



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 19.08.2022  
Kabul Tarihi : 22.11.2022

Received Date : 19.08.2022  
Accepted Date : 22.11.2022

### ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME TEKNİKLERİ KULLANILARAK YAPISAL BİR UYGULAMA İÇİN KOMPOZİT MALZEME ÖNCELİKLENDİRİLMESİ

#### PRIORITIZATION OF COMPOSITE FOR A STRUCTURAL IMPLEMENTATION USING MULTI-CRITERIA DECISION MAKING TECHNIQUES

Mehmet DURMAZ<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0002-6187-8103)

Özdeş ÇERMİK<sup>1\*</sup> (ORCID: 0000-0001-9308-4589)

<sup>1</sup> Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Özdeş ÇERMİK, ozdescermik@ksu.edu.tr

#### ÖZET

Malzeme seçimi yapısal/mekanik tasarım süreçlerinde çok önemli adımlardan biridir. Malzeme seçimi yapılırken analitik ve matematiksel ilkelere dayanan karar verme süreçlerinin daha iyi sonuç vermektedir. Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) metodları malzeme seçiminde etkin ve sıklıkla kullanılan tekniklerdir. Bu çalışmada, değişik oran ve tipte kumaş, yüksek fırın cürufu ve epoksi içeren 8 adet kompozit malzeme arasından yapısal bir uygulama için en uygun malzeme seçiminde farklı ÇKKV tekniklerinden yararlanılmıştır. Birden fazla ÇKKV yöntemi kullanılarak yapılan önceliklendirmeler seçimin güvenilirliğini artırmaktadır. Bu nedenle AHP ve TOPSIS teknikleriyle yapılan malzeme seçimine ek olarak ELECTRE I ve VIKOR yöntemleri kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Kompozit malzemelerin yoğunluk, aşınma hızı, mikro sertlik, çekme mukavemeti, eğilme mukavemeti, kayma mukavemeti ve darbe dayanımı gibi 8 farklı fiziksel-mekanik ve aşınma özelliklerini belirleyen kriterler kullanılarak sıralama ve seçim işlemleri uygulanmıştır. Alternatifler kendi aralarında en iyiden en kötüye doğru, her bir metod için ayrı ayrı sıralanmıştır. ELECTRE I, VIKOR ve TOPSIS yöntemlerinden elde edilen sonuçlar birbirleriyle kıyaslanmıştır. Yapılan malzeme seçimi sıralamasında viskon kumaş içerikli %10-15 yüksek fırın cürufu ile %60-55 epoksi içeren kompozit malzemelerin en iyi tercihler olduğu sonucu elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** AHP, çok kriterli karar verme, ELECTRE I, VIKOR

#### ABSTRACT

Material selection is one of the most important steps in structural/mechanical transport processes. Decision-making processes based on analytical and mathematical principles give better results when choosing materials. Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods are effective and frequently used techniques in material selection. In this study, different MCDM techniques have been used to select the most suitable material for a structural application among 8 composite materials containing different ratios and types of fabric, blast furnace slag and epoxy. Prioritization using more than one MCDM method increases the reliability of the selection. Therefore, in addition to material selection made with AHP and TOPSIS techniques, the results obtained using ELECTRE I and VIKOR methods have been compared. Sorting and selection processes have been applied using 8 different physical-mechanical and wear properties of composite materials such as density, wear rate, microhardness, tensile strength, bending strength, shear strength and impact strength. Alternatives are listed separately for each method, from best to worst. The results obtained from ELECTRE I, VIKOR and TOPSIS methods have been compared. In the material selection ranking, it has been concluded that the composite materials containing 30% viscose fabric, 10-15% blast furnace slag and 60-55% epoxy are the best choices.

ToCite: DURMAZ, M., & ÇERMİK, Ö., (2022). ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME TEKNİKLERİ KULLANILARAK YAPISAL BİR UYGULAMA İÇİN KOMPOZİT MALZEME ÖNCELİKLENDİRİLMESİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(Özel Sayı), 80-97.

**Keywords:** AHP, multi-criteria decision making, ELECTRE I, VIKOR

## GİRİŞ

İnsanoğlunun hayatında geçmişten bugününe kadar önemli bir yere sahip olan karar verme, aslında bir çeşit seçim sürecidir. Bu süreç hayatımızın birçok alanında karşımıza çıkar. Bu alanlara örnek olarak otomobil ya da makine satın almak, tesis yeri seçimi yapmak, yapılacak uygulamalara en uygun malzemeyi belirlemek gibi birçok örnek verilebilir. Ürün geliştirme, pazarlama ve yapısal/mekanik tasarım sürecinde malzeme seçimi büyük bir öneme sahiptir. Karar verme süreçleri geçmiş tecrübelerle dayanarak subjektif olarak yönetilebilir. Ancak analitik ve matematiksel yöntemlere dayanan karar verme süreçleri daha başarılı sonuçlar ortaya çıkarmaktadır.

Son zamanlarda, malzeme seçimi kararlarında karmaşıklıkla başa çıkmak için Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) sürecine dayalı çeşitli yöntemler başarıyla kullanılmaktadır. ÇKKV tekniği Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ile hayatımıza girmiştir. Bu yöntem Myers ve Alpert aracılığıyla 1968 yılında ortaya çıkmıştır. Saaty yeni bir model geliştirerek AHP metodunu ÇKKV problemlerinde kullanmıştır (Yaralıoğlu, 2001). AHP, en uygun alternatifin belirlenmesine yönelik sayısal ve sayısal olmayan kriterleri değerlendirerek, kompleks karar verme problemlerinin çözümünde kullanılan bir ÇKKV yöntemidir. Günümüzde ÇKKV teknikleri kullanılarak birçok çalışma yapılmıştır. Literatürde yapılan AHP, ELECTRE ve VIKOR yöntemleri kullanılarak yapılan çalışmalardan bazıları verilecektir. Shanian vd. (2006) ELECTRE yöntemini kullanarak ısıtma işlemi görmeyen silindirik örtünün seri üretimi için optimum malzeme seçimi için üretim maliyeti de dahil olmak üzere çok sayıda karar kriterini göz önünde bulundurarak seçim yapmışlardır. Chatterjee vd. (2009) VIKOR ve ELECTRE yöntemlerini kullanarak iki ayrı örnek üzerinde sıralama yapmışlardır. İlk örnekte bir volan tasarımı için en uygun malzemenin seçimini, ikinci örnekte ise bir yelkenli direği tasarımı için en uygun malzeme belirlenmiştir. Çıkan sonuçlar daha önceki çalışmalarla kıyaslanarak VIKOR ve ELECTRE yöntemleri sınanmıştır. Chatterjee vd. (2010) VIKOR ve ELECTRE yöntemlerinde kullanarak endüstriyel robot kol seçimi yapmışlardır. Bu çalışmada 7 adet alternatifi yükleme kapasitesi, yinelenebilirlik, maksimum uç hızı, hafıza kapasitesi ve manipülatör erişim kriterleri kullanılarak seçim yapılmıştır. Hambalı vd. (2010) AHP yöntemini kullanarak kompozit otomobil tampon kirişi için en uygun malzemeyi seçmişlerdir. Bu seçim işlemi sırasında 6 farklı tip kompozit malzeme ve 8 ana kriter ile 12 alt kriterden faydalanmışlardır. Jahan vd. (2011) VIKOR yöntemini kullanarak çeşitli alternatifler arasından kalça protezi için en iyi malzemeyi seçmiştir. Seçim işleminde doku toleransı, korozyon direnci, gerilme mukavemeti, yorulma mukavemeti, tokluk, aşınma direnci, elastik modül, özgül ağırlık ve maliyet kriterlerini kullanmıştır. Ayrıca elektrikli araçlarda kullanılan polimer yakıt hücresinde kullanılan plakaların malzeme seçimini analiz etmişlerdir. Chauhan ve Vaish (2012) VIKOR ve TOPSIS yöntemlerini kullanarak manyetik malzeme seçimi yapmışlardır. Çalışmada Entropi yöntemi kullanılarak ağırlıklar hesaplanmıştır ayrıca yumuşak ve sert manyetik malzemeler için ayrı ayrı alternatifler seçilmiştir. Girubha ve Vinodh (2012) VIKOR yöntemini kullanarak elektrikli otomobillerde kullanılan gösterge paneli için malzeme seçimi yapmışlardır. Seçim işleminde 4 farklı malzeme kullanılmış olup ayrıca çevresel etkilerde dikkate alınmıştır. Venkataramaiah vd. (2012) polietilen ve polifenilen gibi farklı alternatif malzemelerin performansını değerlendirmek için güneş enerjisi levha kolektörü için en uygun malzemeyi AHP yöntemi ile seçmişlerdir. Seçim aşamasında termal genleşme katsayısı, yoğunluk, termal iletkenlik, maliyet, çekme mukavemeti, çentik darbe dayanımı ve güvenlik seviyesi sıcaklığı kriterlerinden faydalanılmıştır. Rai vd. (2013) VIKOR yöntemini kullanarak volan için en iyi alternatif malzemeyi seçmek için yorulma sınırı, kırılma tokluğu parçalanabilirlik ve fiyat gibi karar kriterleri dikkate alınmıştır. Kiong vd. (2013) düşük karbonlu çelik ve dökme demir gibi alternatif malzemeler arasından vida üretimi için en uygun malzemeyi belirlemek için AHP yöntemini kullanmışlardır. Çalışmalarında dikkate alınan çevresel kriterler; karbon ayak izi, su ötrofikasyonu, hava asitlenmesi ve tüketilen toplam enerji olarak seçilmiştir. Anojkumar vd (2014) VIKOR, ELECTRE gibi farklı ÇKKV yöntemlerini kullanarak şeker endüstrisinde kullanılmak için uygun boru malzemesi seçimi yapmışlardır. Seçim işleminde 5 farklı paslanmaz çelik kalitesi ve akma mukavemeti, uzama yüzdesi, çekme mukavemeti, sertlik, maliyet korozyon hızı ve aşınma oranı gibi 7 değerlendirme kriteri bu çalışmada kullanılmıştır. Ertuğrul ve Özçil (2014) TOPSIS ve VIKOR yöntemleri ile yaklaşık olarak eşdeğer ısıtma ve soğutma kapasitesine sahip 8 adet A enerjisi sınıfı klimayı 7 farklı kritere göre sıralayıp tercih yapmışlardır. Sen vd. (2016) TOPSIS, VIKOR ile birlikte farklı ÇKKV yöntemlerini kullanarak biyel kolu için malzeme seçimi ve sıralaması yapmışlardır. Sıralama yöntemlerinde 6 alternatif ve kriter dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlar kıyaslanmış ve sıralamadaki farklar incelenmiştir. Soni vd. (2018) TOPSIS, ELECTRE yöntemlerini kullanarak otomobil uygulaması için uyum magnezyum alaşımını seçmişlerdir. Bu seçim işlemi sırasında 8 farklı magnezyum alaşımı ve 10 kritere göre farklı yöntemlerle sıralama ve seçim yapılmıştır. Moradian vd. (2019) AHP, MOORA, TOPSIS ve VIKOR yöntemlerini kullanarak otomobillerde kullanılan fren servo valf gövdesi için malzeme seçimi yapmışlardır. Seçim işlemi için 16 adet alternatif belirlenmiştir. Alternatifler arasından tercih yapmak için gerilme direnci,

malzemenin sıcaklık sapsması, yoğunluk ve maliyet kriterleri dikkate alınmıştır. Patnaik vd. (2019) AHP-TOSIS yöntemini kullanarak yapısal uygulamalar için kompozit malzeme seçimi yapmışlardır. Polyester ve viskon kumaş kullanarak yaptıkları 8 kompozit malzemeyi, yoğunluk, mikro sertlik, çekme mukavemeti, eğilme mukavemeti, katmanlar arası kayma mukavemeti, darbe dayanımı ve aşınma hızı kriterlerini dikkate alarak sıralama ve seçim yapmışlardır. Dev vd. (2020) Entropi-VIKOR yöntemini kullanarak otomotiv piston bileşeni için malzeme seçimi yapmışlardır. Çalışmada farklı porselen ağırlık yüzdelere sahip 4 malzeme incelenmiştir. Malzemeler arasında seçim yapmak için yoğunluk, sertlik, basınç mukavemeti, çekme mukavemeti, eğilme mukavemeti, sürtünme katsayısı ve aşınma oranları gibi kriterler dikkate alınmıştır. Yapılan çalışmalar incelendiğinde AHP, ELECTRE I ve VIKOR yöntemlerinin, ÇKKV problemlerini çözmek için etkili birer yöntem olduğu görülmüş ve çeşitli uygulamalarda başarıyla kullanılmışlardır.

Kumaş takviyeli kompozit malzemeler madencilik, ulaşım, otomobiller, inşaat, tarım ve spor gibi farklı birçok mühendislik çalışmalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Elde edilen kompozit malzemeler bir mühendislik uygulamasında kullanılacağı zaman çok fazla alternatifle karşılaşıldığından ÇKKV teknikleri kullanılarak karar verme aşamasında analitik kararlar ile doğru seçimler yapılmalıdır. Bu çalışmada ki hedef mühendislikte tasarım ve üretimde önemli bir kriter olan malzeme seçimini en etkin ve verimli bir şekilde yapmak için ÇKKV metotlarından yararlanmaktadır. Önceliklendirme yapılırken kullanılan yöntemlerin fazlaştırılması karar verme süreçlerini olumlu yönde etkileyip sıralamanın güvenilirliğini artıracaktır. Mevcut çalışmanın amacı, çeşitli deneysel koşullar altında incelenmiş (Patnaik vd., 2019) kumaş takviyeli epoksi kompozitlerde seçim ve sıralama işleminin AHP-TOPSIS yöntemine ek olarak iki farklı ÇKKV yöntemi olan ELECTRE I ve VIKOR yöntemleriyle yapılmasıdır. Önceliklendirme yapılırken kompozitlerin yoğunluk, aşınma hızı, mikro sertlik, çekme mukavemeti, eğilme mukavemeti, darbe dayanımı, kayma mukavemeti gibi fiziksel ve mekanik özelliklerinden yararlanılmıştır. ELECTRE I yöntemi karar verme sürecine birçok nicel ve nitel kriteri dahil ederek alternatiflerin performansına göre kıyaslama yapar. VIKOR yöntemi karar verme sürecine uzlaşmacı şekilde yaklaşarak ideal alternatife yakınlık değerlerini kıyaslayarak sıralama yapar. Bu iki farklı yöntemle göre yapılan önceliklendirme ile iki yeni seçim sıralaması yapıp elde edilen sonuçlar literatürdeki sonuçlarla kıyaslanacaktır.

## MATERYAL ve METOT

Elle yatırma yöntemiyle hazırlanmış polyester ve viskon kumaşlar ile değişik oranlarda yüksek fırın cürufu (YFC) partikülü ve epoksi dolgulu 8 farklı kompozit malzeme Tablo 1 de yer almaktadır (Patnaik vd., 2019). Kompozit malzemeler PK1 (Polyester kompozit 1) ve VK1 (Viskon kompozit 1) olmak üzere aynı mantıkla tabloda isimlendirilmiştir.

**Tablo 1: Kompozit İçerikleri**

PK1	%30 (w/w) polyester kumaş (400 g/m <sup>2</sup> ) + %0 (w/w) YFC + %70 (w/w) epoksi
PK2	%30 (w/w) polyester kumaş (400 g/m <sup>2</sup> ) + %5 (w/w) YFC + %65 (w/w) epoksi
PK3	%30 (w/w) polyester kumaş (400 g/m <sup>2</sup> ) + %10 (w/w) YFC + %60 (w/w) epoksi
PK4	%30 (w/w) polyester kumaş (400 g/m <sup>2</sup> ) + %15 (w/w) YFC + %55 (w/w) epoksi
VK1	%30 (w/w) viskon kumaş (400 g/m <sup>2</sup> ) + %0 (w/w) YFC + %70 (w/w) epoksi
VK2	%30 (w/w) viskon kumaş (400 g/m <sup>2</sup> ) + %5 (w/w) YFC + %65 (w/w) epoksi
VK3	%30 (w/w) viskon kumaş (400 g/m <sup>2</sup> ) + %10 (w/w) YFC + %60 (w/w) epoksi
VK4	%30 (w/w) viskon kumaş (400 g/m <sup>2</sup> ) + %15 (w/w) YFC + %55 (w/w) epoksi

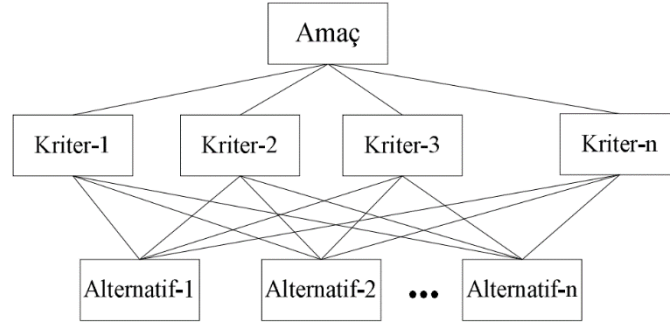
ÇKKV metotlarında sıralama yapabilmek için alternatiflere ve bu alternatifleri sıralayabilmek için kriterlere ihtiyaç vardır. Kriter sayısının fazla olması sıralama ve seçim aşamalarında kesin sonuca ulaşmayı kolaylaştırır. Malzemeleri özelliklerine göre sıralamak için ilk aşamada AHP yöntemi kullanılarak kriterlerin ağırlıkları belirlenmelidir. İkinci aşamada 8 farklı kompozit malzemeleri sıralamak için ELECTRE I ve VIKOR yöntemleri kullanılmıştır. AHP yönteminde elde edilen ağırlıklar ikinci aşamada sıralama işleminde kullanılmıştır.

### *AHP Yöntemi ile Kriter Ağırlıklarının Hesaplanması*

AHP metoduyla ağırlıkların belirlenmesi 8 temel adımdan oluşur. Bu adımlar aşağıda verilmiştir.

Adım 1 Hiyerarşik Yapının Oluşturulması: Amaç aşınmaya dayanıklı kullanımlar için kompozit malzemelerin sıralanmasıdır. Dikkate alınan kriterler fiziksel özellik (yoğunluk), mekanik özellikler (mikro sertlik, çekme mukavemeti, eğilme mukavemeti, katmanlar arası kayma mukavemeti ve darbe dayanımı) ve bulamaç aşınma özelliğidir (Ws(n) ve Ws(v) yani sırasıyla farklı normal yük Ws(n) ve kayma hızında Ws(v) özgül aşınma oranının

ortalama değeri). Dikkate alınan alternatifler PK1, PK2, PK3, PK4, VK1, VK2, VK3 ve VK4'tür. Şekil 1 de AHP yöntemi hiyerarşi şeması örneği gösterilmiştir.



Şekil 1: AHP Yöntemi Hiyerarşi Şeması

Adım 2 İkili Karşılaştırma Matrisi Oluşturma: Kriter ağırlıklarını belirlemek için ikili karşılaştırma matrisi (A) düzenlenir. İkili karşılaştırma kararları, Tablo 2'de gösterilen hedefe göre her bir kriter için önceden tanımlanmış derecelendirme değeri temelinde gerçekleştirilir. Matriste n kriter varsayarsak, i kriterinin j kriteri ile ikili karşılaştırması,  $a_{ij}$ 'nin i kriterinin j kriterine göre göreceli önemini ifade ettiği bir kare matris A oluşturulur. Matriste,  $i = j$  olduğunda  $a_{ij} = 1$  ve  $a_{ji} = 1/a_{ij}$ .

Tablo 2: İkili Karşılaştırma (SAATY) Ölçeği (Hambalı et al., 2010)

Sayısal Değer	Önem Derecesi
1	Eşit derecede önemli
3	Biraz önemli
5	Önemli
7	Çok önemli
9	Son derece önemli
2,4,6,8	Ara değerler

Adım 3 Standartlaştırılmış Matris Oluşturma: Aşağıdaki denklem kullanılarak standartlaştırılmış matris oluşturulur,

$$c_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{j=1}^n a_{ij}} \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \text{ ve } j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

Adım 4 Kriter Ağırlıklarının Bulunması: Aşağıdaki denklem kullanılarak her bir kriter için satır toplamları ve kriter ağırlıkları bulunur,

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

Adım 5 Öncelik Vektörünün Hesaplanması: Öncelik vektörü  $V_i = A.w_i$ , burada  $i = 1, 2, 3, \dots, m$  kullanılarak hesaplanır.

Adım 6 Asal Vektörün Hesaplanması:  $\lambda_i = \frac{V_i}{w_i}$  kullanılarak öz vektör hesaplanır daha sonra  $\lambda_{max} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i}{n}$  ile asal vektör bulunur.

Adım 7 Tutarlılık İndeksinin Hesaplanması: Tutarlılık indeksi (TI) aşağıdaki denklem kullanılarak bulunur.

$$TI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

Adım 8 Tutarlılık Oranının (TO) Hesaplanması: Aşağıdaki denklem kullanılarak elde edilir. Rastgele tutarsızlık indeksi (RI) değeri kriter sayısına (n) bağlıdır. Tablo 3'deki n değerine karşılık gelen seçilerek belirlenir. Tutarlılık oranının kabul edilebilir olması için %10'dan küçük olması gerekir; bazı durumlarda %20'ye kadar tolere edilebilir (Patnaik, Swain and Purohit, 2019).

$$TO = \frac{TI}{RI} \quad (4)$$

**Tablo 3:** Rastgele Tutarsızlık İndeksi (RI) (Hambalı et al., 2010)

Kriter Sayısı (n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Rastgele Tutarsızlık İndeksi (RI)	0,00	0,00	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,46	1,149

### Alternatiflerin Sıralanması

Alternatiflerin sıralanmasında ELECTRE I ve VIKOR olmak üzere iki yöntem kullanılacaktır bu yöntemler ve adımları aşağıda verilmiştir.

#### ELECTRE-I Yöntemi

ELECTRE I yöntemi ile alternatiflerin önceliklendirilmesi 8 temel adımdan oluşur. Bu adımlar aşağıda verilmiştir.

Adım 1 Karar Matrisi (A) Oluşturulması: Alternatif ve kriterleri içeren bir A matrisi aşağıdaki gibi oluşturulur.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

Adım 2 Standart Karar Matrisi (X) Belirlenmesi: Bu aşamada, A matrisinin X matrisine dönüştürülmesi için aşağıdaki formüller kullanılır. Fayda kriterleri ve zarar kriterleri için sırasıyla aşağıdaki formüller kullanılır.

$$x_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n a_{ij}^2}} \quad i = 1, 2, \dots, m \text{ ve } j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$x_{ij} = \frac{\frac{1}{a_{ij}}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{a_{ij}}\right)^2}} \quad i = 1, 2, \dots, m \text{ ve } j = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

Adım 3 Ağırlıklandırılmış Normalize Karar Matrisi (Y) Oluşturulması: AHP metodunda bulunan kriter ağırlıkları ile X matrisi çarpılarak Y matrisi elde edilmektedir.

$$y_{ij} = w_j \times x_{ij} \quad (7)$$

Burada  $w_j$ , j. kriterin ağırlığıdır ve  $\sum_{j=1}^n w_j = 1$  formülü ile hesaplanır. Y matrisi aşağıda gösterilmektedir.

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{m1} & y_{m2} & \dots & y_{mn} \end{bmatrix}$$

Adım 4 Uyum ( $C_{kl}$ ) ve Uyumsuzluk ( $D_{kl}$ ) Kümelerinin Oluşturulması: Uyum kümesine ( $C_{kl}$ ) karşılık bir uyumsuzluk kümesi ( $D_{kl}$ ) bulunur.  $A_k$  ve  $A_l$ , şeklinde ifade edilen uyum kümesi  $C_{kl}$ ;  $k \geq l$  ve  $l \geq 1$  ise  $A_k$  alternatifinin  $A_l$  alternatifine tercih edildiği kriterlerin kümesi uyum kümesidir.  $A_k$  alternatifi  $A_l$  alternatifinden daha kötü ise uyumsuzluk kümesi elde edilir. Uyumluluk ve uyumsuzluk kümeleri için sırasıyla aşağıdaki formüller kullanılır.

$$C_{kl} = \{ j \mid y_{kj} \geq y_{lj} \} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

$$D_{kl} = \{ j \mid y_{kj} < y_{lj} \} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

Adım 5 Uyum (C) ve Uyumsuzluk (D) Matrislerinin Belirlenmesi: C matrisi oluşturmak amacıyla uyumluluk kümeleri kullanılır. C elemanları için

$$C_{kl} = \sum_{j \in C_{kl}} w_j \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

denklem (10) kullanılır ve elde edilen matris aşağıdaki gibidir.

$$C = \begin{bmatrix} - & c_{12} & \dots & c_{1m} \\ c_{21} & - & \dots & c_{2m} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ c_{m1} & a_{m2} & \dots & - \end{bmatrix}$$

D matrisinin elde edilmesi için denklem (11) den yararlanılır.

$$d_{kl} = \frac{\max_{j \in D_{kl}} |y_{kj} - y_{lj}|}{\max_j |y_{kj} - y_{lj}|} \quad (11)$$

D matrisinin gösterimi aşağıdaki gibidir:

$$D = \begin{bmatrix} - & d_{12} & \dots & d_{1m} \\ d_{21} & - & \dots & d_{2m} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ d_{m1} & d_{m2} & \dots & - \end{bmatrix}$$

Adım 6 Uyum Üstünlük (F) ve Uyumsuzluk Üstünlük (G) Matrislerinin Belirlenmesi: F kare matrisinde yer alan elemanlar, uyum matrisi elemanlarıyla ( $c_{kl}$ ) uyum eşik değerinin ( $\underline{c}$ ) karşılaştırılmasıyla hesaplanır.

$$\underline{c} = \frac{1}{m(m-1)} \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m c_{kl} \quad , \quad k \neq l \quad (12)$$

Buradaki m sayısı alternatifleri göstermektedir. Burada  $\underline{c}$  ise,  $\frac{1}{m(m-1)}$  değeri ile uyum matrisinde yer alan elemanların toplamının çarpımına eşittir. F matrisindeki elemanlar ( $f_{kl}$ ), aşağıdaki ilişki yardımıyla belirlenir.

$$\begin{aligned} c_{kl} \geq \underline{c} \text{ ise; } f_{kl} &= 1, \\ c_{kl} < \underline{c} \text{ ise; } f_{kl} &= 0. \end{aligned} \quad (13)$$

G kare matrisi F matrisiyle aynı şekilde bulunur. Uyumsuzluk eşik değeri ( $\underline{d}$ ) aşağıda yer alan denklem ile belirlenir.

$$\underline{d} = \frac{1}{m(m-1)} \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m d_{kl} \quad , \quad k \neq l \quad (14)$$

Diğer bir değişle uyumsuzluk eşik ( $\underline{d}$ ) değeri,  $\frac{1}{m(m-1)}$  değeri ile D matrisindeki elemanların toplamının çarpımına eşittir. G matrisindeki elemanlar ( $g_{kl}$ ) 1 veya 0 değerlerini alır. Aşağıdaki ilişki yardımıyla bulunur.

$$\begin{aligned} d_{kl} \leq \underline{d} \text{ ise; } g_{kl} &= 1, \\ d_{kl} > \underline{d} \text{ ise; } g_{kl} &= 0. \end{aligned} \quad (15)$$

F ve G matrisi aşağıda gösterilmiştir.

$$F = \begin{bmatrix} - & f_{12} & \dots & f_{1m} \\ f_{21} & - & \dots & f_{2m} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ f_{m1} & f_{m2} & \dots & - \end{bmatrix} \quad G = \begin{bmatrix} - & g_{12} & \dots & g_{1m} \\ g_{21} & - & \dots & g_{2m} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ g_{m1} & g_{m2} & \dots & - \end{bmatrix}$$

Adım 7 Toplam Üstünlük Matrisi (E) Belirlenmesi: E matrisin elemanları F ve G matrislerinin elemanlarının karşılıklı çarpımına eşittir. Elde edilen E matrisi C ile D matrisine bağlı olan bir kare matristir ve 1 ya da 0 değerlerini içerir.

$$e_{kl} = f_{kl} \times g_{kl} \quad (16)$$

E matrisi aşağıda gösterilmiştir. Toplam üstünlük (E) matrisine bakılarak alternatiflerin üstünlükleri ve tercih sıralamaları kıyaslanır.

$$E = \begin{bmatrix} - & e_{12} & \dots & e_{1m} \\ e_{21} & - & \dots & e_{2m} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ e_{m1} & e_{m2} & \dots & - \end{bmatrix}$$

Adım 8 Net Uyumluluk ( $c_k$ ) ve Net Uyumsuzluk ( $d_k$ ) İndekslerinin Belirlenmesi: E matrisi yardımıyla alternatifler arasındaki tercih sırası oluşturulur. Ancak üstünlüklerin net olarak belirlenemediği durumlarda ise, net uyumluluk ve net uyumsuzluk indekslerinin hesaplanması gereklidir. Net uyumluluk indeksi,

$$c_k = \sum_{l=1}^m c_{kl} - \sum_{l=1}^m c_{lk}, \quad l \neq k \quad (17)$$

ve net uyumsuzluk indeksi ise,

$$d_k = \sum_{l=1}^m d_{kl} - \sum_{l=1}^m d_{lk}, \quad l \neq k \quad (18)$$

formülü ile hesaplanır. Buradan elde edilen ' $d_k$ ' küçükten büyüğe ve ' $c_k$ ' büyükten küçüğe sıralanır.

### VIKOR Yöntemi

VIKOR yöntemi ile alternatiflerin önceliklendirilmesinde 7 temel adım ve iki koşul mevcuttur. Bu adım ve koşullar aşağıda verilmiştir.

Adım 1 Karar Matrisi (X) Oluşturulması:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

Adım 2 Kriterlerin En İyi ( $f_j^*$ ) ve En Kötü ( $f_j^-$ ) Değerlerinin Bulunması: Burada j. kriter bir faydayı temsil ettiğinde  $f_j^*$  ve  $f_j^-$  değerleri;

$$f_j^* = \max_i x_{ij} \quad f_j^- = \min_i x_{ij} \quad (19)$$

eşitlikleri ile belirlenirken, j. kriteri bir maliyeti temsil ettiğinde  $f_j^*$  ve  $f_j^-$  değerleri aşağıdaki eşitlikler yardımıyla belirlenir.

$$f_j^* = \min_i x_{ij} \quad f_j^- = \max_i x_{ij} \quad (20)$$

Adım 3 Normalize Karar Matrisi (R) Oluşturulması: Normalizasyon işlemiyle X matrisi karşılaştırılabilir seviyeye indirgenir. Böylelikle R matrisi elde edilir. R matrisinin elemanları:

$$r_{ij} = \frac{f_j^* - x_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \quad (21)$$

formülü ile hesaplanır. Hesaplamalar sonunda elde edilen R matrisi aşağıdaki şekilde gösterilir.

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix}$$

Adım 4 Ağırlıklı Normalize Karar Matrisi (V) Oluşturulması:  $w_j$  kriter ağırlıkları ile R matrisindeki sütunlarda gösterilen kriterlerin çarpılması ile, V matrisi elde edilir. V matrisinin elemanları  $v_{ij}$ :

$$v_{ij} = r_{ij} \cdot w_j \quad (22)$$

eşitliği ile bulunur. Ağırlıklandırılmış normalize karar matrisi V aşağıdaki şekilde gösterilir.

$$V = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & \dots & v_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{m1} & v_{m2} & \dots & v_{mn} \end{bmatrix}$$

Adım 5 En Büyük Pişmanlık ( $R_i$ ) ve Ortalama Grup Faydası ( $S_i$ ) Değerlerinin Belirlenmesi: En büyük pişmanlık  $R_i$  alternatifler arasındaki en kötü grup değeridir.  $S_i$  ve  $R_i$  değerleri aşağıdaki denklemler ile hesaplanır.

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_{ij} \cdot \frac{f_j^* - x_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \quad (23)$$

$$R_i = \max_j \left( w_j \cdot \frac{f_j^* - x_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \right) \quad (24)$$

Adım 6  $Q_i$  Değerinin Belirlenmesi: Bu aşamada  $Q_i$  değeri hesaplanacaktır. Bu değer alternatifleri sıralamak için kullanılacaktır.  $Q_i$  değeri  $S^*$ ,  $S^-$ ,  $R^*$  ve  $R^-$  parametreleri yardımıyla belirlenir ve bu parametreler sırasıyla aşağıdaki eşitlikler ile bulunmaktadır.

$$S^* = \min_i S_i \quad S^- = \max_i S_i \quad R^* = \min_i R_i \quad R^- = \max_i R_i \quad (25)$$

$Q_i$  değerinin hesaplanmasında kullanılan diğer bir elemanda  $q$  parametresidir.  $q$  parametresi kriterlerin çoğunluğunun ağırlığını gösterir. Karşıt görüşte olanların minimum pişmanlık ağırlıkları  $(1-q)$  değeri ile ifade edilir. ( $q > 0,5$ ) ise “uzlaşma” sağlanır. ( $q = 0,5$ ) olduğu durumda “konsensüs” olurken ( $q < 0,5$ ) ise “veto” sağlanır.  $Q_i$  değeri denklem (26) yardımıyla hesaplanır.

$$Q_i = \frac{q \cdot (S_i - S^*)}{S^- - S^*} + \frac{(1-q) \cdot (R_i - R^*)}{R^- - R^*} \quad (26)$$

Adım 7 Alternatif Sıralaması ve Koşul Denetimi: Bu aşamada  $S_i$ ,  $R_i$  ve  $Q_i$  ayrı ayrı en küçükten en büyüğe sıralanır. Böylelikle 3 adet sıralama oluşur. Bu sıralamaların doğrulamak için alternatiflerin kabul edilebilir avantaj ( $C_1$ ) ve kabul edilebilir istikrar ( $C_2$ ) kümeleri elde edilir.

Koşul I Kabul Edilebilir Avantaj Koşulu ( $C_1$ ): Denklem (27) kullanılarak alternatiflerin  $C_1$  kümesinde yer alıp almadığı denetlenir.

$$Q(A_2) - Q(A_1) \geq DQ \quad (27)$$

Denklem (27)'deki  $DQ$  ifadesi için denklem (28) den yararlanılır. Bu ifadedeki  $m$  alternatif sayısını belirtir.

$$DQ = \frac{1}{m-1} \quad (28)$$



İlk alternatif denklem (27) e göre değerlendirilir. Bu denklemi sağlar ise Koşul I gerçekleşmiştir.  $Q_i$  değeri sıralamasında yer alan tüm alternatifler de sırasıyla aynı denkleme tabi tutulup koşulu sağlayıp sağlamadığına bakılır. Koşulu sağlayanlar  $C_1$  kümesinde yer alır.

Koşul II Kabul Edilebilir İstikrar Koşulu ( $C_2$ ): Burada istenen  $Q_i$  değerlerine göre yapılan sıralama ile  $S_i$  ve/veya  $R_i$  sıralamalarının birbirine uyumlu olmasıdır. Yani küçük  $Q_i$  değerine sahip alternatifin diğer sıralamalarda da minimum değerde olması beklenir. Sonuç uyumluysa elde edilen sonuç istikrarlıdır. Koşulu sağlayanlar  $C_2$  kümesinde yer alır.

Verilen iki koşuldaki birinin sağlanmadığı durumlar aşağıdaki adımlar izlenir.

- Koşul II sağlanmadığı durumlarda ilk iki sıradaki alternatif tercih olarak kabul edilir.
- Koşul I sağlanmadığında tüm alternatifler en iyi çözüm kümesinde yer alabilir.

Aşağıdaki eşitsizlik ile en iyi çözüm kümesinde bulunacak alternatifler belirlenir.

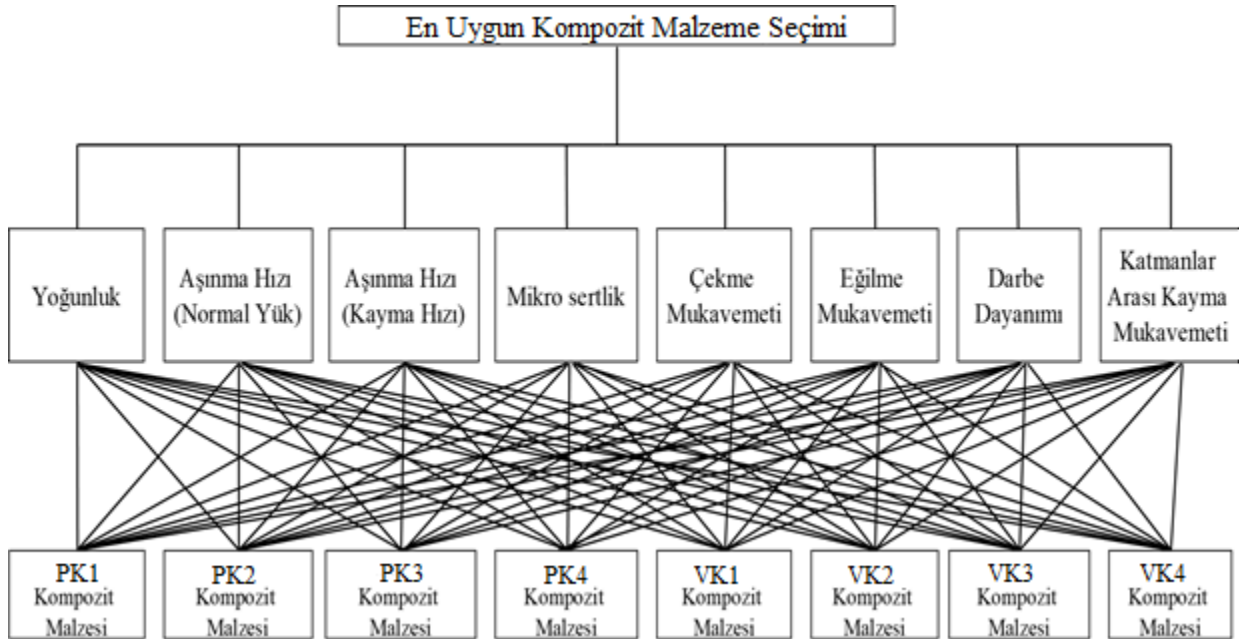
$$D(A_M) - Q(A_1) < DQ \quad (29)$$

Denklem (29) da verilen eşitsizliği sağlayan son alternatifin sıra numarası M ile gösterilir. Uzlaşık çözüm kümesi için  $Q_i$  değerine bağlı olarak bir sıralama elde edilir En iyi alternatif minimum  $Q_i$  değerine sahip alternatif olarak kabul edilir.

## BULGULAR ve ANALİZ

### AHP Yöntemi ile Kriter Ağırlıklarının Hesaplanması

En uygun kompozit malzeme seçimi için amacın, kriterlerin ve alternatiflerin belirtildiği hiyerarşik yapı oluşturulur ve bu yapı Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2: En Uygun Kompozit Malzeme Seçiminin Hiyerarşik Yapısı

Kriterlerin önem değerleri Tablo 2’de verilen Saaty ölçeği yardımıyla önem derecesine göre ikili karar matrisinde düzenlenir. Tablo 4’te kriterlerin ikili karşılaştırması gösterilmektedir.

AHP yöntemi işlem adımlarını takip ederek standartlaştırılmış matris ve kriterlerin ağırlıkları elde edilir. Öncelik vektörü ve öz vektör hesaplanır. Asal öz değer ise 9,0743 olarak bulunur ve tutarlılık indeksi (TI), denklem (3) kullanılarak hesaplanır. Bu çalışmada kriter (n) sayısı 8’dir. TI değeri 0.1535 olarak bulunmuştur. Rastgele tutarsızlık indeksi (RI) kriter sayısı ile ilişkili olduğundan Tablo 3 kullanılarak belirlenir. Denklem (4) kullanılarak hesaplanan tutarlılık oranının (TO) değeri, izin verilen aralığın oldukça altında olan 0,1088’dir. Sonuçlar Tablo 5’te özetlenmiştir.

**Tablo 4:** Kriterlerin İkili Karşılaştırılması

Kriterler	Yoğunluk	Aşınma Hızı (Normal Yük)	Aşınma Hızı (Kayma Hızı)	Mikro sertlik	Çekme Mukavemeti	Eğilme Mukavemeti	Katmanlar Arası Kayma Mukavemeti	Darbe Dayanımı
Yoğunluk	1	1/8	1/8	1/4	1/7	1/5	1/5	1/4
Aşınma Hızı (Normal Yük)	8	1	1/2	5	4	3	3	3
Aşınma Hızı (Kayma Hızı)	8	2	1	5	4	3	3	3
Mikro sertlik	4	1/5	1/5	1	1/6	1/4	1/4	1/3
Çekme Mukavemeti	7	1/4	1/4	6	1	4	4	4
Eğilme Mukavemeti	5	1/3	1/3	4	1/4	1	2	1/3
Katmanlar Arası Kayma Mukavemeti	5	1/3	1/3	4	1/4	1/2	1	1/3
Darbe Dayanımı	4	1/3	1/3	3	1/4	3	3	1

**Tablo 5:** AHP Yönteminin Sonuçları

	Yoğunluk	Aşınma Hızı (Normal Yük)	Aşınma Hızı (Kayma Hızı)	Mikro sertlik	Çekme Mukavemeti	Eğilme Mukavemeti	Katmanlar Arası Kayma Mukavemeti	Darbe Dayanımı
Kriter Ağırlıkları	0.0201	0.2218	0.2694	0.0394	0.1815	0.0853	0.0735	0.1090
Asal Öz değer ve Tutarlılık Parametreleri	$\lambda_{max} =$ 9.0743		TI = 0.1535	RI = 1.41	TO = 0.1088			

**ELECTRE-I Yöntemi ile Alternatiflerin Sıralanması**

Adım 1 Karar Matrisi (A) Oluşturulması: Alternatifleri ve kriter değerlerinin gösterildiği A matrisi Tablo 6'da verilmektedir.

**Tablo 6:** Alternatiflerin Kriter Değerleri ve Karar Matrisi (A)

Kompozitler	Yoğunluk (gm/cc)	Aşınma Hızı (Normal Yük) (cm <sup>3</sup> /N-m)	Aşınma Hızı (Kayma Hızı) (cm <sup>3</sup> /N-m)	Mikro- sertlik (Hv)	Çekme Mukavemeti (Mpa)	Eğilme Mukavemeti (Mpa)	Katmanlar Arası Kayma Mukavemeti (Mpa)	Darbe Dayanımı (J)
PK1	1,2060	0,0296	0,0298	23,9000	30,2700	41,8500	49,3400	1,3510
PK2	1,2078	0,0267	0,0214	28,7000	38,4600	47,1300	53,9200	1,5050
PK3	1,2127	0,0259	0,0188	33,3000	42,2300	53,4200	59,4300	1,7960
PK4	1,2221	0,0240	0,0164	35,2000	38,6500	50,2600	51,0400	1,9330
VK1	1,2130	0,0350	0,0221	24,2700	36,1900	51,7100	55,5900	1,5560
VK2	1,2180	0,0298	0,0165	29,5800	40,0600	54,3600	57,1300	1,9240
VK3	1,2260	0,0257	0,0138	35,1200	44,5300	58,6700	60,8700	2,0360
VK4	1,2330	0,0240	0,0123	37,4300	39,8700	57,0900	56,1900	2,1920

Adım 2 Standart Karar Matrisi (X) Belirlenmesi: Fayda kriterleri için denklem (5) ve zarar kriterleri içinde denklem (5 ve 6) kullanılarak A matrisi normalize edilerek X matrisi oluşturulur. X matrisi Tablo 7'de verilmiştir.

Adım 3 Ağırlıklandırılmış Normalize Karar Matrisi (Y) Oluşturulması: AHP yöntemi kullanılarak bulunan kriter ağırlıkları ile standart karar matrisi denklem (7) yardımı ile çarpılmasıyla ağırlıklı normalize karar matrisi bulunur. Y matrisi Tablo 8'de verilmiştir.

Adım 4 Uyum (C<sub>kl</sub>) ve Uyumsuzluk (D<sub>kl</sub>) Kümelerinin Oluşturulması: Ağırlıklı normalize karar matrisinin satır elemanları birbirleri ile denklem (8 ve 9) kullanılarak kıyaslanmaları sonucunda uyum ve uyumsuzluk kümeleri belirlenir. Belirlenen uyum ve uyumsuzluk kümeleri Tablo 9'da verilmiştir.

Adım 5 Uyum (C) ve Uyumsuzluk (D) Matrislerinin Belirlenmesi: Uyum setlerinde belirlenen elemanlar ile denklem (10) kullanılarak uyum matrisi oluşturulur. Tablo 10'da uyum matrisi verilmiştir.

**Tablo 7:** Standart Karar Matrisi (X)

Kompozitler	Yoğunluk (gm/cc)	Aşınma Hızı (Normal Yük) (cm <sup>3</sup> /N-m)	Aşınma Hızı (Kayma Hızı) (cm <sup>3</sup> /N-m)	Mikro-sertlik (Hv)	Çekme Mukavemeti (Mpa)	Eğilme Mukavemeti (Mpa)	Katmanlar Arası Kayma Mukavemeti (Mpa)	Darbe Dayanımı (J)
PK1	2,8551	2,6582	1,8576	0,2699	0,2745	0,2842	0,3140	0,2643
PK2	2,8508	2,9417	2,5884	0,3241	0,3488	0,3201	0,3431	0,2944
PK3	2,8393	3,0383	2,9511	0,3761	0,3830	0,3628	0,3782	0,3514
PK4	2,8174	3,2708	3,3879	0,3975	0,3505	0,3413	0,3248	0,3782
VK1	2,8386	2,2485	2,5030	0,2741	0,3282	0,3512	0,3537	0,3044
VK2	2,8269	2,6368	3,3612	0,3340	0,3633	0,3692	0,3635	0,3764
VK3	2,8085	3,0643	4,0256	0,3966	0,4038	0,3984	0,3873	0,3983
VK4	2,7925	3,2790	4,5108	0,4227	0,3616	0,3877	0,3576	0,4289

**Tablo 8:** Ağırlıklı Normalize Karar Matrisi (Y)

Kompozitler	Yoğunluk (gm/cc)	Aşınma Hızı (Normal Yük) (cm <sup>3</sup> /N-m)	Aşınma Hızı (Kayma Hızı) (cm <sup>3</sup> /N-m)	Mikro-sertlik (Hv)	Çekme Mukavemeti (Mpa)	Eğilme Mukavemeti (Mpa)	Katmanlar Arası Kayma Mukavemeti (Mpa)	Darbe Dayanımı (J)
PK1	0,0574	0,5895	0,5005	0,0106	0,0498	0,0242	0,0231	0,0288
PK2	0,0573	0,6524	0,6974	0,0128	0,0633	0,0273	0,0252	0,0321
PK3	0,0571	0,6738	0,7951	0,0148	0,0695	0,0309	0,0278	0,0383
PK4	0,0566	0,7254	0,9128	0,0157	0,0636	0,0291	0,0239	0,0412
VK1	0,0570	0,4987	0,6744	0,0108	0,0596	0,0300	0,0260	0,0332
VK2	0,0568	0,5848	0,9056	0,0132	0,0659	0,0315	0,0267	0,0410
VK3	0,0564	0,6796	1,0846	0,0156	0,0733	0,0340	0,0285	0,0434
VK4	0,0561	0,7272	1,2153	0,0166	0,0656	0,0331	0,0263	0,0468

**Tablo 9:** Uyum ve Uyumsuzluk Kümeleri

Uyum Kümeleri		Uyumsuzluk Kümeleri		Uyum Kümeleri		Uyumsuzluk Kümeleri	
C12	{1}	D12	{2,3,4,5,6,7,8}	C51	{3,4,5,6,7,8}	D51	{1,2}
C13	{1}	D13	{2,3,4,5,6,7,8}	C52	{6,7,8}	D52	{1,2,3,4,5}
C14	{1}	D14	{2,3,4,5,6,7,8}	C53	{}	D53	{1,2,3,4,5,6,7,8}
C15	{1,2}	D15	{3,4,5,6,7,8}	C54	{1,6,7}	D54	{2,3,4,5,8}
C16	{1,2}	D16	{3,4,5,6,7,8}	C56	{1}	D56	{2,3,4,5,6,7,8}
C17	{1}	D17	{2,3,4,5,6,7,8}	C57	{1}	D57	{2,3,4,5,6,7,8}
C18	{1}	D18	{2,3,4,5,6,7,8}	C58	{1}	D58	{2,3,4,5,6,7,8}
C21	{2,3,4,5,6,7,8}	D21	{1}	C61	{3,4,5,6,7,8}	D61	{1,2}
C23	{1}	D23	{2,3,4,5,6,7,8}	C62	{3,4,5,6,7,8}	D62	{1,2}
C24	{1,7}	D24	{2,3,4,5,6,8}	C63	{3,6,8}	D63	{1,2,4,5,7}
C25	{1,2,3,4,5}	D25	{6,7,8}	C64	{1,5,6,7}	D64	{2,3,4,8}
C26	{1,2}	D26	{3,4,5,6,7,8}	C65	{2,3,4,5,6,7,8}	D65	{1}
C27	{1}	D27	{2,3,4,5,6,7,8}	C67	{1}	D67	{2,3,4,5,6,7,8}
C28	{1}	D28	{2,3,4,5,6,7,8}	C68	{1,5,7}	D68	{2,3,4,6,8}
C31	{2,3,4,5,6,7,8}	D31	{1}	C71	{2,3,4,5,6,7,8}	D71	{1}
C32	{2,3,4,5,6,7,8}	D32	{1}	C72	{2,3,4,5,6,7,8}	D72	{1}
C34	{1,5,6,7}	D34	{2,3,4,8}	C73	{2,3,4,5,6,7,8}	D73	{1}
C35	{1,2,3,4,5,6,7,8}	D35	{}	C74	{3,5,6,7,8}	D74	{1,2,4}
C36	{1,2,4,5,7}	D36	{3,6,8}	C75	{2,3,4,5,6,7,8}	D75	{1}
C37	{1}	D37	{2,3,4,5,6,7,8}	C76	{2,3,4,5,6,7,8}	D76	{1}
C38	{1,5,7}	D38	{2,3,4,6,8}	C78	{1,5,6,7}	D78	{2,3,4,8}
C41	{2,3,4,5,6,7,8}	D41	{1}	C81	{2,3,4,5,6,7,8}	D81	{1}
C42	{2,3,4,5,6,8}	D42	{1,7}	C82	{2,3,4,5,6,7,8}	D82	{1}
C43	{2,3,4,8}	D43	{1,5,6,7}	C83	{2,3,4,6,8}	D83	{1,5,7}
C45	{2,3,4,5,8}	D45	{1,6,7}	C84	{2,3,4,5,6,7,8}	D84	{1}
C46	{2,3,4,8}	D46	{1,5,6,7}	C85	{2,3,4,5,6,7,8}	D85	{1}
C47	{1,2,4}	D47	{3,5,6,7,8}	C86	{2,3,4,6,8}	D86	{1,5,7}
C48	{1}	D48	{2,3,4,5,6,7,8}	C87	{2,3,4,8}	D87	{1,5,6,7}



**Tablo 14:** Toplam Üstünlük Matrisi (E)

Kompozitler	PK1	PK2	PK3	PK4	VK1	VK2	VK3	VK4
PK1		0	0	0	0	0	0	0
PK2	1		0	0	1	0	0	0
PK3	1	1		0	1	0	0	0
PK4	1	1	1		1	1	0	0
VK1	1	0	0	0		0	0	0
VK2	1	1	0	0	1		0	0
VK3	1	1	1	1	1	1		0
VK4	1	1	1	1	1	1	1	

Adım 8 Net Uyumluluk ( $c_k$ ) ve Net Uyumsuzluk ( $d_k$ ) İndekslerinin Belirlenmesi: Üstünlüklerin ve sıralamanın kesin belirlenmesi için ' $c_k$ ' ve ' $d_k$ ' değerleri bulunmalıdır. Denklem (17) kullanılarak net uyumluluk indeksleri hesaplanır ve büyükten küçüğe sıralanır. Tablo 15'te net uyumluluk indeksleri ve sıralamaları verilmiştir.

Net uyumsuzluk indeksleri denklem (18) kullanılarak hesaplanır ve bulunan değerler küçükten büyüğe sıralanır. Tablo 16'da net uyumsuzluk indeksleri ve sıralamaları verilmiştir.

**Tablo 15:** Net Uyumluluk İndeksleri

Kompozitler	$c_k$	Sıralama
PK1	-5,83153	8
PK2	-2,784331	6
PK3	1,30322	4
PK4	1,575889	3
VK1	-4,4696	7
VK2	0,230942	5
VK3	4,957274	2
VK4	5,018137	1

**Tablo 16:** Net Uyumsuzluk İndeksleri

Kompozitler	$d_k$	Sıralama
PK1	6,4590912	8
PK2	2,6799133	6
PK3	0,1361957	5
PK4	-3,1808653	3
VK1	5,4921056	7
VK2	0,118667	4
VK3	-4,782628	2
VK4	-6,9224793	1

Tablo 15 ve Tablo 16'daki sıralama değerleri kıyaslanarak nihai sıralama yapılır. Bu sıralama Tablo 17 de verilmiştir. ELECTRE I yöntemiyle yapılan sıralamada VK4 kompoziti en iyi tercih olarak belirlenmiştir. Aynı şekilde PK1 kompoziti ise alternatifler arasındaki en kötü tercih olarak belirlenmiştir.

**Tablo 17:** Kompozitlerin ELECTRE I Yöntemiyle Sıralanması

ELECTRE I	
Sıralama	Kompozitler
1	VK4
2	VK3
3	PK4
4	VK2
5	PK3
6	PK2
7	VK1
8	PK1

### VIKOR Yöntemi ile Alternatiflerin Sıralanması

Adım 1 Karar Matrisi (X) Oluşturulması: Alternatifleri ve kriter değerlerinin gösterildiği X matrisi Tablo 18'de yer almaktadır.

**Tablo 18:** Alternatifler ve Kriter Değerleri Karar Matrisi (X)

Kompozitler	Yoğunluk (gm/cc)	Aşınma Hızı (Normal Yük) (cm <sup>3</sup> /N-m)	Aşınma Hızı (Kayma Hızı) (cm <sup>3</sup> /N-m)	Mikro-sertlik (Hv)	Çekme Mukavemeti (Mpa)	Eğilme Mukavemeti (Mpa)	Katmanlar Arası Kayma Mukavemeti (Mpa)	Darbe Dayanımı (J)
PK1	1,2060	0,0296	0,0298	23,9000	30,2700	41,8500	49,3400	1,3510
PK2	1,2078	0,0267	0,0214	28,7000	38,4600	47,1300	53,9200	1,5050
PK3	1,2127	0,0259	0,0188	33,3000	42,2300	53,4200	59,4300	1,7960
PK4	1,2221	0,0240	0,0164	35,2000	38,6500	50,2600	51,0400	1,9330
VK1	1,2130	0,0350	0,0221	24,2700	36,1900	51,7100	55,5900	1,5560
VK2	1,2180	0,0298	0,0165	29,5800	40,0600	54,3600	57,1300	1,9240
VK3	1,2260	0,0257	0,0138	35,1200	44,5300	58,6700	60,8700	2,0360
VK4	1,2330	0,0240	0,0123	37,4300	39,8700	57,0900	56,1900	2,1920

Adım 2 Kriterlerin En İyi ( $f_j^*$ ) ve En Kötü ( $f_j^-$ ) Değerlerinin Bulunması: Fayda ve zarar kriterleri Tablo 19’de gösterilmiştir. Denklem (19) ve (20) ‘ $f_j^*$ ’ ve ‘ $f_j^-$ ’ değerleri hesaplanmıştır ve Tablo 20’de yer almaktadır.

**Tablo 19:** Fayda ve Zarar Kriterleri

Yoğunluk (gm/cc)	Aşınma Hızı (Normal Yük) (cm3/N-m)	Aşınma Hızı (Kayma Hızı) (cm3/N-m)	Mikro-sertlik (Hv)	Çekme Mukavemeti (Mpa)	Eğilme Mukavemeti (Mpa)	Katmanlar Arası Kayma Mukavemeti (Mpa)	Darbe Dayanımı (J)
Zarar	Zarar	Zarar	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda

**Tablo 20:** En İyi ve En Kötü Değerler

Kompozitler	Yoğunluk (gm/cc)	Aşınma Hızı (Normal Yük) (cm3/N-m)	Aşınma Hızı (Kayma Hızı) (cm3/N-m)	Mikro-sertlik (Hv)	Çekme Mukavemeti (Mpa)	Eğilme Mukavemeti (Mpa)	Katmanlar Arası Kayma Mukavemeti (Mpa)	Darbe Dayanımı (J)
PK1	1,2060	0,0296	0,0298	23,9000	30,2700	41,8500	49,3400	1,3510
PK2	1,2078	0,0267	0,0214	28,7000	38,4600	47,1300	53,9200	1,5050
PK3	1,2127	0,0259	0,0188	33,3000	42,2300	53,4200	59,4300	1,7960
PK4	1,2221	0,0240	0,0164	35,2000	38,6500	50,2600	51,0400	1,9330
VK1	1,2130	0,0350	0,0221	24,2700	36,1900	51,7100	55,5900	1,5560
VK2	1,2180	0,0298	0,0165	29,5800	40,0600	54,3600	57,1300	1,9240
VK3	1,2260	0,0257	0,0138	35,1200	44,5300	58,6700	60,8700	2,0360
VK4	1,2330	0,0240	0,0123	37,4300	39,8700	57,0900	56,1900	2,1920
<b>En iyi</b>	<b>1,2060</b>	<b>0,0240</b>	<b>0,0123</b>	<b>37,4300</b>	<b>44,5300</b>	<b>58,6700</b>	<b>60,8700</b>	<b>2,1920</b>
<b>En kötü</b>	<b>1,2330</b>	<b>0,0350</b>	<b>0,0298</b>	<b>23,9000</b>	<b>30,2700</b>	<b>41,8500</b>	<b>49,3400</b>	<b>1,3510</b>

Adım 3 Normalize Karar Matrisi (R) Oluşturulması: Denklem (21) kullanılarak R matrisi hesaplanmıştır ve Tablo 21’de verilmiştir.

**Tablo 21:** Normalize Karar Matrisi (R)

Kompozitler	Yoğunluk (gm/cc)	Aşınma Hızı (Normal Yük) (cm3/N-m)	Aşınma Hızı (Kayma Hızı) (cm3/N-m)	Mikro-sertlik (Hv)	Çekme Mukavemeti (Mpa)	Eğilme Mukavemeti (Mpa)	Katmanlar Arası Kayma Mukavemeti (Mpa)	Darbe Dayanımı (J)
PK1	0,0000	0,5096	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
PK2	0,0667	0,2502	0,5200	0,6452	0,4257	0,6861	0,6028	0,8169
PK3	0,2481	0,1729	0,3700	0,3052	0,1613	0,3121	0,1249	0,4709
PK4	0,5963	0,0055	0,2320	0,1648	0,4123	0,5000	0,8526	0,3080
VK1	0,2593	1,0000	0,5616	0,9727	0,5849	0,4138	0,4579	0,7562
VK2	0,4444	0,5314	0,2395	0,5802	0,3135	0,2562	0,3244	0,3187
VK3	0,7407	0,1529	0,0844	0,1707	0,0000	0,0000	0,0000	0,1855
VK4	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3268	0,0939	0,4059	0,0000

Adım 4 Ağırlıklı Normalize Karar Matrisi (V) Oluşturulması: AHP yönteminde bulunan kriter ağırlıklarıyla denklem (22) kullanılarak ağırlıklı V matrisi Tablo 22’de oluşturulur.

Adım 5 En Büyük Pişmanlık ( $R_i$ ) ve Ortalama Grup Faydası ( $S_i$ ) Değerlerinin Belirlenmesi: Denklem (23) kullanılarak ‘ $S_i$ ’ ve denklem (24) kullanılarak ‘ $R_i$ ’ değerleri hesaplanmıştır Tablo 23’te verilmiştir.

**Tablo 22:** Ağırlıklı Normalize Karar Matrisi (V)

Kompozitler	Yoğunluk (gm/cc)	Aşınma Hızı (Normal Yük) (cm3/N-m)	Aşınma Hızı (Kayma Hızı) (cm3/N-m)	Mikro-sertlik (Hv)	Çekme Mukavemeti (Mpa)	Eğilme Mukavemeti (Mpa)	Katmanlar Arası Kayma Mukavemeti (Mpa)	Darbe Dayanımı (J)
PK1	0,0000	0,1130	0,2694	0,0394	0,1815	0,0853	0,0735	0,1090
PK2	0,0013	0,0555	0,1401	0,0254	0,0772	0,0585	0,0443	0,0891
PK3	0,0050	0,0383	0,0997	0,0120	0,0293	0,0266	0,0092	0,0513
PK4	0,0120	0,0012	0,0625	0,0065	0,0748	0,0427	0,0627	0,0336
VK1	0,0052	0,2218	0,1513	0,0383	0,1061	0,0353	0,0337	0,0825
VK2	0,0089	0,1179	0,0645	0,0229	0,0569	0,0219	0,0238	0,0347
VK3	0,0149	0,0339	0,0227	0,0067	0,0000	0,0000	0,0000	0,0202
VK4	0,0201	0,0000	0,0000	0,0000	0,0593	0,0080	0,0298	0,0000

Adım 6  $Q_i$  Değerinin Belirlenmesi: Denklem (25) de belirtilen parametreler sırasıyla “ $S^* = 0.0985$ ,  $S^- = 0.8711$ ,  $R^* = 0.0339$  ve  $R^- = 0.2694$ ” olarak hesaplanmıştır. Bir diğer parametre olan “ $q$ ” değeri ise sonucun uzlaşmacı bir yaklaşım olması için ‘0.5’ olarak kabul edilmiştir. Denklem (26) kullanılarak kompozit malzemelerin sıralanması için gerekli ‘ $Q_i$ ’ değeri bulunmuştur ve Tablo 23’te verilmiştir.

**Tablo 23:**  $S_i$ ,  $R_i$  ve  $Q_i$  Değerleri

Kompozitler	$S_i$ Değerleri	$R_i$ Değerleri	$Q_i$ (q=0.5) Değerleri
PK1	0,871133051	0,26942498	1
PK2	0,491485056	0,1400887	0,4797518
PK3	0,271455205	0,09969032	0,251604253
PK4	0,295939767	0,0748226	0,214655931
VK1	0,674144088	0,22177738	0,771372882
VK2	0,351481019	0,11785076	0,341943533
VK3	0,098471109	0,03390227	0
VK4	0,117252057	0,05929818	0,066067329

Adım 7 Alternatif Sıralaması ve Koşul Denetimi: Bu aşamada,  $S_i$ ,  $R_i$  ve  $Q_i$  ayrı ayrı en küçükten en büyüğe sıralanır ve üç adet alternatif sıralaması oluşturulur Tablo 24 verilmiştir. Daha sonra sıralamanın doğruluğunu kontrol etmek için alternatiflerin kabul edilebilir avantaj ( $C_1$ ) ve kabul edilebilir istikrar ( $C_2$ ) kümeleri belirlenir.

**Tablo 24:**  $S_i$ ,  $R_i$  ve  $Q_i$  Değerlerinin Sıralanması

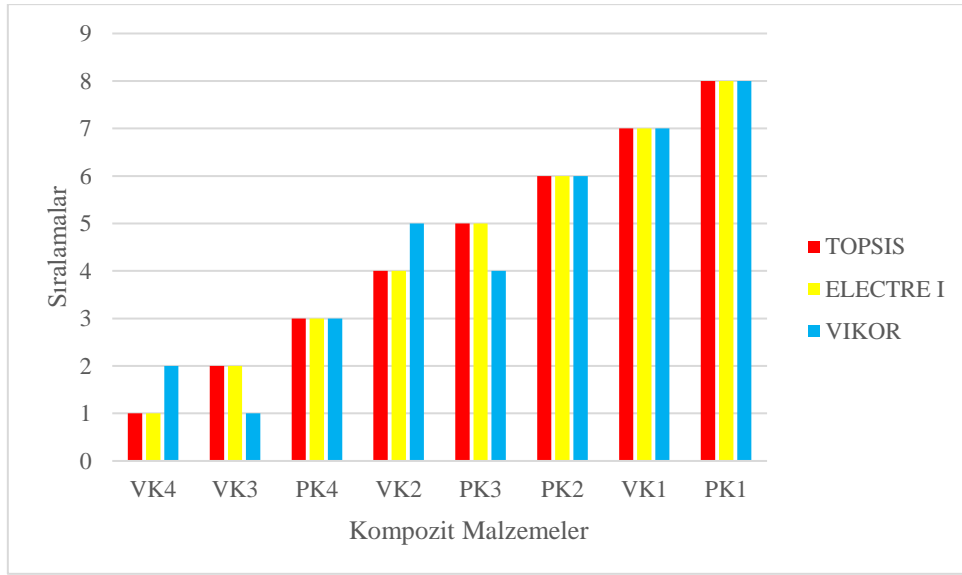
Kompozitler	$S_i$ Değerleri	Kompozitler	$R_i$ Değerleri	Kompozitler	$Q_i$ (q=0.5) Değerleri
VK3	0,098471109	VK3	0,033902274	VK3	0
VK4	0,117252057	VK4	0,059298181	VK4	0,066067329
PK3	0,271455205	PK4	0,074822597	PK4	0,214655931
PK4	0,295939767	PK3	0,099690316	PK3	0,251604253
VK2	0,351481019	VK2	0,117850763	VK2	0,341943533
PK2	0,491485056	PK2	0,140088703	PK2	0,4797518
VK1	0,674144088	VK1	0,221777377	VK1	0,771372882
PK1	0,871133051	PK1	0,269424984	PK1	1

Yukarıda Tablo 24 de verilen sıralamanın doğruluğunu kontrol etmek amacıyla Koşul I ve II den yararlanılmıştır.  $Q_i$  değeri en küçük olan VK3 ( $A_2$ ) kompozit malzemesi için Koşul I şartı aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır. Buradaki  $A_2$  ikinci en iyi alternatif olan VK4 kompozitidir. Burada VK3 kompozitinin Koşul I şartını sağlamadığı görülmektedir.

Koşul I  $DQ = \frac{1}{m-1} = \frac{1}{8-1} = 0.143$  ise;  $Q(A_2) - Q(A_1) \geq DQ$  ise  $0.066 - 0 < 0.143$  buradan  $0.066 < 0.143$  elde edilir. VK3 kompozitinin  $Q_i$  değerleri Tablo 24 de yer alan  $S_i$  ve  $R_i$  değerleriyle kıyaslanmıştır. VK3 kompozit malzemesinin  $S_i$  ve  $R_i$  değerlerinin de minimum değerler olduğu görülmüştür. Böylelikle VK3 malzemesinin Koşul II yi sağladığı görülmüştür. VK3 kompozitinin her iki koşulu birlikte sağlamadığı görülmüştür.

Tüm alternatifler Koşul I sağlamadığı için tercih edilebilir. Denklem (29) kullanılarak alternatifler arasından en iyiler sıralanır. Bu denklemde  $A_1=VK3$ ;  $A_2=VK4$ ;  $A_3=PK4$ ;  $A_4=PK3$ ;  $A_5=VK2$ ;  $A_6=PK2$ ;  $A_7=VK1$ ;  $A_8=PK1$  olduğuna göre;  $D(A_M) - Q(A_1) < DQ$ ,  $D(A_M) - Q(A_1) = 0.066 < 0.143$  olduğundan VK4 kompozit malzemesi koşulu sağlamakta ve aynı hesaplama diğer kompozitler için yapıldığında hiçbiri bu koşulu sağlamamaktadır. Buna göre  $(A_M) = VK4$  kompozit malzemesidir. En iyi çözüm kümesi =  $\{VK3, VK4\}$  olarak belirlenir. Burada yer alan alternatifler arasındaki en iyisi minimum  $Q_i$  değeri olan VK3 kompozit malzemesidir. Bu sebeple VIKOR yöntemiyle sıralarken  $Q_i$  değerlerine göre sıralama yapılmıştır.

Literatürde yer alan TOPSIS metoduyla elde edilmiş sonuçlar (Patnaik vd., 2019) ile bu çalışmada yer alan ELECTRE I ve VIKOR yöntemle kullanılarak elde edilen sıralanışı Şekil 3’ de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar birbirleriyle uyum içinde olmuştur. Buna göre en iyi kompozit malzeme tercihleri viskon kumaş içerikli kompozit olan VK3 ve VK4 tipi kompozitler olarak belirlenmiştir. Ayrıca tüm 3 metot da da PK1 tipi kompozit en kötü alternatif olarak seçilmiştir.



**Şekil 3:** Kompozitlerin farklı ÇKKV Yöntemleriyle Sıralanmasının Karşılaştırılması

### Önceliklendirme Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu çalışmada, farklı ağırlık oranlarında (0, 5, 10 ve 15 w/w) YFC, değişik oranda epoksi ile viskon ya da polyester kumaş içeren 8 farklı kompozit malzemenin önceliklendirilmesi yapılmıştır. Alternatifler arasında sıralama yapılırken kompozitlerin Tablo 6 da yer alan yoğunluk, aşınma hızı, mikro sertlik, çekme mukavemeti, eğilme mukavemeti, darbe dayanımı, kayma mukavemeti gibi fiziksel ve mekanik özelliklerinden yararlanılmıştır. Tablo 6 incelendiğinde aynı oranda YFC ve epoksi içeren viskon kumaş içerikli kompozitlerin polyester kumaş içerikli kompozitlere göre daha iyi fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olduğu görülmektedir. Yine aynı tabloda YFC oranı arttıkça kompozitlerin yoğunluğu, mikro sertliği ve darbe dayanımları artarken aşınma hızları ise azalmaktadır. Bununla birlikte kompozitlerin çekme, eğilme ve kayma mukavemetleri YFC oranı 0 dan yüzde 10'a kadar artırıldığında artarken, yüzde 15 YFC oranına ulaşıldığında mekanik özellikleri bir miktar azalmaktadır. Ağırlıkça %15 YFC dolgululu kompozitler, en yüksek aşınma direncine sahip oldukları yine aynı tabloda görülmektedir.

AHP yöntemi kullanılarak yapılan kriter ağırlıklandırma aşamasında Tablo 2 de verilen ikili karşılaştırma (SAATY) ölçeğinden yararlanılmıştır. Tablo 4 de verilen kriterlerin ikili karşılaştırma matrisinde görüldüğü üzere sırasıyla aşınmaya dayanıklı (aşınma hızı düşük), çekme mukavemeti yüksek, eğilme ve kayma mukavemeti açısından önemli, mikro sertlik ve darbe dayanımı yönünden orta derecede önemli, yoğunluğu düşük bir malzeme seçilmesi amaçlanmıştır. Tablo 4 de yer alan rakamlar büyüdükçe kriterin öneminin arttığına dikkat edilmelidir. Burada en önemli kriter malzemenin aşınma hızının düşük olmasıdır.

Yapılan önceliklendirme sonucunda alternatifler arasında 3 yöntemin ikisinde (TOPSIS ve ELECTRE I) en iyi kompozit olarak VK4 kompoziti belirlenmiştir. Uzlaşmacı yaklaşım yöntemi olan VIKOR yöntemine göre VK4 en iyi ikinci alternatif olarak seçilmiştir. VK3 kompoziti ise VIKOR yöntemine göre en iyi alternatif olurken TOPSIS ve ELECTRE I yöntemine göre en iyi ikinci alternatif olarak belirlenmiştir. VK4 ve VK3 kompozitlerinden sonra her üç yöntemde de en iyi 3. alternatif PK4 kompozit malzemesi olarak seçilmiştir. PK4 kompozitinin normal yük altındaki aşınma hızı VK4 kompozitiyle aynı fakat kayma sırasındaki aşınma hızı daha yüksek ve mukavemet özellikleri VK4'e göre daha düşüktür. Mekanik ve fiziksel özelliklere bakılarak da yapılan tercihin doğru olduğu görülmektedir. Elde edilen sıralama sonuçlarına bakıldığında genel olarak viskon kumaş içerikli kompozit malzemelerin polyester kumaş içerikli kompozit malzemelerden üstün olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Yapılan sıralama sonucunda en kötü alternatif olarak PK1 tipi kompozit belirlenmiştir. PK1 tipi kompozit en düşük yoğunluğa sahip olmasına rağmen düşük aşınma direnci ve düşük mukavemet özellikleri sebebiyle her 3 yöntemde de en kötü alternatif olarak sıralamanın sonunda yer almaktadır.

### SONUÇLAR

Bu çalışmada, aşınmaya dayanıklı yapısal bir uygulamada kullanılmak üzere değişik tipte kumaş ile farklı oranlarda YFC ve epoksi içeren 8 ayrı kompozit malzeme içerisinde en iyi olanının seçilmesi amaçlanmıştır. Kompozit malzemelerin yoğunluk, aşınma hızı, mikro sertlik, çekme mukavemeti, eğilme mukavemeti, kayma mukavemeti ve



darbe dayanımı gibi fiziksel ve mekanik özellikleri için literatürden yararlanılmıştır. ÇKKV tekniklerinden AHP yöntemiyle kriter ağırlıkları hesaplanıp ELECTRE I ve VIKOR yöntemleriyle kompozit malzemeler önceliklendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar literatürdeki TOPSIS metoduyla elde edilen sonuçlar ile kıyaslanmıştır. Bu sonuçlara göre viskon kumaş içerikli VK4 ve VK3 kompozitleri en iyi alternatif olarak belirlenmiştir. Her 3 yöntemde PK1 tipi kompozit malzemenin alternatifler arasında en kötüsü olduğu belirlenmiştir. Yapılan çalışma ile birlikte ayrıca malzeme seçimi yapmak için kullanılan ÇKKV yöntemlerinin anlaşılmasının kolay ve uygulanmasının basit olduğu görülmüştür. Birden fazla ÇKKV yönteminin kullanılması yapılan önceliklendirmenin güvenilirliğini artırmaktadır.

Gelecekteki çalışmalarda PROMETHEE, ARAS, CODAS, MULTIMOORA ve Bulanık (fuzzy) gibi farklı ÇKKV teknikleri kullanılarak eklemeli imalat, çarpışma uygulamaları, otomotiv uygulamaları gibi birçok alanda tasarım ve malzeme seçimlerinde uygulanması hedeflenmektedir.

## KAYNAKLAR

- Anojkumar, L., Ilankumaran, M., & Sasirekha, V. (2014). Comparative analysis of MCDM methods for pipe material selection in sugar industry. *Expert Systems with Applications*, 41(6), 2964-2980.
- Chatterjee, P., Athawale, V. M., & Chakraborty, S. (2009). Selection of materials using compromise ranking and outranking methods. *Materials & Design*, 30(10), 4043-4053.
- Chatterjee, P., Athawale, V. M., & Chakraborty, S. (2010). Selection of industrial robots using compromise ranking and outranking methods. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 26(5), 483-489.
- Chauhan, A., & Vaish, R. (2012). Magnetic material selection using multiple attribute decision making approach. *Materials & Design (1980-2015)*, 36, 1-5.
- Dev, S., Aherwar, A., & Patnaik, A. (2020). Material selection for automotive piston component using entropy-VIKOR method. *Silicon*, 12(1), 155-169.
- Ertuğrul, İ., & Özçil, A. (2014). Çok kriterli karar vermede TOPSIS ve VIKOR sistemiyle klima seçimi. *Çankırı Karatekin Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 4 (1), 267-282.
- Girubha, R. J., & Vinodh, S. (2012). Application of fuzzy VIKOR and environmental impact analysis for material selection of an automotive component. *Materials & Design*, 37, 478-486.
- Hambali, A., Sapuan, S. M., Ismail, N., & Nukman, Y. (2010). Material selection of polymeric composite automotive bumper beam using analytical hierarchy process. *Journal of Central South University of Technology*, 17(2), 244-256.
- Jahan, A., Mustapha, F., Ismail, M. Y., Sapuan, S. M., & Bahraminasab, M. (2011). A comprehensive VIKOR method for material selection. *Materials & Design*, 32(3), 1215-1221.
- Kiong, S. C., Lee, L. Y., Chong, S. H., Azlan, M. A., & Muhd Nor, N. H. (2013). Decision making with the analytical hierarchy process (AHP) for material selection in screw manufacturing for minimizing environmental impacts. In *Applied Mechanics and Materials (Vol. 315, pp. 57-62)*. Trans Tech Publications Ltd.
- Moradian, M., Modanloo, V., & Aghaiee, S. (2019). Comparative analysis of multi criteria decision making techniques for material selection of brake booster valve body. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 6(5), 526-534.
- Patnaik, P. K., Swain, P. T. R., & Purohit, A. (2019). Selection of composite materials for structural applications through MCDM approach. *Materials Today: Proceedings*, 18, 3454-3461.
- Rai, D., Jha, G. K., Chatterjee, P., & Chakraborty, S. (2013). Material selection in manufacturing environment using compromise ranking and regret theory-based compromise ranking methods: A comparative study. *Universal Journal of Materials Science*, 1(2), 69-77.
- Sen, B., Bhattacharjee, P., & Mandal, U. K. (2016). A comparative study of some prominent multi criteria decision making methods for connecting rod material selection. *Perspectives in Science*, 8, 547-549.
- Shanian, A. A., & Savadogo, O. (2006). A material selection model based on the concept of multiple attribute decision making. *Materials & Design*, 27(4), 329-337.

Soni, A., Gautam, D., & Dwivedi, A. (2018). Implementation of multi-criteria decision-making method for the selection of magnesium alloy to suit automotive application. *International Journal for Advance Research and Development*, 3(6), 4-12.

Venkataramaiah, P., Rohith, B., & MohanaReddy, P. (2012). Material selection for solar flat plate collectors using AHP. *Int. J. Eng. Res. Appl*, 2, 1181-1185.

Yaralıoğlu, K. (2001). Performans Değerlendirmede Analitik Hiyerarşi Prosesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi İ.İ.B.F. Dergisi*, 16(1), 129-142.