

KENTSEL BİR BÖLGEDE ATMOSFERİK PCDD/F KONSANTRASYONLARI KULLANILARAK TOPRAK VE SUCUL ORTAMLARDAKİ SEVİYELERİNİN TAHMİN EDİLMESİ

Berke GÜLEĞEN *
Abdul Alim NOORİ **
Yücel TAŞDEMİR ***

Alınma: 30.04.2025 ; düzeltme: 26.06.2025 ; kabul: 27.06.2025

Öz: Poliklorlu dibenzo-p-dioksinler ve dibenzofuranlar (PCDD/F'ler) Stokholm Sözleşmesi'nin EK-C kısmında listelenmiş, insan ve çevre sağlığı açısından önemli risk teşkil eden kalıcı organik kirleticilerdendir. PCDD/F'ler kaynaktan salındıktan sonra atmosferik çökeltme ve dağılım mekanizmaları ile toprak ve su ortamına karışabilmektedirler. Biyolojik olarak zor bozunabilme özellikleri sayesinde bu ortamlarda yaygın olarak bulunabilmekte ve farklı canlı ve ortamlara taşınabilmektedirler. PCDD/F'lerin farklı ortamlardaki konsantrasyon seviyelerinin belirlenmesi bu kirleticilerin davranış mekanizmalarının anlaşılması açısından önem taşımaktadır. Türkiye'de toprak ortamı için oldukça az sayıda ölçüm verisi bildirilmiş olup sucul ortam için bildirilen herhangi bir veri bulunmamaktadır. Bu çalışmada Bursa şehrinin kentsel bir bölgesinde dört mevsimi kapsayacak şekilde ölçümü yapılmış olan atmosferik PCDD/F konsantrasyonları kullanılarak çeşitli denge durumu eşitlikleri yardımı ile toprak ve sucul ortamlardaki PCDD/F konsantrasyon seviyelerinin araştırılması amaçlanmıştır. Buna göre toprak ve sucul ortam için hesaplanan ortalama PCDD/F konsantrasyonlarının sırasıyla $702,74 \pm 553,74$ pg/g ($21,14 \pm 13,41$ pg TEQ/g) ve $0,8 \pm 0,61$ pg/L ($0,12 \pm 0,08$ pg TEQ/L) olduğu belirlenmiştir. Bu değerlerin literatürde bildirilen çeşitli çalışmalar ile uyum içinde olduğu görülmüştür. En yüksek konsantrasyon değerleri iki ortam için de kış ayları için hesaplanmış, mevsimsel etkinin konsantrasyon seviyeleri üzerindeki etkisi açıkça gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dioksin, dağılım katsayısı, denge durumu, Henry yasası, su, toprak

Estimation of PCDD/F Levels in Soil and Aquatic Environments Using the Atmospheric Concentrations in an Urban Site

Abstract: Polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans (PCDD/Fs) are persistent organic pollutants listed in Annex C of the Stockholm Convention, which pose a significant risk to public and environmental health. PCDD/Fs, after being released from the source, can enter the soil and water environment through atmospheric deposition and partition mechanisms. Due to their characteristic of difficult biodegradability, they can be widely found in these environments and can be transported to different living organisms and environments. Determination of the concentration levels of PCDD/Fs in different environments is important for understanding the behavioural mechanisms of these pollutants. In Türkiye, few measurement data have been reported for the soil environment, and currently, there is no data reported for the aquatic environment. In this study, it was aimed to investigate the PCDD/F concentration

* Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 16059, Nilüfer, Bursa, Türkiye

** Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 16059, Nilüfer, Bursa, Türkiye

***Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 16059, Nilüfer, Bursa, Türkiye
İletişim Yazarı: Yücel TAŞDEMİR (tasdemir@uludag.edu.tr)

levels in soil and aquatic environments by using atmospheric PCDD/F concentrations measured over four seasons in an urban area of Bursa city by means of various equilibrium equations. Accordingly, the mean total PCDD/F concentrations estimated for soil and aquatic environment were 702.74 ± 553.74 pg/g (21.14 ± 13.41 pg TEQ/g) and 0.8 ± 0.61 pg/L (0.12 ± 0.08 pg TEQ/L), respectively. These values were found to be in agreement with various studies reported in the literature. The highest concentration values were estimated in winter months for both environments, and the effect of seasonal effect on concentration levels was clearly observed.

Keywords: Dioxin, partition coefficient, equilibrium state, Henry's law, water, soil

1. GİRİŞ

Poliklorlu dibenzo-p-dioksinler ve dibenzofuranlar (PCDD/F'ler) Stokholm Sözleşmesi kapsamında listelenen kalıcı organik kirleticilerdir (KOK'lar) (Cho ve diğ., 2024). PCDD/F'ler, düşük buhar basınçları, yüksek oktanol-su dağılım katsayıları ile polar olmayan ve hidrofobik yapıları ile karakterize edilmektedir (Tran ve diğ., 2022). Çevresel olarak yüksek kararlılık gösterme ve yüksek oranda lipofilik özelliklerinden dolayı çevresel ortamlarda ve organizmalarda yavaş bozunma ve dağılım sergilerler (Yu ve diğ., 2023). PCDD/F'lerin çevreye yayılımı atmosfere gaz emisyonlarının salınımları ile gerçekleşmektedir. Bu emisyonlar daha sonra hem kısa hem de uzun mesafelere taşınmakta, kuru ve ıslak atmosferik çökeltme yoluyla toprağa ve suya karışabilmektedirler (Lei ve diğ., 2024). Çevresel kalıcılık ve uzun mesafeli taşıma özellikleri nedeniyle, PCDD/F'ler su, atmosfer, sediment ve toprak gibi çeşitli çevresel örneklerde yaygın olarak bulunmaktadır (Liu ve diğ., 2024; Lohmann ve diğ., 2023; Pajurek ve diğ., 2023).

Atık yakma, odun yakma, ev yangınları, araç emisyonları, demir-çelik endüstrileri, kağıt ve odun hamurunun klorla ağartılması, kimyasal metalürji ve çimento üretimi gibi işlemler PCDD/F'lerin esas kaynaklarını oluşturmaktadır (Liang ve diğ., 2025; Yu ve diğ., 2024). Volkanik patlamalar, orman yangınları ve doğal yanmalar gibi doğal olaylar sonucunda da atmosfere PCDD/F salınımı gerçekleşebilmektedir (Tran ve diğ., 2024). Ancak, bu doğal kaynaklar insan faaliyetlerine kıyasla atmosferdeki PCDD/F kirliliğine nispeten küçük miktarlarda katkıda bulunmaktadır.

Çevredeki PCDD/F konsantrasyonları genel olarak ultra-iz seviyelerinde bulunsa da lipofilik yapıları, yağ dokularında birikmelerine ve ardından besin zincirinde biyolojik olarak çoğalmalarına ve nihayetinde insan vücuduna ulaşmalarına neden olmaktadır (Rao ve diğ., 2022; X. Wang ve diğ., 2024). İnsanlar PCDD/F'lara solunum, sindirim sistemi ve deri teması gibi çeşitli yollar vasıtasıyla maruz kalabilmektedirler (Khouri ve diğ., 2023). Esas olarak insanların karaciğer ve yağ dokularında biriken PCDD/F'ler üreme, sinir ve bağışıklık sistemleri ile birlikte karaciğer fonksiyonları üzerindeki toksik etkileri ve gelişim bozukluklarına sebep olmaları nedeniyle özellikle endişe oluşturmaktadır (Liang ve diğ., 2024; Tang ve diğ., 2024).

PCDD/F'ler, 135'i PCDF ve 75'i PCDD olmak üzere 210 farklı türe sahip olup bunlardan sadece 2,3,7,8 pozisyonlarında klor içerenlerin organizmalar üzerinde toksik etkileri olduğu bildirilmiştir (Güzel ve diğ., 2024). PCDD/F'lerin toksisiteleri üzerinden sağlık risk değerlendirmesi yapabilmek adına toksik eşdeğerlik faktörü (TEF) kavramı geliştirilmiştir. En yüksek toksik özellik gösteren 10 PCDD ve 7 PCDF türüne Dünya Sağlık Örgütü (WHO) ve Kuzey Atlantik Antlaşması Örgütü (NATO) tarafından toksik eşdeğerlik faktörleri (TEF'ler) atanmıştır (DeVito ve diğ., 2024). PCDD/F analizlerinde genellikle bu türler üzerinden bir değerlendirme yapılmaktadır. Ölçülen konsantrasyonlar ile TEF değerlerinin çarpılması yolu ile konsantrasyonlar toksik eşdeğerlik (TEQ) cinsinden ifade edilebilmektedir.

Bu çalışmada Bursa'nın kentsel bir bölgesinde bir yılı kapsayacak şekilde ölçümü yapılmış olan ortam havası PCDD/F konsantrasyonları üzerinden çeşitli eşitlikler yardımı ile denge durumunda toprak ve su ortamındaki PCDD/F seviyelerinin araştırılması amaçlanmıştır. Türkiye'de toprak ortamındaki PCDD/F seviyelerini bildiren çalışma sayısı oldukça az olup, su ortamındaki PCDD/F seviyelerini bildiren herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Bu açıdan bu

çalışma ile PCDD/F'lerin bu ortamlardaki tahmin edilen seviyeleri üzerinden yapılacak olan değerlendirmenin önemli olduğu düşünülmektedir. Çalışmanın temel amaçları (i) Bursa şehrinin kentsel özellikteki bir bölgesi için toprak ve su ortamındaki denge durumu PCDD/F seviyelerinin tahmin edilmesi, (ii) PCDD/F'lerin bu ortamlardaki mevsimsel değişiminin incelenmesi (iii) PCDD/F tür profilinin araştırılması şeklinde sıralanmaktadır.

2. MATERYAL ve YÖNTEM

2.1. Örneklememe İşlemi ve Örneklememe Bölgesi

Haziran 2022 ile Haziran 2023 tarihleri arasında Bursa'nın kentsel bir bölgesinde (TÜBİTAK Bursa Test ve Analiz Laboratuvarı bahçesi) PCDD/F atmosferik konsantrasyon ölçümü yapılmıştır. Örneklememe ile ilgili detaylı bilgi başka bir çalışmada verilmiştir (Gülegen ve diğ., 2024). Kısaca özetlemek gerekirse: örneklememe ~2,5 metre yüksekliğe sahip bir platform üzerinde yüksek hacimli hava örnekleyici kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Cihaz ayda bir kere olmak üzere ~2 gün boyunca çalıştırılmış, gaz fazındaki PCDD/F'lerin örneklenbilmesi amacı ile poliüretan köpük (2 adet), partikül fazındaki PCDD/F'lerin örneklenbilmesi amacı ile ise cam elyaf filtre (1 adet) kullanılmıştır. Örneklememe noktası şehir merkezine ~2 km mesafede bulunmaktadır. Ayrıca örneklememe noktasının hemen yanında trafiğin yoğun olduğu bir karayolu mevcuttur.

2.2. Laboratuvar İşlemleri

Alınan örnekler PCDD/F analizi konusunda akredite olan bir laboratuvara gönderilmiştir. Tüm laboratuvar işlemleri ve yüksek çözünürlüklü kütle spektrometresi ile birleştirilmiş gaz kromatografisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir (GC-HRMS) okumaları bu laboratuvar tarafından yapılmıştır. Aşağıda bu kısımlar özetlenmiştir: Örneklememe işlemi tamamlandıktan sonra örneklerin ekstraksiyonu amacıyla basınçlı sıvı ekstraksiyon (PLE) ekipmanı kullanılmıştır. Ekstraksiyon işlemine başlamadan çalışma veriminin belirlenmesi amacıyla örnekler 100 µL'lik ¹³C₁₂-PCDD/F (99%) verim standardı eklenmiştir. Ekstraksiyon işlemi tamamlandıktan sonra örnek hacimleri azot gazı kullanılarak 0,5 mL'ye kadar buharlaştırılmış, 5 mL'lik hekzan 3 tekrarlı olacak şekilde kullanılarak yıkama işlemi gerçekleştirildikten sonra örnek hacmi tekrar 0,5 mL'ye düşürülmüştür. Bir sonraki analiz adımı olan temizleme işlemi, PLE Cleanup cihazı kullanılarak yapılmıştır. Bu işlemden önce örnekler, 1 mL'lik hekzan kullanılarak 3 tekrar ile ultrasonik yıkamaya tabi tutulmuş, son hacim 12 mL olacak şekilde işlem yapılmıştır. PLE Cleanup cihazı kullanılarak yapılan temizleme işlemi 5 farklı solvent karışım hattı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İşlem sırasında örnekler sırasıyla silika jel AP-145, alümina LP-121 ve karbon CP-120 kitlerinden geçirilmiştir. Karbon ile tutulumu gerçekleştirilen PCDD/F'ler solventler vasıtasıyla başka bir şişeye aktarılmıştır. Daha sonra 5 mL'lik hekzan ile yıkama işlemi (3 tekrarlı) gerçekleştirilmiş, azot gazı ile kuruluğa kadar uçurma yapılmıştır.

PCDD/F okumaları, yüksek çözünürlüklü kütle spektrometresi ile birleştirilmiş gaz kromatografisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir (GC-HRMS). GC-HRMS analizi USEPA 1613 yöntemine göre yapılmıştır. Analize başlamadan önce örnekler 30 µL'lik hacim düzeltme standardı eklenmiştir. Bu standardın içeriğini ¹³C₁₂-1,2,3,4-TCDD ve ¹³C₁₂-1,2,3,7,8,9-HxCDD bileşikleridir oluşturmaktadır. Analiz için programlanabilir sıcaklık buharlaştırma (PTV) girişi ile donatılmış bir Agilent 7890B gaz kromatografisi ve maksimum 80000 çözünürlüğe sahip bir Micromass Autospec Ultima-NT kütle spektrometresi (Waters, İngiltere) kullanılmıştır. Doğrusallığı elde edebilmek amacıyla 0,5; 2; 10; 40; 200 pg/mL şeklinde beş farklı konsantrasyon düzeyine dayalı bir kalibrasyon eğrisi oluşturulmuştur. Her bileşen için, kalibrasyon eğrisinin r² değeri 0,99'dan büyük olarak tespit edilmiştir. Her numune okuması için, orta seviyeli kalibrasyon standardı örneklerle birlikte okutulmuş, böylece cihazın performansının kontrolü sağlanmıştır. Her bir numuneden GC-HRMS'e 1 µL'lik enjekte edilmiştir. Hedef bileşiklerin ayrıştırılması, sıcaklık programlamalı bir Agilent DB5-MS kapiler kolon (60 m x 0,25 mm x 0,25

µm) kullanılarak yapılmıştır. Helyum gazı, (%99,999 saflıkta, 25 PSI sabit basınçta) taşıyıcı gaz olarak kullanılmıştır. Temizleme işlemi (Purge), enjektörün splitless modunda 2 dakika boyunca 280 °C’de çalıştırılması ile gerçekleştirilmiştir. Fırın ilk olarak 110 °C sıcaklıkla çalıştırılmıştır, daha sonra sıcaklık 220 °C’ye yükseltilmiş (15 °C/dakika hızla) ve 10,67 dakikaya kadar sabit tutulmuştur. Daha sonra sıcaklık 240 °C’ye yükseltilmiş (1,5 °C/dk hızında) ve 2 dakika sabit tutulmuştur. Son olarak sıcaklık 4 °C/dk hızında 310 °C’ye yükseltilmiştir. Çıkış süreleri, hedef ve niteleyici iyonlara göre hedef PCDD/F’lerin tanımlanması gerçekleştirilmiştir. PCDD/F bileşiklerinin ölçüm değerlerinin elde edilmesinde verim standart kalibrasyonu kullanılmıştır.

2.3. Kalite Kontrolü / Kalite Güvencesi

Numune alma sürecinde meydana gelebilecek kirlenmelerin mevcudiyetini belirleyebilmek amacıyla 5 adet şahit numunesi alınmıştır. Şahit poliüretan köpük ve filtreler alüminyum folyoya sarılmış ve kapalı bir şişeye konulmuş, bu halde örnekleme noktasına götürülmüş ve cihaza takılmıştır. Beş dakika kadar bekletildikten sonra tekrar alüminyum folyoya sarılmış ve kapalı bir şişe içine konulup laboratuvara getirilmiştir. Bu örneklerle de gerçek örneklerle uygulanan analiz prosesi uygulanmıştır.

En düşük standart kalibrasyon eğrisinde sinyal/gürültü oranının 3 olduğu bir tepe noktası alanı kullanılmış ve böylelikle Cihaz belirleme limiti (IDL) belirlenmiştir. 1 µL enjeksiyon için elde edilen PCDD/F bileşenlerinin ortalama IDL değeri yaklaşık toplam PCDD/F’ler için 0,35 pg olarak bulunmuştur. Çalışma kapsamında sadece IDL seviyesinin üstünde yer alan değerler rapor edilmiştir. Tespit limit değeri (LOD), her bir PCDD/F bileşeni için belirlenmiştir. LOD değerleri, ortalama şahit kütleleri artı üç standart sapma işlemi yapılarak hesaplanmıştır. Numunelerde LOD’u aşan PCDD/F miktarları dikkate alınmıştır. Numunelerdeki miktarlardan ortalama şahit miktarları çıkarılarak şahit düzeltmesi yapılmıştır. LOD değerleri, toplam kütlenin %0,2 ile 5,42 arasında değişim göstermiştir. ¹³C etiketli PCDD/F’ler için bulunan geri kazanım oranları %50 ile %130 arasında değişerek standart yöntemin kriterlerini karşılamıştır.

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

3.1. $\sum_{17}$ PCDD/F Konsantrasyon Seviyeleri

3.1.1. Hava Ortamı

Ölçülen atmosferik PCDD/F konsantrasyonları hakkında detaylı bilgi başka bir çalışmada verilmiştir (Güleğen ve diğ., 2024). Kısaca özetlemek gerekirse: Gaz fazlı atmosferik toplam PCDD/F ($\sum_{17}$ PCDD/F) konsantrasyonları 0,07 pg/m³ (Kasım/2022) ile 0,14 pg/m³ (Nisan/2023) arasında değişim göstermiştir. Ortalama $\sum_{17}$ PCDD/F konsantrasyonu ise 0,11±0,02 pg/m³ olarak bulunmuştur. Yaz mevsimi için aylık ortalama $\sum_{17}$ PCDD/F konsantrasyonunun 0,10±0,0 pg/m³, kış mevsimi için ise 0,11±0,02 pg/m³ olduğu belirlenmiştir. $\sum_{17}$ PCDD/F konsantrasyonları TEQ cinsinden de hesaplanmıştır. TEQ değerlerinin hesaplanmasında, WHO tarafından 2005 yılında bildirilen TEF değerleri kullanılmıştır (Van den Berg ve diğ., 2006). Buna göre en düşük konsantrasyon 0,01 pg TEQ/m³ olarak Kasım/2022 tarihli örneklemede, en yüksek konsantrasyon ise 0,04 pg TEQ/m³ olarak Haziran/2022 tarihli örneklemede ölçülmüştür. Ortalama $\sum_{17}$ PCDD/F konsantrasyonunun ise 0,02±0,01 pg TEQ/m³ olduğu belirlenmiştir. Partikül faz $\sum_{17}$ PCDD/F konsantrasyonları 0,19 pg/m³ (Haziran/2022) ile 0,73 pg/m³ (Ocak/2023) arasında değişim göstermiş (ortalama: 0,44±0,16 pg/m³) olup, TEQ konsantrasyonlarının ise 0,01 pg TEQ/m³ (Ağustos/2022) ile 0,03 pg TEQ/m³ (Nisan/2023) arasında değiştiği (ortalama: 0,02±0,0 pg TEQ/m³) görülmüştür.

3.1.2. Toprak Ortamı

PCDD/F'lerin toprak ile hava arasındaki geçişleri bu bileşiklerin davranış ve taşınım mekanizmalarının araştırılmasında oldukça önemli bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, toprak-hava dağılım katsayısı (K_{SA}), yarı uçucu organik bileşiklerin bu ortamlar arasındaki dağılımını tahmin etmek için güvenilir bir araç olarak kullanılmaktadır (Caliskan ve diğ., 2025; Hippelein ve McLachlan, 1998):

$$K_{SA} = 0,411 \times \rho_s \times f_{oc} \times K_{OA} \quad (1)$$

Bu denklemde, ρ_s toprağın yoğunluğunu (1,53 kg/L), f_{oc} kuru topraktaki organik karbon oranını (0,02) ve K_{OA} oktanol-hava dağılım katsayısını ifade etmektedir. K_{OA} değeri aşağıdaki eşitlik yardımı ile hesaplanmaktadır (Harner ve diğ., 2000):

$$\log K_{OA} = a' + (b' \times RTI) \quad (2)$$

$$\text{grup 1 için: } a' = \frac{1672}{T} - 2,98 \text{ ve } b' = \frac{0,857}{T} + 7E-5 \quad (3)$$

$$\text{grup 2 için: } a' = \frac{986}{T} + 0,55 \text{ ve } b' = \frac{1,714}{T} - 0,0032 \quad (4)$$

Burada 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD, OCDD, 1,2,3,4,6,7,8-HpCDF, 1,2,3,4,7,8,9-HpCDF ve OCDF türleri grup 1 içinde, kalan diğer türler ise grup 2 içinde sınıflandırılmaktadır.

K_{SA} basitçe aşağıdaki şekilde de ifade edilmektedir (Demircioglu ve diğ., 2011; Yukhimets ve diğ., 2020):

$$K_{SA} = \frac{C_s \times \rho_s}{C_A} \quad (5)$$

Bu denklemde C_s topraktaki PCDD/F konsantrasyonunu (pg/g), C_g ise ölçülen gaz fazındaki atmosferik PCDD/F konsantrasyonunu (pg/m³) temsil etmektedir.

Denge durumunda toprak ortamı için hesaplanan $\sum_{17}$ PCDD/F konsantrasyonlarının aylık değişim Şekil 1a'da gösterilmiştir. $\sum_{17}$ PCDD/F konsantrasyonları 75,92 pg/g (Haziran/2022) ile 1965,6 pg/g (Aralık/2022) arasında değişim göstermiştir. Ortalama $\sum_{17}$ PCDD/F konsantrasyonunun 702,74±553,74 pg/g olduğu belirlenmiştir. Yüksek standart sapma değerinin görülmesi doğrudan ölçülen atmosferik PCDD/F konsantrasyonları ve meteorolojik şartlar ile ilgilidir. Örnekleme noktası çeşitli PCDD/F kaynaklarının etkisi altındadır. Ortam havası örneklemleri ayda bir kere olacak şekilde yapılmıştır. Dolayısıyla, her örnek için kaynak türü, sayısı ve emisyon miktarı ile meteorolojik parametrelerin farklılık göstermesi beklenen bir durumdur. Bu da her bir örnekleme için farklı konsantrasyon seviyelerinin ölçülmesine ve dolayısıyla yüksek standart sapma değerlerinin görülmesine yol açmıştır. Mevsimsel bir değerlendirme yapıldığında ise mevsimsel aylık olarak ortalama $\sum_{17}$ PCDD/F konsantrasyon değerlerine göre mevsimlerin kış (1300,07±941,21 pg/g) > ilkbahar (1059,05±239,31 pg/g) > sonbahar (523,42±290,3 pg/g) > yaz (271,34±299,12 pg/g) şeklinde sıralandığı görülmüştür. Yaz ve kış mevsimleri için elde edilen PCDD/F konsantrasyon farkının istatistiksel olarak anlamlı olduğu belirlenmiştir (p<0,05). En yüksek mevsimsel $\sum_{17}$ PCDD/F konsantrasyon değerinin kış mevsiminde görülmesinin başlıca sebepleri dış ortam havasındaki konsantrasyonlarının artması ve PCDD/F'lerin özellikleridir. Dış ortam havasındaki PCDD/F seviyesinin kışın artmasının temel sebeplerinin bu mevsimde diğer mevsimlere oranla konut ve endüstriyel ısınma amacıyla yakma faaliyetlerinin daha fazla olması ve buna bağlı emisyon salınımlarının artış göstermesi,

düşük güneş ışık şiddeti ve düşük sıcaklıklarda OH radikalleri ile fotokimyasal bozunmanın azalması ve tam karışım ve dağılımın az olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Muñoz-Arnanz ve diğ., 2018). Örnekleme noktası yoğun konutlaşmanın görüldüğü şehir merkezine oldukça yakın olduğundan evsel ısınma kaynaklı emisyon salınımlarından etkilenmenin söz konusu olduğu düşünülmektedir. Ayrıca örnekleme noktasının yanında bulunan karayolunun da ölçülen sonuçlar üzerinde etkili olması aşıkardır. Kış aylarında, araç motorlarında görülen eksik yanmaya bağlı olarak araçlardan daha fazla PCDD/F emisyonlarının atmosfere salınabileceği bildirilmiştir (Deng ve diğ., 2011). Hava örneklemesinin yapıldığı noktanın düzenli araç emisyonların maruz kalması göz önüne alındığında bu durumda mevsimsel $\sum_{17}$ PCDD/F konsantrasyon farklılığına yol açabileceği düşünülmektedir.

$\sum_{17}$ PCDD/F konsantrasyonları TEQ cinsinden analiz edildiğinde ise en düşük konsantrasyonun Ağustos/2022 örneklemeinde 3,23 pg TEQ/g, en yüksek konsantrasyonun ise Aralık/2023 örneklemeinde 47,53 pg TEQ/g olarak ölçüldüğü görülmüştür. Ortalama değerin ise $21,14 \pm 13,41$ pg TEQ/g olduğu belirlenmiştir. Literatürde dünyanın farklı bölgeleri için bildirilen $\sum_{17}$ PCDD/F seviyeleri incelendiğinde bunların geniş bir aralıkta dağılım gösterdikleri görülmektedir. Bu açıdan bu çalışmaya yakın sonuçlar bildiren araştırmalar bulunmakla birlikte, yüksek veya düşük konsantrasyon değerleri rapor eden çalışmalar da mevcuttur (Tablo 1). Ancak genel olarak kentsel alanlar için sunulan $\sum_{17}$ PCDD/F konsantrasyon değerlerinin bu çalışmaya kıyasla düşük olduğu görülmektedir. Bu durum, toprak ortamı için denge durumuna göre hesaplanan bazı PCDD/F tür konsantrasyon seviyelerinin olması gereken değerden yüksek olarak tahmin edilmesi ile ilgili olabilir. Le ve diğ. (2019) Vietnam'da yaptıkları çalışmada ortalama $\sum_{17}$ PCDD/F konsantrasyon değerini bu çalışmaya benzer bir şekilde $28,7 \pm 28,8$ pg TEQ/g olarak bildirmişlerdir. Kore'nin Ulsan şehrinde kentsel bir bölgede yapılan bir çalışmada ise ortalama $\sum_{17}$ PCDD/F konsantrasyonunun 0,39 pg TEQ/g olduğu rapor edilmiştir (Cho ve diğ., 2024). Çin'in Şantung bölgesinde (kentsel) yürütülen bir çalışmada ise 0,54 ile 2,63 pg TEQ/g arasında değişen bir konsantrasyon aralığı bildirilmiştir (Wu ve diğ., 2018). Güney Afrika'nın kentsel bir bölgesinde ise yine bu çalışmadan düşük olarak 0,34 ile 20 pg TEQ/g arasında değişen $\sum_{17}$ PCDD/F konsantrasyonları bildirilmiştir (Nieuwoudt ve diğ., 2009). Özellikle elektronik atıkların geri dönüşüm işlemlerinin yapıldığı alanlarda bu çalışmaya göre yüksek konsantrasyonların bildirildiği görülmektedir. (Tang ve diğ., 2014) Çin'de elektronik atık geri dönüşüm bölgesinde yaptığı çalışmada $\sum_{17}$ PCDD/F konsantrasyonlarının 10,1 ile 205 pg TEQ/g arasında değiştiği verilmiştir. Hindistan'ın elektronik atık geri dönüşüm bölgesinde yürütülen başka bir çalışmada ise ortalama $\sum_{17}$ PCDD/F konsantrasyonunun 31000 pg TEQ/g olduğu rapor edilmiştir (Chakraborty ve diğ., 2018). Bazı ülkeler tarafından topraktaki PCDD/F'ler için üst sınır değerleri belirlemiştir. Almanya'da konut, tarımsal ve endüstriyel topraklar için sırasıyla 1, 5 ve 100 pg TEQ/g değerlerinin aşılmaması gerektiği bildirilmiştir. İsviçre'de ise bu sınır değerler tüm topraklar için 5 pg TEQ/g ve tarımsal topraklar için 20 pg TEQ/g'dır (van Drooge ve diğ., 2021). Bu çalışmada elde edilen PCDD/F konsantrasyon seviyeleri Almanya'da endüstriyel topraklar için bildirilen sınır değerinden oldukça düşüktür. Aylık olarak değerlendirildiğinde ise tahmin edilen PCDD/F konsantrasyon seviyelerinin bildirilen sınır değerler ile uyum içinde olduğu veya kısmen yüksek olarak seyrettiği görülmektedir. Bu açıdan toprak ortamı için elde edilen PCDD/F konsantrasyon seviyelerinin ekosistem açısından kısmen de olsa risk oluşturabilme ihtimalinin söz konusu olduğu söylenebilir.

3.1.3. Su Ortamı

Atmosferik PCDD/F konsantrasyonlarına dayalı olarak sudaki PCDD/F konsantrasyonlarının tahmini Henry yasası sabiti kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her bir PCDD/F bileşiği için 25°C'deki Henry yasası sabiti literatürden elde edilmiş ve aşağıdaki denklem kullanılarak sıcaklık düzeltilmesi yapılmıştır (USEPA, 2001a):

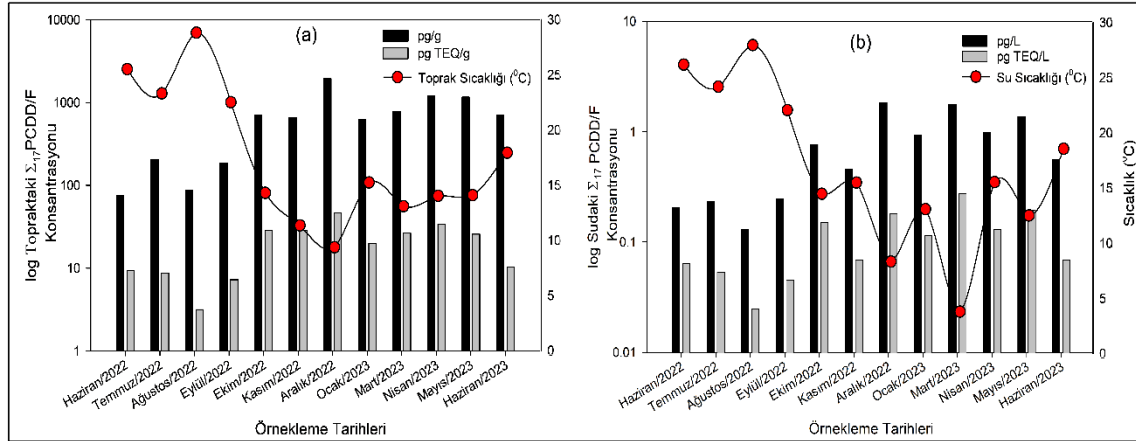
$$H' = \frac{\exp\left[-\frac{\Delta H_{v,TS}}{R_C} \times \left(\frac{1}{T_S} - \frac{1}{T_R}\right)\right] \times H_R}{R \times T_S} \quad (6)$$

Bu eşitlikte H' ortalama toprak sıcaklığında Henry yasası sabitini (boyutsuz), $\Delta H_{v,TS}$ ortalama toprak sıcaklığında buharlaşma entalpisini (cal/mol), T_S ortalama toprak sıcaklığını (K), T_R Henry yasası sabit referans sıcaklığı (K), H_R referans sıcaklıkta Henry yasası sabitini (atm-m³/mol), R_C gaz sabitini (1,9872 cal/mol-K) ve R gaz sabitini (8,205 x 10⁻⁵ atm-m³/mol-K) ifade etmektedir.

Denge durumunda sudaki PCDD/F konsantrasyonu daha sonra Denklem 7 kullanılarak hesaplanmaktadır. Denklemlerde C_g ölçülen gaz fazındaki atmosferik PCDD/F konsantrasyonunu, C_w ise sudaki PCDD/F konsantrasyonunu ifade etmektedir.

$$H' = \frac{C_g}{C_w} \quad (7)$$

Farklı süreçlerle üretilen PCDD/F'ler, doğrudan deşarj, atmosferik çökeltme (kuru ve ıslak) ve difüzyon dahil olmak üzere birçok yolla sucul ortama giriş yapabilmektedirler. Bu çalışmada sucul ortamda denge durumuna göre hesaplanan $\sum_{17}$ PCDD/F konsantrasyonları 0,13 (Ağustos/2022) ile 1,85 pg/L (Aralık/2022) arasında değişim göstermiştir (Şekil 1b). Ortalama $\sum_{17}$ PCDD/F konsantrasyonunun 0,80±0,61 pg/L olduğu görülmüştür. Toprak ortamında elde edilen sonuçlara benzer olarak en yüksek $\sum_{17}$ PCDD/F konsantrasyonları kış mevsiminde görülmüştür (ortalama: 1,39±0,64 pg/L). Aylık ortalama $\sum_{17}$ PCDD/F konsantrasyonlarına göre diğer mevsimler: ilkbahar (1,38±0,4 pg/L) > sonbahar (0,8±0,61 pg/L) > yaz (0,29±0,19 pg/L) şeklinde sıralanmışlardır. Soğuk aylarda daha yüksek konsantrasyon seviyelerinin görülmesinin bu aylarda evsel ısınmanın artması ve kirleticilerin seyrelmesini azaltan mevsimsel koşullar ile ilgili olduğu düşünülmektedir.



Şekil 1:

a. Toprak ortamı PCDD/F konsantrasyonları b. Sucul ortam PCDD/F konsantrasyonları

TEQ cinsinden ise en düşük $\sum_{17}$ PCDD/F değerinin 0,03 pg TEQ/L olarak Ağustos/2022 tarihli örnekleme için, en yüksek $\sum_{17}$ PCDD/F değerinin ise 0,28 pg TEQ/L olarak Mart/2023 tarihli örnekleme için hesaplandığı görülmüş olup ortalama $\sum_{17}$ PCDD/F değerinin 0,12±0,08 pg TEQ/L olduğu belirlenmiştir. Sucul ortam ile toprak ortamı için elde edilen TEQ konsantrasyonları arasındaki ilişkinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmüştür ($p < 0,05$). Dünya genelinde su ortamında yapılmış PCDD/F çalışmalarının sayısı toprak ortamında göre daha az olup, Türkiye’de sucul ortam için bildirilmiş PCDD/F verisinin bulunmadığı görülmüştür.

Bu açıdan bu çalışma ile su ortamı için tahmin edilen verilerin önemli olduğu düşünülmektedir. Dünya genelinde su ortamında bu çalışmaya benzer $\sum_{17}$ PCDD/F seviyeleri bildiren çalışmalar mevcuttur (Tablo 1). Çin'in Yangtze Nehri'nden alınan örnekler için $\sum_{17}$ PCDD/F seviyelerinin 0,028 ile 0,177 pg TEQ/L arasında değişim gösterdiği bildirilmiştir (Zhang ve diğ., 2014). Tayvan'ın farklı yüzey sularından alınan örneklerde ise $\sum_{17}$ PCDD/F seviye aralığı 0,007–0,265 pg TEQ/L olarak rapor edilmiştir (Thuan ve diğ., 2011). Bu çalışmadan daha düşük konsantrasyon seviyeleri bildiren çalışmalar da bulunmaktadır. Chi ve diğ. (2015) Tayvan'ın en büyük su rezervuarlarından aldıkları örnekler için $\sum_{17}$ PCDD/F seviyelerinin 0,011 ile 0,015 pg TEQ/L arasında değiştiklerini rapor etmişlerdir. Çin'in Xijiang Nehri'nden alınmış örnekler için ise $\sum_{17}$ PCDD/F konsantrasyon seviyelerinin yine bu çalışmadan düşük olarak (0,012-0,075 pg TEQ/L) bildirildiği görülmüştür (Liu ve diğ., 2008). Çin'in Dongting Gölü'nde yapılan bir çalışmada ise bu çalışmaya kıyasla yüksek bir $\sum_{17}$ PCDD/F konsantrasyon aralığı (0,19-0,44 pg TEQ/L) verilmiştir (Gao ve diğ., 2014). Farklı çalışmalarda farklı konsantrasyon aralıklarının bildirilmesi, örnek alınan bölgedeki PCDD/F kaynak çeşitliliğinin, örnek alınan sucul ortam özelliğinin ve kullanılan örnekleme metodunun değişiklik göstermesi gibi çeşitli faktörlerden kaynaklanmış olabilir. Özellikle tarım arazilerinden geçen nehirlerde ve endüstriyel atıksuların karıştığı sucul ortamlarda yüksek PCDD/F konsantrasyon seviyelerinin görülmesi beklenen bir durumdur (Lei ve diğ., 2024). Tahmin edilen PCDD/F konsantrasyon seviyeleri çeşitli sucul ortamlarda ölçülen değerler ile karşılaştırılmış olsa da en doğru tartışmanın göl ve benzeri durgun tatlı sular üzerinden yapılabileceği düşünülmektedir. Deniz suları tuzluluk gibi çeşitli özelliklere sahip olmaları ile tatlı sulardan ayrılmaktadır. Akarsular ise hareket halinde oldukları için bu tür ortamlardaki ölçüm sonuçları farklılık gösterebilir. Çeşitli çalışmalarda PCDD/F'lerin sucul ortamlarda bentik organizmalar, balık yiyen kuşlar ve balık yiyen memeliler gibi canlılar için oluşturduğu önemli riskler vurgulanmıştır (Khairy ve diğ., 2015). Bu açıdan PCDD/F'lerin su kalitesine olan etkisinin değerlendirilmesi önem taşımaktadır. Suda çözünürlüklerinin düşük olması nedeniyle WHO tarafından PCDD/F'ler ve için herhangi bir su kalitesi yönergesi belirlenmemiştir (Nguyen ve diğ., 2017). Bununla birlikte, bazı ülkeler tarafından içme suyu için PCDD/F sınır değerleri düzenlenmiştir. Örneğin, USEPA tolere edilebilir günlük alım miktarı için maksimum kirletici seviyesini 30 pg TEQ/L olarak belirlemiştir (USEPA, 2001b). Japonya hükümeti ise içme suyu ve atık sudaki PCDD/F'lerin yıllık ortalama konsantrasyonun sırasıyla 1 pg TEQ/L ve 10 pg TEQ/L'den düşük olması gerektiğini bildirmiştir (Japonya Hükümeti, 2012). Tayvan EPA (2013) tarafından içme suyu için belirlenen maksimum PCDD/F konsantrasyonu ise 3 pg TEQ/L'dir. Bu çalışmada sucul ortam için elde edilen $\sum$ PCDD/F konsantrasyon seviyeleri bahsedilen sınır değerlerinden oldukça küçüktür. Bu açıdan önemli bir sağlık riski oluşturacak seviyede olmadıkları düşünülmektedir.

Tablo 1. Dünyanın değişik noktalarından verilen $\sum_{17}$ PCDD/F konsantrasyon seviyeleri (toprak: pg TEQ/g, su: pg TEQ/L)

Ortam	Örnekleme Bölgesi	Konsantrasyon	Kaynak
Toprak	A Luoi, Vietnam	2,7 - 89	Le ve diğ. (2019)
	Güney Afrika	0,34 - 20	Nieuwoudt ve diğ. (2009)
	Hindistan	8000 - 99000	Chakraborty ve diğ. (2018)
	Şantung, Çin	0,54 - 2,63	Wu ve diğ. (2018)
	Ulsan, Kore	0,03 - 0,73	Cho ve diğ. (2024)
	Zhejiang, Çin	10,1 - 205	Tang ve diğ. (2014)
	Bursa, Türkiye	3,23 - 47,53	Bu çalışma
Su	Dongting Gölü, Çin	0,19 - 0,44	Gao ve diğ. (2014)
	Tayvan	0,011 - 0,015	Chi ve diğ. (2015)
	Tayvan	0,007 - 0,265	Thuan ve diğ. (2011)
	Xijiang Nehri, Çin	0,012 - 0,075	Liu ve diğ. (2008)
	Yangtze Nehri, Çin	0,028 - 0,177	Zhang ve diğ. (2014)
	Bursa, Türkiye	0,03 - 0,28	Bu çalışma

3.2. PCDD/F Tür Dağılım Profilleri

3.2.1. Hava Ortamı

Gaz fazlı atmosferik PCDD/F'lerin tür profili incelendiğinde OCDD'nin toplam konsantrasyonun en büyük kısmını (%15,97) oluşturan tür olduğu belirlenmiştir. Diğer ön plana çıkan türler ise 2,3,4,7,8-PeCDF (%9,85), 1,2,3,7,8-PeCDF (% 9,69) ve 1,2,3,7,8-PeCDD (%9,1) olmuştur. TEQ cinsinden bir değerlendirme yapıldığında ise toplam konsantrasyonun en büyük kısmını 1,2,3,7,8-PeCDD (%42,44), 2,3,7,8-TCDD (%29,63) ve 2,3,4,7,8-PeCDF'nin (%13,78) oluşturduğu görülmüştür. Partikül faz PCDD/F'lerde ise OCDD ve OCDF türleri toplam konsantrasyonun sırasıyla %36,14 ve %13,76'sını oluşturarak ön plana çıkmıştır. TEQ konsantrasyonlarında 1,2,3,7,8-PeCDD (%26,45), 2,3,7,8-TCDD (%14,3) ve 2,3,4,7,8-PeCDF (%14,26) bileşikler en yüksek katkı yapan türler olmuşlardır. Gaz ve partikül faz atmosferik PCDD/F'lerin tür dağılımı ile ilgili daha detaylı bilgi başka bir çalışmada verilmiştir (Gülegen ve diğ., 2024).

3.2.2. Toprak Ortamı

Toprak ortamı için tür bazında hesaplanan PCDD/F konsantrasyonları Tablo 2'de verilmiştir. PCDD/F türlerinin toplam konsantrasyonu oluşturma yüzdeleri incelendiğinde OCDD türünün toplam konsantrasyonun %67,24'lük kısmını oluşturarak 17 tür içinde ön plana çıktığı görülmüştür (Şekil 2a). Bu türün diğer türlere kıyasla yüksek molekül ağırlığına sahip olması dolayısıyla topraktaki organik kısma daha fazla sorplanma isteğinin olması ve doğada bozunurluğunun yine diğer türlere oranla düşük olmasının bu durumda rol oynadığı düşünülmektedir. Toplam konsantrasyona en yüksek katkı yapan diğer iki türün ise OCDF (% 6,34) ve 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD (%3,69) olduğu belirlenmiştir. OCDD, OCDF ve 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD'nin baskın olduğu tür profilinin kurşunsuz benzin ve dizel yakıt yakılmasından kaynaklanan araç emisyonları ile ilişkili olduğu bildirilmiştir (Cortés ve diğ., 2014). Örnekleme noktası, araç emisyonlarından yoğun bir şekilde etkilenen bir noktada bulunduğu için tür profilinin bu şekilde şekillenmesi beklenen bir durumdur. Toprak ortamında yürütülen birçok araştırmada bu çalışmaya benzer tür profillerinin rapor edildiği görülmüştür. Türkiye'de toprak ortamında PCDD/F seviyelerini değerlendiren yalnızca bir çalışma bulunmaktadır. Bahsedilen çalışma Kocaeli şehrinin atık yakma tesisi/ kentsel bölgesinde yapılmış olup, toplam konsantrasyona en çok katkı yapan türlerin OCDD ve OCDF olduğu bildirilmiştir (Bakoglu ve diğ., 2005). Tayvan'ın kırsal bir bölgesinde yürütülen bir çalışmada ise sırasıyla OCDD, OCDF ve 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD'nin baskın profili oluşturduğu rapor edilmiştir (Hsu ve diğ., 2018). İtalya'da, atık yakma tesisi etkisindeki bir bölgede yapılan çalışmada ise toplam konsantrasyon yaklaşık %70'ini OCDD'nin oluşturduğunun, bunu HpCDD (%10) ve OCDF'nin (%15) takip ettiği bildirilmiştir (Vassura ve diğ., 2011).

Toplam TEQ konsantrasyonuna en çok katkı yapan tür ise 1,2,3,7,8-PeCDD (%28,65) olmuştur. Diğer ön plana çıkan türün ise 2,3,4,7,8-PeCDF (%9,59) olduğu görülmüştür. Bu iki türün evsel ısınma amaçlı kömür yakma kaynaklı oluşabilecekleri bildirilmiştir (Ding ve diğ., 2012). Örnekleme noktası yoğun kentleşmenin bulunduğu şehir merkezine oldukça yakındır. Bu açıdan özellikle kış aylarında evsel ısınma kaynaklı emisyonlardan etkilenmesi kuvvetle muhtemeldir. Bu türlerin demir-çelik endüstrileri kaynaklı olarak atmosfere salınabilecekleri de rapor edilmiştir (Song ve diğ., 2023). Bursa şehri Türkiye'nin en önemli sanayi şehirlerinden biri olup çok sayıda organize sanayi bölgesine sahiptir. Bu bölgelerden taşınan emisyonların örnekleme bölgesini etkilemiş olma ihtimali bulunmaktadır. Çeşitli çalışmalarda bu çalışmaya benzer olarak bu iki türün ön plana çıktığı rapor edilmiştir. Ngo ve diğ. (2018) Tayvan'ın kentsel/endüstriyel bir bölgesinde yürüttükleri çalışmada toplam TEQ konsantrasyonuna en çok katkı yapan türlerin bu çalışmaya benzer olarak 1,2,3,7,8-PeCDD ve 2,3,4,7,8-PeCDF olduğunu bildirmişlerdir. Çin, Pekin'de şehir merkezine yakın bir parktan alınan toprak örneklerinde ise

sırasıyla 2,3,4,7,8-PeCDF ve 1,2,3,7,8-PeCDD'nin TEQ cinsinden en baskın türler oldukları rapor edilmiştir (Li ve diğ., 2014).

Tablo 2. Toprak ortamı PCDD/F konsantrasyonlarının minimum (min), maksimum (mak), ortalama (ort) ve standart sapma (SS) değerleri

PCDD/F'ler	Konsantrasyon							
	pg/g				pg TEQ/g			
	Min	Mak	Ort	SS	Min	Mak	Ort	SS
2,3,7,8-TCDF	0,13	2,61	0,93	0,75	0,01	0,26	0,09	0,07
1,2,3,7,8-PeCDF	0,14	13,37	5,35	3,97	0,00	0,40	0,16	0,12
2,3,4,7,8-PeCDF	0,92	13,96	6,76	4,37	0,28	4,19	2,03	1,31
1,2,3,4,7,8-HxCDF	1,92	67,68	18,27	18,94	0,19	6,77	1,83	1,89
1,2,3,6,7,8-HxCDF	1,43	39,70	16,20	12,72	0,14	3,97	1,62	1,27
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0,67	63,82	19,67	18,61	0,07	6,38	1,97	1,86
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0,24	7,99	3,03	2,34	0,02	0,80	0,30	0,23
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	1,36	39,80	15,52	12,48	0,01	0,40	0,16	0,12
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	1,01	49,75	18,55	15,86	0,01	0,50	0,19	0,16
OCDF	4,93	106,77	44,58	34,05	0,00	0,03	0,01	0,01
2,3,7,8-TCDD	0,12	4,93	1,55	1,46	0,12	4,93	1,55	1,46
1,2,3,7,8-PeCDD	1,41	11,03	6,06	3,41	1,41	11,03	6,06	3,41
1,2,3,4,7,8-HxCDD	1,75	44,11	15,21	11,64	0,18	4,41	1,52	1,16
1,2,3,6,7,8-HxCDD	2,39	38,48	16,33	10,87	0,24	3,85	1,63	1,09
1,2,3,7,8,9-HxCDD	2,35	42,18	18,31	14,99	0,24	4,22	1,83	1,50
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0,79	74,21	25,93	22,83	0,01	0,74	0,26	0,23
OCDD	26,69	1448,2	472,53	404,83	0,01	0,43	0,14	0,12

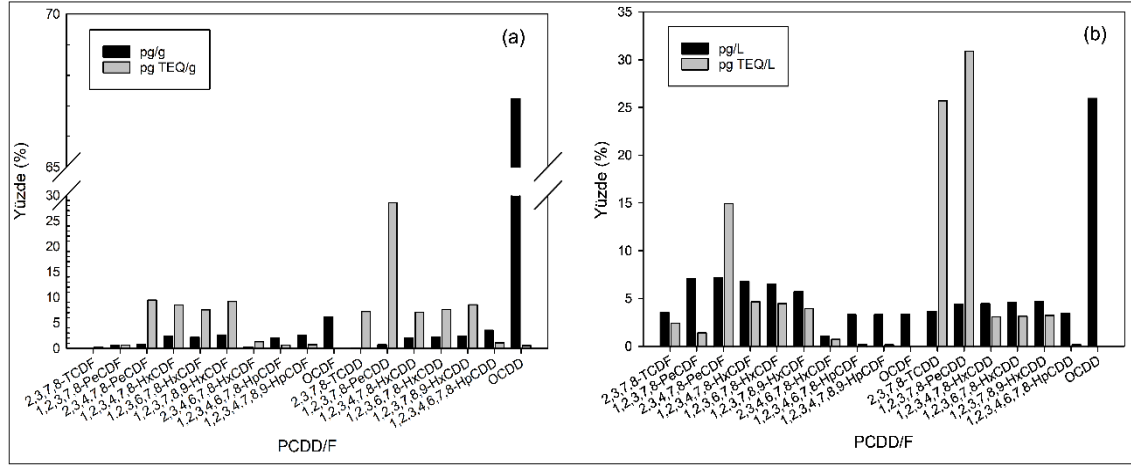
3.2.3. Su Ortamı

Sucul ortam için hesaplanan PCDD/F tür konsantrasyonları Tablo 3'te özetlenmiştir. Toplam PCDD/F konsantrasyonuna en çok katkı yapan türün toprak ortamına benzer şekilde OCDD olduğu görülmüştür (%25,98). Katkı yapma yüzdesine göre ön plana çıkan diğer türler ise 2,3,4,7,8-PeCDF (%7,22), 1,2,3,7,8-PeCDF (%7,13), 1,2,3,4,7,8-HxCDF (%6,84) ve 1,2,3,6,7,8-HxCDF (%6,54) olmuştur. Bu açıdan sucul ortam ve toprak ortamındaki PCDD/F tür profillerinin farklılık gösterdiği söylenebilir. Bu durum PCDD/F türlerinin fizikokimyasal özelliklerine bağlı olarak farklı ortamlardaki davranışlarının değişiklik göstermesindendir. Daha önce belirtildiği üzere yüksek OCDD konsantrasyonları araç emisyonları ile ilişkilendirilmiştir Ngo ve diğ. (2020) tarafından araç emisyonları kaynaklı olarak 2,3,4,7,8-PeCDF ve 1,2,3,6,7,8 HxCDF türlerinin birlikte salınabilecekleri açıklanmıştır. Dolayısıyla baskın tür profilinin bu şekilde oluşmasında atmosfere salınan araç emisyonlarının önemli bir katkısının olduğu düşünülmektedir. Su ortamında yürütülmüş çalışmalarda OCDD'nin baskın PCDD/F türü olduğu bildirilmiştir. Lu ve diğ. (2016) beş farklı arıtma tesisinden aldıkları ham su örneklerinde OCDD'nin toplam konsantrasyonun %95,1'ini oluşturduğunu ve en baskın tür olduğunu sunmuşlardır. Lei ve diğ. (2024) Çin'de nehir deltasının farklı noktalarından aldıkları yüzey suyu örnekleri için OCDD'nin baskın tür (Toplam konsantrasyonun %48'i) olduğunu rapor etmişlerdir. Çin'in Dongting Gölü'nden alınan örnekler için OCDD'nin toplam konsantrasyonun %67-95'ini oluşturduğunu ve baskın tür olduğu bulunmuştur (Gao ve diğ., 2014).

Tablo 3. Su ortamı PCDD/F konsantrasyonlarının minimum (min), maksimum (mak), ortalama (ort) ve standart sapma (SS) değerleri

PCDD/F'ler	Konsantrasyon							
	pg/L				pg TEQ/L			
	Min	Mak	Ort	SS	Min	Mak	Ort	SS
2,3,7,8-TCDF	0,004	0,116	0,029	0,032	0,000	0,012	0,003	0,003
1,2,3,7,8-PeCDF	0,002	0,162	0,057	0,051	0,000	0,005	0,002	0,002
2,3,4,7,8-PeCDF	0,012	0,143	0,058	0,041	0,003	0,043	0,017	0,012
1,2,3,4,7,8-HxCDF	0,010	0,191	0,055	0,051	0,001	0,019	0,005	0,005
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0,007	0,166	0,052	0,048	0,001	0,017	0,005	0,005
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0,002	0,132	0,046	0,041	0,000	0,013	0,005	0,004
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0,001	0,037	0,009	0,010	0,000	0,004	0,001	0,001
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0,002	0,067	0,027	0,022	0,000	0,001	0,000	0,000
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0,001	0,074	0,027	0,026	0,000	0,001	0,000	0,000
OCDF	0,003	0,080	0,027	0,025	0,000	0,000	0,000	0,000
2,3,7,8-TCDD	0,003	0,097	0,030	0,033	0,003	0,097	0,030	0,033
1,2,3,7,8-PeCDD	0,012	0,061	0,036	0,017	0,012	0,061	0,036	0,017
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0,007	0,093	0,036	0,027	0,001	0,009	0,004	0,003
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0,009	0,079	0,037	0,025	0,001	0,008	0,004	0,003
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0,007	0,082	0,038	0,032	0,001	0,008	0,004	0,003
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0,001	0,087	0,028	0,027	0,000	0,001	0,000	0,000
OCDD	0,010	0,660	0,208	0,192	0,000	0,000	0,000	0,000

Sucul ortam için toplam TEQ konsantrasyonuna en çok katkı yapan PCDD/F türleri incelendiğinde ise toprak profiline benzer bir profilin oluştuğu görülmüştür. 1,2,3,7,8-PeCDD toplam konsantrasyonun %30,92'sini oluşturarak en baskın tür olmuştur (Şekil 2b). 2,3,7,8-TCDD (%25,73) ve 2,3,4,7,8-PeCDF'nin (%14,97) toplam TEQ konsantrasyonun en yüksek katkı yapan diğer türler olduğu belirlenmiştir. Bu üç PCDD/F türünün insanlarda çeşitli sağlık sorunları ile birlikte solunum yolu, prostat, lenf ve yumuşak doku kanseri gibi oldukça ciddi hastalıklara sebep olabileceği bildirilmiştir (Vernez ve diğ., 2023). Literatürdeki diğer su ortamı PCDD/F çalışmalarında da bu üç türün ön plana çıktığı görülmüştür. Liu ve diğ. (2008) Çin'de nehir ortamında yaptıkları çalışmada bu çalışmaya benzer olarak 2,3,4,7,8-PeCDF; 2,3,7,8-TCDD ve 1,2,3,7,8-PeCDD'nin baskın tür profilini oluşturduğunu bildirmişlerdir. Gao ve diğ. (2014) ise Çin'in nehir ortamında yürüttükleri çalışmada yine bu çalışmaya benzer şekilde 2,3,7,8-TCDD; 1,2,3,7,8-PeCDD ve 2,3,4,7,8-PeCDF'nin toplam konsantrasyona en çok katkı yapan türler olduklarını rapor etmişlerdir. Çin'in bir nehir deltasında yapılan başka bir çalışmada ise 2,3,7,8-TCDD'nin toplam konsantrasyonun %15'ini oluşturduğu ve baskın tür olduğu bildirilmiştir (Lei ve diğ., 2024). OCDD'nin toplam konsantrasyona en yüksek katkıyı yapan tür olmasına rağmen toplam TEQ konsantrasyonuna en düşük katkı yapan türlerden biri olması dikkat çekicidir. Bu durum, OCDD türünün düşük toksik özellik göstermesi veya başka bir deyişle düşük TEF değerine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. PCDD/F türlerinin toksisite cinsinden ifade edilen konsantrasyonları (TEQ konsantrasyonları) TEF değerlerine bağlı olarak normal konsantrasyonlarına göre genel olarak farklılık göstermiştir.



Şekil 2:

a. Toprak ortamı PCDD/F türlerinin toplam konsantrasyona katkı yüzdeleri b. Su ortamı PCDD/F türlerinin toplam konsantrasyona katkı yüzdeleri

4. SONUÇ

PCDD/F'ler çeşitli kaynaklardan atmosfere, toprak ve su gibi çeşitli ortamlara yayılmaktadır. PCDD/F'lerin çevredeki konsantrasyonlarının belirlenmesi, davranışlarının ve hem çevre hem de halk sağlığı üzerindeki potansiyel etkilerinin anlaşılması açısından kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, ölçülen ortam havası konsantrasyon değerleri kullanılarak farklı ortamlardaki (toprak ve su) denge konsantrasyonları belirlenmiştir. Tahmin edilen veriler gerçek ölçümlerin yerini almasa da literatürde kabul görmüş modeller kullanılarak gerçekçi sonuçlar elde edilmiştir. PCDD/F çalışmaları oldukça pahalı, zahmetli ve zaman alıcı olduğundan bu yaklaşım ile toprak ve su ortamlarında ölçüm yapılmadan olası kirlilik hakkında araştırma yapılabilme imkanı sağlanmıştır. Buna göre yapılan hesaplamalar sonucunda $\sum_{17} \text{PCDD/F}$ konsantrasyon seviyelerinin toprak ortamında 75,92 ile 1965,6 pg/g (3,23 ile 47,53 pg TEQ/g), sucul ortamda ise 0,13 ile 1,85 pg/L (0,03 ile 0,28 pg TEQ/L) arasında değişim gösterdiği belirlenmiştir. Dünya çapında yürütülen çalışmalar ile bir karşılaştırma yapıldığında sucul ortam için elde edilen sonuçların benzer, toprak ortamı için elde edilen sonuçların ise benzer/ kısmen yüksek bir profil ortaya koyduğu görülmüştür. Toprak ortamı için elde edilen yüksek konsantrasyon seviyeleri özellikle OCDD türünün önemli katkısından kaynaklanmıştır. Bu tür yüksek molekül ağırlığı dolayısıyla çökeltme sorplanma ilgisinin yüksek olması ve doğada bozunmasının diğer türlere göre daha zor olmasından ötürü toprak ortamında yoğun miktarda birikebilmektedir. Su ortamı için de yine OCDD baskınlığı dikkat çekmiştir. Toprak ve sucul ortam için baskın PCDD/F türlerinin genel olarak benzerlik gösterdiği saptanmıştır. Baskın türler, çevredeki PCDD/F'lerin araç ve evsel ısınma kaynaklı emisyonlardan kaynaklanmış olabileceğini göstermiştir. Atmosferik PCDD/F örnekleme noktası şehir merkezinde bulunduğu için böyle bir kaynak profilinin oluşması beklenen bir durumdur. Her iki ortam için de düşük sıcaklıkların ölçüldüğü aylarda yüksek PCDD/F konsantrasyon seviyelerinin hesaplandığı görülmüştür. Bu durum soğuk aylarda konut ve endüstriyel ısınma amacıyla yakma faaliyetlerinin daha fazla olması, OH radikalleri ile fotokimyasal bozunmanın azalması ve düşük atmosferik karışım yüksekliğinin görülmesi ile ilişkilendirilmiştir. Bu çalışmada hesaplama yöntemi ile elde edilen veriler Bursa şehrinin kentsel bir bölgesinde PCDD/F'lerin toprak ve sucul ortam seviyeleri hakkında anlamlı yorum ve tartışmaların yapılmasına olanak sağlamıştır. Ancak gelecekte gerçek toprak ve su ortamı örnekleri ile elde edilecek verilerin PCDD/F'lerin oluşturabilecekleri kirlilik hakkında daha sağlıklı yorumların yapılabilmesine olanak sağlayacağı düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'nun (TÜBİTAK) 121Y473 numaralı projesi ile finansal olarak desteklenmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

YAZAR KATKISI

Berke Güleğen çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, veri toplama, verilerin analiz edilmesi ve yorumlanması, makale taslağının oluşturulması; Abdul Alim Noori çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, veri toplama, verilerin analiz edilmesi ve yorumlanması, makale taslağının oluşturulması; Yücel Taşdemir çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, verilerin analiz edilmesi ve yorumlanması, fiktisel içeriğin eleştirel incelemesi konularında katkı sağlamıştır.

KAYNAKLAR

1. Alimohammadi, M. and Lake, C. (2022). Fate and transport of particle matter during GEOTextile tube dewatering of a dioxin and furan (PCDD/F) contaminated sediment. *Geotextiles and Geomembranes*, 50(2), 203–215. doi: 10.1016/j.geotextmem.2021.09.006
2. Bakoglu, M., Karademir, A. and Durmusoglu, E. (2005). Evaluation of PCDD/F levels in ambient air and soils and estimation of deposition rates in Kocaeli, Turkey. *Chemosphere*, 59(10), 1373–1385. doi: 10.1016/j.chemosphere.2004.12.029
3. Bei, J., Xu, X., Zhan, M., Li, X., Jiao, W., Khachatryan, L. and Wu, A. (2022). Revealing the Mechanism of Dioxin Formation from Municipal Solid Waste Gasification in a Reducing Atmosphere. *Environmental Science & Technology*, 56(20), 14539–14549. doi: 10.1021/acs.est.2c05830
4. Caliskan, B., Celik, S., Sakin, A. E. and Tasdemir, Y. (2025). Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbon concentrations in a semi-urban site: temporal variation, risk assessment, source identification, and estimation of levels in diverse environments. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 44(3), 683–697. doi: 10.1093/etoxnl/vgaf025
5. Chakraborty, P., Selvaraj, S., Nakamura, M., Prithiviraj, B., Cincinelli, A. and Bang, J. J. (2018). PCBs and PCDD/Fs in soil from informal e-waste recycling sites and open dumpsites in India: Levels, congener profiles and health risk assessment. *Science of The Total Environment*, 621, 930–938. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.11.083
6. Chi, K. H., Luo, S., Kao, S. J., Hsu, W.-T. and Lee, T. Y. (2015). Sources and Deposition Fluxes of PCDD/Fs in the Largest Reservoir System in Taiwan before and after Typhoon Morakot. *Aerosol and Air Quality Research*, 15(4), 1227–1239. doi: 10.4209/aaqr.2014.10.0235
7. Cho, H.-K., Khuman, S. N., Cho, I.-G., Park, M.-K. and Choi, S.-D. (2024). Spatial distributions and source identification of PCDD/Fs and PCBs in soils and pine needles in the multi-industrial city of Ulsan, South Korea. *Chemosphere*, 369, 143821. doi: 10.1016/j.chemosphere.2024.143821

8. Cortés, J., González, C. M., Morales, L., Abalos, M., Abad, E. and Aristizábal, B. H. (2014). PCDD/PCDF and dl-PCB in the ambient air of a tropical Andean city: Passive and active sampling measurements near industrial and vehicular pollution sources. *Science of The Total Environment*, 491–492, 67–74. doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.01.113
9. Demircioglu, E., Sofuoglu, A. and Odabasi, M. (2011). Particle-phase dry deposition and air–soil gas exchange of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Izmir, Turkey. *Journal of Hazardous Materials*, 186(1), 328–335. doi: 10.1016/j.jhazmat.2010.11.005
10. Deng, Y., Peng, P., Ren, M., Song, J. and Huang, W. (2011). The winter effect on formation of PCDD/Fs in Guangzhou by vehicles: A tunnel study. *Atmospheric Environment*, 45(15), 2541–2548. doi: 10.1016/j.atmosenv.2011.02.022
11. DeVito, M., Bokkers, B., van Duursen, M. B. M., van Ede, K., Feeley, M., Antunes Fernandes Gáspár, E., Haws, L., Kennedy, S., Peterson, R. E., Hoogenboom, R., Nohara, K., Petersen, K., Rider, C., Rose, M., Safe, S., Schrenk, D., Wheeler, M. W., Wikoff, D. S., Zhao, B. and van den Berg, M. (2024). The 2022 world health organization reevaluation of human and mammalian toxic equivalency factors for polychlorinated dioxins, dibenzofurans and biphenyls. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 146, 105525. doi: 10.1016/j.yrtph.2023.105525
12. Ding, L., Li, Y., Wang, P., Li, X., Zhao, Z., Zhang, Q., Tuan, T. and Jiang, G. (2012). Seasonal trend of ambient PCDD/Fs in Tianjin City, northern China using active sampling strategy. *Journal of Environmental Sciences*, 24(11), 1966–1971. doi: 10.1016/S1001-0742(11)61058-9
13. Gao, L., Zhang, Q., Zhang, B., Liu, W. and Xiao, K. (2014). Polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in water and six fish species from Dongting Lake, China. *Chemosphere*, 114, 150–157. doi: 10.1016/j.chemosphere.2014.04.015
14. Güleğen, B., Noori, A. A. and Tasdemir, Y. (2024). Urban air PCDD/Fs: Atmospheric concentrations, temporal changes, gas/particle partitioning, possible sources and cancer risks. *Science of The Total Environment*, 934, 173231. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.173231
15. Güzel, B., Çetintürk, K., Canlı, O. and Karademir, A. (2024). Spatial distribution, source identification, and risk assessment of polychlorinated organic pollutants (PCDD/Fs and DL-PCBs) in the sediments of the largest urban water supply area (Iznik lake) in the Marmara region, Bursa, Türkiye. *CATENA*, 234, 107566. doi: 10.1016/j.catena.2023.107566
16. Harner, T., Green, N. J. L. and Jones, K. C. (2000). Measurements of Octanol–Air Partition Coefficients for PCDD/Fs: A Tool in Assessing Air–Soil Equilibrium Status. *Environmental Science & Technology*, 34(15), 3109–3114. doi: 10.1021/es000970m
17. Hippelein, M. and McLachlan, M. S. (1998). Soil/Air Partitioning of Semivolatile Organic Compounds. 1. Method Development and Influence of Physical–Chemical Properties. *Environmental Science & Technology*, 32(2), 310–316. doi: 10.1021/es9705699
18. Hsu, Y.-C., Que, D. E., Gou, Y.-Y., Tsou, T.-C., Liu, C.-K., Wang, Y.-L., Hou, W.-C., Lin, Y.-H., Liu, W.-Y., Chao, H.-R. and Lee, W.-J. (2018). National surveillance of 2,3,7,8-substituted polychlorinated dibenzo-p-dioxins/furans in soil in Taiwan. *Chemosphere*, 203, 239–252. doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.03.191
19. Japan Government, (2012). Dioxins, Japan.
20. Khairy, M., Barrett, K. and Lohmann, R. (2015). Changing sources of polychlorinated dibenzo- p -dioxins and furans in sediments and ecological risk for nekton in the lower Passaic River and Newark Bay, New Jersey, USA. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 35(3), 550–562. doi: 10.1002/etc.3223

21. Khoury, N., Martínez, M. Á., Paz-Graniel, I., Martínez-González, M. Á., Corella, D., Castañer, O., Martínez, J. A., Alonso-Gómez, Á. M., Wärnberg, J., Vioque, J., Romaguera, D., López-Miranda, J., Estruch, R., Tinahones, F. J., Lapetra, J., Serra-Majem, J. L., Bueno-Cavanillas, A., Tur, J. A., Sanjurjo, S. C. ... Salas-Salvadó, J. (2023). Dietary intake of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and furans, adiposity and obesity status. *Environmental Research*, 227, 115697. doi: 10.1016/j.envres.2023.115697
22. Le, L. T. H., Dat, N. D., Minh, N. H. and Nguyen, K.-A. (2019). Characteristics of PCDD/Fs in soil and sediment samples collected from A-So former airbase in Central Vietnam. *Science of The Total Environment*, 661, 27–34. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.163
23. Lei, R., Liu, W., He, Y., Jia, T., Li, C., Su, W. and Xing, Y. (2024). Spatial distributions, behaviors, and sources of PCDD/Fs in surface water and sediment from the Yangtze River Delta. *Environmental Research*, 251, 118540. doi: 10.1016/j.envres.2024.118540
24. Li, W., Li, C., Chen, Z., Ding, N. and Cai, Z. (2014). Levels of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in mountainous and park soils in Beijing, China. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 94(7), 691–711. doi: 10.1080/03067319.2014.891106
25. Liang, M., Gao, Y., Shen, Y., Zhang, X., Gu, J. and Ji, G. (2024). Serum metabolism distribution in individuals exposed to dioxins: A case study of residents near the municipal solid waste incinerators in China. *Science of The Total Environment*, 947, 174431. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.174431
26. Liang, Y., Liu, H., Wang, L., Zhao, J., Li, S., Yi, L., Jiang, S., Lu, Z. and Zhang, G. (2025). A new yeast-based bioreporter for simple, sensitive, and cost-effective detection of dioxin-like compounds. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 423, 136730. doi: 10.1016/j.snb.2024.136730
27. Liu, C., Yu, S., Song, W. and Peng, S. (2024). Investigation and risk assessment of dioxins and dioxin-like PCBs in main aquatic products in market from Shanghai. *Microchemical Journal*, 207, 111925. doi: 10.1016/j.microc.2024.111925
28. Liu, Y., Peng, P., Li, X., Zhang, S. and Ren, M. (2008). Polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans (PCDD/Fs) in water and suspended particulate matter from the Xijiang River, China. *Journal of Hazardous Materials*, 152(1), 40–47. doi: 10.1016/j.jhazmat.2007.06.071
29. Lohmann, R., Vrana, B., Muir, D., Smedes, F., Sobotka, J., Zeng, E. Y., Bao, L.-J., Allan, I. J., Astrahan, P., Barra, R. O., Bidleman, T., Dykyi, E., Estoppey, N., Fillmann, G., Greenwood, N., Helm, P. A., Jantunen, L., Kaserzon, S., Macías, J. V. ... Wong, C. S. (2023). Passive-Sampler-Derived PCB and OCP Concentrations in the Waters of the World—First Results from the AQUA-GAPS/MONET Network. *Environmental Science & Technology*, 57(25), 9342–9352. doi: 10.1021/acs.est.3c01866
30. Lu, F., Jiang, Y., Wu, D., Zhou, J., Li, S. and Zhang, J. (2016). Levels and profiles of polychlorinated dibenzo-p-dioxin and dibenzofurans in raw and treated water from water treatment plants in Shenzhen, China. *Environmental Pollution*, 211, 233–240. doi: 10.1016/j.envpol.2015.12.062
31. Muñoz-Arnanz, J., Roscales, J. L., Vicente, A., Ros, M., Barrios, L., Morales, L., Abad, E. and Jiménez, B. (2018). Assessment of POPs in air from Spain using passive sampling from 2008 to 2015. Part II: Spatial and temporal observations of PCDD/Fs and dl-PCBs. *Science of The Total Environment*, 634, 1669–1679. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.164

32. Ngo, T. H., Tsou, H. H., Chen, Y. F., Chen, Y. W. and Chi, K. H. (2018). Sources identification of PCDD/Fs in soil and atmospheric deposition in Taiwan. *Chemosphere*, 208, 374–381. doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.05.195
33. Ngo, T. H., Yang, Y.-H., Chen, Y.-C., Pan, W. C. and Chi, K. H. (2020). Continuous nationwide atmospheric PCDD/F monitoring network in Taiwan (2006–2016): Variation in concentrations and apportionment of emission sources. *Chemosphere*, 255, 126979. doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126979
34. Nieuwoudt, C., Quinn, L. P., Pieters, R., Jordaan, I., Visser, M., Kylin, H., Borgen, A. R., Giesy, J. P. and Bouwman, H. (2009). Dioxin-like chemicals in soil and sediment from residential and industrial areas in central South Africa. *Chemosphere*, 76(6), 774–783. doi: 10.1016/j.chemosphere.2009.04.064
35. Rao, Q., Wang, X., Zhang, Q., Hoogenboom, R., Li, H., Deng, Z., Song, W., Cheng, L., Liu, X., Guan, S., Song, W., Yao, C., Chen, S. and Zhou, J. (2022). New insights into the transfer and accumulation of dioxins and dioxin-like PCBs in the food web of farmed Chinese mitten crabs: A typical case from the Yangtze River area. *Journal of Hazardous Materials*, 436, 129178. doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.129178
36. Song, S., Chen, K., Huang, T., Ma, J., Wang, J., Mao, X., Gao, H., Zhao, Y. and Zhou, Z. (2023). New emission inventory reveals termination of global dioxin declining trend. *Journal of Hazardous Materials*, 443, 130357. doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.130357
37. Taiwan EPA, (2013). *Environmental Policy Monthly* XVI:12
38. Tang, X., Zeng, B., Hashmi, M. Z., Long, D., Yu, B., Ullah, N., Shen, C. and Chen, Y. (2014). PBDEs and PCDD/Fs in surface soil taken from the Taizhou e-waste recycling area, China. *Chemistry and Ecology*, 30(3), 245–251. doi: 10.1080/02757540.2013.844798
39. Thuan, N. T., Tsai, C. L., Weng, Y. M., Lee, T. Y. and Chang, M. B. (2011). Analysis of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and furans in various aqueous samples in Taiwan. *Chemosphere*, 83(6), 760–766. doi: 10.1016/j.chemosphere.2011.02.065
40. Tran, H. T., Lin, C., Hoang, H. G., Bui, X. T., Le, V. G. and Vu, C. T. (2022). Soil washing for the remediation of dioxin-contaminated soil: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 421, 126767. doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126767
41. Tran, H.-T., Hoang, H. G., Chacha, W. E., Mukherjee, S., Duong, T. V. H., Nguyen, N. S. H., Nguyen, K. N. and Naidu, R. (2024). A review of advanced bioremediation technologies for dioxin-contaminated soil treatment: Current and future outlook. *Chemosphere*, 366, 143400. doi: 10.1016/j.chemosphere.2024.143400
42. USEPA, (2001a). Correcting the Henry's Law Constant for Soil Temperature.
43. USEPA, (2001b). National Primary Drinking Water Standards.
44. van Drooge, B. L., Abalos, M., Abad, E., Adrados, M. A., Gomez, A., Gallés, P. and Grimalt, J. O. (2021). Qualitative and quantitative changes in traffic and waste incineration PCDD/Fs in urban air and soils under different seasonal conditions (Metropolitan Area of Barcelona). *Science of The Total Environment*, 753, 142149. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142149
45. Van den Berg, M., Birnbaum, L. S., Denison, M., De Vito, M., Farland, W., Feeley, M., Fiedler, H., Hakansson, H., Hanberg, A., Haws, L., Rose, M., Safe, S., Schrenk, D., Tohyama, C., Tritscher, A., Tuomisto, J., Tysklind, M., Walker, N. and Peterson, R. E. (2006). The 2005 World Health Organization Reevaluation of Human and Mammalian Toxic Equivalency Factors for Dioxins and Dioxin-Like Compounds. *Toxicological Sciences*, 93(2), 223–241. doi: 10.1093/toxsci/kfl055

46. Vassura, I., Passarini, F., Ferroni, L., Bernardi, E. and Morselli, L. (2011). PCDD/Fs atmospheric deposition fluxes and soil contamination close to a municipal solid waste incinerator. *Chemosphere*, 83(10), 1366–1373. doi: 10.1016/j.chemosphere.2011.02.072
47. Vernez, D., Oltramare, C., Sauvaget, B., Demougeot-Renard, H., Aicher, L., Roth, N., Rossi, I., Radaelli, A., Lerch, S., Marolf, V. and Berthet, A. (2023). Polychlorinated dibenzo-p-dioxins (PCDDs) and dibenzofurans (PCDFs) soil contamination in Lausanne, Switzerland: Combining pollution mapping and human exposure assessment for targeted risk management. *Environmental Pollution*, 316, 120441. doi: 10.1016/j.envpol.2022.120441
48. Wang, X., Rao, Q., Zhang, Q., Liu, C., Li, Y., Wang, D., Huang, D., Li, Y., Yao, C. and Song, W. (2024). Tissue distribution and exposure risk assessment of dioxins, dioxin-like polychlorinated biphenyls and perfluoroalkyl substances in red swamp crayfish. *Food Control*, 166, 110747. doi: 10.1016/j.foodcont.2024.110747
49. Wu, J., Hu, J., Wang, S., Jin, J., Wang, R., Wang, Y. and Jin, J. (2018). Levels, sources, and potential human health risks of PCNs, PCDD/Fs, and PCBs in an industrial area of Shandong Province, China. *Chemosphere*, 199, 382–389. doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.02.039
50. Yu, J., Li, H., Liu, Y. and Wang, C. (2023). PCDD/Fs in indoor environments of residential communities around a municipal solid waste incineration plant in East China: Occurrence, sources, and cancer risks. *Environment International*, 174, 107902. doi: 10.1016/j.envint.2023.107902
51. Yukhimets, A., Kuzu, S. L., Akyüz, E. and Saral, A. (2020). Investigation of geospatial distribution of PAH compounds in soil phase and determination of soil–air exchange direction in a megacity. *Environmental Geochemistry and Health*, 42(8), 2471–2484. doi: 10.1007/s10653-019-00369-5
52. Zhang, Q., Gao, L., Zheng, M., Liu, L. and Li, C. (2014). Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins (PCDDs) and Dibenzofurans (PCDFs) and Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in Water Samples from the Middle Reaches of the Yangtze River, China. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 92(5), 585–589. doi: 10.1007/s00128-013-1189-y

