

EnviroMail™ / Avrupa

No. 31 / Şubat 2026

right solutions.
right partner.

OTM-50 ile GC-MS/MS Kullanılarak Havada Uçucu PFAS Analizi

ALS, atmosferik PFAS analizleri için ABD Çevre Koruma Ajansı'nın (U.S. EPA) en güncel standart yöntemi olan ve ilk olarak Ocak 2024'te yayımlanan **Other Test Method 50 (OTM-50)** kapsamında havada uçucu PFAS analizini yakın zamanda hizmetlerine eklemiştir. OTM-50 yöntemi, kanister (gaz örnekleme kabı) ile numune alma ve GC-MS analizi kullanır ve özellikle diğer mevcut yöntemlerle analiz edilemeyen uçucu PFAS bozunma ara ürünlerinin varlığını belirlemek amacıyla atık yakma tesisleri gibi kaynakların baca emisyonlarını izlemek üzere geliştirilmiştir. Bu analiz türü, baca gazı emisyonları atmosfere verilmeden önce PFAS bileşiklerinin tamamen ortadan kaldırıldığı (mineralize edildiğinin) doğrulanmasını amaçlar. Öncül PFAS kirlenmelerinin parçalanması daha düşük sıcaklıklarda mümkün olsa da, çoğunluğu organoflorlu bileşiklerden oluşan ara ürünlerin tamamen yok edilmesi çok daha yüksek sıcaklıklar gerektirir. Tam mineralizasyon sağlanmadığında, yakma veya diğer bertaraf teknolojileri PFAS'ı tamamen yok etmek yerine farklı formlara dönüştürerek atmosfer yoluyla yeniden çevreye kazandırabilir. OTM-50 yöntemi ile emisyonların test edilmesi, PFAS'ın tamamen ortadan kaldırılmasını sağlayacak şekilde bertaraf süreçlerinin optimize edilmesine yardımcı olur; böylece PFAS'ın atmosfere taşınma döngüsünün kırılmasına ve sucul ile karasal ortamlardaki küresel PFAS ve organoflor yükünün azaltılmasına katkı sağlar.

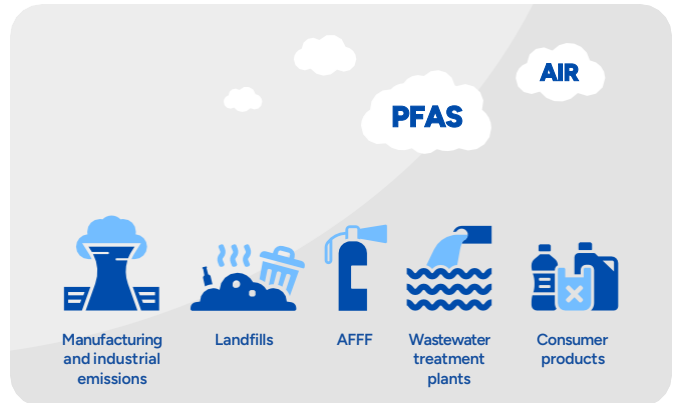


Şekil 1: Görsel Form

Atmosferik PFAS'ın Bulunuşu ve Kaynakları

Çevredeki PFAS döngüsünü gösteren grafiksel illüstrasyonlar genellikle atmosferi bu döngünün temel bir bileşeni olarak tanımlar. Olası kaynaklar arasında genellikle florokimyasal üretim tesislerine büyük dikkat gösterilmiş olsa da; genel olarak PFAS kullanan üretim tesisleri, düzenli depolama sahaları, atıksu arıtma tesisleri, atık ve arıtma çamuru yakma süreçleri, yangın söndürme köpükleri kullanımı ile PFAS içeren çok çeşitli evsel ve kişisel bakım ürünleri, küresel atmosferdeki PFAS'ın en önemli kaynaklarını oluşturur.

PFAS'ın atmosferik taşınımı ve çökme döngüsünün daha iyi anlaşılması ve bu döngünün nasıl kırılabileceğinin belirlenmesi acil bir ihtiyaçtır. Hava ve emisyonlardaki PFAS analizlerinin geliştirilmesi bu yönde atılan ilk adımdır. Yakın zamana kadar havadaki uçucu PFAS'lar için güvenilir test yöntemleri büyük ölçüde mevcut olmadığından, atmosferik PFAS; toprak, su, biyota ve insanlardaki PFAS'a kıyasla çok daha az çalışılmıştır.



Şekil 2: Görsel Form

Atmosferik PFAS Gruplandırılmaları

Son yıllarda yapılan atmosferik çalışmalar, yeni tanımlanan birçok PFAS kirleticisinin yanı sıra, normalde uçucu olarak kabul edilmeyen ancak partiküller ve diğer aerosoller aracılığıyla atmosfere taşınabilen geçmiş (legacy) PFAS bileşiklerini de ortaya koymuştur. ABD Çevre Koruma Ajansı (U.S. EPA), atmosferik PFAS'ı polarite ve uçuculuk özelliklerine göre dört ana gruba ayırmıştır (Şekil 3'te gösterildiği gibi). Bu grupların farklı fizikokimyasal özelliklere sahip olması nedeniyle her biri için farklı analiz teknolojileri gereklidir.

Polar yarı uçucu PFAS grubu, ABD EPA 1633 gibi LC-MS/MS tabanlı PFAS analiz yöntemleri kapsamında hâlihazırda incelenen birçok PFAS bileşimini içerir. Havada bulunan bu maddeler OTM-45 yöntemi kullanılarak örneklenebilir.

Polar uçucu PFAS grubuna ait çok az sayıda bileşik tanımlanmış olmakla birlikte, bu bileşiklerin analizi polar kolonlar kullanılarak gaz kromatografisi ile gerçekleştirilmelidir.

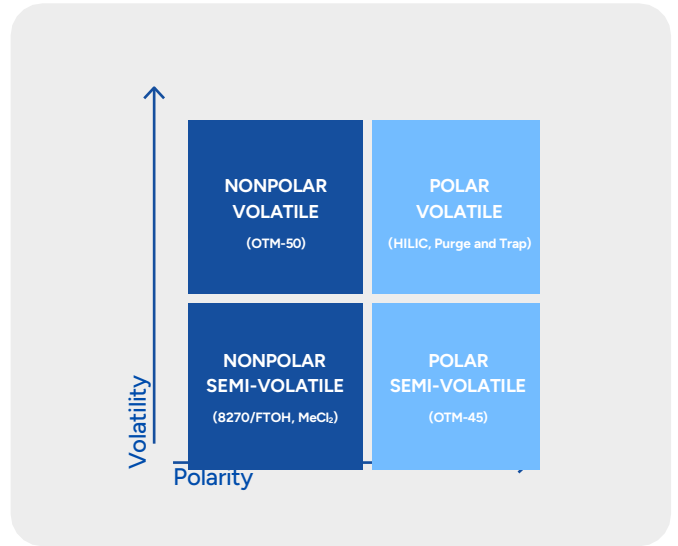
Nonpolar yarı uçucu PFAS bileşikleri arasında florotelomer alkoller, triflorasetik asit (TFA), ultra kısa zincirli PFAS'lar, sülfonamidler, sülfonamid etanoller, akrilatlar ve metakrilatlar, florotelomer olefinler, doymamış karboksilik asitler, FOSAA'lar (sülfonamido asetik asitler), mono- ve diPAP'ler (florotelomer fosfat mono- ve diesterleri) ile iyodürler yer alır. Günümüzde bu maddelerin havadaki analizi için standart bir yöntem bulunmamaktadır.

Nonpolar uçucu PFAS bileşiklerinin ölçümü OTM-50 yöntemi kapsamında yapılmaktadır. Bu bileşikler büyük ölçüde soğutucu gazlar ile florlanmış alkan ve alkenlerden oluşur. Soğutucu akışkanlar üretim süreçlerinde, ayrıca soğutma, klima ve ısı pompası sistemlerinin kullanımı ve bertarafı sırasında ya da bazı aerosol tüketici ürünlerinden atmosfere salınabilir. Florlanmış alkan ve alkenler ise genellikle eksik yanma ürünleri (PIC) olarak oluşur ve çoğunlukla PFAS bileşiklerinin ısıtma veya yüksek enerjili kimyasal reaksiyonlar sonucu karboksilat ya da sülfonat grubunu kaybetmesiyle meydana gelir. ABD EPA, OTM-50 metodunun geliştirilmesi kapsamında yürütülen yakma (insinerasyon) çalışmalarında bu süreçleri kapsamlı şekilde incelemiştir.

Çevresel/Sağlık Tehlikeleri ve Mevzuat Durumu

Havadaki PFAS'ın çevresel ve sağlık üzerindeki tehlikeleri hakkında hâlâ öğrenilmesi gereken çok şey bulunmaktadır ve geçmişte yeterince geliştirilmiş test yöntemlerinin bulunmaması nedeniyle düzenleyici sınır değerler büyük ölçüde mevcut değildir. İnsan maruziyeti başlıca solunum yoluyla gerçekleşir; bu maruziyet gaz fazındaki uçucu PFAS'lara veya solunabilir partikül maddeye (PM10 ve PM2.5) adsorbe olmuş uzun zincirli PFAS bileşiklerine bağlıdır. Florotelomer alkoller (genellikle iç ortam havasında bulunur) ile TFA, ultra kısa ve kısa zincirli PFAS'lar (genellikle dış ortam havasında bulunur) açısından temel endişe, bu ortamlarda yüksek seviyelerde tespit edilmeleri nedeniyle artan maruziyettir. Eski nesil soğutucu akışkanlar ile florlanmış alkan ve alkenlere yönelik endişeler ise çoğunun güçlü sera gazı olması nedeniyle küresel ısınma potansiyelleriyle ilişkilidir. Yeni nesil hidrofloroolefin (HFO) soğutuculara ilişkin endişeler ise TFA oluşumu ile ilgilidir. Bu maddelerin çoğu için ekolojik ve insan sağlığına yönelik riskler henüz yeterince anlaşılmamıştır.

ABD Çevre Koruma Ajansı'nın baca gazı emisyonlarının izlenmesi için iki yöntem (OTM-50 ve OTM-45) yayımlanmış olmasına rağmen, bu yöntemlerin kullanımına yönelik ABD federal düzeyinde zorunlu bir gereklilik bulunmamaktadır. Uluslararası ölçekte ise (WHO, AB, ABD, Kanada, Avustralya gibi) PFAS için dış ortam hava kalitesine yönelik standartlar veya uygulanabilir sayısal sınır değerler henüz mevcut değildir. Günümüzde OSHA veya NIOSH tarafından belirlenmiş mesleki maruziyet limitleri de bulunmamaktadır; ancak Amerikan Hükümet Endüstriyel Hijyenistleri Konferansı (ACGIH), bazı PFAS türevleri için endüstriyel hijyen eşik sınır değerleri (TLV) yayımlamıştır. İlk adım olarak, dünya genelinde bazı ülkeler tarama ve yönetim kılavuzları geliştirme çalışmalarını sürdürmektedir.



Şekil 3: Özelliklerine ve analitik tekniklere göre atmosferik PFAS aruplandırılmaları (ABD EPA).

OTM-50 Numune Alma Detayları

OTM-50 kapsamında numune toplama işlemi, EPA'nın eşlik eden yöntemi olan OTM-45 ile karşılaştırıldığında nispeten daha basittir. 1,4 L hacimli vakumlanmış bir kanister, partikül filtresi takılmış ısıtılmalı bir prob tüpü aracılığıyla baca örnekleme portuna bağlanır. Ekipman purj işleminden geçirildikten sonra, kanister iç basıncı 5–8 inç cıva seviyesine ulaşıncaya kadar birkaç dakikadan bir saate kadar değişebilen sürelerde numune alınır. Arka plan ve duplikat numunelerin alınması önerilir; yüksek nem veya asidik gazların bulunduğu durumlarda ara bir impinger kullanılması gerekebilir. Kanisterler ve bağlantı ekipmanları ALS tarafından sağlanır (temizlenmiş, doğrulanmış ve kullanıma hazır halde) ve diğer numunelerden çapraz kontaminasyonu önlemek amacıyla taşıma sırasında özel soğutucular kullanılır.

Laboratuvar Doğrulaması ve GC-MS/MS Test Yöntemi

Laboratuvarda tüm kanisterler ve bağlantı ekipmanları, OTM-50'de belirtilen gerekliliklerin ötesine geçen yöntemlerle temizlenir ve kontrol edilir. Analiz Sertifikaları (Certificate of Analysis) her zaman örnekleme kampanyasına ait parti doğrulama kanisterinin test sonuçlarını içermekle birlikte, tüm kanisterler temizlik sonrasında ayrı ayrı doğrulanır ve talep edilmesi halinde kanistere özgü doğrulama sonuçları raporlanabilir ► [Diğer sayfadan devam edin.](#)

(Laboratory Proofing and GC-MS/MS Test Method)

Bu analiz için kullanılan laboratuvar ekipmanları arasında kanister basınçlandırma sistemi ve kanisterleri otomatik olarak tek tek numune giriş arayüzüne aktaran bir sistem bulunmaktadır. Gerekli numune hacmi daha sonra konsantre edilmek üzere bir adsorban tuzağa aktarılır. Ardından tuzak ısıtılarak tutulan bileşikler kromatografik kolona salınır. OTM-50 yöntemi minimum cihaz gereksinimi olarak tek kuadrupollü GC-MS sistemini belirtse de, ALS girişimleri azaltmak ve hassasiyeti artırmak amacıyla çoklu reaksiyon izleme (MRM) geçişlerine sahip üçlü kuadrupollü GC-MS/MS sistemi kullanılmaktadır. GC-MS/MS kullanımı, OTM-50 bileşik listesi için ortam havası veya iç ortam havası izlemelerinde yeterince düşük tespit limitleri elde edilmesini sağlar.

Yönteme ait temel detayların özeti için Tablo 1'e; parametrelerin tam listesi, kısa adları, CAS numaraları, Raporlama Limitleri (LOR) ve kimyasal formüller için ise Tablo 2'ye başvurulmalıdır. Test sonuçları genellikle hacimce milyarda birim (ppbv) ve $\mu\text{g}/\text{m}^3$ birimleriyle raporlanır.

Bu yöntem, ALS Waterloo laboratuvarı tarafından kapsamlı şekilde valide edilmiştir ve ISO 17025 akreditasyon başvurusu devam etmektedir (güncel durum için CALA akreditasyon kapsamımıza bakınız).

Bu yöntemin geliştirilmesindeki destek ve iş birliği için Agilent Technologies'e teşekkür ederiz.

Bu önemli yeni analiz hizmeti hakkında daha fazla bilgi için lütfen ALS Proje Yöneticiniz ile iletişime geçiniz.



Şekil 4. OTM-50 kanister numunelemesi için saha personelinin örnekleme probunu ve giriş filtresini monte etmesi

Tablo 1. Test Yöntemi ve Numune Alma Detayları

ALS Test Codes	E695 (ppbv units) EC695 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ units)
Analytical Method	GC-MS/MS
Sample Containers	1.4 L Silonite canisters
Reference Method	US EPA OTM-50
Holding Time	30 days



Şekil 5. OTM-50 için otomatik GC-MS/MS cihaz sistem

References

- [LINK](#) De Silva, A.O. et al. (2021). PFAS Exposure Pathways for Humans and Wildlife: A Synthesis of Current Knowledge and Key Gaps in Understanding. *Environmental Toxicology and Chemistry* 40, 3, 631–657. <https://doi.org/10.1002/etc.4935>
- [LINK](#) Sangkham, S. et al. (2025). Specific Ambient PM2.5-Bound Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS): A Prominent Human Health Risk Issue That Deserves Attention? *Environ. Sci. Technol.* 59, 14780–14783. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5c07694>
- [LINK](#) Shields, E.P. (2023). Pilot-Scale Thermal Destruction of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in a Legacy Aqueous Film Forming Foam. *ACS EST Engg.*, 3, 1308–1317. <https://doi.org/10.1021/acsestengg.3c00098>
- [LINK](#) U.S. EPA (2024). EPA Tools & Resources Webinar: EPA's PFAS Air Emissions Measurement Methods. Stephen R. Jackson, Center for Environmental Measurement and Modeling, Office of Research and Development, October 16, 2024.
- [LINK](#) U.S. EPA (2025). Other Test Method 50 (OTM-50) Sampling and Analysis of Volatile Fluorinated Compounds from Stationary Sources Using Passivated Stainless-Steel Canisters, Revision 0, January 14, 2025, Measurement Technology Group, Office of Air Quality Planning and Standards.
- [LINK](#) Wallace, M.A.G. et al. (2024). A Review of Sample Collection and Analytical Methods for Detecting Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Indoor and Outdoor Air. *Chemosphere* 358, 142129. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142129>
- [LINK](#) Wang, J. et al. (2022). Critical Review of Thermal Decomposition of Per- and Polyfluoroalkyl Substances: Mechanisms and Implications for Thermal Treatment Processes. *Environ. Sci. Technol.* 56, 5355–5370. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c02251>

Tablo 2. OTM-50 için ALS Parametre Listesi

Parameter Name	Short Name	ALS LOR (ppbv)	CAS#	Chemical Formula
Chlorodifluoromethane	R-22	0.002	75-45-6	CHClF ₂
Chlorotrifluoromethane	R-13	0.002	75-72-9	CF ₃ Cl
Decafluorobutane	DFB	0.002	355-25-9	C ₄ F ₁₀
Difluoromethane	R-32	0.002	75-10-5	CH ₂ F ₂
Dodecafluoropentane		0.002	678-26-2	C ₅ F ₁₂
Fluoromethane	R-41	0.002	593-53-3	CH ₃ F
1H-Heptafluoropropane	R-227ea	0.002	2252-84-8	C ₃ HF ₇
Heptafluoropropyl-1,2,2,2-tetrafluoroethyl ether	E1	0.002	3330-15-2	C ₅ HF ₁₁ O
Hexadecafluoroheptane		0.002	335-57-9	C ₇ F ₁₆
Hexafluoroethane	R-116	0.002	76-16-4	C ₂ F ₆
Hexafluoropropene	HFP	0.002	116-15-4	C ₃ F ₆
Hexafluoropropylene oxide	HFPO	0.010	428-59-1	C ₃ F ₆ O
1H-Nonafluorobutane		0.002	375-17-7	C ₄ HF ₉
Octadecafluorooctane		0.002	307-34-6	C ₈ F ₁₈
Octafluorocyclobutane	R-C318	0.002	115-25-3	C ₄ F ₈
Octafluorocyclopentene	FC-C1418	0.002	559-40-0	C ₅ F ₈
Octafluoropropane	R-218	0.002	76-19-7	C ₃ F ₈
Pentafluoroethane	R-125	0.002	354-33-6	C ₂ HF ₅
2H-Perfluoro-5-methyl-3-6,dioxanonane	E2	0.002	3330-14-1	C ₈ HF ₁₇ O ₂
1H-Perfluoroheptane		0.002	375-83-7	C ₇ HF ₁₅
1H-Perfluorohexane		0.002	355-37-3	C ₆ HF ₁₃
1H-Perfluorooctane		0.002	335-65-9	C ₈ HF ₁₇
1H-Perfluoropentane		0.002	375-61-1	C ₅ HF ₁₁
Tetradecafluorohexane		0.002	355-42-0	C ₆ F ₁₄
1,1,1,2-Tetrafluoroethane	R-134a	0.002	811-97-2	C ₂ H ₂ F ₄
Tetrafluoroethene	TFE	0.002	116-14-3	C ₂ F ₄
Tetrafluoromethane	R-14	0.002	75-73-0	CF ₄
Trichlorofluoromethane	R-11	0.002	75-69-4	CCl ₃ F
1,1,1-Trifluoroethane	R-143a	0.002	420-46-2	C ₂ H ₃ F ₃
Trifluoromethane	R-23	0.002	75-46-7	CHF ₃

SCAN OR CLICK

Summary of All
EnviroMailsAsk the
EXPERTS