دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز
فصلنامه آلودگی‌های محیطی و توسعه پایدار شهری

دوره ۱، شماره ۲، پیاپی ۲
تابستان ۱۴۰۳، صفحات ۴۷-۲۳

"مقاله مروری"

آلاینده‌های نوظهور در محیط‌های آبی: وقوع، منابع، سرنوشت، اثرات بهداشتی و زیست محیطی و ارزیابی ریسک

محمد صفری[۱]، احمد اصل هاشمی[۲]، غلامحسین صفری[۲،۳*]

[۱] دانشکده پزشکی، واحد کرمان، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان، ایران
[۲] گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران
[۳] مرکز تحقیقات و محیط زیست، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران
[*] نویسنده مسئول مکاتبات: hsafari13@yahoo.com

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۱۳، پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۰۶/۰۲)

چکیده

آلاینده‌های نوظهور (EPs) شامل بسیاری از ترکیبات مصنوعی یا طبیعی از قبیل زیست‌کش‌ها (بیوسایدها)، بازدارنده‌های آتش، هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای، نرم‌کننده‌ها، مواد فعال سطحی (سورفکتانت‌ها)، هورمون‌ها، محصولات مراقبت شخصی، ترکیبات دارویی و نانوذرات می‌باشند، که اغلب در محیط کنترل یا نظارت نمی‌شوند. این آلاینده‌ها در غلظت‌های محیطی کم وجود دارند و اثرات شدیدی بر سلامتی انسان و موجودات زنده می‌گذارند. این آلاینده‌ها عمدتاً در بیمارستان‌ها، مزارع کشاورزی و مناطق شهری و صنعتی تولید می‌شوند. راه‌های اصلی ورود آن‌ها به محیط زیست، بقایای آب‌های آلوده، لجن فاضلاب حاصل از تصفیه‌خانه فاضلاب و کود دامی ناشی از مزارع کشاورزی می‌باشند. با این حال، اگرچه منابع ورودی این آلاینده‌ها شناخته شده هستند، سرنوشت و رفتار آن‌ها در بخش‌های مختلف محیطی و همچنین خطرات آن‌ها برای سلامتی انسان و محیط زیست نیاز به تحقیقات بیش‌تری دارد. هدف از این مقاله مروری، بررسی وضعیت فعلی وقوع، منابع آلودگی، سرنوشت، اثرات بهداشتی و زیست‌محیطی و همچنین ارزیابی ریسک‌های ناشی از EPها در محیط‌های آبی در راستای مدیریت پایدار منابع آبی می‌باشد. در این مقاله مروری طبقه‌بندی EPها در محیط زیست، منابع، سرنوشت و اثرات آن‌ها، با چند مثال مورد بحث قرار می‌گیرد. همچنین برخی از مشکلات مربوط به آلودگی محیط‌های آبی با EPها و ریسک‌هایی که آن‌ها می‌توانند برای آبزیان و سلامتی انسان‌ها ایجاد کنند، ارائه می‌شود. این مقاله نگاهی انتقادی به چالش‌های فعلی ناشی از حضور EPها در محیط‌های آبی و توصیه‌هایی برای تحقیقات بیش‌تر به منظور کاهش اثرات EPها بر محیط‌های آبی و سلامت انسان ارائه می‌کند.

واژه‌های کلیدی: محیط‌های آبی، آلاینده‌های نوظهور، سرنوشت، اثرات بهداشتی، ارزیابی ریسک

مقدمه

آلودگی محیط زیست به یکی از چالش برانگیزترین و روزمره‌ترین معضلات بشر تبدیل شده است. با صنعتی شدن و شهرنشینی، کاهش کیفیت محیط زیست به طرز نگران کننده‌ای افزایش یافته است. گروه‌های مختلف آلاینده‌ها از قبیل ترکیبات غیر آلی پایدار (مانند فلزات سنگین) و ترکیبات آلی (داروها، آفت‌کش‌ها، عوامل مختل کننده غدد درون‌ریز، محصولات مراقبت شخصی و غیره) یک مشکل جدی در سطح جهانی هستند، زیرا می‌توانند بر روی گیاهان و جانوران و سلامتی انسان تأثیر بگذارند (۲و۱).

آب، به عنوان یک منبع ضروری برای حیات در روی زمین، یکی از آسیب‌پذیرترین بخش‌های محیط زیست است. از این رو، آلودگی آب به موضوعی بسیار مورد توجه و خطیر در سراسر جهان تبدیل شده است. سومین مجمع جهانی آب در کیوتوی ژاپن، از سال ۲۰۰۲ توجه را به این واقعیت جلب کرده است که روزانه حدود ۲ میلیون تن آلاینده از دسته‌های مختلف (فاضلاب، پسماندهای صنعتی و کشاورزی) در سراسر جهان به آب ریخته می‌شود، مقداری که تقریباً با وزن جمعیت خشکی برابر است، در نتیجه نزدیک به ۱۵۰۰ کیلومتر مکعب فاضلاب تولید می‌شود (٤و۳).

مطالعات منتشر شده در ادبیات تأکید می‌کند که آلاینده‌ها در محیط آبی با یک پویایی جالب در ارتباط با طبقه‌بندی‌های خود مشخص می‌شوند که در طول زمان تغییر می‌کنند. بنابراین، تشدید تلاش‌های تحقیقاتی و منابع سرمایه‌گذاری شده برای شناسایی همه امکانات به منظور کاهش اثرات و ریسک‌های ناشی از آلودگی آب، با اثرات ضمنی بر سلامت انسان ضروری است، زیرا آلاینده‌های پایدار ظرفیت درگیر شدن در زنجیره غذایی را دارند. بهبود تکنیک‌های تشخیص برخی از مواد در محیط‌های آبی در دهه‌های اخیر منجر به شناسایی تعداد فزاینده‌ای از آلاینده‌ها و محصولات تبدیلی آن‌ها شده است که قبلاً شناخته شده نبودند (٦و۵). این ترکیبات به‌عنوان آلاینده‌های نوظهور (EP_s) شناخته می‌شوند که شامل محصولاتی هستند که روزانه در خانه‌ها، صنعت و سایر فعالیت‌های انسانی (سورفکتانت‌ها و محصولات تجزیه، داروها و محصولات مراقبت شخصی، افزودنی‌های بنزین و نرم‌کننده‌ها و غیره) استفاده می‌شوند. بررسی ادبیات نشان می‌دهد که مکانیسم‌های فعلی برای جمع‌آوری اطلاعات خاص در مورد پویایی EPها در آب باید به‌روزرسانی و پالایش شوند تا از ریسک‌های احتمالی برای کیفیت آب، گیاهان و جانوران در حوضه‌های رودخانه‌ها جلوگیری شود (۳و۲).

موضوع EPها توجه جهانی را به خود جلب کرده است و چندین سازمان دولتی و غیردولتی تحقیقات فعالی در این زمینه انجام داده‌اند. اما آلودگی ناشی از EPها پدیده جدیدی نیست و از چندین هزار سال قبل وجود داشته است. افزایش آن متناسب با توسعه صنایع و فناوری است. جنگ‌های جهانی و جنگ‌های بعدی منجر به آلودگی شیمیایی، هسته‌ای و بیولوژیکی محیط زیست به میزان غیر قابل تصوری شده است. آلودگی‌ها با منشأهای مختلف ممکن است به روش‌های عمدی یا غیرعمدی ایجاد شوند. این روند آلودگی، با آلودگی بیولوژیکی بدنه‌های آبی با مدفوع، مواد زائد و فاضلاب انسانی، آلودگی جهانی سرب از طریق استخراج و ذوب توسط رومیان آغاز شد و به سمت آفت‌کش‌های مبتنی بر آرسنیک و کلر مانند DDT

حرکت کرد و در حال حاضر به ترکیبات دارویی، محصولات مراقبت شخصی، نانوذرات، بازدارنده‌های آتش و غیره رسیده است (۷).

این موضوع، به عنوان یک هدف پایدار برای جامعه علمی و تحقیقاتی باقی خواهد ماند زیرا هر ساله ترکیبات جدیدی سنتز و به محیط زیست وارد می‌شوند. این بدان معنا نیست که فقط مواد شیمیایی مصنوعی به عنوان EPها در نظر گرفته می‌شوند. طبق تعریفی که توسط سازمان زمین شناسی ایالات متحده ارائه شده است، EPها عبارتند از هر ماده شیمیایی مصنوعی یا طبیعی یا هر میکروارگانیسمی که معمولاً در محیط نظارت نمی‌شوند، اما پتانسیل ورود به محیط را دارد و باعث ایجاد اثرات نامطلوب بر محیط‌زیست و یا سلامتی انسان می‌شوند و یا مشکوک به ایجاد اثرات نامطلوب هستند (۸). در واقع، ٦٨ آلاینده میکروبی از جمله باکتری‌ها یا ژن‌های مقاوم به آنتی بیوتیک نیز به عنوان EPs در نظر گرفته می‌شوند (۱۱-۹).

همچنین ممکن است یک آلاینده به دلیل اینکه یک منبع جدید یا مسیری جدید برای رسیدن آن به انسان کشف شده است یا یک روش تشخیص یا فناوری تصفیه‌ای جدید برای آن ایجاد شده است، "نوظهور" تلقی گردد (۱۲). با این حال، درک بهتر EPها یک چالش واقعی است زیرا در حال حاضر فقط اطلاعات کمی در مورد رفتار آن‌ها در محیط‌زیست و اثرات سمی آن‌ها بر سلامتی انسان یا محیط زیست در دسترس است. تا حد زیادی، توسعه سریع روش‌های تحلیلی طیف‌سنجی جرمی در ۲۵ سال گذشته راه را برای شناسایی EPها در مقادیری خیلی اندک باز کرده است (۱۳). از زمانی که EPها توجه گسترده‌ای را به خود جلب کردند، تلاش‌های زیادی برای روشن کردن نگرانی انتشار EPها در محیط و تشویق بیش‌تر سیاست‌گذاران برای اتخاذ اقدامات مرتبط برای جلوگیری از خطرات زیست محیطی صورت گرفته است. در نتیجه، در حال حاضر تعداد زیادی مطالعات پژوهشی در این زمینه در سراسر جهان در حال انجام است که منجر به انتشار مقالات متعددی شده است (۱۸-۱٤).

سانگانیاتو[1] و همکاران در سال ۲۰۱۸ پژوهشی در زمینه تجمع زیستی آلاینده‌های موجود از جمله EPها در دلفین‌های گوژپشت ساکن در آب‌های ساحلی کم‌عمق اقیانوس هند و آرام که اغلب تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی قرار می‌گیرند، انجام دادند (۱۹). فیلیپ[2] و همکاران در سال ۲۰۱۸ پیشرفت گام به گام تحقیقات هندی‌ها در مورد EPها را بررسی کردند (۱۲). کیو[3] و همکاران در سال ۲۰۱۸ به طور جامع آلودگی EPها در شیرابه دفن پسماند در چین را بررسی کردند (۲۰). استارلینگ[4] و همکاران در سال ۲۰۱۹ مطالعات انجام شده در برزیل را با توجه به وقوع، کنترل و سرنوشت EPها در محفظه‌های محیطی جمع‌آوری کردند و داده‌های منتشر شده را با داده‌های به دست آمده در کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه مقایسه کردند (۲۱). گونگ[5] و همکاران در سال ۲۰۱۸ مروری بر کاربرد نمونه‌گیرهای غیرفعال معمولی

[1] Sanganyado
[2] Philip
[3] Qi
[4] Starling
[5] Gong

برای نظارت بر آلاینده‌های آلی قطبی ارائه کردند (۲۲). گوگوی[1] و همکاران در سال ۲۰۱۸ اثربخشی تکنیک‌های مختلف تصفیه در حذف EPها را بررسی کردند و اشاره کردند که دیدگاه تحقیقات آینده باید بر توسعه مدل‌ها و چارچوب غربالگری مبتنی بر ریسک تمرکز کند (۲۳). با توجه به این واقعیت که میکروپلاستیک‌ها نیز به عنوان EPها طبقه‌بندی می‌شوند، فعل و انفعالات بین میکروپلاستیک‌ها و آلاینده‌ها توسط باربوزا[2] و همکاران در سال ۲۰۱۸ مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها نشان دادند که مواد زائد میکروپلاستیکی دریایی ممکن است ایمنی و سلامت غذای انسان را به خطر بیندازند (۲٤). با توجه به این واقعیت که فرآیندهای تصفیه فاضلاب متداول قادر به تصفیه EPها در غلظت‌های بسیار پایین نیستند. طاهران[3] و همکاران در سال ۲۰۱۸ پیشنهاد کردند که تصفیه ثانویه با یک طرح تصفیه پیشرفته برای زلال سازی پساب و در نتیجه حذف EPها ادغام شود (۲۵). با این حال، در مقایسه با کشورهای توسعه یافته، کشورهای در حال توسعه به طور کلی فاقد مطالعات کافی در مورد مسائل مربوط به EPها هستند. این مطالعه با هدف بررسی وضعیت فعلی وقوع، طبقه بندی، مسیرهای بالقوه، منابع آلودگی، سرنوشت، ریسک‌های زیست‌محیطی و بهداشتی و در نهایت ارزیابی ریسک‌های ناشی از EPها در محیط‌های آبی در راستای مدیریت پایدار منابع آب انجام شد.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر یک مطالعه توصیفی – مروری است که داده‌های آن از طریق مطالعات کتابخانه‌ای به دست آمده و از منابع مختلف به منظور پردازش مطالب استفاده شده است. با توجه به اهمیت موضوع EPها در محیط زیست سعی گردید تا حد امکان از مرتبط-ترین و به‌روزترین منابع حاوی نکات ارزنده در رابطه با وقوع EPها در محیط‌های آبی و اثرات آن‌ها بر سلامتی انسان و محیط زیست استفاده شود. در این مطالعه مروری ابتدا به طبقه‌بندی EPها، مسیرهای بالقوه، منابع، و سرنوشت آن‌ها در محیط زیست پرداخته شده است. سپس اثرات بهداشتی و زیست-محیطی ناشی از این آلاینده‌ها مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت مباحث مرتبط با ارزیابی ریسک‌های ایجاد شده توسط EPها در راستای مدیریت پایدار منابع آبی و کاهش اثرات آن‌ها بر محیط‌های آبی و سلامت انسان مورد مطالعه قرار گرفته است.

طبقه‌بندی EPها

EPها به صورت زیر طبقه‌بندی می‌شوند (۲۸-۲٦):

۱. ترکیبات دارویی (داروهای غیرمجاز و تجویزی)

۲. محصولات مراقبت شخصی (محصولات آرایشی و بهداشتی، سورفکتانت‌ها، گندزداها، زیست‌کش‌های خانگی، افزودنی‌های مواد غذایی)

۳. مواد شیمیایی صنعتی (افزودنی‌های مواد غذایی، آفت‌کش‌ها، بی‌فنیل پلی‌کلرینه شده، بازدارنده‌های آتش، مواد ضد میکروبی)

٤. محصولات جانبی گندزدایی (ناشی از تصفیه-خانه‌های آب: نیتروزوآمین، هالونیترومتان‌ها، هالواستونیتریل‌ها، تری هالومتان‌ها، هالواستیک اسیدها)

[1] Gogoi
[2] Barboza
[3] Taheran

۵. سموم جلبکی (سموم آزاد شده از برخی از جلبک‌ها مانند سیانوتوکسین‌ها، میکروسیستین)

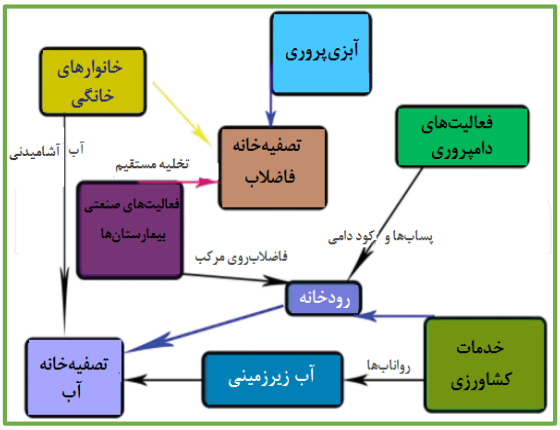
٦. زیست‌کش‌ها و متابولیت‌های آن‌ها (عوامل بازدارنده گیاهان و کشاورزی [آفت‌کش‌ها])

۷. بیوتروریسم و دستگاه‌های اختلال (سلاح‌های بیولوژیکی و شیمیایی)

بیش از ۱۰۳٦ آلاینده نوظهور متابولیت‌های ثانویه و همچنین محصولات تبدیل زیستی آن‌ها در فهرست NORMAN شناسایی شده است (۲۹). رایج‌ترین کلاس‌ها/دسته‌های EPها عبارتند از: مواد شیمیایی صنعتی، محصولات جانبی گندزدایی، آفت‌کش‌ها، شیرین کننده‌ها، ترکیبات مختل کننده غدد درون‌ریز، نانوذرات، کرم‌های ضد آفتاب، فیلترهای UV، ترکیبات دارویی و محصولات مراقبت شخصی (۳۲-۳۰).

مسیرهای بالقوه EPها

مجموعه‌ای از فعالیت‌های انسانی مانند فعالیت‌های کشاورزی، خانگی و صنعتی منجر به تخلیه آلاینده‌ها به ماتریس‌های مختلف محیطی می‌شوند (شکل (۱)). آب و رسوبات به عنوان یک مخزن برای این آلاینده‌ها عمل می‌کنند (۳۳). مصرف مداوم ترکیبات دارویی به دلیل توجه کم‌تر به طب سنتی برای درمان و استفاده مکرر از محصولات مراقبت شخصی، منجر به انتشار محصولات جانبی مختلف با غلظت‌های کم در محیط زیست می‌شود (۳٤). غلظت این آلاینده‌ها در محیط زیست، بستگی به فرآیندهای تولید مورد استفاده برای این داروها در کشورهای مختلف دارد (۳۵). وجود EPها در آب بر پارامترهای فیزیکوشیمیایی آب تأثیر گذاشته و منجر به کاهش کیفیت آب آشامیدنی می‌شود. با این حال، اساساً بسیاری از تصفیه خانه‌های فاضلاب (WWTPs[1]) برای حذف EPها همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است، در نظر گرفته نشده و یا طراحی نشده‌اند. در نتیجه ماهیت آب‌گریز بودن EPها و متابولیت‌های آن‌ها و همچنین سایر ویژگی‌های خاص، در هنگام تخلیه در آب، این آلاینده‌ها در زیر سطح آب قرار می‌گیرند. آب شهری تصفیه شده و تصفیه نشده و همچنین تصفیه خانه‌های فاضلاب، منابع و مسیرهای اصلی ورود EPها به ماتریس‌های محیطی هستند (۲۷).



شکل (۱): منابع بالقوه EPها و متابولیت‌های آن‌ها در چرخه آب اصلاح شده (۲۷)

EPها در محیط‌های آبی

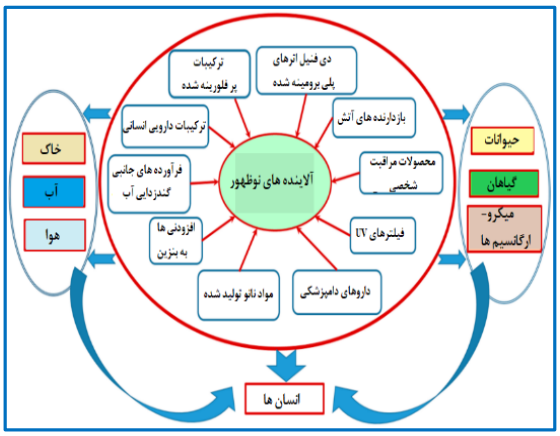
در نتیجه توسعه مستمر فعالیت‌های انسانی (صنعت، کشاورزی و بهداشت)، تولید و استفاده از مواد شیمیایی معروف به «آلاینده‌های نوظهور[2]» و/ یا «آلاینده‌های با نگرانی‌های نوظهور[3]» افزایش یافته است. اولین EPها در اوایل دهه ۱۸۰۰ در محیط‌های آبی کشف شدند (۳٦). وجود EPها در محیط زیست

[1] Wastewater Treatment Plants

[2] Emerging Pollutants
[3] Contaminants of Emerging Concerns

نتیجه شهرنشینی کنترل نشده، توسعه صنعت، فعالیت‌های مراقبت‌های بهداشتی ضروری برای حمایت از رفاه انسان، کشاورزی و حمل و نقل است و شامل طیف گسترده‌ای از مواد تولید شده توسط انسان است که برای جامعه مدرن ضروری تلقی می‌شود (۹و۲).

EPها مواد شیمیایی آلی پایدار سنتزی هستند که به طور معمول در محیط نظارت نمی‌شوند، اما می‌توانند اثرات نامطلوبی بر محیط زیست و سلامت انسان ایجاد کنند. بر اساس پایگاه داده NORMAN، بیش از ۷۰۰ ترکیب وجود دارد که در ۲۰ دسته از EPها دسته‌بندی شده‌اند: "سورفکتانت‌ها، آنتی‌بیوتیک‌ها و سایر داروها، هورمون‌های استروئیدی و سایر ترکیبات مختل کننده غدد درون ریز (EDCs[1])، بازدارنده‌های آتش، ضدآفتاب‌ها، محصولات جانبی گندزدایی، آفت‌کش‌های جدید و متابولیت‌های آفت‌کش‌ها، سموم جلبکی طبیعی و غیره (۳۷و۳). شکل (۲) گروهی از EPها را نشان می‌دهد که در محیط زیست یافت می‌شوند.



شکل (۲): دسته‌بندی EPهایی که بر خاک، هوا، آب، حیوانات، گیاهان، میکروارگانیسم‌ها و انسان تأثیر می‌گذارند (۳۸و۲۳و۶)

مطالعات و تحقیقات متعددی در مورد وقوع، رفتار منابع، اثرات و ریسک‌های ناشی از EPها در محیط وجود دارد (۳۸و۲۳)، اما در حال حاضر، داده‌های جامعی در مورد سمیت آن‌ها در دسترس نیست. این به دلیل اطلاعات ضعیف ناشی از ویژگی‌های پیچیده EPها در محیط در ارتباط با خواص فیزیکوشیمیایی آن‌ها است که باعث رفتار غیرمنتظره در آب، خاک و هوا می‌شود (۳و۲). EPها را می‌توان در آب‌ها در غلظت‌های وسیعی (در محدوده نانوگرم بر لیتر تا میکروگرم بر لیتر) یافت. اثرات EPها بر موجودات زنده با اختلالات غدد درون ریز، سمیت حاد و مزمن و مقاومت میکروارگانیسم‌ها به آنتی‌بیوتیک‌ها همراه بوده و تهدیدی برای سلامت انسان خواهد بود (۳۹و۳).

گروه دیگری از آلاینده‌ها وجود دارد که به عنوان «آلاینده‌های با نگرانی نوظهور» شناخته می‌شوند، که «مواد شیمیایی شناخته‌شده‌ای هستند که برای دهه‌ها در کاربردهای مختلف استفاده شده و به طور تجمعی در محیط منتشر می‌شوند و محصولات فرعی ناشی از تجزیه محیطی آن‌ها اکنون در منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی و همچنین در خاک و رسوبات شناسایی شده‌اند. اصطلاح "آلاینده‌های با نگرانی نوظهور" معمولاً زمانی استفاده می‌شود که اطلاعات بسیار کمی در مورد میزان و فرکانس ریسک‌های ناشی از این دسته از آلاینده‌ها بر روی محیط زیست و سلامت انسان در دسترس باشد (۴۰).

اگرچه برخی از EPها برای چندین سال در محیط زیست وجود داشته‌اند، وقوع کمی و کیفی آن‌ها به تازگی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و مشخص

[1] Endocrine–Disrupting Compounds

شده است که این ترکیبات می‌توانند برای اکوسیستم‌ها ریسک بالایی داشته باشند (۲). روش‌های آنالیز جدید (به‌عنوان مثال، کروماتوگرافی مایع همراه با طیف‌سنجی جرمی (LC-MS)، یا LC-MS-MS) اخیراً توسعه یافته و به کار گرفته شده‌اند که نوید بخش تشخیص غلظت‌های بسیار کم (نانوگرم تا میکروگرم بر لیتر) از این ترکیبات در ماتریس‌های مایع و جامد است. با استفاده از این تکنیک‌ها، شناسایی و تعیین کمیت حدود ۳۰۰۰ ترکیب شیمیایی فعال بیولوژیکی در محیط ممکن خواهد شد (٦).

بسیاری از EPها به دلیل کمبود اطلاعات در مورد اثرات مواجهه مزمن، تابع استانداردها و مقررات نیستند. محصولات دارویی (PPs[1])، محصولات مراقبت شخصی (PCPs[2]) و بازدارنده‌های آتش برخی از متداول‌ترین EPهای شناسایی شده در محیط هستند (۳و۱۷) (جدول (۱)). ترکیباتی که بر سیستم غدد درون‌ریز (EDC) تأثیر می‌گذارند، برخی از EPها هستند که بیش‌تر مورد بررسی قرار گرفته‌اند (شکل (۲)). بیش از ۲۰۰ ترکیب منفرد شناسایی شده است، و تعدادی از آن‌ها تاکنون پایش شده است (۳).

در حال حاضر، بیش از ۳ میلیون تن فتالات در جهان تولید می‌شود. فتالات یک ترکیب شیمیایی معروف است که بیش از نیم قرن است به عنوان نرم‌کننده در پلاستیک‌ها یا به عنوان تثبیت‌کننده در لوازم آرایشی استفاده می‌شود (۲۸-۲٦).

در میان EPها، دسته‌ای از ترکیبات دارویی به دلیل حجم زیادی که برای درمان طیف گسترده‌ای از بیماری‌ها استفاده می‌شوند و ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی و بیولوژیکی بسیار متنوع آن‌ها، بیش‌تر مورد توجه قرار گرفته‌اند. تقریباً تمام گروه‌های دارویی در پساب‌ها شناسایی شده‌اند (٤١). ترکیبات دارویی (شامل گروه‌های مختلف: هورمون‌ها، ضد التهاب، ضد صرع، استاتین‌ها، داروهای ضد افسردگی، بتابلاکرها، آنتی‌بیوتیک‌ها، مواد حاجب و غیره) پس از تجویز تا حد زیادی به شکل اصلی یا به صورت متابولیت‌ها دفع می‌شوند و می‌توانند در فاضلاب شهری، فاضلاب بیمارستانی و آب‌های سطحی یافت شوند (٤٢). آن‌ها همچنین می‌توانند به آب‌های زیرزمینی یا حتی آب آشامیدنی و همچنین خاک حاصل از آب آبیاری برسند. به نظر می‌رسد آنتی‌بیوتیک‌ها در محیط به مقدار فزاینده‌ای پخش می‌شوند و تنوع رو به رشدی از ترکیبات را در بر می‌گیرند. مطالعات اخیر نشان داد که غلظت آنتی‌بیوتیک‌ها در برخی از رودخانه‌های جهان تا ۳۰۰ برابر از سطوح "ایمن" فراتر می‌باشد (٤٣). مطابق نظر سازمان جهانی بهداشت ، بزرگ‌ترین تهدید برای سلامتی، امنیت غذایی و توسعه جهانی، مقاومت آنتی بیوتیکی است. درمان تعداد فزاینده‌ای از عفونت‌ها و بیماری‌ها دشوار است، زیرا آنتی‌بیوتیک‌هایی که برای درمان آن‌ها استفاده می‌شوند در نتیجه آلودگی‌های محیطی کارایی کم‌تری دارند (٤٤).

در بین EPها، ریزآلاینده‌های نوظهور (EMPs[3]) «مواد شیمیایی انسان‌زایی (ناشی از فعالیت‌های انسانی) هستند که در محیط (آبی) به دلیل فعالیت‌های انسانی، بطور بالقوه بسیار بالاتر از سطح پس‌زمینه طبیعی اما با غلظت‌هایی در سطوح پایین (کمیاب) (به عنوان مثال، در محدوده میکروگرم بر لیتر)» وجود دارند. اگرچه EMPها در غلظت‌های بسیار پایین در

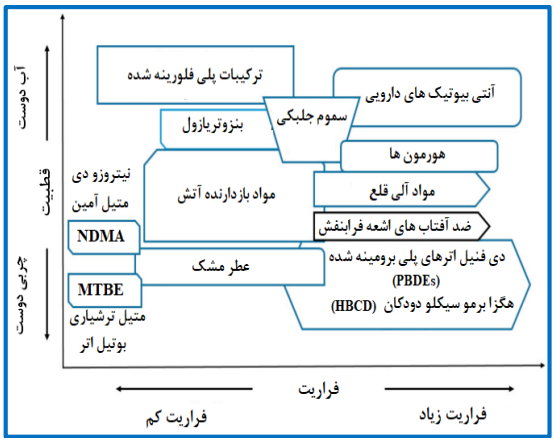
[1] Pharmaceutical Products
[2] Personal Care Products
[3] Emerging Micro Pollutants

محلول‌های آبی (از پیکوگرم تا میکروگرم بر لیتر) یافت می‌شوند، اما EMPها معمولاً پس از مواجهه طولانی مدت می‌توانند اثرات سمی شدیدی را ایجاد کنند. EPها را می‌توان با توجه به خواص فیزیکی و شیمیایی آن‌ها به صورت زیر دسته‌بندی کرد (۳):

۱) مواد آلی قطبی (به عنوان مثال، داروها، مواد شیمیایی صنعتی، آفت‌کش‌ها)

۲) ذرات آلوده‌کننده (به عنوان مثال، نانوذرات و میکروپلاستیک‌ها).

هنگامی که EPها در محیط، فاضلاب، آب‌های سطحی یا پساب‌های تصفیه شده قرار می‌گیرند، قطبی‌تر، اسیدی‌تر و قلیایی‌تر از مواد شیمیایی طبیعی هستند و این ویژگی‌ها در برخی از غلظت‌ها آن‌ها را خطرناک می‌کند. بسیاری از EPها آب‌گریز هستند و از طریق زنجیره غذایی پویا هستند، بنابراین می‌توانند در بافت‌های غنی از چربی تجمع کنند یا می‌توانند با قرار گرفتن در معرض مستقیم یا غیرمستقیم بر سیستم غدد درون ریز حیوانات و انسان تأثیر بگذارند (۲) (شکل (۳)).



شکل (۳): فراریت و قطبیت EPها (٦)

دسته‌ای از ترکیبات آلی که اخیراً در لیست EPها گنجانده شده است شامل ترکیبات ضد اشعه فرابنفش یا فیلترهای آلی UV هستند. اگرچه می‌توان آن‌ها را به عنوان محصولات مراقبت شخصی در نظر گرفت، اما این ترکیبات نیاز به توجه ویژه‌ای دارند، زیرا افزایش تولید و استفاده از فیلترهای آلی UV آن‌ها را به دسته جدیدی از آلاینده‌های زیست محیطی تبدیل کرده است. این ترکیبات به طور گسترده در ترکیب محصولات ضد آفتاب استفاده می‌شوند، زیرا به دلیل ضریب جذب مولی زیادشان در محدوده UVA (۳۲۰–٤۰۰nm) و UVB (۲۸۰–۳۲۰ nm) توانایی جذب تابش خورشید را دارند (٦). بنابراین فیلترهای UV می‌توانند مصرف کنندگان را از اثرات مضر اشعه خورشید محافظت کنند و همچنین پایداری نوری محصولات مراقبت شخصی مانند کرم‌های پوست، اسپری مو، لوازم آرایشی، رنگ مو، شامپو، لوسیون بدن و غیره را افزایش دهند. استفاده گسترده و نظارت بر آن‌ها بیانگر آنست که این ترکیبات می‌توانند در بدن انسان (بسیار چربی دوست)، در محفظه‌های محیطی و اکوسیستم‌ها تجمع یابند (٤٥). علاوه بر این، برخی از مطالعات مقدماتی در حیوانات نشان داده است که برخی از فیلترهای UV مختل کننده غدد درون‌ریز هستند. سایر خطرات مرتبط با حضور آن‌ها در محیط بسیار کم شناخته شده است (٤٦).

فیلترهای UV به دلیل تعداد زیاد شناگران و آفتاب‌گیران در طول فعالیت‌های تفریحی وارد آب‌های سطحی می‌شوند. سواحل بیش‌تر در معرض مواجهه با این ترکیبات قرار دارند و آب خلیج‌ها یا دریاها می‌تواند حاوی فیلترهای UV مختلف از کرم‌های ضد

آفتاب مانند اتیل هگزیل متوکسی سینامات، EHMC[1] باشد. اوکتوکریلن، OC[2]؛ بوتیل متوکسی دی بنزوئیل متان، BM-DBM[3]. بنزوفنون-۳، BP3[4] و غیره، و پایش آن‌ها صد کیلوگرم در سال را به عنوان پتانسیل آلودگی آب با فیلترهای UV پیش‌بینی می‌کند. آن‌ها در رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، آب دریا، آب‌های زیرزمینی، رسوبات و موجودات زنده شناسایی شده‌اند. با این حال، منبع اصلی آلودگی، پساب‌های حاصل از WWTPs گزارش شده است. مشابه با سایر دسته‌های EPها، WWTPها در حذف فیلترهای آلی UV بسیار موثر نیستند. راموس[5] و همکاران یک مرور کلی در مورد ظهور و سرنوشت گروه بزرگی از فیلترهای UV در تصفیه خانه‌های مختلف فاضلاب انجام دادند (۶).

اگر غلظت این ترکیبات در محیط‌های آبی به سطوح مورد نظر برسد، کیفیت پساب فاضلاب به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد و استفاده مجدد از فاضلاب تصفیه شده محدود می‌شود (۴۷و۶). به همین دلیل وقوع و اثرات منفی آن‌ها بر محیط آبی و سلامت انسان نیاز به بررسی کامل دارد. تجزیه و تحلیل این ترکیبات در ماتریس‌های پیچیده مانند فاضلاب همانند سایر EPها به تکنیک‌های حساس و بسیار خاص مانند LC-MS/MS نیاز دارد. در حال حاضر، قانون اروپا حداکثر غلظت مجاز را برای هر فیلتر UV در محصولات آرایشی و بهداشتی مشخص کرده است (قوانین شماره ۲۰۰۹/۱۲۲۳ پارلمان اروپا و شورای ۳۰ نوامبر ۲۰۰۹ در مورد محصولات آرایشی) (۴۸). تعداد ۲۷ فیلتر UV در قوانین اتحادیه اروپا در غلظت‌های بین ۱۵-۲ درصد مجاز هستند. برخی از فیلترهای آلی UV می‌توانند در محصولات تبدیلی (TP[6]) در نتیجه تجزیه نوری تحت تأثیر تابش خورشیدی یا با تجزیه زیستی در محیط به ترکیبات دیگری تبدیل شوند و به همین خاطر در طول نظارت شناسایی نمی‌شوند. مشابه با سایر EPها، مطالعات تجربی بیش‌تری باید در مورد سرنوشت مخلوط فیلترهای UV در محیط انجام شود (۴۹).

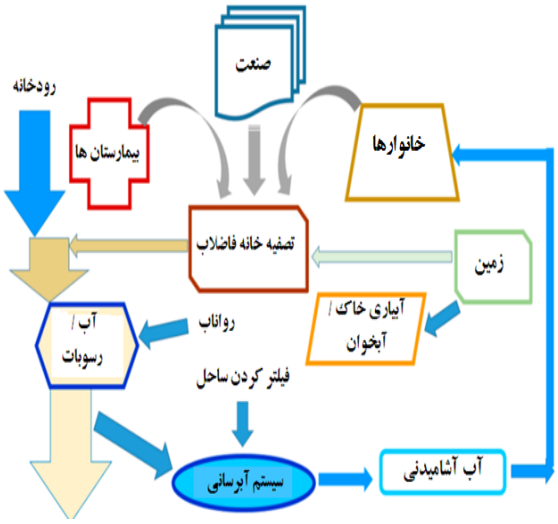
علاوه بر این، قوانین اروپا شامل مقررات دیگری در مورد EPها می‌باشد، مانند: REACH[7] (مقررات (EC) شماره ۲۰۰۶/۱۹۰۷ پارلمان اروپا و شورای مورخ ۱۸ دسامبر ۲۰۰۶ در مورد ثبت، ارزیابی، مجوز و محدودیت مواد شیمیایی) (۵۰) و یا مقررات مربوط به تعیین روش‌های اعطای مجوز و نظارت بر ترکیبات دارویی برای مصارف پزشکی و دامپزشکی (مقررات پارلمان اروپا و شورای اصلاح مقررات (EC) شماره ۲۰۰۴/۷۲۶ تشریح رویه‌های جامعه برای مجوز و نظارت بر فرآورده‌های دارویی برای استفاده پزشکی و دامپزشکی و ایجاد آژانس دارویی اروپا) (۵۱). بر اساس دستورالعمل چارچوب آب (WFD[8]) (دستورالعمل EC/۶۰/۲۰۰۰ پارلمان اروپا و شورای ۲۳ اکتبر ۲۰۰۰ مبنی بر ایجاد چارچوبی برای اقدام جامعه در زمینه سیاست آب)، کشورهای عضو اتحادیه اروپا مواد نوظهوری را که به دلیل فرکانس بالا و ریسک بالقوه برای سلامتی انسان و محیط زیست به این اقدام نیاز دارند، بر اساس فهرست نظارتی تهیه شده از EPها، نظارت می‌کنند (۵۲).

[1] Ethylhexyl Methoxycinnamate
[2] Octocrylene
[3] Butyl Methoxydibenzoylmethane
[4] Benzophenone-3
[5] Ramos
[6] Transformation Products
[7] Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals
[8] Water Framework Directive

منابع آلودگی و سرنوشت EPها در محیط زیست

EPها، طیف وسیعی از ترکیبات با برخی خواص فیزیکی و شیمیایی خاص، مشکلات متعددی را در ارتباط با حذف آن‌ها از محیط زیست ایجاد می‌کنند. به عنوان مثال، در تصفیه آب‌های سطحی و فاضلاب-هایی که حاوی EPها هستند، باید هم فعل و انفعالات بین آلاینده‌ها و هم فعل و انفعالات بین آلاینده‌ها با شرایط محیطی مختلف، مانند توالی فصول، شدت تابش خورشید، دما، مقاومت‌های هیدرولیکی و غیره در نظر گرفته شود. EPها را می‌توان به دلیل ویژگی‌های خاصی نظیر ماندگاری در طول حمل و نقل طولانی و تجمع زیستی، در مناطق مختلفی یافت که در آن‌ها هرگز استفاده نشده‌اند (۵۳و۲).

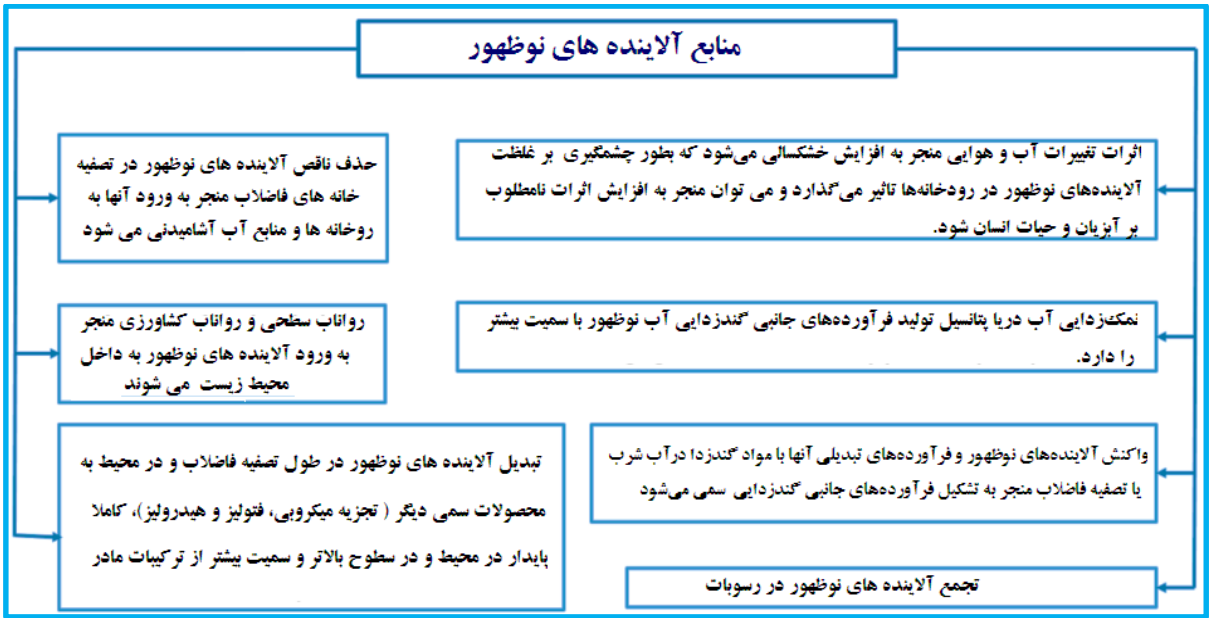
EPها می‌توانند از منابع مختلف نقطه‌ای یا پراکنده در محیط ظهور یابند و سپس از طریق چندین راه یا مکانیسمی که عمدتاً به خواص EPها (قطبیت، فراریت، ماندگاری و غیره) و همچنین ویژگی‌های محیط بستگی دارد، به خاک، اتمسفر یا بدنه‌های آبی برسند (۳). EPها و برخی از متابولیت‌های آن‌ها از مسیرهای مختلفی از صنایع، خانوارها، بیمارستان‌ها، زمین‌ها و غیره در محیط رها می‌شوند (شکل (٤)) و در نهایت وارد آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌شوند (۲۳).



شکل (٤): منشاء EPها و مسیرهای آن‌ها در محیط زیست (٦)

EPها می‌توانند به راحتی به آلاینده‌های اکوسیستم‌های رودخانه‌هایی تبدیل شوند که پساب‌های ناکافی تصفیه شده در آن‌ها تخلیه می‌شوند (شکل (۵)). همچنین آن‌ها می‌توانند در رسوبات و گیاهان و جانوران رودخانه به دلیل ماندگاری تجمع زیستی یابند. تجزیه زیستی، تجزیه شیمیایی و تجزیه نوری آن‌ها (در غیاب نور) می‌تواند با سرعت بسیار کم‌تری رخ دهد. از این رو، حذف آن‌ها از محیط‌های آبی تقریباً ناچیز است (٥٤). اگرچه، برخی از جمعیت‌های میکروبی می‌توانند با اثر زیست‌کشی EPها مبارزه کنند و به طور عملی آن‌ها را تغییر دهند و نرخ تجزیه آن‌ها را افزایش دهند. مطالعات کمی در مورد تجزیه زیستی طبیعی EPها مانند هورمون‌ها، برخی مواد شوینده یا ترکیبات دارویی وجود دارد. معمولاً این مطالعات در آزمایشگاه‌ها انجام می‌شوند، اما تضمینی مبنی بر اینکه که سیستم‌های آزمایشگاهی شرایط واقعی محیط را به خوبی تکرار کنند، وجود ندارد و اجرای این نتایج در مقیاس بزرگ هنوز به اندازه کافی مشخص نشده است (۳و۲). بنابراین، توسعه مطالعات و تحقیقات برای یافتن و بهره‌برداری

از جمعیت‌های میکروبی متناسب با دسته‌های مختلف EPها یا حتی هدف‌گذاری برای ترکیبات خاص، تکلیفی با چشم‌اندازهای بزرگ برای محققان است.



شکل (۵): بروز سمیت EPها از منابع مختلف آلودگی (٦)

اثرات بهداشتی و زیست محیطی ناشی از EPها

بروز ریسک‌های زیست محیطی و سلامتی در انسان در ارتباط با EPها ناشی از سمیت آن‌ها است. EPها بسیار سمی در نظر گرفته می‌شوند، زیرا در غلظت‌های نانوگرم در لیتر (ng/L) می‌توانند اثرات نسبی از قبیل تداخل هورمونی در ماهی‌ها، سمیت ژنتیکی، سرطانزایی در حیوانات آزمایشگاهی، اختلالات غدد درون‌ریز و سمیت ایمنی را هم برای انسان‌ها و هم برای موجودات آبزی نشان دهند، مشخص نیست و/یا تخمین اثرات درازمدت اکثر EPها بر محیط زیست و سلامتی انسان دشوار است و این هنوز یک نگرانی است، در حالی که آگاهی و شناخت از رفتار و خطرات یا ریسک‌های زیست محیطی آن‌ها واقعاً کافی نیست. ادبیات و متون علمی، استفاده از ابزارهای خاص از قبیل ارزیابی ریسک زیست محیطی (ERA[1])، تجزیه و تحلیل کمی رابطه ساختار – فعالیت (QSAR[2])، رابطه بین خواص فیزیکوشیمیایی و رفتار و سرنوشت زیست محیطی (PPEF[3])، به کمک ابزارهای نرم- را برای ارزیابی اثرات سمیت EPها توصیه می‌کند (٤١و٦و٢). مطالعات موجود در مورد ریسک‌های ناشی از EPها در محیط‌زیست و به ویژه در آب، سمیت آن‌ها را بر روی گیاهان و جانوران آبزی (ماهی، جلبک، دافنیا) در نظر گرفته است، اما همچنین بر ریسک‌های سلامتی انسان به‌ویژه در سیستم‌های

[1] Environmental Risk Assessment
[2] Quantitative analysis of the Structure-Activity Relationship
[3] Properties and Environmental Behavior and Fate

بازیابی و استفاده مجدد آب تمرکز کرده است. با این حال، با توجه به غلظت کم این آلاینده‌ها در جریان‌های مایع، جمع‌آوری داده‌ها در مورد پارامترهای سمیت و در معرض قرار گرفتن انسان چالش‌های علمی واقعی هستند (۵۵). در این زمینه، دستورالعمل‌هایی توسط آژانس حفاظت از محیط‌زیست ایالات متحده و سازمان جهانی بهداشت فراهم شده است که روش-هایی را برای ارزیابی ریسک EPها بر روی سلامتی انسان و تعیین عوامل مواجهه با مواد شیمیایی مختلف ارائه می‌دهند. در اتحادیه اروپا، پروتکل‌ها و روش-هایی برای تجزیه و تحلیل ریسک‌های تولید شده توسط مواد شیمیایی، از سال ۱۹۸۰ (برای "مواد شیمیایی جدید") توسعه یافته است، سپس، در آغاز دهه ۱۹۹۰، محصولات دارویی مورد توجه قرار گرفتند. یکی از مهم‌ترین پیشرفت‌ها و تحولات در مورد ثبت و ارزیابی مجوز مواد شیمیایی توسط مقررات REACH ارائه شده است (٦).

بررسی‌ها در زمینه ریسک‌های اکولوژیکی و سلامتی انسان، به عنوان یک اولویت، بر روی گروه‌های آلاینده‌ها در فاضلاب و آب‌های سطحی متمرکز شده است. علاوه بر این، برخی از مطالعات به تجمع EPها در رسوبات پرداختند، که معمولاً به عنوان یک مخزن برای EPها و سمیت دیده می‌شوند (٦). علاوه بر این، اگر ذرات تشکیل‌دهنده رسوبات مجدداً جابجا شده و در جریان مایع متحرک (مثلاً در هنگام سیل) معلق شوند، رسوبات می‌توانند به منبع آلودگی با EPها برای گیاهان و جانوران آبزی تبدیل شوند (شکل (۵)). EPهای مرتبط با ذرات جامد می‌توانند به طور بالقوه در دسترس موجودات اعماق دریا قرار گیرند و اگر سطح تجمع زیستی به اندازه کافی بالا باشد، می‌توانند مواجهه حاد و مزمن ایجاد کرده و به سطوح تغذیه‌ای بالاتر گسترش یابند (٥٦).

در آب رودخانه‌ها، EPها می‌توانند دستخوش تبدیل‌های احتمالی به موادی با سمیت کم‌تر شوند. همچنین محصولات سمی‌تر نیز می‌توانند جذب رسوبات شده و تجمع یابند یا به سایر آب‌های حاوی گیاهان و جانوران حساس یا محافظت شده و یا به آب‌های زیرزمینی استفاده شده به عنوان منبع آب آشامیدنی، منتقل شده و بسته به طبقه و ترکیبات، اثرات بهداشتی و زیست محیطی خود را آشکار نمایند (جدول (۱)).

جدول (۱): منابع، اثرات بهداشتی و زیست محیطی EPها (۵۷)

طبقات	منابع	اثرات بهداشتی	اثرات زیست محیطی
هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای (PAHs)	آسفالت مورد استفاده در جاده‌سازی، داروها، رنگ‌ها، پلاستیک‌ها و آفت‌کش‌ها. آن‌ها همچنین می‌توانند در موادی مانند نفت خام، زغال سنگ، قطران زغال سنگ، کرئوزوت و قیر پشت بام یافت شوند.	• سرطان‌زا و پتانسیل تشکیل نوروتوکسین	• سمیت حاد متوسط تا زیاد برای آبزیان و پرندگان • در غلظت‌های بالا در خاک، می‌تواند اثرات نامطلوبی بر روی بی‌مهرگان زمینی از جمله بر تولید مثل، نمو و ایمنی داشته و ممکن است باعث ایجاد تومور شود.
آفت‌کش‌ها	روان‌آب‌های کشاورزی و فضاهای سبز شهری و پارک‌ها (شامل علف‌کش‌ها و حشره‌کش‌ها)	• اثرات کوتاه مدت مانند سردرد و حالت تهوع • اثرات مزمن مانند سرطان، آسیب تولید مثل، و اختلال غدد درون‌ریز	• می‌تواند خاک، آب، چمن و سایر گیاهان را آلوده کند. • می‌تواند باعث مرگ و میر در حشرات و علف‌های هرز شود. • برای سایر موجودات از جمله پرندگان، ماهی‌ها، حشرات مفید و گیاهان غیر هدف سمی است.
استروژن‌های محیطی	مواد شیمیایی مصنوعی موجود در مواد غذایی، محصولات حیوانی و گیاهی و برخی از اقلام خانگی	• با سرطان سینه در زنان و سرطان پروستات در مردان مرتبط بوده است. • استروژن دارای طیف گسترده‌ای از اثرات بر روی بدن و مغز، از جمله در پردازش عاطفی از طریق عوامل عصبی روانی است.	• فیزیولوژی ماهی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و می‌تواند بر رشد تولید مثل در حیوانات اهلی و وحشی تأثیر بگذارد. • می‌تواند اثرات سایر تنش‌های محیطی را بر گیاه کاهش دهد.
فتالات‌ها	مواد شیمیایی صنعتی که برای نرم کردن پلاستیک PVC و به عنوان حلال در لوازم آرایشی و سایر محصولات مصرفی استفاده می‌شود.	• آسیب به کبد، کلیه‌ها و ریه‌ها • به سیستم تولید مثل آسیب می‌رساند و می‌تواند باعث ناباروری و مشکلات باروری در مردان شود.	• اثرات سمیت در حیوانات از جمله آسیب به کبد، کلیه، ریه‌ها و سیستم تولید مثل
ترکیبات دارویی	ورود از طریق فاضلاب خانوارهای دارای بیماران مصرف کننده دارو	• توسعه سویه‌های باکتری مقاوم به آنتی بیوتیک که می‌تواند منجر به تهدید جدی برای سلامت انسان شود.	• توسعه سویه‌های باکتری مقاوم به آنتی بیوتیک که می‌توانند اکوسیستم‌های باکتریایی طبیعی در محیط را به شدت مختل کنند. • تحت شرایط خاص تاثیر مستقیم بر تولید مثل ماهی
محصولات مراقبت شخصی	محصولات بهداشتی، زیبایی و پاک‌سازی		• تأثیر منفی بر اکوسیستم‌های آبی، به ویژه مربوط به اختلالات غدد درون ریز و اختلالات تولید مثل • ایجاد لایه‌ای روی سطح آب که مانع تبادلات گازی بین هوا و دریا می‌شود.

ادامه جدول (۱):

فیلترهای UV	در محصولات ضد آفتاب و سایر محصولات موضعی یافت می‌شود.	• فیلترهای شیمیایی خاصی مختل کننده غدد درون ریز بالقوه هستند. • مختل کننده غدد درون ریز حیوانات	• ایجاد لایه‌ای روی سطح آب که مانع تبادلات گازی بین هوا و دریا می‌شود.
بازدارنده‌های آتش	به عنوان پوشش استفاده می‌شود.	• خاصیت سرطان‌زایی دارند. • شعله بروم و کلردار • بازدارنده‌ها می‌توانند سمیت آتش را از جمله سرعت رشد آتش و سمیت دود را افزایش دهند.	.• اثرات سمی بر جانوران دریایی
محصولات جانبی گندزدایی	ناشی از زباله‌های خانگی، بیمارستانی و صنعتی.		• شواهدی از خواص سرطان‌زایی و جهش‌زایی محصولات جانبی در حیوانات کوچک وجود دارد.

اگر مخلوطی از انواع EPهای مختلف موجود باشد، اثرات سمی ناشی از آن‌ها می‌تواند تجمع یابد و برهمکنش‌های هم افزایی یا متضاد ایجاد کند، که منجر به اصطلاح "اثر کوکتل[1]" می‌شود، به طوری که دشواری تجزیه و تحلیل ریسک افزایش می‌یابد. در این زمینه، اصل احتیاط باید به طور مداوم اعمال شود تا از محیطی پاک و سالم برای نسل‌های آینده اطمینان حاصل شود، به همین دلیل است که مطالعات بیش‌تر در مورد ریسک‌های ناشی از EPها (در نتیجه رفتار محیطی خاص، سمیت و اثرات آن‌ها بر محیط زیست و سلامت انسان) ضروری می‌باشد (۳۸و۶و۳).

اغلب، شناسایی منشأ EPها و ریسک‌های ایجاد شده توسط آن‌ها دشوار است، تا زمانی که می‌توانند از منابع انتشار آلودگی مانند نشت و تخلیه فاضلاب، رواناب‌های سطحی در مناطق شهری و زمین‌های کشاورزی و غیره منشاء بگیرند (شکل‌های (۶-۴)).

برای برآورد ریسک‌های ایجاد شده توسط EPها از منابع مختلف نسبت به پذیرنده‌های مختلف، شناسایی آن‌ها و تعیین دوزها و مواجهه‌های حاد و مزمن ضروری است. اطلاعات مورد نیاز برای تخمین و تجزیه و تحلیل ریسک در آزمایشگاه‌های تحقیقاتی در حال توسعه مطالعات شیمی محیطی، سم‌شناسی و اکوتوکسیکولوژی است که می‌تواند داده‌های اصلی و مجموعه‌های کاملی از آزمایش‌ها را طبق مقررات موجود تولید کند. این مراحل می‌توانند تشخیص و شناسایی منابع (خطرات)، مسیرها (حمل و نقل و سرنوشت EPها)، پذیرنده‌ها و پیامدها، از جمله در معرض قرار گرفتن انسان (ارتباط آلاینده) را تسهیل کنند (۵۸).

در حال حاضر، ارزیابی ریسک زیست‌محیطی (ERA[2]) با محاسبه مقدار نسبت بین غلظت محیطی پیش‌بینی‌شده (PEC[3]) و غلظت بدون تأثیر

[1] cocktail effect: اصطلاح "اثر کوکتل" برای تعریف سمیت ناشی از ترکیب چند آلاینده استفاده می‌شود. در واقع، برخی از مواد شیمیایی در غلظت‌های کم‌تر از حد آستانه مجاز خطرناک نیستند، اما در صورت ترکیب با سایر آلاینده‌ها می‌توانند سمی باشند. بنابراین، مخلوطی از ترکیبات می‌توانند به یک اثر سمی بالاتر و قوی‌تر از سمیت ترکیب منفرد منجر شوند.

[2] Environmental Risk Assessment

[3] Predicted Environmental Concentration

پیش‌بینی‌شده (PNEC[1]) برای یک ماده واحد انجام می‌شود (۵۹). تا حدودی اخیراً، توسعه مدل‌های فارماکوکینتیک مبتنی بر تبدیل‌های زیستی فیزیولوژیکی در موجودیت‌های تحت‌تاثیر EPها امکان توصیف دریافت، توزیع، متابولیسم و دفع EPها را فراهم کرده است (۳). با این حال، در بیش‌تر موارد، با پرداختن به رابطه برخی از EPها با محیط و ریسک-های مرتبط، مشخص کردن مسیر از منبع به پذیرنده به خصوص برای مواد جدید دشوار است، زیرا این مسیر به عوامل بسیاری در ارتباط با خود مواد از قبیل منبع (خطر)، شرایط محیطی و تصفیه‌های بالقوه‌ای که EPها در معرض آن قرار می گیرند، بستگی دارد (شکل (۷)).

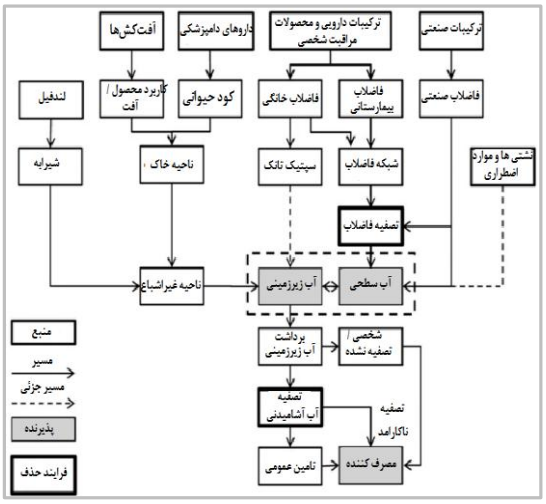
حل این مشکلات در سریع‌ترین زمان ممکن بهترین تصمیمات را برای مدیریت ریسک تسهیل می‌کند. علاوه بر این، برآورد و تجزیه و تحلیل ریسک‌های ایجاد شده توسط مخلوطی از EPها، استراتژی‌های جدیدی را تحمیل می‌کند، که باید واقعیت را با دقت هر چه تمام‌تر باز تولید کند، زیرا اگر تنها یک ماده از مخلوط یا هر ماده به طور جداگانه مورد تجزیه و تحلیل گرفته بگیرد، سمیت مخلوط را می‌توان کم یا بیش از حد برآورد کرد در ادبیات علمی، دو نوع مشکل در این زمینه مطرح شده است (۶۰و۵۹):

- ارزیابی سمیت مخلوط، زمانی که نتایج فقط برای آن مخلوط معتبر است و نمی‌توان آن را به سناریوهای سایر مواجهه‌ها تعمیم داد.

- ارزیابی با در نظر گرفتن اجزای مخلوط، زمانی که نتایج را می‌توان به دو روش تفسیر کرد: با تجمع سمیت اجزا یا در نظر گرفتن عملکرد مستقل هر یک از اجزای مخلوط که منجر به یک اثر سم‌شناسی مشترک می‌شود.

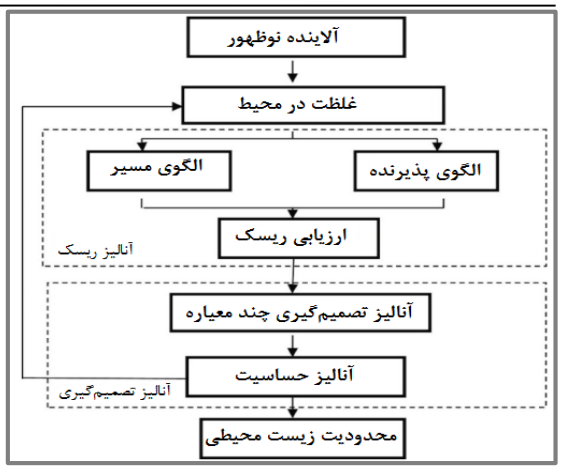
با این حال، این دو رویکرد نمی‌توانند اثرات واقعی مخلوط EPها را توصیف کنند، برخی از مطالعات نشان می‌دهند که تخمین سمیت با آزمایش مخلوط‌ها می‌تواند منجر به سمیت بالاتر از مقدار واقعی شود، در حالی که تخمین‌های منفرد می‌تواند منجر به سمیت کم‌تری نسبت به مقدار واقعی شود.

ارزیابی و تجزیه و تحلیل ریسک از مهم‌ترین تحقیقات مربوط به EPها هستند، زیرا می‌توانند مدیریت آلاینده‌ها را در یک رویکرد "مبتنی بر ریسک" با ارائه پشتیبانی برای تصمیم‌گیری در مورد گزینه‌های اصلاح مناسب هم از نظر کاهش ریسک و هزینه و هم اثربخشی و بهره‌وری به صورت یکپارچه امکان‌پذیر سازد (شکل (۷)). ارزیابی ریسک یکپارچه ارتباط ریسک را با ذینفعان برای تجزیه و تحلیل و تصمیم‌گیری در مورد کاهش ریسک تسهیل می‌کند (۵۶و۶).



شکل (۶): منابع و مسیرهای EPها برای رسیدن به پذیرنده‌های مختلف (خاکستری) (۶)

[1] Predicted No-Effect Concentration



شکل (۷): تجزیه و تحلیل تصمیم‌گیری مبتنی بر ریسک (۶۲)

مروری بر ارزیابی ریسک‌های ایجاد شده توسط EPها

اگرچه EPها اغلب در ماتریس‌های محیطی مختلف در جهان رخ می‌دهند، اما آگاهی از رفتارها و خطرات و یا ریسک‌های زیست محیطی آن‌ها بسیار ناکافی است. با توجه به پیچیدگی و گروه‌های متنوع EPها، توسعه روش‌های قابل اعتماد برای ارزیابی ریسک این آلاینده‌ها ضروری است (۳۸). ریسک‌های زیست محیطی و سلامتی ناشی از EPها با توجه به ایجاد حمایت تصمیم‌گیری برای اطمینان از حفاظت از سیستم‌های اکولوژیکی، به ویژه محیط زیست آبی، و همچنین سلامتی انسان ارزیابی می‌شوند. افراد مورد ارزیابی ریسک سلامتی انسان افرادی هستند که ممکن است از طریق مصرف آب آشامیدنی یا مصرف مواد غذایی آلوده یا محصولات گیاهی آبیاری شده با آب بازیافتی که به اندازه کافی تصفیه نشده است، با آلاینده‌های سمی تماس مستقیم یا غیرمستقیم داشته باشند. در سطح کمیسیون اروپا، تأکید می‌شود که اگر قرار گرفتن در معرض مواد شیمیایی ارزیابی شود، لازم است اثر تجمعی نشرهای قبلی که می‌تواند غلظت‌های باقی‌مانده یا پس‌زمینه ایجاد کند، نیز در نظر گرفته شود (۶).

- روش‌های ضریب خطر و ضریب ریسک

روش‌های ضریب خطر (HQ[1]) و ضریب ریسک (RQ[2]) هر دو اغلب برای توصیف طبقه خطر یک ماده شیمیایی استفاده می‌شوند. RQ نسبت تخمین نقطه‌ای قرار گرفتن در معرض و تخمین نقطه‌ای اثرات است که در درجه اول توسط EPA[3] ایالات متحده برای ارزیابی خطر زیست محیطی آفت‌کش‌ها استفاده می‌شود. HQ ضریب غلظت محیطی اندازه‌گیری یا برآورد شده (MEC[4]) و غلظت اثر (EC[5]) است (۳۸).

روش ضریب ریسک یکی از پرکاربردترین رویکردها برای ارزیابی ریسک اکولوژیکی ناشی از EPهای شناسایی شده، است. RQ بر اساس معادله (۱) محاسبه می‌شود (۶۲و۶۱):

$$RQ = \frac{MEC}{PNEC} \qquad (۱)$$

که در آن MEC غلظت محیطی اندازه‌گیری شده آلاینده را نشان می‌دهد. PNEC غلظت بدون اثر پیش بینی شده آلاینده است. RQ اساساً شاخصی برای تعیین کمیت ریسک زیست محیطی مواد شیمیایی ارایه می‌دهد که شامل مقایسه غلظت محیطی آلاینده‌ها با غلظت‌هایی است که باید عدم وجود اثرات نامطلوب

[1] Hazard Quotient
[2] Risk Quotient
[3] Environmental Protection Agency
[4] Measured Environmental Concentration
[5] Effect Concentration

بر ارگانیسم‌های هدف را بر اساس داده‌های تجربی تضمین نمایند (۶۳).

هنگامی که تجزیه و تحلیل ریسک موکداً برای محیط‌های آبی انجام می‌شود، ارزیابی غلظت‌های شناسایی شده در محیط و سمیت مزمن EPها برای موجودات آبی، برای تعیین RQ ضروری است (۶۴). PNEC از تقسیم مقدار سمیت حاد (کوتاه مدت) یا مزمن (بلند مدت) بر یک فاکتور ارزیابی (AF[1]) حاصل می‌شود. سمیت حاد را می‌توان به عنوان میانه غلظت کشنده (LC50[2]) یا میانگین غلظت موثر (EC50[3]) در نظر گرفت که در این صورت AF برابر ۱۰۰۰ است. سمیت مزمن با غلظت بدون اثر قابل مشاهده (NOEC[4]) مشخص می‌شود، که در این صورت بسته به سطوح تغذیه‌ای، AF می‌تواند ۱۰، ۵۰، ۱۰۰ باشد. در این صورت، سطح ریسک می‌تواند (۶۵و۶۶):

۱) پایین باشد، زمانی که $RQ \leq 0.1$ باشد.

۲) متوسط باشد، زمانی که $0.1 < RQ < 1$ باشد.

۳) بالا باشد، زمانی که $RQ \geq 1$ باشد.

داس سانتوس[5] و همکاران، ارزیابی ریسک پیش‌بینی‌شده ناشی از EPها [۹ ماده شیمیایی مختل کننده غدد درون ریز (EDCs) و ۲۶ ماده شیمیایی فعال دارویی (PhACs)] را در رسوبات دریایی محل مجاور تخلیه فاضلاب زیردریایی در امتداد ساحل ایالتی سائوپائولو (برزیل) با استفاده از روش ضریب ریسک مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش، ارزیابی ریسک زیست محیطی پیش‌بینی‌شده با در نظر گرفتن غلظت‌های زیست محیطی اندازه‌گیری شده و نقاط پایانی سمیت زیست محیطی گزارش شده در منابع، حاکی از پتانسیل ریسک بالا در برخی از SSOs[6] مورد بررسی بود (۶۷).

سسن[7] و همکاران در پژوهشی، ارزیابی خطرات زیست محیطی ناشی از ۴۸ آلاینده نوظهور را در محیط‌های آبی (آب سطحی و فاضلاب) اسلوونی را با استفاده از ضریب ریسک مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش، دو فیلتر UV (اکسی بنزون و دی اکسی بنزون)، استرون و تریکلوزان، علیرغم فراوانی کم، خطر محیطی متوسط تا بالا را با RQ بین ۰/۲۸۲ (برای اکسی بنزون) و ۱۵/۵ (برای استرون) نشان دادند (۶۸).

پنگ[8] و همکاران پیچیدگی و تنوع EPها (باقیمانده‌های داروهای انسانی شامل ۸ آنتی بیوتیک، ۹ متابولیت و ۱۲ داروی متفرقه) را در آب‌های سطحی ووهان، چین، در منطقه دلتای رودخانه یانگ تسه مورد بررسی قرار دادند و از ارزیابی ریسک اکولوژیکی غربالگری برای ارزیابی خطرات اکولوژیکی بالقوه بر اساس رویکرد ضریب خطر استفاده کردند. آن‌ها از ۹۵ درصد غلظت محیطی اندازه گیری شده (MEC95) (یا غلظت منفرد) به عنوان مقادیر MEC استفاده کردند. برای غلظت اثر، آن‌ها از ۵ درصد غلظت‌های اثر حاد (EC05) گزارش شده توسط پایگاه داده ECOTOX (USEPA) استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که بیش‌ترین نسبت باقی‌مانده‌های دارویی در پایین دست رودخانه یانگ تسه و در دریاچه‌های نزدیک به

[1] Assessment Factor
[2] Median Lethal Concentration
[3] Mean Effective Concentration
[4] No Observable Effect Concentration
[5] Dos Santos
[6] Submarine Sewage Outfalls
[7] Cesen
[8] Peng

شهر مرکزی یافت شد و غلظت‌های بالایی (بیش‌تر از ۱۲۰ نانوگرم بر لیتر) از کافئین، متفورمین، تئوبرومین و والسارتان در نمونه‌های آب سطحی شناسایی شدند (۶۹).

RQ محاسبه شده با معادله (۱) به سمیت EPها بر اساس غلظت‌های محیطی اندازه‌گیری شده اشاره دارد، اما تغییرات در غلظت در طول زمان را، که موجودات آبزی را، به ویژه در مورد ترکیبات با حضور طولانی مدت در بدنه‌های آبی، در معرض سطوح سمیت بالاتر از حد تحمل‌پذیری قرار می‌دهد، در نظر نمی‌گیرد. در این شرایط، مشکل تجزیه و تحلیل ریسک متمایز برای EPهای مکرر شناسایی شده و برای EPهای گهگاه شناسایی شده وجود خواهد داشت. این مشکل را می‌توان با وارد کردن عامل فرکانس در محاسبه RQ مرتفع نمود. در این زمینه، ژو[1] و همکاران یک ضریب ریسک جدید (RQf) را بر اساس متوسط مقدار RQ و فرکانس MECهای بیش از PNEC پیشنهاد کردند و در ارزیابی ریسک‌های بالقوه ناشی از مواد شناسایی شده به کار بردند. مقدار RQf را می‌توان با توجه به معادلات (۲) و (۳) محاسبه کرد (۶۴):

$$RQF = RQ \times F = \frac{MEC}{PNEC} \times F \qquad (۲)$$

$$F = \frac{NO_1}{NO_2} \qquad (۳)$$

که RQf ضریب ریسک مبتنی بر فرکانس و تکرار است، در واقع، یک ضریب ریسک بهینه پس از در نظر گرفتن فرکانس‌های MECهای بیش‌تر از PNECها، ایجاد می‌شود. F فرکانس MECهای بیش‌تر از PNECها است. NO_1 تعداد نمونه‌هایی با غلظت بالاتر از PNECها و NO_2 تعداد کل نمونه‌ها را نشان می دهد. RQf مطابق جدول (۲) در ۵ گروه طبقه‌بندی می‌شود.

جدول (۲): توصیف ریسک بر اساس ضریب ریسک مبتنی بر فرکانس (۶۴)

محدوده مقادیر RQf	توصیف ریسک
$RQf \geq 1$	ریسک زیست محیطی بالا
$1 > RQf \geq 0.1$	ریسک زیست محیطی متوسط
$0.1 > RQf \geq 0.01$	اثر نامطلوب در مقیاس کوچک (ریسک قابل تحمل)
$0.01 > RQf \geq 0.001$	محدود (ریسک ناچیز)
$RQf = 0$	بدون ریسک (ایمن)

ارزیابی ریسک‌های سلامتی مرتبط با EPها بر اساس پاسخ برخی از گونه‌های بیولوژیکی به رابطه دوز-پاسخ برای طیف خاصی از غلظت‌های EP است. اگرچه اثرات آن‌ها بر روی انسان خیلی مورد بررسی قرار نگرفته است، این اثرات نامطلوب بر سلامتی انسان عمدتاً بر اساس مدل‌ها اندازه‌گیری می‌شوند. این مدل‌ها باید اعتبار سنجی شوند تا بطور کمی توانایی EPها برای ایجاد تغییرات عمده در سلامتی انسان و تعیین ریسک‌های قابل توجه و مهم تخمین زده شوند (۶۴). ریسک غیرسرطان‌زایی ناشی از بلع EPها را می‌توان با استفاده از شاخص خطر (HI[2])، محاسبه شده برای مسیرهای مواجهه متفاوت (استنشاق، بلع، تماس پوستی و غیره) با استفاده از معادله (۴) ارزیابی کرد (۶۶):

$$HQ_{ingestion} = \frac{CID_{ingestion}}{RfD} \qquad (۴)$$

[1] Zhoe

[2] Hazard Index

که در آن CDI[1] نشان دهنده دریافت مزمن روزانه EPها بوسیله بلع بر حسب (mg/(kg·day است، و RfD[2] دوز مرجع برای EPها برحسب (mg/(kg·day است. برای HI >1، اثرات نامطلوب سلامتی ممکن است رخ دهد، در حالی که برای HI <1، اثرات آن بر روی سلامتی ناچیز است. مقدار CDI را می‌توان با توجه به معادله (۵) تخمین زد (۶۱):

$$CDI = \frac{C \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (۵)$$

که در آن C غلظت EP در آب است. IR[3] به معنای میزان دریافت آب آلوده است (برای بزرگسالان ۱/۴۱ لیتر در روز و برای کودک ۰/۸۷ لیتر در روز تعیین می‌شود). EF[4] فرکانس مواجهه (۳۶۵ روز در سال) است. ED[5] مدت زمان مواجهه (۷۰ سال برای بزرگسالان، ۶ سال برای کودکان) است. BW[6] وزن بدن است (۷۰ کیلوگرم برای بزرگسالان، ۲۰ کیلوگرم برای کودکان). AT[7] میانگین طول عمر است (۲۵۵۵۰ روز برای بزرگسالان، ۲۱۹۰ روز برای کودکان). RfD را می‌توان طبق معادله (۶) محاسبه کرد (۶۱):

$$RfD = LD_{50} \times 4 \times 10^{-5} \quad (۶)$$

علیرغم توجه علمی فزاینده به تأثیر اکولوژیکی هر یک از EPها، شکاف‌های دانش در مورد سمیت همزمان ترکیبی از آلاینده‌ها و اثرات آن بر موجودات آبزی باقی می‌ماند. در مقایسه با سمیت تک ترکیبی، اثرات سمی مشترک و توام مخلوطی از آلاینده‌ها می‌تواند منجر به فعل و انفعالات هم افزایی یا آنتاگونیستی شود که منجر به اثر کوکتل خواهد شد (۷۰). تحقیقات در مورد EPها باید گسترش یابد و در راستای یافتن روش مناسب برای ارزیابی ریسک زیست محیطی حمایت شود. دالساندرو[8] و همکاران در ایتالیا نشان دادند که آنتراسن، روی و کروم فراوان‌ترین ترکیبات شیمیایی در نمونه‌های رسوبات تجزیه و تحلیل شده در سایت آگوستا واقع در زیرمنطقه MSFD Ionian دریای مدیترانه مرکزی بودند. این یافته ما را به توجه بیش‌تر به ارزیابی خطر آلودگی مشترک و توام ترکیبات مختلفی از EPها و سایر آلاینده‌ها سوق می‌دهد (۷۱).

در بیش‌تر موارد، مواجهه انسان تنها در رابطه با یک آلاینده رخ نمی‌دهد، بلکه مخلوطی از انواع مواد شیمیایی در مواجهه دخیل هستند. به همین دلیل، محققان روش‌هایی را برای ارزیابی ریسک‌های سلامتی مرتبط با قرار گرفتن در معرض مجموعه‌های مختلفی از آلاینده‌ها توسعه داده‌اند. کل ریسک‌های بالقوه غیرسرطان‌زای ناشی از مسیرهای مختلف را می‌توان با شاخص خطر تجمعی (HI_{cum}[9]) ارزیابی کرد، همانطور که در معادله (۷) بیان شده است (۷۲):

$$RfD = \Sigma (HI_{ingestion} + HI_{derm}) \quad (۷)$$

به طور مشابه، برای HIcum > 1، اثرات نامطلوبی بر سلامتی انسان وجود دارد (۷۲). فابرگا[10] و همکاران شاخص ریسک یکپارچه آلودگی شیمیایی آبزیان

[1] Chronic Daily Intake
[2] Reference Dose
[3] Intake Rate of polluted water
[4] Frequency of Exposure
[5] Exposure Period
[6] Body Weight
[7] Average Time of lifespan
[8] D'Alessandro
[9] Cumulated Hazard Index
[10] Fabrega

(IRICAP[1]) را با استفاده از معادله (۸) محاسبه کرده‌اند (۷۳):

$$\mathrm{IRICAP} = \frac{\Sigma(\mathrm{hazardindex} \times \mathrm{chemicalconcentration})}{\mathrm{numbero\ f\ chemical}} \quad (۸)$$

برای محاسبه IRICAP، شاخص خطر هر ترکیب جداگانه در غلظت آب نرمال شده در هر نقطه نمونه‌برداری ضرب می‌شود و سپس جمع شده و مقدار نهایی بر تعداد آلاینده‌ها تقسیم می‌شود. غلظت‌ها برای هر ماده شیمیایی به منظور جلوگیری از تخمین بیش از حد برای هر ماده شیمیایی، طبق معادله (۹) نرمال می‌شوند:

$$C_{norm} = \frac{C_i - C_m}{C_{max} - C_{min}} \quad (۹)$$

نتیجه‌گیری

حضور EPها در محیط زیست مشکلات و خطرات جدی را سبب می‌شوند. با توجه به افزایش نظارت بر کیفیت منابع آبی و توسعه تکنیک‌های تجزیه و تحلیلی جدید، شناسایی همزمان مجموعه‌ای از انواع ترکیبات شیمیایی نوظهور در محیط‌های آبی امکان‌پذیر است. با این حال، علیرغم پیشرفت‌های زیادی که در سال‌های اخیر صورت گرفته است، هنوز موانع قابل توجهی وجود دارد که تشخیص سریع و کارآمد EPها و رویکردهای موثر برای حذف این ترکیبات را محدود می‌کند. ظهور EPها حتی در غلظت‌های بسیار کم (ng/L) در محیط‌های آبی می‌تواند منجر به ایجاد ریسک‌های قابل توجه برای محیط زیست و سلامتی انسان باشد. کاهش منابع آلودگی و جایگزینی EPها با محصولاتی که سمیت کم‌تری دارند و راحت‌تر از آب حذف می‌شوند، می‌تواند نقش مهمی در کاهش تأثیر EPها بر محیط زیست و سلامت انسان داشته باشد. زمانی که تجزیه و تحلیل‌های انجام شده، بیانگر ریسک‌های غیرقابل قبول توسط یک آلاینده نوظهور بر روی محیط زیست و یا سلامتی انسان باشد، به منظور کاهش این ریسک‌ها، گزینه‌های مدیریتی مختلفی باید اعمال شود. در وهله اول، پیشگیری از ریسک‌ها با بکارگیری شیوه‌ها و فناوری‌های صنعتی پایدار و همچنین سنتز محصولات سازگار با محیط زیست و عمدتاً فرآورده‌های زیست تخریب‌پذیر، ضروری می‌باشد. از سوی دیگر، توسعه فن‌آوری‌های کارآمد تصفیه فاضلاب به منظور کاهش و یا حذف مقادیر قابل توجهی از EPها و پیشگیری از ورود آن‌ها به بدنه آب‌های طبیعی ضروری است.

تعارض منافع

نویسندگان هیچگونه تعارض منافعی برای اعلام ندارند.

منابع

[1] Bunke, D., Moritz, S., Brack, W., Herráez, D.L., Posthuma, L., Nuss, M., 2019, Developments in society and implications for emerging pollutants in the aquatic environment, Environmental Sciences Europe, 31, 32.
[2] Gavrilescu, M., Demnerová, K., Aamand, J., Agathos, S., Fava, F., 2015, Emerging pollutants in the environment: present and future challenges in biomonitoring, ecological risks and bioremediation, New Biotechnology, 32, 147.
[3] Geissen, V., Mol, H., Klumpp, E., Umlauf, G., Nadal, M., van der Ploeg, M., van de Zee, S.E., Ritsema, C.J., 2015. Emerging pollutants in the environment: A challenge for water resource management, International Soil and Water Conservation Research, 3, 57.
[4] Phillips, L.J., Moya, J., 2014, Exposure factors resources: Contrasting EPA's exposure factors handbook with international sources,

[1] Integrated Risk Index of Chemical Aquatic

Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology, 24, 233.
[5] Stefanakis, A.I., Becker, J.A., 2016, A review of emerging contaminants in water: Classification, sources, and potential risks, In: Impact of water pollution on human health and environmental sustainability, McKeown, A.E., Bugyi, G., (Editors), IGI Global, pp. 55-80.
[6] Vasilachi, I.C., Asiminicesei, D.M., Fertu, D.I., Gavrilescu, M., 2021, Occurrence and fate of emerging pollutants in water environment and options for their removal, Water, 13, 181.
[7] Sauvé, S., Desrosiers, M., 2014, A review of what is an emerging contaminant, Chemistry Central Journal, 8, 15.
[8] Battaglin, W., Kolpin, D.W., Furlong, E., Glassmeyer, S., Blackwell, B., Corsi, S., Meyer, M., Bradley, P., 2018, Contaminants of emerging concern in the environment, Water Resources Impact, 20, 8.
[9] Petrie, B., Barden, R., Kasprzyk-Hordern, B., 2015, A review on emerging contaminants in wastewaters and the environment: Current knowledge, understudied areas and recommendations for future monitoring, Water Research, 72, 3.
[10] Sanderson, H., Fricker, C., Brown, R.S., Majury, A., Liss, S.N., 2016, Antibiotic resistance genes as an emerging environmental contaminant, Environmental Reviews, 24, 205.
[11] Glassmeyer, S.T., Furlong, E.T., Kolpin, D.W., Batt, A.L., Benson, R., Boone, J.S., Conerly, O., Donohue, M.J., King, D.N., Kostich, M.S., Mash, H.E., Pfaller, S.L., Schenck, K.M., Simmons, J.E., Varughese, E.A., Vesper, S.J., Villegas, E.N., Wilson, V.S., 2017, Nationwide reconnaissance of contaminants of emerging concern in source and treated drinking waters of the United States, Science of the Total Environment, 581, 909.
[12] Philip, J.M., Aravind, U.K., Aravindakumar, C.T., 2018, Emerging contaminants in Indian environmental matrices – a review, Chemosphere, 190, 307.
[13] Larsson, D.J., 2014, Pollution from drug manufacturing: Review and perspectives, Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences, 369, 20130571.
[14] Carvalho, A.R.M., Cardoso, V.V., Rodrigues, A., Ferreira, E., Benoliel, M.J., Duarte, E.A., 2015, Occurrence and analysis of endocrine-disrupting compounds in a water supply system, Environmental Monitoring and Assessment, 187, 139.
[15] Lai, W.W.P., Lin, Y.C., Tung, H.H., Lo, S.L., Lin, A.Y.C., 2016, Occurrence of pharmaceuticals and perfluorinated compounds and evaluation of the availability of reclaimed water in Kinmen, Emerging Contaminants, 2, 135.
[16] McGrath, T.J., Morrison, P.D., Ball, A.S., Clarke, B.O., 2017, Detection of novel brominated flame retardants (NBFRs) in the urban soils of Melbourne, Australia, Emerging Contaminants, 3, 23.
[17] Cowell, W.J., Stapleton, H.M., Holmes, D., Calero, L., Tobon, C., Perzanowski, M., Herbstman, J.B., 2017, Prevalence of historical and replacement brominated flame retardant chemicals in New York City homes, Emerging Contaminants, 3, 32.
[18] Westhof, L., Köster, S., Reich, M., 2016, Occurrence of micropollutants in the wastewater streams of cruise ships, Emerging Contaminants, 2, 178.
[19] Sanganyado, E., Rajput, I.R., Liu, W., 2018, Bioaccumulation of organic pollutants in Indo-Pacific humpback dolphin: A review on current knowledge and future prospects, Environmental Pollution, 237, 111.
[20] Qi, C., Huang, J., Wang, B., Deng, S., Wang, Y., Yu, G., 2018, Contaminants of emerging concern in landfill leachate in China: A review, Emerging Contaminants, 4, 1.
[21] Starling, M.C.V.M., Amorim, C.C., Leão, M.M.D., 2019, Occurrence, control and fate of contaminants of emerging concern in environmental compartments in Brazil, Journal of Hazardous Materials, 372, 17.
[22] Gong, X., Li, K., Wu, C., Wang, L., Sun, H., 2018, Passive sampling for monitoring polar organic pollutants in water by three typical samplers, Trends in Environmental Analytical Chemistry, 17, 23.
[23] Gogoi, A., Mazumder, P., Tyagi, V.K., Chaminda, G.G.T., An, A.K., Kumar, M., 2018, Occurrence and fate of emerging contaminants in water environment: A review, Groundwater for Sustainable Development, 6, 169.
[24] Barboza, L.G.A., Vethaak, A.D., Lavorante, B.R.B.O., Lundebye, A.K., Guilhermino, L., 2018, Marine microplastic debris: An emerging issue for food security,

food safety and human health, Marine Pollution Bulletin, 133, 336.
[25] Taheran, M., Naghdi, M., Brar, S.K., Verma, M., Surampalli, R.Y., 2018, Emerging contaminants: Here today, there tomorrow!, Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management, 10, 122.
[26] Dey, S., Bano, F., Malik, A., 2019, Pharmaceuticals and personal care product (PPCP) contamination - a global discharge inventory, In: Pharmaceuticals and personal care products: Waste management and treatment technology, Prasad, M.N.V., Vithanage, M., Kapley, A., (Editors), Butterworth-Heinemann (imprint of Elsevier), pp. 1-26.
[27] Abdulrazaq, Y., Abdulsalam, A., Rotimi, A.L., Abdulbasit, A.A., Clifford, O., Abdulsalam, O.A., Racheal, O.N., Joy, A.A., Victor, F.O., Johannes, Z.M., Bilal, M., Umar M, S., 2020, Classification, potential routes and risk of emerging pollutants/contaminant, In: Emerging contaminants, Nuro, A., (Editor), IntechOpen, pp. 3-14.
[28] Yahaya, A., Sale, F.J., Salehdeen, U.M., 2020, Analytical Methods for Determination of regulated and unregulated disinfection by-products in drinking water: A review, CaJoST, 2, 25.
[29] NORMAN Network, 2016, List of NORMAN emerging substances, Available online: https://www.norman-network.net
[30] Rodriguez-Narvaez, O.M., Peralta-Hernandez, J.M., Goonetilleke, A., Bandala, E.R., 2017, Treatment technologies for emerging contaminants in water: A review, Chemical Engineering Journal, 323, 361.
[31] Richardson, S.D., Ternes, T.A., 2022, Water analysis: Emerging contaminants and current issues, Analytical Chemistry, 94, 382.
[32] Li, W.C., 2014, Occurrence, sources, and fate of pharmaceuticals in aquatic environment and soil, Environmental Pollution, 187, 193.
[33] Yahaya, A., Okoh, O.O., Okoh, A.I., Adeniji, A.O., 2017, Occurrences of organochlorine pesticides along the course of the Buffalo River in the Eastern Cape of South Africa and its health implications, International Journal of Environmental Research and Public Health, 14, 1372.
[34] Yu, C.P., Chu, K.H., 2009, Occurrence of pharmaceuticals and personal care products along the West Prong Little Pigeon River in east Tennessee, USA, Chemosphere, 75, 1281.
[35] Rogers, J.A., Metz, L., Yong, V.W., 2013, Review: Endocrine disrupting chemicals and immune responses: A focus on bisphenol-A and its potential mechanisms, Molecular Immunology, 53, 421.
[36] Du, B., Haddad, S.P., Scott, W.C., Chambliss, C.K., Brooks, B.W., 2015, Pharmaceutical bioaccumulation by periphyton and snails in an effluent-dependent stream during an extreme drought, Chemosphere, 119, 927.
[37] Snow, D.D., Cassada, D.A., Larsen, M.L., Mware, N.A., Li, X., D'Alessio, M., Zhang, Y., Sallach, J.B., 2017, Detection, occurrence and fate of emerging contaminants in agricultural environments, Water Environment Research, 89, 897.
[38] Tang, Y., Yin, M., Yang, W., Li, H., Zhong, Y., Mo, L., Liang, Y., Ma, X., Sun, X., 2019, Emerging pollutants in water environment: Occurrence, monitoring, fate, and risk assessment, Water Environment Research, 91, 984.
[39] Hlavínek, P., Žižlavská, A., 2018, Occurrence and removal of emerging micropollutants from urban wastewater, In: Water management and the environment: Case studies, Zelenakova, M., (Editor), Springer, pp. 231-254.
[40] Gomes, A.R., Justino, C., Rocha-Santos, T., Freitas, A.C., Duarte, A.C., Pereira, R., 2017, Review of the ecotoxicological effects of emerging contaminants to soil biota, Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering, 52, 992.
[41] Basheer, A.A., 2018, New generation nano-adsorbents for the removal of emerging contaminants in water, Journal of Molecular Liquids, 261, 583.
[42] Warner, W., Nödler, K., Farinelli, A., Blum, J., Licha, T., 2018, Integrated approach for innovative monitoring strategies of reservoirs and lakes, Environmental Engineering & Management Journal, 17, 2497.
[43] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), 2019, Pharmaceutical residues in freshwater: hazards and policy responses. OECD Publishing.
[44] Kraemer, S.A., Ramachandran, A., Perron, G.G., 2019, Antibiotic pollution in the

environment: From microbial ecology to public policy, Microorganisms, 7, 180.
[45] Hiller, J., Klotz, K., Meyer, S., Uter, W., Hof, K., Greiner, A., Göen, T., Drexler, H., 2019, Systemic availability of lipophilic organic UV filters through dermal sunscreen exposure, Environment International, 132, 105068.
[46] Zhou, X., Peng, F., Luo, Z., Li, Y., Li, H., Yang, Z., 2020, Assessment of water contamination and health risk of endocrine disrupting chemicals in outdoor and indoor swimming pools, Science of the Total Environment, 704, 135277
[47] Salthammer, T., 2020, Emerging indoor pollutants, International Journal of Hygiene and Environmental Health, 224, 113423.
[48] European Parliament, Council of the European Union, 2009, Regulation (EC) No 1223/2009 of the european parliament and of the council of 30 November 2009 on cosmetic products, Official Journal of the European Union, 342, 59.
[49] Magi, E., Scapolla, C., Di Carro, M., Rivaro, P., Nguyen, K.T.N., 2013, Emerging pollutants in aquatic environments: Monitoring of UV filters in urban wastewater treatment plants, Analytical Methods, 5, 428.
[50] The Commission of the European Communities, 2008, Council regulation (EC) No 440/2008 of 30 May 2008 laying down test methods pursuant to regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council on the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH), Official Journal of the European Union, 142, 1.
[51] The European Parliament and the Council of the European Union, 2004, Regulation (EC) No 726/2004 of the European Parliament and of the Council of 31 March 2004 laying down community procedures for the authorisation and supervision of medicinal products for human and veterinary use and establishing a European Medicines Agency, Official Journal of the European Union, 136, 1.
[52] European Parliament, Council of the European Union, 2000, Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the council of 23 October 2000 establishing a framework for community action in the field of water policy, Official Journal of the European Communities, 327, 1.
[53] Sorlini, S., Collivignarelli, M.C., Miino, M.C., 2019, Technologies for the control of emerging contaminants in drinking water treatment plants, Environmental Engineering & Management Journal, 18, 203.
[54] Caracciolo, A.B., Grenni, P., Rauseo, J., Ademollo, N., Cardoni, M., Rolando, L., Patrolecco, L., 2018, Degradation of a fluoroquinolone antibiotic in an urbanized stretch of the River Tiber, Microchemical Journal, 136, 43.
[55] Lin, X., Xu, J., Keller, A.A., He, L., Gu, Y., Zheng, W., Sun, D., Lu, Z., Huang, J., Huang, X., Li, G., 2020, Occurrence and risk assessment of emerging contaminants in a water reclamation and ecological reuse project, Science of the Total Environment, 744, 140977.
[56] Dsikowitzky, L., Crawford, S.E., Nordhaus, I., Lindner, F., Irianto, H.E., Ariyani, F., Schwarzbauer, J., 2020, Analysis and environmental risk assessment of priority and emerging organic pollutants in sediments from the tropical coastal megacity Jakarta, Indonesia, Regional Studies in Marine Science, 34, 101021.
[57] Larroze, S., Russo, M., Gadelha, J.R., Tode, L., 2021, Contaminants of emerging concern in the Mediterranean Sea, Plan Bleu Notes, 40.
[58] Sanchez, W., Egea, E., 2018, Health and environmental risks associated with emerging pollutants and novel green processes, Environmental Science and Pollution Research, 25, 6085.
[59] Rivera-Jaimes, J.A., Postigo, C., Melgoza-Alemán, R.M., Aceña, J., Barceló, D., de Alda, M.L., 2018, Study of pharmaceuticals in surface and wastewater from Cuernavaca, Morelos, Mexico: Occurrence and environmental risk assessment, Science of the Total Environment, 613-614, 1263.
[60] Kortenkamp, A., Backhaus, T., Faust, M., 2009, State of the art report on mixture toxicity, Final Report - Executive Summary, School of Pharmacy, University of London, London, UK.
[61] Wu, D., Zhou, Y., Lu, G., Hu, K., Yao, J., Shen, X., Wei, L., 2019, The occurrence and risks of selected emerging pollutants in drinking water source areas in Henan, China,

International Journal of Environmental Research and Public Health, 16, 4109.
[62] Thomaidi, V.S., Matsoukas, C., Stasinakis, A.S., 2017, Risk assessment of triclosan released from sewage treatment plants in European rivers using a combination of risk quotient methodology and Monte Carlo simulation, Science of the Total Environment, 603-604, 487.
[63] López-Doval, J.C., Montagner, C.C., de Alburquerque, A.F., Moschini-Carlos, V., Umbuzeiro, G., Pompêo, M., 2017, Nutrients, emerging pollutants and pesticides in a tropical urban reservoir: Spatial distributions and risk assessment, Science of the Total Environment, 575, 1307.
[64] Zhou, S., Di Paolo, C., Wu, X., Shao, Y., Seiler, T.B., Hollert, H., 2019, Optimization of screening-level risk assessment and priority selection of emerging pollutants–the case of pharmaceuticals in European surface waters, Environment International, 128, 1.
[65] Yan, Z., Liu, Y., Yan, K., Wu, S., Han, Z., Guo, R., Chen, M., Yang, Q., Zhang, S., Chen, J., 2017, Bisphenol analogues in surface water and sediment from the shallow Chinese freshwater lakes: Occurrence, distribution, source apportionment, and ecological and human health risk, Chemosphere, 184, 318.
[66] Xiao, J., Wang, L., Deng, L., Jin, Z., 2019, Characteristics, sources, water quality and health risk assessment of trace elements in river water and well water in the Chinese Loess Plateau, Science of the Total Environment, 650, 2004.
[67] Dos Santos, D.M., Buruaem, L., Gonçalves, R.M., Williams, M., Abessa, D.M.S., Kookana, R., de Marchi, M.R.R., 2018, Multiresidue determination and predicted risk assessment of contaminants of emerging concern in marine sediments from the vicinities of submarine sewage outfalls, Marine Pollution Bulletin, 129, 299.
[68] Česen, M., Heath, D., Krivec, M., Košmrlj, J., Kosjek, T., Heath, E., 2018, Seasonal and spatial variations in the occurrence, mass loadings and removal of compounds of emerging concern in the Slovene aqueous environment and environmental risk assessment, Environmental Pollution, 242, 143.
[69] Peng, Y., Fang, W., Krauss, M., Brack, W., Wang, Z., Li, F., Zhang, X., 2018, Screening hundreds of emerging organic pollutants (EOPs) in surface water from the Yangtze River Delta (YRD): Occurrence, distribution, ecological risk, Environmental Pollution, 241, 484.
[70] Di Poi, C., Costil, K., Bouchart, V., Halm-Lemeille, M.P., 2018, Toxicity assessment of five emerging pollutants, alone and in binary or ternary mixtures, towards three aquatic organisms, Environmental Science and Pollution Research, 25, 6122.
[71] D'Alessandro, M., Esposito, V., Porporato, E.M.D., Berto, D., Renzi, M., Giacobbe, S., Scotti, G., Consoli, P., Valastro, G., Andaloro, F., Romeo, T., 2018, Relationships between plastic litter and chemical pollutants on benthic biodiversity, Environmental Pollution, 242, 1546.
[72] Means, B., 1989, Risk-assessment guidance for superfund. Volume 1. Human health evaluation manual. Part A. Interim report (Final). Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, D.C., USA.
[73] Fàbrega, F., Marquès, M., Ginebreda, A., Kuzmanovic, M., Barceló, D., Schuhmacher, M., Domingo, J.L., Nadal, M., 2013, Integrated risk index of chemical aquatic pollution (IRICAP): Case studies in Iberian rivers, Journal of Hazardous Materials, 263,187.

"Review article"

Emerging pollutants in aquatic environments: Occurrence, sources, fate, health and environmental effects and risk assessment

Mohammad Safari[1], Ahmad Asl Hashemi[2], Gholamhossein Safari[2,3]*

[1]Faculty of Medicine, Islamic Azad University, Kerman Branch, Kerman, Iran
[2]Department of Environmental Health Education, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran
[3]Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran
*Corresponding author: hsafari13@yahoo.com
(Received: 3 July 2024, Accepted: 23 August 2024)

Abstract
Emerging pollutants (EPs) encompass a wide range of synthetic or natural substances, such as biocides, fire retardants, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), emollients, surfactants, hormones, personal care products, pharmaceutical compounds, and nanoparticles, many of which are not consistently controlled or monitored in the environment. Despite their typically low environmental concentrations, these pollutants pose significant risks to human health and living organisms. EPs primarily originate from hospitals, agricultural fields, urban areas and industrial sectors. Their entrance into the environment occurs through polluted water, wastewater sludge from wastewater treatment plants, and manure from agricultural fields. While the sources of EPs are generally known, further research is needed to fully understand their behavior, fate, and potential risks across different environmental sectors as well as their impacts on human health and ecosystems. This review aims to investigate the current state of the occurrence, pollution sources, fate, and health and environmental impacts of EPs, with a particular focus on aquatic environments and the broader goal of sustainable water resource management. The article categorizes EPs in the environment, and provides detailed discussion on their sources, fate and effects supported by relevant examples. Additionally, it addresses the challenges posed by EP contamination in aquatic systems and the associated risks to both aquatic life and human health. Finally the review offers critical insights into the current challenges and suggests avenues for further research to mitigate the effects of EPs on aquatic environments and public health.

Conflict of interest: None declared.

Keywords: Aquatic environments, Emerging pollutants, Fate, Health effects, Risk assessment