

## تصفیه پساب کرومی توسط تالاب مصنوعی با بستر سرباره و اثر افزودن زیست جاذب

زهرا ایروانی<sup>۱\*</sup>، مهدی رادفر<sup>۲</sup> و سید حسن طباطبائی<sup>۳</sup>

### چکیده

آلاینده کرومی، یکی از آلاینده‌های پرخطر است که در صورت تخلیه آن به محیط زیست، مخاطرات فراوانی در پی خواهد داشت. یکی از روش‌های تصفیه طبیعی، تالاب مصنوعی است. هدف این پژوهش، طراحی و ساخت تالاب مصنوعی افقی زیرسطحی در مقیاس آزمایشگاهی برای تصفیه آلاینده کرومی با بستر سرباره و گیاه لویی و بررسی تأثیر افزودن زیست جاذب حاصل از ضایعات کشاورزی به سرباره است. به این منظور حوضچه‌هایی با طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۱۵۰، ۵۰ و ۵۰ سانتی‌متر ساخته شد. برای عبور آلاینده از تمام بستر، دو عدد بافل در طول حوضچه‌ها قرار داده شد. از آب آلوده به کروم شش ظرفیتی با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر استفاده شد. در فاز اول پوشال ذرت به‌عنوان زیست جاذب مناسب برای حذف کروم انتخاب شد. در فاز دوم به تأثیر افزودن پوشال ذرت به سرباره پرداخته شد و نتایج نشان داد اگر بستر تالاب فقط از سرباره پر شود، در زمان ماند ۷ روز، راندمان حذف کروم پس از یک هفته، حدود ۸۰ درصد است و پس از ۱۲ هفته، راندمان حذف به کمتر از ۱۰ درصد می‌رسد و تالاب دچار شکست می‌شود؛ اما با افزودن زیست‌جاذب به سرباره با همان زمان ماند، راندمان حذف پس از ۱۲ هفته، بالای ۹۹/۹۷ درصد و غلظت کروم خروجی از تالاب ۰/۰۲ میلی‌گرم بر لیتر است. به علت عملکرد مطلوب تالاب پروژه ادامه داده شد و نتایج نشان داد میزان کارایی تالاب پس از ۷ ماه بالا بوده و راندمان حذف ۹۹/۷ درصد و غلظت کروم خروجی از تالاب ۰/۳۵ میلی‌گرم بر لیتر است. در فاز سوم اثر زمان ماند ۳ روز و ۵ روز بررسی شد و برای زمان ماند ۵ روز، بعد از ۱۲ هفته درصد حذف حدود ۹۹/۹ درصد و غلظت کروم خروجی از تالاب ۰/۱۴ میلی‌گرم بر لیتر و برای زمان ماند ۳ روز، درصد حذف کروم حدود ۸۷ درصد و غلظت کروم خروجی از تالاب ۱۳ میلی‌گرم بر لیتر به دست آمد. نتایج نشان داد که با توجه به غلظت بالای کروم، تالاب‌ها عملکرد خوبی داشته و با افزودن زیست جاذب عملکرد تالاب به صورت چشمگیری افزایش یافت و راندمان حذف کروم و طول عمر تالاب را افزایش و زمان ماند را کاهش داد.

**واژه‌های کلیدی:** تالاب مصنوعی، پساب کرومی صنایع فولاد، سرباره، زیست جاذب، گیاه.

ارجاع: ایروانی ز.، رادفر م. و طباطبائی س. ح. ۱۴۰۲. تصفیه پساب کرومی توسط تالاب مصنوعی با بستر سرباره و اثر افزودن زیست جاذب. مجله پژوهش آب ایران. ۱۳-۲۳. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2023.14196.2482>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

\* نویسنده مسئول: [zahra.iravani@yahoo.com](mailto:zahra.iravani@yahoo.com)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۲۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۰۷

## مقدمه

پساب، از یک سو مهم‌ترین عامل آلودگی آب به‌شمار می‌رود و از سوی دیگر در صورت تصفیه کافی می‌تواند به‌عنوان یکی از منابع جایگزین آب محسوب شود (طباطبائی و همکاران، ۲۰۲۰). یکی از مهم‌ترین صنایع پرمصرف آبی در جهان و ایران، صنایع فولاد است. میزان آب مصرفی در صنایع فولاد کشور در مجموع بالغ بر ۱۶۰ میلیون مترمکعب آب در هر سال است که نسبت به مصرف کل صنایع، رقمی حدود ۱۷ درصد را شامل می‌شود (افخمی و همکاران، ۱۳۹۴). آب مصرفی پس از رفع نیازهای فرایند تولید فولاد، کیفیت اولیه خود را از دست داده و به اصطلاح تبدیل به پساب می‌شود (چانگ و همکاران، ۲۰۱۰). کیفیت پساب‌ها بسته به نوع فرایند متنوع است، اما یکی از خطرناک‌ترین آلاینده‌های حاصل از صنایع فولاد، آلایندگی کرومی است که ناشی از فرایند تولید ورق‌های گالوانیزه است (زوجاجی و همکاران، ۲۰۱۵). کروم همچنین از راه پساب صنایع مختلفی از جمله آبکاری‌ها، دباغی‌ها، رنگریزی‌ها، تولید منسوجات، معدن‌کاری‌ها و صنایع کودسازی وارد منابع آب می‌شود. روش‌های مختلف حذف کروم شامل تصفیه شیمیایی، استخراج با حلال، تبادل یون، جذب، فیلتراسیون غشایی، تکنولوژی‌های تصفیه الکتروشیمیایی، فرایندهای بیولوژیکی و اخیراً روش‌های فتوکاتالیستی هستند. روش‌های بالا معایبی مثل غیراقتصادی بودن، عدم حذف کامل کروم، نیاز به چند مرحله تصفیه یا مواد زائد که نیازمند تصفیه بعدی هستند، را دارند (فو و وانگ، ۲۰۱۰). حد مجاز غلظت کروم براساس استاندارد سازمان بهداشت جهانی برای تخلیه به آب‌های سطحی ۰/۱ و برای آب آشامیدنی ۰/۰۵ میلی‌گرم بر لیتر است (یونس و همکاران، ۲۰۲۲).

یکی از روش‌هایی تصفیه آب، روش تالاب مصنوعی است. مهم‌ترین مزیت تالاب مصنوعی، تصفیه فیزیکی/شیمیایی و بیولوژیکی به‌صورت ترکیبی و هم‌زمان است. از مزایای دیگر آن می‌توان به ارزان بودن برای ساخت و نگهداری، نیازمند به فناوری پایین، انرژی کم، استفاده در مکان‌های مختلف، دوستدار محیط‌زیست، ایجاد فضای سبز زیبا و محل مناسب برای جذب حیات وحش که موجب برقراری یک اکوسیستم پایدار می‌شود، اشاره کرد (هوم و موتگو، ۲۰۱۲). تالاب مصنوعی شامل

حوضچه‌های آب‌بندی‌شده با عناصری از قبیل ماده بستر، گیاه، عایق آب‌بند و قسمت‌های ورودی و خروجی است (استفاناکیس و همکاران، ۲۰۱۴). پساب ورودی به این سیستم به‌واسطه حضور عواملی مثل گیاه، ریزجانداران و ماده بستر تحت تأثیر فرایندهای مختلف فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی قرار گرفته و تصفیه می‌شود. تالاب‌ها از نظر نوع جریان به دو گروه جریان سطحی<sup>۱</sup> و جریان زیرسطحی<sup>۲</sup> تقسیم می‌شوند که هر کدام به سه گروه جریان افقی، جریان عمودی و جریان ترکیبی (هیبریدی) تقسیم‌بندی می‌شوند. تالاب زیرسطحی جریان افقی، به دلیل سهولت در ساخت و کنترل، بیشتر مرسوم است و چون تصفیه در زیر سطح زمین اتفاق می‌افتد، برای شرایط اقلیمی سردسیری مناسب‌تر است (بتول و همکاران، ۲۰۱۹). تالاب مصنوعی برای تصفیه طیف گسترده‌ای از پساب‌ها از جمله پساب معادن (شیریدان و همکاران، ۲۰۱۸)، فاضلاب صنعتی (لو و همکاران، ۲۰۱۹)، رواناب و سیلاب (چوی و همکاران، ۲۰۱۵؛ لی و همکاران، ۲۰۱۷)، فاضلاب خانگی (ماتاموروس و همکاران، ۲۰۱۷)، پساب‌های صنعتی (وایمزال، ۲۰۱۴)، زهکشی کشاورزی (کینکنونیمی و همکاران، ۲۰۱۳) و همچنین شیرابه‌های دفع زباله (بین و همکاران، ۲۰۱۷) استفاده شده است.

از مهم‌ترین مزایای گیاهان در تالاب مصنوعی، انتقال اکسیژن اتمسفر به داخل بستر و تسریع فعالیت ریزجانداران است (شلف و همکاران، ۲۰۱۳). گیاهان با سایه‌اندازی و محدودکردن نفوذ نور آفتاب به تالاب، رشد جلبک‌ها را کنترل می‌کنند. در فصول سرما از یخ‌زدگی جلوگیری کرده و همچنین دارای اثرات زیبایی‌شناختی هستند (تروونگ و همکاران، ۲۰۰۳). این گیاهان باید دارای مقاومت زیاد در تماس با آلاینده، آفات و بیماری‌ها باشند و برای نفوذ در بستر سیستم ریشه‌ای قوی داشته باشند. بومی منطقه بوده یا با آب‌وهوای منطقه سازگاری داشته باشند (گلستانی‌فر و همکاران، ۲۰۱۴). رای و همکاران (۲۰۱۵) گزارش کردند که از بین سه گیاه لویی، نی و تارا (گونه گل‌شیپوریان) کشت‌شده در تالاب مصنوعی برای تصفیه فاضلاب شهری وارده به رودخانه هاریدوار در هند، بیشترین مقدار فاکتور تجمع زیستی

1- Free water surface system

2- Sub surface flow system

داشتن بالاترین راندمان به بارهیدرولیکی کم و زمان ماند طولانی نیاز دارند (کومار و همکاران، ۲۰۱۱). در این پژوهش پیش‌بینی شد با افزودن زیست جاذب حاصل از ضایعات کشاورزی که خود دوست‌دار محیط‌زیست است، راندمان حذف آلاینده افزایش، زمان‌ماند کاهش و فرایند تصفیه در تالاب تسریع شود.

هدف این پژوهش، تصفیه آلاینده کرومی صنایع فولاد اصفهان با بستر سرپاره و گیاه لویی در تالاب مصنوعی و بررسی اثر افزودن زیست جاذب به بستر سرپاره بر افزایش راندمان حذف و کاهش زمان‌ماند هیدرولیکی تالاب است.

### مواد و روش‌ها

برای تهیه آلاینده کرومی از پساب کرومی صنایع فولاد نمونه‌گیری انجام شد و در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه اصفهان مورد آنالیز قرار گرفت که نتایج آن در جدول ۱ آمده است. نتایج این آنالیز نشان داد که در پساب کرومی تنها عنصری که مقدار آن بیش از حد مجاز است، کروم است. پس در این پروژه از آب آلوده کرومی با غلظت حدود ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر استفاده می‌شود. از آنجایی که پساب کارخانه حاوی آلاینده‌های متعددی است و هدف تحقیق فقط بررسی آلاینده کروم بود، اختصاصاً این آلاینده به‌صورت مصنوعی ساخته شد. برای ساخت آلاینده کرومی شش ظرفیتی از پتاسیم‌دی‌کرومات ( $K_2Cr_2O_7$ ) صنعتی با درصد خلوص ۹۹ استفاده شد.

جدول ۱- مقادیر کمتی برخی عناصر در پساب کرومی صنایع

فولاد					
عناصر	مقدار (mg/L)	حد مجاز (mg/L)	عناصر	مقدار (mg/L)	حد مجاز (mg/L)
Ca	۴/۷۷۱	۷۵	Cu	۰/۰۳۳	۱
Co	۰/۰۲۶	۱	Fe	۰/۰۲۸	۳
K	۰/۱۰۲	۱۲	Mg	۰/۱۰۹	۱۰۰
Mn	۰/۲۳۰	۱	Na	۳۸/۸۶	۲۰۰
Ni	۰/۴۳۰	۲	Al	۰/۱۸۸	۵

\* راهنمای طبقه‌بندی کیفیت آب خام، پساب‌ها و آب‌های برگشتی برای مصارف صنعتی و تفریحی. نشریه شماره ۴۶۲.

(BCF) و فاکتور انتقال (TF) در تابستان و برای گیاه لویی است. بستر تالاب، عامل اصلی رشد گیاه و فیلم میکروبی است و اثر قطعی بر فرایندهای هیدرولیکی و بیولوژیکی دارد. عواملی از قبیل قطر ذرات خاک، تخلخل، اندازه مؤثر ذرات، درجه دانه‌بندی و ضریب هدایت هیدرولیکی، فاکتورهای مؤثر بر راندمان حذف آلاینده‌ها هستند (استوت مایستر و همکاران، ۲۰۰۳). بسترها نقش فیلتراسیون، جذب، رسوب، کلوخی‌شدن، ترسیب<sup>۱</sup> و تبادل یونی را بازی می‌کنند. با استفاده از انواع مواد متخلخل همچون شن، ماسه، سرپاره خُرده‌های آجر، بیوجار، زئولیت، پوکه معدنی و پرلیت، لاستیک، پلاستیک، فوم پلی‌استر و... پر می‌شود. پارک و همکاران (۲۰۱۷) بیان کردند که سرپاره<sup>۲</sup> جاذب خوبی برای فسفات است و با کاهش اندازه ذرات، میزان حذف فسفات افزایش می‌یابد. آن‌ها با افزودن سرپاره به تالاب ساخته‌شده با بستر شن و ماسه، به این نتیجه رسیدند که افزودن حدود ۲۵ درصد سرپاره به شن و ماسه درشت می‌تواند طول عمر تالاب ساخته‌شده را از ۲۹۲ روز به ۱۳۴۹ روز افزایش دهد. تی و همکاران (۲۰۱۵) به مقایسه بین تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی بافل‌دار و متعارف پرداختند و گزارش کردند که تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی بافل‌دار در مقایسه با متعارف عملکرد بسیار بالاتری دارد. در این مطالعه، راندمان حذف رنگ در تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی بافل‌دار به ترتیب ۶۹، ۸۸ و ۱۰۰ درصد و تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی متعارف به ترتیب برابر با ۳۰، ۴۶ و ۷۳ درصد بود. در مطالعات انجام‌شده، سرپاره به‌عنوان جاذب موفق در حذف آمونیوم، آلاینده‌های آلی و فلزات سنگینی مانند مس، آرسنیک، سرب، منگنز، کروم، نیکل، روی و... گزارش شده است (بتول و زیشان، ۲۰۱۷). راندمان تصفیه در تالاب مصنوعی بستگی به جنس بستر، نوع و طراحی تالاب، زمان‌ماند پساب، میزان بار هیدرولیکی، فعالیت ریزجاندارها، نوع گیاه و شرایط اقلیمی دارد. در این تحقیق از سرپاره صنایع فولاد در بستر تالاب مصنوعی استفاده شد. همچنین برای نوآوری در این پژوهش به ارزیابی اثر زیست جاذب‌های اضافه‌شده به بستر سرپاره پرداخته شد. تالاب‌های ساخته‌شده به دست بشر برای

1- Precipitation

2- Slag



شکل ۲- حوضچه ساخته شده



شکل ۳- لوله در خروجی تالاب

گیاه تالاب مصنوعی: گیاه انتخابی لویی بود که با اقلیم اصفهان سازگار بوده و همهٔ خصوصیات برای استفاده در تالاب را دارا است. گیاه منتخب از زیستگاه طبیعی واقع در حاشیهٔ رودخانه در باغ بهادران استخراج و حدود یک ماه با آب معمولی آبیاری شد تا سیستم ریشه شروع به پنجه‌زنی کند. سپس گیاهان لویی در حوضچه‌ها به صورت دستی و با تراکم ۲۵ بوته در مترمربع کشت شد. بستر اصلی تالاب مصنوعی: برای بستر تالاب سربراره محصول شرکت صنایع فولاد که به هنگام تولید آهن در کورهٔ بلند از ناخالصی‌های موجود در سنگ آهن به وجود می‌آید، استفاده شد. سربراره ترکیبی از سیلیکات و اکسیدهای فلزی پیچیده است که پس از سرد شدن مواد ناخالص، باقی می‌ماند. یکی از کاربردهای سربراره، استفادهٔ آن به عنوان جاذب در حذف آلاینده‌های متفاوت محیط‌زیست است. ساکی و همکاران (۲۰۱۴) بیان کردند که در شرایط بهینه، سربراره صنایع فولاد با قطر ذرات حدود ۰/۵ میلی‌متر قابلیت جذب یون کروم از محلول‌های آبی با غلظت (mg/lit) ۲۵، مقدار جاذب ۳ گرم و زمان تماس ۶۰ دقیقه را تا حدود ۹۶ درصد دارا است و سربراره برای حذف آلایندهٔ کرومی، یک جاذب مناسب بوده است. برای این تحقیق سربراره از نوع بادامی با دانه‌بندی ۱۰ تا ۲۰ میلی‌متر انتخاب شد که در جدول ۲ برخی نتایج آنالیز شیمیایی آن آورده شده است.

بستر بهبودیافته با زیست جاذب: در این پژوهش برای انتخاب بهترین زیست جاذب، ابتدا ضایعات کشاورزی تهیه و برای رسیدن به اندازهٔ ذرات ۱۰ تا ۲۰ میلی‌متر (سایز استفاده‌شده در تالاب) با آسیاب خرد شدند. سپس ۱۰۰ میلی‌لیتر از غلظت‌های (mg/lit) ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ کروم (VI) که از پودر دی‌کرومات پتاسیم تهیه شده بود، در داخل یک بشر ۲۵۰ میلی‌لیتری ریخته و مقدار

برای تعیین مساحت مورد نیاز برای تالاب‌های مصنوعی، معادلات مختلفی ارائه شده است. در این پژوهش از معادلهٔ Wood (۱۹۹۰) به صورت زیر استفاده شد.

$$A = \frac{Q_a(Ln C_0 - Ln C_t)}{K} \quad (1)$$

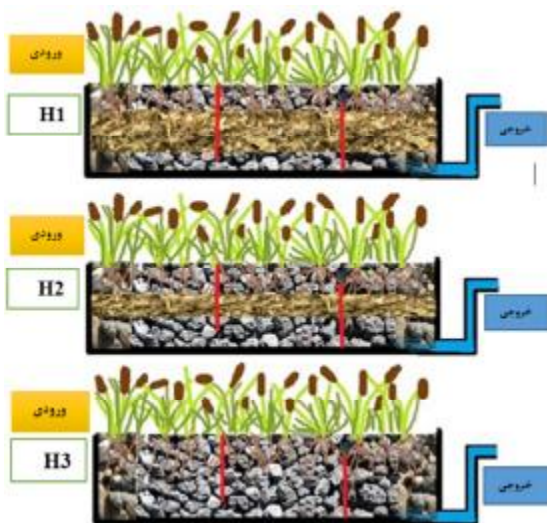
$C_0$  غلظت آلایندهٔ ورودی به تالاب برحسب میلی‌گرم بر لیتر،  $C_t$  غلظت آلایندهٔ خروجی از تالاب برحسب میلی‌گرم بر لیتر،  $K$  ضریب ثابت حذف آلاینده بر حسب  $(\frac{1}{day})$  است که توسط wood برای آلایندهٔ صنعتی  $(d^{-1})$  ۰/۱۹۸ پیشنهاد شده است.  $Q_d$  متوسط دبی ورودی و خروجی  $(\frac{m^3}{day})$  است. با استفاده از معادلهٔ بالا و با فرض غلظت اولیهٔ کروم (mg/lit) ۱۰۰ و غلظت جریان خروجی (mg/lit) ۱ و دبی متوسط (lit/day) ۳۰ سطح لازم هر حوضچهٔ تالاب حدود ۰/۷۵ متر مربع به دست آمد و با توجه به معیارهای طراحی نسبت طول به عرض ۱:۳، طول و عرض و ارتفاع به ترتیب ۱۵۰، ۵۰ و ۵۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد (آلنده و همکاران، ۲۰۱۴).

طراحی پایلوت تالاب مصنوعی: سه حوضچه به نام‌های H1، H2 و H3 با طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۱۵۰، ۵۰ و ۵۰ سانتی‌متر ساخته شد. هر سه حوضچه از نظر ساخت و اجرا مشابه بودند. بدنه‌سازی آن‌ها با استفاده از بلوک سیمانی و آجر انجام گرفت. به منظور عایق‌بندی و آب‌بندی مطابق با شکل ۱ و ۲ تمام کف و بدنه ایزوگام شد. برای اطمینان از عبور آلاینده از تمام بستر دو عدد بافل در طول حوضچه‌ها قرار داده شد. بافل‌ها مطابق با شکل ۲ شامل سرریزهای مستطیلی به ارتفاع ۱۰ و عرض ۴۰ سانتی‌متر از جنس سرامیک هستند که یکی به سمت بالا و دیگری به سمت پایین و با فاصلهٔ ۵۰ سانتی‌متر نسبت به یکدیگر در حوضچه‌ها کار گذاشته شده‌اند. برای جلوگیری از گرفتگی خروجی حوضچه‌ها مطابق با شکل ۳، یک زهکش عرضی از نیم لولهٔ پلی‌اتیلن به قطر ۶۳ میلی‌متر تعبیه شد.



شکل ۱- نمای شماتیک تالاب مصنوعی

جدول ۲- آنالیز شیمیایی سرباره صنایع فولاد		
مقادیر اکسید	نماد	درصد
اکسید آلومینیوم	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۹-۳
اکسید منیزیم	MgO	۱/۵-۱/۸
سولفور	S	۰/۱-۰/۱۵
اکسید سدیم	Na <sub>2</sub> O	۱/۷۷-۲/۵
اکسید منگنز	MnO	۴/۴-۵
مجموع آهن	Fe	۱۵/۵-۱۷/۷
اکسید آهن	FeO	۱۲/۲-۱۳/۶
اکسید آهن	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱۱/۲۵-۱۵/۵
اکسید کلسیم	CaO	۲۷/۶-۵۲/۵
سیلیسیوم	Si	۹/۳۷-۱۹/۹



شکل ۴- پلان کلی تالاب مصنوعی زیرسطحی H1, H2, H3

پس از پر شدن حوضچه‌ها، گیاه لویی در داخل بستر مستقر و آلایندۀ کرومی از طریق قطره‌چکان‌های تعبیه‌شده روی مخزن، وارد حوضچه‌ها شده و پس از طی مسیر، از قسمت خروجی که در قسمت پایین و وسط تالاب قرار داشت، جمع‌آوری شد. نمونه‌برداری‌ها از قسمت خروجی سیستم برداشت و برای آنالیز کیفی به آزمایشگاه منتقل و غلظت کروم خروجی توسط دستگاه ICP اندازه‌گیری و درصد حذف آلایندۀ از معادله (۲) محاسبه شد. نمونه‌گیری برای سه تالاب به‌صورت مجزا، به مدت ۷ ماه انجام گرفت. تخلخل سرباره ۴۷ درصد و تخلخل زیست جاذب ۴۳ درصد به‌دست آمد. برای محاسبۀ دبی ورودی به هر تالاب از میانگین‌گیری وزنی، تخلخل کل به‌دست آمد و سپس با استفاده از معادله (۵) و زمان ماند ۷ روز، دبی حجمی یک شبانه‌روز برای تالاب H1، H2 و

۰/۱ گرم از جاذب‌های مذکور به آن اضافه و سپس روی شیکر با سرعت ۱۵۰ دوربردقیقه هم‌زده‌شد. بعد از سپری‌شدن ۲۴ ساعت، برای جداکردن فاز جامد از محلول شفاف، نمونه‌ها از کاغذ صافی عبور داده شدند و غلظت باقی‌ماندهٔ کروم، توسط دستگاه طیف‌سنج پلاسماي جفت‌شدهٔ القایی (ICP<sup>۱</sup>) اندازه‌گیری و درصد حذف آلایندۀ از معادله (۲) محاسبه شد که در آن C<sub>0</sub> غلظت اولیهٔ محلول کروم قبل از ورود به تالاب بر حسب mg/lit، C غلظت ثانویهٔ محلول کروم بعد از خروج از تالاب بر حسب mg/lit و E درصد حذف آلایندۀ است. ظرفیت جذب با استفاده از معادله (۳) و (۴) محاسبه شد که در آن n, K<sub>F</sub>: ثابت یا ضریب فرندلیچ، K<sub>L</sub>: ثابت تعادلی یا ضریب لانگمویر بر حسب C<sub>e</sub>, lit/mg: غلظت تعادلی مادهٔ جذب‌شده در محلول بعد از جذب سطحی بر حسب q<sub>e</sub>, mg/lit: مقدار مادهٔ جذب‌شونده روی جاذب در حالت تعادل بر حسب mg/kg و q<sub>m</sub>: ظرفیت جذب اشباع یک لایه بر حسب mg/g است.

$$E = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100 \quad (2)$$

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (3)$$

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_L q_m} + \frac{C_e}{q_m} \quad (4)$$

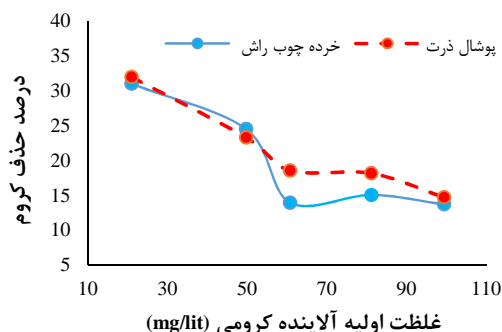
ترکیب مناسب بستر کمکی با بستر اصلی: برای مقایسه و انتخاب بهترین درصد ترکیب بستر کمکی با بستر سرباره مطابق با شکل ۴، سه حوضچه با طول، عرض و ارتفاع به‌ترتیب ۱۵۰، ۵۰ و ۵۰ سانتی‌متر ساخته شد که اجزای هرکدام به شرح زیر است:

تالاب H1: ۱۵ سانتی‌متر بالا و پایین حوضچه از سرباره از نوع بادامی با دانه‌بندی ۱۰ تا ۲۰ میلی‌متر پر و ۲۰ سانتی‌متر وسط از زیست‌جاذب منتخب با قطر ذرات ۱۰ تا ۲۰ میلی‌متر پر شد.

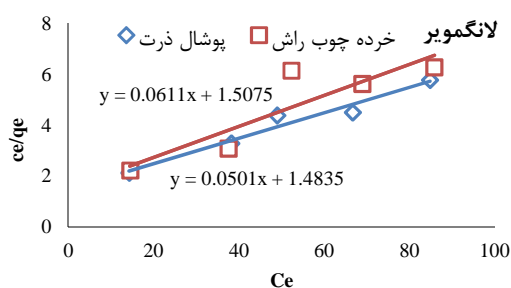
تالاب H2: ۲۰ سانتی‌متر بالا و پایین حوضچه از سرباره از نوع بادامی با دانه‌بندی ۱۰ تا ۲۰ میلی‌متر پر و ۱۰ سانتی‌متر وسط از زیست‌جاذب منتخب با قطر ذرات ۱۰ تا ۲۰ میلی‌متر پر شد.

تالاب H3: کل ارتفاع (۵۰ سانتی‌متر) حوضچه از سرباره از نوع بادامی با دانه‌بندی ۱۰ تا ۲۰ میلی‌متر پر شد.

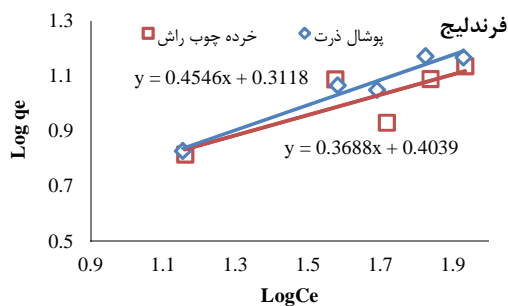
جذب بالاتری نسبت به خُرده‌چوب راش است؛ بنابراین از پوشال ذرت به‌عنوان زیست جاذب در بستر تالاب استفاده شد.



شکل ۵- نمودار راندمان حذف خُرده‌چوب راش و پوشال ذرت



شکل ۶- نمودار لانگمویر خُرده‌چوب راش و پوشال ذرت



شکل ۷- نمودار فرندلیج خُرده‌چوب راش و پوشال ذرت

جدول ۳- پارامترهای مدل لانگمویر و فرندلیج

پارامتر	پوشال ذرت	خُرده‌چوب راش
فرندلیج		
$K_F$	۲	۲/۷۷
$n$	۲/۲	۲/۷
$R^2$	۰/۹۳۵	۰/۸
لانگمویر		
$(lit/mg) K_L$	۰/۰۳۳	۰/۰۴
$(mg/gr) q_m$	۲۰	۱۶/۷
$R^2$	۰/۹۳	۰/۸

H3 دبی به‌ترتیب ۲۴/۳، ۲۴/۷ و ۲۵/۱ لیتر بر شبانه‌روز به‌دست آمد و برای راحتی کار برای هر سه تالاب دبی ۲۵ لیتر در شبانه‌روز در نظر گرفته و با تنظیم شیرهای تعبیه‌شده در ورودی، اعمال شد.

$$t = \frac{LWyn}{Q} \quad (۵)$$

در معادله (۵)،  $t$ : زمان ماند برحسب روز،  $L$ : طول حوضچه بر حسب متر،  $W$ : عرض حوضچه بر حسب متر،  $y$ : عمق حوضچه بر حسب متر،  $n$ : تخلخل کل بستر و  $Q$ : دبی ورودی برحسب مترمکعب بر روز است.

زمان‌ماند: از بین سه تالاب H1، H2 و H3 تالابی با بهترین عملکرد حذف کروم انتخاب و طبق همان بستر، سه تالاب دیگر به‌نام‌های H4 با زمان ماند ۳ روز، H5 با زمان ماند ۵ روز و H6 با زمان ماند ۷ روز طراحی شد و نمونه‌گیری برای هر تالاب به‌صورت مجزا، هر ۱۴ روز یک مرتبه و در یک تکرار از انتها به‌مدت ۳ ماه انجام گرفت. با توجه به اینکه حجم و تخلخل هر سه تالاب مصنوعی ثابت است، تغییر زمان‌ماند هر سامانه با تغییر دبی جریان ورودی امکان‌پذیر است.

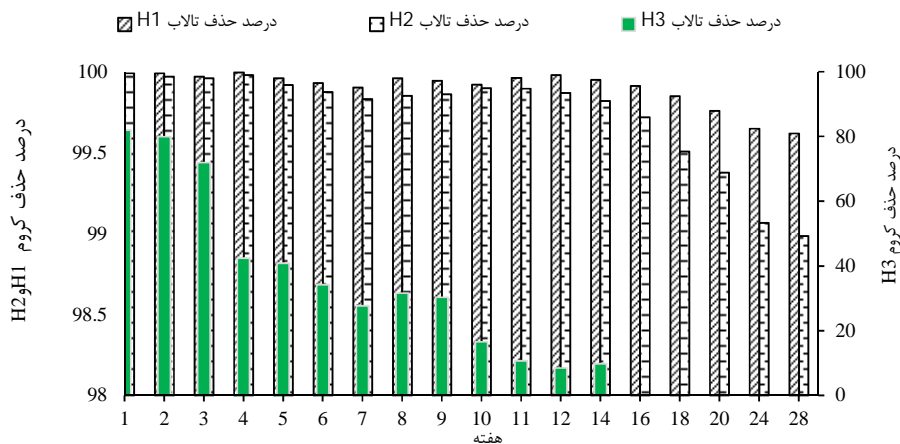
### نتایج و بحث

جذب مواد زیست جاذب و ایزوترم: شکل ۵، نمودار درصد حذف کروم برای پوشال ذرت و خُرده‌چوب راش را نشان می‌دهد. نتایج اولیه نشان‌داد که پوشال ذرت و خُرده‌چوب راش عملکرد بهتری در حذف کروم داشتند. نتایج حذف کروم با این دو زیست جاذب در مدل‌های جذب ایزوترم فرندلیج<sup>۱</sup> (معادله (۳)) و لانگمویر<sup>۲</sup> (معادله (۴)) برازش داده شد (شکل ۷ و ۶) و حداکثر ظرفیت جاذب با مدل لانگمویر محاسبه شد که نتایج در جدول ۳ آمده است. مقایسهٔ مقادیر  $R^2$  در بین دو مدل نشان می‌دهد که مدل فرندلیج، در برآورد مقادیر جذب کروم برای جاذب‌های پوشال ذرت و خُرده‌چوب راش، از عملکرد بهتری برخوردار است. آذری و همکاران (۱۳۹۳) نشان داد که فرایند جذب کروم از مدل فرندلیج تبعیت می‌کند. آنالیز آماری انجام‌شده توسط نرم‌افزار SPSS نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین نتایج به‌دست‌آمده از درصد حذف کروم توسط پوشال ذرت و خُرده‌چوب راش در سطح ۵ درصد وجود ندارد؛ اما پوشال ذرت دارای حداکثر ظرفیت

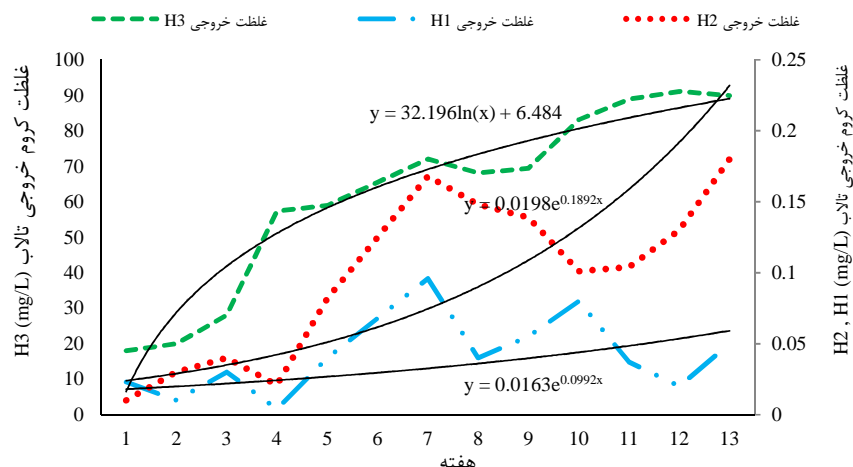
1- Freundlich  
2- Langmuir

ظرفیت جذب از مدل لانگمویر برای پوشال ذرت ۲۰ میلی‌گرم بر گرم پوشال ذرت است و با توجه به مقادیر بالای پوشال ذرت در داخل تالاب، سطح تماس زیست‌جاذب با آلاینده افزایش و در نتیجه میزان حذف کروم افزایش می‌یابد. تالاب H1 که دارای زیست‌جاذب بیشتری نسبت به تالاب H2 است، عملکرد بهتری از خود نشان داده است. خشتی و همکاران (۲۰۱۹) به نتایج مشابهی رسیدند و دریافتند با افزایش مقدار جاذب، مقدار راندمان حذف افزایش می‌یابد. آنها افزایش مکان‌های جذب و دسترسی بیشتر آلاینده به مکان‌های جذب را عامل افزایش راندمان دانستند. قابل ذکر است که در تالاب H1 و H2 به دلیل حضور زیست‌جاذب (پوشال ذرت) که زباله آلی و فاسدشدنی است پس از سه هفته در تالاب لارو پشه مشاهده شد که این میزان بعد از حدود یک ماه به بیشترین مقدار خود یعنی حدود ۱۰ لاور در مساحت ۲۵ سانتی‌متر مربع رسید. این سیکل چرخشی با دوره بازگشت ۴۰ روز در طول دوره پروژه، تکرار شد؛ اما در تالاب H3 که در بستر خود ماده فاسدشدنی نداشت، لارو پشه مشاهده نشد. گیاه لویی کشت‌شده در تالاب H2 و H1 نسبت به تالاب H3 طول عمر و رشد بیشتری داشت. غلظت خروجی آلاینده کرومی تالاب H3 پس از ۲ ماه به مقدار حدود (mg/lit) ۷۰ رسید و غلظت بالا باعث کاهش رشد گیاه شد؛ اما در تالاب H1 و H2 گیاه لویی رشد خوبی داشت و پس از دو ماه ارتفاع گیاه از ۲۵ تا ۳۵ سانتی‌متر به ۵۰ تا ۷۵ سانتی‌متر رسید و تعداد آن از طریق پاچوش حدود دو برابر شد. در ماه مرداد، به دلیل گرما گیاه شادابی خود را از دست داد و در شهریور دوباره رشد کرد و در آخر پروژه همچنان شادابی خود را حفظ کرده بود. حد مجاز غلظت کروم براساس استاندارد سازمان بهداشت جهانی برای تخلیه به آب‌های سطحی ۰/۱ و برای آب آشامیدنی ۰/۰۵ (mg/lit) است که با توجه به شکل ۹ غلظت کروم خروجی تالاب H1 تا هفته ۱۶ و تالاب H2 تا هفته ۵ زیر حد مجاز برای تخلیه به آب‌های سطحی است و تالاب H1 عملکرد بهتری از خود نشان داده است؛ بنابراین برای ادامه پروژه و بررسی اثر زمان‌ماند روی تالاب‌ها از بستر تالاب H1 استفاده شد.

نتایج ترکیب بستر کمکی با بستر اصلی: تالاب‌های مصنوعی افقی زیرسطحی از ۱۰ فرودین سال ۱۴۰۱ شروع به کار کردند و نمونه‌گیری تا ۲۰ خرداد سال ۱۴۰۱ به صورت هفتگی و به مدت ۱۰ هفته انجام گرفت. در ادامه به دلیل محدودیت هزینه، نمونه‌گیری با فواصل زمانی بیشتر انجام شد و در ۲۲ مهر ۱۴۰۱، پس از ۲۸ هفته پروژه به پایان رسید. مطابق با آنچه گفته شد، آلاینده با غلظت ورودی ثابت و برابر با ۱۰۰ mg/lit به تالاب‌ها وارد و پس از طی مسیر، از خروجی تالاب‌ها نمونه‌گیری شد و راندمان حذف از معادله (۱) به دست آمد. نمودار راندمان حذف تالاب‌های مصنوعی H1، H2 و H3 برحسب هفته در شکل ۸ و نمودار غلظت خروجی کروم از تالاب‌های مصنوعی H1، H2 و H3 در شکل ۹ رسم شد. میزان حذف کروم تالاب H3 که بستر آن فاقد زیست‌جاذب بود، از ۸۲ درصد شروع و با گذشت زمان میزان قابل توجهی از میزان حذف کاهش یافت تا در هفته ۱۴ میزان حذف به کمتر از ۱۰ درصد رسید و عملاً تالاب دچار شکست شد و از آن زمان به بعد، نمونه‌گیری انجام نشد. جذب آلاینده روی سطح جاذب عموماً از طریق مراحل زیر صورت می‌گیرد: (۱) انتقال جذب‌شونده از توده محلول به سطح خارجی جاذب، (۲) اثرات متقابل با اتم‌های سطحی جاذب که منجر به جذب شیمیایی (تعامل قوی جاذب-جذب‌شونده معادل با تشکیل پیوند کووالانسی) یا جذب ضعیف (تعامل ضعیف جاذب-جذب‌شونده معادل با مشابه نیروهای واندروالس) می‌شود. درباره جاذب‌های متخلخل مشابه سرباره، آلاینده کرومی پس از عبور از سطح خارجی جاذب، به آهستگی به داخل خلل و فرج پخش و جذب می‌شود. در ابتدا شروع کار تالاب، سطح موجود و مکان‌ها جذب خالی بوده و این مکان‌ها برای جاذب تبدالی در اختیار آلاینده کروم است؛ اما با گذشت زمان و پر شدن منافذ بستر و اشباع شدن آن‌ها، تعداد مکان‌های جذب کاهش می‌یابد، پس غلظت خروجی افزایش و درصد حذف کاهش می‌شود. مطابق با شکل ۸، اضافه شدن زیست‌جاذب در بستر سرباره عملکرد بسیار خوبی داشته و با وجود زیست‌جاذب در تالاب H1 و H2 درصد حذف تالاب بعد از ماه هفتم بیش از ۹۹ درصد است. نتایج آزمایش پیمان‌های نشان داد حداکثر



شکل ۸- نمودار درصد حذف H1, H2, H3



شکل ۹- نمودار غلظت خروجی کروم H1, H2, H3

دبی ورودی به هر تالاب از معادلهٔ (۵) محاسبه شد. حجم آلایندهٔ ورودی در یک شبانه‌روز برای تالاب H4, H5 و H6 به ترتیب حدود ۶۰، ۳۵ و ۲۵ لیتر در نظر گرفته شد. تالاب‌های جدید از ۱ مرداد ۱۴۰۱ شروع به کار کردند و پس از ۱۲ هفته، در ۲۲ مهر ۱۴۰۱ متوقف شدند. نمونه‌برداری هر دو هفته یکبار انجام شد که نتایج آن در جدول ۵ و شکل ۱۰ آمده است.

نتایج نشان داد که هرچه زمان ماند بزرگ‌تر باشد، راندمان حذف کروم بیشتر خواهد شد و در تالاب H6 پس از سه ماه غلظت کروم خروجی کمتر از حد مجاز برای شرب است. در تالاب H5 غلظت کروم خروجی کمتر از حد مجاز برای تخلیه به آب‌های سطحی است و در تالاب H4 که زمان ماند ۳ روز بود، عملکرد تالاب نسبت به دو تالاب دیگر کمتر است و از هفتهٔ هشتم به بعد، راندمان حذف با

مقایسهٔ آماری بین تالاب‌ها با برنامه SPSS انجام شد. براساس جدول ۴، سطح معناداری مقایسهٔ تالاب H1 با H2 برابر با ۰/۰۲۹ (P < ۰/۰۵) گزارش شده است؛ بنابراین در سطح خطای ۵ درصد می‌توان نتیجه گرفت تفاوت معناداری بین میانگین تالاب H1 با H2 وجود دارد. همچنین مقایسهٔ آماری بین دو تالاب H2 و H3 نشان داد بین تالاب بدون زیست جاذب با تالاب دارای زیست جاذب در سطح خطای ۵ درصد تفاوت معناداری وجود دارد.

نتایج زمان‌ماند: تالاب مصنوعی برای داشتن بالاترین و بهترین راندمان به بار هیدرولیکی کم و زمان‌ماند طولانی نیاز دارد (کومار و همکاران، ۲۰۱۱). برای بررسی زمان‌ماند، سه تالاب به نام‌های H4 با زمان‌ماند ۳ روز، H5 با زمان‌ماند ۵ روز و H6 با زمان‌ماند ۷ روز طراحی شد و



( $P > 0.05$ ) گزارش شده است و اختلاف معناداری بین این دو تالاب وجود ندارد.

جدول ۶- آنالیز آماری مربوط به زمان ماند در تالابها

Independent-Samples Kruskal-Wallis Test Summary			
تالاب	تعداد	میانگین	آماره آزمون
H4	۶	۹۶/۶۳	۸/۵
H5	۶	۹۹/۹۴	۰/۱۳۲
H5	۶	۹۹/۹۴	۰/۹۷۳
H6	۶	۹۹/۹۶	۵۰

### نتیجه گیری

نتایج نشان داد که با توجه به غلظت بالای کروم ورودی تمام تالابها عملکرد خوبی در حذف کروم داشتند؛ اما تالاب H1 و H2 عملکرد بهتری نسبت به H3 نشان دادند. این مساله بدان معنا است که با اضافه شدن زیست جاذب پوشال ذرت به بستر سرپاره، می توان راندمان حذف را به بالای ۹۹/۹۹ درصد رساند و طول عمر تالاب را به بیش از ۳ ماه افزایش داد. پوشال ذرت به دلیل داشتن منابع سلولزی و لینگین، در هنگام تجزیه شدن محیطی مناسب برای تشکیل لایه بیولوژیکی ایجاد کرد؛ به گونه ای که ریزجاندار برای تجزیه در تالاب مشاهده شد. این مساله به حذف کروم از طریق بیولوژیکی کمک کرده و عملکرد تالاب مصنوعی را افزایش داد. فاسد شدن و وجود ریزجاندارها مانند کود برای گیاه لویی عمل کرد. چون تالابها فاقد هر نوع خاک بودند و گیاه در سرپاره کشت شد، فاسد شدن پوشال ذرت و وجود ریزجاندارها نقش مهمی در تامین ماده غذایی مورد نیاز لویی در نتیجه رشد لویی داشت.

### سپاسگزاری

مقاله حاضر، بخشی از رساله دکترای مهندسی منابع آب دانشگاه شهرکرد است. نویسندگان بر خود لازم می دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از این دانشگاه و شرکت صنایع فولاد اصفهان به عمل آورند.

### منابع

- افخمی ر. فروتن ف. سعادت ا. و میرمحمد صادقی ح. ۱۳۹۴. بررسی فاضلاب های صنعتی در صنایع فولاد. همایش ملی مصرف بهینه آب در صنعت چالش ها و راهکارها، اصفهان.

شیب تند رو به کاهش است و غلظت خروجی طی ۴ هفته از ۱ به ۱۳ میلی گرم در لیتر کاهش می یابد. مقایسه سه تالاب H4، H5 و H6 نشان می دهد که اختلاف زیادی بین دو تالاب H5 و H6 وجود ندارد؛ اما تالاب H4 با دو تالاب دیگر اختلاف دارد و پیشنهاد نمی شود.

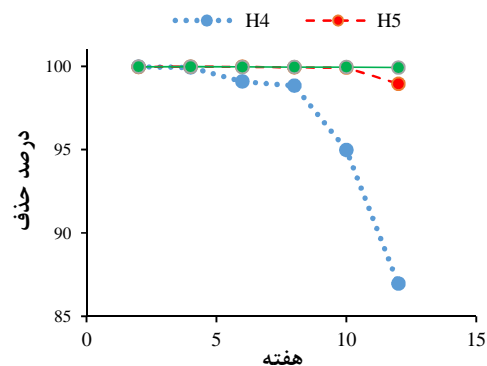
جدول ۴- مقایسه آماری بین تالابها

Independent-Samples Kruskal-Wallis Test Summary				
تالاب	تعداد	میانگین	آماره آزمون	سطح معناداری
H1	۱۷	۹۹/۹۲	۸۱/۵	*.۰۰۲۹
H2	۱۷	۹۹/۷۹		
H3	۱۴	۳۶/۲۹		*.۰۰۰۰
H2	۱۷	۹۹/۷۹		

جدول ۵- غلظت خروجی کروم H6، H5، H4

هفته	غلظت خروجی H4	غلظت خروجی H5	غلظت خروجی H6
۲	۰/۰۲	۰/۰۳۳	۰/۰۱۹
۴	۰/۰۶	۰/۰۱۶	۰/۰۱
۶	۰/۰۹	۰/۰۳۳	۰/۰۳
۸	۱/۱۶	۰/۰۶	۰/۰۴
۱۰	۵	۰/۰۸	۰/۰۴
۱۲	۱۳	۰/۱۴	۰/۰۷

غلظت ورودی به همه تالابها ۹۹/۶ (mg/lit)  
همه غلظت ها برحسب (mg/lit)



شکل ۱۰- نمودار راندمان حذف کروم H6، H5، H4

مقایسه آماری برای تالاب H4، H5 و H6 انجام گرفت و براساس جدول ۶، سطح معناداری مقایسه تالاب H4 با H5 برابر با ۰/۶۶۷ ( $P > 0.05$ ) گزارش شده است؛ بنابراین در سطح خطای ۵ درصد می توان نتیجه گرفت تفاوت معناداری بین میانگین تالاب H4 با H5 وجود ندارد. سطح معناداری مقایسه تالاب H5 با H6 برابر با ۰/۶۶۷

- wetland Jomo Kenyatta University of Agriculture and Technology Nairobi Kenya.
12. Kheshti Z. Ghajar K. A. Altaee A. and Kheshti M. R. 2019. High-Gradient Magnetic Separator (HGMS) combined with adsorption for nitrate removal from aqueous solution. *Separation and Purification Technology*. 212: 650-659.
  13. Kumar Choudhary A. Kumar S. and Sharma C. 2011. Constructed wetlands: an approach for wastewater treatment. *Elixir Pollution*. 37: 3666-3672.
  14. Kynkäänniemi P. Ulén B. Torstensson G. and Tonderski K. S. 2013. Phosphorus retention in a newly constructed wetland receiving agricultural tile drainage water. *J. Environ.*
  15. Li Y. C. Zhang D. Q. and Wang M. 2017. Performance evaluation of a full-scale constructed.
  16. Lu H. Li J. Liu X. and Yu Zh. 2019. Removal of Fluoride and Arsenic by a Hybrid Constructed Wetland System Chem. *Biodiversity* 16 e1900078.
  17. Matamoros V. Rodríguez Y. and Bayona J. M. 2017. Mitigation of emerging contaminants by full-scale horizontal flow constructed wetlands fed with secondary treated wastewater. *Ecol. Eng.* 99: 222-227.
  18. Park J. H. Wang J. J. Kim S. H. Cho J. S. and Kang S. W. 2017. Phosphate removal in constructed wetland with rapid cooled basic oxygen furnace slag. *Chemical Engineering Journal Qual.* 42: 596-605.
  19. Rai U. N. Upadhyay A. K. Singh N. K. Dwivedi S. and Tripathi R. D. 2015. Seasonal applicability of horizontal sub-surface flow constructed wetland for trace elements and nutrient removal from urban wastes to conserve Ganga River water quality at Haridwar India. *Ecol. Eng.* 81: 115-122.
  20. Shelef O. Gross A. and Rachmilevitch S. 2013. Role of Plants in a Constructed Wetland: Current and New Perspectives. *Water*. 5: 405-419.
  21. Sheridan C. Akcil A. Kappelmeyer U. and Moodley I. 2018. A review on the use of constructed wetlands for the treatment of acid mine drainage. *Constructed Wetlands for Industrial Wastewater Treatment*. 249-262.
  22. Stefanakis A. I. Akratos C. S. and Tsihrintzis V. A. 2014. Vertical Flow Constructed Wetlands: Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment (1st ed.). Amsterdam. The Netherlands: Elsevier Publishing.
  23. Stottmeister U. Wießner A. Kusch P. Kappelmeyer U. Kaßner M. Bederski O. ۲. آذری ع. غلامی م. مختاری م. کاکاوندی ب. احمدی ا. و ستاری تبریزی م. ۱۳۹۳. حذف کروم شش ظرفیتی از محیط آبی با استفاده از کربن فعال مغناطیسی شده با نانو ذرات آهن صفر (CMFe<sub>0</sub>): مطالعه سینتیک، ایزوترم و ترمودینامیک. بهداشت و توسعه، ۳(۱): ۱۴-۲۷.
  ۳. ساکی پ. مافی غلامی ر. تکدستان ا. و خوشخو ا. ۱۳۹۲. جذب کروم از محلول‌های آبی توسط سرپاره صنایع فولاد: مدل‌سازی ایزوترم و سینتیک جذب. طلوع بهداشت. ۱۲(۴): ۵۱-۶۰.
  ۴. گلستانی فر ح. ملایی ج. و ناصرین م. ۱۳۹۳. نقش تالاب‌ها در تصفیه فاضلاب شهری و صنعتی (طراحی، بهره‌برداری). نشر دانشگاهی فرهنگم. تهران. ۱۷۱ ص.
  5. Allende K. L. Mccarthy D. and Fletcher T. 2014. The influence of media type on removal of arsenic, iron and boron from acidic wastewater in horizontal flow wetland microcosms planted with *Phragmites australis*. *Chemical Engineering Journal*. 246: 217-228.
  6. Batool A. Tawfik A. and Saleh B. 2019. Removal of toxic metals from wastewater in constructed wetlands as a green technology. catalyst role of substrates and chelators. *Ecotoxicology and Environmental Safety*.
  7. Batool A. and Zeshan. 2017. Effect of chelators and substrates on phytoremediation of synthetic leachate for removal of trace elements. soil and sediment contamination: an international journal. *Taylor & Francis*. 26: 220-233.
  8. Choi J. Geronimo F. K. F. Maniquiz-Redillas M. C. Kang M. J. and Kim L. H. 2015. Evaluation of a hybrid constructed wetland system for treating urban stormwater runoff. *Desalin. Water Treat.* 53 3104-3110.
  9. Chung J. Junbeum K. Youngnoh K. and Hwang Y. 2010. Assessment and selection of best available technology (BAT). *Resources Conservation and Recycling*. 70: 32-37.
  10. Fu F. and Wang Q. 2010. Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *journal of Environmental Management*. 92: 407418
  11. Home P. and Muthigo K. G. 2012. Assessment of the efficiency of different mixes of macrophytes in removing heavy metals from wastewater using constructed

- Mu'ller R. A. and Moormann H. 2003. Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnology Advances*. 22: 93-117.
24. Tabatabaei S. H. Nourmahnad N. Golestani Kermani S. Tabatabaei S. A. Najafi P. and Heidarpour M. 2020. Urban wastewater reuse in agriculture for irrigation in arid and semi-arid regions-A review. *International journal of recycling organic waste in agriculture*. 9(2):193-220.
25. Tee H. C. Lim P. E. Seng C. E. Nawi M. and Adnan R. 2015. Enhancement of azo dye Acid Orange 7 removal in newly developed horizontal subsurface-flow constructed wetland. *Journal of environmental management*. 147: 349-55.
26. Truong P. Carlin G. and Cook F. 2003. Vetiver grass hedges for water quality improvement in acid sulfate soils. (Queensland, Australia). In: *Proceedings of the 3th International Conference on Vetiver and Exhibition Guangzhou China*.
27. Vymazal J. 2014. Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: a review. *Ecol. Eng.* 73: 724-751.
28. Wood A. 1990. Constructed wetlands for wastewater treatment—engineering and design considerations. In: *Proceedings of the International Conference on the use of Constructed Wetlands in Water Pollution Control Cambridge UK*.
29. Yin T. Chen H. Reinhard M. Yi X. He Y. and Gin K. 2017. Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances removal in a full-scale tropical constructed wetland system treating landfill leachate. *Water Res.* 125: 418-426.
30. Younas F. Niazi N. Bibi I. and Hussain KH. 2022. Constructed wetlands as a sustainable technology for wastewater treatment. *Journal of Hazardous Materials* 422 126926. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126926>.
31. Zojaji F. Hassani A. H. and Sayadi M. H. 2015. A comparative study on heavy metal content of plants irrigated with tap and wastewater. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 12(3): 865-870.

