



مواد شیمیایی جاودانه؛ از تفلون تا آب آشامیدنی، ردپای یک آلودگی خاموش در زندگی انسان

محمد صالحی مله^{۱*}

۱- گروه فرآیند، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

واژگان کلیدی:

PFAS، مواد شیمیایی جاودانه،
تفلون، آلودگی آب آشامیدنی،
سلامت عمومی،
تصفیه محیط زیست

مواد پر و پلی فلوروآلکیل (PFAS) که به «مواد شیمیایی جاودانه» معروف هستند، خانواده‌ای بزرگ از ترکیبات مصنوعی با پیوند فوق العاده قوی کربن-فلوئور هستند. این ویژگی، آن‌ها را در برابر تجزیه طبیعی در محیط زیست و بدن انسان مقاوم کرده و سبب ماندگاری دهه‌ها تا قرن‌ها می‌شود. PFAS از دهه ۱۹۴۰ در طیف گسترده‌ای از محصولات روزمره مانند ظروف تفلون، بسته‌بندی‌های مقاوم به چربی، منسوجات ضدآب، فوم‌های آتش‌نشانی و صنایع الکترونیک به کار رفته‌اند. امروزه این آلاینده‌ها در آب آشامیدنی، خاک‌های کشاورزی، هوای داخل ساختمان و حتی خون بیش از ۹۸ درصد انسان‌ها یافت می‌شوند. مطالعات ارتباط مستقیم PFAS را با انواع سرطان (کلیه و بیضه)، اختلال در سیستم ایمنی و کاهش پاسخ به واکسن، مشکلات تیروئیدی و هورمونی، افزایش کلسترول و اختلال در رشد جنین نشان داده‌اند. حذف این مواد از محیط زیست به دلیل پایداری شیمیایی فوق العاده، بسیار دشوار، پرهزینه و انرژی‌بر است؛ روش‌های متداول تصفیه مانند کربن فعال تنها مواد را منتقل می‌کنند و نیاز به مدیریت پسماند ثانویه دارند. در سطح جهانی، سازمان حفاظت از محیط زیست آمریکا حد مجاز ۴ نانوگرم در لیتر را برای برخی PFAS‌ها در آب آشامیدنی تعیین کرده و اتحادیه اروپا به سمت ممنوعیت گسترده این ترکیبات حرکت می‌کند. آگاهی عمومی، انتخاب محصولات فاقد PFAS و جایگزینی ظروف نجسب با نمونه‌های سرامیکی یا چدنی، نقش کلیدی در کاهش مواجهه دارد. مقابله با این چالش نیازمند همکاری دولت‌ها، صنایع، دانشگاه‌ها و شهروندان برای حرکت از پاکسازی به پیشگیری و توقف تولید این آلاینده‌های ابدی است.



محمد صالحی مله (نویسنده مسئول)
پست الکترونیک: m.salehimalleh@modares.ac.ir

۱- آلودگی‌ای که دیده نمی‌شود

تصور کنید صبح خود را با پختن یک نیمرو در یک تابه نجسب شروع می‌کنید، سپس برای پیاده‌روی در زیر باران، ژاکت ضدآب خود را می‌پوشید و در نهایت ناهار را در یک بسته‌بندی کاغذی مقاوم به چربی از رستوران محبوبتان تحویل می‌گیرید. تمامی این راحتی‌ها مدیون لایه‌ای نامرئی از موادی است که امروزه به یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی قرن ۲۱ تبدیل شده‌اند؛ موادی که نه بو دارند، نه طعم و نه با چشم پست دیده می‌شوند، اما تقریباً در همه جا حضور دارند.

این ترکیبات که با نام مواد پر و پلی فلوروآلکیل (PFAS) شناخته می‌شوند، خانواده‌ای بزرگ شامل بیش از ۴۷۰۰ نوع ماده شیمیایی مصنوعی هستند که از دهه ۱۹۴۰ میلادی در صنایع مختلف به کار گرفته شده‌اند. ویژگی منحصر به فرد این مواد، پیوند شیمیایی میان اتم‌های کربن و فلوئور است؛ این پیوند یکی از قوی‌ترین پیوندهایی است که در شیمی آلی شناخته شده است. دقیقاً به دلیل همین پیوند فوق العاده مستحکم، PFAS در برابر تجزیه طبیعی بسیار مقاوم هستند. این ویژگی باعث شده تا دانشمندان به آن‌ها لقب مواد

شیمیایی جاودانه (Forever Chemicals) بدهند، چرا که پس از ورود به طبیعت یا بدن انسان، ممکن است دهه‌ها یا حتی قرن‌ها باقی بمانند و از بین نروند.

اگرچه این مواد دهه‌هاست که تولید می‌شوند، اما در سال‌های اخیر به سه دلیل عمده به صدر اخبار علمی جهان رسیده‌اند:

(۱) پیشرفت در تکنولوژی‌های تشخیص نشان داده است که PFAS اکنون در آب آشامیدنی میلیون‌ها نفر، خاک‌های کشاورزی و حتی در خون بیش از ۹۸ درصد از جمعیت انسان‌ها یافت می‌شود. این مواد حتی در مناطق دورافتاده‌ای مانند قطب شمال و قله اورست نیز شناسایی شده‌اند.

(۲) مطالعات رابطه مستقیم میان قرار گرفتن در معرض PFAS و بیماری‌های جدی را تایید کرده‌اند. این خطرات شامل انواع سرطان (به‌ویژه کلیه و بیضه)، اختلال در سیستم ایمنی، مشکلات تیروئیدی، افزایش کلسترول خون و اختلال در رشد جنین است.

(۳) به دلیل پایداری بالای این مواد، استانداردهای سلامت در حال تغییر هستند.

۲- از آشپزخانه تا محیط زیست؛ PFAS کجاست؟

مواد PFAS به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد شیمیایی در برابر تجزیه حرارتی، شیمیایی و بیولوژیکی مقاوم است، در طیف گسترده‌ای از محصولات روزمره و فرآورده‌های صنعتی نفوذ کرده‌اند. در ادامه، مسیر حضور این مواد از محیط خانه تا چرخه طبیعت بررسی می‌شود.

(۱) ظروف نچسب: یکی از آشناترین کاربردهای PFAS در خانه‌ها، استفاده از آن‌ها در روکش ظروف نچسب مانند تفلون یا PTFE است. این روکش‌ها پایداری حرارتی بالایی دارند و از چسبیدن غذا جلوگیری می‌کنند، اما مطالعات نشان داده‌اند که در دماهای بسیار بالا (بیش از ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد) یا در صورت فرسودگی سطح ظرف، این مواد می‌توانند به صورت گاز یا ذرات ریز آزاد شده و وارد غذا یا هوای خانه شوند.

(۲) بسته‌بندی مواد غذایی: PFAS به طور گسترده در بسته‌بندی‌های مقاوم به چربی، روغن و آب استفاده می‌شود تا از نشت رطوبت و روغن جلوگیری شود. این مواد در

جعبه‌های پیتزا، کاغذهای دور ساندویچ و فنجان‌های کاغذی قهوه به وفور یافت می‌شوند. علاوه‌براین کیسه‌های پاپ‌کورن مایکروویوی که حاوی سطوح بالایی از این مواد هستند. تحقیقات تایید کرده‌اند که این ترکیبات می‌توانند از بسته‌بندی به داخل مواد غذایی نفوذ کرده و راهی برای ورود به سیستم گوارش انسان پیدا کنند.

(۳) منسوجات و لباس‌های ضدآب: در صنعت نساجی، از PFAS برای ایجاد خاصیت لکه‌گریزی و ضدآب بودن در پارچه‌ها استفاده می‌شود. این کاربرد شامل لباس‌های بارانی و تجهیزات ورزشی ضدآب است. فرش‌ها و موکت‌های مقاوم به لک که یکی از منابع اصلی PFAS در گرد و غبار خانگی هستند. میلمان و تودوزی خودروها برای افزایش دوام در برابر آلودگی.

(۴) کاربردهای صنعتی: PFAS فراتر از کالاهای مصرفی، در صنایع کلیدی نیز نقشی حیاتی اما آلاینده دارد که شامل موارد زیر است.

• فوم‌های آتش‌نشانی: این فوم‌ها برای خاموش کردن آتش‌سوزی‌های نفتی در فرودگاه‌ها و پایگاه‌های نظامی استفاده می‌شوند و یکی از منابع اصلی آلودگی شدید آب‌های زیرزمینی در جهان هستند.

• صنعت الکترونیک: در تولید نیمه‌هادی‌ها، گواشی‌های هوشمند و صفحات مدار چاپی.

• آبکاری فلزات: به ویژه در فرآیند کروم‌کاری برای جلوگیری از انتشار بخارات سمی.

(۵) ورود تدریجی به آب، خاک و هوا: این مواد به دلیل پایداری بالا، هرگز در طبیعت از بین نمی‌روند و از طریق چندین مسیر وارد چرخه زیستی می‌شوند.

• پساب‌های تصفیه‌نشده: تصفیه‌خانه‌های سنتی قادر به حذف PFAS نیستند و این مواد همراه با آب به رودخانه‌ها و دریاها می‌ریزند.

• شیرابه لندفیل‌ها: زباله‌های حاوی PFAS در محل‌های دفن زباله با گذشت زمان شیرابه‌های خطرناکی تولید می‌کنند که به خاک و سفره‌های آب زیرزمینی نفوذ می‌کند.

o انتقال اتمسفری: برخی PFAS ها فرار هستند و می‌توانند از طریق هوا به مناطق بسیار دور منتقل شده و با بارش باران به زمین بازگردند. به طور خلاصه، PFAS از محصولات ساده آشپزخانه خارج شده و به یک آلودگی همه‌جایی تبدیل شده است که اکنون در آب آشامیدنی، خاک‌های کشاورزی و خون اکثر انسان‌ها حضور دارد.

۳- چرا دانشمندان نگران هستند؟

نگرانی گسترده جامعه علمی در مورد مواد PFAS به دلیل ویژگی‌های خاص شیمیایی آن‌هاست که این مواد را از سایر آلاینده‌ها متمایز می‌کند. در ادامه، دلایل اصلی این نگرانی‌ها بررسی شده است.

۳-۱- ماندگاری طولانی در محیط زیست

مواد PFAS در برابر تجزیه طبیعی توسط باکتری‌ها، نور خورشید یا واکنش‌های شیمیایی به شدت مقاوم هستند. برآورد می‌شود که نیمه‌عمر برخی از این ترکیبات در آب تحت شرایط طبیعی بیش از ۹۰ سال باشد؛ به این معنا که پس از ورود به محیط، برای دهه‌ها و حتی قرن‌ها باقی می‌مانند و از بین نمی‌روند.

۳-۲- تجمع در زنجیره غذایی

مواد PFAS برخلاف بسیاری از آلاینده‌های دیگر که در چربی‌ها ذخیره می‌شوند، تمایل زیادی به اتصال به پروتئین‌ها دارند. این مواد از طریق آب و خاک وارد بدن گیاهان و موجودات کوچک می‌شوند و با خورده شدن این موجودات توسط شکارچیان بزرگ‌تر، غلظت آن‌ها در هر مرحله از زنجیره غذایی افزایش می‌یابد که به آن بزرگ‌نمایی زیستی (Biomagnification) می‌گویند. مطالعات نشان داده‌اند که موجودات در سطوح بالاتر زنجیره غذایی (مانند ماهی‌های بزرگ، پرندگان شکاری و انسان‌ها) بیشترین سطح از این مواد را در بدن خود دارند.

۳-۳- ورود به بدن انسان

انسان‌ها از چندین طریق در معرض این آلاینده‌ها قرار می‌گیرند.

(۱) بلعیدن: اصلی‌ترین راه ورود، مصرف آب آشامیدنی آلوده و مواد غذایی (مانند ماهی‌های آلوده یا غذاهایی که در بسته‌بندی‌های حاوی PFAS بوده‌اند) است.
(۲) استنشاق: ذرات گرد و غبار خانگی که از فرش‌ها یا مبلمان لکه‌گیر جدا می‌شوند، می‌توانند از طریق تنفس وارد ریه شوند.
(۳) انتقال مادر به جنین: مطالعات تایید کرده‌اند که PFAS می‌تواند از طریق جفت به جنین و پس از تولد از طریق شیر مادر به نوزاد منتقل شود.

۳-۴- مهم‌ترین نگرانی‌های سلامت به زبانی ساده

تحقیقات گسترده پزشکی پیوند میان قرار گرفتن در معرض PFAS و مشکلات جدی سلامت را نشان داده است. مهم‌ترین این نگرانی‌ها شامل موارد زیر است.

(۱) افزایش خطر سرطان: به‌ویژه سرطان‌های کلیه، بیضه و پروستات.

(۲) اختلال در سیستم ایمنی: تضعیف پاسخ بدن به واکسن‌ها (به‌ویژه در کودکان) و کاهش توانایی بدن در مقابله با عفونت‌ها

(۳) مشکلات هورمونی و تیروئید: PFAS عملکرد غده تیروئید را مختل کرده و باعث به هم خوردن تعادل هورمون‌های بدن می‌شود.

(۴) افزایش کلسترول خون که خطر بیماری‌های قلبی و عروقی را افزایش می‌دهد.

(۵) مشکلات رشد و باروری: شامل کاهش وزن نوزاد هنگام تولد، بلوغ زودرس و مشکلاتی در باروری زنان و مردان.

به طور خلاصه، دانشمندان نگران هستند زیرا ما در حال تولید موادی هستیم که هرگز از بین نمی‌روند، در بدن ما انباشته می‌شوند و می‌توانند سلامت نسل‌های فعلی و آینده را به طور جدی تهدید کنند.

۴- وقتی آلودگی به این آسانی از بین نمی‌رود

تلاش برای حذف مواد PFAS از محیط زیست، به یکی از پیچیده‌ترین چالش‌های مهندسی و علمی قرن حاضر تبدیل شده است. برخلاف آلاینده‌های سنتی که ممکن است توسط

باکتری‌ها یا نور خورشید تجزیه شوند، PFAS در برابر روش‌های معمول تصفیه به شدت مقاومت می‌کند.

۴-۱- دلیل دشواری حذف PFAS

اصلی‌ترین مانع در مسیر نابودی این مواد، ساختار اتمی آن‌هاست. پیوند میان کربن و فلوئور (C-F) یکی از مستحکم‌ترین پیوندها در شیمی آلی است که انرژی بسیار بالایی (بیش از ۴۸۵ کیلوژول بر مول) برای شکستن آن نیاز است.

این استحکام باعث می‌شود که:

- (۱) تجزیه بیولوژیکی سنتی عملاً غیرممکن باشد؛ چرا که میکروب‌ها نمی‌توانند از این مواد به عنوان منبع انرژی استفاده کنند.
- (۲) روش‌های اکسیداسیون معمولی (مانند کلرزنی یا ازن‌زنی ساده) توان شکستن این پیوندها را ندارند.
- (۳) ترکیبات زنجیره کوتاه (که به عنوان جایگزین ایمن‌تر معرفی شده بودند) حتی چالش‌برانگیزتر هستند، زیرا در آب بسیار محلول‌تر و متحرک‌تر بوده و روش‌های سنتی مانند کربن فعال در جذب آن‌ها بازدهی پایینی دارند.

۴-۲- چالش تصفیه آب و خاک

تصفیه PFAS در مقیاس بزرگ با بن‌بست‌های فنی روبرو است.

- (۱) روش‌هایی مانند کربن فعال یا اسمز معکوس (RO) فقط PFAS را از آب جدا و در یک جا متمرکز می‌کنند، اما آن‌ها را از بین نمی‌برند. این کار باعث ایجاد «جریان‌های غلیظ پسماند» یا کربن‌های اشباع‌شده می‌شود که خود به عنوان یک زباله خطرناک، نیاز به مدیریت ثانویه دارند.
- (۲) وجود مواد آلی طبیعی و نمک‌های دیگر در آب، ظرفیت تصفیه‌خانه‌ها را کاهش می‌دهد، زیرا این مواد با PFAS برای چسبیدن به سطوح جاذب رقابت کرده یا باعث گرفتگی غشاهای تصفیه می‌شوند.
- (۳) در خاک بسیار متحرک است و می‌تواند برای دهه‌ها به سفره‌های آب زیرزمینی نفوذ کند. پاکسازی خاک‌های آلوده اغلب مستلزم جابجایی حجم عظیمی از خاک یا

استفاده از روش‌های بسیار گران‌قیمت مانند سوزاندن در دمای بالای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد است.

۴-۳- هزینه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی

هزینه مقابله با این آلودگی نامرئی سرسام‌آور است.

- (۱) برآوردها نشان می‌دهد هزینه تصفیه و جبران خسارات PFAS در اروپا می‌تواند سالانه ۵۲ تا ۸۴ میلیارد یورو و در آمریکا تا ۲ تریلیون دلار باشد. فقط هزینه عملیاتی سالانه برای سیستم‌های کوچک تصفیه آب در برخی مناطق به بیش از ۸۰۰ هزار دلار می‌رسد.
- (۲) روش‌های تخریبی پیشرفته مانند اکسیداسیون الکتروشیمیایی یا پلاسما، انرژی بسیار زیادی مصرف می‌کنند (حدود ۳ تا ۱۰ کیلووات ساعت به ازای هر تن آب) که خود باعث افزایش ردپای کربن و هزینه‌های عملیاتی می‌شود.
- (۳) اگر فرآیند تخریب کامل نباشد (معدنی‌سازی ناقص)، ممکن است محصولات جانبی سمی‌تر یا متحرک‌تری ایجاد شود که خطرات جدیدی برای سلامت انسان ایجاد کنند.

به طور خلاصه، ما با آلاینده‌ای روبرو هستیم که تولید آن ارزان اما پاکسازی آن غیرممکن یا بسیار گران است؛ موضوعی که ضرورت محدود کردن تولید این مواد را بیش از پیش نمایان می‌کند.

۵- جهان چه می‌کند و ما چه باید بکنیم؟

بحران آلودگی مواد PFAS پاسخی چندجانبه و جهانی را می‌طلبد. از آنجا که این مواد مرز نمی‌شناسند و در همه جا یافت شده‌اند، مقابله با آن‌ها از سطح دیپلماسی بین‌المللی تا انتخاب‌های روزمره مصرف‌کنندگان گسترده شده است.

۵-۱- اقدامات کشورهای مختلف و نهادهای بین‌المللی

در سطح جهانی، کنوانسیون استکهلم گام‌های بزرگی برای محدود کردن این مواد برداشته است؛ ترکیباتی مانند PFOS، PFOA و اخیراً PFHxS به دلیل سمیت و پایداری بالا در لیست مواد ممنوعه یا به شدت محدود شده قرار گرفته‌اند.

(۱) سازمان حفاظت از محیط‌زیست آمریکا (EPA) اخیراً استانداردهای بسیار سخت‌گیرانه‌ای وضع کرده و حد

مجاز برای برخی PFAS ها در آب آشامیدنی را تنها ۴ نانوگرم در لیتر اعلام کرده است. همچنین بودجه‌ای یک میلیارد دلاری برای پایش و تصفیه این مواد اختصاص یافته است.

(۲) اتحادیه اروپا با استفاده از چارچوب REACH به سمت ممنوعیت گسترده بیش از ۱۰ هزار نوع PFAS حرکت می‌کند. کشورهایی مانند دانمارک و آلمان حتی پیشروتر بوده و محدودیت‌های شدیدتری را اعمال کرده‌اند. (۳) به عنوان یکی از بزرگ‌ترین تولیدکنندگان، چین پایش PFOS را در اولویت قرار داده و صادرات و واردات آن را از سال ۲۰۲۴ ممنوع کرده است.

۲-۵- اهمیت پایش آب و محیط‌زیست

دانشمندان تاکید می‌کنند که بدون یک سیستم پایش دقیق و مداوم امروزی، نمی‌توان با این آلودگی نامرئی مقابله کرد. بنابراین شناسایی دقیق منابع آلودگی (مانند صنایع آبکاری، نساجی و محل‌های دفن زباله) حیاتی است. استفاده از روش‌های پیشرفته آزمایشگاهی مانند LC-MS/MS برای تشخیص مقادیر ناچیز این مواد در آب و خاک ضروری است تا پیش از آنکه آلودگی به سفره‌های آب زیرزمینی و زنجیره غذایی نفوذ کند، اقدامات اصلاحی انجام شود.

۳-۵- نقش آموزش، آگاهی عمومی و انتخاب‌های مصرف‌کنندگان

آگاهی عمومی موتور محرک تغییر قوانین و رفتارهای صنعتی است. وقتی مصرف‌کنندگان از خطرات PFAS مطلع باشند، تقاضا برای محصولات جایگزین افزایش می‌یابد. ما به عنوان مصرف‌کننده چه می‌توانیم بکنیم؟

- (۱) تغییر ظروف آشپزخانه: جایگزینی تابه‌های نچسب تفلونی با ظروف سرامیکی، چدنی یا استیل.
- (۲) دقت در بسته‌بندی: کاهش استفاده از بسته‌بندی‌های فست‌فود و کیسه‌های پاپ‌کورن میکروویوی که لایه‌های مقاوم به چربی آن‌ها حاوی PFAS است.
- (۳) مطالعه برچسب محصولات: انتخاب منسوجات، لباس‌های ضدآب و لوازم آرایشی که صراحتاً برچسب "PFAS-Free" دارند.

در نهایت، مقابله با این «آلاینده‌های ابدی» نیازمند همکاری میان دانشمندان برای ابداع روش‌های تخریب، دولت‌ها برای وضع قوانین بازدارنده و شهروندان برای انتخاب‌های آگاهانه است تا سلامت نسل‌های آینده تضمین شود.

۶- سخن پایانی: آگاهی، نخستین گام برای آینده‌ای سالم‌تر

در طی دهه‌های گذشته، PFAS به دلیل ویژگی‌های شگفت‌انگیز خود، از نفوذ به صنعت تا سفره‌های غذای ما پیش رفته است. اما امروز می‌دانیم که این راحتی، بهای سنگینی چون پایداری ابدی در طبیعت و تهدید سلامت انسان را به همراه داشته است. ما با آلاینده‌ای روبرو هستیم که مرزهای جغرافیایی را درنور دیده و از اعماق آب‌های زیرزمینی تا دوردست‌ترین نقاط جهان نفوذ کرده است.

۱-۶- جمع‌بندی کوتاه

مواد شیمیایی جاودانه (PFAS) به دلیل پیوند فوق‌العاده قوی کربن-فلوئور، در برابر تجزیه طبیعی مقاوم هستند و در زنجیره غذایی انباشته می‌شوند. اگرچه فناوری‌های تصفیه آب و خاک در حال پیشرفت هستند، اما حذف کامل این مواد بسیار دشوار، پرهزینه و انرژی‌بر است. (بنابراین، بهترین، بهترین استراتژی، حرکت از سمت تلاش برای پاکسازی به سمت پیشگیری و توقف تولید است.

۲-۶- مسئولیت مشترک برای آینده‌ای پاک

مقابله با این چالش جهانی فراتر از توان یک نهاد واحد است و نیازمند یک هم‌افزایی همه‌جانبه است.

(۱) دولت‌ها و نهادهای نظارتی: باید با وضع قوانین سخت‌گیرانه (مانند استانداردهای جدید EPA و اتحادیه اروپا)، محدود کردن تولید مواد خطرناک و حمایت مالی از پروژه‌های پایش و تصفیه، زیرساخت‌های لازم را فراهم کنند.

(۲) صنایع: تولیدکنندگان باید به سمت شیمی سبز و ابداع جایگزین‌های فاقد PFAS (PFAS-Free) حرکت کنند. مسئولیت‌پذیری در مدیریت پسماندهای صنعتی و شفافیت در استفاده از ترکیبات شیمیایی، وظیفه اخلاقی و قانونی صنایع است.

- and their remediation through degradation and defluorination techniques. *Chemical Engineering Journal*, 534.
- Kannan, U., Ravichandran, M. K., Monisha, M., Krishnasamy, S., Valliammai, Prabakar, P., . . . Sunantha, G. (2026). Short-chain PFAS: A global challenge - Environmental fate, health risks, and promising removal technologies. *Results in Chemistry*, 20.
- Mbanga, B. G. F., Ogundijo, O. T., Ugboh, F. M., Urama, V. C., & Tywabi-Ngeva, Z. (2026). A decade of PFAS removal research (2015–2025): Global advances and the African context: A comprehensive review. *Green Analytical Chemistry*, 17.
- Mirabediny, M., Sun, J., Yu, T. T., Akermark, B., Das, B., & Kumar, N. (2023). Effective PFAS degradation by electrochemical oxidation methods-recent progress and requirement. *Chemosphere*, 321, 138109.
- Narasimhappa, P., Singh, S., Varshney, R., Chauhan, V., Kour, R., Ramamurthy, P. C., & Shehata, N. (2025). Environmental behavior and human health risks of PFAS: occurrence, toxicity, and the state-of-the-art removal approaches. *RSC Adv*, 15(52), 44555-44583.
- Puttamreddy, S., & Nippatlapalli, N. (2024). Advanced insights into sustainable electrooxidation technique and futuristic strategies: Multifaceted approach for PFAS degradation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(5).
- Rekik, H., Arab, H., Pichon, L., El Khakani, M. A., & Drogui, P. (2024). Per-and polyfluoroalkyl (PFAS) eternal pollutants: Sources, environmental impacts and treatment processes. *Chemosphere*, 358, 142044.
- Sharma, S., Shetti, N. P., Basu, S., Nadagouda, M. N., & Aminabhavi, T. M. (2022). Remediation of per- and polyfluoroalkyls (PFAS) via electrochemical methods. *Chemical Engineering Journal*, 430.
- Singh, D., Dikshit, A. K., & Dangi, M. B. (2025). Technological advances in per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) removal from landfill leachate: Source identification and treatment options. *Emerging Contaminants*, 11(2).
- Sivagami, K., Sharma, P., Karim, A. V., Mohanakrishna, G., Karthika, S., Divyapriya, G., . . . Kumar, A. N. (2023). Electrochemical-based approaches for the treatment of forever chemicals: Removal of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFAS) from wastewater. *Sci Total Environ*, 861, 160440.
- Thakur, A., Khusnutdinova, A. N., Navarro-Marquez, M., Kumar, V., Ma, H., Golyshin, P. N., Parra-Saldivar, R. (2025). Comprehensive strategies for
- (۳) دانشگاه‌ها و مراکز علمی: پژوهشگران باید بر توسعه روش‌های نوین برای تخریب کامل (معدنی‌سازی) پیوندهای PFAS و همچنین مطالعه اثرات درازمدت ترکیبات جایگزین تمرکز کنند تا از تکرار اشتباهات گذشته جلوگیری شود.
- (۴) مدارس و رسانه‌ها: آموزش عمومی باید از سنین پایین آغاز شود. آگاه کردن دانش‌آموزان و خانواده‌ها درباره منابع آلودگی در زندگی روزمره، زیربنای تغییر رفتارهای مصرفی در جامعه است.
- (۵) شهروندان: ما به عنوان مصرف‌کننده، قدرتمندترین ابزار یعنی «حق انتخاب» را در اختیار داریم. با انتخاب محصولات فاقد مواد شیمیایی فلئوئوردار و کاهش استفاده از ظروف و بسته‌بندی‌های مشکوک، می‌توانیم بازار را به سمت تولید محصولات سالم‌تر سوق دهیم.
- آگاهی، سلاح ما در برابر این آلودگی نامرئی است. اگرچه PFAS جاودانه نامیده شده است، اما با اقدام هماهنگ و آگاهانه، می‌توانیم از تبدیل شدن آن به یک «بحران ابدی» جلوگیری کنیم و زمینی سالم‌تر را به نسل‌های بعد بسپاریم.

منابع

- Asadi Zeidabadi, F., Banayan Esfahani, E., Moreira, R., McBeath, S. T., Foster, J., & Mohseni, M. (2024). Structural dependence of PFAS oxidation in a boron doped diamond-electrochemical system. *Environ Res*, 246.
- Dickman, R. A., & Aga, D. S. (2022). A review of recent studies on toxicity, sequestration, and degradation of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS). *J Hazard Mater*, 436, 129120.
- Dong, Y., Gao, S., Zhao, Y., Sun, G., & Yu, J. (2026). Advances in electrochemical technologies for PFAS destruction. *Chem Sci*, 17(16), 7843-7874.
- Gar Alalm, M., & Boffito, D. C. (2022). Mechanisms and pathways of PFAS degradation by advanced oxidation and reduction processes: A critical review. *Chemical Engineering Journal*, 450.
- Hussain, H. N., Jilani, M. I., Imtiaz, F., Ahmed, T., Arshad, M. B., Mudassar, M., & Sharif, M. N. (2025). Advances in the removal of Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) from water using destructive and non-destructive methods. *Green Analytical Chemistry*, 12.
- Jawaduddin, M., Su, Z., Rashid, S., Graham, N., & Yu, W. (2026). A comprehensive review of global per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in water

- drinking water, their limitations, and future outlooks. *Emerging Contaminants*, 11(1).
- Zeidabadi, F. A., Esfahani, E. B., & Mohseni, M. (2023). Effects of water matrix on per- and poly-fluoroalkyl substances (PFAS) treatment: Physical-separation and degradation processes – A review. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 10.
- the remediation of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS): Mechanisms, technologies, and future perspectives. *Ecotoxicol Environ Saf*, 306, 119374.
- Venkatesh Reddy, C., Kumar, R., Chakraborty, P., Karmakar, B., Pottipati, S., Kundu, A., & Jeon, B.-H. (2024). A critical science mapping approach on removal mechanism and pathways of per- and poly-fluoroalkyl substances (PFAS) in water and wastewater: A comprehensive review. *Chemical Engineering Journal*, 492.
- Wang, H., Ye, C., Ge, R., Teng, B., Zhu, J., & Wang, C. (2026). Addressing the challenges of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) contamination: Overview of contamination status, treatment technologies, and prospects. *Process Safety and Environmental Protection*, 207.
- Zahra, Z., Song, M., Habib, Z., & Ikram, S. (2025). Advances in per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) detection and removal techniques from



Forever chemicals; from Teflon to drinking water, the trace of a silent contamination in human life

Mohammad Salehi Maleh^{1*}

1. Process Department, Faculty of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Article information

Keywords:

PFAS, Forever Chemicals, Teflon, Drinking Water Contamination, Public Health, Environmental Remediation



Mohammad Salehi Maleh
(Corresponding author)
Email: m.salehimaleh@modares.ac.ir

Abstract

Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS), known as "forever chemicals," are a large family of synthetic compounds with an extremely strong carbon-fluorine bond. This characteristic makes them resistant to natural degradation in the environment and the human body, causing them to persist for decades or even centuries. Since the 1940s, PFAS have been used in a wide range of everyday products such as non-stick cookware (Teflon), grease-resistant packaging, waterproof textiles, firefighting foams, and the electronics industry. Today, these contaminants are found in drinking water, agricultural soils, indoor air, and even in the blood of over 98% of humans. Studies have shown a direct link between PFAS and various cancers (kidney and testicular), immune system dysfunction and reduced vaccine response, thyroid and hormonal problems, increased cholesterol, and fetal growth disorders. Removing these substances from the environment is extremely difficult, costly, and energy-intensive due to their extraordinary chemical stability; common treatment methods such as activated carbon only transfer the substances and require secondary waste management. Globally, the U.S. Environmental Protection Agency (EPA) has set a permissible limit of 4 nanograms per liter for certain PFAS in drinking water, and the European Union is moving toward a widespread ban on these compounds. Public awareness, choosing PFAS-free products, and replacing non-stick cookware with ceramic or cast-iron alternatives play a key role in reducing exposure. Addressing this challenge requires cooperation among governments, industries, universities, and citizens to shift from remediation to prevention and to halt the production of these everlasting pollutants.