






KARBONDİOKSİT TUTUCU OLARAK KULLANILAN KARBON NANOTÜPLER İÇİN EN UYGUN MODİFİKASYON TÜRÜNÜN BELİRLENMESİ

Ece YAPICI 
Hasret AKGÜN 
*Aysun ÖZKAN** 
Zerrin GÜNKAYA 
Müfide BANAR 

Alınma: 04.07.2022; kabul: 13.03.2023

Öz: İklim değişikliğinin en önemli sebeplerinden birisi olan karbondioksit (CO₂) emisyonlarının birincil kaynağı, enerji üretiminde kullanılan fosil yakıtlardır. Yanma sonrası oluşan CO₂ emisyonlarını azaltmak için, adsorpsiyon prosesinin ve bu süreçte özellikle karbon bazlı adsorbanların kullanımının oldukça etkili olduğu kanıtlanmıştır. Bunlardan birisi olan karbon nanotüplerin, adsorpsiyon kapasitesini artırmak için farklı modifikasyonları kullanılmaktadır. Ancak, en uygun modifikasyon türüne karar verirken sadece adsorpsiyon kapasitesi yeterli olmamakta, pek çok teknik kriterin yanında maliyetler de gündeme gelmektedir. Bu nedenle bu çalışmada, çok duvarlı karbon nanotüplerin polietilenimin (PEI), tetraetilenpentamin (TEPA), 3-aminopropiltrioksolan (APTS) ve pürin takviyeli PEI olmak üzere dört farklı modifikasyonu ele alınmış ve en uygun modifikasyon türünü belirlemek için de çok kriterli karar verme (MCDM) teknikleri kullanılmıştır. Ele alınan kriterler (ön işlem maliyeti, modifikasyon malzemesi maliyeti, enerji ihtiyacı, adsorpsiyon kapasitesi, toplam döngü, adsorpsiyon kapasitesinin düşmesi, desorpsiyon sıcaklığı ve desorpsiyon süresi) SMART (Simple Multi-Attribute Rating Technique) ve CRITIC (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation) yöntemleri ile ağırlıklandırılmıştır. Modifikasyon alternatifleri, her iki yöntemden elde edilen ağırlıklandırma sonuçlarıyla COPRAS (Complex Proportional Assessment) yöntemi kullanılarak karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda, dört farklı karbon nanotüp modifikasyonu içinden en uygun seçeneğin pürin takviyeli PEI olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: COPRAS, CRITIC, Karbondioksit yakalama, Karbon nanotüp, SMART

Determination Of the Most Appropriate Modification Type for Carbon Nanotubes Used for Carbon Dioxide Capture

Abstract: The primary source of carbon dioxide (CO₂) emissions, one of the most important causes of climate change, is fossil fuels used in energy production. Adsorption and especially the use of carbon-based adsorbents have proven to be very effective in reducing CO₂ emissions after combustion. Different modifications of carbon nanotubes used for this purpose are used to increase the adsorption capacity. However, when deciding on the most suitable modification type, the adsorption capacity alone is not sufficient, besides many technical criteria, costs also become an issue. Therefore, in this study, four different modifications of multi-walled carbon nanotubes such as polyethyleneimine (PEI), tetraethylenepentamine (TEPA), 3-aminopropyltriethylsilane (APTS), and purine-enhanced PEI were discussed and multi-criteria decision making (MCDM) techniques were used to determine the most appropriate modification type. Considered criteria (pretreatment cost, modification material cost, energy requirement, adsorption capacity, total cycle, decrease in adsorption capacity, desorption temperature, and

* Eskişehir Teknik Üniversitesi 2 Eylül Kampüsü, 26555 Tepebaşı/Eskişehir
İletişim Yazarı: Aysun ÖZKAN (aysunozkan@eskisehir.edu.tr)

desorption time) were weighted with SMART (Simple Multi-Attribute Rating Technique) and CRITIC (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation) methods. The modification alternatives were compared with the weighting results obtained from both methods using the COPRAS (Complex Proportional Assessment) method. As a result of the study, it was determined that the most suitable option among four different carbon nanotube modifications was PEI supplemented with purine.

Keywords: COPRAS, CRITIC, Carbon dioxide capture, Carbon nanotube, SMART

1. GİRİŞ

Avrupa Birliği, Avrupa Yeşil Mutabakatı ile 2050 yılında iklim nötr ilk kıta olma hedefini ortaya koyarken; aynı zamanda sanayinin dönüşümünü gerektiren yeni bir büyüme stratejisi benimseyeceğini ve tüm politikalarını iklim değişikliği ekseninde yeniden şekillendireceğini açıklamıştır. Bu bağlamda, ülkemizde de Ticaret Bakanlığı tarafından Temmuz 2021’de 9 ana başlık, 32 hedef ve 81 eylemden oluşan Yeşil Mutabakat Eylem Planı yayımlanmıştır. Bunların arasında “İklim Değişikliği ile Mücadele” ana başlığı altında Paris Anlaşması’nın gereklerinin yerine getirilmesi hususuna da yer verilmiştir (Ticaret Bakanlığı, 2021).

İklim değişikliği, günümüzde insanlığın karşı karşıya olduğu en önemli sorunlardan birisidir. Toplam sera gazı emisyonlarının yaklaşık %68’ini oluşturan karbondioksit (CO₂), küresel iklim değişikliğinin ana sorumlusudur (Deng ve Park, 2019, Singh vd., 2020). Bugün, antropojenik CO₂ emisyonlarının %37’si, enerji üretimi için fosil yakıtların yakılmasından kaynaklanmaktadır (Oschatz ve Antonietti, 2018). Karbon yakalama ve depolama (Carbon Capture and Storage: CCS), antropojenik kaynaklı CO₂ emisyonlarını azaltmak için kullanılabilecek potansiyel teknolojilerden birisidir (Tome ve Marrucho, 2016). CO₂’nin yakalanması, yanma öncesi ve sonrası olmak üzere temel olarak ikiye ayrılır. Yanma sonrası karbon yakalama, günümüzde mevcut en basit teknoloji olup (Hussin ve Aroua, 2020), temel prensibi fosil yakıtların yanması sonucu oluşan baca gazından CO₂’in tutulmasıdır (Zou vd., 2017, Modak ve Jana, 2019).

Fosil yakıttan enerji üreten santrallerde kullanılan geleneksel bir yöntem olan aminle sıyırma, aminlerin yüksek CO₂ afinitesi nedeniyle baca gazından CO₂ absorpsiyonunda yüksek bir verimlilik sağlar. Ancak aminle sıyırma yönteminde, rejenerasyon için yüksek enerji gereksinimi, bozunma eğilimi, toksik gaz salımı ve mekanik parçaların aşınması gibi dezavantajlar vardır (Yay ve Gizli, 2019, Tian vd., 2018, Hu vd., 2020). Bu nedenle kurulumu kolay, ekonomik, daha verimli ve çevresel açıdan risk oluşturmayacak CO₂ tutma yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır (Bahamon ve Vega, 2016). Bu gereklilik üzerine yapılan çalışmalarda, CO₂’i adsorpsiyon yoluyla ayırmanın ve yakalamanın, amin bazlı absorpsiyon tekniğinin yerini alabilecek etkili bir alternatif yöntem olduğu keşfedilmiştir (Hussin ve Aroua, 2020, Hu vd., 2020, Ahmed vd., 2020, Babu vd., 2017). Diğer yandan aminlerin avantajlarından faydalanmak ve aynı zamanda aminle sıyırmadan kaynaklanan sorunları çözmek için de aminlerle fonksiyonelleştirilmiş katı adsorbanlar kullanılmıştır (Sanz vd., 2013, Lin vd., 2013).

Karbon bazlı adsorbanlar; kimyasal ve termal stabilite, nem stabilitesi, yüksek gözenek hacmi, yüksek spesifik yüzey alanı ve rejenerasyon kolaylığı gibi birçok fayda sağlamaktadır. Bu noktada bu adsorbanlar arasında, mekanik mukavemetleri, termal ve kimyasal stabilite, içi boş yapıları ve yüksek spesifik yüzey alanları nedeniyle karbon nanotüpler (Carbon Nanotube: CNT) dikkat çekmektedir. Bu üstün özellikler, CO₂ yakalamada CNT’lerin kullanımına olan ilginin artmasına yol açmıştır (Lee vd., 2015). Ayrıca, aminlerle fonksiyonelleştirilmiş CNT’lerin fiziksel ve kimyasal adsorpsiyon ile yüksek CO₂ yakalama kapasitesi ve seçicilik sergilediği görülmüştür (Du vd., 2013).

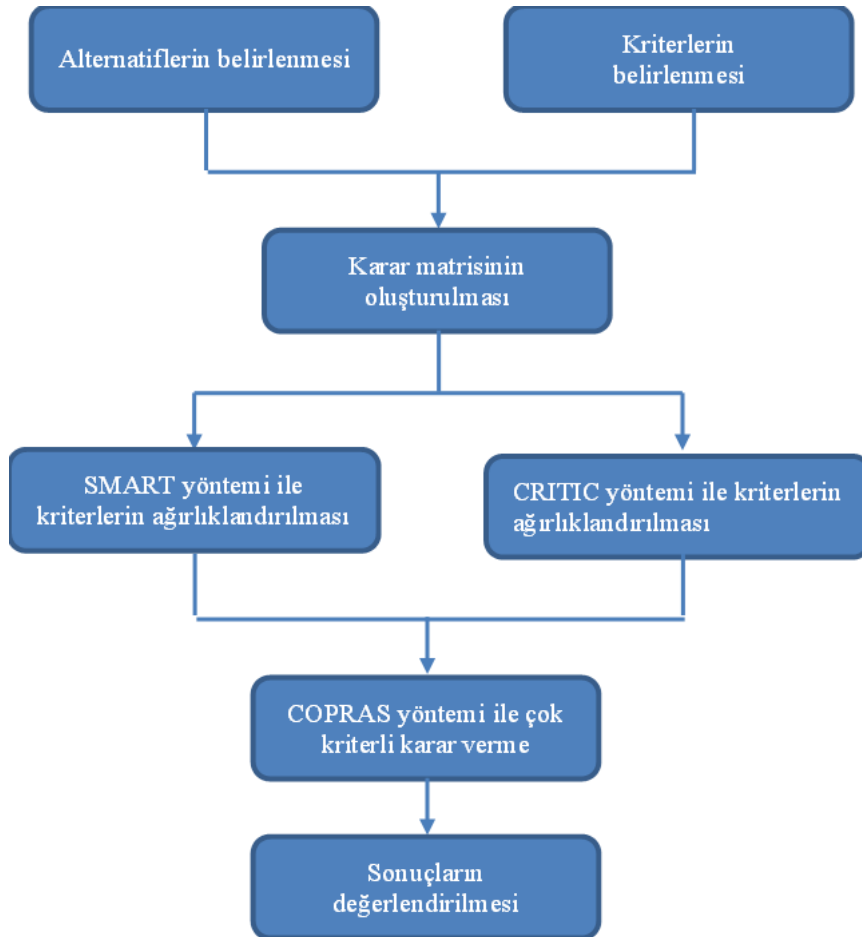
CO₂ yakalamada kullanılacak ideal adsorbanın seçilmesi için yüksek adsorpsiyon kapasitesi, termal-mekanik-kimyasal stabilite, üretim kolaylığı ve maliyet gibi çeşitli faktörlerin dikkate alınması gerekir (Singh vd., 2020, Ahmed vd., 2020, Khraisheh vd., 2020). Bu gibi

durumlarda, doğru kararı verebilmek için çok kriterli karar verme (Multi-Criteria Decision-Making: MCDM) teknikleri, en uygun yöntemi belirlemek için etkili araçlardır.

Bu çalışmada, yanma sonrası oluşan CO₂ emisyonlarını yakalamada kullanılacak CNT'lerin fonksiyonelleştirilmesi için en uygun modifikasyon türünün MCDM tekniği ile belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, dört farklı amin bazlı modifikasyon alternatifi ve sekiz kriter belirlenmiştir. Kriterler, subjektif bir yöntem olan Basit Çok Nitelikli Derecelendirme Tekniği (Simple Multi-Attribute Rating Technique: SMART) ve objektif bir yöntem olan Kriterler Arası Korelasyon Aracılığıyla Kriterlerin Önemi (Criteria Importance Through Inter-Criteria: CRITIC) yöntemleriyle ağırlıklandırılmıştır. Amin bazlı modifikasyon alternatiflerini değerlendirmek için ise, bir MCDM tekniği olan Karmaşık Orantılı Değerlendirme (Complex Proportional Assessment: COPRAS) tekniği kullanılmıştır.

2. YÖNTEM

Çalışmada öncelikle kapsamlı bir literatür taraması yapılmış ve CNT'lere uygulanan 4 alternatif modifikasyon yöntemi ve CO₂ adsorpsiyonunda önemli olan 8 kriter belirlenmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda karar matrisi oluşturulmuştur. Kriterler SMART ve CRITIC yöntemleri kullanılarak ağırlıklandırılmış ve ardından COPRAS yöntemi kullanılarak alternatifler önceliklendirilmiştir. Son olarak ise, bu farklı metodolojilerden elde edilen değerler karşılaştırılmıştır. Çalışmanın akış şeması Şekil 1'de özetlenmiştir.



Şekil 1:

Akış şeması

2.1. Alternatif ve Kriterlerin Belirlenmesi

CNT'ler tek duvarlı ve çok duvarlı üretilmekte ancak, tek duvarlı CNT üretimi zor ve maliyetli olduğu için adsorpsiyon çalışmalarında çok duvarlı karbon nanotüplerin (Multi-walled carbon nanotube: MWCNT) kullanımı söz konusu olmaktadır. Çalışmada, MWCNT'lerin amin bazlı 4 farklı modifikasyon yöntemi alternatif olarak belirlenmiş ve modifikasyonların detayları Tablo 1'de verilmiştir. İdeal adsorban seçimi için temel faktörler göz önünde bulundurularak belirlenen kriterler ise Tablo 2'de görülmektedir.

Tablo 1. Alternatifler

Alternatifler*	Modifikasyon yöntemi	Ref.
PEI	MWCNT'ler öncelikle yüzeylerine karboksil asit gruplarını eklemek için hacimce 1:3 oranında HNO ₃ ve H ₂ SO ₄ ile ön işleme tabi tutulmuştur. Etanole (10 mL) PEI eklenmiş ve 70°C'de 30 dk. karıştırılmıştır. Karboksilatlanmış MWCNT'ler de ayrıca etanol solüsyonunda 30 dk. karıştırılmış ve ardından PEI solüsyonu ile reaksiyona sokulmuştur. PEI/karboksilatlanmış MWCNT çözeltisi, 40°C'de 12 saat boyunca sürekli olarak karıştırıldıktan sonra oda sıcaklığında kurutulmuştur.	Lee vd., 2015
TEPA	Öncelikle MWCNT'lerin kimyasal aktivasyonu, 50 mL etanol içinde 1:6 oranında KOH ile oda sıcaklığında 6 saat karıştırılarak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra karışım 80°C'de 12 saat kurutulmuş, ardından 3 saat N ₂ gazı akışında 600°C sıcaklıkta ısı işleme tabi tutulmuştur. Malzemeler daha sonra seyreltik HCl içinde bir gece karıştırılmış, süzülmüş, pH değeri 7'ye ulaşana kadar suyla yıkanmış ve 100°C'de fırında kurutulmuştur. Daha sonra MWCNT'ler, 20 mL etanol ile hazırlanan TEPA çözeltisine ilave edilmiş ve oda sıcaklığında 24 saat karıştırıldıktan sonra 50°C'de fırında kurutulmuştur.	Irani vd., 2017
APTS	2 g MWCNT, 30 mL APTS ve 70 mL toluen içeren çözeltiye eklenmiştir. APTS karışımı, 2 saat boyunca 100°C'de geri akıtılmıştır. Oda sıcaklığına soğutulduktan sonra karışım, 0,45 µm'lik fiber filtreden süzülmüş ve süzülen katı 2 saat boyunca 120°C'de fırında kurutulmuştur.	Su vd., 2011
PEI+pürin	MWCNT'ler (80 mg), 20 mL saf su içerisinde 2 saat boyunca sonikasyon yoluyla dağıtılmıştır. Daha sonra 80 mg pürin eklenerek oda sıcaklığında 4 saat daha karıştırılmıştır. Karışım süzüldükten sonra pürin-CNT'ler 30 mL'lik PEI (ağırlıkça %6) sulu çözeltisi içinde dağıtılmış ve oda sıcaklığında 12 saat karıştırılmıştır. Daha sonra karışım vakumla süzülmüştür.	Deng ve Park, 2019

*PEI: polietilenimin, TEPA: tetraetilenpentamin, APTS: 3-aminopropiltrieoksilan, PEI+pürin: pürin takviyeli PEI

Tablo 2. Kriterler

No	Kriterler	Birim	Tercih yönü	Açıklama
c1	Ön işlem maliyeti	1-9 ölçeği	Azalan	Modifikasyon öncesi MWCNT'lere uygulanan işlemlerin maliyetidir.
c2	Modifikasyon malzemesi maliyeti	\$	Azalan	1 g MWCNT'yi modifiye etmek için kullanılan malzemelerin maliyetidir.
c3	Modifikasyon enerji ihtiyacı	1-9 ölçeği	Azalan	Modifikasyon sırasında karıştırma ve ısıtma gibi işlemler için harcanan enerjidir.
c4	Adsorpsiyon kapasitesi	mmol/g	Artan	Adsorbanların maksimum CO ₂ adsorpsiyon kapasitesidir.
c5	Toplam döngü	Sayı	Artan	Adsorbanların tekrar kullanılabilirdiği adsorpsiyon-desorpsiyon döngülerinin sayısıdır.
c6	Adsorpsiyon kapasitesindeki düşüş	%	Azalan	Toplam döngüden sonra adsorpsiyon kapasitesindeki düşüştür.
c7	Desorpsiyon sıcaklığı	°C	Azalan	Adsorbandan CO ₂ desorpsiyon sıcaklığıdır.
c8	Desorpsiyon süresi	dk	Azalan	Adsorbandan CO ₂ desorpsiyon süresidir.

2.2. Karar Matrisinin Oluşturulması

Belirlenen her alternatif için, her kriterin referans çalışmalardaki değerleri doğrultusunda oluşturulan karar matrisi Tablo 3'te verilmiştir. Söz konusu matris, kriter ağırlıklandırması için CRITIC ve alternatif sıralaması için COPRAS yöntemlerinde karar matrisi olarak kullanılmıştır.

Tablo 3. Karar matrisi

Alternatifler/Kriterler	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8
PEI	3	3,9	9	2,17	10	3	120	120
TEPA	9	0,17	3	5	10	20	90	5
APTS	1	8,25	9	2,45	100	11,65	120	25
PEI+pürin	1	1,25	1	3,86	50	1	100	60

2.3. Kriterlerin Ağırlıklandırılması

Bu çalışmada ağırlıklandırma yöntemleri olarak SMART ve CRITIC uygulanmıştır. SMART, karar vericilerin yargılarına dayanan öznel bir yöntemken; CRITIC yöntemi, önceden tanımlanmış bir karar matrisine dayanan nesnel bir yöntemdir (Odu, 2019). Ağırlıklandırma işlemlerinin uygulanması sırasında Microsoft Excel programı kullanılmıştır.

2.3.1. SMART yöntemi

Bu yöntemde karar verici en önemsiz kritere 10 puan, en önemli kritere 100 puan vererek kriterleri en kötünden en iyiye doğru sıralar. Kriter ağırlıkları, puanların toplamı 1'e normalize edilerek hesaplanır (Odu, 2019). Bu çalışmada, yazarların kişisel yargılarına göre kriterler en önemliden önemsizlere doğru sıralanarak puanlanmıştır.

2.3.2. CRITIC yöntemi

Bu yöntem, objektif bir ağırlıklandırma tekniği olup, karar matrisinin analitik olarak incelenmesine ve bir kriterin değerini ölçmek için korelasyon analizini kullanan standart sapmaya dayanmaktadır (Odu, 2019, Kısa, 2021). İlk olarak karar matrisi aşağıdaki gibi

normalize edilir (Odu, 2019) (Eşitlik 1-2). Buradaki y_j ; karar matrisindeki elemanların değerleridir.

Faydalı kriterler için:

$$p_{ij} = \frac{y_{ij} - y_j^{min}}{y_j^{max} - y_j^{min}} \quad (1)$$

Faydalı olmayan kriterler için:

$$p_{ij} = \frac{y_j^{max} - y_{ij}}{y_j^{max} - y_j^{min}} \quad (2)$$

Daha sonra normalizasyonda elde edilen değerler kullanılarak matristeki kriter değerleri arasında doğrusal bir korelasyon katsayısı hesaplanır (Eşitlik 3).

$$v_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^m (p_{ij} - \bar{p}_j)(p_{ik} - \bar{p}_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (p_{ij} - \bar{p}_j)^2 \sum_{i=1}^m (p_{ik} - \bar{p}_k)^2}} \quad (3)$$

Son olarak, kriterlerin ağırlıkları standart sapma (σ_j) ve korelasyon katsayısı (v_{jk}) kullanılarak hesaplanır (Eşitlik 4-5).

$$w_j = \frac{\beta_j}{\sum_{k=1}^n \beta_k} \quad (4)$$

$$\beta_j = \sigma_j \sum_{k=1}^n (1 - v_{jk}) \quad (5)$$

2.4. Alternatiflerin Sıralanması

Alternatifler, SMART ve CRITIC yöntemlerinden elde edilen kriter ağırlıkları kullanılarak Karmaşık Orantılı Değerlendirme (Complex Proportional Assessment, COPRAS) yöntemi ile sıralanmıştır. COPRAS yöntemi, Zavadskas ve Kaklauskas tarafından 1994 yılında geliştirilmiştir. COPRAS, ideal olana ve ideal olmaya oran ile bir çözüm türeterek en iyi alternatifin belirlendiği önemli MCDM yöntemlerinden birisidir. Bu yöntemde, öncelikle karar matrisi normalize edilir (Eşitlik 6).

$$R_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{j=1}^n x_{ij}} \quad (6)$$

Ardından, ağırlıklı normalleştirilmiş matris hesaplanır (Eşitlik 7).

$$V_{ij} = w_j R_{ij} \quad (7)$$

Daha büyük değerlerin daha çok tercih edildiği kriter değerlerinin toplamları P_i hesaplanır (Eşitlik 8). Burada g maksimize edilmesi gereken faydalı kriter sayısıdır.

$$P_i = \sum_{j=1}^g R_{ij} \quad (8)$$

Daha küçük değerlerin daha çok tercih edildiği kriter değerlerinin toplamları R_i hesaplanır (Eşitlik 9). Burada $n-g$ minimize edilmesi gereken faydalı olmayan kriter sayısıdır.

$$R_i = \sum_{j=n-g}^n R_{ij} \quad (9)$$

Her alternatifin bağıl ağırlığı Q_i hesaplanır (Eşitlik 10).

$$Q_i = P_i + \frac{\sum_i^n R_i}{R_i \sum_i^n (1/R_i)} \quad (10)$$

Analiz edilen alternatifin bağıl ağırlığı alternatiflerin içerisindeki en yüksek bağıl ağırlığa bölünerek N_i hesaplanır (Eşitlik 11). N_i değeri en yüksek olan seçenek en iyi alternatif olarak kabul edilir.

$$N_i = \frac{Q_i}{Q_{max}} \times 100 \quad (11)$$

3. BULGULAR

SMART ve CRITIC yöntemleri ile elde edilen kriter ağırlıklandırma sonuçları Tablo 4'te verilmiştir. SMART yönteminde en önemli kriter sistemin doğrudan verimi olan c4 (adsorpsiyon kapasitesi) olarak belirlenmişken, standart sapma temelli CRITIC yönteminde c1 (ön işlem maliyeti) en önemli kriter olmuştur. Diğer kriterlerin sıralaması incelendiğinde, iki yöntem arasında önemli farklılıklar olduğu görülmektedir.

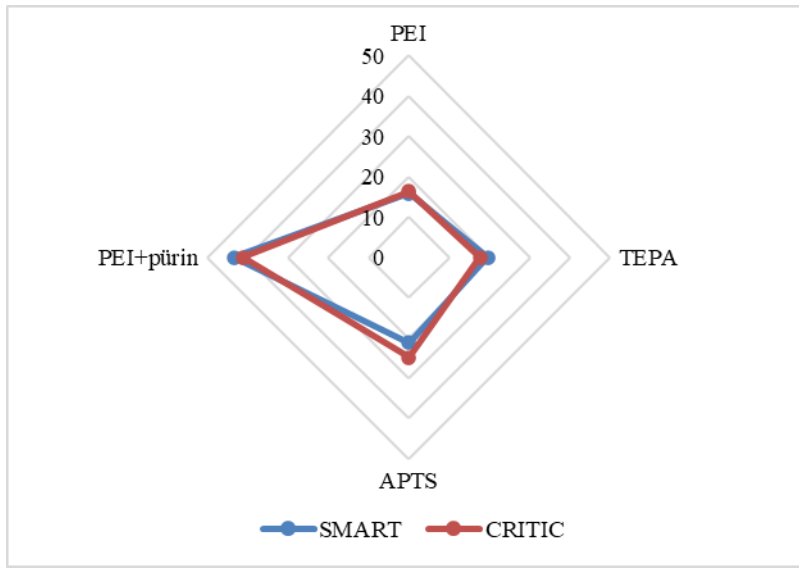
COPRAS yöntemiyle elde edilen değerlendirme verileri ve sıralamalar ise Tablo 5'te gösterilmektedir. Ayrıca, tablodaki değerler kullanılarak alternatifleri yüzde dağılımları belirlenmiş ve grafiksel olarak Şekil 2'de gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, her iki yöntemde de A4'ün (PEI-pürin) en iyi alternatif olduğu görülmektedir. İkinci en iyi alternatif A3 (APTS) olurken, en zayıf seçeneğin de A1 (PEI) olduğu belirlenmiştir. A4 alternatifi düşük maliyet ve enerji tüketimi, yüksek adsorpsiyon kapasitesi ve adsorpsiyon kapasitesindeki düşüşün az olması nedeniyle ilk sırada bulunmuştur. Kriter ağırlıkları ile bu sonuçlar değerlendirildiğinde, SMART ve CRITIC yöntemlerinde ağırlığı yüksek olan sırasıyla c4 ve c1 kriterlerinin PEI-pürin alternatifinde en yüksek değerlere sahip olduğu dikkat çekmektedir. PEI için ise adsorpsiyon verimi ve toplam döngü değerleri, diğer alternatiflere göre en düşük değerlere sahipken, azalan değerlere sahip olması istenen yüksek enerji tüketimi, yüksek desorpsiyon sıcaklığı ve uzun desorpsiyon süresi nedeniyle son sırada yer almıştır. Kriter ağırlıklandırma yöntemlerinden elde edilen farklı sıralamalara rağmen, alternatiflerin sıralaması aynı olmuştur. Bu durum sonuçların güvenilirliğini artırmaktadır.

Tablo 4. Kriter ağırlıkları

Yöntem		c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8
SMART	Değer	0,1731	0,1538	0,1346	0,1923	0,1154	0,0962	0,0769	0,0577
	Sıralama	2	3	4	1	5	6	7	8
CRITIC	Değer	0,1616	0,1088	0,0992	0,1028	0,1523	0,1533	0,1085	0,1134
	Sıralama	1	5	8	7	3	2	6	4

Tablo 5. Alternatiflerin sıralaması

Alternatifler	SMART		CRITIC	
	Değer	Sıra	Değer	Sıra
PEI	36,5645	4	39,8328	4
TEPA	45,3209	3	42,7728	3
APTS	48,8250	2	60,3046	2
PEI+pürin	100	1	100	1



Şekil 2:
Alternatiflerin dağılımı (%)

4. SONUÇ

Bu çalışmada, CO₂ yakalamada kullanılan MWCNT'lerin adsorpsiyon kapasitesini artırmak için uygulanan PEI, TEPA, APTS ve pürin takviyeli PEI olmak üzere dört farklı modifikasyon türü ele alınmış ve en uygun türü belirlemek için MCDM teknikleri kullanılmıştır. Karar vericilere yol gösterici olması açısından önem arz eden bu teknikler, özellikle çevresel süreçler ve maliyeti yüksek yatırımlarda başvurulmasında fayda olan yöntemlerdir. Nitekim bu çalışmada da teknik, çevresel ve ekonomik kriterler dikkate alınarak, toplam sera gazı emisyonlarının yaklaşık %68'ini oluşturan ve küresel iklim değişikliğinin ana sorumlusu olarak bilinen CO₂'in yakalanması için kullanılan karbon nanotüplerin modifikasyonunda en uygun seçeneğin pürin takviyeli PEI olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmadaki yaklaşım temelinde, karbondioksit veya farklı kirleticilerin adsorpsiyonu için farklı alternatifler kullanılarak (farklı adsorban malzemeler veya farklı modifikasyon yöntemleri gibi) yeni çalışmalar yapılmasıyla daha etkin çözümlerin üretilmesi mümkündür.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazar(lar), bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

YAZAR KATKISI

Ece Yapıcı ve Hasret Akgün veri toplama ve veri analizi, Aysun Özkan ve Zerrin Günkaya çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi ve Müfide Banar ise yorumlama kısmında makaleye katkıda bulunmuştur.

KAYNAKLAR

1. Ahmed, R., Liu, G., Yousaf, B., Abbas, Q., Ullah, H. ve Ali, M.U. (2020) Recent advances in carbon-based renewable adsorbent for selective carbon dioxide capture and separation-A review, *Journal of Cleaner Production*, 242, 118409. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118409>
2. Babu, D.J., Bruns, M. ve Schneider, J.J.(2017) Unprecedented CO₂ uptake in vertically aligned carbon nanotubes, *Carbon*, 125, 327-335. doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.09.047>
3. Bahamon, D. ve Vega, L.F. (2016) Systematic evaluation of materials for post combustion CO₂ capture in a Temperature Swing Adsorption process, *Chemical Engineering Journal*, 284, 438-447. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.08.098>
4. Deng, M. ve Park, H.G. (2019) Spacer-assisted amine-coiled carbon nanotubes for CO₂ capture, *Langmuir*, 35(13), 4453-4459. doi: <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.8b03980>
5. Du, Y., Du, Z., Zou, W., Li, H., Mi, J. ve Zhang, C. (2013) Carbon dioxide adsorbent based on rich amines loaded nano-silica, *Journal of Colloid and Interface Science*, 409, 123. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2013.07.071>
6. Hu, X.E., Liu, L., Luo, X., Xiao, G., Shiko, E., Zhang, R., Fan, X., Zhou, Y., Liu, Y., Zeng, Z. ve Li, C. (2020) A review of N-functionalized solid adsorbents for post-combustion CO₂ capture, *Applied Energy*, 260, 114244. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114244>
7. Hussin, F. ve Aroua, M.K. (2020) Recent trends in the development of adsorption technologies for carbon dioxide capture: A brief literature and patent reviews (2014–2018), *Journal of Cleaner Production*, 253, 119707. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119707>
8. Irani, M., Jacobson, A.T., Gasem, K.A. ve Fan, M. (2017) Modified carbon nanotubes/tetraethylenepentamine for CO₂ capture, *Fuel*, 206, 10-18. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.05.087>
9. Khraisheh, M., Mukherjee, S., Kumar, A., Al Momani, F., Walker, G. ve Zaworotko, M.J. (2020) An overview on trace CO₂ removal by advanced physisorbent materials, *Journal of Environmental Management*, 255, 109874. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109874>
10. Kısa, A.C.G. (2021) TR83 bölgesinde yenilenebilir enerji kaynaklarının CRITIC tabanlı gri ilişki analizi yaklaşımı ile değerlendirilmesi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(4), 542-548. doi: 10.5505/pajes.2021.99389
11. Lee, M.S., Lee, S.Y. ve Park, S.J. (2015) Preparation and characterization of multi-walled carbon nanotubes impregnated with polyethyleneimine for carbon dioxide capture,

- International Journal of Hydrogen Energy*, 40(8), 3415-3421. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.12.104>
12. Lin, Y., Yan, Q.J., Kong, C.L. ve Chen, L. (2013) Polyethyleneimine Incorporated Metal-organic Frameworks Adsorbent for Highly Selective CO₂ Capture, *Scientific Reports*, 3, 1895. doi: 10.1038/srep01859
 13. Modak, A, ve Jana, S. (2019) Advancement in porous adsorbents for post-combustion CO₂ capture, *Microporous and Mesoporous Materials*, 276, 107-132. doi: <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2018.09.018>
 14. Odu, G.O. (2019) Weighting Methods for Multi-Criteria Decision Making Technique, *Journal of Applied Science and Environmental Management*, 23(8), 1449-1457. doi: 10.4314/jasem.v23i8.7
 15. Oschatz, M. ve Antonietti M. (2018) A search for selectivity to enable CO₂ capture with porous adsorbents, *Energy & Environmental Science*, 11(1), 57-70. doi: 10.1039/C7EE02110K
 16. Sanz, R., Calleja, G., Arencibia, A. ve Sanz-Pérez, E.S. (2013) Development of High Efficiency Adsorbents for CO₂ Capture based on a Double-Functionalization Method of Grafting and Impregnation, *Journal of Material Chemistry A*, 1, 1956–1962. doi: <https://doi.org/10.1039/C2TA01343F>
 17. Singh, G., Lee, J., Karakoti, A., Bahadur, R., Yi, J., Zhao, D., AlBahiyi, K. ve Vinu, A. (2020) Emerging trends in porous materials for CO₂ capture and conversion, *Chemical Society Reviews*, 49(13), 4360-4404. doi: <https://doi.org/10.1039/D0CS00075B>
 18. Su, F., Lu, C. ve Chen, H.S. (2011) Adsorption, desorption, and thermodynamic studies of CO₂ with high-amine-loaded multiwalled carbon nanotubes, *Langmuir*, 27(13), 8090-8098. doi: <https://doi.org/10.1021/la201745y>
 19. Tian, Z., Huang, J., Zhang, X., Shao, G., He, Q., Cao, S. ve Yuan, S. (2018) Ultra-microporous N-doped carbon from polycondensed framework precursor for CO₂ adsorption, *Microporous Mesoporous Materials*, 257, 19-26. doi: <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2017.08.012>
 20. Ticaret Bakanlığı. “Yeşil Mütabakat Eylem Planı 2021”. <https://ticaret.gov.tr/haberler/yesil-mutabakat-eylem-planı-yayimlandi> (Erişim Tarihi: 01.10.2021).
 21. Tome, L.C. ve Marrucho, I.M. (2016) Ionic liquid-based materials: A platform to design engineered CO₂ separation membranes, *Chemical Society Reviews*, 45(10), 2785-2824.
 22. Yay, B. ve Gizli, N. (2019) A review on silica aerogels for CO₂ capture applications. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(7), 907-913. doi: <https://doi.org/10.1039/C5CS00510H>
 23. Zou, L., Sun, Y., Che, S., Yang, X., Wang, X., Bosch, M., Wang, Q., Li, H., Smith, M., Yuan, S., Perry, Z. ve Zhou, H.C. (2017) Porous organic polymers for post-combustion carbon capture, *Advanced Materials*, 29(37), 1700229. doi: <https://doi.org/10.1002/adma.201700229>