



Bor Karbür (B_4C) Katkılı Epoksi Esaslı Nanokompozitlerin Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleriyle Seçimi

Selection of Boron Carbide (B_4C) Doped Epoxy Based Nanocomposites by Multi-Criteria Decision Making Methods

Batuhan Özakin^{1*} , Kürşat Gültekin² , İlhan Çelik³ 

¹Samsun Üniversitesi, Kavak Meslek Yüksekokulu, Samsun, Türkiye

²Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye

³Samsun Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye

Öz

Ürün tasarlama ve geliştirilmesinde malzeme seçimi çok önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca kullanıcıların yüksek performans ve sürdürülebilirlik elde etmesi için doğru malzemenin seçimi büyük önem taşımaktadır. Ürün geliştirmede maksimum performansı ve minimum maliyeti sağlayan optimum malzemeyi seçmek gerekmektedir. Optimum malzemeyi seçmek için son zamanlarda çok kriterli karar verme yöntemleri tercih edilen yöntemler haline gelmiştir. Bu yöntemler sorunları küçük parçalara ayırarak analizler gerçekleştirip ardından parçaları bir araya getirip soruna etkili çözüm sunmaktadırlar. Bu çalışmada, epoksi esaslı reçineye ağırlıkça farklı oranlarda (%0.5, %1, %2, %3, %4, %5) hegzagonal bor karbür (B_4C) nanoparçacıkları eklenerek elde edilen nanokompozitlerin; çekme mukavemeti, şekil değiştirme kabiliyeti, depolama modülü, camı geçiş sıcaklığı (T_g), çapraz bağ yoğunluğu, tokluk ve fiyat özellikleri kullanılarak MOORA (oran analizine dayalı çok amaçlı optimizasyon) ve TOPSIS (ideal çözüme benzerliğe göre tercih sıralaması tekniği) çok kriterli karar verme yöntemleriyle malzeme seçimi gerçekleştirilmiştir. MOORA ve TOPSIS çok kriterli karar verme yöntemleriyle yapılan malzeme seçimlerinde ilk sırayı her iki yöntemde de ağırlıkça %2 oranında B_4C katkı epoksi nanokompozitin optimum malzeme olarak tercih edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Nanokompozitler, Malzeme seçimi, Çok kriterli karar verme yöntemleri, MOORA, TOPSIS

Abstract


Material selection plays a very important role in product design and development. In addition, the selection of the right material is of great importance for users to achieve high performance and sustainability. In product development, it is necessary to choose the optimum material that provides maximum performance and minimum cost. Recently, multi-criteria decision making methods have become the preferred methods to select the optimum material. These methods analyze the problems by breaking them into small parts, then put the parts together and offer an effective solution to the problem. In this study, nanocomposites obtained by adding hexagonal boron carbide (B_4C) nanoparticles in different weight ratios (0.5%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5%) to the epoxy-based resin; Material selection was carried out by using MOORA (Multi-Objective Optimization on the basis of Ratio Analysis) and TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity) multi-criteria decision making methods by using tensile strength, strain ability, storage modulus, glass transition temperature (T_g), crosslink density, toughness and price properties. It was concluded that 2% by weight B_4C added epoxy nanocomposite should be preferred as the optimum material in the material selections made by MOORA and TOPSIS multi-criteria decision making methods.

Keywords: Nanocomposites, Material selection, Multi-criteria decision making methods, MOORA, TOPSIS

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: batuhan.ozakin@samsun.edu.tr

Batuhan Özakin  orcid.org/0000-0003-1754-949X

Kürşat Gültekin  orcid.org/0000-0002-6790-6822

İlhan Çelik  orcid.org/0000-0001-6757-834X



1. Giriş

Tasarım sürecinin en önemli faaliyetlerden biri olan malzeme seçimi, 20 yılı aşkın süredir araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Uygun olmayan bir malzeme seçilmesi durumunda tasarım hasara uğrayarak performansı önemli ölçüde azaltmaktadır. Optimum malzemeyi seçmek için geleneksel olarak bilinen en düşük fiyatın etkili bir yaklaşım olmayabileceği tespit edildiğinden dolayı çok kriterli karar verme yöntemleri malzeme seçimi alanında son zamanlarda popüler uygulamalardan biri haline gelmiştir. Çok kriterli karar verme yöntemleri genel olarak alternatifler üretme, kriterler oluşturma, alternatiflerin değerlendirilmesi, kriter ağırlıklarının değerlendirilerek bir sıralama sisteminin uygulanmasından oluşmaktadır (Edwards 2005, Deng ve Edwards 2007, Jahan vd. 2011, Doumpos ve Zopounidis 2002, Rahim vd. 2020). Bu yöntemlerde karmaşık problemler küçük parçalara ayrılarak analizler yapıldıktan sonra, tüm parçalar bir araya getirilerek problemin tam görüntüsü meydana getirilmektedir (Ghaleb vd. 2020). Çok kriterli karar verme yöntemleri için geliştirilmiş teknikler arasında her tekniğin kendine özgü analiz modelleri, bilgi gereksinimleri, temel varsayımları ve kararları bulunmaktadır (Aruldoss vd. 2013). Literatürde araştırmacılar tarafından çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılarak malzeme seçimi yapılan birçok çalışma yer almaktadır. Athawale ve Chakraborty (2012), malzeme seçimi için en sık kullanılan çok kriterli karar verme yöntemlerinin sıralama performansını incelemişler ve VIKOR (çoklu kriter uzlaşma sıralaması) yönteminin hesaplama basitliği nedeniyle daha iyi bir performansa sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Karande vd. (2016) yaptıkları bir çalışmada, popüler olarak kullanılan çok kriterli karar verme yöntemlerini endüstriyel robot seçim problemine uygulamışlardır. MOORA (oran analizine dayalı çok amaçlı optimizasyon) yönteminin çarpımsal formunun en önemli ve kritik kriterlerinin değişen ağırlıklarından en az etkilenen ve en çarpıcı yöntem olduğunu tespit etmişlerdir. Patnaik vd. (2009), yapısal uygulamalarda malzeme seçimi için AHP (analitik hiyerarşi prosesi) ve TOPSIS (ideal çözüme benzerliğe göre tercih sıralaması tekniği) yöntemlerini kullanmışlardır. Sıralamayı kompozit malzemelerin yoğunluk, sertlik, çekme, eğilme, aşınma oranı ve darbe dayanımı özelliklerine göre belirlemişlerdir. Yapılan analizler sonucunda 400 gsm, %30 viskoz hasır kumaş takviyeli ve %15 yüksek fırın cürufu parçacık dolgululu epoksi kompozitlerinin en iyi sonucu verdiğini tespit etmişlerdir. Raju vd. (2020), alüminyum-hindistan cevizi kabuğu külü (CSA) kompozitlerinin en iyi oranını belirlemek için TOPSIS, AHP ve MOORA yöntemlerini entegre ederek sıralama çalışması yapmışlar-

dır. Al-1100 matrisi içerisine hacimce %5, %10, %15 ve %20 oranlarında CSA katkı kompozitleri döküm yöntemiyle üretmişlerdir. Üretilen kompozitlerin yoğunluk, sertlik, çekme mukavemeti, tokluk, aşınma hızı ve sürtünme katsayısı gibi özelliklerini kriter olarak ele almışlardır. Yapılan analizler sonucunda, %15 oranında CSA katkı kompoziti en iyi malzeme olarak belirlemişlerdir. Ayrıca, en zayıf performans gösteren malzeme olarak ise katkısız kompozitin olduğunu ifade etmişlerdir. Singh vd. (2021), çekme mukavemeti, sertlik, yoğunluk ve maliyet gibi parametreler ile çok kriterli karar verme yöntemlerini kullanarak alüminyum hibrit metal matris kompozitlerin seçilmesini AHP ve TOPSIS yöntemlerini kullanarak optimize etmişlerdir. Analizler sonucunda ise AA5083'ün tüm alüminyum hibrit metal matrisli kompozitler arasında istenilen özelliği elde etmek için en uygun matris malzemesi olduğunu belirtmişlerdir. Bhadra ve Dhar (2022), havacılık ve uzay araçlarında kabin içi uygulamalarında kullanılan on iki farklı doğal elyaf takviyeli polimer kompozit malzemeler arasından en iyi doğal elyafı belirlemek için bulanık AHP, TOPSIS, EDAS (ortalama çözüm) ve COPRAS (karmaşık oransal değerlendirme) yöntemlerini kullanmışlardır. Ayrıca, bu çok kriterli karar verme yöntemlerinin hassasiyetini değerlendirmeye çalışmışlardır. Kullanılan on iki alternatif arasında Bagas elyafının en uygun olduğunu ve ayrıca EDAS yönteminin diğer yöntemlere göre daha hassas olduğunu tespit etmişlerdir. Literatürde yer alan çalışmalar değerlendirildiğinde, çok kriterli karar verme yöntemlerinin malzeme seçiminde önemli bir rol teşkil ettiği ve aynı zamanda optimum malzemenin seçiminde uygun olduğu görülmektedir.

Yapılan çalışmada, daha önce deneysel olarak epoksi esaslı reçineye ağırlıkça %0.5, %1, %2, %3, %4, %5 oranlarında hegzagonal bor karbür (B₄C) nanoparçacıkları eklenerek üretilen nanokompozitlerin (Gültekin vd. 2021); çekme mukavemeti, şekil değiştirme kabiliyeti, depolama modülü, camsı geçiş sıcaklığı (T_g), çapraz bağ yoğunluğu, tokluk ve fiyat özellikleri kullanılarak MOORA ve TOPSIS çok kriterli karar verme yöntemleriyle malzeme seçimi gerçekleştirilmiştir.

2. Malzemeler ve Malzeme Seçim Yöntemleri

2.1. Malzeme

Daha önce yapılan deneysel çalışmada (Gültekin vd. 2021), iki bileşenli MGS-LR285 epoksi reçine içerisine hegzagonal bor karbür (B₄C) nanoparçacıkları ağırlıkça %0.5, %1, %2, %3, %4, %5 oranlarında ilave edilmiş ve homojen dağılım sergilemesi için ultrasonik karıştırıcıda karıştırılmıştır.

Epoksi esaslı reçineye B₄C nanoparçacıkları ilave edilerek üretilen nanokompozitlerin; çekme mukavemeti, şekil değiştirme kabiliyeti, depolama modülü, camsı geçiş sıcaklığı, çapraz bağ yoğunluğu, tokluk özellikleri önceki çalışmada belirlenmiştir. Nanokompozit malzemelerin üretimi ve testleri ile ilgili bilgiler bahsedilen çalışmada detaylı bir şekilde anlatılmıştır (Gültekin vd. 2021). Üretilen nanokompozit malzemelerin maliyeti ise aynı ağırlıkta kullanılan reçine ve nanoparçacıkların katkı oranları referans alınarak hesaplanmıştır. Çalışmada kullanılan B₄C katkılı nanokompozit malzemeler ve özellikleri Çizelge 1’de verilmektedir. Çalışmada kriter olarak seçilen bu özellikler polimer kompozit malzemelerin seçiminde sıklıkla dikkate alınan kriterlerdir. Bu kriterlerden çekme dayanımı, şekil değiştirme kabiliyeti, depolama modülü ve statik tokluk değerleri nanokompozit malzemenin seçiminde yüksek değerde olması istenen mekanik özelliklerdir. Bununla birlikte camsı geçiş sıcaklığı ve çapraz bağ yoğunluğu özellikleri ise polimer nanokompozit malzeme seçiminde yüksek değer alması istenen en önemli termal ve yapısal özelliklere ait kriterlerdir. Fiyat kriteri ise tüketicinin en çok kayda değer saydığı polimer nanokompozit malzeme seçiminde düşük değerde olması istenen ekonomik özelliklerindedir.

2.2. Malzeme Seçim Yöntemleri

2.2.1. MOORA Yöntemi

MOORA yöntemi, Brauers ve Zavadskas (2016) tarafından geliştirilmiş ve son zamanlarda sıklıkla kullanılan çok kriterli karar verme yöntemlerindedir. Bu yöntemde kriterler arasındaki etkileşimler bir bütün olarak ele alınır ve ağırlıklı değerler ile malzeme seçimi gerçekleştirilir. MOORA yönteminde birçok yaklaşım bulunmaktadır. En çok kullanılanı

ise MOORA oran yaklaşımıdır. Bu yaklaşımın aşamaları aşağıda belirtildiği gibidir (Chakraborty 2011).

Aşama 1: Karar matrisi (K) oluşturulur. Bu matris Çizelge 1’de belirlenen kriterlerden elde edilir.

$$K = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1m} \\ k_{21} & k_{22} & \vdots & k_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \dots & k_{nm} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Aşama 2: Karar matrisi (K) normalize edilir. Normalize karar matrisi (N), Denklem (2) yardımıyla oluşturulur ve seçilen kriterlerdeki maksimum ya da minimum amaç irdelenmez.

$$k_{ij}^* = \frac{k_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n k_{ij}^2}}, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

Aşama 3: Karar kriterlerinin performansı (X); maksimizasyon amaçlı performans değerleri toplamından minimizasyon amaçlı performans değerleri toplamı çıkarılarak Denklem (3) yardımıyla belirlenir.

$$X = \sum_{j=1}^m k_{ij}^* - \sum_{j=t+1}^n k_{ij}^* \quad (3)$$

Aşama 4: Elde edilen karar kriterlerinin performans (X) değerleri sıralanır. Sıralama sonucunda en yüksek değeri alan malzemenin ilk sırada seçimi yoluna gidilir.

2.2.2. TOPSIS Yöntemi

TOPSIS yöntemi, Hwang ve Yoon (1981) tarafından geliştirilmiş ve birçok uygulamada kullanılan çok kriterli karar verme yöntemlerindedir. Alternatif karar kriterlerinin

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan B₄C katkılı nanokompozit malzemeler ve özellikleri (Gültekin vd. 2021)

B ₄ C katkı oranı (%)	Nanokompozit malzeme	Çekme dayanımı (MPa)	Şekil değiştirme kabiliyeti (mm/mm)	Depolama modülü (MPa)	Camsı geçiş sıcaklığı (°C)	Çapraz bağ yoğunluğu (mol/m ³)	Statik tokluk (MPa)	Fiyat (USD)
0	BC0	60.70	0.072	2290	69.20	2822	2.57	1.00
0.5	BC05	70.80	0.081	2597	70.50	2987	3.59	1.34
1	BC1	78.80	0.088	3154	72.90	3487	4.42	1.68
2	BC2	82.05	0.091	3304	73.80	3767	5.21	2.36
3	BC3	78.09	0.062	2778	71.10	3168	3.07	3.05
4	BC4	58.30	0.054	2545	69.80	3016	1.84	3.73
5	BC5	51.04	0.048	2332	68.00	2950	1.42	4.41

değerlendirilmesi pozitif ideal çözüm ve negatif ideal çözüm olmak üzere iki temel yaklaşıma dayanır. TOPSIS yöntemi en iyi alternatifi pozitif ideal çözümden en kısa ve negatif ideal çözümden en uzak mesafeye sahip olması gerektiği fikrini esas almaktadır (Dymova vd. 2013). Bu yaklaşımın aşamaları aşağıda belirtildiği gibidir (Sarkar 2014).

Aşama 1: Karar matrisi (K) oluşturulur. Bu matris Çizelge 1’de belirlenen kriterlerden elde edilir.

$$K = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1m} \\ k_{21} & k_{22} & \vdots & k_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \dots & k_{nm} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Aşama 2: Karar matrisi (K) normalize edilir. Normalize karar matrisi (N), Denklem (5) yardımıyla oluşturulur.

$$k_{ij}^* = \frac{k_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n k_{ij}^2}}, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

Aşama 3: Ağırlıklı standart karar matrisi (A) oluşturulur. Bu matris, değerlendirme ölçütlerine ilişkin ağırlık değerleri kriterlerinin önem derecesine göre belirlenir. Normalize karar matrisinin elemanları belirlenen ağırlık değerleri ile çarpılır ve ağırlıklı standart karar matrisi oluşturulur.

Aşama 4: Pozitif ve negatif ideal çözüm değerleri elde edilir. Pozitif ideal çözüm A matrisinin sütunlarının en büyük değerleri, negatif ideal çözüm ise A matrisinin en küçük değerleridir. Pozitif ideal çözüm kümesi, $A^+ = \{a_1^+, a_2^+, \dots, a_m^+\}$ ve negatif ideal çözüm kümesi ise $A^- = \{a_1^-, a_2^-, \dots, a_m^-\}$ şeklinde tanımlanır.

Aşama 5: Pozitif ve negatif ideal çözüm değerlerine olan uzaklık değerleri, Denklem (6) ve (7) yardımıyla belirlenir ve karar seçeneği sayısı kadar uzaklık değeri hesaplanır.

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (a_{ij} - a_j^+)^2} \quad (6)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (a_{ij} - a_j^-)^2} \quad (7)$$

Aşama 6: Her bir karar seçeneğinin ideal çözüme göreli yakınlık katsayıları, Denklem (8) yardımıyla hesaplanır. Pozitif ve negatif ideal çözüm değerlerinden uzaklıklar bulunur.

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (8)$$

Aşama 7: Elde edilen yakınlık katsayıları, $0 \leq C_i < 1$ aralığındadır. Belirlenen yakınlık katsayılarından büyük olan değerlere göre sıralama yapılarak seçim işlemi gerçekleştirilir.

3. Analiz ve Bulgular

Malzeme seçimi için MOORA oran yaklaşımında ele alınan karar matrisi Çizelge 1’de verilmiştir. Bu değerler Denklem (2) yardımıyla normalize değerlerine dönüştürülmüştür. Normalize edilmiş karar matrisine ait değerler Çizelge 2’de verilmiştir.

Karar kriterlerinin performansı değerlendirilirken çekme dayanımı, çekme şekil değiştirme kabiliyeti, depolama modülü, camsı geçiş sıcaklığı, çapraz bağ yoğunluğu ve statik tokluk kriterlerinin maksimum olması istenir. Aynı zaman-

Çizelge 2. Normalize edilmiş karar matrisine ait değerler

Nanokompozit malzeme	Çekme dayanımı (MPa)	Şekil değiştirme kabiliyeti (mm/mm)	Depolama modülü (MPa)	Camsı geçiş sıcaklığı (°C)	Çapraz bağ yoğunluğu (mol/m ³)	Statik tokluk (MPa)	Fiyat (USD)
BC0	0.330	0.375	0.316	0.370	0.335	0.286	0.136
BC05	0.385	0.422	0.359	0.376	0.354	0.399	0.183
BC1	0.429	0.459	0.435	0.389	0.414	0.491	0.229
BC2	0.447	0.474	0.456	0.394	0.447	0.579	0.322
BC3	0.425	0.323	0.384	0.380	0.376	0.341	0.416
BC4	0.317	0.281	0.351	0.373	0.358	0.204	0.508
BC5	0.278	0.250	0.322	0.363	0.350	0.158	0.601

Çizelge 3. MOORA oran yaklaşımıyla elde edilen malzeme seçimi sıralaması

	BC0	BC05	BC1	BC2	BC3	BC4	BC5
X	1.876	2.112	2.388	2.475	1.813	1.376	1.120
Sıralama	4	3	2	1	5	6	7

Çizelge 4. Ağırlıklı standart karar matrisine ait değerler

Nanokompozit malzeme	Çekme dayanımı (MPa)	Şekil değiştirme kabiliyeti (mm/mm)	Depolama modülü (MPa)	Camsı geçiş sıcaklığı (°C)	Çapraz bağ yoğunluğu (mol/m ³)	Statik tokluk (MPa)	Fiyat (USD)
BC0	0.047	0.054	0.045	0.053	0.048	0.041	0.019
BC05	0.055	0.060	0.051	0.054	0.051	0.057	0.026
BC1	0.061	0.066	0.062	0.056	0.059	0.070	0.033
BC2	0.064	0.068	0.065	0.056	0.064	0.083	0.046
BC3	0.061	0.046	0.055	0.054	0.054	0.049	0.059
BC4	0.045	0.040	0.050	0.053	0.051	0.029	0.073
BC5	0.040	0.036	0.046	0.052	0.050	0.023	0.086

da fiyat kriterinin ise minimum olması beklenir. Denklem (3)'de her malzeme için yerine konulduğunda karar kriterlerinin performansı değerleri (X) elde edilmiştir. Karar kriterlerinin performansı değerleri sıralanmış ve malzeme seçimine ait sıralama elde edilmiştir. Çizelge 3'de MOORA oran yaklaşımıyla elde edilen malzeme seçimi sıralaması verilmiştir.

Malzeme seçimi için TOPSIS yaklaşımında ele alınan karar matrisi Çizelge 1'de verilmiştir. Bu değerler Denklem (5) yardımıyla normalize değerlerine dönüştürülmüştür. Normalize edilmiş karar matrisine ait değerler Çizelge 2'de verilmiştir. Ağırlıklı standart karar matrisi oluşturulurken çekme mukavemeti, şekil değiştirme, depolama modülü, camsı geçiş sıcaklığı, çapraz bağ yoğunluğu, tokluk ve fiyat özelliklerinin önem derecesi eşit olarak kabul edilmiş ve ağırlıklı standart karar matrisi elde edilmiştir (Çalışkan vd. 2012). Belirlenen önem dereceleri ile normalize karar matrisinin çarpılması sonucunda elde edilen ağırlıklı standart karar matrisine ait değerler Çizelge 4'de sunulmuştur.

Ağırlıklı standart karar matrisinde elde edilen değerlerden en düşük olanlar negatif ideal çözüm kümesini ve en yüksek olanlar ise pozitif ideal çözüm kümesi değerleri belirlenmiştir. Çizelge 4'de elde edilen ağırlıklı standart karar matrisinin değerlerinden pozitif ideal çözüm kümesi, $A^+ = \{0.064, 0.068, 0.065, 0.056, 0.064, 0.083, 0.086\}$ olarak

Çizelge 5. Pozitif ve negatif ideal çözüm değerlerine olan uzaklık değerleri

Nanokompozit malzeme	S_i^+	S_i^-
BC0	0.086	0.026
BC05	0.069	0.045
BC1	0.055	0.060
BC2	0.040	0.073
BC3	0.051	0.077
BC4	0.068	0.061
BC5	0.076	0.067

elde edilmiştir. Benzer şekilde negatif ideal çözüm kümesi ise $A^- = \{0.040, 0.036, 0.045, 0.052, 0.048, 0.023, 0.019\}$ olarak belirlenmiştir.

TOPSIS yönteminin beşinci aşamasında pozitif ve negatif ideal çözüm değerlerine olan uzaklık değerleri (S_i^+, S_i^-) Denklem (6) ve (7) yardımıyla hesaplanmıştır. Denklemler yardımıyla hesaplanan pozitif ve negatif ideal çözüm değerlerine olan uzaklık değerleri Çizelge 5'de verilmiştir.

TOPSIS yönteminin altıncı aşamasında her bir karar seçeneğinin ideal çözüme göreli yakınlık katsayıları ise Denklem (8) yardımıyla hesaplanmıştır. Yöntemin yedinci ve son aşamasında yakınlık katsayılarından büyük olan değerlere

göre sıralama yapılarak seçim işlemi gerçekleştirilmiştir. Karar seçeneklerinden ideal çözüme göre hesaplanan yakınlık katsayıları ve malzeme seçim sıralamaları Çizelge 6'da verilmiştir.

Çizelge 6. Karar seçeneklerinden ideal çözüme göre hesaplanan yakınlık katsayıları ve malzeme seçim sıralamaları

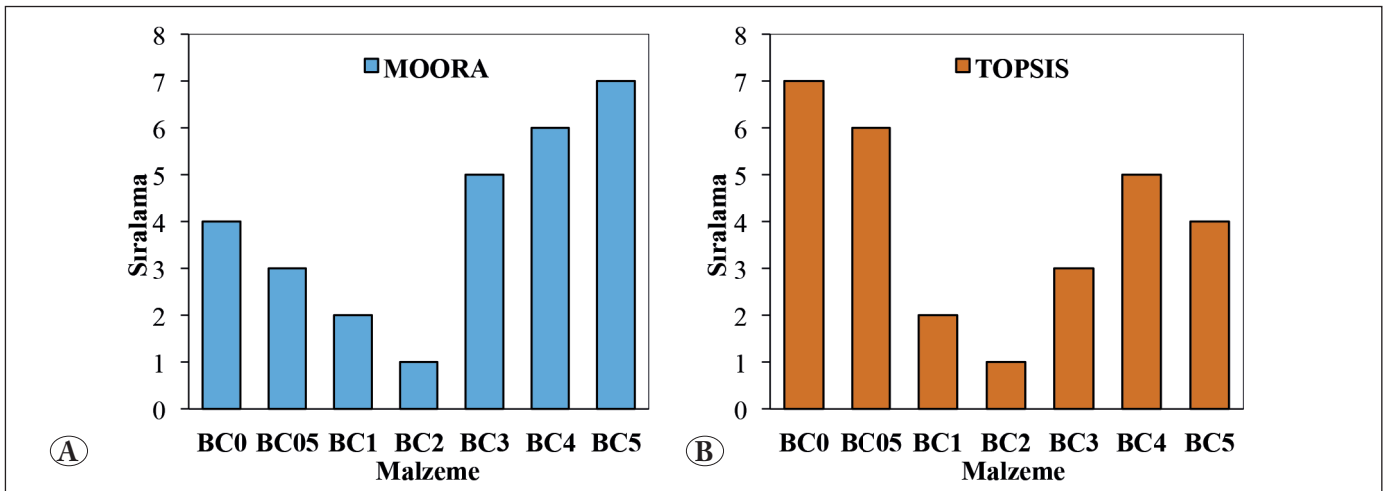
Nanokompozit malzeme	C_i	Sıralama
BC0	0.232	7
BC05	0.395	6
BC1	0.542	2
BC2	0.669	1
BC3	0.514	3
BC4	0.447	5
BC5	0.467	4

Çok kriterli karar verme yöntemleriyle yapılan malzeme seçim işlemleri analizi sonucunda, MOORA yönteminden elde edilen sıralamalar Şekil 1(A)'da ve TOPSIS yöntemiyle elde edilen sıralamalar ise Şekil 1(B)'de görülmektedir. Birinci sırada yer alan malzemeye bakıldığında her iki yöntemde de ağırlıkça %2 B₄C nanoparçacık katkı epoksi nanokompozitin tercih edilmesi gerektiğini göstermektedir. Ayrıca her iki yöntemde de ikinci sırayı ağırlıkça %1 oranında B₄C nanoparçacıkları katkı epoksi esaslı nanokompozit malzemenin aldığı görülmüştür. Üçüncü sırayı MOORA oran yaklaşımında ağırlıkça %0.5 oranında B₄C katkı epoksi esaslı nanokompozit alırken, TOPSIS yönteminde ise %3 oranında B₄C katkı epoksi esaslı nanokompozitin aldığı gözlemlenmiştir. Seçilen malzemeler içerisinde son sıraya bakılacak olursa MOORA oran yaklaşımında ağırlık-

ça %5 oranında nanoparçacık katkı nanokompozitin aldığı gözlemlenirken, TOPSIS yönteminde ise son sırada katkı epoksi kompozitin yer aldığı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, deneysel sonuçların yer aldığı çalışma ile birlikte değerlendirildiğinde her iki çalışmanın da birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir (Gültekin vd. 2021). Grafiklerde üçüncü sıra ve sonraki seçim sıralamalarında iki yöntem kıyaslandığında farklılıklar gözlemlenmiştir. Bu farklılıklar tercih edilen yöntemlerin matematiksel süreçlerindeki farklılıklardan oluşmaktadır. TOPSIS yöntemi literatürde en çok tercih edilen çok kriterli karar verme yöntemi olup kriterlerin ağırlık katsayıları seçim sıralamalarına büyük oranda etki etmektedir. Bu çalışmada TOPSIS yönteminde her kriter için ağırlık katsayıları eşit oranlı olarak değerlendirilmiş ve seçim sıralamaları belirlenmiştir. MOORA yöntemi ise yine sıklıkla tercih edilen yöntemlerden biri olup kriterler için ağırlık katsayılarını hesaba katmadan seçim sıralamalarına ulaşan çok kriterli karar verme yöntemlerindedir. Dolayısıyla belirtilen bu farklılıkların seçim sıralamalarını etkilediği görülmektedir. Uygulamada ilk sırayı alan alternatif seçenekler ön planda olduğundan her iki yaklaşımın oldukça güvenilir sonuçlar verdiği söylenebilir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada daha önce deneysel olarak epoksi esaslı reçineye ağırlıkça %0.5, %1, %2, %3, %4, %5 oranlarında hegzagonal bor karbür (B₄C) nanoparçacıkları eklenerek elde edilen nanokompozitlerin; seçim sürecinde sıklıkla dikkate alınan mekanik özelliklerden çekme dayanımı, şekil değiştirme kabiliyeti, depolama modülü ve statik tokluk, yapısal ve termal özelliklerden camsı geçiş sıcaklığı ve çapraz bağ



Şekil 1. Çok kriterli karar verme yöntemleriyle yapılan malzeme seçimlerinden elde edilen sıralamalar A) MOORA yöntemi, B) TOPSIS yöntemi.

yoğunluğu ile tüketicinin en önem verdiği fiyat kriterlerine göre MOORA ve TOPSIS çok kriterli karar verme yöntemleriyle malzeme seçimi gerçekleştirilmiştir. MOORA oran yaklaşımı ve TOPSIS çok kriterli karar verme yöntemleriyle yapılan malzeme seçimlerinde ilk sırayı her iki yöntemde de ağırlıkça %2 oranında B₄C nanoparçacıkları katkılı epoksi esaslı nanokompozitin, ikinci sırayı yine her iki yöntemde de ağırlıkça %1 oranında B₄C katkılı epoksi esaslı nanokompozitin aldığı gözlemlenmiştir. Benzer şekilde üçüncü sırayı MOORA oran yaklaşımında ağırlıkça %0.5 oranında B₄C katkılı nanokompozit alırken, TOPSIS yönteminde ise ağırlıkça %3 oranında B₄C katkılı nanokompozitin aldığı tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda seçilen malzemeler içerisinde ise son sırayı, MOORA oran yaklaşımında ağırlıkça %5 oranında B₄C katkılı nanokompozitin aldığı, TOPSIS yönteminde ise katkısız epoksi esaslı reçinenin aldığı sonucuna varılmıştır. Yapılan analizler sonucunda elde edilen sonuçların daha önce yapılan deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür. TOPSIS yönteminde kriterlere ait ağırlık katsayılarını değerlendiren matematiksel süreçler içerirken, MOORA yöntemi ise ağırlık katsayıları olmadan basit matematiksel işlemler içermektedir. Dolayısıyla her iki çok kriterli karar verme yöntemiyle de güvenilir malzeme seçimi yapılabileceği sonucuna varılmıştır.

5. Kaynaklar

- Aruldoss, M., Lakshmi, T. M., Venkatesan, V. P. 2013.** A survey on multi criteria decision making methods and its applications. *Am. J. Inf. Syst.* 1(1):31-43. DOI: 10.12691/ajis-1-1-5.
- Athawale, V. M., Chakraborty, S. 2012.** Material selection using multi-criteria decision-making methods: a comparative study. *Proc. Inst. Mech. Eng. L.* 226(4):266-285. DOI: 10.1177/1464420712448979.
- Bhadra, D., Dhar, N. R. 2022.** Selection of the natural fiber for sustainable applications in aerospace cabin interior using fuzzy MCDM model. *Mater.* 21:101270. DOI: 10.1016/j.mtl.2021.101270.
- Brauers, W. K., Zavadskas, E. K. 2006.** The MOORA method and its application to privatization in a transition economy. *Control Cybern.* 35(2):445-469.
- Chakraborty, S. 2011.** Applications of the MOORA method for decision making in manufacturing environment. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 54(9):1155-1166. DOI: 10.1007/s00170-010-2972-0.
- Çalışkan, H., Kurşuncu, B., Kurbanoğlu, C., Güven, Ş. Y. 2012.** TOPSIS metodu kullanılarak kesici takım malzemesi seçimi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 9(3), 35-42.
- Deng, Y. M., Edwards, K. L. 2007.** The role of materials identification and selection in engineering design. *Mater. Des.* 28(1):131-139. DOI: 10.1016/j.matdes.2005.05.003.
- Doumpos, M., Zopounidis, C. 2002.** Multicriteria decision aid classification methods (Vol. 73). Springer Science & Business Media.
- Dymova, L., Sevastjanov, P., Tikhonenko, A. 2013.** A direct interval extension of TOPSIS method. *Expert Syst Appl.* 40(12):4841-4847. DOI: 10.1016/j.eswa.2013.02.022.
- Edwards, K. L. 2005.** Selecting materials for optimum use in engineering components. *Mater. Des.* 26(5):469-473. DOI: 10.1016/j.matdes.2004.07.004.
- Ghaleb, A. M., Kaid, H., Alsamhan, A., Mian, S. H., Hidri L. 2020.** Assessment and comparison of various MCDM approaches in the selection of manufacturing process. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 4039253. DOI: 10.1155/2020/4039253.
- Gültekin, K., Uğuz, G., Topcu, Y., Özel, A. 2021.** Structural, thermal, and mechanical properties of silanized boron carbide doped epoxy nanocomposites. *J. Appl. Polym. Sci.* 138(42):51244. DOI: 10.1002/app.51244.
- Hwang, C. L. Yoon, K. 1981.** Methods for multiple attribute decision making. In *Multiple Attribute Decision Making*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Jahan, A., Mustapha, F., M. Y. Ismail, M.Y., Sapuan, S.M., Bahraminasab, M. 2011.** A comprehensive VIKOR method for material selection. *Mater. Des.* 32(3):1215-1221. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.10.015.
- Karande, P., Zavadskas, E., Chakraborty, S. 2016.** A study on the ranking performance of some MCDM methods for industrial robot selection problems. *Int. J. Ind. Eng. Comput.* 7(3):399-422. DOI: 10.5267/j.ijec.2016.1.001.
- Patnaik, P. K., Swain, P. T. R., Purohit, A. 2019.** Selection of composite materials for structural applications through MCDM approach. *Mater. Today: Proc.* 18:3454-3461. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.273.
- Rahim, A. A., Musa, S. N., Ramesh, S., Lim, M. K. 2020.** A systematic review on material selection methods. *Proc. Inst. Mech. Eng. L.* 234(7):1032-1059. DOI: 10.1177/1464420720916765.
- Raju, S. S., Murali, G. B., Patnaik P. K. 2020.** Ranking of Al-CSA composite by MCDM approach using AHP-TOPSIS and MOORA methods. *J. Reinf. Plast. Compos.* 39(19-20):721-732. DOI: 10.1177/0731684420924833.
- Sarkar, A. 2014.** A TOPSIS method to evaluate the technologies. *Int. J. Qual. Reliab. Manag.* 31(1):2-13. DOI: 10.1108/IJQRM-03-2013-0042.
- Singh, A. K., Avikal, S., Sharma, A., Verma, R. P. 2021** Selection of suitable metal matrix composite for design application using MCDM approach. *Mater. Today: Proc.* 46:10771-10775. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.01.672.