



## İnegöl'de Mevsimsel Atmosferik PCB Konsantrasyonlarının Belirlenmesi

Burak ÇALIŞKAN<sup>1</sup>, S. Sıddık CİNDORUK<sup>2</sup>, Mustafa ODABAŞI<sup>3</sup>

<sup>1</sup>B.U.Ü., Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Bölümü, Bursa, Türkiye, ORCID: 0000-0002-8729-9441

<sup>2</sup>B.U.Ü., Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Bölümü, Bursa, Türkiye, ORCID: 0000-0001-7536-0332

<sup>3</sup>Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Müh. Bölümü, İzmir, Türkiye, ORCID: 0000-0002-0506-0470

Corresponding Author: Burak ÇALIŞKAN, [burakcaliskan@uludag.edu.tr](mailto:burakcaliskan@uludag.edu.tr),

### Özet

Bu çalışma, İnegöl ilçesinde atmosferik PCB konsantrasyonlarının mevsimsel değişimini ve bölgesel farklılıklarını incelemiştir. Sonuçlar, yaz aylarında PCB konsantrasyonlarının kış aylarına kıyasla 1.56 kat daha yüksek olduğunu göstermiştir. Yaz dönemi örnekleme kampanyasında ortalama toplam  $\sum_{41}$  PCB konsantrasyonu  $256.37 \pm 136.6$   $\text{pg}/\text{m}^3$  olarak belirlenirken, kış döneminde bu değer  $161.62 \pm 89.84$   $\text{pg}/\text{m}^3$  olarak ölçülmüştür. Yaz mevsiminde baskın homolog grup 5 klorlu PCB'ler (5-Cl), kış mevsiminde ise 3 klorlu PCB'ler (3-Cl) olarak tespit edilmiştir. Elde edilen veriler, sanayi, kentsel alanlar ve arıtma tesislerinin PCB konsantrasyonları üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur. Örneğin, yaz döneminde kentsel alanlarda ortalama PCB konsantrasyonu en yüksek seviyede ( $309.63 \pm 108.12$   $\text{pg}/\text{m}^3$ ) ölçülmüşken, kış döneminde arıtma tesisi bölgesindeki konsantrasyonlar ( $290.53 \pm 116.10$   $\text{pg}/\text{m}^3$ ) baskın olmuştur. Çalışmada, PCB türlerinin mevsimsel dağılımı ve bölgesel kaynaklara bağlı olarak farklılık gösterdiği görülmüştür. Önceki literatürle karşılaştırıldığında, elde edilen konsantrasyonlar hem daha düşük hem de daha yüksek değerler gösterebilmiştir. Bu farklılıklar, örnekleme tarihleri, meteorolojik koşullar ve bölgesel sanayi faaliyetlerindeki değişimlerle ilişkilendirilmiştir.

### Article Info

Research Article

Received:02/12/2024

Accepted:24/12/2024

### Anahtar Kelimeler

PCB, Pasif Hava Örnekleyici, Mevsimsel Karşılaştırma

### Öne Çıkanlar

İnegöl ilçesinde atmosferik PCB konsantrasyonlarının mevsimsel farklılıkları incelenmiştir. Yaz döneminde toplam PCB konsantrasyonları, kış dönemine göre 1.56 kat daha yüksektir. Bulgular, uluslararası literatür ile karşılaştırılmıştır.

## Seasonal Variation of Atmospheric PCB Concentrations in İnegöl

### Abstract

*This study investigated the seasonal variations and regional differences in atmospheric PCB concentrations in the İnegöl district. The results showed that PCB concentrations were 1.56 times higher in summer compared to winter. During the summer sampling campaign, the average total  $\sum_{41}$  PCB concentration was determined as  $256.37 \pm 136.6$  pg/m<sup>3</sup>, whereas it was measured as  $161.62 \pm 89.84$  pg/m<sup>3</sup> in winter. The dominant homolog group in summer was 5-chlorinated PCBs (5-Cl), while in winter, 3-chlorinated PCBs (3-Cl) were predominant. The data revealed the impact of industries, urban areas, and treatment facilities on PCB concentrations. For example, in the summer period, the highest average PCB concentration was measured in urban areas ( $309.63 \pm 108.12$  pg/m<sup>3</sup>), whereas in winter, concentrations were highest near treatment facilities ( $290.53 \pm 116.10$  pg/m<sup>3</sup>). The study demonstrated that the seasonal distribution of PCB types varied depending on regional sources. Compared to previous literature, the obtained concentrations exhibited both lower and higher values. These differences were attributed to sampling periods, meteorological conditions, and changes in regional industrial activities.*

### Keywords

*PCB, Passive Air Sampler, Seasonal Comparison*

### Highlights

*Seasonal variations in atmospheric PCB concentrations in İnegöl were investigated. Total PCB concentrations in the summer were 1.56 times higher than in the winter. The findings were compared with the international literature.*

## 1. Giriş

Kalıcı organik kirleticiler (KOK'lar), genellikle halojen atomları içeren (örneğin klorlanmış ya da bromlanmış) karbon bazlı kimyasal bileşiklerden oluşan ve doğada uzun süre kalabilen bir grup kirletici maddedir. Bu bileşikler, çevreye yayılma ve biyolojik birikim özellikleri sayesinde insan sağlığı ve ekosistemler için ciddi riskler oluşturabilir. KOK'lar, besin zincirine entegre olarak organizmalarda birikim gösterir ve bu birikim süreçleri, düşük bozunma hızları ve çevresel taşıyım kapasiteleri nedeniyle özellikle tehlikelidirler. Üstelik bu kirleticiler uzak bölgelere de taşınabilir ve kaynağının tespit edilemediği, insan etkinliğinden uzak bölgelerdeki su ve kara ekosistemlerinde birikerek küresel ölçekte çevresel ve sağlık sorunlarına yol açabilirler [1].

KOK'ların özellikleri arasında kimyasal kararlılık, hidrofobiklik ve lipofiliklik öne çıkar [2]. Bu özellikler, KOK'ların çevresel ortamda uzun süre kalabilmesine ve yağ dokularında birikmesine neden olur. Özellikle sucul ve karasal ekosistemlerde uzun mesafeli taşıyım potansiyeli, bu kirleticilerin yerel, bölgesel ve küresel ölçekte yayılımına katkıda bulunur. KOK'lar atmosferde gaz ya da partikül fazında bulunarak atmosferik süreçler aracılığıyla taşınır ve toprağa, suya veya bitkilere çökerek çevresel döngüde

yer alır [3]. Ayrıca, biyolojik birikim yoluyla besin zincirinin üst seviyelerindeki organizmalarda yüksek konsantrasyonlara ulaşabilir [4].

KOK'lar arasında önemli bir yere sahip olan poliklorlu bifeniller (PCB'ler), doğada ve canlı organizmalarda uzun süre kalabilen ve çevre için büyük tehdit oluşturan kirleticilerdir. Bu kirleticiler tamamen insan kaynaklı aktiviteler sonucu üretilir ve doğada parçalanmaları oldukça zor olan özellikler taşır. PCB'ler, 1920'li yıllarda transformatör ve kapasitörler, plastikler, yağ bazlı boyalar, kablo yalıtımı gibi çeşitli ürünlerde kullanılmaya başlanmıştır [5]. Endüstride geniş bir uygulama alanına sahip olmaları, bu bileşiklerin yaygın şekilde çevreye salınmasına neden olmuştur.

Havada bulunan PCB'ler, doğrudan veya dolaylı olarak birçok kaynaktan atmosfere salınabilir. Bu kaynaklar arasında endüstriyel tesisler, askeri alanlar, kirlenmiş su toplama bölgeleri, düzenli depolama ve tehlikeli atık sahaları, elektrik ark ocakları, yakma ve diğer yanma süreçleri yer alır. Ayrıca, tarım arazilerinde kullanılan kanalizasyon çamurları ve inşaat malzemeleri de önemli salım kaynakları arasında sayılabilir [6]. PCB'ler, genellikle PCB içeren ya da klorlanmış materyallerin yakılması, çöp depolama alanlarından ya da çeşitli ara kesitlerdeki kütle transferleri aracılığıyla atmosfere salınır [7].

PCB'ler ilk olarak 1881 yılında laboratuvar ortamında sentezlenmiş ve ticari üretimleri 1929 yılında başlamıştır [8]. 1960 ve 1970'lerde kullanım oranları zirve yapmıştır [6]. Ancak, çevresel ve sağlık üzerindeki olumsuz etkilerinin fark edilmesiyle birlikte 1970'lerin sonlarına doğru birçok ülkede üretimleri ve kullanımları yasaklanmış ya da sınırlandırılmıştır [8]. Her ne kadar üretimleri durdurulmuş olsa da dünyanın dört bir yanından alınan çevre örneklerinde PCB'lere rastlanmaya devam edilmektedir [9–11].

Bu bileşiklerin çevresel yayılımı ve kalıcılığı, hava, su ve toprak gibi ortamların yanı sıra biyolojik dokularda da tespit edilebilmeleri nedeniyle geniş çaplı bir izleme ve kontrol gerektirmektedir [12]. Özellikle yüksek lipofiliklikleri nedeniyle canlı organizmalarda yağ dokularında birikerek toksik etkiler gösterebilirler. İnsan sağlığı üzerindeki etkileri arasında bağışıklık sistemi baskılanması, hormonal bozulmalar, üreme bozuklukları ve kanser riski yer alır. Ayrıca, PCB'ler nörotoksik etkiler gösterebilir ve gelişimsel bozukluklara yol açabilir [13,14].

Günümüzde atmosferik PCB'lerin izlenmesi, çevresel ve insan sağlığı üzerindeki etkileri nedeniyle önemli bir araştırma alanı olmaya devam etmektedir [15–18]. Bursa genelinde bu kirleticilere yönelik çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiş ve farklı ilçelerdeki atmosferik PCB konsantrasyonları ölçülerek raporlanmıştır [19–24]. İnegöl ilçesinde ise daha önce iki farklı noktada atmosferik PCB konsantrasyonları ölçülmüş olmakla birlikte [25], bu alandaki çalışmaların sınırlı sayıda olması, ilçenin atmosferik PCB profiline ilişkin kapsamlı bir değerlendirme yapılmasını gerekli kılmaktadır. Bu çalışmada, İnegöl ilçesinde örnekleme noktalarının sayısı artırılarak, bölgenin atmosferik PCB konsantrasyonları daha geniş bir perspektiften incelenmiş ve literatüre yeni veriler kazandırılmıştır.

## 2. Materyal ve Yöntem

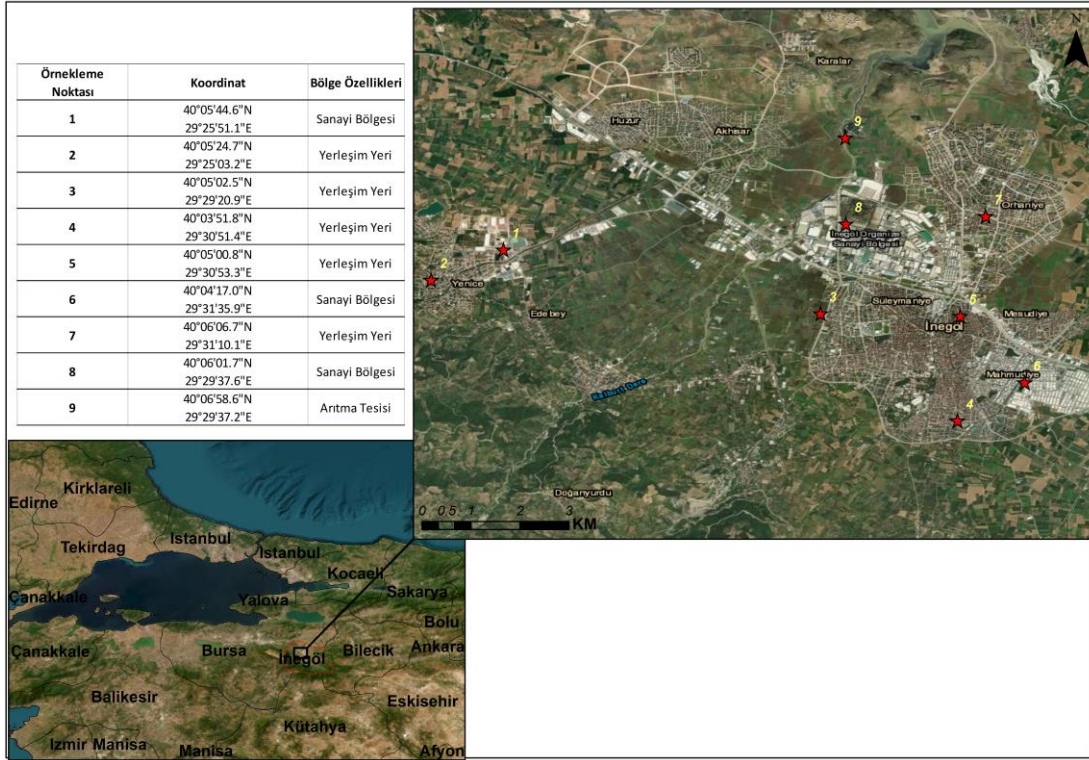
### 2.1. Örnekleme noktaları ve örnekleme programı

İnegöl ilçesi, Bursa'nın güneydoğusunda yer almakta olup yaklaşık 300,000 kişilik bir nüfusa sahiptir. İlçede, İnegöl Organize Sanayi Bölgesi (İOSB), İnegöl Mobilya Ağaç İşleri İhtisas Organize Sanayi Bölgesi ve Yenice Organize Sanayi Bölgesi olmak üzere üç farklı sanayi bölgesi bulunmaktadır.

İnegöl Organize Sanayi Bölgesi'nde yaklaşık 70 işletme faaliyet göstermektedir. İnegöl Mobilya Ağaç İşleri İhtisas Organize Sanayi Bölgesi'nde ise yaklaşık 83 firma üretim yaparken, Yenice Organize Sanayi Bölgesi'nde yaklaşık 42 aktif firma bulunmaktadır. İOSB'nin kurulmasından sonra, orman ürünleri sektörünün yanı sıra tekstil, otomotiv yan sanayi ve diğer sanayi kolları da önemli bir gelişim göstermiştir. Bölgedeki işletmelerin çoğunluğunu tekstil ve konfeksiyon sektöründeki firmalar oluşturmakla birlikte, sünger üretimi, sunta ve kontrplak üretimi, gıda ve yem üretimi, ambalaj, cam, orman ürünleri, mobilya, kimya, döküm ve otomotiv yan sanayi gibi çok çeşitli sektörlerde faaliyet gösteren birçok işletme de bulunmaktadır [26].

İlçede faaliyet gösteren fabrikaların il içindeki katma değere katkı oranı %84, il dışına ise %16'dır. Bu şehir, Türkiye toplam ihracatının %1'ini, mobilya ihracatının %10'unu ve yurt içi mobilya talebinin %40'unu karşılamaktadır. Ayrıca, ilçeden geçen Bursa-Ankara karayolu, oldukça yoğun bir trafik yüküne sahiptir. 2020-2022 yılları arasında, bu güzergâhı ortalama 37.000 araç kullanmıştır [26]. İlçenin topoğrafik yapısının çanak şeklinde olması nedeniyle, gün boyunca ve akşam saatlerinde şehir üzerinde tersinim (inversiyon) olayı sıkça gözlemlenmektedir [27,28].

Bursa'nın İnegöl ilçesinde atmosferik PCB konsantrasyonlarının tespiti için gerçekleştirilen bu çalışmada yaz örnekleri 29/06/2020-28/08/2020 tarihlerinde, kış örnekleri ise 17/12/2020-18/02/2021 tarihleri arasında pasif hava örnekleyicisi yardımıyla poliüretan köpük diskler (PÜK'ler) kullanılarak alınmıştır. Örnekleme kampanyasında 9 farklı nokta seçilmiş olup, her noktadan tek bir örnek alınmıştır (Şekil 1). Örnekleme noktaları seçilirken olası kaynaklar, güvenlik ve yerleşim gibi parametreler göz önünde bulundurulmuştur.



Şekil 1. Örnekleme noktaları

## 2.2. Numune hazırlama ve analiz

Atmosferik numuneler poliüretan köpük (PÜK) disk içeren pasif hava örnekleme cihazları (PAS) ile toplanmıştır. Her iki örnekleme kampanyasında da toplanan numunelere ekstraksiyon işlemi öncesinde analitik verimin belirlenebilmesi için PCB 14, PCB 65 ve PCB 166 surrogate standardı eklenmiştir. Bu işlemin ardından numuneler 1:1 aseton-hekzan karışımı ile 12 saat süresince Soxhlet ekstraksiyon metodu ile ekstrakte edilmiştir. Ekstrakt hacimleri döner buharlaştırıcı ve azot (N<sub>2</sub>) gazı kullanılarak 2 mL'ye kadar yoğunlaştırılmıştır. Hacmi indirilmiş numuneler 3 g silisik asit, 2 g alümina ve 1 cm Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> içersen kolondan geçirilmiştir. Kolon ilk olarak 20 mL diklorometan (DCM) ve 20 mL petrol eteri (PE) ile yıkanmıştır. Daha sonra, 2 mL'lik numune kolona eklenmiştir. Eklenen numunenin kolondan geçmesine müsaade edildikten sonra kolona 35 mL PE eklenmiştir. PCB'leri içeren numune toplandıktan sonra hacmi azaltılmış ve çözücü, yüksek saflıkta azot akışı kullanılarak hekzan ile değiştirilmiştir. Numune hacmi 5 mL'ye kadar yoğunlaştırılarak şişeye 10 mL hekzan eklenmiştir. Hacim tekrar 5 mL'ye düşürüldükten sonra, numuneye tekrar 5 mL hekzan eklenmiş ve son numunenin hacmi 1 mL olacak şekilde azot gazı ile azaltılmıştır. Viallere alınan örnekler Agilent 6890 N gaz kromatografisi (GC)-kütle spektrometresi (Agilent 5973 inert MSD) kullanılarak analizi gerçekleştirilmiştir. Tüm numuneler, analiz yapılana kadar dondurucuda saklanmıştır [7,29,30].

## 2.3. Hacimsel hava konsantrasyonları

Sonuçlar, hava konsantrasyonu (C<sub>Hava</sub>) olarak pg/m<sup>3</sup> biriminde raporlanmış ve bu değer, örnekleyici konsantrasyonunun (C<sub>PAS</sub>; ng), örnekleme süresi (t, gün) ve örnekleme hızı (R, m<sup>3</sup>/gün) çarpımına bölünerek elde edilmiştir [31].

$$C_{Hava} = \frac{C_{PAS}}{R \times t} \quad (1)$$

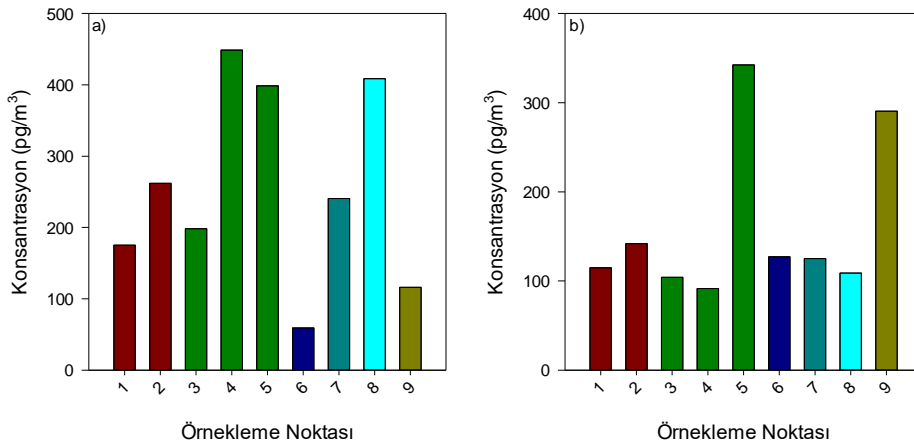
## 2.4. Kalite kontrol

Örnekleme kampanyasının elde edilen ortalama verim PCB 14, 65 ve 166 için sırasıyla %100.1±8.3, %103±12.6 ve %90±13.4 olarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında numunelerin, taşınması ve analiz sürecinde, örnekteki kirletici seviyelerinin dış etkenlerden etkilenmesini önlemek için şahit numuneler de alınmıştır. Şahit numunelere, gerçek örneklerde uygulanan tüm işlemler aynı şekilde uygulanmıştır. LOD (Limit of Detection) değeri hesaplanırken, şahit numunelerin ortalama değerine üç kat standart sapma eklenerek elde edilmiştir [32]. Çalışma kapsamında LOD'nin altında kalan örnek sonuçları dikkate alınmamıştır.

## 3. Bulgular ve Tartışma

Atmosferik PCB konsantrasyonları, genellikle sıcak aylarda soğuk aylara göre daha yüksek bulunur [22,33]. Bunun temel nedeni, yaz aylarında sıcaklıkların artmasıyla birlikte kirletici kaynaklardan buharlaşmanın yoğunlaşmasıdır. Bu durum, atmosferde yüksek konsantrasyonlarda PCB birikimine yol açmaktadır [34]. Gerçekleştirdiğimiz çalışmanın sonuçları da bu durumu desteklemektedir; yaz aylarında tespit edilen toplam ortalama PCB konsantrasyonu, kış aylarına kıyasla 1.56 kat daha yüksek bulunmuştur.

Yaz döneminde gerçekleştirilen örnekleme kampanyasında, ilçenin toplam  $\sum_{41}$  PCB konsantrasyonları 59.22 pg/m<sup>3</sup> ile 448.74 pg/m<sup>3</sup> arasında değişmekte olup, ortalama konsantrasyon 256.37±136.6 pg/m<sup>3</sup> olarak ölçülmüştür. Kış döneminde yapılan örneklemede ise  $\sum_{41}$  PCB konsantrasyonları 91.44 pg/m<sup>3</sup> ile 342.32 pg/m<sup>3</sup> arasında değişmiş ve ortalama konsantrasyon 161.62±89.84 pg/m<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir. Örnekleme noktalarına ait toplam PCB konsantrasyonları Şekil 2'de sunulmuştur.



**Şekil 2.** Örneklem noktelerindeki atmosferik PCB konsantrasyonlarının mevsimsel değişimi; a) yaz dönemi, b) kış dönemi

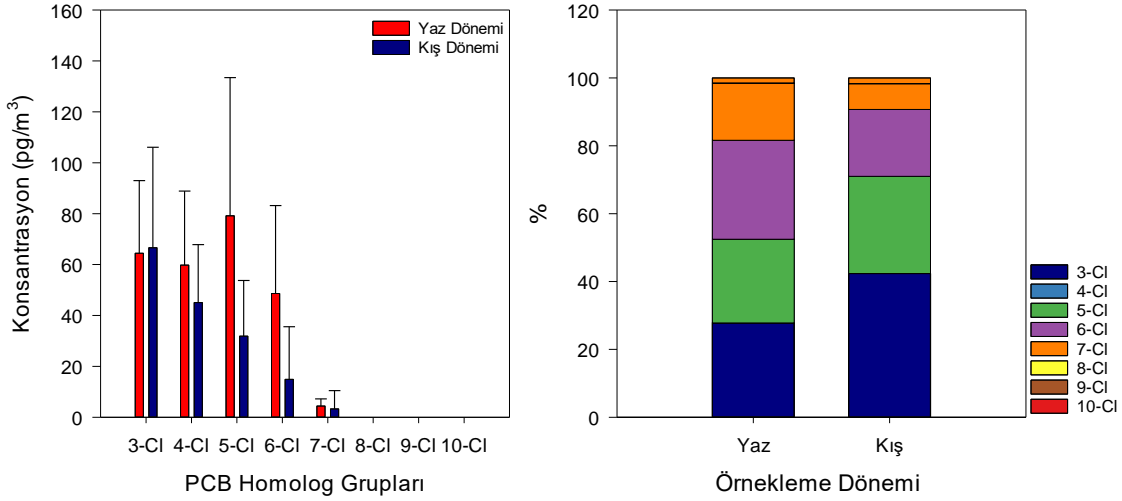
Küçük (2020) tarafından İnegöl'de iki farklı noktada gerçekleştirilen çalışmada, örnekleme yapılan iki nokta bu çalışmada kullanılan 6 ve 8 numaralı örneklem noktaları ile örtüşmektedir [25]. Küçük (2020)'nin çalışmasında, 6 numaralı örneklem noktasında gaz fazındaki  $\sum_{82}$  PCB konsantrasyonlarının 0.28 ng/m<sup>3</sup> ile 3.11 ng/m<sup>3</sup> aralığında değişim

gösterdiği bildirilmiştir. Benzer şekilde 8 numaralı örnekleme noktasında gaz fazındaki  $\sum_{82}$  PCB konsantrasyonları  $0.41 \text{ ng/m}^3$  ile  $3.49 \text{ ng/m}^3$  arasında ölçülmüştür. Bu değerler, bu çalışmada elde edilen konsantrasyonların oldukça üstünde bulunmuştur. Bu farklılıkların birkaç olası nedeni bulunmaktadır. Örnekleme tarihleri, meteorolojik koşullar ve endüstriyel aktiviteler gibi faktörler, PCB konsantrasyonlarındaki varyasyonu etkileyebilir. Örneğin, Küçük (2020) çalışmasında ölçümler, yoğun sanayi faaliyetlerinin olduğu bir dönemde yapılmış olabilirken, bu çalışmada yapılan örnekleme farklı bir zaman diliminde gerçekleşmiş ve sanayi kaynaklı emisyonlar farklı seviyelerde olmuş olabilir. Literatürde, aynı örnekleme noktalarında farklı yıllarda yapılan örnekleme kampanyalarından elde edilen PCB konsantrasyonlarının giderek azaldığına dair çalışmalar da bulunmaktadır. Örneğin, Cindoruk ve Taşdemir (2008), 2004-2005 yılları arasında Bursa Uludağ Üniversitesi Görükle Kampüsü'nde gerçekleştirdikleri çalışmalarında, atmosferdeki 41 farklı PCB türünü analiz etmiş ve gaz fazında ortalama PCB konsantrasyonunu  $328.1 \pm 284.2 \text{ pg/m}^3$  olarak rapor etmişlerdir [35]. Aynı kampüste, 2008-2009 yılları arasında gerçekleştirilen diğer bir çalışmada ise yıllık ortalama  $\sum_{83}$  PCB konsantrasyonu  $268.1 \pm 166.7 \text{ pg/m}^3$  olarak ölçülmüştür [36].

Bununla birlikte, Birgül ve arkadaşları (2017) tarafından Bursa'daki kırsal bir alan (Uludağ) ile endüstriyel bir bölge (Kestel Organize Sanayi Bölgesi) arasında atmosferik PCB konsantrasyonlarının karşılaştırıldığı çalışmada, soğuk aylarda kırsal bölgede  $26.3 \text{ pg/m}^3$ , endüstriyel bölgede ise  $58 \text{ pg/m}^3$ ; sıcak aylarda ise sırasıyla  $12.6 \text{ pg/m}^3$  ve  $320 \text{ pg/m}^3$  değerleri belirlenmiştir [37]. Bu çalışmada ölçülen PCB konsantrasyonları, Birgül ve arkadaşlarının (2017) soğuk aylar için rapor ettiği hem kırsal hem de endüstriyel bölge verilerinden daha yüksek bulunmuştur. Ancak, sıcak aylarda kırsal bölgede tespit ettikleri konsantrasyonlar bu çalışmada ölçülen değerlere kıyasla daha düşük, endüstriyel bölgede rapor ettikleri konsantrasyonlar ise daha yüksek bulunmuştur.

Xu et al., (2019) Çin'de bir endüstri bölgesinde gerçekleştirdikleri çalışmalarında 29 farklı PCB türünü analiz etmiş ve kış aylarında ortalama PCB konsantrasyonunu  $219 \pm 382 \text{ pg/m}^3$ , yaz aylarında ise  $262 \pm 176 \text{ pg/m}^3$  olarak raporlamışlardır. Analiz edilen PCB tür sayısı bu çalışmadakine kıyasla daha az olmasına rağmen, özellikle kış aylarında ölçülen konsantrasyonlar İnegöl'deki değerlere göre daha yüksek bulunmuştur. İnegöl'de endüstriyel faaliyetler daha çok tekstil, gıda, kimya, cam ve makine gibi sektörlerden oluşurken, Xu ve ark. tarafından incelenen bölgede biyofarmasötik, elektronik üretimi, yeni malzemeler ve enerji gibi sektörlerin ağırlıkta olduğu bir sanayi yapısı söz konusudur. Bu sektör farklılıkları, konsantrasyonlar arasındaki farkların nedeni olabilir.

Bölgelerin karakteristik özelliklerine göre toplam  $\sum_{41}$  PCB konsantrasyonlarının mevsimsel değişimleri incelendiğinde, yaz döneminde en yüksek ortalama konsantrasyon kentsel bölgede tespit edilmiştir. Kış döneminde ise, örnekleme kampanyası sırasında en yüksek ortalama konsantrasyonun arıtma tesisinin bulunduğu bölgede olduğu belirlenmiştir. Bölgesel ortalama PCB konsantrasyonu ortalaması yaz döneminde sanayi bölgesinde  $214.35 \pm 177.99 \text{ pg/m}^3$ , kentsel bölgede  $309.63 \pm 108.12 \text{ pg/m}^3$  ve arıtma tesisi bölgesinde  $116.10 \text{ pg/m}^3$  olarak hesaplanmıştır. Kış örnekleme kampanyasında ise bu konsantrasyonlar ortalamaları sanayi bölgesinde  $119.73 \pm 6.48 \text{ pg/m}^3$ , kentsel bölgelerde  $160.98 \pm 103.20 \text{ pg/m}^3$  ve arıtma tesisi bölgesinde  $290.53 \text{ pg/m}^3$  olarak tespit edilmiştir.



**Şekil 3.** PCB homolog gruplarının mevsimsel konsantrasyonu ve yüzdesel dağılımı

İlçedeki ortalama PCB konsantrasyonlarının homolog gruplarına göre dağılımı incelendiğinde, yaz mevsiminde gerçekleştirilen örnekleme kampanyasında en yüksek konsantrasyonun 5 klorlu bileşiklerde olduğu belirlenmiştir ( $79.19 \pm 54.27 \text{ pg/m}^3$ ). Buna karşılık, kış mevsiminde en yüksek konsantrasyona sahip homolog grup 3 klorlu PCB'ler olarak tespit edilmiştir ( $66.57 \pm 39.53 \text{ pg/m}^3$ ). Yaz dönemindeki örneklemede homolog gruplar oransal olarak 5-Cl > 3-Cl > 4-Cl > 6-Cl > 7-Cl sırasıyla baskın olarak belirlenirken, kış dönemindeki örneklemede sıralama 3-Cl > 4-Cl > 5-Cl > 6-Cl > 7-Cl şeklinde tespit edilmiştir (Şekil 3). Örnekleme bölgeleri arasında mevsimsel farkların olduğu gözlemlenmiştir. Yüksek klorlanmış PCB'ler (örneğin HeptaCB ve OctaCB) ise özellikle kış mevsiminde daha düşük oransal değerler göstermiştir. Bu homolog grupların daha az uçucu özellikleri nedeniyle toprakta birikebileceği, zamanla buharlaşma veya rüzgar yoluyla atmosfere yeniden taşınarak atmosferik konsantrasyonlara katkıda bulunabileceği düşünülmektedir.

Kış mevsimindeki örnekleme kampanyasında, örnekleme noktalarında oransal olarak 3 klorlu PCB'ler baskın grubu oluşturmuş, yalnızca 9 numaralı örnekleme noktasında 5 klorlu PCB'ler baskın olarak tespit edilmiştir. Yaz mevsiminde ise 1, 6 ve 9 numaralı örnekleme noktalarında 3 klorlu PCB'ler baskınken; 3, 4, 5, 7 ve 8 numaralı örnekleme noktalarında 5 klorlu PCB'ler ve 2 numaralı örnekleme noktasında ise 4 klorlu PCB'ler en baskın grup olarak belirlenmiştir.

Analiz edilen 41 PCB türünden her iki mevsimde de benzer sayıda tür tespit edilmiştir. PCB 82, 187, 183, 177, 171, 191, 169, 170, 199, 208, 195, 194, 205, 206, 209 türlerine hiçbir örnekleme noktasında ve hiçbir mevsimde rastlanmamıştır. Yaz mevsiminde en yüksek konsantrasyona sahip 5 tür PCB 52, 18, 101, 95 ve 31 olarak belirlenmişken, kış mevsiminde en yüksek konsantrasyona sahip 5 tür PCB 18, 52, 31, 28, 33 olarak tespit edilmiştir. Her iki mevsimde de tespit edilen türlerin konsantrasyonları Tablo 1'de sunulmuştur.



**Tablo 1.** PCB türlerin mevsimsel dağılımı

PCB Türleri	Ortalama Yaz Konsantrasyonları (pg/m <sup>3</sup> )	PCB Türleri	Ortalama Yaz Konsantrasyonları (pg/m <sup>3</sup> )	PCB Türleri	Ortalama Kış Konsantrasyonları (pg/m <sup>3</sup> )	PCB Türleri	Ortalama Kış Konsantrasyonları (pg/m <sup>3</sup> )
PCB-18	17.76	PCB-132	7.5	PCB-18	19.7	PCB-132	2.11
PCB-17	9.18	PCB-105	7.55	PCB-17	9.21	PCB-105	4.03
PCB-31	14.77	PCB-138	11.37	PCB-31	13.7	PCB-138	4.85
PCB-28	11.47	PCB-158	2.97	PCB-28	12.22	PCB-158	2.14
PCB-33	11.23	PCB-187	0	PCB-33	11.74	PCB-187	0
PCB-52	25.31	PCB-183	0	PCB-52	17.68	PCB-183	0
PCB-49	9.64	PCB-128	3.49	PCB-49	5.25	PCB-128	0.42
PCB-44	8.86	PCB-177	0	PCB-44	9.29	PCB-177	0
PCB-74	6.01	PCB-171	0	PCB-74	6.19	PCB-171	0
PCB-70	9.95	PCB-156	4.57	PCB-70	6.65	PCB-156	0.68
PCB-95	15.51	PCB-180	4.41	PCB-95	5.83	PCB-180	3.3
PCB-101	15.7	PCB-191	0	PCB-101	7.03	PCB-191	0
PCB-99	6.08	PCB-169	0	PCB-99	4.96	PCB-169	0
PCB-87	9.1	PCB-170	0	PCB-87	1.85	PCB-170	0
PCB-110	14.52	PCB-199	0	PCB-110	1.93	PCB-199	0
PCB-82	0	PCB-208	0	PCB-82	0	PCB-208	0
PCB-151	3.28	PCB-195	0	PCB-151	0	PCB-195	0
PCB-149	8.15	PCB-194	0	PCB-149	0.18	PCB-194	0
PCB-118	10.73	PCB-205	0	PCB-118	6.19	PCB-205	0
PCB-153	7.28	PCB-206	0	PCB-153	4.49	PCB-206	0
		PCB-209	0			PCB-209	0
$\Sigma_{41}$ PCB		256.37±136.60		$\Sigma_{41}$ PCB		161.62±89.84	

Çevresel izleme ve PCB'lerin varlığının takibi amacıyla, 7 PCB türü (PCB 28, 52, 101, 118, 138, 153 ve 180) indikatör olarak kullanılır [5]. Bu türlerin konsantrasyonları yaz mevsiminde  $86.27 \pm 6.74$  pg/m<sup>3</sup> kış mevsiminde ise  $55.76 \pm 5.16$  pg/m<sup>3</sup> olarak hesaplanmıştır. Her iki mevsimde de bu türlerin toplam konsantrasyona oranı %34 olarak tespit edilmiştir. Mao vd., (2020)'nin Çin'in kırsal kesimlerinde gerçekleştirdikleri çalışmada, indikatör PCB'lerin ortalama konsantrasyonu  $145 \pm 80$  pg/m<sup>3</sup> olarak bulunmuştur. Dreyer ve Minkos'un (2023)'un Almanya'daki arka plan noktalarında yaptıkları çalışmada ise bu konsantrasyonlar sırasıyla 8.4 ve 6.9 pg/m<sup>3</sup> olarak tespit edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen ortalama PCB konsantrasyonunun, Çin ve Almanya'da gerçekleştirilen çalışmalar arasında bir seviyede olduğu belirlenmiştir.

#### 4. Sonuç

Gerçekleştirilen çalışma, İnegöl ilçesinde atmosferik PCB konsantrasyonlarının mevsimsel dağılımını ortaya koymuştur. Yaz aylarında artan sıcaklıkların kirletici kaynaklardan buharlaşmayı yoğunlaştırdığı ve atmosferde PCB birikimini artırdığı

belirlenmiştir. Çalışmada, yaz dönemi ortalama toplam PCB konsantrasyonu, kış dönemine kıyasla 1.56 kat daha yüksek bulunmuştur.

Bölgeler arası karşılaştırmalar, PCB konsantrasyonlarında sanayi faaliyetlerinin, örnekleme tarihleri ve meteorolojik koşulların etkili olabileceğini göstermiştir. Kentsel bölgelerde yaz döneminde en yüksek konsantrasyonlar gözlemlenirken, kış döneminde arıtma tesisine yakın bölgelerde daha yüksek konsantrasyonlar tespit edilmiştir. Homolog grup analizi, yazın 5 klorlu PCB'lerin, kışın ise 3 klorlu PCB'lerin baskın olduğunu göstermiştir. Bu durum, düşük klorlu PCB'lerin daha uçucu doğasını ve yüksek klorlu PCB'lerin çevresel birikim potansiyelini doğrulamaktadır.

Bu sonuçlar, atmosferik PCB'lerin kaynağı, dağılımı ve mevsimsel değişkenliği hakkında bilgiler sunmaktadır. İnegöl ilçesindeki sanayi faaliyetleri ve arıtma tesislerinin PCB birikimindeki rolü, daha ileri çalışmalarla detaylandırılmalıdır. Ayrıca, bu bulgular çevresel izleme programlarının geliştirilmesi ve kirletici kontrol stratejilerinin oluşturulması için temel teşkil etmektedir.

### Çıkar Çatışması

Bu makale ile ilgili herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

### Yazar Katkısı

Yazarlar eşit katkı sağlamıştır.

## 5. Kaynaklar

- [1] S.L. Kuzu, A. Saral, G. Güneş, A. Karadeniz, Evaluation of background soil and air polychlorinated biphenyl (PCB) concentrations on a hill at the outskirts of a metropolitan city, *Chemosphere* 154 (2016) 79–89. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.03.095>.
- [2] M.A. Ashraf, Persistent organic pollutants (POPs): a global issue, a global challenge, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 24 (2017) 4223–4227. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5225-9>.
- [3] E. Gregoris, E. Argiriadis, M. Vecchiato, S. Zambon, S. De Pieri, A. Donato, D. Contini, R. Piazza, C. Barbante, A. Gambaro, Gas-particle distributions, sources and health effects of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), polychlorinated biphenyls (PCBs) and polychlorinated naphthalenes (PCNs) in Venice aerosols, *Sci. Total Environ.* 476–477 (2014) 393–405. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.01.036>.
- [4] P. Swaminaathan, A. Saravanan, P.R. Yaashikaa, A.S. Vickram, Recent advances in photocatalytic degradation of persistent organic pollutants: Mechanisms, challenges, and modification strategies, *Sustain. Chem. Environ.* 8 (2024) 100171. <https://doi.org/10.1016/j.scenv.2024.100171>.
- [5] Z. Zhang, L. Liu, Y.F. Li, D. Wang, H. Jia, T. Harner, E. Sverko, X. Wan, D. Xu, N. Ren, J. Ma, K. Pozo, Analysis of polychlorinated biphenyls in concurrently sampled Chinese air and surface soil, *Environ. Sci. Technol.* 42 (2008) 6514–6518. <https://doi.org/10.1021/es8004078>.

- [6] IARC, Polychlorinated Biphenyls and Polybrominated Biphenyls IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans Volume 107, 2015.
- [7] Y.M. Aydin, M. Kara, Y. Dumanoglu, M. Odabasi, T. Elbir, Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in ambient air of an industrial region in Turkey, *Atmos. Environ.* 97 (2014) 271–285. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.08.032>.
- [8] I. Çok, M. Hakan Şatıröglü, Polychlorinated biphenyl levels in adipose tissue of primiparous women in Turkey, *Environ. Int.* 30 (2004) 7–10. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(03\)00140-5](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(03)00140-5).
- [9] M. Bokare, N. Lombard, S. Magee, D. Murali, U. Ghosh, Seasonal trends of PCBs in air over Washington DC reveal localized urban sources and the influence of Anacostia River, *Environ. Pollut.* 316 (2023) 120490. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120490>.
- [10] T. Luarte, A. Hirmas-Olivares, J. Höfer, R. Giesecke, M. Mestre, S. Guajardo-Leiva, E. Castro-Nallar, A. Pérez-Parada, G. Chiang, R. Lohmann, J. Dachs, S.B. Nash, J. Pulgar, K. Pozo, P.P. Přibyllová, J. Martiník, C. Galbán-Malagón, Occurrence and diffusive air-seawater exchanges of organochlorine pesticides (OCPs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in Fildes Bay, King George Island, Antarctica, *Sci. Total Environ.* 908 (2024) 168323. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168323>.
- [11] K. Yacine, M. Yacine, S. Georges, E. Gauthier, Determination of PCDD/Fs and dl-PCBs in ash and particle samples generated by an incineration plant for hospital and industrial waste in Northern of Algeria, *Atmos. Pollut. Res.* 9 (2018) 968–975. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.01.017>.
- [12] B. Cetin, S. Yurdakul, M. Keles, I. Celik, F. Ozturk, C. Dogan, Atmospheric concentrations, distributions and air-soil exchange tendencies of PAHs and PCBs in a heavily industrialized area in Kocaeli, Turkey, *Chemosphere* 183 (2017) 69–79. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.05.103>.
- [13] K. Christensen, L.M. Carlson, G.M. Lehmann, The role of epidemiology studies in human health risk assessment of polychlorinated biphenyls, *Environ. Res.* 194 (2021) 110662. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110662>.
- [14] G. Ross, The public health implications of polychlorinated biphenyls (PCBs) in the environment, *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 59 (2004) 275–291. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2004.06.003>.
- [15] M. A, R. Cao, N. Geng, X. Zhu, J. Chen, Characteristics of PAHs, PCDD/Fs, PCBs and PCNs in atmospheric fine particulate matter in Dalian, China, *Chemosphere* 288 (2022) 132488. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132488>.
- [16] A. Dreyer, A. Minkos, Polychlorinated biphenyls (PCB) and polychlorinated dibenzo-para-dioxins and dibenzofurans (PCDD/F) in ambient air and deposition in the German background, *Environ. Pollut.* 316 (2023) 120511. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120511>.
- [17] Y. Qin, Y. Liu, J. Wang, Y. Lu, Z. Xu, Emission of PAHs, PCBs, PBDEs and heavy metals in air, water and soil around a waste plastic recycling factory in an industrial park, Eastern China, *Chemosphere* 294 (2022) 133734. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133734>.
- [18] S.S. Cindoruk, A.E. Sakin, Y. Tasdemir, Levels of persistent organic pollutants

- in pine tree components and ambient air, *Environ. Pollut.* 256 (2020).  
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113418>.
- [19] M.F. Sari, F. Esen, B. Cetin, Concentration levels, spatial variations and exchanges of polychlorinated biphenyls (PCBs) in ambient air, surface water and sediment in Bursa, Türkiye, *Sci. Total Environ.* 880 (2023) 163224.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163224>.
- [20] A. Birgül, P.B. Kurt-Karakus, H. Alegria, E. Gungormus, H. Celik, T. Cicek, E.C. Güven, Polyurethane foam (PUF) disk passive samplers derived polychlorinated biphenyls (PCBs) concentrations in the ambient air of Bursa-Turkey: Spatial and temporal variations and health risk assessment, *Chemosphere* 168 (2017) 1345–1355. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.11.124>.
- [21] S. Siddik Cindoruk, Y. Tasdemir, Characterization of gas/particle concentrations and partitioning of polychlorinated biphenyls (PCBs) measured in an urban site of Turkey, *Environ. Pollut.* 148 (2007) 325–333.  
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.10.018>.
- [22] G. Eker Sanli, S.N. Erkul, Y. Tasdemir, Spatio-Temporal Variations, Fugacity Fractions and Air-Soil Exchanges of PCBs in Industrial, Urban and Semi-Rural Sites, *Polycycl. Aromat. Compd.* 44 (2024) 1019–1036.  
<https://doi.org/10.1080/10406638.2023.2185267>.
- [23] A.E. Sakin, F. Esen, Y. Tasdemir, Effects of sampling interval on the passive air sampling of atmospheric PCBs levels, *J. Environ. Sci. Heal. - Part A Toxic/Hazardous Subst. Environ. Eng.* 52 (2017) 673–679.  
<https://doi.org/10.1080/10934529.2017.1297148>.
- [24] A.E. Sakin, Y. Tasdemir, Determination of Atmospheric PCB Level Variations in Continuously Collected Samples, *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 71 (2016) 235–245. <https://doi.org/10.1007/s00244-016-0291-7>.
- [25] A. Küçük, Mobilya kenti İnegöl atmosferinde poliklorlu Bifenil (PCB) konsantrasyonlarının belirlenmesi, (2020).
- [26] İnegöl Ticaret ve Sanayi Odası, İnegöl Ekonomi Raporu 2023, (2023).  
<https://www.itso.org.tr/dosyalar/2023EkonomiRaporu.pdf>.
- [27] B. Caliskan, A. Küçük, Y. Tasdemir, S.S. Cindoruk, PAH levels in a furniture-manufacturing city atmosphere, *Chemosphere* 240 (2020).  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124757>.
- [28] B. Caliskan, G. Artun, H. Durmuş, E.O. Gaga, S.S. Cindoruk, Atmospheric volatile organic compounds levels in furniture-manufacturing city in Turkey, *Urban Clim.* 43 (2022) 101163.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101163>.
- [29] Y. Dumanoglu, E.O. Gaga, E. Gungormus, S.C. Sofuoglu, M. Odabasi, Spatial and seasonal variations, sources, air-soil exchange, and carcinogenic risk assessment for PAHs and PCBs in air and soil of Kutahya, Turkey, the province of thermal power plants, *Sci. Total Environ.* 580 (2017) 920–935.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.040>.
- [30] M. Odabasi, Y. Dumanoglu, E. Ozgunerge Falay, G. Tuna, H. Altiok, M. Kara, A. Bayram, D. Tolunay, T. Elbir, Investigation of spatial distributions and sources of persistent organic pollutants (POPs) in a heavily polluted industrial region using tree components, *Chemosphere* 160 (2016) 114–125.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.06.076>.
- [31] F. Wania, L. Shen, Y.D. Lei, C. Teixeira, D.C.G. Muir, Development and

- calibration of a resin-based passive sampling system for monitoring persistent organic pollutants in the atmosphere, *Environ. Sci. Technol.* 37 (2003) 1352–1359. <https://doi.org/10.1021/es026166c>.
- [32] Y. Tasdemir, M. Odabasi, N. Vardar, A. Sofuoglu, T.J. Murphy, T.M. Holsen, Dry deposition fluxes and velocities of polychlorinated biphenyls (PCBs) associated with particles, *Atmos. Environ.* 38 (2004) 2447–2456. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.02.006>.
- [33] A.T. Simpson, M.D. Wright, Diffusive sampling of C7-C16 hydrocarbons in workplace air: Uptake rates, wall effects and use in oil mist measurements, *Ann. Occup. Hyg.* 52 (2008) 249–257. <https://doi.org/10.1093/annhyg/men009>.
- [34] B. Cetin, F. Ozturk, M. Keles, S. Yurdakul, PAHs and PCBs in an Eastern Mediterranean megacity, Istanbul: Their spatial and temporal distributions, air-soil exchange and toxicological effects, *Environ. Pollut.* 220 (2017) 1322–1332. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.11.002>.
- [35] S.S. Cindoruk, Y. Tasdemir, Atmospheric gas and particle phase concentrations of polychlorinated biphenyls (PCBs) in a suburban site of Bursa, Turkey, *Environ. Forensics* 9 (2008) 153–165. <https://doi.org/10.1080/15275920801888442>.
- [36] Y. Tasdemir, G. Salihoglu, N.K. Salihoglu, A. Birgül, Air-soil exchange of PCBs: Seasonal variations in levels and fluxes with influence of equilibrium conditions, *Environ. Pollut.* 169 (2012) 90–97. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.05.022>.
- [37] A. Birgül, P. Kurt-Karakus, H. Alegria, E.G.- Chemosphere, undefined 2017, Polyurethane foam (PUF) disk passive samplers derived polychlorinated biphenyls (PCBs) concentrations in the ambient air of Bursa-Turkey: Spatial and, Elsevier (y.y.). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653516316678> (erişim 12 Ekim 2021).
- [38] C. Xu, L. Niu, D. Zou, S. Zhu, W. Liu, Congener-specific composition of polychlorinated biphenyls (PCBs) in soil-air partitioning and the associated health risks, *Sci. Total Environ.* 684 (2019) 486–495. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.334>.
- [39] S. Mao, G. Zhang, J. Li, X. Geng, J. Wang, S. Zhao, Z. Cheng, Y. Xu, Q. Li, Y. Wang, Occurrence and sources of PCBs, PCNs, and HCB in the atmosphere at a regional background site in east China: Implications for combustion sources, *Environ. Pollut.* 262 (2020) 114267. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114267>.