

# بررسی اثر گیاه نی و زمان ماند هیدرولیکی در بازده حذف سرب در تالاب مصنوعی افقی زیرسطحی

سعید طاهری قناد<sup>۱\*</sup>، هادی معاضد<sup>۲</sup>، سعید برومندنسب<sup>۳</sup>، نعمت‌الله جعفرزاده<sup>۴</sup>

۱. استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول

۲. استاد دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

۳. استاد دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

۴. استاد دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی جندی‌شاپور اهواز

hmoazed955@yahoo.com

boroomandsaeed@yahoo.com

Jaafarzadeh\_n@ajums.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۴/۲۳

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۳/۲/۲۶

## چکیده

آلودگی آب با فلزات سنگین مسئله محیط‌زیستی جهانی است که به واسطه فعالیت‌های روزافزون بهره‌برداری از معادن، صنعتی شدن و شهرنشینی در سراسر کره زمین افزایش یافته است. سرب از مهم‌ترین آلاینده‌های زیست‌محیطی محسوب می‌شود که از راه‌های مختلف منابع آب و خاک را آلوده می‌کند. تالاب‌های مصنوعی با استفاده از گیاهان آبی می‌توانند عملیات تصفیه فاضلاب‌های حاوی فلزات سنگین را به طور مؤثرتر و با هزینه‌های کمتری در مقایسه با سایر روش‌ها انجام دهند. در این تحقیق اثر گیاه نی و زمان ماند هیدرولیکی بر بازده حذف سرب در تالاب مصنوعی افقی زیرسطحی در دانشگاه آزاد واحد دزفول از تیر تا مهر ۱۳۹۲ بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش زمان ماند، بازده حذف افزایش می‌یابد، به طوری که بازده حذف سرب در زمان ماند یک‌روزه معادل ۸۴/۱ درصد و در بهترین شرایط در زمان ماند پنج‌روزه معادل ۸۸/۱ درصد اندازه‌گیری شد و بین متوسط بازده حذف سرب در زمان‌های ماند ۱، ۳ و ۵ روز اختلاف معنی‌دار ( $P < 0.05$ ) وجود داشت، در صورتی که بین زمان ۵ و ۱۰ روز اختلاف معنی‌دار مشاهده نشد. بنابراین، با توجه به شرایط این تحقیق، زمان ماند پنج‌روزه برای حذف سرب پیشنهاد می‌شود. همچنین، نتایج نشان داد با کاهش بار هیدرولیکی جریان از ۱۹/۸ تا ۳/۵ سانتی‌متر بر روز، نسبت غلظت فاضلاب خروجی به ورودی به طور معنی‌دار و به صورت رابطه خطی کاهش یافت. بنابراین، با افزایش زمان ماند و کاهش بار سطحی، فرصت بیشتری برای فرایندهای مؤثر در حذف سرب در تالاب فراهم می‌شد و نتایج تجمع سرب در ریشه گیاه نی نیز نشان‌دهنده توان بالای این گیاه در جذب عنصر سنگین سرب بود.

## کلیدواژه

بازده حذف، تالاب مصنوعی، تجمع سرب، نی.

## ۱. سرآغاز

می‌کند. این عنصر در فهرست سازمان محیط‌زیست امریکا از جمله سمی‌ترین فلزات سنگین محسوب می‌شود. لذا پالایش خاک و آب‌های آلوده به این عنصر، از مهم‌ترین سیاست‌های زیست‌محیطی کشورهای صنعتی و در حال توسعه است (موحدیان‌عطار و ابراهیمی، ۱۳۸۲).

حذف و کنترل آلودگی فلزات سنگین، به علت متعدد و متفاوت بودن منابع آلوده‌کننده آن‌ها بسیار مشکل است،

آلودگی آب با فلزات سنگین مسئله محیط‌زیستی جهانی است که به واسطه فعالیت‌های روزافزون بهره‌برداری از معادن، صنعتی شدن و شهرنشینی در سراسر کره زمین افزایش یافته است (Rostami and Joodaki, 2002).

سرب از مهم‌ترین آلاینده‌های زیست‌محیطی محسوب می‌شود که از راه‌های مختلف منابع آب و خاک را آلوده

سیستم‌های عمودی با مدت زمان ماند کوتاه بیشتر است. بنابراین، انتخاب بهینه زمان ماند نقش مؤثری در کارایی تالاب‌های افقی زیرسطحی دارد (Stottmeister et al., 2003).

در تحقیقی درباره فاضلاب شهری و در شرایط تالاب، بازده حذف برخی عناصر میکرو نظیر سرب و مس در محدوده ۵۰-۷۵ درصد گزارش شد و دلیل عمده حذف فلزات سنگین را در طبیعت و تالاب‌های مصنوعی افقی زیرسطحی را در فرایندهای فیزیکی فیلتراسیون و ترسیب بیان کردند (Kropfelova et al., 2009). Sirianuntapiboon و همکاران (۲۰۰۶) در تحقیق دیگری اثر زمان ماند هیدرولیکی برای تصفیه فاضلاب شهری در تالاب مصنوعی را بررسی کردند و از سه زمان ماند ۰/۷۵، ۱/۵ و ۳ روز، زمان ماند ۰/۷۵ را به‌منزله مؤثرترین زمان ماند نتیجه گرفتند و بیشترین بازده حذف پارامترهای کیفی را در زمان ماند ۳ روز گزارش کردند. همچنین، دلیل تأثیر بیشتر زمان‌های ماند کمتر را در بالاتر بودن دبی جریان در سیستم تالاب دانستند.

Cortes و همکاران (۲۰۱۲) بازده حذف مس و روی فاضلاب پرورش خوک را تحت زمان‌های ماند هیدرولیکی ۲۴، ۴۸، ۷۲ و ۹۶ ساعت، در دو گونه گیاهی الوجیرز و تیفا در تالاب‌های مصنوعی افقی بررسی و نتیجه‌گیری کردند که زمان ماند هیدرولیکی، روی بازده حذف مس و روی اثر معنی‌دار داشت و بهترین نتایج برای روی در زمان ماند هیدرولیکی ۹۶ ساعت در شرایط کشت گیاه تیفا و برای مس نیز در زمان ماند ۷۲ ساعت و با بازده تقریبی ۱۰۰ درصد به دست آمد. با افزایش زمان ماند هیدرولیکی، دبی ورودی و خروجی کمتر می‌شد و از این رو گیاه فرصت بیشتری برای حذف داشت. علاوه بر آن، مکانیسم‌های مؤثر را ته‌نشینی شیمیایی و فیزیکی، تبادل یونی و جذب سطحی خاک و جذب بیولوژیکی روی بیوفیلم ریشه، واکنش با ترکیبات آلی و معدنی گزارش

زیرا هر منبع آلوده‌کننده، فرایند تصفیه خاص خود را می‌طلبد. تاکنون روش‌های بسیاری برای تصفیه فاضلاب‌ها ابداع و استفاده شده‌اند که از آن جمله می‌توان به فرایند ترسیب شیمیایی، اسمز معکوس و استفاده از مبادله‌کننده‌های یونی آلی اشاره کرد که هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارند (کاظمیان، ۱۳۷۸؛ قهفرخی و همکاران، ۱۳۹۳). سامانه تالاب مصنوعی با استفاده از گیاهان آبی می‌تواند عملیات تصفیه فاضلاب‌های صنعتی و کشاورزی را به روش زیستی و به طرز مؤثری با هزینه‌های کمتر در مقایسه با دیگر سامانه‌ها انجام دهد. در این سامانه‌ها فرایندهای بیولوژیکی، فیزیکی و شیمیایی برای تصفیه فاضلاب صورت می‌گیرد (Vymazal, 2007; Vymazal, 2010). گیاهان آبی کشت شده در تالاب‌ها قادرند انواع عناصر سمی و فلزات سنگین را جذب و تغلیظ کنند (منشوری و وثوقی، ۱۳۷۸؛ Arts et al., 2008). در سال‌های اخیر توجه زیادی به حذف فلزات سنگین از آب و خاک از طریق گیاهان آبی شده است که این عمل را گیاه پالایی گویند (Bukhari et al., 2013) و (Hazrat et al., 2013). تالاب‌ها معمولاً با چهار نوع جریان به صورت‌های زیرسطحی، سطحی، عمودی و هیبرید اجرا و عمدتاً با گیاه نی کشت می‌شوند. این گیاه از تیره گرامینه با توده سبز بالا و عمق ریشه قابل توجه است (Mantovi et al., 2003) که نقش مهمی در فرایند خودپالایی تالاب دارد (Lavrova and kounnova, 2008). بازده تصفیه در این سیستم‌ها علاوه بر نوع گیاه، به نوع و طراحی تالاب، زمان ماند هیدرولیکی، میزان بار هیدرولیکی، فعالیت میکروارگانسیم‌ها و شرایط اقلیمی بستگی و برای بهترین بازده به میزان بار هیدرولیکی کم و زمان ماند طولانی نیاز دارد (Kumar et al., 2011). زمان ماند هیدرولیکی اساساً به معنی مدت زمانی است که آب در تماس با ریشه گیاه و بستر است که در حذف یا تجزیه آلودگی‌ها نقش مهمی دارد و البته اثر آن در سیستم‌های زیرسطحی نسبت به

## ۲.۲. خصوصیات هیدرولیکی

در سامانه‌های مذکور بار هیدرولیکی و زمان ماند به صورت متغیر شامل چهار زمان ماند متغیر ۱، ۳، ۵ و ۱۰ روز انتخاب شد. میزان دبی مورد نیاز و بار سطحی سرب نیز بر اساس غلظت ۱۰ میلی‌گرم در لیتر سرب، مطابق جدول ۱ محاسبه و اجرا شد. هدف از انتخاب این غلظت، دستیابی به فاضلابی با غلظت بالاتر از حد استاندارد سازمان محیط‌زیست ایران و سازمان بهداشت جهانی بود (WHO, 1989) که بر اساس آن کارایی سامانه‌ها به منظور تصفیه فاضلاب مصنوعی برای مصارف آبیاری بررسی شد. برای تأمین دبی مورد نیاز، از یک منبع ۲۰۰ لیتری کالبره شده مجهز به شیر خروجی برای هر کدام از سامانه‌ها استفاده شد. دبی مورد نیاز و بار هیدرولیکی برای هر کدام از سامانه‌ها پس از اندازه‌گیری خصوصیت فیزیکی و شیمیایی بستر با توجه به حجم تالاب، تخلخل بستر و میزان تبخیر و تعرق روزانه محاسبه شد. نتایج تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی بستر نیز پس از اندازه‌گیری در جدول ۲ آمده است. منبع سرب نیز از نیترات سرب شرکت مرک با قابلیت انحلال بالا تهیه شد.

کردند. هدف اصلی از انجام این تحقیق، بررسی اثر گیاه نی و تغییر زمان ماند هیدرولیکی از یک تا ده روز در بازده حذف سرب در شرایط تالاب مصنوعی افقی زیرسطحی تعریف شد.

## ۲. مواد و روش بررسی

### ۲.۱. مشخصات فیزیکی طرح

سامانه نيزار در این تحقیق شامل سه مکعب مستطیل فلزی از جنس آهن گالوانیزه به طول ۱، عرض ۰/۳ و عمق ۰/۳۵ متر بود. کف تالاب‌ها با بستری از شن به قطر ذرات ۰/۱-۰/۵ میلی‌متر و عمق ۳۰ سانتی‌متر پر شد. در بخش ورودی و خروجی سامانه‌ها نیز از قلوه‌سنگ‌هایی به قطرهای ۵۰-۱۰۰ میلی‌متر استفاده شد تا فاضلاب به محض ورود به داخل بستر نفوذ کند و از جاری شدن آن روی بستر جلوگیری شود. نشاهای نی فراگمیتس در تاریخ ۱۳۹۲/۴/۱۷ از کنار کانال‌ها و زهکش‌های موجود در منطقه جمع‌آوری و بلافاصله در بسترها به فاصله حداقل ۱۰ و عمق ۲۰ سانتی‌متر و به تعداد ۲۰ گیاه در هر تالاب کشت شدند. حفظ فاصله کافی بین ریشه‌ها هنگام کاشت نی سبب افزایش جوانه‌ها، پاجوش‌ها و مصون‌ماندن ریشه‌ها از خشک شدن شد.

جدول ۱. بار سطحی و هیدرولیکی فاضلاب ورودی به سامانه‌ها

زمان ماند (روز)	حجم مصرفی (لیتر)	دبی (L/d)	بار هیدرولیکی (mm/day)	بار سطحی سرب (mg.pb/d.m <sup>2</sup> )
۱	۵۹	۵۹	۱۹۸	۱۹۵۵
۳	۶۹	۲۳	۷۷	۷۵۶
۵	۷۹	۱۶	۵۳	۵۲۶
۱۰	۱۰۴	۱۰	۳۵	۳۳۱

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی ماسه استفاده شده در بستر تالاب

واحد	مقدار	خصوصیت شیمیایی	واحد	مقدار	خصوصیت فیزیکی
ds/m	۰/۰۳	Ec <sub>e</sub>	Mm	۵-۰/۰۱	قطر (میلی‌متر)
---	۷/۲	p <sup>H</sup>	cm/min	۱/۷۹۵	هدایت هیدرولیکی
mg/kg	۰/۰۰۲	سرب	%	۴۷	تخلخل
mg/kg	۵/۳	سولفور	gr/cm <sup>3</sup>	۱/۵۱	وزن مخصوص ظاهری
mg/kg	۰/۵۶	نیترات	---	۳/۷	ضریب یکنواختی

### ۳.۲. نمونه برداری و اندازه‌گیری

برای اعمال تیمارها حدود ۴۵ روز پس از کاشت سپری و با این زمان فرصت لازم برای تثبیت و رشد ریشه گیاهان فراهم شد. لذا شروع اعمال فاضلاب شبیه‌سازی شده در تیمارها تا مورخ ۱۳۹۲/۶/۱ به تعویق افتاد. به منظور تنظیم زمان ماند مختلف در سامانه‌ها و دبی‌ها بار سطحی مختلفی تکرار و پس از اتمام هر کدام از زمان‌های ماند و خروج فاضلاب مصرفی، مدت زمان ۵ روز با آب معمولی وارد سامانه‌ها می‌شد تا شرایط لازم برای مراحل بعدی آزمایش‌ها فراهم شود. تکمیل چهار زمان ماند انتخابی حدوداً به مدت یک ماه و کل آزمایش‌ها در دو تکرار زمانی و طی دو ماه تا مورخ ۱۳۹۲/۸/۱۲ انجام شد. نمونه‌های گیاه پس از برداشت به روش هضم تر عصاره‌گیری و سرب موجود در نمونه‌های بافت گیاه و فاضلاب ورودی و خروجی با کمک دستگاه جذب اتمی مدل Perklm A Analyst 700 اندازه‌گیری شد.

### ۳. نتایج و بحث

#### ۳.۱. بازده‌ها و مدل‌های حذف سرب

نتایج اندازه‌گیری‌ها به طور خلاصه در جدول ۳ آمده است.

با توجه به اندازه‌گیری‌ها، بازده حذف سرب در فاضلاب خروجی بر اساس اختلاف غلظت فاضلاب ورودی و خروجی نسبت به غلظت فاضلاب ورودی محاسبه شد. علاوه بر آن، نسبت غلظت فاضلاب خروجی به ورودی (C/C<sub>0</sub>) و سهم زمانی حذف سرب در زمان‌های ماند مختلف محاسبه شد که در جدول ۳ آمده‌اند. مطابق نتایج این جدول، غلظت سرب در نمونه خروجی فاضلاب در کلیه موارد کمتر از حد مجاز استاندارد EPA و WHO (۵ میلی‌گرم در لیتر) بود. بنابراین، عملکرد سیستم در محدوده شرایط آزمایش در حد مطلوب بود و امکان استفاده مجدد از آب خروجی تالاب مصنوعی برای مصارف آبیاری وجود داشت. علاوه بر آن، بر اساس اندازه‌گیری‌ها، ارتباط بازده حذف سرب فاضلاب نسبت به زمان ماند ترسیم شد. معادله حاکم با استفاده از نرم‌افزار curvexpert به صورت معادله نمایی  $R = a.(b - e^{-ct})$  استخراج شد که در بین معادلات نمایی برازش شده از بالاترین ضریب همبستگی (r=۰/۹۷۵) برخوردار بود. نتایج برازش بازده حذف سرب نسبت به زمان ماند هیدرولیکی در جدول ۴ آمده است.

جدول ۳. نتایج اندازه‌گیری‌ها در فاضلاب ورودی و خروجی

زمان ماند	غلظت ورودی (C <sub>0</sub> )	غلظت خروجی (C)	C/C <sub>0</sub>	بازده حذف (%)
۱	۰/۱۱±۹/۸۸	۰/۰۳±۱/۵۷	۰/۱۵۹	۰/۴۷±۸۴/۱
۳	۰/۰۸±۹/۸۱	۰/۰۴±۱/۲۵	۰/۱۲۸	۰/۴۵±۸۷/۲
۵	۰/۱۲±۹/۹۵	۰/۰۳±۱/۱۸	۰/۱۱۹	۰/۴۱±۸۷/۱
۱۰	۰/۰۶±۹/۵۲	۰/۰۲±۱/۱۳	۰/۱۱۸	۰/۲۸±۸۷/۲

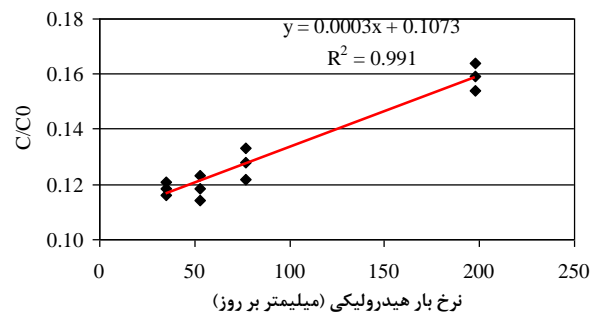
فاضلاب مصنوعی را تحت بارهای هیدرولیکی مختلف در تالاب مصنوعی افقی زیرسطحی با کشت تیفا انجام دادند و نتیجه گیری کردند که با کاهش بار هیدرولیکی، بازده حذف افزایش می‌یافت.

### ۲.۳. اثر زمان ماند بر بازده حذف سرب

روند تغییرات بازده حذف نسبت به زمان نشان داد که با افزایش زمان ماند بازده حذف در حال افزایش بود. به نظر می‌رسد با افزایش زمان ماند، بار هیدرولیکی جریان ورودی و بار سطحی سرب کاهش می‌یافت. لذا فرصت کافی برای فرایندهای فیزیکی، بیولوژیکی و شیمیایی در بستر سامانه‌ها و گیاه فراهم می‌شد تا عملیات حذف سرب انجام شود. همان‌طور که شکل ۲ نشان می‌دهد با گذشت زمان ماند، بازده حذف در حال افزایش و سرعت افزایش آن در حال کاهش است. لذا به نظر رسید زمان‌های اولیه اثر بیشتری در فرایندهای حاکم بر حذف سرب داشتند. به همین منظور سهم زمانی اثر زمان ماند نیز محاسبه شد که آن بر اساس نسبت بازده حذف لحظه‌ای (در زمان‌های ماند مختلف) به بازده زمان ماند ده‌روزه محاسبه شد. با آن می‌توان میزان وزن یا اثر هر کدام از زمان‌های ماند در حذف سرب را کمی کرد که در نمودار ۲ نشان داده شده است. با استفاده از این نمودار می‌توان سهم هر کدام از زمان‌های ماند را در بهبود بازده حذف بررسی کرد. بر اساس این نمودار بیشترین اثر سهم زمانی در زمان ماند یک‌روزه اتفاق افتاده که معادل ۹۵/۴ درصد بازده حذف حداکثر (بازده حذف ۱۰ روزه) بوده است و مطابق با آن می‌توان به بازده حذف ۸۴/۱ درصد رسید. این مقدار از بازده حداکثر، اندکی پایین‌تر است، اما با قبول کاهش حدود ۵ درصد می‌توان با در نظر گرفتن زمان ماند یک‌روزه به این بازده حذف دست یافت. بنابراین، می‌توان به این نتیجه رسید که سیستم فرایندهای شیمیایی و بیولوژیکی مؤثر در بازده حذف سرب در زمان ماند یک‌روزه در بیشترین شدت قرار داشت، اما در ادامه افزایش زمان ماند به کاهش شدت فرایندهای مؤثر منجر می‌شد.

جدول ۴. ضرایب رگرسیونی معادله نمایی حذف

خطای استاندارد	n	r	a	B	C
۰/۰۰۴	۱۲	۰/۹۷۵	۰/۰۸۵	۱۰/۳۹	۰/۷۱۸



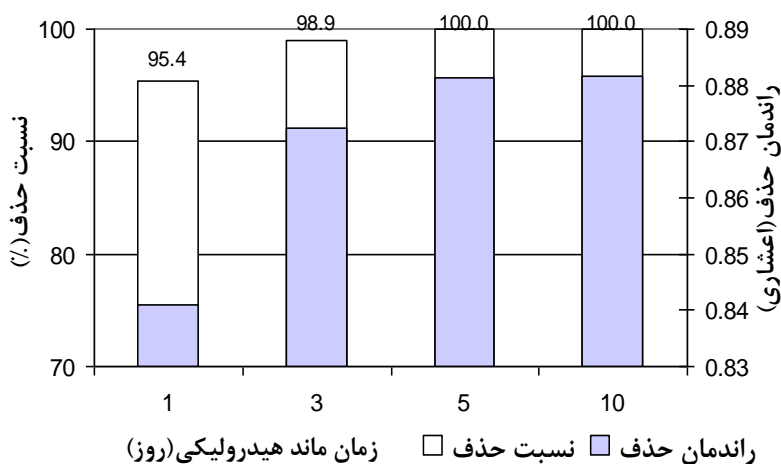
شکل ۱. ارتباط خطی بین نرخ بار هیدرولیکی و نسبت غلظت فاضلاب خروجی به ورودی

Crites و Tchobanoglous در سال ۱۹۹۸ روابطی را برای حذف برخی آلاینده‌ها در تالاب‌های با جریان سطحی و زیرسطحی پیشنهاد دادند که در آن بین بار هیدرولیکی (q) بر حسب میلی‌متر بر روز و نسبت غلظت فاضلاب خروجی به ورودی (C0/Ci)، یک مدل خطی برای آلاینده‌ها تعریف شد. بر همین اساس و با الگوبرداری از این رابطه، ارتباط بین بار سطحی و نسبت غلظت سرب فاضلاب خروجی به ورودی نیز ترسیم (که در شکل ۱ نشان داده شده است) و پس از آن با استفاده از رگرسیون خطی، میزان همبستگی بین متغیرهای مستقل و وابسته بررسی شد. نتایج نشان داد که همبستگی بالایی ( $R^2=0/991$ ) بین آن‌ها برقرار بود. بر اساس این رابطه با کاهش بار هیدرولیکی جریان از ۱۹/۸ تا ۳/۵ سانتی‌متر بر روز، نسبت غلظت فاضلاب خروجی به ورودی به طور معنی‌داری و به صورت رابطه خطی کاهش یافت. بنابراین، با افزایش زمان ماند و کاهش بار سطحی زمان بیشتری برای فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی به منظور حذف سرب در سیستم تالاب فراهم می‌شد. مطابق نتایج بالا، Weeracon و همکاران (۲۰۱۳) نتایج مشابهی را به دست آوردند که بر اساس آن، پتانسیل حذف آلودگی‌های

جدول ۵. بررسی اثر زمان ماند و مقایسه میانگین‌ها

زمان ماند (روز)	بازده (%)	* (دانکن <math>P</math> <math>< 0.05</math>)
۱	۸۴/۱ ± ۰/۴۷	A
۳	۸۷/۲ ± ۰/۴۵	B
۵	۸۸/۱ ± ۰/۴۱	C
۱۰	۸۸/۲ ± ۰/۲۸	C

\*حروف مختلف نشان‌دهنده معنی‌دار بودن اختلاف در تیمارها در سطح ۵ درصدند.



شکل ۲. بازده حذف و سهم زمانی حذف سرب در فاضلاب خروجی

می‌شود که در تحقیقات مشابه، زمان‌های ماند کمتر از یک‌روزه نیز در تحلیل‌های آماری بررسی شوند. تحقیقات مشابهی از سوی افراد مختلف در تالاب‌های مصنوعی زیرسطحی و روی بازده حذف سرب انجام شده است که نتایج مشابهی نیز به دست آمد به طوری که عمدتاً بازده حذف سرب را در محدوده ۷۶-۹۵ درصد نتیجه‌گیری کردند. همچنین، مکانیزم‌های عمده حذف سرب در تشکیل سولفیدهای غیرمحلول، فیلتراسیون جامدات، کلوئیدها و پیوند به آهن و اکسید منگنز را مهم‌ترین دلیل حذف سرب فاضلاب‌ها در سیستم تالاب معرفی کردند (Noller et al., 1994; Kumar et al., 2011). در تحقیق روی بازده حذف سرب در تالاب مصنوعی زیرسطحی و در مقیاس آزمایشگاهی، نتیجه مشابهی حاصل شد. در این تحقیق که

مطابق با این نتایج و شکل ۲، نرخ افزایش بازده حذف به ازای افزایش زمان ماند هیدرولیکی کاهش می‌یافت. بررسی بقیه زمان‌های ماند انتخابی این تحقیق نیز نشان‌دهنده این موضوع است که با انتخاب بازده حذف سه روزه می‌توان تا حد قابل قبولی به بازده حذف پتانسیل نزدیک شد؛ علاوه بر آن برای معنی‌دار بودن اثر تغییرات زمان ماند، با استفاده از آزمون دانکن، مقایسه میانگین مشاهدات نیز بررسی شد که نتیجه آن بر اساس نرم‌افزار SPSS در جدول ۵ آمده است. مطابق آن بین بازده حذف در زمان‌های ماند ۱، ۳ و ۵ روز اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد وجود داشت، اما بین زمان‌های ماند ۵ و ۱۰ روزه اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد مشاهده نشد. بنابراین، در شرایط بهینه می‌توان زمان ماند ۵ روز را پیشنهاد کرد. همچنین، بر اساس نتایج این تحقیق پیشنهاد

استخراج شد (شکل ۳). در این رابطه HRT زمان ماند هیدرولیکی<sup>۲</sup> بر حسب روز و BAF فاکتور تجمع سرب در بافت ریشه نی بر حسب میلی گرم بر کیلوگرم بود.

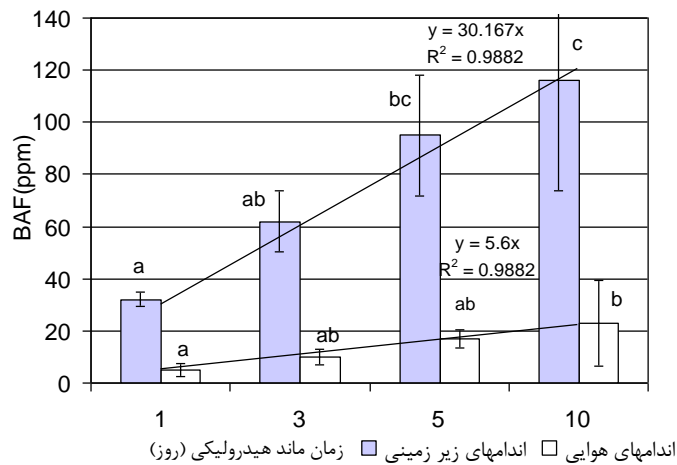
نتایج نشان داد که بین زمان ماند هیدرولیکی و شاخص تجمع رابطه معنی دار وجود داشت، به طوری که با افزایش زمان ماند، فاکتور انباشت سرب در زیتوده کل گیاه به طور متوسط تا حداکثر ۷۸ میلی گرم به کیلوگرم افزایش یافت. این مقدار به طور متوسط در زمان ماند ۱۰ روز حداکثر به میزان ۱۱۶ میلی گرم در کیلوگرم بافت خشک ریشه گیاه افزایش یافت. نتایج تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها نشان داد که زمان ماند در سطح ۵ درصد در میزان شاخص انباشت سرب در اندام‌های زمینی گیاه نی اثر معنی دار داشت. این در حالی است که در سطح ۵ درصد در میزان شاخص انباشت سرب در اندام‌های هوایی گیاه اثر معنی دار نداشت، اما روند انباشت، به صورت تجمعی و افزایشی بود (شکل ۳). این نتایج منحصراً بر اساس انباشت لحظه‌ای در هر زمان ماند محاسبه و انباشت مربوط به هر زمان ماند از زمان ماند بعدی کسر شد. با توجه به اندازه‌گیری‌ها و بیلان جرمی سرب ورودی و خروجی در تالاب، درصد سهم بستر و گیاه در بازده حذف سرب به تفکیک محاسبه شد (شکل ۴). سهم گیاه نیز با توجه به زیتوده خشک نی و شاخص انباشت سرب بر حسب میلی گرم در تالاب محاسبه شد.

بر این اساس نتایج نشان داد، سهم گیاه به طور تجمعی در چهار زمان ماند در محدوده ۷/۷-۱۸/۶ درصد از مقدار سرب وارد شده در فاضلاب ورودی متغیر بود، به طوری که سهم گیاه با افزایش روند تجمعی جذب گیاه نسبت به زمان ماند تا ۱۸/۶ درصد افزایش می‌یافت. بر خلاف آن، سهم بستر با افزایش زمان ماند کاهش می‌یافت و در محدوده ۷۹-۹۰ درصد مقدار سرب وارد شده متغیر بود. با این حال نتایج بیلان جرمی سرب نشان داد که کل سرب حذف شده در بستر به صورت تجمعی در حال افزایش بود (شکل ۵).

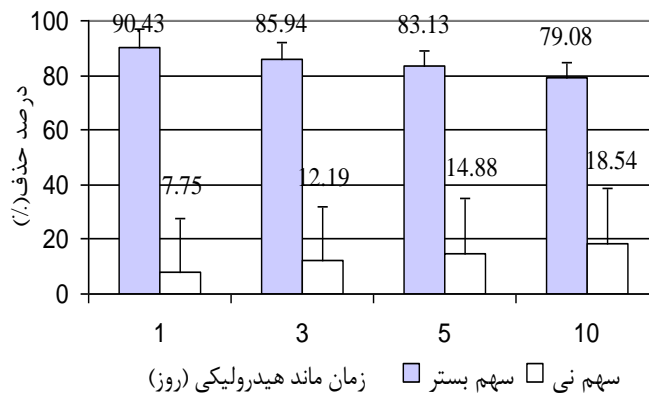
با کشت گیاه تیفا و فراگمیس انجام شد، فاضلاب در غلظت‌های ۱-۲۰ میلی گرم در لیتر وارد شد. بازده حذف در محدوده ۷۵-۹۶ درصد متغیر گزارش شد (Munger et al., 1997). یوسفی و همکاران (۱۳۹۱) در تحقیقی که روی سرب و کادمیوم انجام دادند، دریافتند که با افزایش زمان ماند از ۲ به ۶ روز، درصد حذف فلزات سنگین نیز افزایش یافت و در بیشترین مقدار درصد حذف ۷۵ درصد گزارش شد. منشوری و وثوقی (۱۳۷۸) در تحقیقی به منظور مطالعه کارایی سیستم نزارهای مصنوعی در حذف فلزات سنگین، از واحدهای نیمه‌صنعتی (پایلوت) با جریان زیرسطحی استفاده کردند که نتایج بیانگر آن بود که بیشترین افزایش بازده حذف در زمان ماند یک روز حاصل شد و با افزایش غلظت مس و کروم، بازده حذف از ۱۰۰ به ۹۸ درصد می‌رسید. همچنین، افزایش زمان ماند به افزایش بازده حذف منجر می‌شد و نتیجه‌گیری کردند که گیاه نی در کاهش آلاینده‌ها از جمله فلزات سنگین از فاضلاب نقش مؤثری دارد. به طوری که بخش اعظم مس و کروم در ریشه‌ها و ریزوم‌های نی تجمع می‌یافت و بخش زیادتر از فلزات مس و کروم در بستر شن ذخیره شد و دلیل آن را در فرایندهای بیولوژیکی، ترسیب و جذب سطحی گزارش کردند.

### ۳.۳. بیلان سرب و شاخص انباشت نی

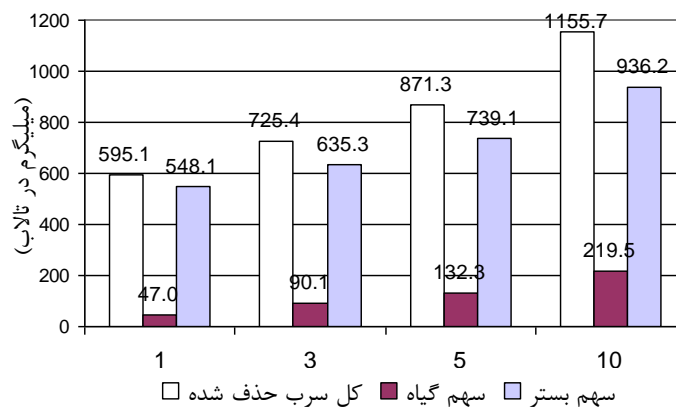
بر اساس تحقیقات انجام شده فلزات سنگین عمدتاً در ریشه گیاهان آبی به خصوص گیاه نی تجمع می‌یابند و می‌توانند نماینده وضعیت آلودگی آب یا لجن فاضلاب باشند. مکانیسم تجمع فلزات در ریشه، یکی از مکانیسم‌های مقابله با عناصر سنگین در فاضلاب‌های صنعتی است (Bonanno and Logiudice, 2010)؛ لذا رابطه خطی بین زمان ماند و فاکتور تجمع نی (BAF) با توجه به نمونه‌برداری و اندازه‌گیری‌ها در بافت ریشه گیاه آبی نی و اندام‌های هوایی (ساقه و برگ) بررسی و بر اساس آن رابطه خطی با ضریب همبستگی بالا ( $r^2=0/988$ ) مطابق رابطه  $BAF=30.167.HRT$



شکل ۳. فاکتور انباشت سرب در بافت خشک نی بر حسب میلی گرم در کیلوگرم



شکل ۴. مقایسه سهم بستر و گیاه در حذف سرب فاضلاب



شکل ۵. متوسط سرب حذف شده در تالاب بر اساس بیان سرب

حذف شده را در تالاب مصنوعی بر حسب میلی گرم در تالاب نشان می دهد. بر اساس این نمودار که با استفاده از بیان سرب ورودی و خروجی در تالاب به دست آمد، متوسط کل سرب حذف شده در محدوده ۱۱۱۵ تا ۵۹۵

لذا سهم بستر در زمان های ماند کم، به دلیل بالاتر بودن بار هیدرولیکی و بار سرب مؤثرتر واقع می شد و با افزایش زمان ماند، سهم انباشت بستر بر حسب درصد کاهش می یافت. نمودار ۵ سهم بستر و گیاه و کل سرب



ذخیره می‌شود و ریشه این گیاه تنها قادر به جذب ۱۴ درصد از مقدار سرب داده شده به فاضلاب مصنوعی بود و بر اساس گزارش محققان، گیاه نی نقش قابل توجهی در حذف سرب تالاب‌های مصنوعی دارد.

#### ۴. نتیجه گیری

- نتایج نشان داد که غلظت سرب در نمونه خروجی فاضلاب در کلیه موارد کمتر از حد مجاز استاندارد EPA و WHO (۵ میلی‌گرم در لیتر) بود. بنابراین، عملکرد سیستم در محدوده شرایط آزمایش در حد مطلوب بود و امکان استفاده مجدد زه آب خروجی تالاب مصنوعی در مصارف آبیاری وجود داشت.

- با افزایش زمان ماند هیدرولیکی و کاهش بار سطحی جریان از ۱۹/۸ تا ۳/۵ سانتی‌متر بر روز نسبت غلظت فاضلاب خروجی به ورودی به طور معنی‌داری و به صورت رابطه خطی با ضریب همبستگی بالا ( $R^2=0.991$ ) کاهش یافت. بنابراین، با افزایش زمان ماند و کاهش بار سطحی زمان بیشتری برای فرایندهای شیمیایی و بیولوژیکی مؤثر در حذف سرب در سیستم تالاب فراهم شد.

- تحلیل‌های آماری نشان داد بین بازده حذف در زمان‌های ماند ۱، ۳ و ۵ روز اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد وجود داشت، اما بین زمان ماند ۵ و ۱۰ روزه اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد مشاهده نشد. بنابراین، بازده حذف در شرایط بهینه و در زمان ماند ۵ روز به مقدار ۸۸/۱ درصد رسید.

- نتایج اندازه‌گیری بافت ریشه گیاه نی نشان داد که بین زمان ماند هیدرولیکی و شاخص BAF رابطه مستقیمی وجود داشت به طوری که با افزایش زمان ماند، فاکتور جذب گیاه به طور متوسط تا حداکثر ۱۱۶ میلی‌گرم در کیلوگرم بافت خشک ریشه افزایش می‌یافت.

- بر اساس محاسبات بیلان، سهم گیاه در حذف سرب در چهار زمان ماند ۱، ۳، ۵ و ۱۰ روزه در محدوده ۷/۷-۱۸/۶ درصد مقدار سرب وارد شده متغیر بود به طوری که

میلی‌گرم و سهم گیاه به میزان ۲۱۹/۵ تا ۴۷ میلی‌گرم در تالاب متغیر بود و بخش بیشتری از میزان کل سرب حذف شده، به واسطه ترسیب فیزیکی و شیمیایی در محدوده ۹۳۶ تا ۵۴۸ میلی‌گرم در بستر تالاب به صورت ذخیره باقی ماند. با توجه به اینکه جنس بستر از ماسه بود و ماسه نیز فاقد ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)<sup>۳</sup> است، لذا مکانیسم‌های زیستی و هیدرولیکی تالاب، در حذف سرب در تالاب مصنوعی نقش قابل توجهی داشتند. از جمله فرایندهای زیستی می‌توان به توان جذب گیاهان آبی و فعالیت میکروارگانیسم‌ها اشاره کرد.

گیاهان آبی از عمده‌ترین فرایندهای بیولوژیکی در تالاب‌ها به شمار می‌روند، زیرا علاوه بر جذب مستقیم از طریق ریشه، سبب ورود اکسیژن به منطقه ریشه می‌شوند که این عمل، جذب مواد غذایی، اکسیداسیون و فساد مستقیم آلودگی‌ها و فعالیت بیشتر میکروارگانیسم‌ها را به دنبال خواهد داشت. بنابراین، گونه‌های مختلف گیاهی در حذف فلزات سنگین نقش مهمی دارند (Liu et al., 2007). شدت حذف از طریق گیاهان آبی به نوع گونه گیاه آبی، مرحله رشد و غلظت عناصر سنگین در فاضلاب بستگی دارد (Sheoran, 2006). گیاهان آبی، عناصر سنگین را عمدتاً در ریشه‌ها و ریزوم خود جمع می‌کنند که با این استراتژی، امکان رشد بیشتر و تجمع و انباشت بیشتر عناصر سنگین در آن‌ها فراهم می‌شود (Barley et al., 2005).

Liu و همکاران (۲۰۰۷) در تحقیقی میزان تجمع سرب را از طریق ۱۹ گونه گیاهی در تالاب مصنوعی بررسی کردند و نتایج نشان داد که بازده حذف به طور متوسط بیشتر از ۹۰ درصد بود و نوع گیاه در تجمع و جذب سرب اثر معنی‌دار داشت و همه گیاهان در اولین برداشت به طور متوسط حدود ۲۲ درصد سرب در فاضلاب را جذب کرده بودند. Cheng و همکاران (۲۰۰۲) در تحقیقی، تالاب‌های مصنوعی عمودی و با کشت سیپروس را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که بخش قابل توجه سرب در بستر تالاب

چمران اهواز به دلیل تأمین بخشی از هزینه‌ها و امکانات اجرایی این تحقیق، تقدیر و تشکر می‌شود.

سهم گیاه با افزایش جذب گیاه نسبت به زمان ماند به طور جمعی افزایش می‌یافت. بنابراین، گیاه نی در حذف سرب در سیستم تالاب زیرسطحی نقش مهمی داشت.

### یادداشت‌ها

1. Bio Accumulation Factor (BAF)
2. Hydraulic Retention Time (HRT)
3. Cation Exchange Capacity (CEC)

### تشکر و قدردانی

این مقاله برگرفته از پایان‌نامه دکتری است که بدین وسیله از قطب علمی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید

### منابع

- کاظمیان، ح. ۱۳۷۸. «آمایش پسماندهای رادیواکتیو منابع حاصل از محصولات شکافت اورانیوم طبیعی»، رساله دکتری شیمی تجزیه، دانشکده شیمی دانشگاه اصفهان.
- منشوری، م. و وثوقی، م. ۱۳۷۸. «حذف فلزات سنگین توسط نزارهای مصنوعی»، دومین همایش ملی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی تهران.
- موحدیان‌عطار، ح. ابراهیمی، ا. ۱۳۸۲. «ارزیابی کارایی ژئولیت‌های طبیعی و رزین‌های مصنوعی در حذف یون‌های نیکل، روی و مس از فاضلاب‌های صنعتی»، مجله پژوهش در علوم پزشکی، ۸: ۷۶۰-۸۰.
- هاشمیان‌قهفرخی، ص. لندی، ا. خادمی، ح. حجتی، س. ۱۳۹۳. «حذف سرب و کادمیوم از محلول‌های آبی با استفاده از کانی‌های سیپولیت و ژئولیت طبیعی ایران»، فصلنامه محیط‌شناسی، ۴۰(۱): ۱۸۹-۱۹۸.
- یوسفی، ذ. مشایخی، ع. محمدپور، ر. ع. ۱۳۹۱. «بررسی کارایی نزار مصنوعی هیبریدی در حذف سرب و کادمیوم از پساب مجتمع پردیس دانشگاه علوم پزشکی مازندران»، مجله دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ۷: ۲۶۹-۲۵۸.
- Arts, G.H.P. Belgers, J.D.M. Hoekzema, C.H. and Thissen, J.T.N.M. 2008. Sensitivity of submersed freshwater macrophytes and endpoints in laboratory toxicity tests. *Environ Pollut.* 153(1):199-206.
- Barley, R.W. Hutton, C. Brown, M.M.E. Cusworth, J.E. Hamilton, T.J. 2005. Trends in biomass and metal sequestration associated with reeds and algae at Wheel Jane Biorem pilot passive treatment plant. *Sci Tot Environ.* 338 (1-2): 107-14.
- Bonanno, G. Logiudice, R. 2010. Heavy metal bioaccumulation by the organs of *Phragmites australis* and their potential use as contamination indicators. *Ecological Indicators* 10(3):639-645.
- Bukhari, H. Shabbir, G. Rehman, J. Riaz, M. Rasool, N. Zubair, M. Ain, Q.U. Munir, S. Shaheen, M.A. 2013. Biosorption of pb(II) and mn(II) metals ions from aqueous solutions by using *typha latifolia* waste biomass. *J Environ Prot Ecol* 14(2): 453-462.
- Cheng, S. Grosse, W. Karrenbrock, F. and Thoennessen, M. 2002. Efficiency of constructed wetlands in decontamination of water polluted by heavy metals. *Ecological Engineering* 18(3): 317-325.
- Cortes-Esquivel, J. Giacomani-Vallejos, G. D.Barcelo, I. Mendez-Novelo, R. and Ponce, M. 2012. Heavy metals removal from Swine wastewater using constructed wetland with horizontal subsurface flow. *Journal of environmental protection* 3:871-877.
- Crites, R. Tchobanoglous, G. 1998. Small and decentralized wastewater management systems. Boston, MA: WCB McGraw-Hill.
- Hazrat, A. Khan, E. and Anwar Sajad, M. 2013. Phytoremediation of heavy metals-Concepts and applications. *Chemosphere* 91 (7): 869-881.

- Kröpfelová, L. Vymazal, J. Svehla, J. and Stíčov, J. 2009. Removal of trace elements in three horizontal sub-surface flow constructed wetlands in the Czech Republic. *Environ Pollut*, 157(4): 1186-94.
- Kumar Choudhary, A. Kumar, S. and Sharma, C. 2011. Constructed wetlands: an approach for wastewater treatment. *Elixir Pollution* 37:3666-3672
- Lavrova, S. Koumanova, B. 2008. The role of *Phragmites Australis* in wetlands self-purification. *J of Environ Prot Ecol* 9(30): 531-539.
- Liu, J. Dong, y. Xu, H. Wang, D. and Xu, J. 2007. Accumulation of Cd, Pb and Zn by 19 wetland plant species in constructed wetland. *Journal of Hazardous materials* 147(3): 947-953.
- Mantovi, P. Marmiroli, M. Maestri, E. Tagliavini, S. Piccinini, S. Marmiroli, N. 2003. Application of a horizontal subsurface flow constructed wetland. *Bioresource Technology* 88: 85-94.
- Mungur, A.S. Shutes, R.B.E. Revitt, D.M. and House, M.A. 1997. An assessment of metal removal by a laboratory scale wetland, *Water Sci. Technol.* 35:125-133.
- Noller, B.N. Woods, P.H. and Ross, B.J. 1994. Case studies of wetland filtration of mine waste water in constructed and naturally occurring systems in northern Australia. *Water Sci. Technol.* 29: 257-66.
- Rostami, K. Joodaki, M.R. 2002. Some studies of cadmium adsorption using *Aspergillus niger*, *Penicillium austurianum*, employing an airlift fermenter. *J. of Chemical Engineering* 89(1-3): 239-252.
- Sheoran. A.S. Sheoran, V. 2006. Heavy metal removal mechanism of acid mine drainage in wetlands: A critical review. *Min Engg.* 19: 105-16.
- Sinicrope, T.L. Langis, R. Gersberg, R.M. Busanardo, M.J. Zedler, J.B. 1992. Metal removal by wetland mesocosms subjected to different hydroperiods. *Ecol. Engg.* 1(4): 309-22.
- Sirianuntapiboon, S. Kongchum, M. and Jitmaikasem, W. 2006. Effects of hydraulic retention time and media of constructed for treatment of domestic wastewater. *African journal of Agricultural Research* 1(2): 027-037.
- Stottmeister, U. Wießner, A. Kusch, P. Kappelmeyer, U. Kaßstner M. Bederski, O. Müller, R.A. and Moormann, H. 2003. Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnology Advances* 22: 93-117.
- Vymazal, J. 2010. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Water* 2: 530-549.
- Vymazal, J. 2007. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *J. science of the total environment* 380: 48-65.
- Weerakoon, G. Jinadasa, K. Herath, G. Mowjood, M. and Van Bruggen, J. 2013. Impact of the hydraulic loading rate on pollutants removal in tropical horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering* 61 Part A: 154-160.
- WHO,. 1989. World Health Organization, Health guidelines for the use of wastewater in agriculture and aquaculture. Technical Report. World Health Organization, Geneva, Switzerland.