Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 3 EYLÜL/SEPTEMBER 2026

Poliklorlu Bifenillerin (PCB'lerin) Ortam Havasındaki Konsantrasyonları, Mekânsal Değişimleri ve Kaynakları

Mehmet Ferhat SARİ [1,a], **Fatma ESEN** [2,b]

[1]*İstanbul Arel Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Çevre Koruma Teknolojileri Bölümü, Su ve Atık Yönetimi Teknikerliği Programı, İstanbul, Türkiye*
[2]*Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye*

[a]***ORCID**: 0000-0001-7114-7286; [b]**ORCID**: 0000-0002-1445-0868*

Makale Bilgileri

Geliş : 25.09.2025
Kabul : 07.10.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1790825

Sorumlu Yazar

Mehmet Fatih SARİ
mehmetferhatsari@arel.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Bursa
Kirletici kaynakları
Mekansal dağılım
Pasif hava örnekleyicileri
Zamansal dağılım

***Atıf şekli:** SARİ, M.F., ESEN, F., (2026). Poliklorlu Bifenillerin (PCB'lerin) Ortam Havasındaki Konsantrasyonları, Mekânsal Değişimleri ve Kaynakları. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(3), 807-817.*

ÖZ

Bu çalışmanın amacı, Bursa Nilüfer Çayı havzasındaki farklı arazi kullanım özelliklerini temsil eden bölgelerde atmosferik poliklorlu bifenillerin (PCB'lerin) konsantrasyon seviyelerini belirlemek; mekânsal, zamansal değişimlerini ve olası kaynaklarını değerlendirmektir. Bu kapsamda, altı farklı örnekleme noktasında pasif hava örnekleyicileri kullanılarak bir yıl süreyle dış ortam havası örnekleri toplanmış ve noktalar arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Tespit edilen toplam 41 PCB ($\sum_{41}$PCB) konsantrasyonları 341,2–2025,9 pg/m^3 arasında değişmiş, ortalama $\sum_{41}$PCB konsantrasyonu ise 945,9 ± 491,6 pg/m^3 (ortalama ± SS) olarak belirlenmiştir. En düşük PCB konsantrasyonu arka plan (Keles) bölgesinde ölçülürken, en yüksek konsantrasyon sanayi ve tarımsal faaliyetlerin etkisindeki örnekleme noktasında (Karacabey) belirlenmiştir. PCB'lerin olası kaynaklarının ve atmosferik davranışlarının değerlendirilmesinde homolog grup dağılımları ile Clausius–Clapeyron yaklaşımından yararlanılmıştır. Mekânsal dağılımlar, endüstriyel ve tarımsal faaliyetlerin yoğun olduğu bölgelerde gözlenen yüksek PCB konsantrasyonlarında bu faaliyetlerin etkili olabileceğine işaret etmiştir. Mevsimsel değerlendirmelerde ise sıcak dönemlerde artan konsantrasyonların, kirlenmiş yüzeylerden sıcaklığa bağlı gerçekleşen yeniden buharlaşma süreçleriyle ilişkili olduğunu göstermektedir.

Concentrations, Spatial Variations, and Sources of Polychlorinated Biphenyls (Pcbs) in Ambient Air

Article Info

Received : 25.09.2025
Accepted : 07.10.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1790825

Corresponding Author

Mehmet Fatih SARİ
mehmetferhatsari@arel.edu.tr

Keywords

Bursa
Pollutant sources
Spatial distribution
Passive air samplers
Temporal distribution

***How to cite:** SARİ, M.F., ESEN, F., (2026). Concentrations, Spatial Variations, and Sources of Polychlorinated Biphenyls (Pcbs) in Ambient Air. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(3), 807-817.*

ABSTRACT

The aim of this study is to determine the concentration levels of atmospheric polychlorinated biphenyls (PCBs) in regions representing different land-use characteristics within the Bursa Nilüfer River basin, Türkiye, and to evaluate their spatial and temporal variations as well as potential sources. Within this scope, ambient air samples were collected for one-year using passive air samplers at six different sampling sites, and the relationships among the sites were examined. The detected total concentrations of the 41 PCB congeners ($\sum_{41}$PCBs) ranged from 341.2 to 2025.9 pg/m^3, with an average $\sum_{41}$PCBs concentration determined as 945.9 ± 491.6 pg/m^3 (mean ± SD). The lowest PCB concentration was measured at the background site (Keles), whereas the highest concentration was observed at the sampling site influenced by industrial and agricultural activities (Karacabey). Homolog group distributions and the Clausius–Clapeyron approach were used to assess the potential sources and atmospheric behavior of PCBs. The spatial distribution indicated that industrial and agricultural activities may have contributed to the elevated PCB concentrations observed in areas where these activities were more intensive. Seasonal evaluations demonstratethat increased concentrations during warm periods are associated with temperature-dependent re-volatilization processes from contaminated surfaces.

1. GİRİŞ

Kimyasal formülü $C_{12}H_nCl(10-n)$ $(9\geq n\geq 0)$ olan poliklorlu bifeniller (PCB'ler), benzen halkasındaki hidrojen atomlarının klor ile yer değiştirmesi sonucu oluşan bileşiklerdir [1]. PCB'ler, düşük elektrik iletkenliği ve alev geciktirici özellikleri sebebi ile 1930'lardan itibaren elektrikli cihazlarda, boyalarda ve plastikleştiricilerde yaygın olarak dielektrik ve soğutucu sıvı olarak kullanılmıştır [2]. Yapılan birçok çalışma, PCB'lerin çevre ve insan sağlığı üzerinde istenmeyen etkileri olan yüksek derecede toksik bileşikler olduğunu göstermiş ve olumsuz etkileri nedeniyle 1970'lerin sonlarında küresel olarak yasaklanmıştır [3]. PCB'lerin içerdiği klor sayısına bağlı olarak fiziksel ve kimyasal özellikleri değişmektedir. PCB'lerin çevrede bulundukları ortamlar da bu fizikokimyasal özelliklerine göre değişiklik göstermektedir [4].

PCB'lerin doğal kaynakları bilinmemekle birlikte, hava ve su gibi değişik ortamlardaki dolanımlarıyla küresel ölçekte sürekli döngü halindedirler. PCB içeren ürünlerin kazara sızması, dökülmesi veya yakılması atmosferdeki PCB konsantrasyonlarının artmasına sebep olur [5,6]. Kalıcı özelliğe sahip olan PCB'ler, fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak Kutup Bölgelerine kadar her yere taşınabilmektedir. İçeriğinde düşük klor bulunduran PCB'ler daha uçucu özelliğe sahip olup, atmosferde daha uzun mesafelere kadar taşınabilmektedirler [7].

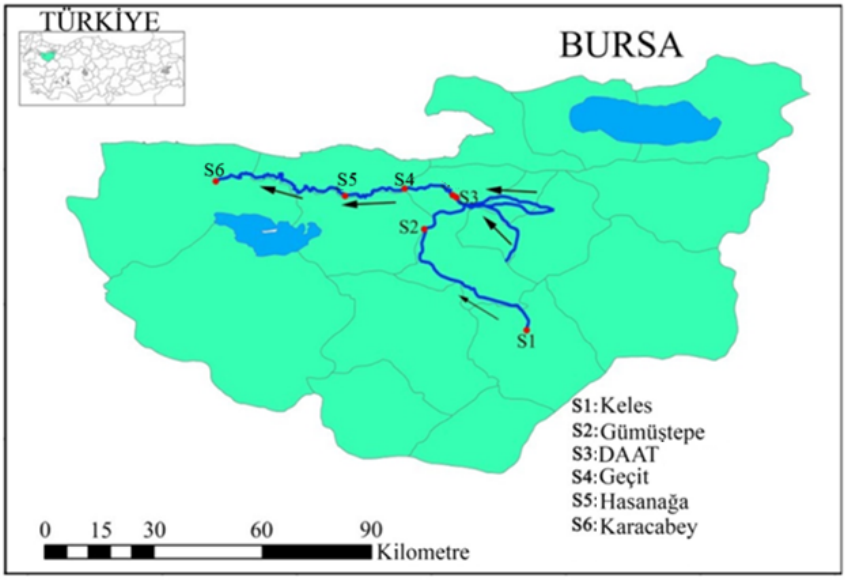
Atmosferde yaygın olarak bulunan ve hava kalitesi açısından önemli kirleticilerden olan PCB'lerin seviyelerini belirlemek üzere ulusal [8,11] ve uluslararası [3,12-14] birçok çalışma yapılmıştır. PCB'lerin atmosferik konsantrasyonlarının belirlenmesinde, son yıllarda pasif hava örnekleyicileri (PHÖ) yaygın olarak kullanılmaktadır. PHÖ'ler, düşük maliyetli, enerji gerektirmeyen ve uzun süreli örnekleme yapabilme özellikleri sayesinde özellikle geniş alanlarda zamana bağlı ortalama konsantrasyonların belirlenmesine yönelik çalışmalarda tercih edilmektedir. Örnekleme aparatı olarak poliüretan köpüğün (PÜK) kullanıldığı bu örnekleyiciler, aktif sistemlere kıyasla daha az bakım gerektirmekte ve iç-dış ortam farkı gözetilmeksizin uygulanabilmektedirler [15]. Bu avantajları sayesinde PHÖ'ler, hem kırsal hem de kentsel alanlarda PCB dağılımının belirlenmesinde önemli bir araç haline gelmiştir. Bursa, yoğun nüfusu, gelişmiş sanayi altyapısı ve tarımsal faaliyetlerin geniş alanlara yayılması nedeniyle atmosferik PCB kirliliğinin farklı arazi kullanım özellikleri açısından değerlendirilmesine uygun bir çalışma alanı niteliğindedir. Nilüfer Çayı havzası boyunca kentsel, endüstriyel ve tarımsal faaliyetlerin bir arada bulunması ve çeşitli evsel ve endüstriyel deşarjların havza üzerinde oluşturduğu çevresel baskı, bölgedeki PCB'lerin mekânsal ve zamansal dağılımlarının araştırılmasını önemli hale getirmektedir. Bursa'da daha önce atmosferik PCB düzeylerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiş olmakla birlikte, farklı arazi kullanım özelliklerini temsil eden noktaların aynı yıllık izleme dönemi içerisinde karşılaştırılması ve elde edilen mekânsal ve zamansal desenlerin olası kaynak süreçleriyle birlikte değerlendirilmesi bölgedeki PCB kirliliğinin daha kapsamlı olarak anlaşılmasına katkı sağlayabilir. Bu yönüyle çalışma, farklı özelliklere sahip örnekleme bölgelerindeki atmosferik PCB düzeylerini karşılaştırmanın yanı sıra, elde edilen güncel verilerin Bursa'da önceki dönemlerde bildirilen konsantrasyonlarla değerlendirilmesine de olanak sağlamaktadır. Bu çalışmanın ana amaçları şunlardır: (1) Ortam havasında PCB konsantrasyonlarının düzeylerini; (2) mekânsal ve zamansal değişimlerini değerlendirmek ve (3) olası kaynaklarını ortaya koymaktır.

2. YÖNTEM

2.1. Örnekleme Bölgeleri ve Programı

Bursa Nilüfer Çayı güzergahı boyunca Ekim 2020 ile Eylül 2021 tarihleri arasındaki bir yıllık periyotta her ay ortam havası örnekleri alınmıştır (Şekil 1). Bursa, ekonomik ve endüstriyel potansiyeli ile yüksek nüfus yoğunluğu açısından Türkiye'nin önde gelen büyükşehirlerinden biridir [16,17]. İl sınırları içerisinde 17 organize sanayi bölgesi yer almakta olup, başlıca sanayi kollarını tekstil, gıda, otomotiv, makine ve mobilya sektörleri oluşturmaktadır. Birçok küçük derenin birleşmesiyle oluşan Nilüfer Çayı, yıl boyunca kesintisiz akışıyla Bursa'nın içme suyu ihtiyacını karşılayan Doğancı Barajı'nın en önemli besleyici akarsularından biridir. Uludağ'ın güney yamaçlarında (Keles) doğan çay, şehir merkezinden geçerek yaklaşık 203 km uzunluğunda bir güzergâhla Karacabey üzerinden Marmara Denizi'ne ulaşır. Nilüfer Çayı boyunca hem evsel hem de endüstriyel kaynaklı atıksuların arıtıldığı çeşitli arıtma tesisleri bulunmaktadır ve bu tesislerde arıtılan sular çaya deşarj edilmektedir. Çayın yıllık toplam akış hacmi 743,77 hm^3 ve ortalama debisi

yaklaşık 24 m^3/s olarak belirlenmiştir. Örnekleme noktalarının büyük bölümü, sanayi ve tarımsal faaliyetlerin yoğun olarak yürütüldüğü alanlarda konumlanmaktadır.



Şekil 1. Örnekleme bölgeleri

Şekil 1'den de görüldüğü gibi hava örnekleri altı farklı örnekleme noktasından alınmıştır. Örnekleme Noktası 3 ile 4 arasındaki mesafe yaklaşık 500 metredir. Atmosferik örnekleme açısından 500 m çok kısa bir mesafe olduğu için S3 ve S4 tek bir örnekleme alanı olarak değerlendirilmiştir. Ancak, bu iki örnekleme noktasının her birinden ayrı ayrı su ve sediment örnekleri de alınmış olup, sonuçları bu makalede verilmemiştir. Örnekleme noktaları; arka plan, yarı-kentsel, kentsel/sanayi, sanayi, sanayi/tarım ve kentsel/tarım bölgelerinden seçilmiştir. Bu farklı özelliklere sahip örnekleme noktaları, PCB'lerin çevresel dağılımını belirlemek için önem arz etmektedir. Örnekleme noktaları ile ilgili açıklamalar aşağıda verilmektedir. Keles (S1), 1 numaralı örnekleme alanı, arka plan bölgesi olarak tanımlanmış olup Keles Delice Köprüsü yakınında konumlanmaktadır. Tarımsal faaliyetlerin ve yerleşimin yoğun olduğu bu nokta, sanayi bölgelerinden en uzak konumda yer almakta ve Nilüfer Çayı'nın kaynağını temsil etmektedir. Gümüştepe (S2), Bursa-Orhaneli karayolu üzerinde, ormanlarla çevrili eğimli bir araziye kurulmuş tarihi bir yerleşim alanıdır. Bursa merkeze yaklaşık 12 km mesafededir ve kentin içme suyunu sağlayan Doğancı Barajı'nın ardından gelen ilk örnekleme noktasıdır. Atıksu Arıtma Tesisi (S3), Bursa Doğu Atıksu Arıtma Tesisi (DAAT), kentin doğu havzasından gelen evsel atıksuların arıtımı için Küçük Balıklı mevkiinde kurulmuştur ve şehirsel/endüstriyel karakter göstermektedir. Geçit (S4), bu noktaya, Demirtaş Organize Sanayi Bölgesi (DOSAB), Kestel ve Gürsu Sanayi Bölgeleri ile Doğu Atıksu Arıtma Tesisi deşarjlarının karıştığı sular ulaşmaktadır. Bu nedenle bölge hem tarımsal hem de endüstriyel özellik taşımaktadır. Hasanağa (S5), 4 numaralı örnekleme alanına benzer biçimde, Bursa'nın Güney Havzası'ndan gelen tüm atıksuların birleşim noktasıdır. Endüstriyel niteliğe sahip olan bu bölgeye Nilüfer Organize Sanayi Bölgesi (NOSAB), Organize Sanayi Bölgesi (OSB) ve Batı Atıksu Arıtma Tesisi çıkış suları ulaşmaktadır. Karacabey (S6), Bursa'nın batısında bulunan ve nüfus açısından ilin beşinci büyük ilçesi olan Karacabey, tarım ve hayvancılıkla öne çıkmaktadır. Şehirsel/tarımsal özellik taşıyan bu örnekleme noktası, Nilüfer Çayı'nın Susurluk Çayı ile birleşmeden önceki son durağını temsil etmektedir. Örnekleme noktalarının seçiminde farklı arazi kullanım özelliklerinin yanı sıra sanayi bölgeleri, atıksu arıtma tesisleri, kentsel yerleşimler ve tarımsal alanlar gibi olası yerel PCB kaynaklarıyla olan ilişkileri de dikkate alınmıştır. Bu kapsamda Keles ve Gümüştepe sanayi faaliyetlerinden görece daha az etkilenen alanları temsil ederken, DAAT, Geçit ve Hasanağa noktaları kentsel ve/veya endüstriyel faaliyetlerin yoğun olduğu bölgelerde, Karacabey ise tarımsal ve kentsel faaliyetlerin birlikte bulunduğu bir alanda yer almaktadır. Bu farklı arazi kullanım özellikleri, örnekleme noktaları arasında gözlenen PCB konsantrasyonlarının mekânsal olarak yorumlanmasında dikkate alınmıştır. Bununla birlikte, örnekleme dönemi boyunca rüzgâr hızı, baskın rüzgâr yönü ve diğer meteorolojik parametreler kaynak değerlendirmesine nicel olarak dâhil edilmemiştir. Bu nedenle atmosferik taşınıma ilişkin değerlendirmeler, arazi kullanım özellikleri ve olası yerel kaynaklar çerçevesinde yapılmıştır.

2.2. Enstrümental Analiz

Ortam havası örnekleri, poliüretan köpük (PÜK) diskler içeren pasif hava örnekleyicileri kullanılarak alınmıştır. Örnekleyiciler yerden yaklaşık 1,5-2 m yüksekliğe monte edilmiştir. Kullanılan PÜK disklerin kalınlığı 1,35 cm, çapı 14 cm, ağırlığı 4,40 g, yüzey alanı 365 cm^2, hacmi 207 cm^3 ve yoğunluğu 0,0213 g/cm^3'tür. Örnek hazırlama; Pasif hava örnekleyicilerinde kullanılacak PÜK diskler 24 saat boyunca saf suda bekletilmiş, ardından iki kez Aseton (ACE) ve 24 saat boyunca Aseton/Hekzan (ACE/HEX) karışımı (1:1) ile Soxhlet cihazında temizlenmiştir. Temizlenen PÜK'ler alüminyum folyo ile sarılarak −20 °C'de saklanmıştır. PÜK diskler örnekleyiciye yerleştirilmeden önce, örnekleyici de saf su, ardından ACE/HEX ile temizlenmiştir. Daha sonra PÜK diskler örnekleyiciye yerleştirilmiş ve 1 ay örnekleme için beklenmiştir. Bir ayın sonunda alınan PÜK disklere ekstraksiyon, temizleme ve yoğunlaştırma adımları uygulanır.

Ekstraksiyon için tüm PÜK diskler soxlet ekstraksiyonuna yerleştirilmiş ve üzerlerine ACE/HEX (1:1) karışımı eklenmiş, ardından PCB izleme standardı (PCB#14, #65, #166, her biri 4 ng) eklendikten sonra 24 saat soxlet ekstraksiyonu yapılmıştır. Daha sonra rotary evaporatör ile hacimleri 2 mL'ye düşürülmüştür [18,19]. Temizleme için katı faz ekstraksiyon kartuşları (Agilent Bond Elute SI) kullanılmış, önce 10 mL HEX ile şartlandırılmıştır. 2 mL'ye yoğunlaştırılmış örnekler kartuşlara eklenmiş, ardından 20 mL HEX ve 30 mL ACE geçirilmiştir. Toplam 50 mL ekstrakt önce 5 mL'ye, ardından 1 mL'ye indirilmiştir.

Tüm örnekler Agilent 6890N GC/MS cihazında analiz edilmiş ve 41 PCB bileşiği PCB #17, 18, 28, 31, 33, 44, 49, 52, 70, 74, 82, 87, 95, 99, 101, 105, 110, 118, 128, 132, 138, 149, 151, 153, 156, 158, 169, 170, 171, 177, 180, 183, 187, 191, 194, 195, 199, 205, 206, 208, and 209 tespit edilmiştir. Cihazda Elektron iyonizasyon (EI) modu ve taşıyıcı gaz olarak helyum kullanılmıştır. Fırın sıcaklık programı: 50 °C (1 dk), 200 °C'ye 25 °C/dk hızla, ardından 300 °C'ye 8 °C/dk hızla çıkılmış ve 5,5 dk bu sıcaklıkta bekletilmiştir [11].

Pasif hava örnekleyicilerinden geçen hava hacimlerinin hesaplanmasında Herkert ve arkadaşları [24] tarafından önerilen model kullanılmıştır. Pasif örnekleme sistemlerinde örneklenen hava hacmi, aktif örnekleme sistemlerinde olduğu gibi doğrudan ölçülen sabit bir hava akışına değil, model ile tahmin edilen örnekleme oranlarına dayanmaktadır. Bu nedenle hesaplanan örnekleme hacimleri belirli düzeyde belirsizlik içerebilmektedir. Özellikle rüzgâr hızı ve sıcaklık gibi meteorolojik koşullardaki değişimler PÜK disklerin kirleticileri tutma hızını ve dolayısıyla etkin örnekleme hacmini etkileyebilmektedir. Bu nedenle model kullanılarak hesaplanan atmosferik PCB konsantrasyonları, meteorolojik koşullara bağlı bu olası belirsizlikler dikkate alınarak değerlendirilmiştir.

2.3. Kalite Kontrol ve Kalite Güvenirlik

Laboratuvar aşamasında kullanılan tüm cam ekipmanlar önce saf su, ardından ACE ve DCM ile yıkanarak temizlenmiştir. Temizlik işlemi tamamlanan malzemeler 105 °C'de 24 saat süreyle etüvde bekletilmiş, ardından desikatörde soğutulmuştur. Steril hale getirilen malzemeler, kullanım anına kadar alüminyum folyo ile sarılarak ışık almayan bir ortamda saklanmıştır.

PÜK diskler ve örneklemede kullanılan diğer malzemelerde kontaminasyon riskini azaltmak amacıyla, toplam örnek sayısının en az %10'u oranında şahit örnek alınmıştır. PÜK diskler ve örneklemede kullanılan diğer malzemelerde olası kontaminasyonu değerlendirmek amacıyla toplam örnek sayısının en az %10'u oranında saha şahit örneği kullanılmıştır. Saha şahitleri, gerçek örneklerle aynı taşıma ve saha koşullarına maruz bırakılmış ancak aktif örnekleme sürecine alınmamıştır. Böylece örnek hazırlama, taşıma ve saha uygulamalarından kaynaklanabilecek olası kontaminasyon kontrol edilmiştir. Bu şahitlerdeki PCB kütle değerleri, gerçek örneklerde uygulanan aynı analiz prosedürü izlenerek belirlenmiştir. Elde edilen şahit verilerinin ortalamasına, standart sapmanın üç katı eklenerek belirleme limiti (LOD) hesaplanmıştır [11,20]. Dış ortam hava örneklerinde elde edilen PCB kütle değerleri, eğer LOD'un altında kalmışsa hesaplamalara dâhil edilmemiştir. Cihazın kalibrasyonu beş farklı konsantrasyonda (4, 10, 40, 60, 1000 ng/mL) gerçekleştirilmiş, $R^2 > 0,99$ elde edilmiştir. Çalışmada %60–120 aralığı kabul edilebilir geri kazanım kriteri olarak değerlendirilmiş ve bu aralığın altında kalan örnekler veri güvenirliğinin korunması amacıyla nicel hesaplamalara dâhil edilmemiştir. Bu kapsamda, Ağustos ayında Keles örnekleme noktasından elde edilen örneğin geri kazanım değerinin %60'ın altında kalması nedeniyle söz konusu örnek

değerlendirme dışında bırakılmıştır. LOD ve LOQ değerleri şahit numunelere göre hesaplanmış, ölçülen örneklerdeki PCB değerleri LOD'nin üzerinde bulunmuştur. Bu yaklaşım, LOD'un altındaki değerlerin analitik yöntemle güvenilir ve nicel olarak belirlenememesi nedeniyle tercih edilmiştir. Bununla birlikte, LOD altındaki değerlerin hesaplamalardan tamamen çıkarılmasının özellikle düşük konsantrasyonların gözlendiği örneklerde ortalama konsantrasyonların yukarı yönlü etkilenmesine neden olabileceği dikkate alınmıştır. Çalışmada nicel değerlendirmeye dâhil edilen PCB konsantrasyonlarının ilgili LOD değerlerinin üzerinde bulunması nedeniyle bu etkinin mevcut veri seti üzerindeki etkisinin sınırlı olduğu değerlendirilmiştir.

2.4. Korelasyon ve Clausius–Clapeyron

Çalışmada, dış ortam havasında ölçülen PCB konsantrasyonları arasındaki bağıntının belirlenmesinde Pearson korelasyon katsayısı (R) yöntemi tercih edilmiş olup, hesaplamalar Eşitlik 1'e göre gerçekleştirilmiştir [21].

$$R_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^{p}(x_{ij} - \bar{x}_j) \times (x_{ij} - \bar{x}_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{p}(x_{ij} - \bar{x}_j)^2 \times \sum_{i=1}^{p}(x_{ik} - \bar{x}_k)^2}} \quad (1)$$

Burada, Xij ve Xik ilgili örnekleme noktalarında ölçülen PCB konjenerlerinin hava ortamındaki konsantrasyonlarını, $\bar{x}$ ise ortalama PCB düzeylerini, p ise incelenen PCB türlerinin sayısını göstermektedir. Pearson korelasyon analizi, farklı örnekleme noktalarında ölçülen PCB konsantrasyonlarının birlikte değişim eğilimlerini ve noktalar arasındaki doğrusal ilişkileri değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır.

PCB gibi uçucu organik kirleticilerin atmosferik konsantrasyonları, ortam sıcaklığıyla yakından ilişkilidir. Bu bağıntı, termodinamik açıdan Clausius–Clapeyron denklemi (Eşitlik 2) ile açıklanmaktadır [22].

$$\ln P = m\left(\frac{1}{T}\right) + b \quad (2)$$

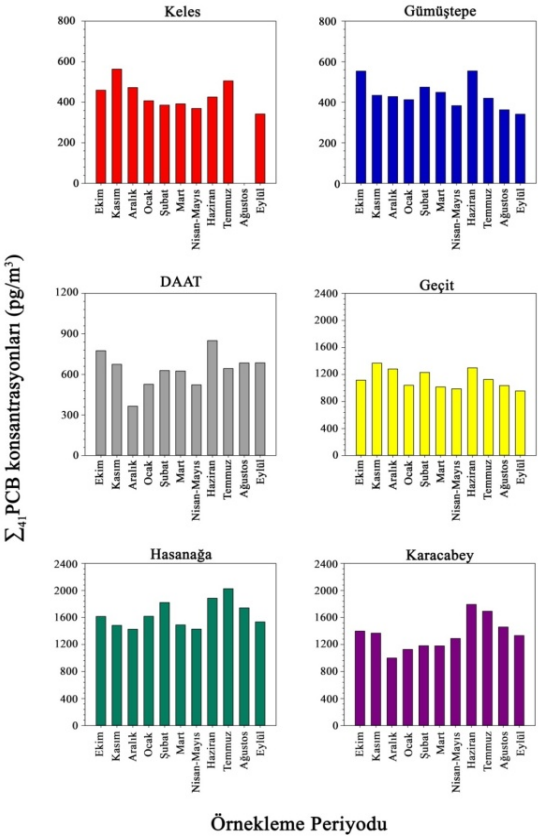
Bu çalışmada Clausius–Clapeyron yaklaşımı, atmosferik PCB konsantrasyonlarının sıcaklığa bağlı değişimini değerlendirmek ve yüzey-atmosfer arasındaki olası yeniden buharlaşma süreçlerine ilişkin çıkarım sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Bu nedenle Clausius–Clapeyron analizinden elde edilen sonuçlar tek başına kesin bir kaynak belirleme yöntemi olarak değil, sıcaklığa bağlı süreçlere ilişkin destekleyici bir gösterge olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca mevsimsel değişimler, örnekleme döneminde gözlenen PCB konsantrasyon eğilimleri üzerinden betimleyici olarak değerlendirilmiş ve mevsimler arasındaki farklılıkların istatistiksel anlamlılığını belirlemeye yönelik ayrı bir hipotez testi uygulanmamıştır. Bu nedenle mevsimsel sonuçlar kesin farklılıklardan ziyade gözlenen eğilimler çerçevesinde yorumlanmıştır.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

3.1. Dış Ortam Havasındaki PCB Konsantrasyonları

Çalışma kapsamında, Bursa'daki Nilüfer Çayı boyunca belirlenen 6 noktadan, Ekim 2020'den Eylül 2021'e kadar her ay atmosferik hava örnekleri alınmıştır (Şekil 1). Alınan ortam havası örneklerindeki PCB'lerin dış ortam konsantrasyonları, örnekleme bölgeleri arasındaki ilişkiler ile PCB'lerin kaynakları belirlenmeyi amaçlamıştır.

Bursa'da pasif hava örnekleyiciler ile altı farklı noktadan örnekleme yapılmış ve toplam 41 PCB ($\sum_{41}$PCB) türü tespit edilmiştir. COVID-19 önlemleri kapsamında uygulanan sokağa çıkma yasakları nedeniyle Mayıs ayında örnekleme yapılamamıştır. Bu sebepten dolayı Nisan ve Mayıs aylarında PÜK diskler sahada iki ay tutulmuş ve örnekleme hacimleri iki ay olacak şekilde (60 gün) hesaplanmıştır. Ayrıca, Ağustos ayındaki arka plan (Keles) örneklerinde geri kazanım verimlerinin %60'ın altında olması sebebiyle bu ayın verileri hesaplamalara dahil edilmemiştir. Örnekleme oranlarının hesaplanmasında, Herkert ve arkadaşları [24]. tarafından sunulan model kullanılmıştır. Altı farklı örnekleme noktasında ortam havasında ölçülen $\sum_{41}$ PCB konsantrasyonları Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Ortam havasındaki toplam PCB konsantrasyonları

$\sum_{41}$PCB konsantrasyonları tüm örnekleme noktalarında 341,2–2025,9 pg/m^3 arasında ölçülmüş, ortalama değer ise 945,9±491,6 pg/m^3 olarak bulunmuştur. Konsantrasyonların en düşük olduğu yer arka plan noktası (Nokta 1) iken, en yüksek değerler sanayi ve tarım etkisindeki bölge (Hasanağa) için belirlenmiştir. Ortam havasında pasif hava örnekleyicileri ile arka plan bölgelerinde PCB ölçümü yapan birçok çalışma bulunmaktadır [25,26]. Li ve arkadaşları [25] arka plan örnekleme noktalarında Avrupa için ortalama 70 pg/m^3, Kuzey Amerika için 79 pg/m^3, Güney Amerika için 66 pg/m^3, Orta Amerika için 270 pg/m^3, Asya için 59 pg/m^3 ve Avustralya için 15 pg/m^3 olarak raporlamıştır. Mao ve arkadaşları [26], Çin'in doğusunda (Zhejiang Eyaleti) arka plan bölgelerinde ortam havasında ortalama $\sum_{40}$PCB konsantrasyonlarını 145±80 pg/m^3 olarak bildirmiştir. Bu çalışmada ise arka plan (Keles) noktasında $\sum_{41}$PCB konsantrasyonları 342,3 ile 536,4 pg/m^3 arasında değişmiş ve ortalama 432,5±67,8 pg/m^3 olarak hesaplanmıştır. Arka plan noktasında elde edilen konsantrasyon değerleri literatürde bildirilen değerlere göre biraz daha yüksektir. Keles örnekleme noktası sanayi alanlarından görece uzak olmakla birlikte, antropojenik etkilerden tamamen izole bir bölge değildir. Bölgenin yerleşim alanlarına ve kent merkezine göre konumu, olası yerel emisyonlar ile atmosferik taşınım süreçleri burada gözlenen PCB düzeylerine katkıda bulunmuş olabilir. Ayrıca PCB'lerin kalıcılığı ve kirlenmiş yüzeylerden yeniden atmosfere salınabilmesi, arka plan olarak tanımlanan alanlarda dahi ölçülebilir konsantrasyonların gözlenmesine neden olabilecek süreçler arasında değerlendirilebilir. Bununla birlikte, rüzgâr hızı ve yönü gibi meteorolojik parametreler çalışmada nicel olarak analizlere dâhil edilmediğinden, Keles örnekleme bölgesinde gözlenen görece yüksek PCB konsantrasyonlarının belirli bir kaynağa doğrudan atfedilmesi mümkün değildir. Bu durum, bazı arka plan bölgelerinde bir veya birden fazla yerel emisyon kaynağı olabileceği anlamına da gelmektedir [27]. Bu çalışmada arka plan olarak tanımlanan bölgenin şehir merkezine çok uzak olmaması ve meteorolojik parametrelerin PCB'lerin taşınımında rol oynadığı düşünülmektedir [19]. Keles noktasından sonra en düşük PCB seviyeleri sırasıyla yarı-kentsel (Gümüştepe; 437,6±68,9 pg/m^3) ve kentsel/sanayi (DAAT) alanlarında (635,2±130,4 pg/m^3) tespit edilmiştir. Benzer şekilde, Sari ve Esen [11]. Bursa'da 2017–2018 yıllarında yarı-kentsel bir noktada ortalama $\sum_{50}$PCB konsantrasyonunu 439,5±166,6 pg/m^3 olarak raporlamıştır. Ayrıca Birgül ve arkadaşları [10], Bursa'daki yarı-kentsel bölgelerde 2014 yılı için ortalama $\sum_{43}$PCB konsantrasyonlarını 43,8±24,4 pg/m^3 ve 140,0±190,0 pg/m^3 olarak bildirmiştir. Bu çalışmada, yarı-kentsel alanda ölçülen PCB konsantrasyonlarının 2017-2018 yıllarında ölçülen değerlerle aynı seviyede olduğu görülmüştür [11]. Bununla birlikte, söz konusu çalışmaların farklı sayıda ve özellikte PCB

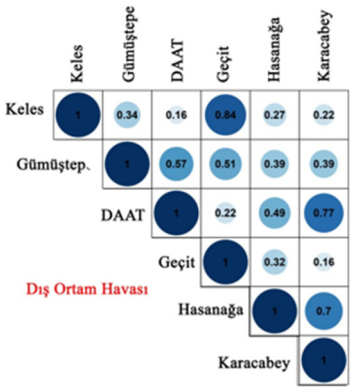
konjenerlerini içermesi, örnekleme süreleri ve örnekleme teknikleri ile analitik prosedürlerin farklılık göstermesi nedeniyle bildirilen konsantrasyonların doğrudan nicel olarak karşılaştırılması sınırlıdır. Bu nedenle literatür karşılaştırmaları, çalışmalar arasındaki mutlak konsantrasyon farklılıklarını ortaya koymaktan ziyade atmosferik PCB düzeylerinin genel büyüklüklerinin ve bölgesel eğilimlerin değerlendirilmesi amacıyla ele alınmıştır.

Bu çalışmada Hasanağa $\sum_{41}$PCB konsantrasyonları 1426,4 ile 2025,9 pg/m^3 arasında değişmiş ve ortalama 1643,1±200,5 pg/m^3 olarak hesaplanmıştır. Aynı şehirde daha önce Birgül ve arkadaşları [10] tarafından yapılan bir çalışmada, 2014 yılında sanayi bölgelerinde ortalama $\sum_{43}$PCB konsantrasyonları sırasıyla 170±150 pg/m^3 ve 280±540 pg/m^3 olarak bildirilmiştir. Bu çalışmada Hasanağa örnekleme noktasında ölçülen PCB konsantrasyonlarının söz konusu çalışmadan daha yüksek çıkmasının, geçen 8 yıllık sürede sanayi kuruluşlarının ve nüfusun artmasına bağlı olduğu düşünülmektedir. PCB'lerin temel kaynakları arasında çöplüklerde uygun olmayan veya yasa dışı yakma işlemleri, toprağa ve su yollarına doğrudan ya da dolaylı deşarjlar ile eski PCB içeren ekipmanların bakım ve onarımı yer almaktadır [9]. Bununla birlikte, bu çalışmada sanayi bölgesinde ölçülen PCB değerleri, literatürde raporlanan diğer sanayi bölgelerine kıyasla görece olarak daha düşüktür. Cetin ve arkadaşları [28] İzmir'deki sanayi bölgesinde kış mevsimi için ortalama $\sum_{36}$PCB konsantrasyonunu 3136±824 pg/m^3, yaz mevsimi için ise 1371±642 pg/m^3 olarak raporlamıştır. Aydin ve arkadaşları [9] tarafından yine İzmir'de yapılan başka bir çalışmada ise, sanayi bölgesinde $\sum_{35}$PCB konsantrasyonları 346 ile 94.363 pg/m^3 arasında değişmiştir. Li ve arkadaşları [29] Çin'in güneydoğusunda sanayi bölgesinde ortalama $\sum_{18}$PCB konsantrasyonunu 7220 pg/m^3 olarak raporlamıştır. Bu değerlerin farklı konjener toplamlarını ($\sum_{18}$PCB, $\sum_{35}$PCB, $\sum_{36}$PCB, $\sum_{43}$PCB ve $\sum_{41}$PCB) ve farklı örnekleme koşullarını temsil ettiği dikkate alındığında, çalışmalar arasındaki karşılaştırmaların doğrudan eşdeğer konsantrasyon karşılaştırmaları olarak değil, farklı çevresel koşullarda gözlenen PCB düzeylerinin genel bir göstergesi olarak değerlendirilmesi gerekmektedir.

Hasanağa örnekleme noktasını takip eden en yüksek PCB seviyeleri, sırasıyla Karacabey (1347,8±237,1 pg/m^3) ve Geçit örnekleme noktalarında (1132,2±140,9 pg/m^3) belirlenmiştir. Geçmişte tarım arazilerinin PCB'ler için doğrudan deşarj noktası olarak kullanılmış olması, günümüzde bu alanlarda yüksek PCB konsantrasyonlarının gözlenmesine yol açmaktadır [30]. Benzer şekilde, Pozo ve arkadaşları [31] tarım alanlarında ölçülen PCB düzeylerinin kentsel alanlara kıyasla daha yüksek olduğunu raporlamıştır. Ayrıca PCB'lerin fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle, toprak bir kaynak görevi görebilmekte ve artan sıcaklıkla birlikte topraktan ortama buharlaşma gerçekleşebilmektedir [9]. Dolayısıyla sanayi ve tarımsal faaliyetlerin yoğun olduğu örnekleme noktalarında gözlenen yüksek PCB konsantrasyonlarının, doğrudan emisyonların yanı sıra geçmiş kirliliğin neden olduğu ikincil yüzey emisyonlarının birlikte etkisiyle ortaya çıkmış olabileceği değerlendirilmektedir.

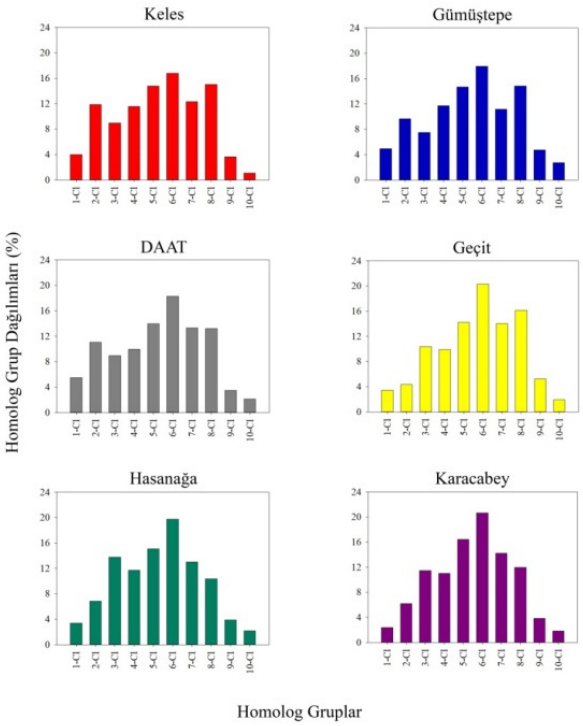
3.2. Örnekleme Bölgeleri Arasındaki İlişkiler ile Kaynakların Belirlenmesi

Örnekleme bölgeleri arasındaki PCB konsantrasyonları arasındaki ilişkilerin belirlenmesinde Pearson korelasyon katsayısı (R) kullanılmıştır. Örnekleme noktalarındaki hava örneklerine ait PCB düzeyleri arasındaki korelasyon değerleri Şekil 3'te sunulmuştur. Elde edilen R değerleri incelendiğinde, örnekleme noktaları arasında pozitif korelasyon gözlenmiştir. Bu bulgu, farklı örnekleme noktalarındaki atmosferik PCB konsantrasyonlarının zamansal dağılımlarının büyük ölçüde benzer olduğunu göstermektedir.



Şekil 3. Dış ortam hava örneklerindeki PCB konsantrasyonlarına ait R değerleri

Dış ortam havasındaki PCB'lerin olası kaynaklarının belirlenmesinde homolog grup dağılımları kullanılmıştır. Bu çalışmada elde edilen homolog grup dağılımları Şekil 4'te sunulmuştur.



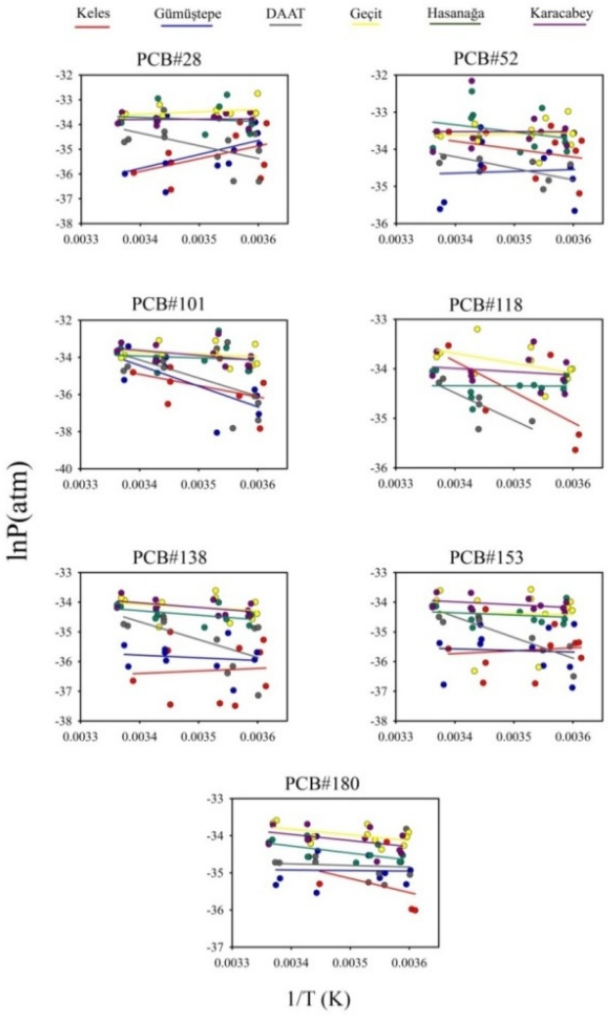
Şekil 4. Dış ortam havası için hesaplanan homolog grup dağılımları

Keles, Gümüştepe ve Geçit örnekleme noktalarında, 6-Cl PCB'lerden sonra en baskın homolog grup 8-Cl PCB'ler iken; DAAT, Hasanağa ve Karacabey noktalarında 5-Cl PCB'ler öne çıkmaktadır. Keles, Gümüştepe ve Geçit bölgelerinde 8-Cl PCB'lerin görece baskın olması, bu bölgelerdeki PCB bileşiminin yakın çevredeki veya bölgesel kaynak süreçlerinden etkilenmiş olabileceğine işaret etmektedir [32]. Benzer şekilde, Kaya ve arkadaşları [33] tarafından yapılan çalışmada, endüstriyel bölgelere yakın örnekleme noktalarında 5-Cl PCB'lerin baskın homolog tür olduğu raporlanmıştır. Bu çalışmada Hasanağa ve Karacabey örnekleme noktalarında 5-Cl PCB'lerin öne çıkması, söz konusu bölgelerdeki endüstriyel ve tarımsal faaliyetlerin atmosferik PCB profilleri üzerinde etkili olabileceğini düşündürmektedir. Bununla birlikte, homolog grup dağılımları tek başına belirli bir PCB kaynağının kesin olarak tanımlanmasına olanak vermediğinden, bu sonuçlar olası kaynak süreçlerini değerlendirmede destekleyici göstergeler olarak ele alınmıştır.

Homolog grup dağılımlarına ek olarak, atmosferik PCB'lerin olası kaynak ve yüzey-atmosfer değişim süreçlerinin değerlendirilmesinde Clausius–Clapeyron denklemi de kullanılmıştır (Şekil 5). Bu yaklaşım, atmosferik PCB konsantrasyonlarının sıcaklıkla ilişkisini ortaya koyarak yakın ve/veya bölgesel kaynakların, sıcaklığa bağlı ikincil emisyonların ve atmosferik taşınım süreçlerinin olası katkılarının değerlendirilmesine destek sağlamaktadır. Bununla birlikte, yöntem tek başına yerel ve uzun menzilli kaynakları kesin olarak birbirinden ayıran bir kaynak belirleme yaklaşımı değildir.Bu analiz kapsamında indikatör PCB türleri (PCB#28, 52, 101, 118, 138, 153 ve 180) dikkate alınmıştır.

Atmosferik PCB'lerin Clausius–Clapeyron denklemi kullanılarak yapılan analizlerinde, eğim değerleri genellikle tüm bileşikler ve örnekleme noktaları için negatif olarak bulunmuştur. Negatif eğimler, atmosferik PCB konsantrasyonlarının sıcaklıkla ilişkili bir değişim gösterdiğine ve özellikle sıcaklığın arttığı dönemlerde toprak, sediment ve diğer kirlenmiş yüzeylerden yeniden buharlaşma yoluyla gerçekleşebilecek ikincil emisyonların atmosferik PCB düzeylerine katkıda bulunabileceğine işaret etmektedir. Bununla birlikte, bu sonuçların doğrudan "yerel kaynak" göstergesi olarak değerlendirilmesi uygun değildir. Clausius–Clapeyron ilişkisi yerel birincil emisyonlar, bölgesel kaynaklar ve uzun menzilli atmosferik taşınımın katkılarını tek başına kesin olarak birbirinden ayıramamaktadır.

Homolog grup dağılımları ve Clausius–Clapeyron analizlerinin birlikte değerlendirilmesi, özellikle DAAT, Geçit, Hasanağa ve Karacabey gibi kentsel, endüstriyel ve/veya tarımsal faaliyetlerin yoğun olduğu bölgelerde yakın çevredeki antropojenik kaynaklar ile kirlenmiş yüzeylerden gerçekleşebilecek ikincil emisyonların atmosferik PCB düzeylerine katkıda bulunabileceğini göstermektedir. Ancak mevcut analizler uzun menzilli atmosferik taşınımın katkısını tamamen ortadan kaldırmaya olanak vermemektedir. Özellikle DAAT, Geçit, Hasanağa ve Karacabey örnekleme noktalarının sanayi bölgelerine yakın konumda olması, bu bölgelerde gözlenen PCB düzeylerinde endüstriyel faaliyetlerin olası katkısının bulunabileceğine işaret etmektedir. Öte yandan, Keles ve Gümüştepe noktaları sırasıyla arka plan ve yarı-kentsel alanları temsil etmesine rağmen, şehir merkezine olan göreceli yakınlıkları nedeniyle, meteorolojik faktörler (rüzgâr hızı ve yönü gibi) aracılığıyla PCB'lerin bu noktalara taşınabileceği düşünülmektedir. Dolayısıyla bu bölgelerde ölçülen PCB'lerin yalnızca yerel kaynaklarla açıklanması yerine, yakın/bölgesel kaynaklar, yeniden buharlaşma süreçleri ve atmosferik taşınımın birlikte etkisinin dikkate alınması daha uygun olacaktır.



Şekil 5. Dış ortam havasındaki PCB'ler için Clausius–Clapeyron grafiği

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Bursa Nilüfer Çayı havzasındaki farklı arazi kullanımlarını temsil eden noktalarda, pasif hava örnekleyicileri kullanılarak atmosferik PCB düzeylerinin bir yıllık mekânsal ve zamansal değişimi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, $\sum_{41}$PCB konsantrasyonlarının 341,2–2025,9 pg/m^3 arasında değiştiğini ve ortalama konsantrasyonun 945,9 ± 491,6 pg/m^3 olduğunu göstermiştir. En düşük PCB konsantrasyonları Keles ve Gümüştepe örnekleme noktalarında gözlenirken, en yüksek konsantrasyonlar sanayi ve tarımsal faaliyetlerin

etkisindeki örnekleme noktalarında (Geçit, Hasanağa ve Karacabey) belirlenmiştir. Bu mekânsal dağılım, söz konusu faaliyetlerin atmosferik PCB yükü üzerindeki doğrudan etkisini ortaya koymaktadır. Örnekleme noktaları arasındaki pozitif korelasyonlar zamansal değişimlerin benzer bir eğilim izlediğine işaret ederken; homolog grup dağılımları ve Clausius–Clapeyron analizleri ise yerel/bölgesel kaynakların yanı sıra kirlenmiş yüzeylerden sıcaklığa bağlı yeniden buharlaşma süreçlerinin de kirliliğe katkı sağladığını doğrulamaktadır. Bununla birlikte, bu yaklaşımlar PCB kaynaklarının kesin olarak ayrıştırılmasına tek başına olanak vermediğinden, uzun menzilli atmosferik taşınım ve diğer olası süreçlerin katkısı tamamen göz ardı edilememektedir. Sonuç olarak; yüksek PCB seviyelerinin gözlendiği sanayi ve tarım bölgelerinde izleme çalışmalarının sürdürülmesi, potansiyel emisyon kaynaklarının detaylandırılması, sıcak dönemlerde artan yeniden buharlaşma süreçlerinin göz önünde bulundurulması ve meteorolojik parametrelerin gelecekteki analizlere dâhil edilmesi önerilmektedir. Bu tür hedefli izleme ve kaynak belirleme çalışmaları, Nilüfer Çayı havzasındaki atmosferik PCB kirliliğinin daha iyi anlaşılmasına ve bölgeye özgü kirlilik kontrol stratejilerinin geliştirilmesine önemli katkılar sunacaktır.

5. KAYNAKLAR

1. Song, H., Yan, X., Zhao, H., Zhang, X., Shi, X. & Ma, J. (2022). Adsorption of polychlorinated biphenyls on gold colloid by surface-enhanced Raman spectroscopy and density functional theory. *Vibrational Spectroscopy, 120*, 103369.
2. Zhu, M., Yuan, Y., Yin, H., Guo, Z., Wei, X., Qi, X., Li, H. & Dang, Z. (2022). Environmental contamination and human exposure of polychlorinated biphenyls (PCBs) in China: A review. *Science of the Total Environment, 805*, 150270.
3. Zhang, P., Ge, L., Gao, H., Yao, T., Fang, X., Zhou, C. & Na, G. (2014). Distribution and transfer pattern of polychlorinated biphenyls (PCBs) among the selected environmental media of Ny-Ålesund, the Arctic: As a case study. *Marine Pollution Bulletin, 89*(1-2), 267-275.
4. Safder, U., Nam, K. J., Kim, D., Shahlaei, M. & Yoo, C. K. (2018). Quantitative structure–property relationship (QSPR) models for predicting the physicochemical properties of polychlorinated biphenyls (PCBs) using deep belief network. *Ecotoxicology and Environmental Safety, 162*, 17-28.
5. Borja, J., Taleon, D.M., Auresenia, J. & Gallardo, S. (2005). Polychlorinated biphenyls and their biodegradation. *Process Biochemistry, 40*(6), 1999-2013.
6. Bhaskar Reddy, V., Moniruzzaman, M., Madhavi, G. & Aminabhavi, T.M. (2020). Modern approaches in separation, identification and quantification of polychlorinated biphenyls. *Current Opinion in Environmental Science and Health, 18*, 26-39.
7. Weitekamp, C.A., Phillips, L.J., Carlson, L.M., DeLuca, N.M., Cohen Hubal, E.A. & Lehmann, G.M. (2021). A state-of-the-science review of polychlorinated biphenyl exposures at background levels: Relative contributions of exposure routes. *Science of the Total Environment, 776*, 145912.
8. Ozcan, S. & Aydin, M.E. (2009). Polycyclic aromatic hydrocarbons, polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides in urban air of Konya, Turkey. *Atmospheric Research, 93*(4), 715-722.
9. Aydin, Y.M., Kara, M., Dumanoglu, Y., Odabasi, M. & Elbir, T. (2014). Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in ambient air of an industrial region in Turkey. *Atmospheric Environment, 97*, 271-285.
10. Birgül, A., Kurt-Karakus, P. B., Alegria, H., Gungormus, E., Celik, H., Cicek, T. & Güven, E.C. (2017). 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*, 1345-1355.
11. Sari, M.F. & Esen, F. (2022). Atmospheric concentration, spatial variations, and source identification of persistent organic pollutants in urban and semi-urban areas using passive air samplers in Bursa, Turkey. *Environmental Science and Pollution Research, 29*, 32082-32092.
12. Liu, Y., Wang, S., McDonough, C.A., Khairy, M., Muir, D.C.G., Helm, P.A. & Lohmann, R. (2016). Gaseous and freely-dissolved PCBs in the Lower Great Lakes based on passive sampling: Spatial trends and air–water exchange. *Environmental Science and Technology, 50*(10), 4932-4939.
13. Hao, Y., Li, Y., Wania, F., Yang, R., Wang, P., Zhang, Q. & Jiang, G. (2021). Atmospheric concentrations and temporal trends of polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides in the Arctic during 2011–2018. *Chemosphere, 267*, 128859.
14. Dreyer, A. & Minkos, A. (2023). Polychlorinated biphenyls (PCB) and polychlorinated dibenzo-para-dioxins and dibenzofurans (PCDD/F) in ambient air and deposition in the German background. *Environmental Pollution, 316*(P1), 120511.

15. Fiedler, H., de Boer, J. & Abad, E. (2024). Persistent organic pollutants in air across the globe using a comparative passive air sampling method. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry, 171*, 117494.
16. Şenkal Sezer, F. (2016). Sağlık ocaklarında konfor koşullarının değerlendirilmesi: Bursa/Nilüfer örneği. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 30*(1), 197-208.
17. Abdulvahitoğlu, A., Abdulvahitoğlu, A. ve Arslan, Z. (2025). Sürdürülebilir elektrikli ulaşım için stratejik planlama: Bursa ilinde elektrikli araç şarj istasyonu yer seçimi analizi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40*(4), 959-976.
18. Gurkan Ayyildiz, E. & Esen, F. (2020). Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) at two sites in Bursa, Turkey: Determination of concentrations, gas–particle partitioning, sources, and health risk. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 78*(3), 350-366.
19. Sari, M.F., Esen, F., Cordova Del Aguila, D.A. & Kurt Karakus, P.B. (2020). Passive sampler derived polychlorinated biphenyls (PCBs) in indoor and outdoor air in Bursa, Turkey: Levels and an assessment of human exposure via inhalation. *Atmospheric Pollution Research, 11*(6), 71-80.
20. Odabasi, M., Cetin, B., Demircioglu, E. & Sofuoglu, A. (2008). Air–water exchange of polychlorinated biphenyls (PCBs) and organochlorine pesticides (OCPs) at a coastal site in Izmir Bay, Turkey. *Marine Chemistry, 109*(1-2), 115-129.
21. Shojaeefard, M.H., Khalkhali, A. & Yarmohammadisatri, S. (2017). An efficient sensitivity analysis method for modified geometry of Macpherson suspension based on Pearson correlation coefficient. *Vehicle System Dynamics, 55*(6), 827-852.
22. Akyüz, M. & Çabuk, H. (2009). Meteorological variations of PM2.5/PM10 concentrations and particle-associated polycyclic aromatic hydrocarbons in the atmospheric environment of Zonguldak, Turkey. *Journal of Hazardous Materials, 170*(1), 13-21.
23. St-Amand, A.D., Mayer, P.M. & Blais, J.M. (2008). Seasonal trends in vegetation and atmospheric concentrations of PAHs and PBDEs near a sanitary landfill. *Atmospheric Environment, 42*(13), 2948-2958.
24. Herkert, N.J., Martinez, A. & Hornbuckle, K.C. (2016). A model using local weather data to determine the effective sampling volume for PCB congeners collected on passive air samplers. *Environmental Science and Technology, 50*, 6690-6697.
25. Li, Y.F., Harner, T., Liu, L., Zhang, Z., Ren, N.Q., Jia, H., Ma, J. & Sverko, E. (2010). Polychlorinated biphenyls in global air and surface soil: Distributions, air–soil exchange, and fractionation effect. *Environmental Science and Technology, 44*(8), 2784-2790.
26. Mao, S., Zhang, G., Li, J., Geng, X., Wang, J., Zhao, S., Cheng, Z., Xu, Y., Li, Q. & Wang, Y. (2020). Occurrence and sources of PCBs, PCNs, and HCB in the atmosphere at a regional background site in east China: Implications for combustion sources. *Environmental Pollution, 262*, 114267.
27. Halse, A.K., Schlabach, M., Eckhardt, S., Sweetman, A., Jones, K. & Breivik, K. (2011). Spatial variability of POPs in European background air. *Atmospheric Chemistry and Physics, 11*(4), 1549-1564.
28. Cetin, B., Yatkin, S., Bayram, A. & Odabasi, M. (2007). Ambient concentrations and source apportionment of PCBs and trace elements around an industrial area in Izmir, Turkey. *Chemosphere, 69*(8), 1267-1277.
29. Li, Y.M., Jiang, G.B., Wang, Y.W., Wang, P. & Zhang, Q.H. (2008). Concentrations, profiles and gas–particle partitioning of PCDD/Fs, PCBs and PBDEs in the ambient air of an e-waste dismantling area, southeast China. *Chinese Science Bulletin, 53*(4), 521-528.
30. Di Guardo, A., Raspa, G., Terzaghi, E., Vergani, L., Mapelli, F., Borin, S., Zanardini, E., Morosini, C., Anelli, S., Nastosio, P., Sale, V.M. & Armiraglio, S. (2020). PCB vertical and horizontal movement in agricultural soils of a highly contaminated site: Role of soil properties, cultivation history and PCB physico-chemical parameters. *Science of the Total Environment, 747*, 141477.
31. Pozo, K., Harner, T., Lee, S.C., Sinha, R.K., Sengupta, B., Loewen, M., Geethalakshmi, V., Kannan, K. & Volpi, V. (2011). Assessing seasonal and spatial trends of persistent organic pollutants (POPs) in Indian agricultural regions using PUF disk passive air samplers. *Environmental Pollution, 159*(2), 646-653.
32. Devi, N.L., Yadav, I.C., Shihua, Q., Chakraborty, P. & Dan, Y. (2014). Distribution and risk assessment of polychlorinated biphenyls (PCBs) in the remote air and soil of Manipur, India. *Environmental Earth Sciences, 72*(10), 3955-3967.
33. Kaya, E., Dumanoglu, Y., Kara, M., Altiok, H., Bayram, A., Elbir, T. & Odabasi, M. (2012). Spatial and temporal variation and air–soil exchange of atmospheric PAHs and PCBs in an industrial region. *Atmospheric Pollution Research, 3*(4), 435-449.