به نام خداوند جان و خرد

انتشارات
۸۲۹

ریزآلاینده‌ها در محیط‌های آبی

هورمون‌های استروئیدی

دکتر رؤیا پیروی مینائی
عضو هیئت علمی دانشگاه علوم پزشکی گناباد
دکتر علیرضا فریدحسینی
عضو هیئت علمی دانشگاه فردوسی مشهد
آسیه متعلّمی
سمیرا سالاری
علیرضا مقدّم

عنوان و نام پدیدآور: ریزآلاینده‌ها در محیط‌های آبی: هورمون‌های استروئیدی/رؤیا پیروی مینائی ... [و دیگران] ؛ ویراستار علمی علی‌اکبر حیدری تاشه‌کبود؛ ویراستار ادبی هانیه اسدپور فعال مشهد.
مشخصات نشر: مشهد: دانشگاه فردوسی مشهد، انتشارات، ۱۴۰۱.
مشخصات ظاهری: ۱۲۸ ص.؛ مصوّر، جدول.
فروست: انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد؛ ۸۲۹.
شابک: ISBN: 978-964-386-521-4
وضعیت فهرست‌نویسی: فاپا.
یادداشت: پدیدآورندگان رؤیا پیروی مینائی، علیرضا فریدحسینی، آسیه متعلمی، سمیرا سالاری، علیرضا مقدم.
یادداشت: واژه‌نامه. کتابنامه: ص. ۱۱۳-۱۲۵. نمایه.
عنوان دیگر: هورمون‌های استروئیدی.
موضوع: ریزآلاینده‌ها
ریزآلاینده‌ها -- جنبه‌های زیست‌محیطی
هورمون‌های استروئیدی -- تجزیه و آزمایش
آب -- آلودگی
آب -- تصفیه
فاضلاب -- تصفیه
Micropollutants
Micropollutants -- Environmental aspects
Steroid hormones -- Analysis
Water -- Pollution
Water -- Purification
Sewage -- Purification
شناسه افزوده: پیروی، رؤیا، ۱۳۶۶ -
شناسه افزوده: حیدری، اکبر، ۱۳۶۵ - ، ویراستار
شناسه افزوده: دانشگاه فردوسی مشهد، انتشارات.
رده‌بندی کنگره: TD۴۲۷
رده‌بندی دیویی: ۶۲۸/۱۶۸
شمارهٔ کتاب‌شناسی ملّی: ۸۷۵۲۹۳۴

ریزآلاینده‌ها در محیط‌های آبی (هورمون‌های استروئیدی)

پدیدآورندگان: دکتر رؤیا پیروی مینائی: دکتر علیرضا فریدحسینی؛ آسیه متعلّمی سمیرا سالاری؛ علیرضا مقدّم
ویراستار علمی: دکتر علی‌اکبر حیدری تاشه‌کبود
ویراستار ادبی: هانیه اسدپور فعال مشهد
مشخصات: وزیری، ۱۰۰ نسخه، چاپ دوم، پاییز ۱۴۰۴ (اوّل، ۱۴۰۱)
چاپ و صحافی: همیار
بها : ۱/۷۰۰/۰۰۰ ریال
حق چاپ برای انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد محفوظ است.

انتشارات
۸۲۹

مراکز پخش:
فروشگاه و نمایشگاه کتاب پردیس: مشهد، میدان آزادی، دانشگاه فردوسی مشهد، جنب سلف یاس
تلفن: ۳۸۸۰۲۶۶۶- ۳۸۸۳۳۷۲۷ (۰۵۱)
مؤسّسهٔ کتابیران: تهران، میدان انقلاب، خیابان کارگر جنوبی، بین روانمهر و وحید نظری، بن‌بست گشتاسب، پلاک ۸ تلفن: ۶۶۴۸۴۷۱۵ (۰۲۱)
مؤسّسهٔ دانشیران: تهران، خیابان انقلاب، خیابان منیری جاوید (اردیبهشت) نبش خیابان نظری، شمارهٔ ۱۴۲
تلفکس: ۶۶۴۰۰۲۲۰ – ۶۶۴۰۰۱۴۴ (۰۲۱)
http://press.um.ac.ir Email: press@um.ac.ir

فهرست مطالب

پیشگفتار ۵

فصل ۱. خصوصیات و منابع ریزآلاینده‌ها ۷

تعریف ریزآلاینده‌ها ۷

ویژگی ریزآلاینده‌ها و هورمون‌های استروئیدی ۹

مسیرهای ورود ریزآلاینده‌ها به محیط‌زیست ۱۳

پیدایش ریزآلاینده‌ها در آب‌های سطحی ۱۹

پیدایش ریزآلاینده‌ها در آب‌های زیرزمینی ۲۱

وجود ریزآلاینده‌ها در آب‌های آشامیدنی ۲۲

فصل ۲. اثرات سلامتی و زیست‌محیطی هورمون‌های استروئیدی ۲۵

برنامهٔ غربالگری و جنبه‌های قانونی EDC ۲۵

اثرات بهداشتی و زیست‌محیطی ترکیبات استروژنی ۲۸

فصل ۳. حذف هورمون‌های استروئیدی در سیستم‌های تصفیه ۳۱

عملکرد تصفیه‌خانه‌های معمول درمورد ریزآلاینده‌ها ۳۱

حذف کلی ریزآلاینده‌ها در واحدهای متعارف تصفیهٔ آب و فاضلاب ۳۱

سرنوشت ترکیبات استروژنی در فرایندهای مهندسی‌شده ۳۳

بررسی میزان حذف استروئیدها براساس سطوح تصفیه ۳۴

تصفیهٔ مقدماتی ۳۴

تصفیهٔ اوّلیه ۳۴

تصفیهٔ ثانویه ۳۶

فرایندهای حذف نوترینت ۳۸

بررسی میزان حذف استروئیدها براساس نوع تصفیه ۳۹

فرایندهای فیزیکی ۴۰

فرایندهای شیمیایی ۵۶

فرایندهای بیولوژیکی..... ۵۷
مقایسهٔ بازده‌های حذف در روش‌های بیولوژیک متداول..... ۷۸
سرنوشت ترکیبات استروژنی درطی تثبیت لجن..... ۷۸
هضم هوازی و بی‌هوازی..... ۷۹
تثبیت شیمیایی لجن..... ۸۰
سرنوشت ترکیبات استروژنی در فرایندهای اُزن‌زنی و اکسیداسیون پیشرفته (AOPS)..... ۸۰
فتولیز..... ۸۳
فتوکاتالیست ناهمگن..... ۸۴
اکسیدکننده‌های قوی..... ۸۶
ترکیب UV و اکسیدانت‌های قوی..... ۸۸
سونولیز..... ۹۰

فصل ۴. شناسایی و اندازه‌گیری ریزآلاینده‌ها..... ۹۷
تکنیک‌های آنالیز ریزآلاینده‌ها در نمونه‌های آب و فاضلاب..... ۹۷
تکنیک‌های آنالیز ریزآلاینده‌ها در نمونه‌های لجن..... ۱۰۵
تکنیک‌های آنالیز ریزآلاینده‌ها در نمونه‌های خاک..... ۱۰۸

جمع‌بندی..... ۱۰۹
منابع..... ۱۱۳
واژه‌نامه..... ۱۲۶
نمایه..... ۱۲۷

پیشگفتار

ریزآلاینـده‌ها[1] و آلاینده‌های نوظهور[2] درنتیجهٔ تولید از منابع مختلف و انتشـار در محیط‌های آبی، در تعداد و میزان قابل‌توجهی تولید می‌شـوند. این دسـته از آلاینده‌ها معمولاً تحت نظارت نیسـتند، درحالی‌که پتانسـیل ورود به محیط را دارند و باعث اثرات اکولوژیکی، بهداشتی و تأثیر بر سلامتی انسان‌ها می‌شوند. با توجه به اثرات بالقوّهٔ این آلاینده‌ها، اقدامات پیشگیرانه لازم و ضروری می‌باشد و این درحـالی اسـت که در کشـورهای درحال‌توسـعه، مدیریت و نظارت هماهنگ بر آب‌های زیرزمینی و سـطحی هنوز از انسجام و ارتقای لازم برخوردار نیست. در ایران نیز استانداردهای ملّی کیفیـت آب پارامترهای مختلفی را برای ارزیابی کیفیت آب درنظر می‌گیرد که متأسـفانه شـامل ریزآلاینـده‌ها نمی‌شـود. بنابراین در سـیسـتم‌های مدیریت یکپارچهٔ کنونی، مؤلّفه‌های خاص در ارزیابی چرخهٔ زیسـتی آلاینده‌های نوظهور، دیدگاه محیط‌زیستی جدیدی است که باید موردتوجه قرار گیرد.

آنچه در این کتاب موردتوجه قرار گرفته اسـت، توضـیح درمورد راه‌های ورود، شـناسـایی و سـرنوشـت هورمون‌های اسـتروئیدی به‌عنوان یکی از ریزآلاینده‌ها در محیط‌های آبی و سیستم‌های مختلف تصـفیهٔ آب و فاضـلاب اسـت. البته باوجوداینکه عنوان و هدف اصـلی این کتاب، بحث درمورد هورمون‌های اسـتروئیدی در محیط‌های آبی می‌باشـد، اما در برخی قسمت‌ها از نام عمومی ریزآلاینده‌ها اسـتفاده شـده اسـت؛ زیرا برخی مطالعات (به‌عنوان نمونه درمورد خصـوصـیات، سـرنوشـت و یـا درصـد حذف) به‌صـورت کلی گزارش‌هایی را ارائه داده‌اند که هورمون‌های اسـتروئیدی هم هدف بحث بوده است. کتاب حاضر در پنج فصل تدوین شده است. در فصل اوّل، به تعریف ریزآلاینده‌ها، ویژگی‌ها و سـرنوشـت آن‌ها در محیط‌زیسـت، به‌ویژه منابع آبی، پرداخته شـده اسـت. فصـل دوم، به بررسـی اثرات هورمون‌های استروئیدی بر سلامتی انسان و محیط‌زیست می‌پردازد. در فصـل سـوم، روش‌های حذف هورمون‌های اسـتروئیدی در سـیستم‌های تصفیهٔ آب و

1. Micro pollutants
2. Emerging pollutants

فاضلاب مطرح می‌شود. در فصل چهارم، روش‌های شناسایی و اندازه گیری هورمون‌های استروئیدی در بسترهای مختلف مانند آب، فاضلاب، لجن و خاک ارائه شده است.

بنابراین در این کتاب سعی شده است که برخی از موارد و مطالب اساسی مرتبط با هورمون‌های استروئیدی که از جنبهٔ محیط‌زیستی و حفاظت از منابع آبی دارای اهمیت بیشتری است، توضیح داده شود. مخاطبان این کتاب دانشجویان مقاطع کارشناسی و تحصیلات تکمیلی مهندسی محیط‌زیست و مهندسی بهداشت محیط درزمینه‌های آموزشی و پژوهشی می‌باشند. همچنین مطالب این کتاب می‌تواند برای سایر علاقه‌مندان به مبحث آلاینده‌های نوظهور مفید واقع شود.

این کتاب حاصل تلاش چندین سال تدریس، پژوهش، راهنمایی و مشاورهٔ پایان‌نامه‌های مختلف توسط تیم مؤلّفان در مقاطع مختلف تحصیلی می‌باشد. در نگارش و تدوین این کتاب سعی شده است علاوه‌بر به‌روز بودن مطالب کتاب، مطالعهٔ آن برای خوانندگان قابل‌فهم و روان باشد. هرچند تلاش شده است با مرور چندبارهٔ مطالب کتاب، اشکالات آن تاحدّامکان برطرف شود، اما مانند دیگر آثار خالی از اِشکال نیست. بنابراین از خوانندگان گرامی‌سپاسگزار خواهیم شد، اگر انتقادها و دیدگاه‌های اصلاحی خود را به آدرس ایمیل peirovi.r@gmu.ac.ir ارسال کنند.

در پایان بر خود لازم می‌دانیم که از جناب آقای دکتر اکبر حیدری که زحمت ویراستاری علمی این کتاب را عهده‌دار شدند و نیز از داوران محترم که با ارائهٔ پیشنهادهای ارزندهٔ خود به ارتقای این کتاب کمک کرده‌اند، سپاسگزاری کنیم. همچنین از مدیریت محترم نشر آثار علمی دانشگاه فردوسی مشهد و کارکنان محترم این مدیریت، کمال تشکر و قدردانی را داریم.

نویسندگان

تابستان ۱۴۰۰

۱

خصوصیات و منابع ریزآلاینده‌ها

تعریف ریزآلاینده‌ها

بیش از چند دهه است که مسائل و مشکلات مربوط به ریزآلاینده‌ها در سراسر جهان به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مسائل و نگرانی‌های زیست‌محیطی مطرح شده است. ریزآلاینده‌ها معمولاً با غلظت‌های مختلفی از نانوگرم تا میکروگرم بر لیتر در محیط‌های آبی دیده می‌شوند (اینگراند[1]، هنری[2]، بیوس[3] و د روبین[4]، ۲۰۰۳؛ ویمازال[5]، برزینوا[6] و کوشلوه[7]، ۲۰۱۵). اگرچه ممکن است غلظت‌های پایین ریزآلاینده‌ها اهمیتی نداشته باشند، اما می‌توانند چالش‌هایی را در فرایندهای تصفیهٔ آب و فاضلاب ایجاد کنند (لو[8] و همکاران، ۲۰۱۴؛ نگوین[9] و همکاران، ۲۰۱۴). ورود این آلاینده‌ها از راه‌های مختلف به منابع آبی ازیک‌سو و اهمیت تأمین آب آشامیدنی سالم ازسویی‌دیگر، مسئله‌ای است که به‌شدت نیازمند توجه و حائز اهمیت می‌باشد (علیدادی و همکاران، ۱۳۹۳؛ پیروی، علیدادی، دهقان و واحدیان، ۱۳۹۲).

راه ورود این ترکیبات به محیط به نحوهٔ کاربرد و شکل استفاده از آن‌ها بستگی دارد. به‌نظر می‌رسد عمده‌ترین راه‌های ورود این ترکیبات به محیط‌زیست مواردی مانند رواناب‌های کشاورزی

1. Ingrand
2. Herry
3. Beausse
4. de Roubin
5. Vymazal
6. Březinová
7. Koželuh
8. Luo et al.
9. Nguyen et al.

و شـهری، دفع فاضـلاب‌های شـهری و صـنعتی، دفع لجن و نشـت‌های اتفاقی اسـت. این ترکیبات طبیعی و سـینتتیک به‌سـبب تداخل در عملکرد طبیعی سـیسـتم غدد درون‌ریز در انسـان و جانوران توجه خاصـی را به خود جلب کرده‌اند (ماتیچ[1]، گروجیچ[2]، ژائوکوویچ[3] و لائوسـویچ[4]، ۲۰۱۴). ازآنجایی‌که پیش‌بینی وسعت خطرات مرتبط با حضور این ترکیبات در محیط‌زیست مشکل است، نگرانی زیادی دررابطه با این مواد وجود دارد (سـیلوا[5]، اوترو[6] و اسـتیوز[7]، ۲۰۱۲). به تمامی این ترکیبات، مختل‌کنندهٔ سیستم غدد درون‌ریز[8] گفته می‌شود که ممکن است در برخی منابع از آن‌ها با نام آلاینده‌های نوظهور[9] یاد کنند (جاسـینسـکا[10] و همکاران، ۲۰۱۵؛ رضایی و همکاران، ۲۰۰۸). هنگامی‌که این آلاینده‌ها با غلظتی بیش از غلظت آسـتانه در محیط‌زیسـت حضـور داشـته باشـند، اثرات معکوسـی بر روی انسـان و سـایر موجودات برجای خواهند گذاشـت (قانعیان، پیروی و ابراهیمی، ۲۰۱۷). EDC_s اصـولاً شـامل هورمون‌های طبیعی، هورمون‌های سینتتیک و متابولیت‌های آن‌ها، هورمون‌های غیراسـتروئیدی، PCBs[11]، PAH[12] و PFC[13] و ترکیبات سـینتتیکی می‌باشـد که به‌عنوان پلاسـتیسـایزر، خاموش‌کنندهٔ شـعله، سـورفاکتانت، حشـره‌کش، بعضـی از مواد دارویی و محصـولات مراقبـت فردی اسـتفـاده می‌شـونـد (پیروی، علیـدادی، جمالی و جعفرپور، ۱۳۹۵؛ ویرکوتیت[14]، وارما[15] و جگاتیزان[16]، ۲۰۱۰). تعداد زیادی از تحقیقات علمی بر این نکته دلالت دارند که برخی از این مواد ممکن اسـت موجب تداخل در عملکرد طبیعی بدن انسـان و حیوانات شوند.

مکانیسم‌های تداخل این ترکیبات شامل موارد زیر است:

- تقلید اثرات هورمون‌ها
- مقابله با اثرات هورمون‌ها
- اختلال در ساخت و متابولیسم هورمون‌ها
- اختلال در سـاخـت گیرنـدهٔ ویژه هورمون (هرواس مارتینز[17]، ۲۰۲۰؛ سـیلوا و همکاران[18]، ۲۰۱۲)

1. Matić
2. Grujić
3. Jauković
4. Laušević
5. Silva
6. Otero
7. Esteves
8. Endocrine Disrupting Compounds (EDCs)
9. Emerging Pollutants
10. Jasinska
11. Polychlorinated Biphenyls
12. Polynuclear Aromatic Hydrocarbons
13. Polyfluorinated Compounds
14. Virkutyte
15. Varma
16. Jegatheesan
17. Hervás Martínez
18. Silva.

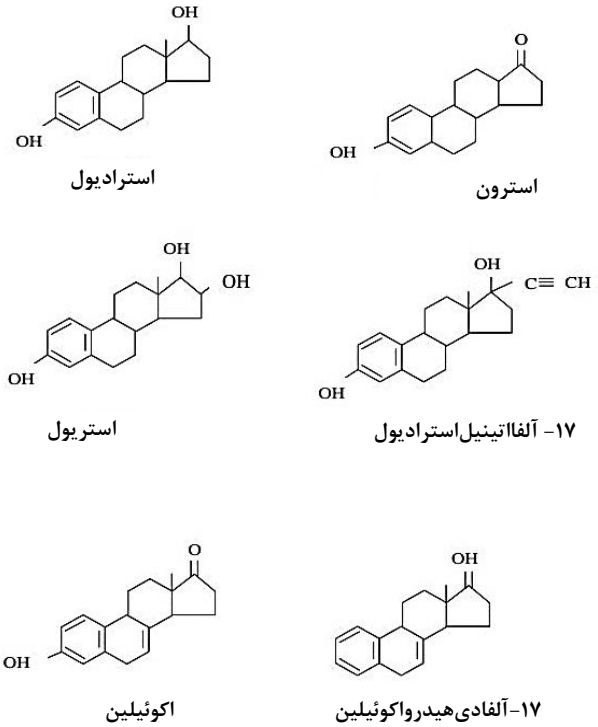
اکثر این ترکیبات که در طبیعت با گیرنده‌های هورمونی واکنش نشان می‌دهند، ترکیبات استروژنیک هستند و تعداد کمی از آن‌ها پتانسیل اندروژنیک یا آنتی‌اندروژنیک دارند (شارگیل[1]، گرستل[2]، فاین[3]، نیتسان[4] و کورتزمن[5]، ۲۰۱۵). در میان این ترکیبات مختل‌کننده، هورمون‌های ناشی از زائدات انسانی و حیوانی اغلب به‌عنوان هورمون‌های استروئیدی شناخته می‌شوند و با پتانسیل استروژنی بالایی که دارند، از بقیه متمایز می‌باشند (حمید و اسکیچی‌اوغلو[6]، ۲۰۱۲) که در ادامه راجع به خصوصیات آن‌ها بحث خواهد شد.

- قابل‌ذکر است که باوجوداینکه عنوان و هدف اصلی این کتاب بحث درمورد هورمون‌های استروئیدی در محیط‌های آبی می‌باشد، اما در برخی قسمت‌ها از نام عمومی ریزآلاینده‌ها استفاده شده است؛ زیرا برخی مطالعات (به‌عنوان مثال درمورد خصوصیات، سرنوشت و یا درصد حذف) به‌صورت کلی گزارش‌هایی را ارائه داده‌اند که در این موارد هورمون‌های استروئیدی هم مدّنظر بوده است.

ویژگی ریزآلاینده‌ها و هورمون‌های استروئیدی

همان‌طور که در قسمت قبل بیان شد، EDCs شامل دامنهٔ وسیعی از ترکیبات شیمیایی هستند، هورمون‌های استروئیدی- به‌عنوان یکی از این ترکیبات- گروهی از ترکیبات فعال بیولوژیکی هستند که از کلسترول ساخته شده‌اند، در بدن انسان تولید می‌شوند و به‌طور عمومی یک حلقهٔ سیکلوپنتانوپرهیدروفنانترون[7] دارند (ینگ[8]، کوکانا[9] و رو[10]، ۲۰۰۲). استروژن‌های طبیعی شبکهٔ تتراسیکلیک یکسانی دارند که شامل حلقهٔ فنلی، دو حلقهٔ سیکلوهگزان و یک حلقهٔ سیکلوپنتان است. علت تفاوت در حلقهٔ D این است که در موقعیت C16 و C17 ترکیبات متفاوتی شکل می‌گیرد (شکل ۱-۱). ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی این ترکیبات نقش مهمی در پیش‌بینی سرنوشتشان در محیط طبیعی و مهندسی‌شده دارند. همان‌طوری که در جدول ۱-۱ نشان داده شده است، استروژن‌ها خیلی در آب قابل‌حل نیستند. ضریب پخش اکتانول/آب (K_{ow}) به‌عنوان نسبتی از انحلال یک ترکیب در اکتانول و آب تحت شرایط تعادل در دمای خاص، در جدول ۱-۱ نشان داده شده است.

1. Shargil
2. Gerstl
3. Fine
4. Nitsan
5. Kurtzman
6. Hamid & Eskicioglu
7. Cyclopentano-perhydrophenantrone
8. Ying
9. Kookana
10. Ru



شکل ۱-۱ ساختار شیمیایی برخی استروژن‌های طبیعی و سینتتیک

ازآنجایی‌که میزان پراکندگی مواد بین آب و دیگر محیط‌های آلی همواره به‌صورت نسبی است، مقدار K_{ow} برای پیش‌بینی جذب و یا انحلال یک ترکیب مناسب می‌باشد. مقدار لگاریتم K_{ow} ترکیبات استروژنی بین ۲٫۵ تا ۴ متفاوت است. درنتیجه گفته می‌شود آب‌گریزی آن‌ها متوسط است و تمایل زیادی به پخش در محیط‌های جامد دارند (حمید[1] و اسکیچی‌اوغلو[2]، ۲۰۱۲).

تعداد بسیار زیادی از کل استروژن‌های تولیدشده در بدن به‌شکل کونژوگیته‌شده با ادرار هستند. قبل از تخلیهٔ ادرار، استروژن‌های کونژوگیته به‌وسیلهٔ گلوکورونوئید و یا گروه سولفاته در موقعیت‌های C_3 و C_{17} قرار می‌گیرند. این کونژوگیته‌های قطبی ازنظر بیولوژیکی غیرفعال هستند و قابلیت انحلال آن‌ها در آب در مقایسه با ترکیباتی که کونژگیته نمی‌شوند، بیشتر است. باوجوداینکه بیشتر هورمون‌های دفعی از انسان به‌صورت کونژوگیته هستند (حمید و اسکیچی‌اوغلو، ۲۰۱۲)، اما مطالعات نشان داده است بیشتر هورمون‌های استروژنی موجود در ورودی و خروجی

1. Hamid
2. Eskicioglu

فاضلاب به‌شکل استروژن آزاد و استروژن‌های سولفوره هستند. این موضوع نشان می‌دهد که دی‌کونژوگاسیون اتفاق افتاده است. دی‌کونژوگاسیون می‌تواند به‌وسیلهٔ اشرشیاکلی موجود در مدفوع و آنزیم بتاگلیکورنیداز آن صورت گرفته باشد (حمید و اسکیچی‌اوغلو، ۲۰۱۲). وجود ترکیبات سولفورهٔ استروژن‌ها می‌تواند به‌دلیل ضعف آنزیم آری‌سولفاتاز اشرشیاکلی در مقایسه با بتاگلیکورنیداز باشد (آندراسی[1] و همکاران، ۲۰۱۳؛ کاربلا[2] و همکاران، ۲۰۰۴؛ حمید و اسکیچی‌اوغلو[3]، ۲۰۱۲؛ ناگارنایک[4]، میلز[5] و بولانگر[6]، ۲۰۱۰).

استروژن‌های طبیعی: استرون (E_1)[7]، ۱۷- بتااسترادیول (E_2)[8]، استریول (E_3)[9] و نوع سینتتیک آن ۱۷- آلفااتیلین‌استرادیول (EE_2)[10] رایج‌ترین استروژن‌ها در فاضلاب هستند (راکز[11] و گوئل[12]، ۲۰۱۰). E_2 متابولیت اوّلیه در زنانی است که در سنین باروری هستند و بالاترین پتانسیل را دارد. E_3 متابولیت E_1 و E_2 است (حمید و اسکیچی‌اوغلو[13]، ۲۰۱۲).

E_1, E_2, E_3 به‌طور عمده هورمون‌های زنانه هستند که برای حفظ سلامت بافت‌های سینه، پوست و مغز مهم می‌باشند، درحالی‌که EE_2 یک استروژن مصنوعی است که به‌عنوان هورمونی برای جلوگیری از بارداری استفاده می‌شود. تمام انسان‌ها همچنین حیوانات، هورمون‌های استروئیدی را در مقادیر مختلف به محیط دفع می‌کنند که این میزان دفع بسته به سن، وضعیت سلامت، رژیم غذایی و وضعیت بارداری متفاوت است. این هورمون‌ها ازطریق تخلیهٔ فاضلاب و دفع فاضلاب حیوانی به محیط وارد می‌شوند (ژنگ[14]، ییتس[15] و بردفورد[16]، ۲۰۰۷).

تعدادی از هورمون‌های طبیعی و سینتتیک ناشی از انسان و حیوانات به‌عنوان تخریب‌کنندهٔ غدد درون‌ریز عمل می‌کنند. علاوه‌براین، بعضی از این استروژن‌ها مانند ترکیبات تولیدی گیاهان رفتار می‌کنند. با درنظرگرفتن منشأ تولید، این ترکیبات می‌توانند به‌صورت زیر طبقه‌بندی شوند:

- هورمون‌های استروژنی /اندروژنی طبیعی: E_1,E_2,E_3، تستوسترون (Tan, Jing, Ding, & Wei, ۲۰۱۵) و سایر موارد
- هورمون‌های سنتتیک: EE_2، دی‌اتیل‌استیلبسترول، ۱۹- نورتیندرون و سایر موارد

1. Andrási et al.
2. Carballa et al.
3. Hamid & Eskicioglu
4. Nagarnaik
5. Mills
6. Boulanger
7. Estrone
8. 17β-Estradiol
9. Estriol
10. 17α-Ethinylestradiol
11. Racz
12. Goel
13. Hamid & Eskicioglu
14. Zheng
15. Yates
16. Bradford

- فیتومایکواستروژن‌ها: دیادزین، جنستین، زیرالنون و سایر موارد (آلبرو[1]، سانچز-برونته[2]، میگل[3]، پرز[4] و تادئو[5]، ۲۰۱۳)

جدول ۱-۱ خصوصیات فیزیکو شیمیایی و پتانسیل استروژنی هورمون‌های استروژنی

هورمون	گروه	وزن مولکولی (گرم بر مول)	انحلال‌پذیری در آب (میلی‌گرم بر لیتر)	LogK ow	ضریب ثابت هنری	پتانسیل استروژنیک (YES)
E_1	استروژن طبیعی	۲۷۰٫۴	۱۳	۳٫۳۴	$۶٫۲\times ۱۰^{-۷}$	۱، ۰٫۳۸
E_2	استروژن طبیعی	۲۷۲٫۴	۱۳	۳٫۹۴	$۶٫۳\times ۱۰^{-۷}$	۱
۱۷- آلفااسترادیول	استروژن طبیعی	۲۷۲٫۴	-	۴٫۰۱	۲×۱۰^{-۱۱}، ۰٫۰۷۵، ۰٫۳
E_3	استروژن طبیعی	۲۸۸٫۴	۱۳	۲٫۸۱	$۳٫۸\times ۱۰^{-۷}$	۰٫۰۰۱، ۰٫۰۲۴
EE_2	استروژن سینتتیک	۲۹۶٫۴	۱۱۶	۳٫۶۷	-	۱٫۵- ۱٫۱۹
۲- هیدروکسی‌استرون	استروژن طبیعی	۲۸۶٫۳	-	-	-	۰٫۰۰۲۶
۱۶- آلفاهیدورکسی‌استرون	استروژن طبیعی	۲۸۶٫۳	-	-	-	-
اکوئیلین	استروژن طبیعی	۲۶۸٫۴	۱۴٫۱	۳۵٫۳	-	-
جنیستئین	فیتواستروژن	۲۷۰٫۲	۲۵۸	۸۴٫۲	-	۰٫۰۰۲
کومسترول	فیتواستروژن	۲۶۸٫۲	-	-	-	۰٫۴- ۷۰٫۶e
دیادزئین	فیتواستروژن	۲۵۴٫۲	-	-	-	۰٫۶- ۰۰٫۲e
اکوئول	فیتواستروژن	۲۴۲٫۲	-	-	-	۰٫۵- ۰۰٫۲e
بیوچنین-a	فیتواستروژن	۲۸۴٫۳	-	-	-	۶- < ۲e
فورمونونتین	فیتواستروژن	۲۸۶٫۳				-

خصوصیات فیزیکوشیمیایی E_1,E_2,E_3 و EE_2 در جدول ۱-۱ Error! Reference source not found. خلاصه شده است. در میان این خصوصیات، قابلیت انحلال در آب (SW) و ضریب تقسیم اکتانول به آب (K_{OW}) جزء پارامترهای کلیدی در مطالعات مربوط به سرنوشت مواد شیمیایی در محیط هستند. SW تاحدّ زیادی به پارامترهای درجه‌حرارت، فشار، pH، قدرت یونی، وجود مواد آلی معلّق و محلول بستگی دارد. استروژن‌های طبیعی در جدول ۱-۱ (E_1, E_2, E_3) دارای mg/L SW =۱۳ می‌باشند، درحالی‌که استروژن‌های مصنوعی (EE_2) SW پایین‌تری دارند (۴٫۸). پارامتر مهم دیگر برای ترکیبات شیمیایی، k_{ow} است که به SW، ضریب جذب خاک به رسوب و فاکتورهای تجمّع بیولوژیکی در محیط‌های آبی وابسته است. ترکیبات شیمیایی با مقادیر k_{ow} پایین

1. Albero
2. Sánchez-Brunete
3. Miguel
4. Pérez
5. Tadeo

(کمتر از ۱۰) به‌طور نسبی هیدروفیل (آب‌گریز) هستند و به داشتن SW بالا، ضریب جذب خاک/رسوب و فاکتور تجمّع بیولوژیکی پایین تمایل دارند. در مقابل، ترکیبات شیمیایی با k_{ow} بالا (بیشتر از ۱۰۴) به‌شدت آب‌گریز هستند و پتانسیل جذب بالایی دارند (جونز-لپ[1] و استیونز[2]، ۲۰۰۷). به‌طورکلی، از جدول ۱-۱ می‌توان نتیجه‌گیری کرد که این استروژن‌ها، ترکیباتی با فرّاریت پایین و آب‌گریز (هیدروفوبیک) هستند (سیلوا[3] و همکاران، ۲۰۱۲). همچنین در جدول ۱-۱ پتانسیل بعضی از هورمون‌های طبیعی و سینتتیک نسبت به E_2 نشان داده شده است. این مقادیر با کاربرد یک بررسی بیولوژیکی بر روی مخمّر[4] انجام شده است. مخمّر YES یک نوترکیب گیرندهٔ استروژن انسانی مهندسی‌شده به‌همراه گیرنده بتاگالاکتوزیداز را به‌کار می‌گیرد. پتانسیل‌ها بسته به نوع بررسی بیولوژیکی به‌کاررفته و روش شناسایی متفاوت‌اند و به‌همین‌دلیل است که در ستون آخر جدول دو عدد ذکر شده است (حمید و اسکیچی‌اوغلو، ۲۰۱۲).

مطالعات نشان می‌دهد که EE_2 و E_2 جزء استروژن‌هایی با پتانسیل بالا می‌باشند و بعد از آن‌ها E_1 و E_3 از پتانسیل بالا برخوردارند (عبدالمونیم‌عزوز[5] و بالستروس[6]، ۲۰۱۲؛ فولمار و همکاران[7]، ۲۰۰۲). این هورمون‌های طبیعی و سینتتیک نگرانی اصلی را به خود اختصاص داده‌اند (فولمار[8] و همکاران، ۲۰۰۲؛ اینگراند[9] و همکاران، ۲۰۰۳)؛ زیرا با غلظت خیلی پایین (در محدودهٔ نانوگرم بر لیتر) مستعد داشتن اثرات منفی بر روی موجودات آبزی هستند (آندراسی[10] و همکاران، ۲۰۱۳؛ آفارتوا[11] و همکاران، ۲۰۱۱؛ ایروین[12]، گری[13] و اوبردستر[14]، ۲۰۰۱).

مسیرهای ورود ریزآلاینده‌ها به محیط‌زیست

غلظت ریزآلاینده‌ها در فاضلاب ورودی و پساب خروجی واحدهای تصفیه‌خانه با توجه به نرخ تولید فاضلاب، نرخ دفع، میزان مصرف آب (به‌ازای هر نفر در روز)، سایز واحدهای تصفیه‌خانه و میزان کارایی حذف فرایندهای تصفیهٔ فاضلاب متفاوت است. میزان تولید و مصرف محصولاتی که حاوی ترکیبات ریزآلاینده هستند، مقدار آلاینده‌های ورودی به واحدهای تصفیه را مشخص می‌کند (پتروویچ[15] و همکاران، ۲۰۰۹).

1. Jones-Lepp
2. Stevens
3. Silva
4. Yeast-based in vitro bioassay (YES assay)
5. Abdelmonaim Azzouz
6. Ballesteros
7. Folmar
8. Folmar
9. Ingrand
10. Andrási
11. Aufartová
12. Irwin
13. Gray
14. Oberdörster
15. Petrovic

مطالعه‌ای که در چین بر روی فعالیت هورمون‌های استروئیدی در جریان‌های آبی انجام شد، ثابت کرد که ۵۴ درصد منشأ هورمون‌های استروئیدی موجود در آب‌های شیرین، تخلیهٔ فاضلاب‌های تصفیه نشده است. E_2 با نسبت سهم ۸۲٫۸ درصد عامل اصلی فعالیت استروژنی در بین سایر ترکیبات استروژنی بود. مقادیر ضریب ریسک E_2 بالاتر و از ۱٫۵۵ تا ۷۸۲٫۹۵ متغیر بود و ۷۶ درصد از نمونه‌های آب سطحی موردمطالعه، بیشترین خطر محیطی را نشان دادند. همچنین غلظت‌های بالای هورمون‌های استروئیدی در نواحی‌ای که تحت شرایط استرس آبی قرار دارند، یافت شد (کاسونگا[1]، کوتیزی[2]، کامیکا[3]، نگول-جیم[4] و بنتکه مومبا[5]، ۲۰۲۱؛ یائو[6]، لی[7]، یان[8]، چان[9] و سانگ[10]، ۲۰۱۸).

مطالعات نشان داده است که غلظت PPCP[11] در فاضلاب با میزان تولید و مصرف آن‌ها ارتباط دارد. همچنین غلظت‌های استامینوفن، کاربامازفین، سولفامتوکسازول و موارد مشابه با میزان تولید سالانهٔ آن‌ها در ارتباط است. غلظت‌های بالایی (بیشتر از ۱۰ میکروگرم بر لیتر) از استامینوفن، ترامادول، کدئین در فاضلاب خام ایالت کینگدوم[12] گزارش شده است. ترکیبات دارویی که در بدن انسان تجزیه شده و ازطریق ادرار و مدفوع دفع می‌شوند، نقش مهمی‌در تعیین مقدار این آلاینده‌ها در فاضلاب خام دارند. ترکیبات دارویی با میزان نرخ دفعی کم (مانند ایبوپروفن، کاربامازوفن، دیکلوفناک و...) لزوماً با غلظت‌های پایین در فاضلاب خام وجود ندارند. این امر احتمالاً به‌این‌دلیل است که نرخ پایین دفع آن‌ها تحت‌تأثیر مصرف زیاد این ترکیبات بوده است. علاوه‌براین، بیماری‌های فصلی و اپیدمیک می‌تواند باعث افزایش مصرف این داروها در یک دورهٔ زمانی خاص شوند. تحقیقات نشان می‌دهد که شرایط آب‌وهوایی می‌تواند باعث نوسان میزان ریزآلاینده‌ها در فاضلاب ورودی شود. همچنین به‌دلیل شیوع آفت‌ها در شرایط آب‌وهوایی مختلف، مصرف آفت‌کش‌ها فصلی است (کولپین[13]، اسکوپک[14]، میر[15]، فورلونگ[16] و زاگ[17]، ۲۰۰۴).

فاضلاب شهری مسیر اصلی دریافت ترکیبات هورمونی استروژنی ناشی از زائدات انسانی است.

1. Kasonga
2. Coetzee
3. Kamika
4. Ngole-Jeme
5. Benteke Momba
6. Yao
7. Li
8. Yan
9. Chan
10. Song
11. Pharmaceuticals and personal care products
12. United Kingdom (UK)
13. Kolpin
14. Skopec
15. Meyer
16. Furlong
17. Zaugg

درمجموع، استروژن‌های سینتتیکی که به‌طور وسیع برای هورمون‌درمانی و پیشگیری از بارداری استفاده می‌شوند، در بدن انسانْ هضم و زائدات آن پس از دفع ازطریق محیط‌های آبی وارد محیط‌زیست می‌شوند. هورمون‌ها می‌توانند ازطریق منابع نقطه‌ای (مانند پساب ناشی از تأسیسات تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب[1]) و منابع غیرنقطه‌ای (مانند رواناب سطحی ناشی از کارهای کشاورزی) وارد محیط‌زیست شوند. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، مواد دفعی انسان و حیوانات منبع اصلی هورمون‌های استروئیدی در محیط‌های آبی هستند. هورمون‌های طبیعی و سینتتیک و متابولیت‌های آن‌ها درنهایت وارد تصفیه‌خانهٔ آب و فاضلاب می‌شوند.

بهینه‌سازی حذف ریزآلاینده‌ها نظیر ترکیبات استروژنی برای تصفیه‌خانه‌های معمول فاضلاب و لجن امکان‌پذیر نیست. جامدات تثبیت‌شده بعد از تصفیهٔ فاضلاب ممکن است به‌علت حذف ناکافی جامدات از فاز مایع، به‌عنوان منبعی از این ریزآلاینده‌ها محسوب شوند. مطالعهٔ سرنوشت این مواد شیمیایی برای تعیین میزان حذف در تصفیه‌خانه و بار ورودی استروژن‌ها به محیط‌زیست، امری ضروری است. هر دو بخش جامدات و مایعات تصفیه‌شده در فاضلاب ورودی به‌عنوان مسیر بالقوّهٔ ورود این ترکیبات به محیط‌زیست هستند (کاربلا[2]، امیل[3] و لما[4]، ۲۰۰۸؛ کاربلا و همکاران، ۲۰۰۴؛ ناگارنایک[5] و همکاران، ۲۰۱۰). جدول ۱-۲ غلظت هورمون‌ها در فاضلاب خام و تصفیه‌شده در چند کشور را نشان می‌دهد.

جدول ۱-۲ غلظت و میزان حذف در سیستم‌های متداول تصفیه‌خانه در کشورهای مختلف

نام هورمون	محل نمونه‌برداری	غلظت در ورودی (میکروگرم بر لیتر)	غلظت در خروجی (میکروگرم بر لیتر)	بازده (درصد)
استرون	چین، فرانسه، آلمان، ایتالیا، کره، سوئد، آمریکا	۰٫۰۱ – ۰٫۱۷	<۰٫۰۰۱ – ۰٫۰۸	۷۴٫۸ – ۹۰٫۶
استرادیول	چین، فرانسه، آلمان، ایتالیا، کره، سوئد، آمریکا	۰٫۰۰۲ – ۰٫۰۵	<۰٫۰۰۱ – ۰٫۰۰۷	۹۲٫۶ -۱۰۰
۱۷- آلفااتیلین‌استرادیول	چین، فرانسه، آلمان، ایتالیا، سوئد، آمریکا	۰٫۰۰۱ -۰٫۰۰۳	<۰٫۰۰۱ – ۰٫۰۰۲	۴۳٫۸ - ۱۰۰
استریول	چین، کره	۰٫۰۸۰ – ۰٫۱۲۵	غیرقابل شناسایی	۱۰۰

فاکتور مهم دیگر بارش باران است که الگوهای جریان را در ورودی تصفیه‌خانه تغییر و تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. میزان محصولات مراقبت فردی و داروها[6] در فاضلاب خام، زمانی که میزان

1. Water and wastewater treatment plants (WWTPs)
2. Carballa
3. Omil
4. Lema
5. Nagarnaik
6. Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs)

جریان درنتیجهٔ شرایط آب‌وهوایی خشک به‌نصف کاهش می‌یابد، دو برابر می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، میزان بارش‌ها می‌تواند غلظت آلاینده‌ها را رقیق کند. سایر فاکتورهای آب‌وهوایی مانند دما، نورخورشید می‌توانند تخلیهٔ ریزآلاینده‌ها در فرایندهای تصفیهٔ فاضلاب را تحت‌تأثیر قرار دهند (کاسپرسیک‌هوردن[1]، دینسدیل[2] و گوی[3]، ۲۰۰۹).

طی مطالعات مختلف، غلظت اکثر ریزآلاینده‌ها در ورودی واحدهای تصفیه‌خانه در بازهٔ ۰٫۱ تا ۱۰ میکروگرم بر لیتر گزارش شده است؛ درحالی‌که برخی ترکیبات دیگر مانند داروها (استامینوفن، کافئین، ایبوپروفن، ناپروکسن، اسیدسالسیلک) و یک ترکیب جرم‌کش (تریکلوسان)، یک سورفاکتانت (نانیل‌فنل) و یک ترکیب شیمیایی صنعتی غلظت‌های نسبتاً بالاتری را نشان داده‌اند.

به‌طور معمول، ترکیبات با غلظت بالا (بالاتر از ۱۰ میکروگرم بر لیتر) در ورودی واحدهای تصفیه‌خانه شامل ایبوپروفن، آتنولول، کافئین و نانیل‌فنل‌ها هستند. به‌عنوان مثال، ایبوپروفن دارای بیشترین فراوانی (غلظت‌هایی از ۳٫۷۳ تا ۶۰۳ میکروگرم بر لیتر) در ورودی ۴ تصفیه‌خانه در اسپانیا برخوردار بود. به‌طور ویژه می‌توان بیان کرد که میزان بالای غلظت این ترکیب با مقدار مصرف بیشتر و در دسترس بودن آن در ارتباط است (سانتوس[4]، آپاریسیو[5]، کالژون[6] و آلونسو[7]، ۲۰۰۹). میزان غلظت کافئین در ورودی ۳ واحد تصفیه‌خانه در چین به‌طور متوسط بیشتر از ۵۰ میکروگرم بر لیتر بود. وجود مقادیر بالای کافئین به‌احتمال‌زیاد با غلظت آن در چای، قهوه، نوشیدنی‌های بدون الکل و میزان مصرف این محصولات مرتبط است (کورکار[8]، کومارو[9] یوگال[10]، ۲۰۱۹؛ ژو[11] و همکاران، ۲۰۱۰). هورمون‌های استروئیدی و حشره‌کش‌ها در مقایسه با ترکیبات دیگر غلظت‌های کمتری (کمتر از ۱ میکروگرم بر لیتر) را نشان داده‌اند. غلظت اکثر این ریزآلاینده‌ها در خروجی فاضلاب از ۰٫۰۰۱ تا ۱ میکروگرم بر لیتر متغیر گزارش شده است. ترکیباتی که در فاضلاب خام از غلظت بالاتری برخوردار هستند، در پساب نهایی نیز در مقادیر بیشتری‌اندازه‌گیری می‌شوند.

غلظت بعضی ترکیبات نظیر اتانول، کافئین، ایبوپروفن، ناپروکسن، تریکلوسان، DEHP

1. Kasprzyk-Hordern
2. Dinsdale
3. Guwy
4. Santos
5. Aparicio
6. Callejón
7. Alonso
8. Korekar
9. Kumar
10. Ugale
11. Zhou