

Alüminyum Matrisli Kompozitler İçin En Uygun Takviye Malzemesinin AHP Yöntemi ile Seçimi

Yaşam KANDEMİR^{1,2}, Temel VAROL^{2*}

Öz

Düşük yoğunluk, yüksek sertlik, iyi aşınma direnci ve yüksek özgül mukavemet özelliklerine sahip olan Metal matris kompozitler ileri mühendislik malzemelerinin önemli bir türüdür ve bu özelliklerinden dolayı özellikle otomotiv, savunma, havacılık sektörlerinde tercih edilmektedirler. Alüminyum metal matris kompozitler düşük yoğunluk, ucuzluk ve kolay üretim gibi özellikleri ile metal matrisli kompozitlerin önemli bir sınıfını oluşturmaktadır. Metal matris kompozitlerin mukavemet ve sertlik gibi mekanik özelliklerini ve yüksek sıcaklık dayanımını geliştiren ana unsur seramik esaslı takviye elemanlarıdır. Bu noktada takviye malzemelerinin seçimi oldukça kritiktir. Bu çalışmada takviye malzemesi seçimine karar vermek amacıyla çok kriterli karar verme yöntemlerinden biri olan Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) Yöntemi kullanılmıştır. Seçim kriterleri olarak rijitlik, yoğunluk, kırılma tokluğu, fiyat ve ergime noktası seçilmiştir. Metal matrisli kompozitlerin üretiminde en çok tercih edilen takviye malzemeleri olan B₄C, TiC, SiC ve Al₂O₃ alternatif takviye türü olarak seçilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda en önemli seçim kriterinin rijitlik (%51), en uygun alternatif takviye malzemesinin ise B₄C (%42) olduğu belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Alüminyum metal matris kompozit, Analitik hiyerarşi prosesi (AHP), Takviye malzemesi, Bor karbür, Titanyum karbür.

Selection of the Most Appropriate Reinforcement Material for Aluminum Matrix Composites by AHP Method

Abstract

Metal matrix composites, which have low density, high hardness, good wear resistance and high specific strength properties, are an important type of advanced engineering materials and they are preferred especially in the automotive, defense and aerospace sectors due to these properties. Aluminum metal matrix composites constitute an important class of metal matrix composites with their features such as low density, cheapness and easy production. The main element that improves the mechanical properties of metal matrix composites such as strength and hardness and high temperature resistance is ceramic-based reinforcing elements. At this point, the selection of reinforcement materials is very critical. In this study, the Analytical Hierarchy Process (AHP) Method, which is one of the multi-criteria decision-making methods, is used to decide on the choice of reinforcement material. Rigidity, density, fracture toughness, price and melting point are chosen as selection criteria. B₄C, TiC, SiC and Al₂O₃, which are the most preferred reinforcement materials in the production of metal matrix composites, are chosen as alternative reinforcement types. As a result of the study, it has been determined that the most important selection criterion is rigidity (51%) and the most suitable alternative reinforcement material is B₄C (42%).

Keywords: Aluminum metal matrix composite, Analytical hierarchy process (AHP), Reinforcement material, Boron carbide, Titanium carbide.

¹Trabzon Silah Sanayi A.Ş., Ar-Ge Merkezi, Trabzon, Türkiye, ykandemir41@gmail.com

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Trabzon, Türkiye, tvarol@ktu.edu.tr

¹<https://orcid.org/0000-0002-5718-6972>

²<https://orcid.org/0000-0002-1159-5383>

1. Giriş

Malzeme biliminin esasını teşkil eden metal, polimer ve seramik malzemelerin birbiri içinde çözünmeyecek şekilde mikro ve makro olarak bir araya getirilmesi ile oluşan ve ana malzeme özelliklerinden farklı fiziksel ve mekanik özellikler sergileyen malzemeler olarak tanımlanan kompozit malzemelerin kullanımı günden güne artmaktadır. Günümüzde gelişen teknoloji ve ihtiyaç duyulan gereksinimlere bağlı olarak kompozit malzemeler de çok sayıda alt gruba ayrılmış ve yeni tür kompozit esaslı malzemeler geliştirilmiştir (Onaran, 1993). Bu kompozit türlerinden biri de metal matrisli kompozit malzemelerdir. Yüksek özgül mukavemet, düşük yoğunluk, yüksek sıcaklık dayanımı, iyi derecede aşınma direnci, üstün darbe direnci ve yüksek sertlik gibi özelliklerin aynı malzeme bünyesinde elde edilmesini sağlayan metal matrisli kompozitler otomotiv, savunma, havacılık ve yapısal uygulamalarda tercih edilen bir malzeme türü haline gelmiştir (Chakravorthy ve Rao, 2022).

Metal matris kompozitlerde kullanılan iki ana elaman matris ve takviyedir. Matris malzemesinin ana görevi: kompozit malzeme üzerine gelen yükleri takviye malzemelerine iletmek, çatlak yayılmasını önlemek, takviye elemanlarını bir arada tutmak, kompozit malzemenin tokluğunu artırmak iken, takviye malzemesinin görevi ise yüksek darbe ve aşınma direnci sağlayarak kompozit yapının sertliğini ve rijitliğini arttırmak, aşınma direncini geliştirmek ve yüksek sıcaklık dayanımı sağlamaktır (Varol, 2012; Varol, 2016). Matris türüne göre alüminyum, bakır, magnezyum, çinko ve titanyum esaslı metal matrisli kompozitler en çok tercih edilen metal matrisli kompozitler olup özellikle alüminyum matrisli kompozitler sahip oldukları düşük yoğunluk, ucuzluk ve kolay üretim özellikleri ile ön plana çıkmaktadırlar (Siddharthan ve ark., 2022). Takviye türüne göre ticarileşmiş ve üzerinde araştırma yapılan metal matrisli kompozitler ise genellikle alüminyum oksit (Al_2O_3), silisyum karbür (SiC), bor karbür (B_4C) ve titanyum karbür (TiC) takviyeli metal matrisli kompozitlerdir (Emiru ve ark., 2022; Surya ve Gugulothu, 2021; Qiao ve ark., 2022).

Literatürde takviye türü ve oranının (Taşkın ve ark., 2022), matris türü ve miktarının (Paul ve ark., 2022) ve üretim yönteminin (Luo ve ark., 2022) metal matrisli kompozitlerin fiziksel, mekanik ve termal özellikleri üzerine etkisinin araştırıldığı çok sayıda araştırma çalışması vardır. Güler ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada bakır matrisli metal matrisli kompozitlerin özellikleri üzerine Al_2O_3 takviye oranının etkisi araştırılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre aşınma oranı ağırlıkça %3 Al_2O_3 miktarına kadar düşüş göstermiş ve artan Al_2O_3 miktarı ile kompozit yapısında oluşan gözenek miktarındaki artış sebebiyle bu oran yükselmiştir (Güler ve ark., 2021). Varol ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada ise AA2024 matrisli SiC takviyeli metal matrisli kompozitlerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine SiC oranının etkisi araştırılmış ve bu etki için yapay sinir ağı temelli tahmin modelleri oluşturulmuştur. Çalışma sonuçlarına göre artan SiC oranı ile yoğunluk

değerleri azalmış buna karşın sertlik değerlerinde önemli artışlar gözlemlenmiştir. Ayrıca yapay sinir ağı yöntemi ile oluşturulan tahmin modelleri ile yoğunluk ve sertlik değerleri için yapılan tahminlerde başarı oranı %99 olarak belirlenmiştir (Varol ve ark., 2018). Varol ve Çanakçı tarafından yapılan başka bir çalışmada ise AA2024 matrisli B₄C takviyeli kompozitlerin özellikleri üzerine B₄C oranı ve boyutunun etkisi araştırılmış ve takviye oranı artışına ek olarak takviye boyutunun da metal matrisli kompozitlerin özelliklerini etkilediği vurgulanmıştır (Varol ve Çanakçı, 2013).

Yukarıda açıklanan çalışmalarda görüldüğü gibi metal matrisli kompozitlerin üretimi ve özellikleri üzerine çok sayıda araştırma yapılmasına ek olarak araştırmacılar tarafından çok ölçütlü karar verme yöntemleri ile matris ve proses değişkenlerini belirleme çalışmaları da yürütülmüştür. Avikala ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada maliyet, yoğunluk, sertlik, gerilme ve ergime noktası kriterlerine bağlı olarak 7000 serisi alaşım türlerinin seçimi için kriter ağırlıkları Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ile belirlenerek TOPSIS yöntemi ile en uygun matris türü belirlenmeye çalışılmıştır (Avikala ve ark., 2021). Kumar ve arkadaşları tarafından yapılan bir diğer çalışmada, proses optimizasyonu için 6 farklı proses parametresi (I_p , T_{on} , T_{off} , W_f , W_t , SV) ve talaş kaldırma oranı, yüzey pürüzlülüğü ve kıvılcım boşluğu olmak üzere 3 yanıt parametresi (MRR, SR, SG) dikkate alınarak Taguchi L_{27} deney düzeneği ile parametre etkileri araştırılmış ve AHP, Genetik Algoritma yöntemi ile değerlendirmelerde bulunulmuştur (Kumar, 2022). Başka bir çalışmada ise karıştırmalı döküm yöntemi ile üretilen AA7050/B₄C kompozitlerinin işlenmesi için kullanılan EDM prosesine ait parametrelerin optimizasyonu Taguchi yöntemi ile belirlenmeye çalışılmıştır (Kumar ve ark., 2019). Sharma ve arkadaşları tarafından yapılan araştırma çalışmasında farklı Si₃N₄ oranlarına sahip olan 5 ayrı kompozit malzeme TOPSIS, VIKOR, COPRAS, PROMETHEE II karar verme yöntemleri ile incelenerek en uygun kompozit malzemenin AA8011-%15 Si₃N₄ olduğuna karar vermişlerdir (Sharma ve ark., 2022). Kumar ve arkadaşları ise yarı otomatik karışım döküm yöntemi ile hazırlanan SiO₂ ve SiC seramik partikülleri takviyeli AA2024 kompozit malzemeleri arasında PSI yöntemini kullanarak en uygun kompozit malzeme seçimi yapmışlardır. Bu malzeme seçimi ile beraber yoğunluk, eğme dayanımı, gerilme kuvveti, darbe dayanımı, aşınma direnci kriterlerini araştırmışlardır (Kumar ve Kumar, 2020). Yapılan tüm bu çalışmalar göz önüne alındığında metal matrisli kompozit üretimi ile ilgili olarak kullanılacak takviye malzemesi seçimini çok kriterli karar verme yöntemleri ile birleştiren bir araştırma çalışması bulunmamaktadır. Bu nedenle bu çalışmanın amacı savunma, havacılık ve otomotiv sanayinde sıklıkla kullanılan Al matrisli kompozitler için en uygun takviye türünün çok ölçütlü karar verme yöntemlerinden biri olan AHP yöntemi ile belirlenmesidir. AHP yöntemini esas aldığımız bu çalışmada kriter ve alternatifler için etkin bir sonuç, sistematik bir yaklaşım içeren Super Decisions uygulaması tercih edilmiştir. Super Decisions ile birlikte karar verme süreçlerinin uygulanabilirliği kolaylaşmakta ve en uygun alternatif seçimi ile kriter değerlendirmelerine olanak sağlamaktadır (Kaplan ve Saray, 2014). Bu doğrultuda Al matrisli

kompozit üretiminde sıklıkla tercih edilen dört farklı takviye türü (Al_2O_3 , SiC, B_4C , TiC) arasından en uygun olanının seçimi için rijitlik, yoğunluk, fiyat, kırılma tokluğu, ergime noktası kriterleri dikkate alınmıştır. Bu çalışma ile metal matrisli kompozit malzeme için en uygun takviye malzeme seçiminin belirlenmesi ve en etkin kriterin ortaya konması hedeflenmiştir.

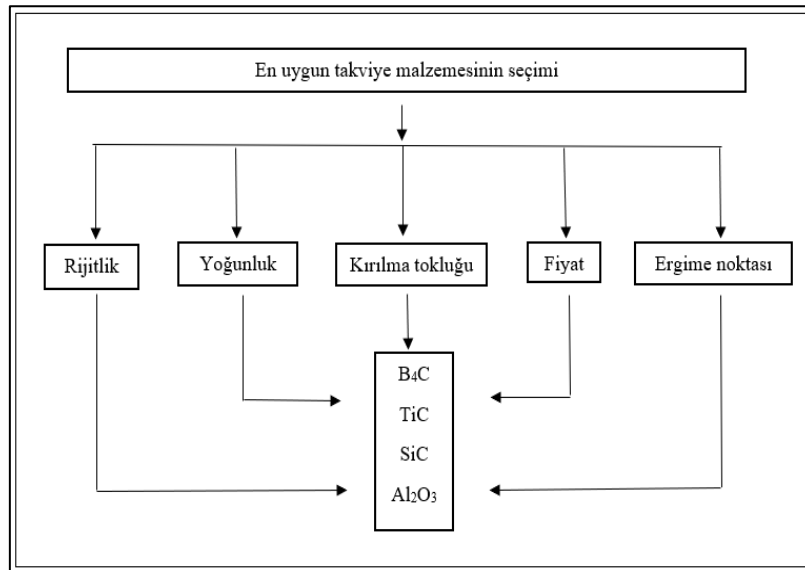
2. Materyal ve Metot

2.1. Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) Yöntemi

AHP, Saaty ile ortaya konan analitik karar verme mekanizmasıdır ve hiyerarşik bir yapı ile kriter ve alternatifleri değerlendiren adımları oluşturan bir yöntemdir. Kriterler ve alternatifler arasında ikili karşılaştırma matrisleri oluşturularak, birbiriyle matematiksel oranlar ortaya koyan bir karar sürecidir. Hedef, birden çok kriter ile birden çok alternatifin bulunduğu bir problemde karar mekanizmasını kolaylaştırmak ve oluşturulan hiyerarşik yapı doğrultusunda çözümler üretmektir. Matrisler oluşturulurken 9'lu Saaty ölçeği kullanılmakta ve bu ölçek yardımıyla matris elemanları arasındaki ilişkiler ortaya konmaktadır. AHP uygulama aşamaları şu sıra ile takip edilmektedir:

2.1.1. Hiyerarşik Yapının Oluşturulması

Bu yapı oluşturulurken amaç, kriterler ve alternatifler belirlenmektedir. Uzman görüşleri doğrultusunda hazırlanan bu seçenekler, Şekil 1'de ortaya konan hiyerarşik yapı ile entegre bir oluşum göstermektedir.



Şekil 1. Hiyerarşik yapının oluşturulması

2.1.2. Karşılaştırma Matrislerinin Oluşturulması

İkili karşılaştırma matrisleri oluşturulurken uzman fikirleri doğrultusunda probleme esas teşkil eden ana kriterler, alt kriterler ve alternatifleri içeren matrise karar verilir. Matris oluşturulduktan sonra Tablo 1’de gösterilen Saaty ölçeği ile ortaya konan 1-9 arası değerlendirme ölçütlerine göre matris elemanlarına ölçütler atanır.

Matris elemanları arasında biri ötekine göre daha önemli olan elemanın bulunduğu satır tamsayı olarak ifade edilir ancak daha az önemli olan elemanın satırı ise kesirli olarak yazılır. Bu şekilde hem kriterler için karşılaştırma matrisi hem de her bir alt kriter için alternatifler kendi aralarında ikili karşılaştırma matrisi oluşturulur. Saaty ölçeğine göre oluşturulan skalalar, kriterler arası değerlendirmelerde bulunmak için kullanılmaktadır.

Tablo 1. Saaty ölçeği değerlendirme skalası

Önem Değerleri (a_{ij})	Açıklama
1	Eşit derecede önemli
3	Orta derecede önemli
5	Kuvvetli derecede önemli
7	Çok kuvvetli derecede önemli
9	Mutlak derecede önemli
2,4,6,8	Ara değerler

2.1.3. İkili Karşılaştırma Matrisinin Normalize Edilmesi

İkili karşılaştırma matrisi oluşturulduktan sonra matris değerleri kendi aralarında normalize edilmesi gerekmektedir. Normalize işlemi, matris bulunan değer skalalarını tek bir düzeye indirmek için uygulanmaktadır. Ayrıca normalize işlemi için farklı formüller uygulanmaktadır (Özdağoğlu, 2013).

En yaygın kullanılan normalizasyon örneğinin formülü, Denklem 1’de gösterildiği gibi matris sütununda her bir değer sütun toplamına bölünerek elde edildiği normalizasyon örneğidir.

$$c_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum a_{ij}} \quad (1)$$

2.1.4. Öncelik Vektörü ve Tutarlılık Oranının Hesaplanması

Normalize matris oluşturulduktan sonra her satırın ortalaması Denklem 2’de gösterildiği gibi alınmaktadır. Satır ortalamaları, her satırın toplamının satırdaki eleman sayısına bölünmesiyle hesaplanmaktadır. Her satırın ortalaması alındıktan sonra elde edilen her bir değer önem ağırlıklarını (w) göstermektedir.

$$w = \frac{\sum_{j=1}^n C_{ij}}{n} \quad (2)$$

Öncelik vektör değerleri aşağıda belirtilmiştir. Vektör değerlerinin sıralaması aynı zamanda kriter ağırlıkları anlamına gelmektedir. Bu sayede en etkin kriterler bu matriste görülmektedir.

$$w = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \\ w_n \end{bmatrix}$$

Şekil 2. Örnek önem ağırlık matrisi

Önem ağırlıkları ile matris değerleri çarpıldıktan sonra her bir satırın toplamının değeri önem ağırlıklarına bölünür. Oluşan değerlerin toplam ortalaması Denklem 3’te gösterildiği üzere “ λ ” değerini ifade etmektedir.

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{n} \quad (3)$$

Tablo 2’de gösterilen rassal değerler, Denklem 4 ve Denklem 5 formülasyonları kullanılarak tutarlılık oranı hesaplanmaktadır.

Tablo 2. Karşılaştırma matrisinde kullanılan rassal değerler (Saaty, 2013)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Tutarlılık oranı “consistency rate” (CR), tutarlılık göstergesi” consistency indicator” (CI), rassal indeks “random index” (RI) olarak formülasyonlarda gösterilmektedir. CR değerinin %10’dan az olması beklenmektedir. Tutarlılık oranının %10’dan az çıkması değerlendirilen alternatif ve kriterlerin ikili ilişkilerinin tutarlı olduğunu ve elde edilen sonuçların pozitif yönde katkı

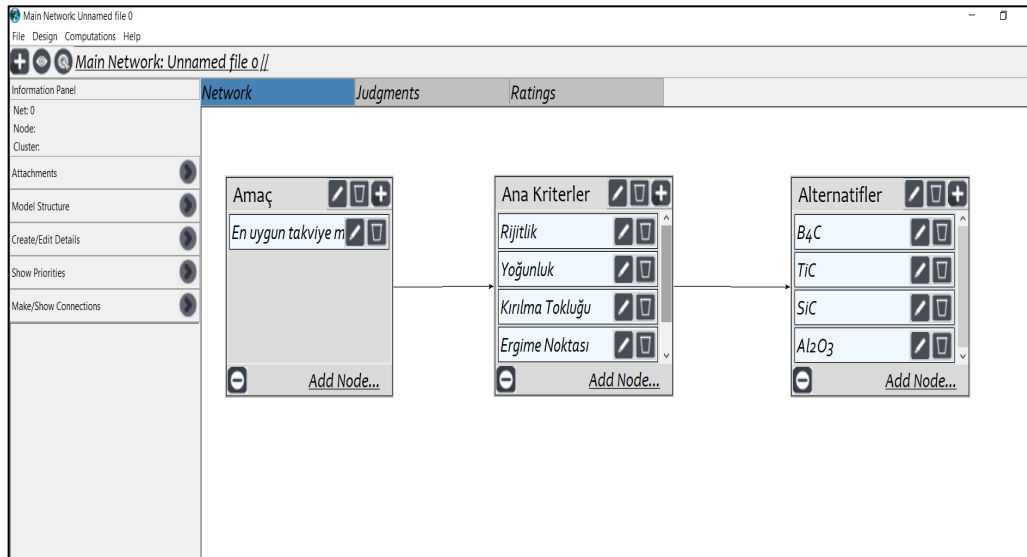
sağlayacağını göstermektedir. Bu sayede ilgili alternatifler arasında sağlıklı değerlendirmeler yapılmaktadır.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4)$$

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

2.2. Super Decisions Uygulaması

Super Decisions, Analitik Hiyerarşi Proses ve Analitik Ağ Proses yöntemlerine uygulama imkânı sunan bir araçtır. Bu araç, karar vericilerin veya karar aşamasında olan kullanıcıların kolaylıkla uygulayabildiği ve manuel olarak uzun süren işlem adımlarının kısa sürede neticeye varmasını sağlayan bir yazılımdır. Bu yazılımı uygulamak için problemin tanımlanması, kriter ve alternatiflerin belirlenmesi ve karar matrisinin oluşturulması gerekmektedir. Bu aşamalar ile birlikte kriter önceliklerinin ve ikili karşılaştırma matris değerlerinin belirlenmiş olması önem arz etmektedir. Bu adımlar izlendikten sonra Şekil 3'te gösterildiği gibi hiyerarşik yapının programa aktarılma süreci başlamaktadır.



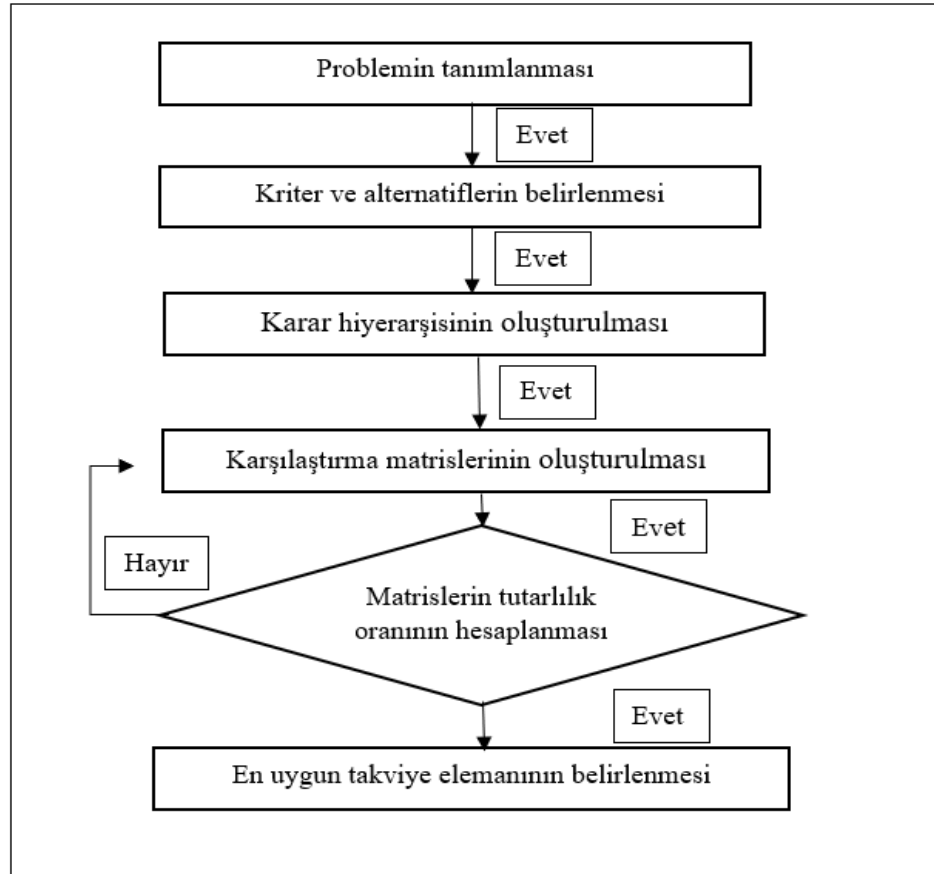
Şekil 3. Super decisions uygulaması ana ekranı

Hiyerarşik yapı tamamlandıktan sonra, yapının programa aktarılması ile birlikte kriter öncelikleri belirlendikten sonra kriter ağırlıkları hesaplanır. Eş zamanlı olarak alternatif değerleri de programa eklendiği için alternatif ağırlıklarını eş zamanlı olarak program bize sunmaktadır. Bu adımlar sonucunda sistematik bir yaklaşım ortaya konmaktadır.

3. Bulgular

Alüminyum metal matris kompozitler için en uygun takviye elemanı seçiminde Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemi tercih edilmiştir. AHP yönteminin tercih edilme sebepleri arasında her bir kriteri ve her bir alternatifi ayrı ayrı ele alarak tutarlı ve istikrarlı sonuçlar üretmesidir. Yöntemin uygulanması açısından tercih edilmekte olan “Super Decisions V3.2” karar destek yazılımı kullanılmıştır. Bununla birlikte karar algoritması Şekil 5’te gösterilmiştir. Bu doğrultuda yazılımdaki uygulama aşamaları şu şekilde gerçekleştirilmiştir:

1. Problemin tanımlanması
2. Kriterler ve alternatiflerin belirlenerek karar algoritmasının oluşturulması
3. Uzmanlar tarafından kriter ve alternatifler arasında öncelik tahminlerinin yapılması
4. Kriter ve alternatifler arasında ikili karşılaştırma matrislerinin oluşturulması
5. İkili karşılaştırma matrislerinin yazılıma girişinin yapılması
6. Kriterler arası önem ağırlıklarının hesaplanması
7. Her bir kriter için alternatifler arası ağırlıkların hesaplanması
8. Alternatifler arası önem ağırlıklarının belirlenmesi
9. Sonuçların grafiksel olarak tablolaştırılması



Şekil 4. Karar diyagramı

3.1. Problemin Tanımlanması

Çok kriterli karar verme yöntemlerinin sistematığına bakıldığında ilk aşama, problemin tanımlanma aşamasıdır. Bir problem tanımlanırken kendi sistematığı içerisinde belirlenen ölçütlerin neden ortaya konduğu açıklanmalıdır. Bu çalışmada metal matris kompozitlere en uygun takviye malzemesi seçiminde tanımlanan problem şu şekilde açıklanmaktadır:

Metal matrisli kompozitlerin üretimi için iki ana problem matris ve takviye malzemesi türünü belirlemektedir. Genel olarak yapısal imalat uygulamalarında hafiflik, düşük maliyet, yüksek korozyon direnci özelliklerinden dolayı matris malzemesi olarak alüminyum ve alaşımları tercih edilir. Takviye malzemeleri için ise bu şekilde net bir ayırım yapmak mümkün değildir. Bunun nedeni matris malzemeleri kadar tanınmıyor olmamaları, üretimlerinin ve ulaşılabilirliklerinin zor olması, saflıklarına bağlı olarak özelliklerinin değişmesidir. Bu nedenle çok ölçütlü karar verme yöntemleri içinde sıklıkla tercih edilen AHP yöntemi ile Al matrisli kompozitler için takviye malzemesi seçimi problemi tanımlanmıştır.

3.2. Kriter ve Alternatiflerin Belirlenmesi

Problem tanımlandıktan sonra uzman görüşü alınarak matris malzemesine takviye elemanları ve bu elemanların kriterleri belirlenerek alternatif ve kriterleri içeren Tabloda gösterilmiştir. Kriterlerin uzman görüşü doğrultusundaki sıralaması “Rijitlik-Yoğunluk-Ergime Noktası-Fiyat-Kırılma Tokluğu” şeklindedir. Fiyat kriteri %99 ve üzeri Saflık, 5-10 mikron boyut aralığında ve 100 gr esas alınarak değerlendirilmiştir. Takviye elemanı olarak titanyum karbür (TiC), bor karbür (B₄C), silisyum karbür (SiC), alüminyum oksit (Al₂O₃) belirlenmiştir. Esas alınan birimler Tablo 3’te belirtilmiştir.

Rijitlik: Kuvvet etkisi altında şekil değişimine karşı gösterilen direnç olarak adlandırılan ve Elastisite Modülü ile ifade edilen rijitlik, metal matrisli kompozit yapıda takviye elemanı olarak kullanılan seramik esaslı malzemeler kullanılarak geliştirilmektedir. Takviye elemanına ait en önemli özelliklerden biri olan rijitlik değerleri bu nedenle AHP yapısında bir seçim kriteri olarak seçilmiştir.

Yoğunluk: Genel olarak metal matrisli kompozitlerin sağladığı üstünlüklerden biri de düşük yoğunluktur. Bu nedenle seçim kriteri olarak dikkate alınmalıdır. Al matrisli kompozitler esas alındığında ise alüminyumun sağladığı düşük yoğunluk avantajının sürdürülebilmesi için takviye malzemesinin yoğunluğu da düşük olmalıdır.

Ergime Noktası: Takviye malzemesinin metal matrisli kompozitlerin yüksek sıcaklık dayanımını arttırması beklenmektedir. Bu iyileştirmenin ne derecede gerçekleşeceği ise takviye

malzemesinin ergime noktasına bağlıdır. Bu nedenle AHP yapısında bir seçim kriteri olarak seçilmiştir.

Kırılma Tokluğu: Metal matrisli kompozitlerin rijitliğini arttırarak sertlik, aşınma dayanımı ve darbe direnci özelliklerini geliştiren takviye malzemesi diğer taraftan matris yapının tokluğunu azaltmaktadır. Bu nedenle seçim kriteri olarak dikkate alınmalıdır. Tokluğun seviyesine göre kompozit yapı gevrek davranış da sergileyebilir. Bu nedenle takviye malzemesinin kırılma tokluğu çok düşük olmamalıdır.

Fiyat: Ortak bir malzeme seçim kriteri olan fiyat metal matrisli kompozitlerde matris ve takviye malzemesinin seçimi için oldukça önemlidir ve bu nedenle AHP yapısında bir seçim kriteri, olarak seçilmiştir. Takviye boyutu ne kadar küçük ise fiyat da o oranda artmaktadır.

Tablo 3. Kriter ve alternatif değerleri

Kriterler	Alternatifler			
	TiC	B ₄ C	SiC	Al ₂ O ₃
Fiyat (Euro)	150	160	104	76
Yoğunluk (g/cm ³)	4,91	2,52	3,21	3,96
Kırılma Tokluğu (Mpa.m ^{0.5})	2,80	2,50	3,10	3,30
Ergime Noktası (°C)	3067	2400	2545	2040
Rijitlik (GPa)	450	470	410	350

3.3. İkili Karşılaştırma Matrislerinin Oluşturulması

Kriter ve alternatif değerleri belirlendikten sonra kriterler arası ikili karşılaştırma matrisi oluşturulmuştur. İkili karşılaştırma matrisi oluşturulurken kriterler arasında önem değerleri dikkate alınmıştır. Kriterler arası önem değerleri belirlendikten sonra matris aşamasına geçilmiştir. Sonrasında fiyat, rijitlik, yoğunluk, kırılma tokluğu ve ergime noktası kriterlerine göre alternatifler arası karşılaştırma matrisleri yapılmıştır. Matrisler oluşturulurken matris değeri tamsayı ise satırdaki elemanın üstün olduğunu, eğer matris değeri kesirli sayı ise satırdaki matris elemanın üstünlüğünün zayıf olduğunu göstermektedir. Örneğin, tabloda yoğunluk kriteri fiyat kriterine göre “7” önem derecesine sahiptir. Fiyat kriterine göre yapılan ikili karşılaştırma matrisinde ise B₄C, TiC malzemesine göre “2” derece daha öneme sahiptir. Matrisler oluşturulurken uzman görüşlerine başvurulmuş ve yapılan değerlendirmeler sonucunda matrisler hakkındaki yorumlar ve hesaplamalar, formülasyonlar ile yapılmıştır. Bu sayede ikili ilişkiler hesaplanmıştır.

Tablo 4. Kriterler arası ikili karşılaştırma matrisi

	Fiyat	Yoğunluk	Kırılma Tokluğu	Ergime Noktası	Rijitlik
Fiyat	1	1/7	1/5	2	1/3
Yoğunluk	7	1	3	9	4
Kırılma Tokluğu	5	1/3	1	5	2
Ergime Noktası	1/2	1/9	1/5	1	1/3
Rijitlik	3	1/4	1/2	3	1

Uzman fikirleri alınarak oluşturulan kriterler arası karşılaştırma matrisinde %2 tutarlılık oranı elde edilmiştir. %51 oran ile rijitlik kriteri en büyük önem ağırlığına sahip olduğu görülmüştür.

Tablo 5. Fiyat kriterine göre alternatiflerin ikili karşılaştırma matrisi

	TiC	B ₄ C	SiC	Al ₂ O ₃
TiC	1	2	1/5	1/7
B ₄ C	1/2	1	1/6	1/8
SiC	5	6	1	1/3
Al ₂ O ₃	7	8	3	1

Fiyat kriterine göre yapılan alternatiflerin ikili karşılaştırma matrisinde %4 tutarlılık oranı elde edilerek en önemli alternatif %58 oranında Al₂O₃ olduğu saptanmıştır. Fiyat kriteri, maliyet kriteri olduğu için Al₂O₃, fiyatı en düşük olan alternatif olarak en iyi alternatiftir.

Tablo 6. Rijitlik kriterine göre alternatiflerin ikili karşılaştırma matrisi

	TiC	B ₄ C	SiC	Al ₂ O ₃
TiC	1	1/2	3	5
B ₄ C	2	1	4	6
SiC	1/3	1/4	1	3
Al ₂ O ₃	1/5	1/6	1/3	1

Rijitlik kriterine göre yapılan alternatiflerin ikili karşılaştırma matrisinde ortaya çıkan en iyi alternatif B₄C olmuştur.

Tablo 7. Yoğunluk kriterine göre alternatiflerin ikili karşılaştırma matrisi

	TiC	B ₄ C	SiC	Al ₂ O ₃
TiC	1	1/6	1/5	1/3
B ₄ C	6	1	3	3
SiC	5	1/3	1	2
Al ₂ O ₃	3	1/3	1/2	1

Yoğunluk kriterine göre yapılan alternatiflerin ikili karşılaştırma matrisinde %52 ile en iyi alternatif B₄C olmuştur.

Tablo 8. Kırılma tokluğu kriterine göre alternatiflerin ikili karşılaştırma matrisi

	TiC	B ₄ C	SiC	Al ₂ O ₃
TiC	1	1/3	1/2	1/4
B ₄ C	3	1	3	2
SiC	2	1/3	1	1/4
Al ₂ O ₃	4	1/2	4	1

Kırılma tokluğu kriterine göre yapılan alternatiflerin ikili karşılaştırma matrisinde %42 ile en iyi alternatif B₄C olmuştur.

Tablo 9. Ergime noktası kriterine göre alternatiflerin ikili karşılaştırma matrisi

	TiC	B ₄ C	SiC	Al ₂ O ₃
TiC	1	5	4	7
B ₄ C	1/5	1	1/2	3
SiC	1/4	2	1	4
Al ₂ O ₃	1/7	1/3	1/4	1

Ergime noktası kriterine göre yapılan alternatiflerin ikili karşılaştırma matrisinde Tablo 9’da %60 ile en iyi alternatif TiC olmuştur. Ergime noktası kriteri göz önünde bulundurulduğunda titanyum karbür (TiC), fiyat kriterinde alüminyum oksit (Al_2O_3), yoğunluk, kırılma tokluğu ve rijitlik kriterlerinde ise bor karbür (B_4C) takviye malzemesi en uygun alternatifler olarak belirlenmiştir. Oluşturulan bu matrisler yardımıyla kriter ve alternatifler arasında objektif bir değerlendirme yapılmıştır. Bir sonraki aşamada ise matris normalizasyonları aşamasına geçilmiştir.

3.4. Normalizasyon İşlemi ve Önem Ağırlıklarının Belirlenmesi

Matrisler oluşturulduktan sonra Denklem 1 kullanılarak, her matris ayrı ayrı normalize edilerek önem ağırlıkları (w) hesaplanmıştır. Önem ağırlıkları belirlenirken normalize matristeki her satırın ortalaması alınmıştır. Ana kriterlerin önem ağırlıkları Tablo 10’da verilmiştir.

Tablo 10. Önem ağırlıkları

Ana kriterler	Önem ağırlıkları (w)
Fiyat	0,06
Rijitlik	0,51
Yoğunluk	0,24
Kırılma Tokluğu	0,05
Ergime Noktası	0,14

3.5. Tutarlılık Oranı Hesaplanması

Tutarlılık oranı, matrislerde belirtilen kriter ve alternatif matrislerinin kullanılabilirliğini gösteren rakamsal değer olarak ifade edilmektedir. Her matris için tutarlılık oranı ayrı ayrı hesaplanmıştır. Oluşturulan matrisler kriterler arası matris, fiyat kriterine göre matris, rijitlik kriterine göre matris, yoğunluk kriterine göre matris, kırılma tokluğu kriterine göre matris, ergime noktası kriterine göre matris şeklindedir.

Tutarlılık oranının hesaplanması aşamasında Super Decisions karar destek yazılımından yararlanılmıştır. Saaty ölçeğine göre yapılan işlemler sonucunda matris için tutarlılık oranının %10’dan fazla olmaması beklenmektedir. Aksi takdirde karşılaştırma matrislerinin tekrar gözden geçirilmesi gerekmektedir.

Denklem 3 ile λ değeri, Denklem 4 ve Denklem 5 ile beraber rassal değerler kullanılarak tutarlılık oranı hesaplanmıştır. Rassal değerler belirlenirken literatürde kullanılan rassal değer skalası baz alınmıştır. Kriter sayıları esas alınarak rassal değer seçilmiştir. Tüm matrisler için tutarlılık oranı Tablo 11’de gösterilmiştir. Tüm matrisler için alternatif yüzdeleri ise Tablo 12’de gösterilmiştir.

Tablo 11. Tutarlılık oranı

Matrisler	Tutarlılık oranı
Kriterler arası ikili karşılaştırma matrisi	%2
Fiyat kriterine göre alternatiflerin ikili karşılaştırma matrisi	%4
Rijitlik kriterine göre alternatiflerin ikili karşılaştırma matrisi	%2
Yoğunluk kriterine göre alternatiflerin ikili karşılaştırma matrisi	%3
Kırılma tokluğu kriterine göre alternatiflerin ikili karşılaştırma matrisi	%6
Ergime noktası kriterine göre alternatiflerin ikili karşılaştırma matrisi	%3

Tabloda gösterildiği üzere oluşturulan karşılaştırma matrislerinin tutarlılık oranları %10’dan daha düşük bir değerdedir. Bu sonuçlar matrislerin tutarlı olduğunu göstermiştir. Fiyat kriterine göre en iyi alternatif Al_2O_3 , rijitlik kriterine göre B_4C , kırılma tokluğu kriterine göre B_4C , yoğunluk kriterine göre B_4C , ergime noktası kriterine göre TiC olduğu saptanmıştır.

Tablo 12. Kriterlere göre alternatif yüzdeleri

	En İyi Alternatif	Yüzde	En Düşük Alternatif	Yüzde
Fiyat	Al_2O_3	%58	Al_2O_3	%4
Rijitlik	B_4C	%49	Al_2O_3	%6
Yoğunluk	B_4C	%52	TiC	%6
Kırılma Tokluğu	B_4C	%42	TiC	%9
Ergime Noktası	TiC	%60	Al_2O_3	%5

Alüminyum metal matris kompozitler için en uygun takviye malzemesinin mevcut malzemeler arasında bor karbür B_4C olduğu belirlenmiştir. Tablo 12 incelendiğinde fiyat kriterine göre %58 oranı ile en iyi alternatif Al_2O_3 , rijitlik kriterine göre %49 oranı ile en iyi alternatif B_4C , yoğunluk kriterine

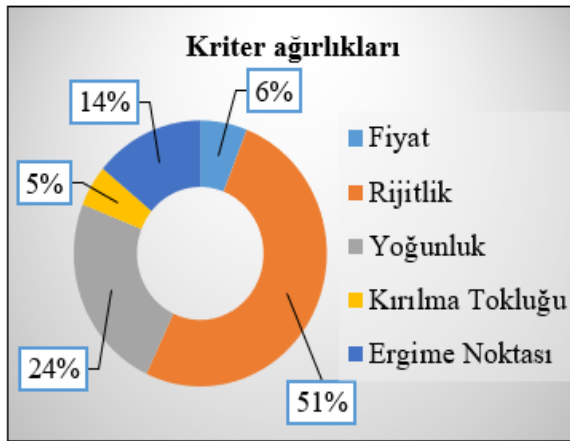
göre %52 oranı ile en iyi alternatif B₄C, kırılma tokluğu kriterine göre %42 oranı ile en iyi alternatif B₄C, ergime noktası kriterine göre %60 oranı ile en iyi alternatif TiC bulunmuştur.

En düşük alternatifler ise, fiyat kriterine göre %4 oranı ile Al₂O₃, rijitlik kriterine göre %6 oranı ile Al₂O₃, yoğunluk kriterine göre %6 oranı ile TiC, kırılma tokluğu kriterine göre %9 oranı ile TiC, ergime noktası kriterine göre %5 oranı ile Al₂O₃ olmuştur.

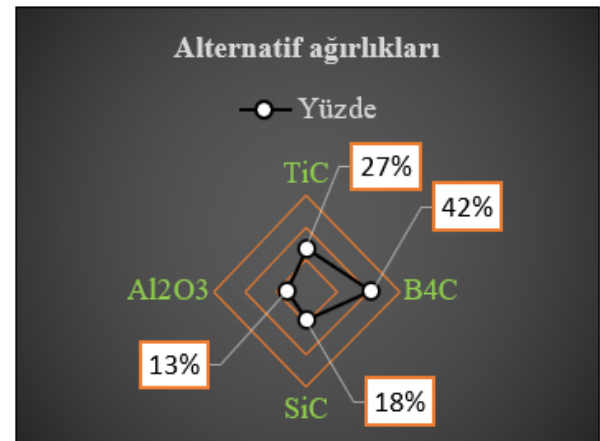
Tablo 13. Kriter ve alternatif sıralamaları

Kriterler	Sıralama	Alternatifler	Sıralama
Rijitlik	1	B ₄ C	1
Yoğunluk	2	TiC	2
Ergime noktası	3	SiC	3
Fiyat	4	Al ₂ O ₃	4
Kırılma tokluğu	5		

Bor karbür (B₄C) %42, titanyum karbür (TiC) %27, silisyum karbür (SiC) %18, alüminyum oksit (Al₂O₃) ise %13 yüzdesine sahiptir.



Şekil 5. Kriter ağırlıkları



Şekil 6. Alternatif ağırlıkları

4. Sonuçlar

Metal matris kompozitler ileri mühendislik malzemeleri içinde önemli bir yer teşkil etmektedir. Yüksek aşınma direnci ve sertlik, yüksek sıcaklıklara dayanım gibi özellikleri sayesinde otomotiv, havacılık, savunma sanayi gibi sektörlerde kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Metal matris kompozitler yüksek mukavemet, sertlik, düşük kırılma tokluğu gibi özellikleri ile matris oluşumunda

yapısal dayanım ortaya koyduğu gibi, metal matrisli kompozit malzemelerin önemli bileşenlerinden olan takviye malzemeleri ise kompozitlerin rijitliğini ve yapısal direncini artırma noktasında kritik bir fayda sağlamaktadır. Bu sebeple takviye malzemelerinin doğru bir şekilde seçimi üretilen metal matrisli kompozitin fiziksel, mekanik, tribolojik özellikleri ve kullanım amacı açısından mutlak bir yere sahiptir. Bu amaçla, mevcut araştırma çalışmasında kompozit seçimi ile ilgili yapılan çalışmalara bir yenilik getirilerek çok kriterli karar verme yöntemleri entegre edilerek takviye malzeme seçimi çalışması yapılmıştır. Alüminyum metal matrisli kompozitler için en uygun takviye malzemesi seçimi için AHP yöntemi uygulanmış olup Super Decisions karar destek yazılımından yararlanılmıştır. Rijitlik, kırılma tokluğu, fiyat, yoğunluk ve ergime noktası karar kriterleri olarak tercih edilmiş olup TiC, B₄C, SiC, Al₂O₃ karar alternatifleri olarak belirlenmiştir. Oluşturulan karar matrisi ile birlikte kriterler ve alternatifler uzman görüşleri doğrultusunda önem sıralaması belirlenerek ikili karşılaştırma matrisleri aynı şekilde uzman değerlendirmelerine tabi tutulmuştur. Hiyerarşik yapı Super Decisions uygulamasına aktararak, uygulama sonucunda kriter ve alternatif ağırlıkları, sıralamaları, yüzdelik oranları hesaplanmıştır. AHP yöntemi ile ikili karşılaştırma matrisleri oluşturularak %2 ile %6 arasında değişen tutarlılık oranı hesaplanmıştır. Bunun sonucunda rijitlik %51, yoğunluk %24, ergime noktası %14, fiyat %6, kırılma tokluğu %5 şeklinde önem ağırlıklarına sahip olduğu görülmüştür. Rijitlik %51 ile en etkin kriter, kırılma tokluğu ise %5 ile en az etkin kriter olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla kriter sıralaması “rijitlik>yoğunluk>ergime noktası>fiyat>kırılma tokluğu” olarak incelenmiştir. TiC, B₄C, SiC, Al₂O₃ alternatiflerinin araştırma sonucunda sırasıyla %42 B₄C, %27 TiC, %18 SiC, %13 Al₂O₃ ağırlıklarına sahip olduğu görülmüştür. Bu noktada alternatif sıralamaları ise B₄C>TiC>SiC>Al₂O₃ olarak ortaya konmuştur. Bu sonuçlar ile birlikte her kriter için en yüksek alternatif oranları hesaplanmıştır. Fiyat kriteri için %58 ile Al₂O₃, rijitlik kriteri için %49 ile B₄C, yoğunluk kriteri için %52 ile B₄C, kırılma tokluğu kriteri için %42, ergime noktası kriteri için %60 TiC en iyi alternatif olarak hesaplanmıştır.

Bu çalışma ile kompozit malzeme seçiminden farklı olarak, alüminyum metal matrisli kompozit malzemeler için en uygun takviye malzemesi seçimi yapılarak malzeme bilimi çalışmalarına yenilik kazandırılması amaçlanmıştır. Mevcut çalışmanın bulanık karar verme yöntemleri ile genişletilmesi, klasik sayılar kullanmak yerine bulanık sayı türlerinin çalışmaya entegre edilmesi, birden çok bulanık karar verme yönteminin bütünleşik kullanılması araştırmanın geliştirilmesi anlamında araştırmacılara katkı sağlayacaktır.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Teşekkür

Bu çalışma, TÜbitak 2244 Sanayi Doktora Programı kapsamında Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) ve Trabzon Silah Sanayi A.Ş (TİSAŞ) tarafından sağlanan destekle tamamlanmıştır. TÜbitak ve Trabzon Silah Sanayi'ne desteklerinden dolayı teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- Avikala S., Singh A.K., Badhotiya G.K., and Kumar K.C.N. (2021). A fuzzy-ahp and topsis based approach for selection of metal matrix composite used in design and structural applications. *Materials Today: Proceedings*, 46(20), 1050-11053.
- Chakravarthy M.P., and Rao D.S. (2022). Evaluation of mechanical properties of aluminium alloy (AA 6082) reinforced with rice husk ash (RHA) and boron carbide (B₄C) hybrid metal matrix composites using stir casting method. *Materials Today: Proceedings*, 66(2), 580-586.
- Emiru A.A., Sinha D.K., Kumar A., and Yadav A. (2022). Fabrication and characterization of hybrid aluminium (Al6061) metal matrix composite reinforced with SiC, B₄C and MoS₂ via stir casting. *International Journal Of Metalcasting*, 1-12.
- Güler O., Varol T., Alver Ü., Kaya G., and Yıldız F. (2021). Microstructure and wear characterization of Al₂O₃ reinforced silver coated copper matrix composites by electroless plating and hot pressing methods. *Materials Today Communications*, 27, 102205.
- Kaplan Y., and Saray U. (2014). Examination of Turkey's renewable energy and fossil energy consumption with analytic hierarchy process (AHP). *Journal of New Results in Science*, 3(5), 28-36.
- Kumar A., Hussain S.A.I, and Rai R.N. (2019). Optimization by ahp-aras of edm process parameters on machining AA7050-10%B₄C composite. *Advances in Industrial and Production Engineering*, 285–296.
- Kumar M., and Kumar A. (2020). Application of preference selection index method in performance based ranking of ceramic particulate (SiO₂/SiC) reinforced AA2024 composite materials. *Materials Today: Proceedings*, 27(3), 2667-2672.
- Kumar N.M.S. (2022). Effect on wear property of aluminium metal matrix composite reinforced with different solid lubricants: a review. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 13(2), 1-9.
- Luo K., Xiong H., Zhang Y., Gu H., Li Z., Kong C., and Yu H. (2022). AA1050 metal matrix composites reinforced by high-entropy alloy particles via stir casting and subsequent rolling. *Journal of Alloys and Compounds*, 893, 162370.
- Onaran, K., (1993). Malzeme bilimi problemleri ve çözümleri. İstanbul: Bilim Teknik Yayınevi.

- Özdağoğlu A. (2013). Çok ölçütlü karar verme modellerinde normalizasyon tekniklerinin sonuçlara etkisi: Copras örneği, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İİBF Dergisi*, 8(2), 229-252.
- Paul R.C., Joseph R., Kumar V.N., Devi P.B., and Manigandan S. (2022). Experimental analysis of hybrid metal matrix composite reinforced with Al₂O₃ and graphite, *International Journal of Ambient Energy*, 43(1), 648-652.
- Qiao G., Zhang B., Bai Q., Gao Y., Du W., and Zhang Y. (2022). Machinability of TiC-reinforced titanium matrix composites fabricated by additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 76, 412-418.
- Saaty, T.L. (2013). *Mathematical principles of decision making: the complete theory of the analytic hierarchy process*. USA: RWS Publications.
- Sharma R., Pradhan M.K., and Jain P. (2022). Optimal selection of an AA8011 reinforced nano Si₃N₄ composite using multi criteria decision-making method. *Materials Today: Proceedings*, 56(3), 1399-1405.
- Siddharthan B., Kumaravel A., and Praveen J. (2022). Mechanical and electrical characterization of aluminium alloy metal matrix composites reinforced with graphite. *Materials Today: Proceedings*, 66(3), 1413-1418.
- Surya M.S., and Gugulothu S.K. (2021). Fabrication, mechanical and wear characterization of silicon carbide reinforced aluminium 7075 metal matrix composite. *Silicon*, 14, 2023–2032.
- Taşkın V., Kılıç C., Yakut R., and Taşkın N.Ü. (2022). The effects of different reinforcement ratios on wear behaviors in EN-AW 5754 (AlMg3)/SiCp composite materials produced with the squeeze casting method. *BSEU Journal of Science*, 9(1), 42-51.
- Varol T., and Çanakcı A. (2013). Effect of particle size and ratio of B₄C reinforcement on properties and morphology of nanocrystalline Al2024-B₄C composite powders. *Powder Technology*, 246, 462-472.
- Varol T., Çanakcı A., and Özşahin Ş. (2018). Prediction of effect of reinforcement content, flake size and flake time on the density and hardness of flake AA2024-SiC nanocomposites using neural networks. *Journal of Alloys and Compounds*, 739, 1005-1014.
- Varol, T. (2012). *AA2024 matrisli B₄C parçacık takviyeli metal matrisli kompozitlerin toz metalurjisi yöntemiyle üretimi ve özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Varol, T. (2016). *Nano partikül takviyeli bakır esaslı fonksiyonel derecelendirilmiş elektrik kontak malzemelerinin üretimi ve karakterizasyonu*. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.