




# Faz Değişim Malzemelerinde Kullanılan İnorganik Nanomalzemelerin MULTIMOORA Yöntemiyle Önceliklendirilmesi

## Prioritization of Inorganic Nanomaterials Used in Phase Change Materials by MULTIMOORA Method

Hasret Akgün<sup>1</sup> , Ece Turan<sup>1</sup> , Aysun Özkan<sup>1</sup> , Zerrin Günkaya<sup>1</sup> , Müfide Banar<sup>\*1</sup> 

<sup>1</sup>Eskişehir Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü 26555, Eskişehir, Türkiye

**Başvuru/Received:** 26/06/2023

**Kabul / Accepted:** 22/09/2023

**Çevrimiçi Basım / Published Online:** 31/12/2023

**Son Versiyon/Final Version:** 31/12/2023

### Öz

Faz değişim malzemeleri (Phase Change Materials (PCM)), özellikle devamlı ulaşılamayan enerji kaynaklarını depolayarak ve talep edildiğinde kullanılmasını sağlayarak yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji sağlarlar. PCM'ler termal enerji depolamada istenilen termodinamik, kinetik, kimyasal ve ekonomik özellikleri bir arada tek başına karşılayamamalarından dolayı farklı nanomalzemeler ile desteklenmektedirler. PCM'in özelliklerini geliştirmek için kullanılan nanomalzemelerin seçimi için kritik parametreler mevcut olup, bu çalışmada inorganik nanomalzemelerin önceliklendirilmesi amaçlanmıştır. Bu noktada Çok Kriterli Karar Verme (Multi Criteria Decision Making (MCDM)) metodolojisi oldukça kullanışlıdır. Bu çalışmada, PCM'lerde kullanılacak 5 farklı inorganik nanomalzeme (bakır oksit, alüminyum oksit, gümüş, titanyum oksit ve bor nitrid) önceliklendirilmesi için Oran Analizine Dayalı Çok Amaçlı Optimizasyon Yöntemi (MULTIMOORA) kullanılmıştır. Erime noktası değişimi, gizli ısı değişimi, termal iletkenlik değişimi, ön işlem gereksinimi, toksisite ve maliyet olmak üzere 6 değerlendirme kriteri belirlenmiştir. Kriter ağırlıklarının belirlenmesinde ise sırasıyla entropi (objektif yöntem) ve sıralama (subjektif) yöntemleri kullanılmıştır. Her iki kriter ağırlıklandırma yöntemine göre de erime noktası değişiminin en önemli kriter olduğu görülmüştür. MULTIMOORA sonuçlarına göre PCM'lere eklenecek en uygun inorganik nanomalzemenin ise bor nitrid (BN) olduğu tespit edilmiştir.

### Anahtar Kelimeler

*"Mcdm, multimoora, pcm, tes"*

### Abstract

Phase Change Materials (PCM) provide renewable and sustainable energy, especially by storing renewable energy sources that are not always available and enabling them to be used when demanded. Since PCMs cannot meet the desired thermodynamic, kinetic, chemical and economic properties in thermal energy storage alone, they are supported by different nanomaterials. There are critical parameters for the selection of nanomaterials used to improve the properties of PCM, and in this study, it is aimed to prioritize inorganic nanomaterials. At this point, the Multi Criteria Decision Making (MCDM) methodology is very useful. In this study, Multi-Objective Optimization Method Based on Ratio Analysis (MULTIMOORA) was used to prioritize 5 different inorganic nanomaterials (copper oxide, aluminum oxide, silver, titanium oxide and boron nitride) that can be used in PCMs. Six evaluation criteria were determined as melting point change, latent heat change, thermal conductivity change, pretreatment requirement, toxicity and cost. The criteria weights were determined by entropy (objective method) and ranking (subjective) methods, respectively. According to the weighting method of both criteria, the melting point change was determined as the most important criterion. According to MULTIMOORA results, boron nitride (BN) was found to be the most suitable inorganic nanomaterial to be added to PCMs.

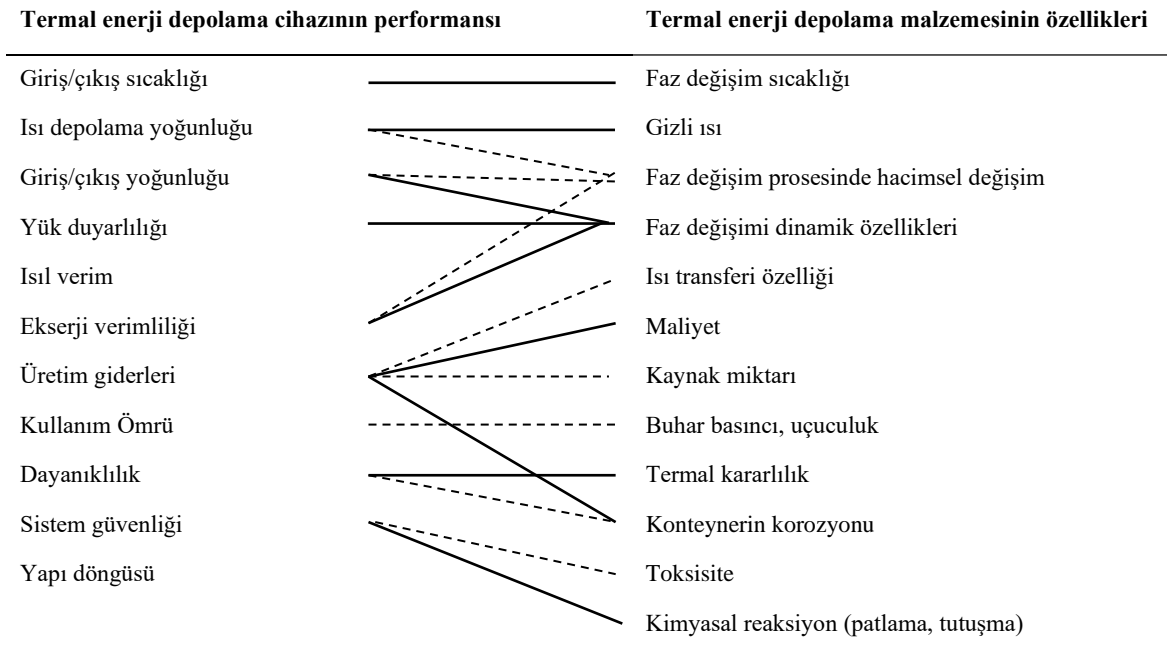
### Key Words

*"Mcdm, multimoora, pcm, tes"*

## 1. Giriş

Günümüzde kaynakların korunumunun sağlanması ve çevre üzerindeki olumsuzluklar nedeniyle, fosil yakıtların yerine yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Güneş, dalga ve rüzgâr enerjileri yenilenebilir enerji kaynaklarının en yaygın türleridir ve temiz ve sürdürülebilir olarak nitelendirilmektedirler. Gerçekte, yenilenebilir enerji kaynaklarının daha fazla uygulanmasıyla ilgili en büyük darboğazı, talebin yoğun olduğu dönemlerde ulaşılabilirlik sorunu oluşturmuştur (Al Ghossein vd., 2017). Bu noktada, termal enerji depolama (TES), enerji tüketiminin zaman kaymasına izin verir. Ulaşılabilirlik sorununa çözüm olarak TES'ler ile enerji, düşük talep veya düşük maliyetli üretim dönemlerinde depolanabilir ve daha sonra yüksek talep veya yüksek maliyetli üretim dönemlerinde kullanılabilir. Bu, enerjinin arz ve talebini dengelemeye yardımcı olur ve hem tüketiciler hem de enerji sağlayıcıları için maliyet tasarrufu sağlayabilir. TES enerji tasarrufunu artırarak çevre kirliliğini azaltmak, depolama sonrası çalışma ortamında termal konfor sağlamak, elektroniklerin çalışma ömrünü iyileştirmek vb. için potansiyel bir teknolojidir (Luo vd., 2021). Termal enerji, duyulur ısı depolama (sensible heat storage (SHS)), gizli ısı depolama (latent heat storage (LHS)) ve kimyasal ısı depolama (chemical heat storage (CHS)) yöntemleri kullanılarak depolanabilir (Aydın, 2010). Üç termal enerji depolama formundan gizli ısı depolama, faz değiştirme işlemi sırasında sıcaklık ve hacimde çok az değişim olurken, büyük depolama kapasitesi nedeniyle daha çok tercih edilmektedir (George vd., 2020). Gizli ısı, maddenin faz değişimi esnasında çevreden aldığı veya çevreye verdiği ısıdır. Malzeme faz değişim sıcaklığına ulaştığında, duruma bağlı olarak füzyon veya buharlaşma gizli ısı olarak bilinen dönüşümü gerçekleştirmek için büyük miktarda ısıyı emer ve bu şekilde enerji depolanır. Genel olarak, gizli ısı depolama sistemleri depolama ortamının katı ve sıvı fazları arasındaki gizli ısıyı kullanır (Cárdenas ve León, 2013).

TES sistemleri için PCM seçilirken çok sayıda faktör dikkate alınmalıdır. Seçilen malzemelerin çeşitli yönlerden performansı, ısı depolama kapasitesini ve termal depolama/salım verimliliğini doğrudan etkileyecektir. Herhangi bir PCM'nin termodinamik, kinetik, kimyasal ve ekonomik kriterler temelinde uygun TES kullanımına yönelik seçimi ile ilişkisi Şekil 1' de gösterilmiştir (Wei vd., 2018). Diğer yönden PCM'ler istenilen termodinamik, kinetik, kimyasal ve ekonomik özellikleri tek başına karşılayamamaktadırlar (Shahid ve Abdala, 2021).



Şekil 1. Isı Depolama Sistemi Performansı ile Isı Depolama Malzemesi Özellikleri Arasındaki İlişki (Wei vd., 2018)

Cihazların boyutlarını küçültme, verimliliği artırma ve malzemelerin özelliklerini geliştirmede ilgi gören nanoteknolojik uygulamalar son yıllarda düşük termal iletkenliğe sahip malzemelerin ısı transferini iyileştirebilme kabiliyeti ile odak noktası olmaktadır. Nanomalzeme (NM)'lerin yüksek termal iletkenliğe sahip olmaları, PCM'lerin iletkenliğini geliştirmede önemli bir rol oynar. Mevcut literatür çalışmalarında farklı NM türlerinin eklenmesi ile PCM'lerin özelliklerinin geliştirildiği görülmektedir. Malzemelerin termofiziksel özellikleri bileşenlerinin özelliklerine bağlı olduğundan, ısı transferini artırma açısından daha yüksek termal iletkenliğe sahip yapılar tercih edilmektedir; bununla birlikte, bu iletken malzemelerin bazılarının maliyetleri yüksektir. Çoğu durumda, metaller ve karbonlu malzemeler gibi iletken NM'lerin dahil edilmesi, kompozit PCM'nin özgül ısısında azalmaya yol açmıştır. NM'lerin eklenmesiyle PCM'lerin ısı transferinde artış ve alev geciktirmede iyileştirme gibi bazı özellikler değişmiştir. PCM'lerin ısı transfer kapasitesi, esas olarak faz dönüşümü olarak ortaya çıkan şarj/deşarj oranına göre değerlendirilir. NM'lerin varlığı, dinamik viskozitedeki artış veya gizli ısı kapasitesindeki azalma nedeniyle bazı sorunlara neden olabilir (Nazari vd., 2021). Grafen, karbon nanotüpler (CNT) ve karbon nanofiberler (CNF), gibi karbon bazlı nanomalzemeler, yüksek termal iletkenlik ve mekanik dayanıma sahiptirler (Ulus, 2021; Kaviarasu ve Prakash, 2016). PCM'lere dahil edildiğinde, bu nanomalzemeler kompozitin hem ısı transferini

hem de yapısal özelliklerini geliştirerek daha verimli termal enerji depolaması sağlar. Titanyum dioksit (TiO<sub>2</sub>), çinko oksit (ZnO) ve alümina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) gibi metal oksit nanoparçacıkları, PCM geliştirmesi için faydalı olabilecek çeşitli özelliklere sahiptir. Küçük miktarlarda dağıtıldıklarında PCM'lerin termal iletkenliğini, kararlılığını ve faz değiştirme davranışını geliştirebilirler.

Kibria vd. (2015), termal enerji depolama sistemleri için nanomalzeme ile geliştirilmiş PCM'lere ait çalışmalarında, karbon nanotüpleri, karbon nanofiberleri, grafit ve grafen nanopartikülleri, metal ve metal oksit nanopartikülleri gibi nanomalzemelerin eklenmesiyle geliştirilmiş yağ asidi ve parafin bazlı PCM'lere odaklanmıştır. CNT ve CNF ile geliştirilmiş yüzey işlemine sahip PCM'ler, termal iletkenlikte daha iyi bir artış göstermiştir. Metal ve metal oksit PCM'ler için termal iletkenlik artışı boyut, şekil ve konsantrasyona bağlı olduğunu gözlemiştir. PCM'de nanopartiküllerin aşırı eklenmesi, kütle/hacim konsantrasyonunda bir artışa neden olmuştur ve bu da olumsuz bir etkiye (dinamik viskozite artışları) neden olmuştur.

Huang vd. (2021), parafinin termal iletkenliğini arttırmak için, katkı maddesi olarak çok katmanlı grafen kullanarak hazırladıkları kompozit faz değişim malzemesindeki (Composite Phase Change Material (CPCM)) çok katmanlı grafenin kütle oranı ağırlıkça %15,1'e ulaştığında, CPCM'nin termal iletkenliğinin saf parafinin (0,22 W/(m·K)) 4 katı bir değere (0,88 W/(m·K)) ulaştığını belirlemiştir. Ayrıca, CPCM'nin erime gizli ısısını 114,2 kJ/kg olarak saptamışlar ve CPCM'nin iyi bir ısı depolama özelliğine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Sızıntı deneyleri sonucunda katmanlı grafenin parafine karşı iyi bir adsorpsiyona sahip olarak sızıntıyı önlediği gözlenmiştir. Termal döngü deneyleri ise CPCM'nin iyi termal stabilite sağladığını göstermiştir.

Kuziel vd. (2021), CPCM'leri yapmak için PCM olarak parafin ve termal iletkenlik katkı maddesi olarak farklı türde karbon nanotüpler kullanmışlardır. Çok duvarlı karbon nanotüple (Multi-walled carbon nanotube - MWCNT) geliştirilmiş CPCM'lerdeki MWCNT içeriği ağırlıkça %2 olduğunda, CPCM'lerin termal iletkenliğinin %161 arttığı gözlenmiştir.

Sheng vd. (2019), parafinin termal iletkenliğini arttırmak için karbon fiber kullanarak sentezledikleri CPCM'ler için farklı yoğunluklarda (sırasıyla 0,097 g/cm<sup>3</sup> ve 0,172 g/cm<sup>3</sup>) karbon fiber kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, CPCM'lerin termal iletkenliğinin karbon fiberin yoğunluğuyla ilişkili olduğu ve CPCM'lerin ısı iletkenlik açısından anizotropi sunduğu (eksenel ısı iletkenliğinin radyal termal iletkenlikten daha yüksek olduğu) bulunmuştur. Deneysel çalışma sonucunda yüksek yoğunluklu karbon lif ile hazırlanmış CPCM'in en yüksek ekstenel termal iletkenliğe (saf parafinin termal iletkenliğinin yaklaşık 6,92 katı) sahip olduğu görülmüştür.

Zhao vd. (2021), termal iletkenlik katkı maddesi olarak Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve PCM olarak parafin kullanarak hazırladıkları CPCM'lerin termal iletkenliğini 1,27 W/(m·K) olarak bulmuşlardır; bu da saf parafininin yaklaşık 5 katıdır. CPCM'lerin termal iletkenliğinin iyileştirilmesi, alüminanın çok sayıda gözenekli yapıya sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Alümina, CPCM'lerin termal iletkenliğini artırabilen ve PCM'nin sızıntısını önleyebilen büyük bir adsorpsiyon kapasitesine sahiptir. Bununla birlikte, alüminanın kütle oranının artmasıyla birlikte CPCM'lerin gizli ısısı da buna bağlı olarak azalmış, alüminanın kütle oranı %50 olduğunda CPCM'lerin erime gizli ısısı 101,5 kJ/kg olarak bulunmuştur.

Wang vd. (2021) yapmış oldukları çalışmada, parafin vaks ve farklı nanomalzemeler (CuO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) ile CPCM hazırlamışlardır. CPCM'lerin faz değişimi gizli ısısı, viskozitesi ve termal iletkenliği analiz edilmiştir. Sonuçlar, saf parafin vaks ile karşılaştırıldığında, ağırlıkça %1,2 CuO/parafin kompozit PCM'lerin termal iletkenliğinin 25°C'de %24,9 arttığını, buna karşın 70 °C'de termal iletkenliğinin %20,6 arttığını göstermiştir. Saf parafin vaks ile karşılaştırıldığında, nanokompozit PCM'lerin gizli ısısı 70°C erime sıcaklığında %1,5 azalmış, viskozitesi %10,1 artmıştır.

Nanomalzemelerin eklenmesi ile değişen termal özelliklerin yanı sıra oluşan kompozitlerde fiziksel ve kimyasal değişimler de söz konusu olabilmektedir. Eklenen altıgensel bor nitrid (Hexagonal boron nitride (hBN)) nanomalzemelerin kompozit içindeki dağılımını görselleştirmek ve şekil, boyut ve kalınlığının belirlenmesi, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ya da geçirimli elektron mikroskobu (TEM) kullanılarak görsel olarak incelenmektedir. Parafin içine dağıtılan hBN aglomerasyonlar oluşturduğundan, bunu ortadan kaldırmak için ultrasonikasyon kullanılmaktadır. Kompozitlerin X-Işını Kırınım analizi (XRD) eğrileri incelendiğinde, oluşan tepeler kompozitin yapısındaki safsızlıkların göstergesidir (Fang vd., 2014).

TiO<sub>2</sub> nanomalzemelerin parafine eklenmesi ile nanomalzemenin kompozit içinde miktarının ağırlıkça artması ile aglomerasyon eğilimi artmaktadır. Düşük konsantrasyonlu sıvı haldeki bir kompozitte, çözünme, "Brown" hareketleri ve elektrostatik itme ile nanopartiküllerin ayrılmasına neden olur. Nanopartiküller arasındaki çarpışma olasılığı, artan konsantrasyonla artar ve Van der Waals kuvveti kısa mesafede daha güçlüdür. Bu nedenle nanopartiküller yüksek konsantrasyonda gruplar oluşturma eğilimindedir. Kompozitin mikro yapısı katı hal ile sıvı hal arasında farklıdır çünkü katı haldeki parafin vaks molekülleri TiO<sub>2</sub>'yi gruplara itebilir (Wang vd., 2014). Cu ve parafin vaks ile hazırlanan kompozitlerin kimyasal yapıları fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) analizi yardımı ile incelendiğinde FT-IR absorpsiyon spektrumları, bakır nanomalzemenin parafin vaks ile fiziksel olarak bağlandığını, kimyasal stabilite için kimyasal yapı etkileşimini bozmadığını göstermiştir. SEM ve TEM görüntüleri incelendiğinde Cu nanoparçacıkların aglomerasyon eğiliminde olduğu görülmektedir (Lin ve Al-Kayiem, 2016).

TES uygulamaları için, PCM'lerin özelliklerinin, PCM'lere inorganik NM eklenerek geliştirilmesine ilişkin (NM-PCM) literatür çalışmaları Tablo 1'de özetlenmiştir.

**Tablo 1.** İnorganik NM Eklenmesiyle Geliştirilen Kompozit PCM'lere Ait Literatür Çalışmaları

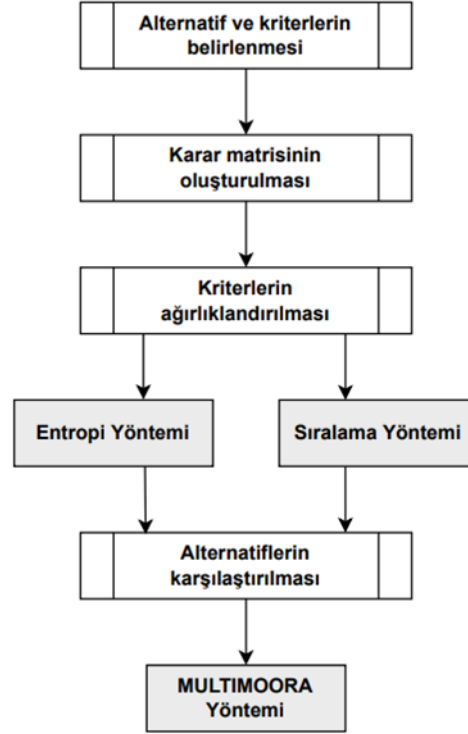
Nanomalzeme	CuO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ag	TiO <sub>2</sub>	BN
<b>Değişen özellik</b>					
Parafin erime noktası, °C	60,42	54	37	48	58
Kompozit erime noktası, °C	57,81	52	36,5	46	58,7
Parafin gizli ısı, kJ/kg	184,2	159,5	241	168	200
Kompozit gizli ısı, kJ/kg	157,3	211	208	165	191
Termal iletkenlik artışı, %	46,3	62,3	34,1	5,9	6%
Ön işlem Gereksinimi	Yok	Var	Var	Var	Yok
Toksosite	Çok	Orta	Çok	Orta	Orta
Maliyet, \$	33,00	14,00	150,00	1,20	106
Karıştırma Yöntemi	Karıştırıcı-Ultrasonikasyon	Karıştırıcı-Ultrasonikasyon	Kontrollü sıcaklık banyosu	Karıştırıcı-Sonikasyon	Manyetik karıştırıcı-Ultrasonikasyon
Referans	Fang, 2014; Wang vd., 2014; Lin ve Al Kayiem, 2016; Al Ghossein, 2017; Mohamed vd., 2017, Tony 2021				

NM'lerin özellikleri büyük ölçüde boyut, şekil ve yüzey kaplaması gibi spesifik özelliklerine bağlı olmasının yanı sıra tablodan da anlaşıldığı üzere NM'lerin farklı açılardan birbirlerine göre üstünlükleri bulunmaktadır. Bu noktada NM seçiminde, bir problemin çeşitli kriterlere dayalı bir dizi alternatif arasından en iyi çözümünü bulmak için kullanılan MCDM yaklaşımı faydalı bir araçtır. MCDM, literatürde yer aldığı 1950-1970'li yıllar arasındaki gelişmesinden bu yana birçok karar verme probleminde yaygın olarak uygulanan önemli bir araç olmuştur (Demir ve Arslan, 2022). MCDM, karar verme konusunun değerlendirilmesine, ağırlıkların belirlenmesine ve her bir kriter göre her seçeneğin performansının hesaplanmasına vurgu yapar (Zavadskas ve Podvesko, 2016). Özellikle son yıllarda karar problemini oluşturan kriter ağırlıklarını belirlemek için birçok araştırmacı farklı yöntemler geliştirmiş ve bu yöntemler birleştirilerek hibrit modeller de oluşturulmuştur (Pamuçar ve Ćirović, 2015). Yang vd. (2018), tarafından yapılan bir çalışmada, PCM seçimi için MCDM yöntemleri kullanılmıştır. Kriterlerin subjektif ve objektif ağırlıkları sırasıyla Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) ve entropi yöntemi ile belirlenmiştir. İkinci olarak, ağırlık kombinasyonunu elde etmek için optimize edilmiş kombinasyon ağırlığı yöntemi kullanılmıştır. Daha sonra PCM'ler, uygun PCM seçimi için İdeal Çözüme Benzerlik (TOPSIS) yöntemi kullanılarak sıralanmıştır. Başka bir çalışmada, Das vd. (2021), bir otomobil kabininde pasif termal yönetim için uygun PCM 'yi seçmek üzere Çok Amaçlı Karar Verme (MODM) ve Çok Nitelikli Karar Verme (MADM) yöntemleri kullanmıştır. Çalışmada farklı seçim yöntemlerinin karşılaştırmalı analizi yapılmıştır. MODM, Ashby yöntemiyle PCM'lerin özelliklerini öznel olarak değerlendirmek için kullanılmıştır. AHP ve TOPSIS, entropi tabanlı ağırlıklarla birlikte kullanılmıştır.

Bu çalışmanın amacı her geçen gün daha fazla ihtiyaç duyulan PCM'lerin özelliklerini geliştirmek için uygun inorganik nanomalzemenin belirlenmesidir. Literatür çalışmaları incelendiğinde PCM'leri geliştirmek için kullanılan NM'nin yoğunluğu, miktarı, moleküler yapısı ve moleküller arası etkileşimlerin CPCPM'nin özelliklerini etkilediği görülmüştür. Ayrıca inorganik NM'ler, özel uygulama ve gereksinimlere bağlı olarak sonikasyon, kimyasal çökelme veya elektrospinleme gibi çeşitli yöntemlerle PCM'ler içinde sentezlenebilir ve dağıtılabilir. Bu NM'lerin seçimi, TES sisteminin istenen özelliklerine ve gereksinimlerine bağlıdır. Bu katkı maddelerinin farklı kombinasyonları ve konsantrasyonları, belirli sıcaklık aralıklarını, ısı transfer gereksinimlerini ve kararlılık hususlarını karşılamak için uygulanabilir. PCM'ler bağlamında MCDM ile ilgili mevcut literatür, öncelikle belirli uygulamalar için PCM seçimine odaklanmaktadır. PCM gelişimi için hem organik hem de inorganik katkı maddelerinin seçimine ilişkin önemli oranda bir araştırma ihtiyacı vardır. Daha önce yapılan çalışmalar öncelikle termal iletkenlik ve erime noktası gibi termal özellikleri karşılaştırmakta iken bu çalışma, PCM seçimi için, uygulama aralığını genişletmede önemli olan temel faktörleri kapsayan, niceliksel ve niteliksel kriterlerin karşılaştırılmasını sağlayan kriterleri ele alan, alternatif inorganik nanomalzemelerin karşılaştırılması ve uygun katkı malzemesinin seçimi için farklı kriterleri değerlendirerek optimum bir alternatifin ortaya konulmasını sağlayan bir çalışmadır. Malzeme seçimi için itici güç genellikle performansın iyileştirilmesi ve maliyetin en aza indirilmesidir. Bu çalışmada literatürden elde edilen verilere göre, PCM'lerin özelliklerini geliştirmek için en uygun inorganik NM'yi seçmek amacıyla kriter ağırlıkları entropi (entropy) ve sıralama (ranking) yoluyla belirlenirken, alternatiflerin sıralamasında Oran Analizine Dayalı Çok Amaçlı Optimizasyon (MULTIMOORA)- (Multi-Objective Optimization on the basis of a Ratio Analysis plus the full MULTIplicative form) kullanılmıştır. Karar matrisi inorganik malzemelerin PCM'lerin özelliklerine etkisini konu alan çalışmalar baz alınarak oluşturulmuştur. PCM'leri geliştirmek için beş alternatif, bakır oksit (CuO), alüminyum oksit (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), gümüş (Ag), titanyum oksit (TiO<sub>2</sub>) ve bor nitrid (BN); erime noktası değişimi (c1), gizli ısı değişimi (c2), termal iletkenlik değişimi (c3), ön işlem gereksinimi (c4), toksosite (c5) ve maliyet (c6) olarak belirlenen 6 kriter açısından karşılaştırılmıştır.

## 2. Yöntem

Bu çalışmada, kriterlerin ağırlıklandırılmasında objektif yöntemlerden entropi yöntemi, subjektif yöntemlerden ise sıralama yöntemi kullanılmıştır. Alternatifler, literatür çalışmaları doğrultusunda, PCM geliştirilmesinde en çok kullanılan inorganik malzemelerden seçilmiştir. Kriter ağırlıklarının belirlenmesinin ardından MCDM tekniklerinden MULTIMOORA yöntemi ile alternatifler karşılaştırılmıştır. Çalışmanın akış şeması Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 2. Çalışmanın Akış Şeması

### 2.1. Alternatif ve Kriterlerin Belirlenmesi

PCM'lerin belirli uygulamalarda kullanılabilmesi için uygun termal, fiziksel, kinetik, kimyasal ve ekonomik özellikleri sağlaması gereklidir. PCM'ler, iyi termal iletkenlik ve gizli ısı kapasitesi gibi termal özellikler; iyi kimyasal stabilizasyon, toksik olmama, yanıcı olmama ve aşındırıcı olmama gibi kimyasal özellikler; düşük/sıfır aşırı soğutma gibi kinetik özellikler; faz değişimi sırasında minimum hacim değişimi ve uyumlu erime noktası gibi fiziksel özellikler gerektirmektedir. Nanomalzeme toksikolojisi alanı sürekli gelişmekte ve potansiyel sağlık etkileri sürekli iyileştirilmektedir. Sürdürülebilir kullanımlarını sağlamak için PCM'lerin maliyeti düşük olmalıdır. Ancak PCM'ler her zaman bu özellikleri karşılayamayabilir ve bu PCM'lerin özelliklerinin geliştirilebilmesi için katkı malzemelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada PCM'lerin özelliklerini geliştirmek için sıklıkla kullanılan 5 farklı inorganik katkı malzemesi alternatif olarak belirlenmiştir. Bu katkı malzemelerinin PCM'de aranan özelliklerin geliştirilmesine yönelik de aşağıdaki kriterler belirlenmiştir;

*Erime noktası sıcaklık değişimi (c1):* Faz değişim malzemeleri, uygulama alanına göre belirlenen çalışma sıcaklığına uygun bir erime noktasına sahip olmalıdır. PCM'ler, erime boyunca endotermik bir süreçte ısıyı emer ve PCM soğuduğunda, ısıyı ekzotermik sürece geri verir (Javadi vd., 2020). Düşük erime noktası, karıştırma sırasında daha az enerji kullanıldığı anlamına gelir.

*Gizli ısı değişimi (c2):* Nanomalzemeler eklenerek geliştirilen kompozit PCM'nin gizli ısısındaki değişim, termal döngülere maruz kaldıktan sonra PCM'nin termal ve fiziksel kararlılığı hakkında bilgi sağlayabilir. Nanomalzemeler optimum oranda kullanılmazsa, kullanımları kompozitin gizli ısısını düşürebilir. Bu, PCM'nin emebileceği ve salabileceği termal enerji miktarını azaltır ve termal enerji depolama verimliliğini düşürür. Gizli ısı kapasitesi, çoğu uygulama için bir PCM'nin önemli bir termodinamik özelliğidir (Jiang vd., 2016).

*Termal iletkenlik geliştirme (c3):* Bir sıcaklık gradyanında bir malzemenin geçen ısı akış hızı, termal iletkenlik (Javadi vd., 2020) tarafından belirlenir. Termal iletkenlik, yüklenme ve boşaltma hızı olarak da bilinen malzemenin eriyik katılma hızını etkiler. Nano

boyutlu katkı maddelerinin eklenmesi, doğal taşınımı bastırarak bir malzemenin veya sıvının termal iletkenliğini değiştirmektedir (Coetzee vd., 2020).

*Ön işlem gereksinimi (c4):* İnorganik malzemelerin katkı malzemesi olarak kullanıldığı bazı kompozit PCM'lerin hazırlanması sırasında bazı durumlarda inorganik malzemeler doğrudan kullanılamamaktadır. Ön işlem gereksinimini karşılaştırmak için literatür çalışmaları incelenmiş ve ön işlem gereksinimleri 1 ile 9 arasında ölçeklendirilmiştir. Bu değerler, inorganik malzeme katkı maddesi olarak kullanılmadan önce ön işlem uygulanması gerekiyorsa puan 9 olarak verilmiştir. Ön işlem gereksinimine ait çalışma sayısına göre puan düşürüldüğünden, bu çalışmada ön işlemin gerekmediği durumlar için 1 puan verilmiştir.

*Toksosite (c5):* Nanomalzemelerin büyük yüzey alanı, küçük boyut, morfoloji, reaktivite ve kimyasal bileşim gibi fiziko-kimyasal özellikleri toksik etkilerine katkıda bulunan temel faktörlerdir (Khanna vd, 2015). Bu çalışmada, literatürde yer alan nanotoksosite çalışmaları incelenerek bu nanomalzemeler için 1 ile 9 arasında ölçeklendirme yapılmıştır. Ölçeklendirme yapılırken tanecik boyutunun özelliklere etkisi göz önünde tutularak 20-100 nm aralığı esas alınmıştır.

Jeng ve Swanson (2006)'ın, 30 ila 45 nm arasında değişen parçacık boyutlarına sahip TiO<sub>2</sub>, ZnO, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> metal oksit nanoparçacıkları için yapmış oldukları çalışmada, ZnO düşük konsantrasyonlarda dahi toksik etki gösterirken, daha yüksek konsantrasyonlara çıktığında toksosite değerlerinin sırasıyla ZnO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> ve Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> şeklinde azaldığı görülmüştür. Benzer bir çalışmada aynı konsantrasyonlara sahip nanopartiküllerin toksisiteleri sırasıyla Zn, Ni, TiO<sub>2</sub>, Al, Ag olarak azalmaktadır (Park vd., 2007). Zhang vd. (2011)'nin, yapmış oldukları çalışmada, aynı konsantrasyondaki ZnO, TiO<sub>2</sub>, SiO ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> toksisiteleri sırasıyla azalmaktadır.

Çeşitli endüstrilerden çevreye NM'lerin deşarjının, toprak mikrobiyotasının bileşimini ve fizyolojik fonksiyonlarını değiştirmesi beklenmektedir. Bu beklentinin toprak mikrobiyotası üzerinde oluşturduğu belirsizlik dikkate alınarak, boyut ve morfoloji bakımından farklılık gösteren beş NP'nin (Ag, ZnO, CuO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve TiO<sub>2</sub>) Azotobacter chroococcum, Bacillus thuringiensis, Pseudomonas mosselii ve Sinorhizobium meliloti'nin büyüme davranışı ve fizyolojik aktivitesi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. İlginç bir şekilde, tüm bakteri suşları Ag-NP'lere ve ZnO-NP'lere duyarlı bulunmuş ancak CuO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve TiO<sub>2</sub> NP'lere karşı tolerans göstermiştir. Aynı konsantrasyonlardaki Ag ve ZnO karşılaştırıldığında Ag'nin toksisitesinin ZnO'ya göre yüksek olduğu görülmüştür (Ahmed vd., 2020).

BN'nin nanopartikül formları, elektronik, kaplamalar ve biyomedikal kullanımlar dahil olmak üzere çeşitli uygulamalar için incelenmiştir. Mevcut yaklaşım, nanoparçacık şeklindeki BN'nin genellikle düşük toksisiteye sahip olduğunun kabul edildiğini göstermektedir. Çalışmalar, BN nanoparçacıklarının insan sağlığı veya çevre üzerinde önemli olumsuz etkilere neden olmadığını göstermiştir.

*Maliyet (c6):* Faz değişim malzemelerinin maliyeti, TES sistemlerinin teknolojik ve ekonomik fizibilitesini etkileyen önemli faktörlerdir. Nanomalzemelerin her birinin maliyeti üretim tekniklerine göre değişiklik gösterebilmektedir. Ancak maliyet kriteri, nanomalzeme ile geliştirilmiş bir PCM hazırlanırken en çok kullanılan nanomalzemelerin satış maliyetlerine göre belirlenmiştir. Nanomalzemenin PCM katkı malzemesi olarak kullanımı aşaması maliyet kalemi sınırlarına dahil edilmemiştir.

## 2.2. Karar Matrisinin Oluşturulması

MCDM yöntemi ile karar vermek için kriterler belirlendikten ve uygun veriler toplandıktan sonra karar matrisi oluşturulmuştur. Literatür taraması sonucunda elde edilen bazı kriterler için değişimler hesaplanmış ve c1 ve c3 kriterleri için negatif değerler elde edilmiştir. Entropi yöntemi bir logaritma fonksiyonu içerdiğinden, verilerde negatif sayıların ve sıfırların bulunması sorun teşkil etmektedir. Bu sorunu aşmak için literatürde bazı dönüşümler önerilmiştir. Bu çalışmada negatif değerlerin ortalama ve standart sapmaları kullanılarak pozitifleştirme yapılmıştır. c1 ve c3 kriterlerinin değer aralığı ve yönü belirlenerek değişimlerden kaynaklı negatif x<sub>ij</sub> değerlerine denklem (1)'e göre pozitifleştirme uygulanmıştır.

$$x_{ij}^l = \frac{x_{ij} - \min_{ij}}{\max_{ij} - \min_{ij}} \quad (1)$$

Bu aşamada pozitifleştirme sonrası yeni c1 ve c3 değerleri ile karar matrisi yeniden oluşturulmuştur.

## 2.3. Kriterlerin Ağırlıklandırılması

MCDM problemlerinde kriter ağırlıklarının belirlemek için araştırmacılar tarafından farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bu çalışmada, objektif yöntem olarak Entropi yöntemi, subjektif olarak ise sıralama yöntemi tercih edilmiştir. Entropi kavramı, 1865 yılında Clausius tarafından termodinamikte düzensizlik ve dağılımın bir ölçütü olarak ortaya atılmıştır. Bu kavram, Shannon (1948) tarafından ayrık olasılık dağılımı ile açıklanan belirsizliğin bir ölçüsü olarak bilgi teorisi açısından farklı bir şekilde tanımlanmıştır (Zhang vd., 2021).

Entropi yönteminde, karar matrisindeki veriler, karar problemindeki kriterlerin ağırlıklarını hesaplamak için kullanılır (Ayçin ve Çakın, 2019; Lescauskiene vd., 2020). Basit bir ağırlıklandırma yöntemi olarak bilinen sıralama yöntemi, subjektif kriter ağırlıklandırma yöntemidir. Sıralama yöntemi, sıra toplamı, sıra üssü ve karşılıklı sıra kullanılarak ağırlıkları belirlemek için kullanılan üç yaklaşımda, kriterler en iyiden en kötüye doğru sıralanır (Odu, 2019).

### 2.3.1. Objektif ağırlıklandırma: entropi yöntemi

Entropi, veri kümeleri arasındaki karşılıkları ölçtüğü ve karar vericiye aktarılan ortalama içsel bilgileri netleştirdiği için önceden tanımlanmış bir karar matrisine göre işlev görür.

Shannon entropisi ile objektif ağırlığı belirlemek için kullanılan prosedür şu şekildedir:

**Adım 1**  $p_{ij}$  denklem (2) sonuçlarını elde etmek için karar matrisinin normalleştirilmesi.

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (2)$$

**Adım 2** Entropi hesaplanması

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij}, \quad (3)$$

Burada,  $k=1/\ln(m)$

**Adım 3** Entropi kavramına dayalı olarak objektif ağırlığın tanımlanması

$$w_j = \frac{1-E_j}{\sum_{j=1}^n (1-E_j)}, \quad (4)$$

**Adım 4** Karar verici subjektif ağırlık atarsa, entropi ağırlığının genel formunun hesaplanması

$$w_j^* = \frac{s_j w_j}{\sum_{j=1}^n s_j w_j}, \quad (5)$$

Genel Shannon entropi ağırlığı  $w_j^*$  denklemi, öznel ve nesnel ağırlıkların ( $s_j$  and  $w_j$ ) birleştirilmesiyle elde edilir.

### 2.3.2. Subjektif ağırlıklandırma: Sıralama yöntemi

Sıralama yönteminde, kriterler en iyiden en kötüye doğru sıralanır. Sıralama yöntemini kullanarak ağırlıkları belirlemeye yönelik üç yaklaşım vardır: sıra toplamı (rank-sum (RS)), sıra üssü (the rank exponent (RE)) ve karşılıklı sıra (reciprocal rank (RR)).

RS yöntemi, ağırlık satırlarının, satırların toplamına bölünmesiyle normalize edilerek hesaplanır.

$$w_j(RS) = \frac{n-p_j+1}{\sum_{k=1}^n n-p_k+1} \quad (6)$$

Burada  $p_j$ ,  $j$ . kriterin sıralamasıdır  $j = 1, 2, \dots, n$

RE yöntemi, değerin, en önemli kriterin bir sonucu olarak bir karar verici tarafından tahmin edilebilen bir parametrenin üstel değerine yükseltilmesi dışında sıra toplamı yöntemine benzer.

$$w_j(RE) = \frac{(n-p_j+1)^p}{\sum_{k=1}^n (n-p_k+1)^p} \quad (7)$$

Burada  $p_j$  'nin derecesidir ve  $p$ , ağırlıkları tanımlayan parametredir,  $j = 1, 2, \dots, n$ .

RR yöntemi, ölçüt sıralamasının normalleştirilmiş karşılığını kullanır. Denklem (8) ile ifade edilebilir.

$$w_j(RR) = \frac{1/p_j}{\sum_{k=1}^n (1/k)} \quad (8)$$

Burada  $p_j$   $j$ . kriterin sıralamasıdır,  $j=1, 2, \dots, n$ .

### 2.3.3. Alternatiflerin önceliklendirilmesi

Alternatiflerin değerlendirilmesinde MULTIMOORA yöntemi kullanılmıştır. MULTIMOORA 2010 yılında Brauers, Zavadskas tarafından ortaya konulmuş olup, “Moora oran”, “Moora referans noktası”, “Moora tam çarpım formu” yaklaşımlarının bütünleşik bir değerlendirmesidir. Yöntem birbirinden farklı ölçüm birimleri olan kriterleri bir arada değerlendirerek en iyi alternatifi seçmeye imkân sağlamaktadır (Maghsoodi vd., 2018; Odu vd., 2019; Hafezalkotob ve Hafezalkotob, 2016; Hafezalkotob vd., 2019).

MULTIMOORA yönteminde ilk olarak  $i= 1, 2, \dots m$  alternatif sayısı,  $j= 1, 2, \dots n$  kriter sayısı ile karar matrisi oluşturulmaktadır.

$$\begin{matrix} x_1(1) & \cdots & x_1(n) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_m(1) & \cdots & x_m(n) \end{matrix}$$

İzleyen adımda karar matrisi normalleştirilir. Normalizasyon matrisi, kriterlerin her bir alternatifin karelerinin toplamının kareköküne bölünmesiyle elde edilir. Bu işlem Denklem (9) ile elde edilir.  $X_{ij}^*$ ;  $i$ . alternatif,  $j$ . kriter değerinin normalleştirilmiş halidir.

$$X_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (9)$$

Normalizasyon işleminden sonra sütundaki kriterler değerlendirilerek maksimum veya minimum olmalarına göre toplanır ve toplanan minimum kriter değerleri toplanan maksimum kriter değerlerinden çıkarılır. Özetle, Denklem (10)'daki gibi ifade edilebilir;  $j=1, 2, 3, \dots, g$  maksimize edilen kriterler ve  $i=1, 2, 3, \dots, n$  minimize edilen kriterlerdir.

$$y_i^* = j = 1gx_{ij}^* - j = g + 1nx_{ij}^* \quad (10)$$

Önemlilik katsayısı veya niteliklerin önem ağırlıkları oran sistemine eklenebilir. Denklem (10), (11) ve (12) gibi Genişletilmiş Oran Sistemine uyarlanabilir.

$$y_i^w = \sum_{j=1}^g s_j x_{ij}^* - \sum_{j=g+1}^n s_j x_{ij}^* \quad (11)$$

$$y_i^{ew} = \sum_{j=1}^g w_j^* x_{ij}^* - \sum_{j=g+1}^n w_j^* x_{ij}^* \quad (12)$$

$y_i^w$  ve  $y_i^{ew}$  sırasıyla ağırlıklı ve entropi ağırlıklı oran sistemleri için tüm özneliliklerle ilgili olarak  $i$ . alternatifin belirlenen değerlerini ifade eder.

Optimal alternatif değerleri Denklem (13) ve (14)'e göre tanımlanabilir.

$$A_{WRS}^* = \{A_i | \max_i y_i^w\} \quad (13)$$

$$A_{EWRs}^* = \{A_i | \max_i y_i^{ew}\} \quad (14)$$

Alternatiflerin optimizasyon değerleri büyükten küçüğe sıralanır ve en iyi alternatife karar verilir. En yüksek puana sahip alternatif en iyi alternatif, en düşük puana sahip alternatif ise en kötü alternatif olarak kabul edilir.

Genişletilmiş referans noktası yaklaşımı, Denklem (15-16)'da verilen subjektif ve genel Shannon entropi ağırlıkları aracılığıyla geliştirilebilir.

$$z_i^w = \max_j |s_j r_j - s_j x_{ij}^*| \quad (15)$$

$$z_i^{ew} = \max_j |w_j r_j - w_j x_{ij}^*| \quad (16)$$

Ağırlıklı ve entropi ağırlıklı referans noktası yaklaşımlarının optimal alternatiflerini belirlemek için alternatifler Denklem (17-18)'de gösterildiği gibi küçükten büyüğe sıralanır.

$$A_{WRP}^* = \{A_i | \min_i z_i^w\} \quad (17)$$

$$A_{EWRP}^* = \{A_i | \min_i z_i^{ew}\} \quad (18)$$



Genişletilmiş tam çarpım formu, MULTIMOORA yönteminin üçüncü kısmı Denklem (19)'a göre belirlenebilir; burada g maksimize edilecek kriteri ve (n-g) minimize edilecek kriteri gösterir.

$$u_i^w = \frac{\prod_{j=1}^g (x_{ij}^*)^{s_j}}{\prod_{j=g+1}^n (x_{ij}^*)^{s_j}} \quad (19)$$

Normalleştirilmiş karar matrisi kullanılarak  $u_i^{w'}$ 'nin eşdeğer bir formu Denklem (20)'ye göre hesaplanabilir.

$$u_i^{ew} = \frac{\prod_{j=1}^g x_{ij}^{w_j^*}}{\prod_{j=g+1}^n x_{ij}^{w_j^*}} \quad (20)$$

Her iki tekniğe dayalı en uygun alternatifler Denklem (21-22)'de verilmiştir.

$$A_{WMF}^* = \{A_i | \max_i u_i^w\} \quad (21)$$

$$A_{EMF}^* = \{A_i | \max_i u_i^{ew}\} \quad (22)$$

Duyarlılık analizi, çözümlenme sürecinde meydana gelen tercihlerdeki küçük değişikliklere veya parametreler için alınan değerlerdeki küçük değişikliklere karşı çözümün kararlılığı veya davranışı olarak tanımlanmaktadır (Mukhametzyanov ve Pamucar, 2018). Kriter ağırlıklarının değişimine dayalı duyarlılık analizi, farklı sıralama yöntemlerinden elde edilen sonuçların MULTIMOORA'da yeniden hesaplanması ile gerçekleştirilmiştir.

### 3. Bulgular

Literatür taramasına dayalı olarak (Tablo 1), c1 ve c3 kriterlerinin pozitifleştirilmesi sürecinden sonra karar matrisi (Tablo 2) elde edilmiştir.

**Tablo 2.** Karar Matrisi

İnorganik malzeme	Erime	Gizli Isı	Termal	Ön İşlem Gereksinimi	Toksosite	Maliyet (\$)
	Noktası Değişimi (%)	Değişimi (%)	İletkenlik Değişimi (%)			
CuO	0,00	68,62	0,01	5	7	33,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,27	67,40	2,49	7	6	14,00
Ag	1,28	84,85	0,08	8	9	150,00
TiO <sub>2</sub>	0,07	72,62	0,92	9	5	1,20
BN	2,32	70,65	0,75	9	2	106,00

Karar matrisi kullanılarak objektif ve subjektif yöntemlerle belirlenen kriter ağırlıklarının sonuçları Tablo 3'te gösterilmiştir.

**Tablo 3.** Objektif ve Subjektif Ağırlıklandırma Sonuçları (%)

Kriterler		Erime Noktası Değişimi	Gizli Isı Değişimi	Termal İletkenlik Değişimi	Ön İşlem Gereksinimi	Toksosite	Maliyet
Ağırlıklandırma yöntemi	Entropi	33,6	0,2	28,5	1,1	12,2	24,5
	Sıralama Sıra Toplamı	28,6	4,8	9,5	23,8	14,3	19,0

**Tablo 3 (Devam).** Objektif ve Subjektif Ağırlıklandırma Sonuçları (%)

		Kriterler					
		Erime Noktası Değişimi	Gizli Isı Değişimi	Termal İletkenlik Değişimi	Ön İşlem Gereksinimi	Toksisite	Maliyet
Sıralama	Sıra Üssü	39,6	1,1	4,4	27,5	9,9	17,6
	Karşılıklı Sıra	6,8	40,8	20,4	8,2	13,6	10,2

Tablo 3'te gösterilen entropi ile ağırlıklandırma sonuçlarına göre en önemli kriter %33,6 ile erime noktası değişimi (c1) olarak belirlenmiştir. Sıralama yönteminde, sıra toplamı ve sıra üssü yöntemlerinin her ikisi için de c1 en önemli kriter iken, karşılıklı sıralama yöntemi için gizli ısı değişimi (c2) en önemli kriterdir. Kriter ağırlıklarının karar verme yöntemine etkisinin belirlenmesi objektif ve subjektif karşılaştırma yapılabilmesi için sırasıyla entropi ve sıralama yöntemine ait sonuçlar MULTIMOORA karar verme yönteminde kullanılmıştır.

MULTIMOORA (objektif ve subjektif ağırlıklar) yaklaşımıyla elde edilen alternatiflerin nihai sıralaması Tablo 4'te verilmiştir.

**Tablo 4.** Ağırlıklı MULTIMOORA (Objektif Ve Subjektif Ağırlıklar) İçin Değerlendirme Sonuçları

Alternatif	Ağırlıklandırma Yöntemi	Oran Sistemi	Referans Noktası Yaklaşımı	Tam Çarpımsal Form	Nihai Sıralama
CuO		4	5	5	5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		1	3	1	2
Ag	Entropi	5	2	4	4
TiO <sub>2</sub>		3	4	3	3
<b>BN</b>		2	1	2	<b>1</b>
CuO		4	5	5	5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		2	3	2	2
Ag	Sıra Toplamı	5	2	4	4
TiO <sub>2</sub>		3	4	3	3
<b>BN</b>		1	1	1	<b>1</b>
CuO	Sıra üssü	5	5	5	5

**Tablo 4 (Devam).** Ağırlıklı MULTIMOORA (Objektif Ve Subjektif Ağırlıklar) İçin Değerlendirme Sonuçları

Alternatif	Ağırlıklandırma Yöntemi	Oran Sistemi	Referans Noktası Yaklaşımı	Tam Çarpımsal Form	Nihai Sıralama
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		2	3	2	2
Ag		3	2	4	3
TiO <sub>2</sub>		4	4	3	4
<b>BN</b>		<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>

#### 4. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada, PCM özelliklerini ve performanslarını iyileştirmek için kullanılan inorganik bazlı nanomalzemeler ile yapılan mevcut çalışmalar ve MCDM yöntemleri kullanılarak yapılan çalışmalar incelenmiştir. Objektif ağırlıklandırma yöntemi olan entropi ve subjektif yöntem olarak sıralamaya göre belirlenen kriter ağırlıklandırma sonuçlarına göre “erime noktası”nın en önemli kriter olduğu görülmüştür. Subjektif ağırlık, doğrudan karar vericilerin yorumlarına ve mühendislik deneyimlerine dayalı olarak elde edilmiştir. Bunu takiben, bu iki kriter ağırlıklandırma yönteminin MULTIMOORA sıralama yöntemi üzerindeki etkisi incelenmiş ve entropi, sıra toplamı ve sıra üssü kriter ağırlıklandırmasını içeren MULTIMOORA uygulamasında “BN” en iyi alternatif olmuştur. Karşılıklı sıralama sonuçlarında ise, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ilk sırada yer almıştır. Bu sonucun, ikinci yüksek ağırlık değerine sahip termal iletkenlik değişimi değerinin Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> için yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yapılan tüm uygulamalarda CuO en son tercih edilen alternatif olmuştur. MULTIMOORA yöntemi ile entropi ve sıralama kavramına dayanan bu çalışma, PCM'leri geliştirmek için uygun inorganik nanomalzemelerin seçilmesi alanında karar vermenin etkili bir yolunu sunar.

Katkı malzemelerinin PCM özellikleri üzerindeki etkileri, katkı malzemelerinin türü ve konsantrasyonu, amaçlanan uygulama ve istenen performans özellikleri dahil olmak üzere çok çeşitli faktörlere bağlıdır. Katkı malzemelerinin seçimi ve test edilmesi farklı konsantrasyonlar, farklı çalışma süreleri, farklı ön işlem gereksinimlerinde çalışmalara ihtiyaç duyar. Ayrıca bu nanomalzemelerin PCM tabanlı enerji depolama sistemlerini belirli sıcaklık aralıkları ve hacim değişikliği gereksinimlerine göre optimize etmek gereklidir. Bu çalışmanın amacı çok geniş bir kullanım alanına sahip PCM olarak kullanılan parafin vaksların inorganik nanomalzemeler ile geliştirilmesine yönelik genel bir görüş ortaya koymaktır. Elde edilen sonuçlar ile deneysel çalışmaların sayısının azaltılması da hedeflenmektedir. MCDM çalışmasının sonunda 1. alternatif olarak BN en iyi sonuç iken, 2. Sırada Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'in en iyi katkı malzemesi olduğu görülmesi, deneysel çalışmaların planlanması sürecinde sırasıyla bu iki malzemenin katkı malzemesi olarak öncelikli kullanım potansiyelini ortaya koymaktadır. Çalışmanın sınırları, bu makalede tartışılan kriterler ve alternatiflerle orantılıdır ve bunların daha da geliştirilme potansiyeli vardır. Gelecekteki araştırmalarda, inorganik ve organiklerin birlikte değerlendirilmesinin yanı sıra farklı MCDM yöntemlerinin uygulanması da ele alınabilir.

#### Teşekkür

Bu çalışma Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından 22ADP097 ve numaralı projeler kapsamında desteklenmiştir.

#### Referanslar

Al Ghossein, R. M., Hossain, M. S., & Khodadadi, J. M. (2017). Experimental determination of temperature-dependent thermal conductivity of solid eicosane-based silver nanostructure-enhanced phase change materials for thermal energy storage. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 107, 697-711. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.059>

Aydın, A. A. (2010). The synthesis and thermal properties of novel organic phase change materials (PhD thesis). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı

- Cárdenas, B., & León, N. (2013). High temperature latent heat thermal energy storage: Phase change materials, design considerations and performance enhancement techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 724-737. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.028>
- Coetzee, D., Venkataraman, M., Militky, J., & Petru, M. (2020). Influence of nanoparticles on thermal and electrical conductivity of composites. *Polymers*, 12(4), 742. <https://doi.org/10.3390/polym12040742>
- Das, D., Sharma, R. K., Saikia, P., & Rakshit, D. (2021). An integrated entropy-based multi-attribute decision-making model for phase change material selection and passive thermal management. *Decision Analytics Journal*, 1, 100011. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2021.100011>
- Demir, G., & Arslan, R. (2022) Sensitivity Analysis in Multi-Criterion Decision-Making Problems. *Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 24(3), 1025-1056. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2021.100011>
- Fang, X., Fan, L. W., Ding, Q., Yao, X. L., Wu, Y. Y., Hou, J. F., ... & Hu, Y. C. (2014). Thermal energy storage performance of paraffin-based composite phase change materials filled with hexagonal boron nitride nanosheets. *Energy conversion and management*, 80, 103-109. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.01.016>
- George, M., Pandey, A. K., Abd Rahim, N., Tyagi, V. V., Shahabuddin, S., & Saidur, R. (2020). A novel polyaniline (PANI)/paraffin wax nano composite phase change material: Superior transition heat storage capacity, thermal conductivity and thermal reliability. *Solar Energy*, 204, 448-458. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.04.087>
- Huang, Z., Wang, C., Zhou, L., & Wu, C. (2021). Thermal conductivity enhancement and shape stability of phase-change materials using high-strength 3D graphene skeleton. *Surfaces and Interfaces*, 26, 101338. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2021.101338>
- Javadi, F. S., Metselaar, H. S. C., & Ganesan, P. (2020). Performance improvement of solar thermal systems integrated with phase change materials (PCM), a review. *Solar Energy*, 206, 330-352. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.05.106>
- Jeng, H. A., & Swanson, J. (2006). Toxicity of metal oxide nanoparticles in mammalian cells. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 41(12), 2699-2711. <https://doi.org/10.1080/10934520600966177>
- Jiang, G., Huang, J., Fu, Y., Cao, M., & Liu, M. (2016). Thermal optimization of composite phase change material/expanded graphite for Li-ion battery thermal management. *Applied Thermal Engineering*, 108, 1119-1125. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.197>
- Kaviarasu, C., & Prakash, D. (2016). Review on Phase Change Materials with Nanoparticle in Engineering Applications. *Journal of Engineering Science & Technology Review*, 9(4).
- Kibria, M. A., Anisur, M. R., Mahfuz, M. H., Saidur, R., & Metselaar, I. H. S. C. (2015). A review on thermophysical properties of nanoparticle dispersed phase change materials. *Energy conversion and management*, 95, 69-89. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.02.028>
- Kuziel, A. W., Dzido, G., Turczyn, R., Jędrysiak, R. G., Kolanowska, A., Tracz, A., ... & Boncel, S. (2021). Ultra-long carbon nanotube-paraffin composites of record thermal conductivity and high phase change enthalpy among paraffin-based heat storage materials. *Journal of Energy Storage*, 36, 102396. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102396>
- Lin, S. C., & Al-Kayiem, H. H. (2016). Evaluation of copper nanoparticles-Paraffin wax compositions for solar thermal energy storage. *Solar Energy*, 132, 267-278. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.03.004>
- Luo, Y., Xiong, S., Huang, J., Zhang, F., Li, C., Min, Y., ... & Liu, Y. (2021). Preparation, characterization and performance of paraffin/sepiolite composites as novel shape-stabilized phase change materials for thermal energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 231, 111300. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111300>
- Mohamed, N. H., Soliman, F. S., El Maghraby, H., & Moustfa, Y. M. (2017). Thermal conductivity enhancement of treated petroleum waxes, as phase change material, by  $\alpha$  nano alumina: Energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 1052-1058. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.009>
- Nazari, M. A., Maleki, A., Assad, M. E. H., Rosen, M. A., Haghghi, A., Sharabaty, H., & Chen, L. (2021). A review of nanomaterial incorporated phase change materials for solar thermal energy storage. *Solar Energy*, 228, 725-743. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.08.051>

- Pamučar, D., & Čirović, G. (2015). The selection of transport and handling resources in logistics centers using Multi-Attributive Border Approximation area Comparison (MABAC). *Expert systems with applications*, 42(6), 3016-3028. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.11.057>
- Park, S., Lee, Y. K., Jung, M., Kim, K. H., Chung, N., Ahn, E. K., ... & Lee, K. H. (2007). Cellular toxicity of various inhalable metal nanoparticles on human alveolar epithelial cells. *Inhalation toxicology*, 19(sup1), 59-65. <https://doi.org/10.1080/08958370701493282>
- Shahid, U. B., & Abdala, A. (2021). A critical review of phase change material composite performance through Figure-of-Merit analysis: Graphene vs Boron Nitride. *Energy Storage Materials*, 34, 365-387. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2020.10.004>
- Sheng, N., Zhu, R., Dong, K., Nomura, T., Zhu, C., Aoki, Y., ... & Akiyama, T. (2019). Vertically aligned carbon fibers as supporting scaffolds for phase change composites with anisotropic thermal conductivity and good shape stability. *Journal of Materials Chemistry A*, 7(9), 4934-4940.6 <https://doi.org/10.1039/C8TA11329G>
- Tony, M. A. (2021). Recent frontiers in solar energy storage via nanoparticles enhanced phase change materials: Succinct review on basics, applications, and their environmental aspects. *Energy Storage*, 3(4), e238. <https://doi.org/10.1002/est2.238>
- Ulus, H. (2021). The impact of seawater aging on basalt/graphene nanoplatelet-epoxy composites: performance evaluating by Dynamic Mechanical Analysis (DMA) and short beam shear (sbs) tests. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(1), 412-419. <https://doi: 10.28948/ngumuh.791161>
- Wang, J., Xie, H., Guo, Z., Guan, L., & Li, Y. (2014). Improved thermal properties of paraffin wax by the addition of TiO<sub>2</sub> nanoparticles. *Applied Thermal Engineering*, 73(2), 1541-1547. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.05.078>
- Wang, J., Li, Y., Zheng, D., Mikulčić, H., Vujanović, M., & Sundén, B. (2021). Preparation and thermophysical property analysis of nanocomposite phase change materials for energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151, 111541. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111541>
- Wei, G., Wang, G., Xu, C., Ju, X., Xing, L., Du, X., & Yang, Y. (2018). Selection principles and thermophysical properties of high temperature phase change materials for thermal energy storage: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1771-1786. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.271>
- Yang, K., Zhu, N., Chang, C., Wang, D., Yang, S., & Ma, S. (2018). A methodological concept for phase change material selection based on multi-criteria decision making (MCDM): A case study. *Energy*, 165, 1085-1096. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.022>
- Zavadskas, E. K., & Podvezko, V. (2016). Integrated determination of objective criteria weights in MCDM. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 15(02), 267-283. <https://doi.org/10.1142/S0219622016500036>
- Zhao, B., Wang, Y., Wang, C., Zhu, R., Sheng, N., Zhu, C., & Rao, Z. (2021). Thermal conductivity enhancement and shape stabilization of phase change thermal storage material reinforced by combustion synthesized porous Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Journal of Energy Storage*, 42, 103028. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103028>