



## İçme Sularından Pentaklorofenol (PCP) Giderimi İçin En İyi Arıtma Alternatiflerinin Çok Ölçütlü Karar Verme Metotları (MCDM) Kullanılarak Belirlenmesi

*Determination of the Best Treatment Alternatives for Pentachlorophenol (PCP) Removal from Drinking Water Using Multi-Criteria Decision Making Methods (MCDM)*

Emrah Öztürk\*

Süleyman Demirel Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

### Öz

Pentaklorofenol (PCP) toksik özelliklerinden dolayı öncelikli mikrokirletici olarak sınıflandırılmaktadır. PCP biyosit olarak yaygın kullanım alanlarına sahiptir. PCP'ler tehlikeli atık bertaraf sahalarından ve tarımsal alanlardan (yağmursuları ve rüzgar etkisiyle sürüklenmeyle) içme suyu kaynaklarına taşınmaktadır. Özellikle içme suları ve gıdalar üzerindeki PCP kalıntılarının insan vücuduna alınması insan sağlığı üzerinde önemli bir risk oluşturmaktadır. Bu çalışmada, PCP'nin içme sularından uzaklaştırılmasında kullanılacak en iyi arıtma alternatifi çok ölçütlü karar verme metotlarından (MCDM) yararlanılarak belirlenmiştir. En iyi arıtma alternatifinin belirlenmesi sürecinde kriter ağırlıklandırma (KAM), ağırlıklandırılmış toplama (ATM) ve basit sıralama (BSM) metotlarının bir kombinasyonundan oluşan bir analiz modeli kullanılmıştır. Bu kapsamda tanımlanan 18 değerlendirme kriterine göre literatürdeki benzer çalışma verilerinden ve uzman görüşlerinden de yararlanılarak kapsamlı ve sistematik bir değerlendirme yapılmıştır. Sonuçta membran filtrasyon proseslerinin (nanofiltrasyon (NF) ve ters ozmos (RO)) yüksek giderim performanslarına sahip olması, kolay kurulum, işletim ve bakım kolaylığı, kimyasal gereksiniminin az olması, yaygın kullanıma sahip olması ve oturmuş bir teknoloji olması, arıtılmış su kalitesinin yüksek olması, yan ürün ya da daha toksik metabolitlerin oluşmaması gibi avantajlara sahip olması nedeniyle en iyi arıtma alternatifi olarak belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Çok ölçütlü karar verme metotları (MCDM), İçme suyu arıtımı, Mikrokirletici giderimi, Pentaklorofenol (PCP)

### Abstract

Pentachlorophenol (PCP) is classified as a priority substance (micropollutant) due to its toxic properties. PCP has a widespread usage as a biocide. PCPs are transported from hazardous waste disposal sites and agricultural areas (via rainfalls and drifting wind) to drinking water sources. In particular, the intake of PCP residues on drinking water and foodstuffs poses a significant risk to human health. In this study, the best treatment alternative for the removal of PCP from drinking water was determined using the multi-criteria decision making methods (MCDM). An analysis model consisting of a combination of criteria weighting method (CWM), weighted sum method (WSM) and simple ranking method (SRM) were used to determine the best treatment alternative. In this context, a comprehensive and systematic evaluation was conducted based on the described 18 evaluation criteria by utilizing similar studies in the literature and expert recommendations. Ultimately, the membrane filtration processes (NF and RO) were determined as the best treatment alternative because of high removal performance, ease of installation, ease of operation and maintenance, low chemical requirements, widespread usage and robust technology, high quality of treated water, absence of more toxic metabolites or by-products formation etc.

**Keywords:** Drinking water treatment, Micropollutant removal, Multi-criteria decision making (MCDM) methods, Pentachlorophenol (PCP)

\*Sorumlu yazarın e-posta adresi: [emrahozturk@sdu.edu.tr](mailto:emrahozturk@sdu.edu.tr)

## 1. Giriş

Pentaklorofenol (PCP), susuz alüminyum klorür veya demir klorür gibi katalizörlerin varlığında fenollerin kademeli olarak klorlanmasıyla sentetik olarak üretilen bir kimyasal bileşiktir (USDHHS 2001, Petrescu vd. 2016). Saf PCP renksiz kristaller olarak bulunmakta ve özellikle sıcak ortamda keskin bir fenolik kokuya sahiptir (USDHHS 2001). PCP'nin sudaki çözünürlüğü oldukça düşüktür ( $K_{ow}$  5.12) (ANR 2015). Ultraviyole radyasyon ile kolaylıkla bozunabilir (Suegara vd. 2005). Buna ek olarak, heksaklorobenzen, pentaklorobenzen ve benzen heksaklorit izomerlerinin PCP'ye metabolize olabilmektedir (USDHHS 2001). PCP genellikle biyosit, herbisit ve dezenfektan olarak yaygın bir kullanıma sahiptir (Bosso 2014, Diagboya vd. 2014). PCP tarımda tohumların korunması, soğutma kuleleri, boya katkı maddeleri, halat üretimi, kağıt üretimi, ahşap koruyucularda, deri ve tekstil endüstrisinde biyosit olarak kullanılmaktadır (Rubilar vd. 2008, Bosso 2014, Diagboya vd. 2014). Bu alanlar haricinde özellikle kişisel bakım ürünlerinde, sabunlarda, deterjanlarda ve tıbbi araçların dezenfeksiyonunda bir dezenfektan olarak kullanılmaktadır (Borysiewicz ve Kolsut, 2002).

PCP özellikle tehlikeli atık bertaraf alanlarından, tarımsal alanlardan yağmur suları ve rüzgar etkisiyle sürüklenmesi sonucunda yüzeysel su ve yeraltı su kaynaklarına taşınabilmektedir (USDHHS, 2001). Bazı tehlikeli atık bertaraf alanları, ahşap işleme tesisleri ve kazayla dökülmelerin gerçekleştiği alanların yakınlarındaki bölgelerde PCP konsantrasyonları daha yüksek olabilmektedir (USDHHS 2001). PCP fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle yüzeysel sularda fotoliz ve biyotransformasyona uğrayarak sedimentlere adsorbe olabilmektedir (Diagboya vd. 2014). Ayrıca PCP kimyasal olarak parçalanması sonucunda insan sağlığı için daha toksik metabolitleri oluşabilmektedir (USDHHS 2001, Diagboya vd. 2014).

PCP'nin çevre ve halk sağlığı üzerinde oluşturduğu risklerin önlenmesi için son yıllarda birçok ülkede kullanımı kontrol altına alınmıştır. PCP yüksek toksik özellikleri nedeniyle Avrupa'da ve ABD'de öncelikli mikrokirletici olarak sınıflandırılmaktadır (Kim vd. 2006, Bosso 2014, Deng vd. 2014). Kanada'da ise 1990 yılında PCP içeren ürünlerin sadece ahşap koruyucu olarak kullanılmasına izin verilmektedir (CCME 1997). Avustralya, Çin ve Hindistan gibi ülkelerde de PCP kullanımı sınırlandırılmıştır (Tan ve Zhang 2008, Abhilash ve Singh, 2009). Ülkemizde 30 Kasım 2012 tarihinde 28483 sayılı Resmi Gazetede Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği yayımlanmıştır (YSKY 2012).

10 Ağustos 2016 tarihinde 29797 sayılı Resmi Gazetede yayımlanan Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik kapsamında da PCP yerüstü su kaynakları için öncelikli kirleticilerden biri olarak tanımlanmıştır (YSKY 2016).

İnsan maruziyeti daha çok içme suları ve gıdalar üzerindeki PCP kalıntıları yoluyla gerçekleşmektedir (USDHHS 2001). Ayrıca, ahşap koruma amacıyla PCP uygulanmış yüzeylere uzun süreli deri teması yoluyla da vücuda alınabilmektedir. Çeşitli araştırmacılar tarafından anne sütü, insan yağ dokusu ve idrarda PCP kalıntılarının rastlanmıştır (USDHHS 2001, Kim vd. 2006, Singh 2006).

PCP'nin insan sağlığı üzerinde önemli akut ve kronik etkileri bulunmaktadır. Başlıca akut etkiler; aşırı hidrasyon, aşırı terleme, dehidratasyon, iştahsızlık, kilo kaybı, mide bulantısı, titreme ve hareket kabiliyetinde kayıplar şeklinde olabilmektedir (Borysiewicz ve Kolsut, 2002). Başlıca kronik etkiler ise; karaciğer ve böbrek hasarı, bağışıklık sistemi bozuklukları, dolaşım sistemi bozuklukları, merkezi sinir sistemi hasarı, üreme sistemi bozuklukları ve kalp yetmezliği gibi kronik etkiler olarak sıralanabilir (USDHHS 2001). PCP çevre ve insan sağlığı üzerinde oluşturduğu riskler nedeniyle Avrupa Birliği Su Çerçeve Direktifi'nde (2000/60/EC) öncelikli kirleticilerden biri olarak tanımlanmıştır. Direktifte iyi su kalitesi yönetimi uygulamalarıyla belirlenen mikrokirleticilerin toplum sağlığı üzerinde risk oluşturmayacak seviyenin altında olması gerektiği belirtilmiştir. Direktifte yüzeysel sularda PCP için çevresel kalite standardı (ÇKS) 0.1 µg/L olarak belirlenmiştir (EC 2000). Ülkemizde yürürlükte olan Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği'nde PCP için yıllık ortalama çevre kalite standardı (YO-ÇKS) değeri göller, nehirler, kıyı ve geçiş suları için 0.4 µg/L olarak verilmiştir. Aynı yönetmelik kapsamında maksimum izin verilebilir çevre kalite standardı (MAK-ÇKS) değeri ise 0.1 µg/L olarak belirlenmiştir (YSKY 2012).

Ülkemizin AB tam üyelik sürecinde kapsamında değerlendirildiği direktiflerden birini AB Su Çerçeve Direktifi oluşturmaktadır. Bu kapsamda yüzeysel ve yeraltı su kaynakları başta olmak üzere içme sularında da PCP gibi belirlenen öncelikli mikrokirleticilerin giderimine yönelik önlemlerin alınması gerekecektir. Böylelikle havza yönetimi çalışmalarıyla öncelikli mikrokirleticilerin sucül ortamlara kontaminasyonun önlenmesi ve mevcut konvansiyonel içme suyu arıtma tesislerinin mikrokirletici giderimi sağlayacak şekilde modernize edilmesi gerekli olacaktır. Bu çalışmada PCP'nin içme sularından uzaklaştırılmasında kullanılan arıtma alternatiflerinin performansları nitel ve nicel olarak

değerlendirilmiştir. Ayrıca arıtma alternatifleri çok ölçütlü karar verme yöntemlerinden (MCDM) yararlanılarak tanımlanmış 18 değerlendirme kriterine göre analiz edilmiştir. Böylelikle içme sularından PCP gideriminde uygulanabilir en iyi arıtma alternatiflerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmanın konvansiyonel içme suyu arıtma tesislerinin modernizasyonun gerekli olduğu durumda karar alıcılara, proje mühendislerine ve tesis operatörlerine proje hazırlıkları ve tesis işlemleri sırasında katkı sağlayacağı ön görülmektedir.

## 2. Gereç ve Yöntem

İçme suyu kaynaklarından PCP giderimine yönelik en iyi arıtma alternatifinin belirlenmesinin amaçlandığı bu çalışmada MCDM'larından yararlanılarak kapsamlı ve sistematik bir değerlendirme çalışması yürütülmüştür. En iyi arıtma alternatifinin belirlenmesi kapsamında yalnızca giderim performanslarının değerlendirilmesi objektif olarak karar vermeyi güçleştirmektedir. Bu süreçte ilk yatırım ve işletme maliyetleri, metabolitler/yan ürün oluşumu, atık oluşumu, ön arıtma gereksinimi, inşaat ve işletme kolaylığı, teknoloji varlığı gibi çok çeşitli kriterlerin de göz önünde bulundurulması gereklidir. Bu gibi çok farklı değişkenin olduğu durumlarda MCDM en iyi alternatifin belirlenmesinde oldukça etkili sonuçlar vermektedir. MCDM'ları çevresel konularda sıklıkla kullanılan nicel ve nitel kriterlerin karşılaştırılmasına olanak tanıyan şeffaf ve sistematik bir karar verme yöntemi olarak kullanılmaktadır (Lattemann 2010). Temelde MCDM, tanımlanan kriterlere göre farklı alternatiflerin modellemesi ve analizine dayanmaktadır (Aruldoss vd. 2013). Literatürde çeşitli alanlarda karar verme süreçlerinde farklı MCDM modeli kullanılmıştır (Velasquez ve Hester 2013). Basit Çoklu Özellik Değerlendirme Tekniği (SMART) ve Analitik Hiyerarşi Yöntemi (AHM), en çok bilinen ve kullanılan karar verme modelleridir. Bu modeller, çeşitli kriterlere göre çok sayıda alternatifin değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada SMART ve AHM modellerini kriter ağırlıklandırma (KAM), ağırlıklı toplam (ATM) ve basit sıralama (BSM) metotları ile kombine edilerek özgün ve basit bir uygulanabilir karar verme modeli kullanılmıştır. Sucul ortamdan PCP gideriminde kullanılabilecek en iyi arıtma alternatifinin belirlenmeye çalışıldığı bu çalışmada öncelikli olarak karar verme sürecinde kullanılacak toplam 18 değerlendirme kriteri tanımlanmış ve KAM kullanılarak ağırlıkları belirlenmiştir. Bu aşamada literatürdeki

benzer çalışma verilerinden ve uzman görüşlerinden yararlanılmıştır (Çizelge 1). Daha sonra özellikle içme suyu kaynaklarından PCP giderimine yönelik uygulanan arıtma alternatifleri detaylı literatür araştırmaları yapılarak incelenmiştir. Arıtma alternatifleri özellikle giderim performansları, tekno-ekonomik uygulanabilirlik ve pilot ya da tam ölçekli uygulamaların mevcudiyeti açısından değerlendirilerek potansiyel arıtma alternatifleri belirlenmiştir. Potansiyel arıtma alternatifleri daha önceden tanımlanan 18 değerlendirme kriteri esas alınarak MCDM ile analiz edilmiştir. Bu kapsamda değerlendirme kriterlerinin de kendi içerisinde farklı önceliklere sahip olması nedeniyle toplam 100 puan üzerinden KAM kullanılarak bir kriter ağırlıklandırması yapılmıştır. Yine KAM'larından yararlanılarak her bir potansiyel arıtma alternatifi tanımlanan değerlendirme kriterlerine göre ağırlıklandırılmış ve alternatif ağırlık puanları belirlenmiştir. Alternatif proseslerin belirlenmesinde temel kriter o prosesin mikrokirletici giderim verimidir. Bu sebeple 18 kriter arasında en yüksek (11) ağırlık puanına sahiptir. Kriter ağırlık puanı belirlenirken her bir prosesin avantaj ve dezavantajları, tam ölçek uygulamaları, yatırım ve işletim maliyetleri gibi parametreler literatür değerlendirmesi sonucunda elde edilmiştir. Elde edilen tüm bilgiler derlenerek bir ağırlık puan skalası oluşturulmuştur. Bu puan skalası farklı mikrokirleticiler için farklı olabilir. Örneğin PCP için "işletim için gereklilikler ve tüketimler" kriterinin ağırlık puanı 7 iken, komplekslik 3 puandır. Bir prosesin seçiminde o prosesin işletiminde gerekli temel veya mekanik-elektronik bileşenlerin bilinmesi prosesin komplekslik derecesinden daha öncelikli ve önemli bir faktördür ve bu sebeple ağırlık puanı daha büyüktür. Daha sonra aşağıda verilen Eşitlik 1'den yararlanılarak potansiyel arıtma alternatiflerinin kriter ağırlıkları hesaplanmıştır. ATM'larına göre Eşitlik 2'de verilen formülasyon kullanılarak alternatiflerin toplam öncelik puanları hesaplanmıştır. Son olarak, her bir potansiyel alternatif için BSM'dan yararlanılarak toplam alternatif puanlarına göre bir öncelik sıralaması yapılmıştır. Böylelikle içme sularından PCP'nin giderimine yönelik en iyi arıtma yöntemi belirlenmiştir.

$$\text{Kriter ağırlık puanı} = W_i \times C_i \quad (1)$$

$$\text{Toplam kriter öncelik puanı} = \sum_i^n W_i \cdot C_i \quad (2)$$

$W_i$ : Kriterin ağırlık puanı,  $C_i$ : Alternatifin ağırlık puanı,  $n$ : Alternatif sayısı,  $i$ : Kriter sayısı

**Çizelge 1.** MCDM değerlendirme kriterleri ve ağırlık puanları

Değerlendirme kriterleri	Kriter tanımları ve ağırlık puanları		
	1	2	3
<b>Giderim verimi (%)</b> Proses etkinliği, giderim performansı	50-70	70-90	>90
<b>Güvenirlilik ve dayanıklılık</b> Ekipman, sürekli çalışma, planlanmamış bakım	Uygulamaya özgü	Orta derecede güvenirlilik ve sağlamlık	Çok güvenirlilik ve sağlamlık
<b>Komplekslik</b> Mekanik, borulama, enstrümantasyon ve kontrol vb. açısından	Çok kompleks	Orta derecede kompleks	Basit
<b>Planlanmış bakım gereksinimi</b> Planlanmış bakım seviyesi açısından	Yüksek bakım gereksinimi (≥4 hafta/yıl)	Orta derecede bakım gereksinimi (2-4 hafta/yıl)	Düşük (≤2 hafta/yıl)
<b>İşletim kolaylığı</b> İşletim için personel gereksinimi	Neredeyse tamamen manuel işletim	Kısmi otomatik ve manuel işletim	Tamamen otomasyona dayalı işletim
<b>Kurulum kolaylığı</b> Kurulumla özgü inşaat ve ekipman gereksinimi	Yüksek seviyede inşaat ve ekipman gereksinimi	Orta seviyede inşaat ve ekipman gereksinimi	Düşük seviyede inşaat ve ekipman gereksinimi
<b>Kimyasal gereksinimi</b> Temizleme-yenileme ve işletim için kimyasal gereksinimi	Toplam 5'den fazla çeşit kimyasal gereksinimi	3-5 arasında farklı kimyasal gereksinimi	Toplamda 3'den az farklı kimyasal gereksinimi
<b>İşletim için gereklilikler ve tüketimler</b> Membranlar, reçineler gibi temel veya mekanik-elektronik bileşenlerin değişimi	1 yıldan daha kısa sürede değişim/yenileme gereksinimi	1-5 yıl arasında değişim/yenileme gereksinimi	5 yıldan daha uzun sürede değişim/yenileme gereksinimi
<b>Uygulamadaki tecrübe</b> Global ölçekte yaygın olarak kullanılan ve ulaşılabilir teknoloji olması açısından	<5 yıllık tecrübe	5-10 yıllık tecrübe	>10 yıllık tecrübe
<b>Atık oluşumu</b> Konsantre, geri yıkama, rejenerasyon, temizleme çözeltileri, çamur vb. oluşumu	4'den fazla ve yüksek kirlilik yüküne sahip atık oluşumu	2-4 arasında farklı ve orta seviyede kirlilik yüküne sahip atık oluşumu	2'den daha az ve düşük kirlilik yüküne sahip atık oluşumu
<b>Atıkların/konsantrelerin arıtımı ve yönetimi</b> Konsantreler, geri yıkama, temizleme çözeltileri, rejenerant ve atıkların toplanması, arıtımı ve bertarafı açısından	Sınırlı ve yüksek bertaraf maliyeti	Yüksek maliyetlerin karşılanabildiği durumlarda bertaraf edilebilir	Atık oluşumu yok ya da bertaraf sorunu bulunmamakta
<b>Su kayıpları</b> Konsantreler, geri yıkama, rejenerasyon, temizleme çözeltileri ve diğer atık akımları dahil olmak üzere su kayıplarının en aza indirilmesi açısından	Proseste su kayıpları: >%30	Proseste su kayıpları: %10-30	Proseste su kayıpları: <%10
<b>Arıtılmış su kalitesi güvenliği</b> Proseste giren su kalitesindeki değişimlerin arıtılmış su kalitesine etkisi (sürecin sağlamlığı).	Proseste giren su kalitesine yüksek seviyede bağımlı	Proseste giren su kalitesine orta seviyede bağımlı	Proseste giren su kalitesinden bağımsız

Çizelge 1. Devam

Değerlendirme kriterleri	Kriter tanımları ve ağırlık puanları		
	1	2	3
<b>Faydalı kullanım ömrü</b> İnşaat, mekanik vb. açısından sistemin toplam faydalı kullanım ömrü	<10 yıl	10-20 yıl	>20 yıl
<b>Teknolojinin varlığı ve tasarımın gelişmişlik seviyesi</b> Tek üretici, patentli ve sınırlı üretim, piyasa rekabet koşulları vb.	Tek ya da sınırlı üretime sahip, patentli ve erişilmesi güç	Sadece birkaç üretici bulunmakta	Kolay erişilebilir, yaygın kullanım ve tecrübeye sahip
<b>Ön arıtma gereksinimi</b> Giriş suyundaki askıda katı madde, partiküler ve kolloidal maddeler, toplam çözünmüş katılar (TDS), organik maddeler vb. etkisi açısından	Yüksek seviyede ön arıtım gereksinimi	Orta seviyede ön arıtım gereksinimi	Düşük seviyede ön arıtım gereksinimi
<b>Yan ürün/metabolit oluşturma potansiyeli</b> Proseste yan ürün ya da daha toksik metabolitlerin oluşma potansiyeli açısından	Yan ürün ya da metabolit oluşumu söz konusu	Yan ürün/metabolit oluşumu söz konusu olabilir	Yan ürün/metabolit oluşumu söz konusu değil
<b>Prosesin kullanım uygunluğu</b> Yasal düzenlemeler, ithalat ve jeopolitik kısıtlar, yerel olarak sınırlı deneyimin bulunması açısından	En az 1 yıllık yerel deneyim ve sınırlı kullanım	Kısıtlama yok, ancak sınırlı yerel deneyim	Sınırlama yok ve yerel deneyim bulunmakta

### 3. Araştırma Bulguları

#### 3.1. Potansiyel arıtma alternatiflerinin değerlendirilmesi

##### 3.1.1. Adsorpsiyon prosesleri

Shokoohi vd. (2015) sulu çözülden PCP gideriminde NaOH kullanarak modifiye edilmiş *Phanerochaete chrysosporium fungus* biyokütlesini biyosorbent olarak kullanmışlardır. Yürüttükleri deneysel çalışmalarda PCP başlangıç konsantrasyonları, farklı pH koşulları ve temas süresi parametrelerinin biyosorpsiyon performansı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Maksimum giderim verimi, pH 3'de ve 120 dakika temas süresinde %73 olarak bulunmuştur. Ayrıca araştırmacılar asidik koşullarda kullanılan biyokütlenin hidronyum iyonları ile çevrilmesi sonucunda PCP adsorpsiyonunun arttığını gözlemlemişlerdir (Shokoohi vd. 2015). Benzer başka bir çalışmada, PCP'nin sucul ortamdan gideriminde NaOH ile modifiye edilmiş *Aspergillus niger* biyokütlesi üzerindeki biyosorpsiyonunu araştırılmıştır. Temas süresi, başlangıç konsantrasyonları ve pH değerlerinin biyosorpsiyon performansını etkilediği gözlemlenmiştir (Shokoohi vd. 2016). Sonuç olarak; başlangıç PCP konsantrasyonunun 10 mg/L'den 40 mg/L'ye çıkarılması ve adsorpsiyon kapasitesinin 4.23'ten 11.65 mg/g kadar artırılması sonucunda PCP giderim performansının %87'den %55'e düştüğü belirlenmiştir (Shokoohi vd. 2016). Bo vd. (2008)

sucul ortamdan fenolik kirleticilerin gideriminde mikrodalga destekli katalitik oksidasyon proseslerinin etkinliğini araştırmışlardır. Yürüttükleri deneysel çalışmalarda granüler aktif karbon destekli platin (Pt/GAC) katalizörleri mikrodalga ışınması kullanılarak hazırlanmışlar ve karakterize etmişlerdir. Deneysel çalışmalar sürekli akış modunda paketlenmiş yataklı bir reaktör vasıtasıyla 1454 mg/L PCP başlangıç konsantrasyonunda, 400 W mikrodalga gücünde, 6.4 ml/dk ve 120 ml/dk koşullarında gerçekleştirilmiştir. Pt/GAC prosesinde maksimum PCP giderim veriminin %90 seviyesinde olduğunu gözlemlenmiştir (Bo vd. 2008).

Devi ve Saroha (2014) kağıt fabrikası atık çamurundan sıfır değerli demir manyetik biochar kompozitleri (nZVI-MBC) sentezlemiş ve PCP içeren sentetik ve gerçek atıksuların arıtımında kullanmışlardır. Yürüttükleri çalışmalarda nZVI-MBC ile adsorpsiyon prosesinin atıksulardan PCP giderim performansının %73-99 arasında değiştiğini tespit etmişlerdir (Devi ve Saroha 2014). Estevinho vd. (2006) biyosorbent olarak badem kabukları kullanarak kesikli şartlarda gerçekleştirdikleri testlerde, 10 mg/L başlangıç konsantrasyonu, 10 g/L adsorbent dozu, pH 2, 4 mL/dk akış hızı ve 24 saat temas süresinde giderim veriminin %93-99 arasında değiştiğini belirlemişlerdir (Estevinho vd. 2006). Ayrıca desorpsiyon veriminin %7 olduğunu ve badem kabuğunun kontamine sulardan PCP'nin giderimi için

düşük maliyetli alternatif olabileceği sonucuna erişmişlerdir (Estevinho vd. 2008). Ezzatahmedi vd. (2017) kil destekli nano ölçekli sıfır valansız demir (nZVI)'nin PCP giderim etkinliğini değerlendirdikleri bir derleme çalışmasında, 0.05 mmol/L başlangıç konsantrasyonunda, pH 4'de ve 2 saatlik temas süresi sonunda PCP giderim veriminin %96 olduğunu belirtmişlerdir (Ezzatahmedi vd. 2017). Mathialagan vd. (2009) cansız *Aspergillus niger* biyokütlesi kullanılarak PCP'nin biyosorpsiyonunu incelemişlerdir. Otoklavlanmış ve kimyasal yöntemlerle geliştirilmiş biyokütlenin çeşitli formları, PCP'nin sulu çözeltilerden uzaklaştırılmasındaki performansları açısından test edilmiştir. Adsorban olarak, setiltrimetilammonium bromid (CTAB) kullanılarak 1 mg/L başlangıç PCP konsantrasyonunda, pH 3-6 arasında ve 6 saatlik temas süresi şartlarında yürütülen deneylerde PCP giderim veriminin %99 olduğunu gözlemlemişlerdir (Mathialagan vd. 2009).

### 3.1.2 Kimyasal oksidasyon ve ileri oksidasyon prosesleri

Ren vd. (2012) ozonun kütle transferi karakteristikleri ve PCP'nin ozonla oksidasyon performanslarını belirlemek üzere gerçekleştirdikleri deneysel çalışmalarda, yeni geliştirilen bir mikrokanal reaktörü kullanarak sucul ortamdaki PCP'nin %75'ini gidermeyi başarmışlardır (Ren vd. 2012). Cheng vd. (2015) sucul ortamdaki PCP gideriminde nZVI/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> kombine sisteminde Fenton katalizörü olarak nZVI kullanmışlardır. Başlangıç PCP konsantrasyonu 50 mg/L, pH 3-5 aralığında, 15 mg nZVI dozunda ve 60 dakika temas süresi sonrasında maksimum giderim veriminin %57 olduğunu gözlemlemişlerdir (Cheng vd. 2015). Ayrıca yürüttükleri deneysel çalışmalarda Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>'ün nZVI/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> sisteminde yüksek seviyede adsorpsiyon ve katalitik oksidasyon performanslarına sahip olduğunu rapor etmişlerdir. Bu sayede nZVI'nin proseste daha sonra yeniden kullanılabilmesini ifade etmişlerdir (Cheng vd. 2015).

Asgari vd. (2014) mikrodalga (MW)/sodyum persülfat (SPS) ve MW/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> proseslerinin sucul ortamdaki PCP giderim performanslarını incelemişlerdir. Başlangıç PCP konsantrasyonu 100 mg/L olan sentetik su örneklerinden pH 11'de, 0.02 mol/L SPS dozunda, 600 W güçte, 30 dakika temas süresi sonunda MW/SPS ve MW/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> proseslerinin maksimum PCP giderim verimlerinin sırasıyla %94 ve %87 olduğunu belirlemişlerdir (Asgari vd. 2014). Ayrıca deneysel sonuçlar, sülfat radikalinin hidroksil radikalinden daha güçlü olduğunu göstermiştir. Araştırmacılar, PCP giderimi sırasında MW/SPS yönteminin MW/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> yönteminden daha etkili olduğu sonucuna varmışlardır (Asgari vd. 2014).

Heidari vd. (2015) sucul ortamdaki PCP'nin eliminasyonu için elektro-Fenton prosesinin (EFP) performansı ile birlikte reaksiyon süresi, pH, uygulanan voltaj, elektrotlar arasındaki mesafenin giderim performansına etkilerini incelemişlerdir. Maksimum PCP giderim veriminin (%86) 3 cm elektrotlar arası mesafede, pH 3, 24 volt voltajda ve 40 dakika reaksiyon süresi şartlarında elde etmişlerdir (Heidari vd. 2015). Samarghandi vd. (2015) sucul ortamdaki PCP gideriminde UV/ZrO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> kombine proseslerinin etkinliğini incelemişlerdir. Yürüttükleri deneysel çalışmalarda; ultraviyole (UV) maruz kalma süresi, başlangıç PCP konsantrasyonu, pH, zirkonyum dioksit (ZrO<sub>2</sub>) nanopartikül konsantrasyonu ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonu gibi çeşitli parametrelerin PCP giderimindeki etkilerini de değerlendirmişlerdir. pH 6, 30 dakika temas süresi, 0.1 g/L nanopartikül konsantrasyonunda ve 14.7 mM/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonu koşullarında sucul ortamdaki PCP'nin tamamının giderilebildiğini rapor etmişlerdir (Samarghandi vd. 2015).

### 3.1.3 Membran filtrasyon prosesleri

Van der Bruggen vd. (2003) 5 µg/L başlangıç PCP konsantrasyonlarında sahip sentetik su örneklerinden nanofiltrasyon (NF) ve ters ozmos (RO) membranların giderim performanslarını araştırdıkları çalışmada giderim veriminin %98 olduğunu gözlemlemişlerdir (Van der Bruggen vd. 2003). Razak vd. (2007) 10 mg/L başlangıç PCP konsantrasyonunda, pH 6-7 arasında, 80-120 psi membran işletme basıncında, 13-24 L/m<sup>2</sup>.sa akı değerinde ve 30°C sıcaklık şartlarında RO membranların giderim performanslarını test etmişlerdir. Test koşullarında RO membranların PCP giderim verimlerinin %83-98 arasında değiştiğini belirlemişlerdir (Razak vd. 2007). Sanches vd. (2012) gerçek içme suyu, yeraltı suyu ve yüzeysel su numunelerinden PCP gideriminde NF membranların etkinliğini incelemişlerdir. PCP giderim veriminin 75 µg/L başlangıç PCP konsantrasyonu ve pH 8.2 deney koşullarında %57.5-83.5 arasında değiştiğini gözlemlemişlerdir (Sanches vd. 2012). Birçok araştırmacı tarafından membran filtrasyon proseslerinin (NF ve RO) PCP gibi öncelikli mikrokirleticilerin sucul ortamdaki gideriminde en etkili proseslerden biri olduğu ifade edilmiştir (Zolfaghari vd. 2014).

### 3.1.4 Diğer prosesler

Dionysiou vd. (2000), sürekli akışlı TiO<sub>2</sub> dönen disk fotokatalitik reaktörünün (RDPR) PCP giderim veriminin, 2.5-10 mg/L başlangıç konsantrasyonunda, 25 rpm açıl

hız, 250-350 saat bekleme süresi koşullarında, %90-94 arasında değiştiğini rapor etmişlerdir (Dionysiou vd. 2000). Tso ve Shih (2015) sucul ortamdan PCP gideriminde nZVI gibi nanopartiküller, Pd/Fe ve ultrasonikasyon/karıştırma sistemi kombinasyonundan oluşan bir prosesin etkinliğini incelemişlerdir. Sucul ortamda süspansiyon haldeki nZVI partiküllerinin PCP moleküllerini deklorize edememesine rağmen adsorbe edebileceği sonucuna varmışlardır. Yürütülen deneysel çalışmalarda, PCP'nin sınırlı bir şekilde uzaklaştırılmasını (yaklaşık %43) sağlayan karıştırma prosesi ile karşılaştırıldığında, Pd/Fe nanopartiküllerinin ultrasonikasyon (US) ve US/karıştırma sistemlerinde kullanılması durumunda sudan PCP'nin sırasıyla %81'ini ve %93'ünün giderebildiğini ifade etmişlerdir (Tso ve Shih 2015). Zhang vd. (2014) PCP'yi de içeren farklı öncelikli mikrokirleticilerin gideriminde killi kumlu-susuz bölge (LS-noSZ) ve kumlu-batık (S-SZ) biyofiltreler olmak üzere iki farklı tip biyofiltre konfigürasyonunun etkinliğini test etmişlerdir. LS-noSZ ve S-SZ biyofiltrelerinde PCP giderim verimleri sırasıyla >%80 ve %20-50 olduğunu rapor etmişlerdir (Zhang vd. 2014).

### 3.2 En iyi arıtma alternatiflerinin MCDM analiziyle belirlenmesi

Özellikle içme sularından PCP giderimine yönelik uygulanabilecek potansiyel arıtma alternatifleri literatür araştırmalarından ve uzman görüşlerinden de yararlanılarak GAC ile adsorpsiyon, ileri oksidasyon prosesleri (nZVI/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, UV/ZrO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) ve membran filtrasyon prosesleri (NF ve RO) olarak belirlenmiştir. PCP gideriminde yüksek giderim etkinliğine ve proses stabilitesi gibi özelliklere sahip olan bu prosesler tanımlanmış 18 değerlendirme kriterine göre MCDM kullanılarak analiz edilmiştir. Karar verme sürecinde her bir değerlendirme kriterinin kendi içerisinde farklı önceliklere sahip olması nedeniyle toplam 100 puan üzerinden KAM kullanılarak bir ağırlıklandırma yapılmıştır. Böylelikle değerlendirme kriterlerinin önceliklerinin de karar verme sürecine yansıtılması ve daha objektif bir değerlendirme yapılması sağlanmıştır. Her bir arıtma alternatifi tanımlanan 18 kriterine göre KAM ile ağırlıklandırılarak alternatif puanları belirlenmiştir. Belirlenen alternatif puanları kriter ağırlıkları ile çarpımıyla her bir kriter için potansiyel arıtma alternatifinin kriter puanları belirlenmiştir. Kriter puanları ATM ile toplanarak her bir potansiyel arıtma alternatifinin toplam öncelik puanları belirlenmiştir. Daha sonra toplam öncelik puanları BSM kullanılarak sıralanmış ve sonuçta en iyi arıtma alternatifi belirlenmiştir (Çizelge 2).

MCDM kullanılarak gerçekleştirilen analiz çalışmaları sonucunda içme sularından PCP gideriminde farklı adsorbentlerin (biyosorbentler, doğal ve novel adsorbentler) kullanıldığı adsorpsiyon proseslerinin yüksek giderim verimlerine sahip oldukları görülmüştür. Ancak tam ölçekli uygulamaların sınırlı olması, biyosorbentler ve doğal adsorbentlere erişimin sınırlı olması, çok az sayıda çalışmanın bulunması, adsorpsiyon işlemi sonrasında oluşan kontamine olmuş adsorbentlerin bertarafı ve yönetimi başlıca çekinceleri oluşturmaktadır. GAC ile adsorpsiyon proseslerinde ise PCP gideriminde %90'dan fazla giderim performansı göstermektedir (Wiles vd. 2005, Bo vd. 2008). Bununla birlikte GAC ile adsorpsiyon prosesleri günümüzde yaygın olarak kullanım alanına sahip, proses stabilitesine sahip, kolay tedarik imkanları bulunan, yüksek bakım ve işletim maliyetleri gerektirmeyen arıtma alternatiflerinden biridir. Bu nedenle sucul ortamdan PCP gideriminde bir arıtma alternatifi olarak değerlendirmeye alınmıştır. Ozonla oksidasyon prosesleri PCP gideriminde yaklaşık %75 bir giderim verimine sahip olmakla birlikte yüksek enerji maliyetlerine sahiptir. Bu nedenle sucul ortamdan PCP gideriminde etkili bir arıtma alternatifi olarak değerlendirilmemiştir. Yüksek PCP giderim verimleri (>%80) ve tekno-ekonomik uygulanabilirlikleri açısından nZVI/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, UV/ZrO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> gibi ileri oksidasyon prosesleri etkili arıtma alternatifleri olarak düşünülebilir. Bu proseslerde PCP gideriminde başlıca çekincelerden birini ön arıtım gereksinimine ihtiyaç duyulması oluşturmaktadır. Sucul ortamdan PCP gideriminde özellikle NF ve RO prosesleri yüksek (%80-98) giderim performanslarına sahiptir. Ayrıca membran filtrasyon prosesleri proses stabilitesine sahip olması, işletme kolaylığı, tam otomasyona sahip kurulum imkanlarının bulunması, teknolojiye erişimin kolay olması, yan ürün/metabolit oluşumunun bulunmaması ve operasyonel olarak diğer arıtma alternatiflerine göre daha az gereksinimlere ihtiyaç duyması açısından potansiyel bir arıtma alternatifi olarak değerlendirilmiştir.

Membran filtrasyon proseslerinin başlıca dezavantajları arasında hamsu karakterizasyonuna bağlı olarak bazı durumlarda ön arıtım ihtiyacının olabilmesi ve oluşan membran konsantrelerinin bertarafı sayılabilir. Ancak, özellikle içme suyu arıtma tesislerinde membran filtrasyon proseslerinin kullanılması düşünüldüğünde hacim azaltma tekniklerinin uygulanması veya oluşan konsantrelerinin hamsulara geri döndürülmesi sağlanabilir. Bu sayede oluşan membran konsantrelerinin bertarafı için ekstra bir maliyet söz konusu olmayabilir. Bununla birlikte

**Çizelge 2.** Potansiyel arıtma alternatiflerinin MCDM analiz sonuçları

Değerlendirme kriterleri	Kriter ağırlıkları	Potansiyel arıtma alternatifleri ve ağırlık puanları					
		Adsorpsiyon (GAC)		İleri oksidasyon prosesleri (nZVI/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , UV/ZrO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )		Membran filtrasyon prosesleri (NF ya da RO)	
		Ağırlık puanı	Kriter puanı	Ağırlık puanı	Kriter puanı	Ağırlık puanı	Kriter puanı
Giderim verimi (%)	11	3	33	2	22	3	33
Güvenirlilik ve dayanıklılık	6	2	12	2	12	3	18
Komplekslik	3	3	9	2	6	2	6
Planlanmış bakım gereksinimi	5	2	10	2	10	2	10
İşletim kolaylığı	5	2	10	3	15	3	15
Kurulum kolaylığı	4	3	12	2	8	3	12
Kimyasal gereksinimi	6	3	18	2	12	2	12
İşletim için gereklilikler ve tüketimler	7	2	14	2	14	3	21
Uygulamadaki tecrübe	6	3	18	2	12	3	18
Atık oluşumu	5	3	15	3	15	3	15
Atıkların/konsantrelerin arıtımı ve yönetimi	5	2	10	3	15	2	10
Su kayıpları	5	3	15	3	15	2	10
Arıtılmış su kalitesi güvenliği	6	2	12	2	12	3	18
Faydalı kullanım ömrü	4	2	8	2	8	2	8
Teknolojinin varlığı ve tasarımın gelişmişlik seviyesi	5	3	15	3	15	3	15
Ön arıtma gereksinimi	5	2	10	1	5	1	5
Yan ürün veya metabolit oluşturma potansiyeli	6	3	18	2	12	3	18
Prosesin kullanım uygunluğu	6	2	12	2	12	2	12
<b>Toplam kriter ağırlık puanı</b>	<b>100</b>						
<b>Toplam öncelik puanı</b>			<b>251</b>		<b>220</b>		<b>256</b>
<b>Öncelik sıralaması</b>			<b>2</b>		<b>3</b>		<b>1</b>

membran konsantrelerindeki PCP konsantrasyonları GAC ile adsorpsiyon ve hibrit prosesler kullanılarak giderilebilir. Bu durumda ise ekstra yatırım maliyetleri gerekli olabilmektedir. Ayrıca membran filtrasyon prosesleri sadece PCP gideriminde değil diğer mikrokirleticilerin gideriminde de oldukça etkili sonuçlar göstermektedir. Bu nedenle içme suyu arıtma tesislerinin mikrokirletici giderimine yönelik modernize edilmesinin gerekli olduğu durumlarda membran filtrasyon prosesleri (NF ve RO) en iyi arıtma alternatifi olarak değerlendirilebilir.

#### 4. Sonuçlar ve Tartışma

Yürütülen bu çalışmada çevre ve insan sağlığı üzerindeki toksik etkileri nedeniyle öncelikli kirleticilerden biri olarak sınıflandırılan PCP'nin içme sularından uzaklaştırılmasında kullanılabilinecek en iyi arıtma alternatifi MCDM'dan yararlanılarak belirlenmiştir. En iyi arıtma alternatifinin belirlenmesi sürecinde KAM, ATM ve BSM metotlarının bir kombinasyonu kullanılmıştır. Çalışma kapsamında öncelikle sucul ortamlardan PCP'nin giderimine yönelik gerçekleştirilmiş bilimsel çalışmalardan yararlanılarak potansiyel arıtma alternatifleri belirlenmiştir. Daha sonra



tanımlanan 18 değerlendirme kriterine göre literatürdeki benzer çalışma verilerinden ve uzman görüşlerinden de yararlanılarak kapsamlı ve sistematik bir değerlendirme yapılmıştır. Sonuçta membran filtrasyon proseslerinin (NF ve RO) yüksek giderim performanslarına sahip olması, kolay kurulum, işletim ve bakım kolaylığı, kimyasal gereksiniminin az olması, yaygın kullanıma sahip olması ve oturmuş bir teknoloji olması, arıtılmış su kalitesinin yüksek olması, yan ürün ya da daha toksik metabolitlerin oluşmaması gibi avantajlara sahip olması en iyi arıtma alternatifini olarak belirlenmiştir. Membran filtrasyon proseslerinin başlıca dezavantajları arasında ise ön arıtım gereksinimi, oluşan konsantrelerin bertarafı ve yüksek maliyetler gelmektedir. Ancak içme suyu arıtımında konvansiyonel arıtma sonrasında NF ve RO membranların değerlendirilmesi durumunda ön arıtım gereksinimi ortadan kalkmaktadır. Ayrıca oluşan konsantreler için hacim azaltma teknikleri kullanılarak bertaraf sorunları ortadan kaldırılabilir. İlk yatırım ve işletme maliyetleri açısından bakıldığında ise membran filtrasyon prosesleri sadece PCP gideriminde değil su kaynaklarında bulunan diğer mikrokirleticilerin gideriminde de yüksek giderim performanslarına sahiptir. Dolayısı ile diğer arıtma alternatifleri ile karşılaştırıldığında birim kirletici yükü başına giderim maliyetleri göz önünde bulundurulduğunda daha fizibil olduğu sonucuna erişilebilir.

## 5. Kaynaklar

- Abhilash, PC., Singh N. 2009.** Pesticide use and application: An Indian scenario. *J. Hazard. Mater.*, 165:1-12.
- Agency of Natural Resources (ANR) 2015.** Pentachlorophenol Report, Response to PSB Docket 8310, October 2015, Final Draft for Public Comment.
- Aruldoss, M., Lakshmi, M., Venkatesan, VP. 2013.** Survey on Multi Criteria Decision Making Methods and Its Applications. *Am. J. Inf. Syst.*, 1:31-43.
- Asgari, G., Seidmohammadi, A., Chavoshani, A. 2014.** Pentachlorophenol removal from aqueous solutions by microwave/persulfate and microwave/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: A comparative kinetic study. *J. Environ. Health Sci. Eng.*, 12:87-94.
- Bo, L., Quan, X., Wang, X., Chen, S. 2008.** Preparation and characteristics of carbon-supported platinum catalyst and its application in the removal of phenolic pollutants in aqueous solution by microwave-assisted catalytic oxidation. *J. Hazard. Mater.*, 157:179-186.
- Borysiewicz, M., Kolsut, W. 2002.** Preliminary Risk Profile Pentachlorophenol, Institute of Environmental Protection, Warsaw, Poland.
- Bosso, L. 2014.** Fungi in pentachlorophenol adsorption and degradation: novel bioremediation and biotechnological tools. *PhD Thesis*, University of Naples Federico II Department of Agriculture, Chile in Environmental Resources Sciences, 176 pp.
- Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME) 1997.** Canadian soil quality guidelines for pentachlorophenol: environmental and human health, Winnipeg Manitoba, Canada, ISBN:0-662-25521-6.
- Cheng, R., Chen, C., Liu, G., Zheng, X., Li, G., Li, J. 2015.** Removing pentachlorophenol from water using a nanoscale zero-valent iron/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> system. *Chemosphere*, 141:138-143.
- Deng, S., Ma, R., Yu, Q., Huang, J., Yu, G. 2009.** Enhanced removal of pentachlorophenol and 2,4-D from aqueous solution by an aminated biosorbent. *J. Hazard. Mater.*, 165:408-414.
- Devi, P., Saroha, AK. 2014.** Synthesis of the magnetic biochar composites for use as an adsorbent for the removal of pentachlorophenol from the effluent. *Bioresour. Technol.*, 169:525-531.
- Diagboya, PN., Olu-Owolabi, BI., Adebowale, KO. 2014.** Microscale scavenging of pentachlorophenol in water using amine and triphosphosphate-grafted SBA-15 silica: Batch and modeling studies. *J. Environ. Manage.*, 146:42-49.
- Dionysiou, DD., Khodadoust, AP., Kern, AM., Suidan, MT., Baudin, I., Laine, JM. 2000.** Continuous-mode photocatalytic degradation of chlorinated phenols and pesticides in water using a bench-scale TiO<sub>2</sub> rotating disk reactor. *Appl. Catal. B.*, 24:139-155.
- Estevinho, BN., Ratola, N., Alves, A., Santos, L. 2006.** Pentachlorophenol removal from aqueous matrices by sorption with almond shell residues. *J. Hazard. Mater.*, 137:1175-1181.
- Estevinho, BN., Riberio, E., Alves, A., Santos, L. 2008.** A preliminary feasibility study for pentachlorophenol column sorption by almond shell residues. *Chem. Eng. J.*, 136:188-194.
- European Commission (EC) 2000.** Water Frame Work Directive (2000/60/EC), European Parliament and Council establishing a framework for the community action in the field of water policy. Available from: <http://ec.europa.eu>
- Ezzatahmedi, N., Ayoko, GA., Millar, GJ., Speight, R., Yan, C., Li, J., Li, S., Zhu, J., Xi, Y. 2017.** Clay-supported nanoscale zero-valent iron composite materials for the remediation of contaminated aqueous solutions: A review. *Chem. Eng. J.*, 312:336-350.
- Heidari, Z., Motevasel, M., Jaafarzadeh, NA. 2015.** Application of electro-fenton (EF) process to the removal of pentachlorophenol from aqueous solutions. *Iranian J. Sci. Technol.*, 4:76-87.

- Kim, EY., Choi, YJ., Chae, HJ., Chu, KH. 2006.** Removal of aqueous pentachlorophenol by horseradish peroxidase in the presence of surfactants. *Biotechnol. Bioprocess Eng.*, 11:462-465.
- Lattemann, S. 2010.** Development of an environmental impact assessment and decision support system for seawater desalination plants, CRC Press, Taylor and Francis Group, USA, New York, 288 pp.
- Mathialangan, T., Viraraghavan, T. 2009.** Biosorption of pentachlorophenol from aqueous solutions by a fungal biomass. *Bioresour. Technol.*, 100:549-558.
- Petrescu, CM., Stana, I., Mihali, CV., Turcuş, V., Bratosin, D. 2016.** Flow cytometric and microscopic analysis of green alga *Chlorella fusca* exposed to pentachlorophenol. *Res. J. Agric. Sci.*, 48:121-129.
- Razak, ARA., Ujang, Z., Ozaki, H. 2007.** Removal of endocrine disrupting chemicals (EDCs) using low pressure reverse osmosis membrane (LPROM). *Water Sci. Technol.*, 56:161-168.
- Ren, J., He, S., Ye, C., Chen, G., Sun, C. 2012.** The ozone mass transfer characteristics and ozonation of pentachlorophenol in a novel microchannel reactor. *Chem. Eng. J.*, 210:374-384.
- Rubilar, O., Diez, MC., Gianfreda, L. 2008.** Transformation of chlorinated phenolic compounds by white rot fungi. *Crit. Rev. Env. Sci. Tec.*, 38:227-268.
- Ruder, AM., Yiin, JH. 2011.** Mortality of US pentachlorophenol production workers through 2005. *Chemosphere*, 83:851-861.
- Samarghandi, MR., Rahmani, AR., Samadi, MT., Kiamanesh, M., Azarian, G. 2015.** Degradation of pentachlorophenol in aqueous solution by the UV/ZrO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> photocatalytic process. *Avicenna J. Environ Health Eng.*, 2:1-6.
- Sanches, S., Penetra, A., Rodrigues, A., Ferreira, E., Cardoso, VV., Benoliel, MJ., Crespo MTB., Pereira, VJ., Crespo, J.G. 2012.** Nanofiltration of hormones and pesticides in different real drinking water sources. *Sep. Purif. Technol.*, 94:44-53.
- Shokoohi, R., Azizi, S., Ghiasian, SA., Poormohammadi, A. 2016.** Biosorption of pentachlorophenol from aqueous solutions by *Aspergillus Niger* biomass. *Iranian J. Toxicol.*, 10:33-39.
- Shokoohi, R., Azizi, S., Poormohammadi, A., Panahi, F. 2015.** Study of pentachlorophenol biosorption by phanerochaete *Chrysosporium* biomass: kinetics and adsorption isotherms modeling. *Pharm. Lett.*, 7:59-65.
- Singh, H. 2006.** Mycoremediation: fungal bioremediation, John Wiley & Sons, New Jersey, USA, 592 pp.
- Suegara, J., Lee, BD., Espino, MP., Nakai, S., Hosomi, M. 2005.** Photodegradation of pentachlorophenol and its degradation pathways predicted using density functional theory. *Chemosphere*, 61:341-346.
- Tan, D., Zhang, J. 2008.** Estimates of PCP-Na consumption in districts and provinces in China by the top-down calculation method. *Environ. Pollut. Contr.*, 30:17-20.
- Tso, C., Shih, Y. 2014.** The reactivity of well-dispersed zerovalent iron nanoparticles toward pentachlorophenol in water. *Water Res.*, 72:372-380.
- United States Department of Health and Human Services Public Health Service (USDHHS) 2001.** Toxicological profile for pentachlorophenol, agency for toxic substances and disease registry, September.
- Van der Bruggen, B., Vandecasteele, C. 2003.** Removal of pollutants from surface water and groundwater by nanofiltration: overview of possible applications in the drinking water industry. *Environ. Pollut.*, 122:435-445.
- Velasquez, M., Hester, PT. 2013.** An analysis of multi-criteria decision making methods. *Int. J. Oper. Res.*, 10:56-66.
- Wiles, MC., Huebner, HJ., McDonald, TJ., Donnelly, KC., Phillips, TD. 2005.** Matrix-immobilized organoclay for the sorption of polycyclic aromatic hydrocarbons and pentachlorophenol from groundwater. *Chemosphere*, 59:1455-1464.
- Yerüstü Su Kaynakları Yönetmeliği (YSKY), 2012.** Yerüstü Su Kaynakları Yönetmeliği. 28483 Sayılı Resmi Gazete.
- Yerüstü Su Kaynakları Yönetmeliği (YSKY), 2016.** Yerüstü Su Kaynakları Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik. 29797 Sayılı Resmi Gazete.
- Zhang, K., Randelovic, A., Page, D., McCarthy, DT., Deletic, A. 2014.** The validation of stormwater biofilters for micropollutant removal using in situ challenge tests. *Ecol. Eng.*, 67:1-10.
- Zolfaghari, M., Drogui, P., Seyhi, B., Brar, SK., Buelna, G., Dube, R. 2014.** Occurrence, fate and effects of di (2-ethylhexyl) phthalate in wastewater treatment plants: A review. *Environ. Pollut.*, 194:281-293.