu ve bor fiber gibi hammaddelerin temin edilebilirliği üretim sürekliliğini belirler. Türkiye’de bor rezervlerinin geniş olması bu kriteri güçlendirir [29].
Balistik/Zırh Dayanımı (K6)	Bor karbür (B_4C) ve bor türevlerinin özellikle yüksek sertlikleri nedeniyle zırh sistemlerinde tercih edildiği bilinmektedir. Bu nedenle malzemenin penetrasyon direnci kritik bir kriterdir [30].
Çevresel Etki (K7)	Üretim sırasında oluşan atık, emisyon ve sürdürülebilirlik etkileri çevresel kriterler kapsamında değerlendirilir [31].

4.5. Pisagor Bulanık AHP ile Kriterlerin Ağırlıklandırılması (Weighting of Criteria with Pythagorean Fuzzy AHP)

Pisagor Bulanık AHP yöntemi çerçevesinde, belirlenen yedi değerlendirme kriterinin (Tablo 5) birbirine göre önceliklerini saptamak amacıyla uzman görüşlerine başvurulmuştur. Karar vericiler tarafından gerçekleştirilen bu değerlendirmeler, belirsizliklerin modele dahil edilebilmesi için dilsel ifadeler (Tablo 2 ve 3) aracılığıyla toplanmış ve ardından Pisagor bulanık sayılara dönüştürülmüştür. Uzman değerlendirmelerine dayalı olarak oluşturulan ve kriterler arasındaki göreceli üstünlükleri yansıtan temel veri setini oluşturan Pisagor Bulanık İkili Karşılaştırma Matrisi Tablo 7’de sunulmaktadır.

Söz konusu tabloda, yedi değerlendirme kriteri arasındaki göreceli önem ilişkileri Pisagor bulanık sayılar aracılığıyla ifade edilmiştir. İkili karşılaştırma matrisi, kriterler arasındaki belirsizlikleri ve göreceli üstünlükleri yansıtacak şekilde oluşturulmuş olup, Pisagor Bulanık AHP yönteminin temel girdisini oluşturmaktadır.

İkili karşılaştırma matrisinden elde edilen Pisagor bulanık değerler kullanılarak gerçekleştirilen hesaplamalar sonucunda kriterlerin normalize edilmiş ağırlıkları belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar Tablo 8’de sunulmuştur.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde bazı kriterlerin diğerlerine göre daha yüksek ağırlık değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, savunma sanayisi uygulamalarında performans, dayanıklılık ve güvenilirlik gibi faktörlerin kritik öneme sahip

Tablo 6. Alternatifler tablosu (Table of alternatives).

Alternatifler	Açıklamalar
Silisyum Karbür (SiC) (A1)	Silisyum karbür, yüksek sertlik ve ısıl dayanım özellikleri sayesinde savunma sanayiinde balistik zırh sistemlerinde kullanılan ileri seramik malzemelerden biridir. Bor karbürle kıyasla daha yüksek yoğunluğa sahip olmasına rağmen, üretim süreçlerinin daha yaygın ve olgun olması nedeniyle maliyet açısından avantaj sağlamaktadır. Özellikle zırh plakaları ve yüksek sıcaklığa maruz kalan savunma bileşenlerinde etkili bir alternatif olarak değerlendirilmektedir [32].
Alümina (Al_2O_3) Seramikleri (A2)	Alümina seramikler, üretim kolaylığı ve görece düşük maliyetleri nedeniyle balistik koruma uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Sertliği bor karbür ve silisyum karbürle göre daha düşük olmakla birlikte, uygun tasarım ve kalınlıklarda yeterli balistik dayanım sağlayabilmektedir. Türkiye’de seramik sanayisinin gelişmiş olması, alüminayı yerli üretim ve ham madde erişilebilirliği açısından avantajlı bir alternatif hâline getirmektedir [33].
Aramid Elyaf/ UHMWPE Kompozitleri (A3)	Aramid elyaflar ve ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UHMWPE) esaslı kompozit malzemeler, hafiflik ve darbe sönümleme kabiliyetleri sayesinde özellikle kişisel balistik koruma sistemlerinde tercih edilmektedir. Bu malzemeler, seramik zırhlarla birlikte kompozit yapılar oluşturularak sistemin toplam ağırlığının azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Hareket kabiliyetinin kritik olduğu savunma uygulamalarında önemli avantajlar sunduğu belirtilmektedir [34].
Bor Karbür (B_4C) Seramikleri (A4)	Bor karbür, çok yüksek sertliği ve düşük yoğunluğu nedeniyle balistik zırh uygulamalarında en kritik ileri seramik malzemelerden biridir. Özellikle askeri zırh sistemlerinde penetrasyon direncinin artırılmasında etkin rol oynadığı literatürde ifade edilmektedir [30, 18].
Bor Esaslı Kompozit Seramikler (A5)	Bor bileşikleri içeren kompozit seramikler, klasik seramik malzemelere kıyasla daha yüksek mekanik dayanım ve termal stabilite sunmaktadır. Bu tür malzemelerin savunma sanayiinde yüksek performanslı koruyucu sistemlerde kullanılabileceği belirtilmektedir [28, 32].
Bor Takviyeli Metal Matrisli Kompozitler (A6)	Bor takviyeli metal matrisli kompozitler, metal malzemelerin süneklik avantajı ile bor bileşiklerinin sertlik ve dayanım özelliklerini bir araya getirmektedir. Bu malzemelerin, savunma sanayiinde yapısal ve koruyucu uygulamalarda potansiyel sunduğu literatürde vurgulanmaktadır [35, 26].

olmasından kaynaklanmaktadır. Özellikle yüksek ağırlık değerine sahip kriterler, savunma sistemlerinde kullanılan malzemelerin operasyonel performansını

Tablo 7. İkili karşılaştırma matrisi (Pairwise comparison matrix).

Kriterler	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
K1	E	O	OÜ	OA	O	D	Y
K2	O	E	O	D	OA	D	OÜ
K3	OA	O	E	ÇD	D	ÇD	O
K4	OÜ	Y	ÇY	E	O	O	ÇY
K5	O	OÜ	Y	O	E	OA	ÇY
K6	Y	Y	ÇY	O	OÜ	E	KY
K7	D	OA	O	ÇD	ÇD	KD	E

Tablo 8. Kriter ağırlıkları (Criterion weights).

Kriterler	Ağırlıklar
K6	0,374
K4	0,252
K5	0,171
K1	0,086
K2	0,052
K3	0,037
K7	0,029

doğrudan etkileyen özellikleri temsil etmektedir. Bu nedenle söz konusu kriterlerin karar modelinde daha belirleyici bir rol üstlenmesi beklenen bir sonuç olarak değerlendirilmektedir.

Yöntem uygulaması sonucunda kriter ağırlıkları belirlenmiştir. 0,374 ile en yüksek ağırlık Balistik Dayanımı (K6) kriterine ait olduğu görülmüştür. Balistik dayanımının, çalışmanın temel odak noktasını oluşturan güvenlik ve performans parametrelerini doğrudan etkilemesi sebebiyle en yüksek orana sahip olması şaşırtıcı olmamıştır. Hemen arkasından gelen Isıl Dayanım (K4) kriterinin ağırlığı ise ilk sırada yer alan kriterle oldukça yakındır. Bu iki kriterin toplam ağırlığın yarısından fazlasını oluşturması, sistemin ekstrem dış koşullara karşı direncinin en temel öncelik olduğunu göstermektedir. Devamında sırasıyla Hammade Erişebilirliği (K5) ve Yerli Üretim Oranı-Stratejik Bağımsızlık (K1) kriterleri gelmektedir. Bu iki kriterin ağırlık olarak birbirine yakın seyretmesi (0,171 ve 0,086), sürdürülebilir bir tedarik zinciri ile stratejik özerkliğin birbiriyle bağlantılı ve eş değer öneme sahip iki yetkinlik olarak ele alındığını kanıtlamaktadır. Ardından 5. sırada Üretim Maliyeti (K2) gelmektedir. Maliyetin performans kriterlerine göre daha geride kalması, projenin bütçe odaklı olmaktan ziyade nitelik odaklı yürütüldüğünü gözler önüne sermektedir. Son olarak İşlenebilirlik (K3) ve Çevresel Etki (K7) kriterlerinin en son sırada yer aldığı görülmektedir. Özellikle bu iki kriterin ağırlıklarının diğerlerine göre oldukça düşük çıkması, mevcut karar verme sürecinde operasyonel kolaylık ve çevresel faktörlerin ikincil planda tutulduğunu göstermektedir. Tüm değerlendirmeler sonucunda, ağırlık dağılımının yüksek teknoloji ve stratejik öneme sahip bir ürün seçimi profiliyle tutarlı olduğu ve yöntemin gerçek hayat beklentilerini yansıttığı gözlemlenmektedir.

Pisagor Bulanık AHP yöntemiyle elde edilen kriter ağırlıklarının güvenilirliğini test etmek amacıyla tutarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte, uzman değerlendirmelerinden oluşan ikili karşılaştırma matrisleri durulaştırılarak net değerlere dönüştürülmüş ve matrisin en büyük özdeğerine dayalı olarak Tutarlılık İndeksi (CI) hesaplanmıştır. Nihai Tutarlılık Oranı (CR), bu indeksin Rastgele İndeks (RI) değerine oranlanmasıyla elde edilmiştir.

Yapılan hesaplamalar sonucunda Pisagor Bulanık AHP modeli için elde edilen tutarlılık sonuçları Tablo 9' da

sunulmuştur. Elde edilen CR=0,078 değeri, literatürde kabul gören üst sınır olan 0,10'un altında kaldığı için (CR < 0,10) yapılan değerlendirmelerin tutarlı olduğu ve analiz sonuçlarının akademik olarak geçerli olduğu kanıtlanmıştır.

Tablo 9. Pisagor Bulanık AHP kriter değerlendirme tutarlılık analizi sonuçları (Pythagorean Fuzzy AHP criteria evaluation consistency analysis results).

Analiz Parametresi	Hesaplanan Değer
En Büyük Özdeğer (λ_{max})	7,624
Tutarlılık İndeksi (CI)	0,104
Rastgele İndeksi (RI, n=7 için)	1,320
Tutarlılık Oranı (CR)	0,078

4.6. BWM ile Kriterlerin Ağırlıklandırılması (Weighting Criteria with BWM)

BWM yönteminin uygulama aşamasında, öncelikle belirlenen yedi kriter arasından en iyi ve en kötü kriterler seçilmiştir. Ardından, bu kriterlerin diğer kriterlerle olan ikili karşılaştırmaları yapılarak sistemin girdi verileri oluşturulmuştur. Yapılan analizler sonucunda elde edilen en iyi/en kötü kriter seçimleri, vektörel karşılaştırma değerleri ve kriterlerin nihai ağırlık katsayıları Tablo 10'da toplu olarak sunulmuştur.

Tablo 10. BWM ile kriterlerin ağırlıklandırılması (Weighting criteria with BWM).

Kriter Numarası = 7	Kriter 1	Kriter 2	Kriter 3	Kriter 4	Kriter 5	Kriter 6	Kriter 7
Kriterlerin İsimleri	Yerli Üretim Oranı / Stratejik Bağımsızlık	Üretim Maliyeti	İşlenebilirlik	Isıl Dayanım	Hammade Erişebilirliği	Balistik/ Zırh Dayanımı	Çevresel Etki
En İyisini Seç	K6						
En Kötüsünü Seç	K7						
Diğerlerine							
En İyi Başarılar	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
K6	4	5	6	2	3	1	7
Diğerlerinden							
En Kötü Duruma	K7						
K1	4						
K2	3						
K3	2						
K4	6						
K5	5						
K6	7						
K7	1						
Ağırlıklar	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
ξ^*	0,1045	0,0836	0,0697	0,2091	0,1394	0,3526	0,0410
Girdiye Dayalı CR	0,21428571						
İlgili Eşik	0,3144						

Elde edilen BWM sonuçları incelendiğinde, kriterler arasında belirgin bir ağırlık farklılaşmasının ortaya çıktığı görülmektedir. Bu durum, özellikle savunma sanayisi uygulamalarında performans, dayanıklılık ve güvenilirlik gibi teknik parametrelerin karar verme sürecinde öncelikli olarak ele alındığını göstermektedir. Analiz sonuçlarına göre en yüksek ağırlık değeri 0,3526 ile Balistik/Zırh Dayanımı (K6) kriterine ait olup bu kriterin çalışmanın temel amacını oluşturan güvenlik ve operasyonel performans gereksinimlerini doğrudan etkilemesi nedeniyle ön plana çıkması beklenen bir sonuçtur. Bunu Isıl Dayanım (K4) (0,2091) kriteri izlemekte ve bu iki kriterin toplam ağırlığın önemli bir kısmını oluşturması, sistemin zorlu çevresel ve operasyonel koşullara karşı direncinin en kritik öncelik olduğunu ortaya koymaktadır. Devamında Hammaddede Erişilebilirliği (K5) (0,1394) ve Yerli Üretim Oranı / Stratejik Bağımsızlık (K1) (0,1045) kriterlerinin geldiği görülmekte olup bu durum sürdürülebilir tedarik zinciri ile stratejik özerkliğin karar sürecinde birbirini tamamlayan unsurlar olarak değerlendirildiğini göstermektedir. Üretim Maliyeti (K2) (0,0836) kriterinin daha düşük bir ağırlıkta kalması, çalışmanın maliyet odaklı olmaktan ziyade performans ve güvenlik odaklı bir yaklaşımla ele alındığını ortaya koymaktadır. Son olarak İşlenebilirlik (K3) (0,0697) ve özellikle en düşük ağırlığa sahip olan Çevresel Etki (K7) (0,0410) kriterlerinin karar modelinde ikincil planda değerlendirildiği anlaşılmaktadır. Tutarlılık analizi kapsamında elde edilen ξ^* değerinin 0,0656 olması ve tutarlılık oranının (CR = 0,2143) belirlenen eşik değer (0,3144) altında kalması, yapılan karşılaştırmaların kabul edilebilir düzeyde tutarlı olduğunu göstermektedir.

Çalışmanın bu aşamasında, savunma sanayisinde bor kullanımına yönelik belirlenen kriterlerin önem dereceleri hem Pisagor Bulanık AHP hem de BWM kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan analizler sonucunda elde edilen kriter ağırlıkları, karar verme sürecinin nesnellliğini ve tutarlılığını doğrulamak adına karşılaştırılmıştır.

Tablo 11’de görüleceği üzere, her iki yöntemden elde edilen ağırlıklar birbiriyle yüksek oranda örtüşmektedir. Pisagor Bulanık-AHP (PB-AHP) sonuçlarına göre en kritik öneme sahip olan kriterler, BWM yönteminde de benzer ağırlıklarla ön plana çıkmaktadır.

Tablo 11. Pisagor Bulanık AHP ve BWM yöntemi ile kriterlerin sıralanması (Ranking criteria using Pythagorean, Fuzzy AHP and BWM methods).

Kriterler	PB-AHP Ağırlıkları	BWM Ağırlıkları
K1	0,086	0,105
K2	0,052	0,083
K3	0,037	0,069
K4	0,252	0,209
K5	0,171	0,139
K6	0,374	0,352
K7	0,029	0,041

Bu durum, uzman görüşlerinin tutarlı bir şekilde modellendiğini ve kriter ağırlıklarının alternatiflerin sıralanması için güvenilir bir temel oluşturduğunu kanıtlamaktadır.

4.7. Pisagor Bulanık AHP ile Ağırlıklandırma Sonrası Alternatiflerin BWM ile Sıralanması (Ranking of Alternatives with BWM Following the Pythagorean Fuzzy AHP Weighting Process)

Bu çalışmada, Pisagor Bulanık AHP yöntemi kullanılarak elde edilen kriter ağırlıkları sabit kabul edilerek bor madeninin savunma sanayisindeki kullanımına yönelik belirlenen alternatiflerin sıralanması gerçekleştirilmiştir. Alternatiflerin değerlendirilmesi ve önceliklendirilmesi aşamasında, daha az karşılaştırma gerektirmesi ve yüksek tutarlılık sağlaması nedeniyle BWM yöntemi kullanılmıştır. Bu kapsamda, alternatiflere ait karar matrisi oluşturulmuş, kriter ağırlıkları dikkate alınarak ağırlıklı karar matrisi elde edilmiş ve alternatiflerin nihai sıralaması belirlenmiştir.

Alternatiflerin değerlendirilmesi amacıyla, belirlenen kriterlere göre performans düzeylerini yansıtan karar matrisi oluşturulmuştur. Bu matriste, literatür incelemesi ve uzman görüşleri doğrultusunda yapılan puanlamalar 1-9 aralığında gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan karar matrisi Tablo 12’de verilmiştir.

Tablo 12. Karar matrisi (Decision matrix)

		Kriterler						
		K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
Alternatifler	A1	6	4	3	9	5	8	6
	A2	9	8	7	6	9	6	7
	A3	5	5	8	4	6	9	8
	A4	7	3	4	9	6	9	5
	A5	6	4	5	8	6	8	6
	A6	6	5	6	7	7	7	6

Karar matrisinde yer alan alternatif puanları, Pisagor Bulanık AHP yöntemiyle elde edilen kriter ağırlıkları kullanılarak her bir alternatif her bir kriter ağırlığı ile tek tek çarpılarak ağırlıklı karar matrisi oluşturulmuştur. Bu işlem sonucunda, her bir alternatifin kriterler bazındaki ağırlıklı performans değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen ağırlıklı karar matrisi Tablo 13’te sunulmuştur.

Tablo 13. Ağırlıklı karar matrisi (Weighted decision matrix).

Alternatifler	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
A1	0,516	0,208	0,111	2,268	0,855	2,992	0,174
A2	0,774	0,416	0,259	1,512	1,539	2,244	0,203
A3	0,430	0,260	0,296	1,008	1,026	3,366	0,232
A4	0,602	0,156	0,148	2,268	1,026	3,366	0,145
A5	0,516	0,208	0,185	2,016	1,026	2,992	0,174
A6	0,516	0,26	0,222	1,764	1,197	2,618	0,174

Ağırlıklı karar matrisinden elde edilen değerler kullanılarak alternatifin kriter bazındaki ağırlıklı performans değerleri satırlar toplanarak hesaplanmıştır. Alternatifler bu skorlara göre sıralanmıştır. Elde edilen nihai sıralama Tablo 14'te verilmiştir.

Tablo 14. Alternatiflerin nihai sıralaması (Final ranking of alternatives).

Alternatifler	Toplam Skor	Sıralama
A4	7,711	1
A1	7,124	2
A5	7,117	3
A2	6,947	4
A6	6,751	5
A3	6,618	6

Elde edilen toplam skorlar doğrultusunda alternatiflerin sıralaması incelendiğinde, A4 alternatifinin 7,711 değeri ile en yüksek performansı göstererek ilk sırada yer aldığı görülmektedir. Bu durum, A4'ün belirlenen kriterler açısından genel olarak en dengeli ve üstün performansa sahip olduğunu ortaya koymaktadır. A1 (7,124) ve A5 (7,117) alternatiflerinin birbirine oldukça yakın skorlarla ikinci ve üçüncü sırada yer alması, bu iki alternatifin performans açısından benzer özellikler sergilediğini ve aralarındaki farkın sınırlı olduğunu göstermektedir. Orta sıralarda bulunan A2 (6,947) ve A6 (6,751) alternatiflerinin ise üst gruba kıyasla daha düşük, ancak birbirlerine görece yakın performans değerlerine sahip olduğu dikkat çekmektedir. Son sırada yer alan A3 (6,618) alternatifinin en düşük toplam skoru elde etmesi, belirlenen kriterler kapsamında diğer alternatiflere göre daha zayıf kaldığını ifade etmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, alternatifler arasında belirgin bir performans farkı bulunmakla birlikte, özellikle üst sıralarda yer alan alternatiflerin birbirine yakın skorlar üretmesi karar verme sürecinde hassas bir ayırım yapıldığını ve kullanılan yöntemin ayırt edici bir yapı sunduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada değerlendirilen alternatiflerin belirlenmesi ve sıralanması sürecinde, savunma sanayisinde kullanılan modern balistik koruma sistemleri, ileri seramik ve kompozit malzemelere ait teknik karakteristikler esas alınmıştır. Pisagor bulanık AHP'den gelen ağırlıklar kullanılarak tablolar oluşturulmuştur. Alternatiflerin değerlendirilmesinde; balistik dayanım, mekanik mukavemet, ısıl kararlılık, ağırlık, üretilebilirlik ve maliyet gibi kriterler dikkate alınmış; bu kriterlere ilişkin performans değerleri literatürde yer alan çalışmalar ve uzman görüşleri doğrultusunda oluşturulan karar matrisi aracılığıyla analiz edilmiştir [18, 33, 30, 34, 32]. Pisagor Bulanık AHP yöntemi kullanılarak elde edilen kriter ağırlıkları sabit kabul edilmiş, alternatiflerin göreceli üstünlükleri ise BWM yöntemi ile belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, bor esaslı ileri seramik ve kompozit malzemelerin savunma sanayisinde yüksek performanslı, hafif ve stratejik uygulamalar açısından öne çıktığını göstermektedir [26, 28, 30, 36].

4.8. Kriterlerin BWM ile Ağırlıklandırılması Sonrası Alternatiflerin BWM ile Sıralanması (Ranking of Alternatives with BWM Following the Criteria Weighting Process)

Bu çalışmada, BWM yöntemi kullanılarak elde edilen kriter ağırlıkları belirlenmiş ve bor madeninin savunma sanayisindeki kullanımına yönelik belirlenen alternatiflerin sıralanması gerçekleştirilmiştir. Alternatiflerin değerlendirilmesi ve önceliklendirilmesi sürecinde, daha az karşılaştırma gerektirmesi ve yüksek tutarlılık sağlaması nedeniyle yine BWM yaklaşımı tercih edilmiştir. Bu doğrultuda, alternatiflere ilişkin karar matrisi oluşturulmuş, kriter ağırlıkları dikkate alınarak ağırlıklı karar matrisi elde edilmiş ve nihai olarak alternatiflerin genel sıralaması belirlenmiştir.

Alternatiflerin değerlendirilmesi amacıyla, belirlenen kriterlere göre performans düzeylerini yansıtan karar matrisi oluşturulmuştur. Bu matriste, literatür incelemesi ve uzman görüşleri doğrultusunda yapılan puanlamalar 1-9 aralığında gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan karar matrisi Tablo 15'te verilmiştir.

Tablo 15. Karar matrisi (Decision matrix).

		Kriterler						
		K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
Alternatifler	A1	6	4	3	9	5	8	6
	A2	9	8	7	6	9	6	7
	A3	5	5	8	4	6	9	8
	A4	7	3	4	9	6	9	5
	A5	6	4	5	8	6	8	6
	A6	6	5	6	7	7	7	6

Karar matrisinde yer alan alternatif puanları, BWM yöntemiyle elde edilen kriter ağırlıkları kullanılarak her bir alternatif her bir kriter ağırlığı ile tek tek çarpılarak ağırlıklı karar matrisi oluşturulmuştur. Bu işlem sonucunda, her bir alternatifin kriterler bazındaki ağırlıklı performans değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen ağırlıklı karar matrisi Tablo 16'da sunulmuştur.

Tablo 16. Ağırlıklı karar matrisi (Weighted decision matrix).

		Kriterler						
		K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
Alternatifler	A1	0,6273	0,3345	0,2091	1,8819	0,6970	2,8208	0,2460
	A2	0,9409	0,6691	0,4879	1,2546	1,2546	2,1156	0,2870
	A3	0,5227	0,4182	0,5576	0,8364	0,8364	3,1734	0,3280
	A4	0,7318	0,2509	0,2788	1,8819	0,8364	3,1734	0,2050
	A5	0,6273	0,3345	0,3485	1,6728	0,8364	2,8208	0,2460
	A6	0,6273	0,4182	0,4182	1,4637	0,9758	2,4682	0,2460

Ağırlıklı karar matrisinden elde edilen değerler kullanılarak alternatifin kriter bazındaki ağırlıklı performans değerleri satırlar toplanarak hesaplanmıştır.

Alternatifler bu skorlara göre sıralanmıştır. Elde edilen nihai sıralama Tablo 17'de verilmiştir.

Tablo 17. Alternatiflerin nihai sıralaması (Final ranking of alternatives).

Alternatifler	Sıralama	Sıralama
A4	7,358	1
A2	7,009	2
A5	6,886	3
A1	6,816	4
A3	6,672	5
A6	6,617	6

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, alternatifler arasında belirli bir performans farklılaşmasının olduğu görülmektedir. Toplam skorlar açısından A4 (7,3583) alternatifinin en yüksek değere sahip olduğu ve bu doğrultuda en iyi performansı gösterdiği anlaşılmaktadır. Bu durum, A4'ün belirlenen kriterler kapsamında diğer alternatiflere kıyasla daha dengeli ve üstün bir profil sergilediğini göstermektedir. A4'ü sırasıyla A2 (7,009) ve A5 (6,886) alternatifleri takip etmekte olup, bu alternatiflerin de yüksek performans grubunda yer aldığı söylenebilir. Orta seviyede değerlendirilebilecek alternatifler arasında A1 (6,816) bulunurken, daha düşük skor değerlerine sahip olan A3 (6,672) ve A6 (6,617) alternatiflerinin ise diğerlerine kıyasla daha sınırlı bir performans ortaya koyduğu görülmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, alternatifler arasında çok büyük farklar bulunmamakla birlikte özellikle üst sıralarda yer alan alternatiflerin daha belirgin şekilde öne çıktığı ve karar verme sürecinde tercih edilebilirliklerinin daha yüksek olduğu ifade edilebilir.

5. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussion)

Bu çalışmada, bor madeninin savunma sanayisindeki stratejik kullanım alanlarının ÇKKV çerçevesinde değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, kriter ağırlıkları Pisagor Bulanık AHP ve BWM kullanılarak belirlenmiş; alternatiflerin önceliklendirilmesi ise bu ağırlıklar temel alınarak gerçekleştirilmiştir. Karar verme sürecinde uzman görüşlerinde yer alan belirsizlikleri ve karar vericilerin tereddütlerini daha esnek bir yapıda modelleyebilmesi nedeniyle Pisagor Bulanık AHP yöntemiyle elde edilen ağırlıklar ve bu ağırlıklara dayalı sıralama (Tablo 14) çalışmanın temel bulgusu olarak esas alınmıştır. BWM yöntemiyle gerçekleştirilen analizler ise, temel bulgu olan Pisagor Bulanık AHP sonuçlarını test etmek ve yöntemsel sağlamlığı doğrulamak amacıyla bir kontrol mekanizması olarak kullanılmıştır. BWM, bu çalışmada alternatiflerin sıralanmasında doğrudan bir optimizasyon adımı olarak değil; karar vericiden daha az ikili karşılaştırma talep ederek yüksek tutarlılık sağlayan ağırlık katsayılarının elde edilmesinde kullanılmıştır. Elde edilen bu tutarlı ağırlıklar, "Ağırlıklı Toplam Yaklaşımı" çerçevesinde karar matrisine

uygulanarak alternatiflerin skorları hesaplanmış, böylece her iki yöntemin sonuçları aynı matematiksel zeminde karşılaştırılabilmiştir.

Çalışmanın sonuçları bütüncül olarak değerlendirildiğinde, her iki yöntemin de benzer bir eğilim sergilediği ve Bor Karbür (A4) alternatifinin her iki analizde de en yüksek performansı göstererek birinci sırada yer aldığı görülmektedir. Öncelikle kriter ağırlıkları incelendiğinde hem Pisagor Bulanık AHP hem de BWM sonuçlarında Balistik/Zırh Dayanımı (K6) kriterinin açık ara en yüksek öneme sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durum, savunma uygulamalarında güvenlik ve operasyonel performans gereksinimlerinin karar sürecinin temel belirleyicisi olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte Isıl Dayanım (K4), Hammadde Erişilebilirliği (K5) ve Yerli Üretim Oranı / Stratejik Bağımsızlık (K1) kriterlerinin de görece yüksek ağırlıklar alması, yalnızca teknik performansın değil aynı zamanda tedarik sürekliliği ve stratejik bağımsızlık gibi unsurların da önemli karar kriterleri arasında yer aldığını ortaya koymaktadır. Buna karşılık Üretim Maliyeti (K2), İşlenebilirlik (K3) ve özellikle Çevresel Etki (K7) kriterlerinin daha düşük ağırlıklara sahip olması, karar probleminin maliyet ve çevresel kaygılardan ziyade performans odaklı bir yaklaşımla ele alındığını göstermektedir.

Alternatiflerin değerlendirilmesi sonucunda, Bor Karbürün (A4) her iki senaryoda da ilk sırada yer alması (Pisagor Bulanık AHP skor: 7.711; BWM skor: 7.358), ulaşılan sonuçların kullanılan yöntemden bağımsız olarak yüksek güvenilirliğe sahip olduğunu kanıtlamaktadır. Bor karbürün yüksek sertlik değeri, düşük yoğunluğu ve üstün balistik dayanımı bu sonucu temellendiren başlıca faktörlerdir. Özellikle yüksek penetrasyon direnci ve hafif yapısı sayesinde zırh sistemlerinde ağırlık-performans optimizasyonu sağlaması, literatürdeki çalışmalarla da [23, 37] uyumludur. A4'ü takip eden alternatiflerin sıralamasında küçük farklılıklar olmakla birlikte, Silisyum Karbür (A1) ve Bor Esaslı Kompozit Seramikler (A5) üst sıralarda yer alarak savunma sanayisinde balistik ve yüksek sıcaklık uygulamalarında etkin malzemeler olduklarını doğrulamışlardır [32, 33]. Aramid/UHMWPE Kompozitleri (A3) ise her iki yöntemde de en düşük performans gösteren alternatifler arasında yer almıştır.

Sonuç olarak, Pisagor Bulanık AHP ve BWM yöntemlerinin entegre kullanımı, bor madeninin stratejik değerlendirilmesinde analitik bir çerçeve sunmuştur. Bu yaklaşım, literatürdeki betimsel çalışmaların ötesine geçerek; Türkiye'nin savunma sanayiinde dışa bağımlılığı azaltma hedefleriyle örtüşen, politika yapıcılar ve sektör temsilcileri için yatırım ve Ar-Ge stratejilerinde analitik bir rehber niteliği taşıyan somut bulgular ortaya koymaktadır.

6. Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

Kaynakça (References)

- [1] Yenmez, N. (2011). The importance of boron minerals in Turkey as a strategic mine. *Journal of Geography*, 19, 59-94. <https://izlik.org/JA69AH82FN>
- [2] Demirtaş, A. (2011). Boron compounds and their potential of use in agriculture. *Atatürk University Journal of Agricultural Faculty*, 37(1), 111-115. <https://izlik.org/JA94YW97LX>
- [3] Özkan, Ş. G., Tombal, T. D., Kurşun Ünver, İ., & Osmanlioğlu, A. E. (2016). Properties, production, uses of boron compounds and their importance in nuclear reactor technology. *Journal of Boron*, 1(2), 86-95. <https://izlik.org/JA66FZ26TG>
- [4] Polat, S. (2024). Design and operation of an electrochemical separation process for boron removal from aqueous solutions under continuous flow conditions. *Journal of Boron*, 9(4), 135-142. <https://doi.org/10.30728/boron.1524438>
- [5] Bilgiç, G., Balıkcıoğlu Güzel, A., & Şahin, M. (2024). Boron carbide: Physicochemical properties, synthesis and applications in defense technologies. *The Journal of Defence Sciences*, 20(1), 1-18. <https://doi.org/10.17134/khosbd.1403942>
- [6] Tokcan, S., & Gülmez, A. (2021). Examining of boron of disposability as substitution of oil in the line with Turkey's petroleum dependency. *International Journal of Economic Studies*, 7(1), 59-84. <https://izlik.org/JA52WF68UU>
- [7] Tokcan, S. (2021). *Examining of boron mine as an alternative energy source in Turkey* (Publication no. 696673) [Master's Thesis, Sakarya University]. Council of Higher Education
- [8] Eti Maden. (2025). 2024 Boron sector report. Department of Strategy Development. <https://www.etimaden.gov.tr/storage/2025/2024%20BOR%20SEKT%C3%96R%20RAPORU/2024%20YILI%20BOR%20SEKTOR%20RAPORU.pdf>
- [9] Coşkun, A., & Sarıışık, A. (2021). The effect of boron wastes on the mineralogical and thermal properties of pumice aggregate light mortars. *Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering*, 21(2), 408-425. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.851881>
- [10] Şanal, İ. (2020). Life cycle assessment of profile pipe production. (Publication No. 627592) [Master's thesis, Istanbul Technical University]. Council of Higher Education
- [11] Tunçbilek, Ö. F., & Nas, İ. (2025). Boron as a hydrogen storage method and its environmental impacts. *Journal of Boron*, 10(2), 85-94. <https://doi.org/10.30728/boron.1598573>
- [12] Zengin, A., Aka, B., Gençay, S., & Uzun, M. (2023). Boron and industrial applications. *European Journal of Science and Technology*, 46, 161-178. <https://doi.org/10.31590/ejosat.919451>
- [13] Polat, S. (2025). Optimization of boron removal process from aqueous solutions by electrochemical separation method. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 37(UYIK 2024 Special Issue), 88-95. <https://doi.org/10.7240/jeps.1531483>
- [14] Aksu, O. M., Abbak, S., & Özgül, M. (2022). Synthesis and properties of domestic boron doped BNT-BT lead-free piezoelectric ceramics. *Journal of Boron*, 7(3), 514-519. <https://doi.org/10.30728/boron.1150379>
- [15] Boylu, F., & Uslu, G. (2024). Occupational health and safety in boron mine. *Ondokuz Mayıs University Journal of Humanities*, 5(2), 135-56. <https://doi.org/10.51533/insanbilimleri.1595909>
- [16] Chamber of Mining Engineers. (2005). Bor raporu [Boron report]. Union of Chambers of Turkish Engineers and Architects. https://api2.maden.org.tr/uploads/portal/resimler/ekler/6358599b7afb250_ek.pdf
- [17] Öztürk, H. T. (2022). R&D and innovation systems in the Turkish defense industry. *Selçuk University Journal of Social and Technical Researches*, 20, 129-137. <https://izlik.org/JA34EJ89FM>
- [18] Ünal, Ö. F. (2011). The analytic hierarchy process and its applications in personnel selection. *International Journal of Alanya Faculty of Business*, 3(2), 18-38. <https://izlik.org/JA92WB89XT>
- [19] Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9-26. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)
- [20] Paksoy, T., & Öztürk, M. (2019). Supplier selection with interval type-2 fuzzy rule-based ahp approach. *Journal of Productivity*, 3, 115-141. <https://izlik.org/JA77LJ93AC>
- [21] Yager, R. R. (2013). *Pythagorean fuzzy subsets. Proceedings of the Joint IFSA World Congress and NAFIPS Annual Meeting (IFSA/NAFIPS)* (pp. 57-61). Institute of Electrics and Electronics Engineers. <https://doi.org/10.1109/IFSA-NAFIPS.2013.6608375>
- [22] Ilbahar, E., Karaşan, A., Çebi, S., & Kahraman, C. (2018). A novel approach to risk assessment for occupational health and safety using Pythagorean fuzzy AHP & fuzzy inference system. *Safety Science*, 103, 124-136. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.10.025>
- [23] Thevenot, F. (1990). Boron carbide-A comprehensive review. *Journal of the European Ceramic Society*, 6(4), 205-225. [https://doi.org/10.1016/0955-2219\(90\)90048-K](https://doi.org/10.1016/0955-2219(90)90048-K)
- [24] Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*, 53, 49-57. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.11.009>
- [25] Rezaei, J. (2016). Best-worst multi-criteria decision-making method: Some properties and a linear model. *Omega*, 64, 126-130. <http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2015.12.001>
- [26] Ersöz, F., & Kabak, M. (2010). A literature review of multiple criteria decision making methods at defence sector applications. *The Journal of Defense Sciences*, 9(1), 97-125. <https://izlik.org/JA46XD69RZ>
- [27] Yılmazcan, O. (2021). An application on cost and performance planning in manufacturing companies. *Journal of Business Research-Turk*, 13(2), 1666-1678. <https://doi.org/10.20491/isarder.2021.1222>
- [28] Antolovich, S. D., Busso, E. P., Skelton, P., & Telesman, J. (2016). High temperature materials for aerospace applications. *Materials at High Temperatures*, 33(4-5), 289-290. <https://doi.org/10.1080/09603409.2016.1206294>
- [29] Yiğitbaşıoğlu, H. (2004). An important ore for turkey:

- Boron. *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 2(2), 13-25. https://doi.org/10.1501/Cogbil_0000000046
- [30] Savio, S. G., Ramanjaneyulu, K., Madhu, V., & Balakrishna Bhat, T. (2011). An experimental study on ballistic performance of boron carbide tiles. *International Journal of Impact Engineering*, 38(7), 535-541. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2011.01.006>
- [31] Panagiotopoulou, V. C., Stavropoulos, P., & Chrysosouris, G. (2022). A critical review on the environmental impact of manufacturing: A holistic perspective. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 118, 603-625. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07980-w>
- [32] Zhambakin, D., Abilev, M., Zhilkashinova, A., Ichshanova, A., & Łatka, L. (2026). Silicon carbide ceramics for armor applications: A review of sintering methods and additive systems. *Molecules*, 31(7), 1185. <https://doi.org/10.3390/molecules31071185>
- [33] Silva, M. V., Stainer, D., Al-Qureshi, H. A., & Montedo, O. R. K. (2014). Alumina-based ceramics for armor application: Mechanical characterization and ballistic testing. *Journal of Ceramics*, 2014, 618154. <https://doi.org/10.1155/2014/618154>
- [34] Örcen, G., & Ateş, F. (2024). Ballistic impact response of hybrid composite plates. *European Journal of Technique*, 14(1), 8-16. <https://doi.org/10.36222/ejt.1406586>
- [35] Meignanamoorthy, M., Ravichandran, M., Mohanavel, V., Afzal, A., Sathish, T., Alamri, S., Khan, S. A., & Saleel, C. A. (2021). Microstructure, mechanical properties, and corrosion behavior of boron carbide reinforced aluminum alloy (Al-Fe-Si-Zn-Cu) matrix composites produced via powder metallurgy route. *Materials*, 14(15), 4315. <https://doi.org/10.3390/ma14154315>
- [36] European Commission. (2020). Critical raw materials for strategic technologies and sectors in the EU: A foresight study. *Publications Office of the European Union*. <https://data.europa.eu/doi/10.2873/58081>
- [37] Medvedovski, E. (2010). Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. Part 1. *Ceramics International*, 36(7), 2103-2115. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2010.05.021>