چهارمین کنفرانس بین‌المللی دانشجویان
بهداشت و علوم سلامت ایران
th International Conference for
Iranian Hygienics and Health Sciences Students
www.health.cdsts.ir

بررسی اثرات محیط‌زیستی داروهای منقضی‌شده و روش‌های مدیریت آنها

کبری امیدی‌پور*[۱]، سبحان حیدریان [۲]، قربانعلی دزواره[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت، ایمنی و محیط‌زیست (HSE)، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه مهرالبرز،

kob.omidi1374@gmail.com

۲- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی مدیریت ساخت، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه مهرالبرز،

sobhanheidarian@gmail.com

۳- دانشیار گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه مهرالبرز، gh.dezvareh@mehralborz.ac.ir

خلاصه

افزایش جهانی مصرف دارو، همراه با مدیریت نادرست پسماندهای دارویی، منجر به ورود گسترده ترکیبات دارویی فعال (APIs) از داروهای منقضی‌شده به محیط‌زیست شده است. این آلاینده‌های نوظهور، به‌دلیل پایداری شیمیایی و اثرات زیست‌فعال، تهدیدی جدی برای اکوسیستم‌های آبی و خاکی محسوب شده و با تشدید بحران مقاومت ضد میکروبی (AMR)، سلامت عمومی را به مخاطره می‌اندازند. هدف این مطالعه، بررسی اثرات زیست‌محیطی داروهای منقضی‌شده و ارزیابی روش‌های مدیریت و امحای آن‌ها برای ارائه الگویی یکپارچه است. این پژوهش با رویکرد توصیفی-تحلیلی و با استفاده از روش تحقیق کتابخانه‌ای انجام شده است. داده‌های ثانویه از طریق جستجوی سیستماتیک در پایگاه‌های علمی معتبر (مانند Google Scholar و Civilica) و مطالعه مقالات، کتاب‌ها و گزارش‌های سازمانی بین‌المللی گردآوری و تحلیل شده‌اند. دروهای منقضی‌شده عمدتاً از طریق دفع خانگی در فاضلاب و زباله‌های شهری، پساب مراکز درمانی و صنایع داروسازی وارد محیط می‌شوند. سیستم‌های تصفیه متعارف قادر به حذف کامل این ترکیبات پایدار نیستند. حضور آنتی‌بیوتیک‌ها، هورمون‌ها و داروهای ضدالتهاب در منابع آبی، اثرات نامطلوبی چون اختلالات غدد درون‌ریز در آبزیان و ایجاد فشار انتخابی برای مقاومت میکروبی به‌همراه دارد. روش‌های فعلی مدیریت مانند دفن بهداشتی (با خطر نشت شیرابه) و سوزاندن غیراستاندارد (با تولید آلاینده‌های ثانویه) ناکارآمد هستند. در مقایسه با کشورهای پیشرو که دارای برنامه‌های ملی بازگردانی دارو هستند، ایران فاقد سیستم یکپارچه جمع‌آوری و امحای ایمن است. مدیریت داروهای منقضی‌شده نیازمند رویکردی یکپارچه در چرخه حیات دارو است. الگوی پیشنهادی مبتنی بر: ۱) پیشگیری از مازاد تولید و تجویز، ۲) ایجاد شبکه ملی جمع‌آوری از داروخانه‌ها و مراکز شهری، و ۳) امحای ایمن با استفاده از فناوری‌های ترکیبی (مانند اکسیداسیون پیشرفته) می‌باشد. تصویب قوانین الزام‌آور ملی و هماهنگی بین‌بخشی میان نهادهای مسئول، ضرورتی فوری برای کاهش بار آلودگی دارویی و حفظ سلامت اکوسیستم‌ها و بهداشت عمومی است.

کلمات کلیدی: داروهای منقضی‌شده، آلاینده‌های دارویی، مقاومت ضد میکروبی، اثرات زیست‌محیطی، مدیریت پسماند دارویی، اکسیداسیون پیشرفته.

۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر، پیشرفت‌های چشمگیر در علوم پزشکی و دارویی، به‌طور فزاینده‌ای بر کیفیت زندگی انسان‌ها و کاهش مرگ‌ومیر ناشی از بیماری‌ها تأثیر مثبت گذاشته است. با این حال، افزایش سرسام‌آور تولید، مصرف و توزیع دارو در سطح جهانی، پیامدهای ناخواسته‌ای را در حوزه محیط زیست و سلامت عمومی به همراه داشته است که بخش قابل توجهی از آن مربوط به مدیریت نامناسب پسماندهای دارویی، به‌ویژه داروهای منقضی‌شده، است. این پدیده، که در ادبیات علمی تحت عنوان داروهای باقی‌مانده در محیط [1] شناخته می‌شود، اکنون به یک چالش جدی زیست‌محیطی و بهداشتی در سطح بین‌المللی تبدیل شده است. داروهای منقضی‌شده، چه آن‌هایی که در زنجیره تأمین باقی می‌مانند و چه آن‌هایی که مصرف‌کنندگان خانگی یا مراکز درمانی به دور از نظارت صحیح دفع می‌کنند، حاوی ترکیبات شیمیایی فعالی هستند که ورود آن‌ها به اکوسیستم‌های طبیعی، سلامت موجودات زنده و پایداری محیط زیست را به خطر می‌اندازد. این مقدمه با هدف تشریح ابعاد علمی و مدیریتی این مسئله، مرور دانش موجود، و شناسایی شکاف‌های پژوهشی حیاتی، تدوین شده است.

رشد تصاعدی مصرف دارو یکی از ویژگی‌های بارز جوامع مدرن است. افزایش دسترسی به خدمات بهداشتی، بالا رفتن سن جمعیت، شیوع بیماری‌های مزمن و نوآوری‌های مداوم در تولید داروهای جدید، منجر به افزایش حجم داروهای تولیدی در سطح جهانی شده است. در ایران نیز، با وجود محدودیت‌های اقتصادی، سرانه مصرف دارو به‌طور پیوسته در حال افزایش است که این امر، حجم داروهای باقیمانده و منقضی‌شده در چرخه مصرف را نیز متناسباً بالا می‌برد. این داروهای منقضی‌شده، منابع بالقوه‌ای از آلاینده‌های دارویی هستند که در صورت دفع نامناسب، تهدیدی جدی برای محیط زیست محسوب می‌شوند.

داروهای منقضی‌شده، شامل مقادیر قابل توجهی از مواد مؤثره دارویی [2] و مواد افزودنی شیمیایی هستند که عمدتاً برای اهداف درمانی طراحی شده‌اند، اما در غلظت‌های پایین می‌توانند اثرات فارماکولوژیکی ناخواسته و سمی بر ارگانیسم‌های غیرهدف در محیط زیست اعمال کنند [۱]. دفع نامناسب این مواد، عمدتاً از طریق فاضلاب‌های شهری و بیمارستانی، اماکن دفن زباله، و گاهی تخلیه مستقیم در خاک یا آب‌های سطحی، منجر به آلودگی گسترده منابع آبی، به‌ویژه آب‌های زیرزمینی و سطحی، می‌شود. حضور این ترکیبات در اکوسیستم‌های آبی، مطالعات متعددی را به خود معطوف ساخته است؛ برای مثال، داروهای ضدافسردگی، هورمون‌ها، و مسکن‌ها می‌توانند بر رفتار، سیستم‌های تولیدمثلی، و بقای گونه‌های آبزی تأثیر بگذارند.

یکی از مهم‌ترین پیامدهای این آلودگی‌ها، تشدید بحران جهانی مقاومت میکروبی [3] است. آنتی‌بیوتیک‌ها، به عنوان یکی از پرمصرف‌ترین دسته‌های دارویی، زمانی که به شکل دست‌نخورده یا متابولیزه شده در محیط پخش می‌شوند، غلظت‌هایی ایجاد می‌کنند که برای باکتری‌ها، به‌جای کشتن کامل، صرفاً انتخابی برای بقا [4] فراهم می‌آورد. این شرایط، میکروارگانیسم‌ها را وادار به توسعه مکانیسم‌های مقاومت می‌کند. باکتری‌های مقاوم می‌توانند از طریق خاک، آب و حتی محصولات کشاورزی به زنجیره غذایی و نهایتاً انسان منتقل شوند. دفع نامناسب داروهای منقضی‌شده، به‌ویژه آنتی‌بیوتیک‌ها، یک منبع اصلی و اغلب نادیده گرفته شده در این فرآیند است که مدیریت یکپارچه پسماندهای دارویی را به یک ضرورت فوری تبدیل می‌کند. اهمیت این موضوع نه تنها در ابعاد اکولوژیکی آن، بلکه در تأثیر مستقیم آن بر سلامت عمومی و امنیت غذایی نهفته است [۲].

داروهای منقضی‌شده و مصرف‌نشده، از لحظه تولید تا انتهای عمر مفید، مسیرهای متعددی برای ورود به محیط زیست دارند که هر یک نیازمند رویکردهای مدیریتی خاصی هستند. درک تخصصی این مسیرها برای تدوین استراتژی‌های مؤثر ضروری است.

[1] Pharmaceuticals in the Environment (PiE)
[2] Active Pharmaceutical Ingredients (APIs)
[3] Antimicrobial Resistance (AMR)
[4] Selection Pressure

در ادامه اصلی‌ترین مسیرهای ورود داروهای منقضی‌شده به شبکه فاضلاب مورد بررسی قرار می‌گیرد. یکی از مهمترین مسیر ورود از طرق فاضلاب خانگی و مراکز درمانی است. این مسیر، رایج‌ترین و بزرگ‌ترین منبع ورود داروهای استفاده‌شده و منقضی‌شده به شبکه فاضلاب است. داروهایی که پس از مصرف باقی می‌مانند (به‌خصوص در خانوارهای دارای بیماری‌های مزمن) یا داروهایی که به‌طور نادرست در توالت‌ها یا سینک‌ها تخلیه می‌شوند، مستقیماً وارد سیستم‌های تصفیه فاضلاب می‌شوند. کارایی سامانه‌های تصفیه فاضلاب شهری در حذف کامل این آلاینده‌های نوظهور[5] بسیار متغیر است. بسیاری از ترکیبات دارویی به دلیل ساختار پایدار خود، در فرآیندهای تصفیه متداول (مانند لجن فعال) به‌طور کامل تخریب نمی‌شوند و به صورت متابولیت‌ها یا ترکیبات اصلی وارد آب‌های پذیرنده می‌گردند. در مورد بیمارستان‌ها، غلظت داروها در پساب خروجی اغلب به مراتب بالاتر است، زیرا در این مراکز، دوره‌های درمانی شدیدتر با دوزهای بالاتر دارو انجام می‌شود و گاهی داروهای پرخطر مستقیماً بدون تصفیه اولیه دفع می‌گردند.

دفع نامناسب خانگی و مراکز تولید :دور انداختن داروهای منقضی‌شده در زباله‌های جامد شهری یک مسیر مستقیم دیگر است. این مواد در طول زمان، تحت فرآیندهای تجزیه بیولوژیکی و شیمیایی در محیط دفن قرار می‌گیرند. شیرابه حاصل از این محل‌ها، حامل غلظت‌های بالایی از ترکیبات دارویی است که می‌تواند به آب‌های زیرزمینی نفوذ کند. علاوه بر این، فاضلاب‌های ناشی از فرآیندهای تولید دارو سایت‌های تولید API و فرمولاسیون در صورت عدم رعایت سخت‌گیرانه‌ترین استانداردهای زیست‌محیطی، می‌توانند انتشار متمرکز و شدید ترکیبات دارویی را به محیط‌های محلی ایجاد کنند.

کاربردهای کشاورزی و دامداری :در برخی کشورها، استفاده از لجن فاضلاب تصفیه‌شده (به عنوان کود) یا دارودرمانی دامی با آنتی‌بیوتیک‌ها، منجر به انتقال ترکیبات دارویی به خاک‌های کشاورزی می‌شود. این مسیر، ریسک ورود ترکیبات دارویی به محصولات غذایی و همچنین افزایش احتمال مقاومت میکروبی در میکروارگانیسم‌های خاک را به دنبال دارد.

پایداری شیمیایی ترکیبات دارویی در محیط یکی از کلیدهای درک میزان خطر آن‌هاست. ساختار شیمیایی APIها برای پایداری در بدن انسان و مقاومت در برابر شرایط انبارداری طراحی شده‌اند، که این ویژگی اغلب به معنای پایداری آن‌ها در محیط زیست نیز هست. نیمه‌عمر زیست‌محیطی[6] داروها در آب و خاک متغیر است. برای مثال، برخی آنتی‌بیوتیک‌ها و داروهای هورمونی می‌توانند نیمه‌عمری طولانی در آب داشته باشند و از سیستم‌های تصفیه سنتی جان سالم به در ببرند. پارامترهای محیطی مانند pH، دما، تابش فرابنفش و حضور مواد آلی طبیعی[7] به شدت بر سرعت تجزیه تأثیر می‌گذارند. به عنوان مثال، نور خورشید می‌تواند تجزیه نوری[8] برخی داروها را تسریع کند، در حالی که در شرایط تاریک و بی‌هوازی (مانند عمق رسوبات یا لجن)، نیمه‌عمر ممکن است به طور چشمگیری افزایش یابد. این پایداری نسبی منجر به پدیده‌ای به نام "انتشار تجمعی" می‌شود، جایی که حتی غلظت‌های پایین در طول زمان انباشته شده و اثرات بلندمدت خود را آشکار می‌سازند. همچنین، این ترکیبات می‌توانند از طریق انتقال بین‌فازی (از آب به رسوب یا از آب به موجودات زنده) به زنجیره غذایی وارد شوند و سطح بیوانباشتگی[9] را افزایش دهند.

تحقیقات گسترده‌ای در سطح جهان، وجود و اثرات داروها در محیط زیست را تأیید کرده‌اند و سازمان‌های بین‌المللی راهنمایی‌های مهمی را در این زمینه ارائه داده‌اند. سازمان بهداشت جهانی و سازمان همکاری و توسعه اقتصادی بارها بر لزوم پایش مستمر و توسعه روش‌های حذف مؤثر آلاینده‌های دارویی تأکید کرده‌اند. گزارش‌های بین‌المللی نشان می‌دهد که حضور آنتی‌بیوتیک‌ها، ضدالتهاب‌های غیراستروئیدی و داروهای هورمونی در منابع آب آشامیدنی بسیاری از کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه امری فراگیر است. سازمان حفاظت از محیط زیست ایالات متحده و آژانس دارویی اروپا نیز مطالعاتی را در مورد اثرات اکوتوکسیکولوژی این مواد بر حیات آبزیان و انتقال ژن‌های مقاومت میکروبی هدایت کرده‌اند.

[5] Emerging Contaminants
[6] Environmental Half-Life
[7] Natural Organic Matter - NOM
[8] Photodegradation
[9] Bioaccumulation

نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که حتی غلظت‌های نانوگرم بر لیتر (ng/L) نیز می‌توانند تغییرات رفتاری و فیزیولوژیکی در ماهی‌ها و بی‌مهرگان ایجاد کنند [۳].

در سطح داخلی، پژوهش‌های صورت‌گرفته در ایران، اگرچه پراکنده و نقطه‌ای هستند، اما تصویری نگران‌کننده را ارائه می‌دهند. مطالعات انجام‌شده بر روی پساب خروجی برخی بیمارستان‌های بزرگ در شهرهای ایران، غلظت‌های قابل توجهی از داروهای رایج مانند مترونیدازول، سیپروفلوکساسین و کاربامازپین را نشان داده‌اند. ضعف سیستم‌های جمع‌آوری داروهای منقضی‌شده در سطح خانگی و عدم آگاهی عمومی منجر به تکیه عمده بر سیستم جمع‌آوری پسماندهای شهری شده است. این امر به وضوح نشان‌دهنده ضعف در مرحله اول زنجیره مدیریت پسماند دارویی است. در مقایسه با کشورهای توسعه‌یافته، مانند کشورهای اتحادیه اروپا، ژاپن و استرالیا، که برنامه‌های ملی و ساختاریافته‌ای برای بازگشت دارو[10] دارند، مدیریت داروهای منقضی‌شده در ایران هنوز فاقد یکپارچگی لازم است. در این کشورها، سیستم‌هایی تعبیه شده است که مصرف‌کنندگان می‌توانند داروهای تاریخ‌گذشته خود را به داروخانه‌ها یا مراکز جمع‌آوری مشخص تحویل دهند و این داروها از طریق کانال‌های کنترل‌شده و دارای مجوز برای سوزاندن در کوره‌های مخصوص ارسال می‌شوند. این رویکرد، عملاً مسیر ورود حجم بزرگی از آلاینده‌ها به شبکه فاضلاب و زباله‌های عادی را مسدود می‌کند. در ایران، چنین زیرساخت‌هایی یا وجود ندارند یا به درستی اطلاع‌رسانی و اجرا نشده‌اند.

۲. روش تحقیق

برای انجام این تحقیق علمی از روش توصیفی و منابع کتابخانه‌ای از جمله سایت‌های گوگل اسکولار و سویلیکا و رویکردی سیستماتیک و دقیق استفاده کرده و در این روش، تحقیق بر اساس تحلیل منابع موجود، جمع‌آوری داده‌های ثانویه از مقالات، کتاب‌ها و پژوهش‌های علمی صورت گرفته است و نیزبه تفصیل مراحل انجام این نوع تحقیق با استفاده از منابع آنلاین و کتابخانه‌ای توضیح داده شده است ودرنهایت این پروژه به ارزیابی اثراتی که داروهای منقضی شده بر محیط زیست دارند می پردازد ودر پایان راهکارهایی جهت مدیریت و امحای صحیح داروهای منقضی ارائه می‌دهد.

۳. بحث و یافته‌ها

۳-۱- ماهیت شیمیایی داروهای منقضی‌شده و پایداری زیست‌محیطی

ترکیبات دارویی، بسته به خانواده شیمیایی خود، ویژگی‌های ساختاری و فیزیکی وشیمیایی منحصربه‌فردی دارند که سرنوشت زیست‌محیطی و پایداری آن‌ها را تعیین می‌کند. داروهای منقضی‌شده شامل طیف گسترده‌ای از مولکول‌ها هستند؛ از ترکیبات آلی کوچک (نظیر استامینوفن و ایبوپروفن)، تا مولکول‌های پیچیده نظیر آنتی‌بیوتیک‌ها، هورمون‌های استروئیدی، داروهای ضدسرطان و ترکیبات زیست‌فناورانه جدید. این مواد معمولاً به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که در برابر تخریب زیستی و شیمیایی بدن مقاوم باشند، تا اثربخشی دارویی خود را حفظ کنند. این ویژگی باعث می‌شود که پس از ورود به محیط زیست، اغلب مقاومت نسبت به فرآیندهای تخریب طبیعی را نیز داشته باشند [۴].

پایداری زیست‌محیطی داروها به پارامترهایی مانند ساختار شیمیایی، گروه‌های عاملی، حلالیت در آب، میزان چربی‌دوستی، فشار بخار و تمایل به جذب در رسوبات یا مواد آلی بستگی دارد. برخی داروها مانند کینولون‌ها و ماکرولیدها

[10] Drug Take-Back Schemes

دارای حلقه‌های آروماتیک چندگانه و جانشین‌های هالوژنه هستند که آن‌ها را در برابر تجزیه‌های نوری، شیمیایی و زیستی مقاوم می‌کند. هورمون‌های استروئیدی و داروهای ضدالتهاب غیراستروئیدی باتوجه به ساختارهای فشرده و پیوندهای قوی، معمولاً نیمه‌عمر بالایی در محیط آب و خاک دارند و حتی در شرایط نامساعد تجزیه نیز به‌آسانی باقی می‌مانند.

برخی داروها نظیر سایکوتروپ‌ها (داروهای روان‌گردان) و ضدسرطان‌ها، به‌خاطر ماهیت قطبی، پویایی بالا و قابلیت انتقال آسان در محیط آبی، با تصفیه‌های متداول (مانند لجن فعال یا ته‌نشینی) به‌طور کامل حذف نمی‌شوند. از سوی دیگر، داروهای چربی‌دوست،مانند برخی ضدافسردگی‌ها یا استاتین‌ها، تمایل به جذب و تجمع در ذرات آلی و رسوبات دارند و می‌توانند از طریق فرآیند تجمع زیستی در زنجیره غذایی، به سطوح بالا انتقال یابند .

داروهای منقضی‌شده نه‌تنها از نظر ساختاری در برابر اکسایش، فتولیز و زیست‌تخریب مقاوم‌اند، بلکه برخی محصولات تخریب آن‌ها نیز می‌توانند پایدار و حتی در شرایطی زیان‌بارتر باشند (مانند متابولیت‌های فعال سمّی مشتق از داروهای ضدسرطان). به همین علت، حضور این ترکیبات در محیط زیست گاه برای بازه‌های زمانی طولانی (ماه‌ها تا سال‌ها) پایدار باقی می‌ماند و ممکن است آثار تجمعی و بلندمدت بر آبزیان و سایر اجزای اکوسیستم داشته باشد [۴ و ۵].

۳-۲- مسیرهای ورود داروهای منقضی به محیط زیست

ورود داروهای منقضی‌شده به محیط زیست از طریق مجموعه‌ای از مسیرهای پیچیده و اغلب هم‌پوشان رخ می‌دهد که به عوامل مصرف، مقررات، و فناوری‌های محلی وابسته است. مسیرهای اصلی عبارت‌اند از:

۳-۲-۱- دفع خانگی

در بسیاری از کشورها، به ویژه در غیاب نظام جمع‌آوری و بازگردانی داروها، داروهای منقضی‌شده مستقیماً توسط مصرف‌کنندگان همراه زباله‌های عادی دفع می‌شوند یا در سینک و توالت ریخته می‌شوند. این ترکیبات با زباله‌های شهری به مراکز دفن منتقل، و در اثر شستشوی آب یا باران، به فاز مایع (شیرابه) تبدیل می‌شوند. شیرابه مذکور اغلب حاوی غلظت بالای مواد فعال دارویی، محصولات تخریب ناقص، و متابولیت‌های دارویی است که در صورت نقص در عایق‌بندی، به منابع آب زیرزمینی یا سطحی راه می‌یابد [۶ و ۷].

۳-۲-۲- فاضلاب‌های خانگی و شهری

داروهایی که از مسیر فاضلاب خانگی وارد شبکه می‌شوند، از طریق تصفیه‌خانه‌های شهری پردازش می‌گردند. اکثر سامانه‌های تصفیه متداول (نظیر لجن فعال و ته‌نشینی فیزیکی) قادر به حذف کامل داروهای ریزمولکولی و پایدار نیستند. به همین دلیل، هزاران نانوگرم بر لیتر از انواع آنتی‌بیوتیک‌ها، هورمون‌ها و NSAIDs پس از تصفیه، وارد آب‌های پذیرنده نظیر رودها و دریاچه‌ها می‌شوند.

جدول ۱-غلظت بعضی از داروهای پرکاربرد را رودخانه و پساب‌ها

نام ترکیب دارویی	غلظت (میکروگرم /لیتر)	نمونه
تتراسایکلین	۳۶ درصد	رودخانه
سیپروفلوکساسین	۰/۰۰۷ - ۵/۶	فاضلاب خانگی
دیکلو فناک	۰/۰۷ - ۰/۷۸۴	پساب فاضلاب خانگی
سولفو متازین	۰/۰۱ - ۰/۰۱۸	فاضلاب خانگی
سولفو متاکسازول	۰/۹	پساب فاضلاب خانگی
مفنامیک اسید	۰/۰۹ - ۲/۴	پساب فاضلاب خانگی
آموکسی سیلین	۵۶۴۹۰	پساب فاضلاب دارویی



شکل ۱- نحوه امحاء داروهای تاریخ مصرف گذشته به روش خانگی

۳-۲-۳- پساب بیمارستانی و درمانگاهی

بخش قابل توجهی از داروهای تاریخ‌گذشته و مصرف‌نشده در مراکز درمانی، به دلیل ضعف در مدیریت پسماند، همراه با پساب یا زباله‌های بیمارستانی دفع می‌شود. این پساب‌ها، به‌ویژه در صورت نبود واحدهای تصفیه پیشرفته، می‌توانند غلظت بالایی از داروهای فعال (مانند داروهای ضدسرطان، هورمون‌ها و آنتی‌بیوتیک‌ها) را به منابع آبی منتقل کنند.

۳-۲-۴- پساب صنایع داروسازی

واحدهای تولید دارو، در فرایندهای شستشو و تمیزکاری خطوط تولید یا دفع مواد تاریخ‌گذشته، پساب‌هایی با غلظت بالا از مواد دارویی و محصولات جانبی تولید می‌نمایند. هرچند تصفیه اولیه برای حذف مواد خطرناک اعمال می‌شود، اما بسیاری از تصفیه‌خانه‌های صنعتی فاقد فناوری‌های پیشرفته (مانند اکسیداسیون پیشرفته و غشاهای اسمزی) برای حذف کامل داروهای پایدار هستند.

۳-۲-۵- زباله‌سوزها و امحاء غیرایمن

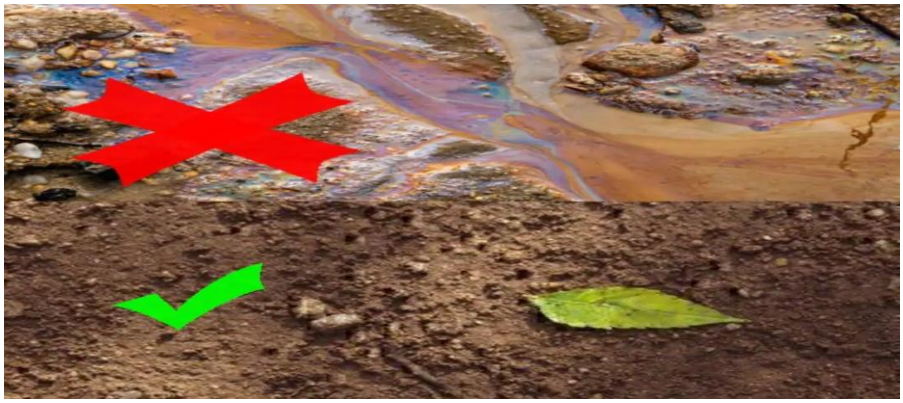
در برخی مناطق، داروهای منقضی‌شده توسط زباله‌سوزها دفع می‌شوند. اما در صورت غیراستاندارد بودن دما و زمان احتراق، برخی داروها و محصولات تخریب آن‌ها به‌صورت بخار یا خاکستر وارد محیط می‌شوند.

۳-۲-۶- ورود غیرمستقیم از طریق کودهای آلی و پساب کشاورزی

استفاده از لجن فاضلاب یا شیرابه حاوی داروها به‌عنوان کود آلی، موجب انتقال داروها به خاک و گاهی زنجیره غذایی کشاورزی می‌شود. همچنین پساب‌های کشاورزی که با کودهای آلی پذیرنده داروها آبیاری می‌شوند، امکان ورود غیرمستقیم مواد دارویی به آب‌های سطحی و زمینی را فراهم می‌کند [۸].



شکل ۲- آلودگی مستقیم از طریق کودهای مورد استفاده در محصولات کشاورزی



شکل ۳- آلودگی و از بین رفتن حاصلخیزی خاک

۳-۳- اثرات زیست‌محیطی بر اکوسیستم‌های مختلف

ورود ترکیبات دارویی فعال[11] حتی پس از انقضا،به محیط زیست یکی از مهم‌ترین و پیچیده‌ترین چالش‌های نوپدید درحوزه آلودگی‌های شیمیایی مدرن محسوب می‌شود. داروهای منقضی‌شده، که اغلب به دلیل عدم وجود سیستم‌های بازیافت مناسب، مستقیماً در سطل‌های زباله خانگی یا فاضلاب تخلیه می‌شوند، حامل ترکیباتی با فعالیت زیستی بالا هستند. این ترکیبات، به دلیل ویژگی‌هایی نظیر پایداری شیمیایی در برابر تجزیه بیولوژیکی، تحرک بالا در محیط‌های مختلف (آب و خاک) و توانایی اثرگذاری بر ارگانیسم‌ها در غلظت‌های بسیار پایین (نانوگرم در لیتر)، می‌توانند پیامدهای زیست‌محیطی و بهداشتی گسترده‌ای ایجاد کنند [۹].

۳-۳-۱- اثرات داروهای منقضی‌شده بر اکوسیستم‌های آبی

محیط‌های آبی (رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و آب‌های زیرزمینی) اصلی‌ترین گیرنده آلاینده‌های دارویی هستند، زیرا مسیرهای اصلی ورود، عمدتاً از طریق سیستم‌های تصفیه فاضلاب شهری و بیمارستانی است که برای حذف این نوع ترکیبات طراحی نشده‌اند.

۳-۳-۲-مسیرهای ورود و انتشار داروهای فعال در محیط آبی

داروهای منقضی‌شده پس از دفع نامناسب یا دفع ناقص در فرآیندهای تصفیه، وارد محیط‌های آبی می‌شوند. کارایی حذف[12] برخی از داروها در تصفیه‌خانه‌های معمولی بسیار پایین است. به عنوان مثال، آنتی‌بیوتیک‌هایی مانند تتراسایکلین و داروهای ضدالتهاب غیراستروئیدی اغلب در تصفیه‌خانه‌ها کمتر از ۵۰ درصد حذف می‌شوند.

۳-۳-۳-اثرات فارماکولوژیک بر ماهیان و آبزیان

اثرات داروهای باقی‌مانده در آب بر موجودات آبزی اغلب شامل تغییرات رفتاری، هورمونی و تولیدمثلی است، حتی در غلظت‌هایی که اثر سمی حاد[13] ندارند.

۳-۳-۳-۱-اختلالات غدد درون‌ریز (Endocrine Disruption)

استروژن‌های مصنوعی (مانند اتینیل استرادیول) و برخی پروژسترون‌ها که برای کنترل بارداری استفاده می‌شوند، می‌توانند باعث فمینیزاسیون (تولید جنس مؤنث) در جمعیت‌های ماهیان نر شوند. این امر توازن جنسی جمعیت را مختل کرده و در طولانی‌مدت منجر به کاهش زاد و ولد می‌گردد.

[11] Pharmaceuticals and Personal Care Products - PPCPs
[12] Removal Efficiency
[13] Acute Toxicity



شکل ۴- آلودگی بیش از حد آب و در نتیجه مرگ آبزیان

۳-۳-۳-۲- اثرات آنتی‌بیوتیک‌ها

حضور مداوم آنتی‌بیوتیک‌ها در محیط آبی، حتی در غلظت‌های زیر حداقل غلظت بازدارنده یک فشار انتخابی قوی بر جمعیت‌های میکروبی طبیعی اعمال می‌کند و به طور مستقیم به افزایش مقاومت آنتی‌بیوتیکی در باکتری‌های محیطی کمک می‌کند.

جدول ۲-اثرات برخی از داروهای پراستفاده بر گونه های آبزیان [۱۰].

ردیف	گروه دارویی/دارو	گونه‌های آبزی تحت تأثیر	اثرات مشاهده‌شده	مکانیسم اصلی اثر
۱	آنتی‌بیوتیک‌ها، سولفونامیدها، فلوروکینولون‌ها و تتراسایکلین‌ها	ماهی‌ها (Danio rerio) و Cyprinus carpio و سخت‌پوستان	کاهش رشد، اختلالات ایمنی، افزایش مقاومت باکتریایی	اختلال در سنتز DNA پروتئین و تغییر میکروبیوم
۲	سفالوسپورینها	ماهی‌ها و میکروارگانیسم‌های آبزی	اختلال در چرخه نیتروژن، افزایش AMR	مهار سنتز دیواره سلولی، تغییر جمعیت باکتریایی
	سفکسیم			
3	ایبوپروفن (NSAIDs)	ماهی‌ها و دوزیستان	سمیت کبدی/ کلیوی، اختلال تولیدمثل	مهار COX و اختلال در پروستاگالندینها
	دیکلوفناک			
۴	استروژنهای دارویی	ماهی‌های نر	فمینیزاسیون، کاهش اسپرمسازی	اتصال به گیرنده‌های استروژنی و فعالیت شبه هورمونی
۵	فلوکستین (SSRIs)	ماهی‌ها، سخت‌پوستان	تغییر رفتار و کاهش تغذیه	تغییر سطح سروتونین در سیستم عصبی
	سرترالین			
۶	استامینوفن	ماهی‌ها و جلبک‌ها	استرس اکسیداتیو، سمیت کبدی	تولید ROS و متابولیت‌های واکنش پذیر

۳-۳-۴-اثرات زیست‌محیطی داروها بر اکوسیستم‌های خاکی

فعالیت‌های کشاورزی، به ویژه استفاده از لجن فاضلاب تصفیه‌شده به عنوان کود مسیر اصلی ورود داروها به خاک است. پایداری شیمیایی داروها در خاک اغلب بسیار بالاتر از محیط آبی است، زیرا خاک دارای مواد آلی (مانند هیومیک اسید) است که قابلیت جذب و نگهداری این ترکیبات را دارند [۱۱].

۳-۴- اثرات بر سلامت انسان و ریسک‌های بهداشت عمومی

داروهای منقضی‌شده نه‌تنها یک چالش زیست‌محیطی بلکه یک خطر مستقیم و غیرمستقیم برای سلامت انسان محسوب می‌شوند. زمانی که داروها از طریق پساب‌ها، لجن فاضلاب، شیرابه‌های دفن و مسیرهای انتقال زیستی به منابع آب و غذا نفوذ می‌کنند، متابولیت‌های فعال آنها می‌توانند در بدن انسان تجمع پیدا کرده و پیامدهای مزمن ایجاد کنند. اثرات این ترکیبات اغلب به صورت تدریجی، تجمعی و چندمرحله‌ای بروز می‌یابد.

۳-۴-۱- مسیرهای انتقال به بدن انسان

مسیرهای اصلی ورود بقایای دارویی شامل موارد زیر است:

جدول ۳. مسیر ورود بقایای دارویی به بدن انسان

مسیر انتقال	نمونه‌ها	پیامد برای انسان
آب آشامیدنی آلوده	بقایای آنتی‌بیوتیک‌ها، تنظیم‌کننده‌های هورمون	تغییر میکروبیوم روده، اختلال هورمونی
محصولات کشاورزی	جذب داروهای ضدالتهاب، آنتی‌بیوتیک یا هورمون از خاک	ورود داروها به زنجیره غذایی، انباشت در بافت
تماس پوستی و هوایی	آئروسل‌های صنعتی یا پساب‌های خشک‌شده	حساسیت پوستی، آسیب تنفسی
مصرف غیرمستقیم گوشت یا شیر آلوده	بقایای داروهای دامپزشکی در خوراک	ریسک مقاومت آنتی‌بیوتیکی و سرطان‌زایی

۳-۴-۲-پیامدهای فیزیولوژیکی و سلولی

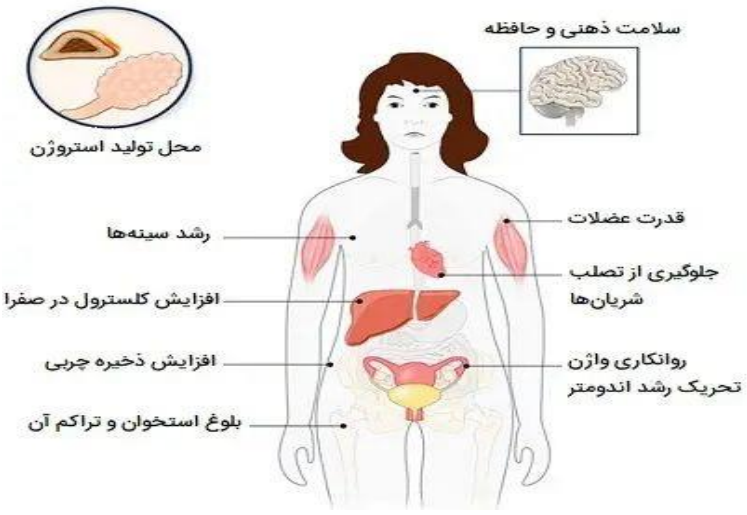
۳-۴-۲-۱-اختلالات غدد درون ریز

هورمون‌های مصنوعی دفع‌شده مانند استروژن‌ها و پروژسترون‌ها از طریق آب آشامیدنی یا محصولات زراعی جذب بدن می‌شوند. این مواد می‌توانند گیرنده‌های هورمونی را تحریک یا مهار کرده و تغییرات پایدار در سطوح هورمونی ایجاد کنند [۱۲]. پیامد آن شامل:

- ناباروری در زنان و مردان
- اختلال در رشد جنینی
- افزایش خطر سرطان‌های وابسته به هورمون (پستان، پروستات)



شکل ۵- اختلال در عملکرد غده استروژن در مردان



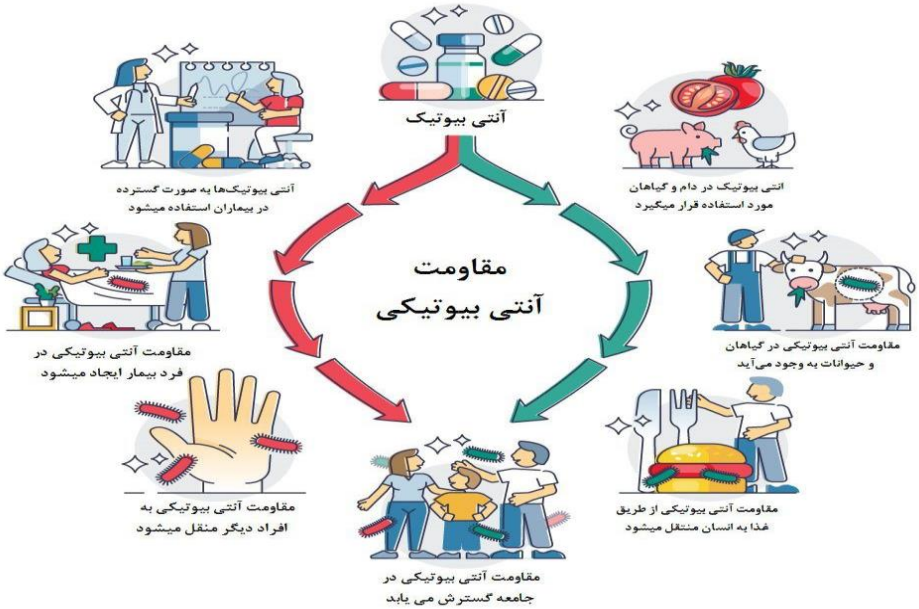
شکل ۶- اختلال در عملکرد غده استروژن در زنان

۳-۴-۲-۲- مقاومت ضد میکروبی

وجود آنتی‌بیوتیک‌ها در آب، خاک و غذا سبب فشار انتخابی بر باکتری‌ها می‌شود. این فشار طبیعی منجر به ظهور ژن‌های مقاومت آنتی‌بیوتیکی در جوامع میکروبی و در نهایت انتقال آن‌ها به انسان می‌گردد [۱۳].

۳-۴-۲-۲-۱- پیامدها

- عفونت‌های مقاوم به درمان در مراکز درمانی
- افزایش هزینه‌های پزشکی و دوره‌های بستری
- کاهش کارایی داروهای حیاتی (مانند پنی‌سیلین، سفالوسپورین‌ها)



شکل ۷- چرخه انتشار مقاومت ضد میکروبی از محیط به انسان

۳-۴-۲-۳-اثرات ژنتیکی و سرطان‌زایی

برخی ترکیبات ضدالتهاب غیراستروئیدی و داروهای ضدسرطان پس از شکست جزئی در محیط، محصولات فرعی ژنوتوکسیک تولید می‌کنند که می‌توانند:

- باعث آسیب DNA و جهش سلولی شوند
- آغازگر تغییرات اپی‌ژنتیک شوند که ریسک سرطان‌های کبد، کلیه و تیروئید را افزایش می‌دهد.
- مکانیسم‌های ترمیم سلولی را مختل کنند
- آغازگر تغییرات اپی‌ژنتیک شوند که ریسک سرطان‌های کبد، کلیه و تیروئید را افزایش می‌دهد [۱۴].

۳-۴-۳-پیامدهای بهداشت عمومی

افزایش هزینه‌های نظام سلامت به‌دلیل شیوع بیماری‌های مزمن، درمان‌های مقاوم و ناتوانی در کنترل عفونت‌های بیمارستانی، تهدیدامنیت غذایی انتقال بقایای داروهای دامپزشکی ازخوراک دام به گوشت ولبنیات، تهدیدی جدی برای مصرف‌کنندگان است.

۳-۴-۴- بررسی موردی و مستندات جهانی:

مطالعات میدانی در اروپا، هند، چین و ایران نشان داده‌اند که بیش از ۴۰ درصد منابع آبی شهری حاوی بقایای آنتی‌بیوتیکی‌اند [۱۵]. در شهر دهلی، استروژن‌های محیطی تا ۲۵ نانوگرم در لیتر گزارش شده‌اند، سطحی که خطر تغییرات فیزیولوژیک انسان را افزایش می‌دهد.

۳-۴-۵- راهبردهای بهداشت عمومی و کاهش ریسک

توسعه سیستم‌های تصفیه پیشرفته مانند:

- اکسیداسیون پیشرفته و غشاهای نانوفیلتراسیون.
- پایش مداوم ژن‌های مقاومت در مراکز تصفیه و فاضلاب‌های شهری.
- آموزش عمومی برای دفع ایمن داروها و مصرف منطقی آن‌ها.

۳-۵- تحلیل کارآمدی روش‌های فعلی مدیریت و امحای داروها

امروزه دفع و مدیریت داروهای منقضی‌شده به یکی از چالش‌های جدی زیست‌محیطی، بهداشتی و مدیریتی بدل شده است. با افزایش مصرف دارو در جوامع انسانی و دامپزشکی، حجم پسماند دارویی افزایش یافته، اما کارآمدی روش‌های موجود هنوز نسبت به استانداردهای بین‌المللی پایین است. شناخت نقاط ضعف، محدودیت‌ها و ظرفیت‌های روش‌های فعلی، برای طراحی راهبردهای بهینه مدیریت پسماند دارویی ضروری است. روش‌های متداول فعلی به سه گروه اصلی تقسیم می‌شوند:

جدول ۴-روش‌های امحاء مواد دارویی

روش	مکانیزم پایه	مزایا	محدودیت‌ها / مخاطرات
سوزاندن	تخریب گرمایی در دمای بالاتر از °C1200	نابودی مولکول‌های دارویی، کاهش حجم	تولید آلاینده‌های هوا (دی‌اکسین، فلزات سنگین)، هزینه بالا
دفن بهداشتی	جداسازی داروها و دفن در لایه‌های خاک	اجرای آسان، کم‌هزینه	نشت شیرابه و آلودگی آب زیرزمینی، پایداری طولانی ترکیبات دارویی
تصفیه پیشرفته	روش‌های فیزیکوشیمیایی مثل AOPs ،UV، غشا و بیوراکتورها	تخریب کامل ساختار دارویی، بازیافت انرژی	نیاز به فناوری بالا، مصرف انرژی زیاد

۳-۵-۱- سوزاندن

گرچه سوزاندن یکی از مؤثرترین شیوه‌ها برای نابودی مولکول‌های فعال دارویی است، اما در عمل با چالش‌های مهمی روبه‌رو است. بسیاری از مواد دارویی دارای عناصر کلردار یا نیترو هستند که در فرآیند احتراق تولید دی‌اکسین‌ها و اکسیدهای نیتروژن می‌کنند[۱۶].

۳-۵-۲- دفن بهداشتی

دفن داروهای منقضی‌شده معمول‌ترین روش در بسیاری از نقاط جهان است، اما مطالعات نشان داده‌است که ترکیباتی چون کاربامازپین، ایبوپروفن و آتنولول حتی پس از ۵ سال در شیرابه دفن یافت می‌شوند. در خاک‌های رسی یا دارای مواد آلی بالا، داروها به‌صورت پایدار باقی می‌مانند و خطر آلودگی آب‌های زیرزمینی را افزایش می‌دهند.

۳-۵-۳- تصفیه و تخریب پیشرفته

در این دسته، تخریب داروها بر پایه فرایندهای فیزیکی و شیمیایی انجام می‌شود:

- اکسیداسیون پیشرفته : استفاده از O_3، H_2O_2، TiO_2/UV که منجر به تخریب کامل حلقه‌های آروماتیک و کاهش سمیت زیستی می‌شود.
- غشاهای نانویی: جداسازی مؤثر داروهای قطبی و غیرقطبی با کارایی بیش از ۹۰ درصد، گرچه تولید لجن غلیظ حاوی دارو از چالش‌های مهم آن است.
- بیوراکتورها: بهره‌گیری از میکروارگانیسم‌های تخصصی برای تجزیه داروهای آنتی‌بیوتیکی و ضدافسردگی با راندمان متوسط اما سازگار با محیط [۱۷].

جدول ۵- مقاسیه روش های امحاء به روش تخریب پیشرفته

روش امحاء	راندمان حذف دارو (درصد)	پایداری محیطی پس از امحاء	هزینه نسبی	مناسب برای	ریسک زیست‌محیطی باقیمانده
سوزاندن کامل	90–99	متوسط (تولید گازهای سمی)	زیاد	داروهای جامد خطرناک	متوسط تا بالا
دفن کنترل‌شده	40–60	ضعیف (نشت و انباشت)	کم	داروهای خانگی حجم پایین	بالا
تصفیه پیشرفته (AOPs)	95–100	عالی	متوسط تا زیاد	فاضلاب دارویی و صنعتی	کم
غشا نانویی	90–95	بسیار خوب	زیاد	منابع آب شهری	متوسط
بیوراکتور میکروبی	70–85	خوب	متوسط	فاضلاب بیمارستانی	کم تا متوسط

۳-۶- مرور استانداردها و قوانین بین المللی

با رشد مصرف دارو در جهان و افزایش تنوع شیمیایی ترکیبات دارویی، خطر ورود این مواد به محیط‌زیست و منابع آب شرب افزایش یافته است. از همین رو از ابتدای دهه ۲۰۱۰ میلادی، نهادهای بین‌المللی چون WHO، OECD، و EU-EMA دستورالعمل‌هایی را برای پیشگیری از آلودگی دارویی و مدیریت داروهای منقضی‌شده تدوین کردند.

۳-۶-۱- دستورالعمل‌های سازمان جهانی بهداشت WHO Guidelines, 2014

سازمان بهداشت جهانی اولین نهاد بین‌المللی بود که دستورالعمل رسمی مدیریت داروهای بلااستفاده را منتشر کرد. اصول کلیدی آن شامل:

الزام جمع‌آوری داروهای منقضی‌شده از داروخانه‌ها و بیمارستان‌ها؛

۱. ممنوعیت دفع داروها در فاضلاب یا زباله شهری؛
۲. توصیه به استفاده از سوزاندن کنترل‌شده در دمای بالاتر از °C1200؛
۳. توجه به آموزش عمومی و اطلاع‌رسانی در سطح جامعه [۱۸].

مزیت: ایجاد الگوی جهانی هماهنگ با کشورهایی که فاقد مقررات محلی هستند.

نقص: تمرکز زیاد بر سوزاندن و فقدان جایگزین‌های فناورانه در کشورهای کم‌درآمد.

۳-۶-۲- ایالات متحده آمریکا EPA و FDA Collaboration 2015–2021

در ایالات متحده، سازمان حفاظت محیط‌زیست EPA و اداره غذا و دارو راهبرد مشترکی را در قالب برنامه‌ی Secure and Responsible Drug Disposal Act ایجاد کردند. سیاست‌های کلیدی عبارت‌اند از:

- برنامه « «Take-backدر داروخانه‌ها و مراکز پلیس.
- ممنوعیت سوزاندن محلی بدون مجوز سازمان .EPA
- توسعه فرایندهای تصفیه دارویی مبتنی‌بر فناوری پلاسمای سرد و میکروامولسیون‌ها.
- پایش حضور داروها در آب آشامیدنی ایالت‌ها.

نتیجه: کاهش ۲۵ درصد ورود داروهای آنتی‌بیوتیکی به شبکه‌های فاضلاب در فاصله ۵ سال (۲۰۱۶-۲۰۲۱).

۳-۶-۳- تجارب آسیا و اقیانوسیه

۱. ژاپن: سیستم قانونی “ ”Pharma Return Systemاز سال ۲۰۱۲ فعال است؛ داروهای مصرف‌نشده خانگی به داروخانه بازگردانده و در سامانه سوزاندن ایمن امحا می‌شوند.
۲. کره‌جنوبی: از ۲۰۱۸ سامانه « «Zero Pharmaceutical Wasteمبتنی بر تصفیه غشایی و بیوراکتورها اجرا می‌شود.
۳. استرالیا: برنامه “ ”Return Unwanted Medicines (RUM)از سال ۱۹۹۸ تاکنون، نمونه موفق مشارکت دولت و صنایع دارویی است و سالانه بیش از ۵۰۰ تن دارو را بازیافت یا امحا می‌کند [۱۹].

۳-۷- وضعیت ایران در مقایسه با تجارب جهانی

در ایران، مقررات مشخص و نظام‌مند برای جمع‌آوری داروهای منقضی‌شده وجود ندارد و دستورالعمل دفع دارویی صرفاً به سطح بیمارستان‌ها محدود است. شکاف‌های موجود عبارتند از:

- نبود شبکه بازگردانی خانگی و داروخانه‌ای؛
- استفاده از دفن و سوزاندن غیراستاندارد؛
- ضعف نظارت زیست‌محیطی و نبود پایش آلودگی دارویی در آب و خاک؛
- نبود تعامل موثر بین سازمان محیط‌زیست و وزارت بهداشت [۱۹].

۳-۸- ارائه الگوی پیشنهادی مدیریت یکپارچه داروهای منقضی‌شده

پراکندگی نهادی در مدیریت داروهای منقضی‌شده سبب می‌شود بخش بزرگی از داروها به فاضلاب‌ها، زباله‌های عمومی و منابع آبی وارد شوند. نبود سازوکار هماهنگ میان وزارت بهداشت، سازمان محیط‌زیست، شهرداری‌ها و صنعت داروسازی، از چالش‌های اصلی نظام مدیریت دارویی در ایران و بسیاری از کشورهای در حال توسعه است. از این رو، ایجاد یک مدل یکپارچه ملی مبتنی بر هماهنگی نهادی، فناوری پیشرفته، و مشارکت اجتماعی، ضرورت علمی و زیست‌محیطی دارد.

۳-۸-۱- رویکرد سیستماتیک چرخه‌حیات دارو

این رویکرد به جای مدیریت «پسماند»، کل چرخه تولید، توزیع، مصرف و امحا را دربرمی‌گیرد. اصول اصلی عبارت‌اند از:

- پیشگیری در منبع Source Prevention: کاهش تولید داروهای مازاد با سیاست‌های دقیق تجویز.
- جمع‌آوری سازمان‌یافته Collection Systems: طراحی شبکه ملی بازگردانی داروها از سطح خانه و داروخانه.

امحای فناورانه ((Technology-Based Disposal: بهره‌برداری از فناوری‌های تخریب نوین مانند فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته.

پایش و گزارش‌دهی ملی ((National Monitoring Framework: ایجاد سامانه اطلاعاتی مشترک میان نهادهای مسئول.

۳-۸-۲- ساختار مدل پیشنهادی یکپارچه

الگوی مدیریت یکپارچه پیشنهادی شامل سه لایه اصلی و شش زیرسیستم اجرایی است:

لایه اول: جمع‌آوری و تفکیک

- ایجاد «ایستگاه‌های بازگردانی دارو» در داروخانه‌ها، درمانگاه‌ها و مراکز شهری؛
- توسعه برنامه‌های *Pharma Return* مشابه مدل اتحادیه اروپا؛
- استفاده از سامانه‌های دیجیتال برای ثبت نوع و مقدار داروهای جمع‌آوری‌شده.

لایه دوم: امحا و تصفیه فناورانه

- به‌کارگیری فرایندهای ترکیبی AOP–Bio (اکسیداسیون پیشرفته همراه با تجزیه زیستی)؛
- نصب واحدهای پایلوت در مراکز داروسازی و تصفیه‌خانه‌های شهری؛
- کنترل انتشار آلاینده‌های گازی و مایع پس از امحا با سنجش عملکرد براساس شاخص‌های COD، log K_{ow}، و LC_{۵۰}.

لایه سوم: نظارت، پایش و آموزش

- تشکیل «مرکز ملی پایش داروهای منقضی‌شده» تحت نظارت مشترک وزارت بهداشت و محیط‌زیست؛
- آموزش عمومی برای نحوه دفع ایمن داروها با برچسب‌های رنگی و اطلاع‌رسانی رسانه‌ای؛
- جمع‌آوری داده زیست‌محیطی برای مدل‌سازی مسیرهای انتشار در نرم‌افزارهایی مانند GIS و COMSOL.

۴. نتیجه‌گیری

پژوهش بالا نشان داد که داروهای منقضی شده، به دلیل ساختار شیمیایی مقاوم و زیست فعالیت، تهدیدی جدی و فزاینده برای سلامت محیط زیست و بهداشت عمومی به ویژه از طریق تقویت AMR محسوب می‌شوند. مسیر اصلی ورود به محیط، دفع خانگی از طریق فاضلاب است که نشان دهنده ناکارآمدی روشهای دفع فعلی است. تحلیل فناوری ها تأکید میکند که هیچ روش واحدی به تنهایی کارآمد نیست؛ سوزاندن پرهزینه و، در حالی که تصفیه های بیولوژیکی ناکافی هستند. الگوی ترکیبی پیشنهادی، که بر الزام قانونی برای جمع آوری در مبدأ یعنی داروخانه ها و استفاده از فناوری های اکسیداسیون پیشرفته برای تخریب در مقیاس بزرگ متمرکز است، مؤثرترین راهکار برای کاهش بار آلاینده ها می‌باشد. پیاده‌سازی این مدل یکپارچه، با حمایت قانونگذاری جامع در ایران، پتانسیل دارد که میزان ورود EPPs به منابع آبی را تا ۷۰ درصد در دهه آینده کاهش دهد و سلامت اکوسیستم های محلی را تضمین نماید. نیاز مبرم به تدوین استانداردهای ملی برای پسماندهای دارویی مصرف کننده امری حیاتی است.

۵. مراجع

1. Bari, S. B., Kadam, B. R., Jaiswal, Y. S., and Shirkhedkar, A. A. (2007). “Impurity profile: significance in active pharmaceutical ingredient”. Eurasian J Anal Chem, 2(1), pp 32-53.
2. Marston, H. D., Dixon, D. M., Knisely, J. M., Palmore, T. N., and Fauci, A. S. (2016). “Antimicrobial resistance”. Jama, 316(11), pp 1193-1204.
3. Konovets, I. M., Yuryshynets, V. I., Kipnis, L. S., and Romanenko, O. V. (2025). “Behavioral Responses of Aquatic Invertebrates as a Promising Endpoint for Detection of the Toxic Effects (a Review)”. Hydrobiological Journal, 61(5) pp 74-85.
4. Galandrin, S., Oligny-Longpré, G., and Bouvier, M. (2007). “The evasive nature of drug efficacy: implications for drug discovery”. Trends in pharmacological sciences, 28(8), pp 423-430.
5. World Health Organization. (2010). “Global report on antimalarial drug efficacy and drug resistance: 2000-2010”. World Health Organization.

6. Insani, W. N., Qonita, N. A., Jannah, S. S., Nuraliyah, N. M., Supadmi, W., Gatera, V. A., and Abdulah, R. (2020). "Improper disposal practice of unused and expired pharmaceutical products in Indonesian households". Heliyon, 6(7), pp e04551.
7. Osei-Djarbeng, S. N., Larbi, G. O., Abdul-Rahman, R., Osei-Asante, S., and Owusu-Antwi, R. (2015). "Household acquisition of medicines and disposal of expired and unused medicines at two suburbs (Bohyen and Kaase) in Kumasi-Ghana". The Pharma Innovation, 4(8, Part B), pp 85.
8. Muhammad, T., Jiang, C., Liu, Z., Manan, I., Xiao, Y., and Li, Y. (2024). "Using organic fertilizer to mitigate organic-inorganic fouling in agricultural saline wastewater irrigation systems". Chemosphere, 352, pp 141373.
9. Boxall, A. B., Rudd, M. A., Brooks, B. W., Caldwell, D. J., Choi, K., Hickmann, S., and Van Der Kraak, G. (2012). "Pharmaceuticals and personal care products in the environment: what are the big questions?" Environmental health perspectives, 120(9), pp 1221.
10. Kulik, K., Lenart-Boroń, A., and Wyrzykowska, K. (2023). "Impact of antibiotic pollution on the bacterial population within surface water with special focus on mountain rivers". Water, 15(5), pp 975.
11. Gworek, B., Kijeńska, M., Wrzosek, J., and Graniewska, M. (2021). "Pharmaceuticals in the soil and plant environment: a review". Water, Air, & Soil Pollution, 232(4), pp 145.
12. Vishwas, D. K. (2022). "Effect of expired pharmaceutical dumping on ecological community". BLDE University Journal of Health Sciences, 7(2), pp 192-197.
13. Muteeb, G., Rehman, M. T., Shahwan, M., and Aatif, M. (2023). "Origin of antibiotics and antibiotic resistance, and their impacts on drug development: A narrative review". Pharmaceuticals, 16(11), pp 1615.
14. Freitas, L. D. A. A., and Radis-Baptista, G. (2021). "Pharmaceutical pollution and disposal of expired, unused, and unwanted medicines in the Brazilian context". Journal of xenobiotics, 11(2), pp 61-76.
15. Bashaar, M., Thawani, V., Hassali, M. A., and Saleem, F. (2017). "Disposal practices of unused and expired pharmaceuticals among general public in Kabul". BMC public health, 17(1), pp 45.
16. Nyaga, M. N., Nyagah, D. M., and Njagi, A. (2020). "Pharmaceutical waste: Overview, management, and impact of improper disposal".
17. Kadam, A., Patil, S., Patil, S., and Tumkur, A. (2016). "Pharmaceutical waste management an overview". Indian Journal of Pharmacy Practice, 9(1), pp 118-121.
18. Bashaar, M., Thawani, V., Hassali, M. A., and Saleem, F. (2017). "Disposal practices of unused and expired pharmaceuticals among general public in Kabul". BMC public health, 17(1), pp 45.
19. Dar, M. A., Maqbool, M., and Rasool, S. (2019). "Pharmaceutical wastes and their disposal practice in routine". Int J Inf Comput Sci, 6, pp 76-92.