

# فرایند حذف کروم شش ظرفیتی با استفاده از پودر جلبک سبز/اسپیروژیرا پرتیکالیس از محلول‌های آبی

الهام آسمان، حسین سیاف\*

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی کاشان، ایران

## چکیده

تاریخ دریافت: ۱۱ فروردین ۱۳۹۵  
تاریخ پذیرش: ۲۳ فروردین ۱۳۹۵

**اهداف** کاربرد جاذب‌های بیولوژیکی به‌صورت زنده و غیرزنده در حذف فلزات سنگین و ترکیبات سمی موجود در محلول‌های آبی و فاضلاب‌های صنعتی روشی بسیار مؤثر و اقتصادی است. در بین این جاذب‌ها، جلبک‌های سبز ظرفیت بسیار بالایی در جذب بیولوژیکی این مواد از خود نشان داده است. *اسپیروژیرا پرتیکالیس* جلبکی رشته‌ای است که به‌صورت توده‌های سبز رنگ و متراکم در رودخانه‌ها، برکه‌ها و جریان‌های آبی زندگی می‌کند. هدف از این مطالعه بررسی میزان توانایی پودر جلبک سبز رشته‌ای *اسپیروژیرا پرتیکالیس* در حذف کروم شش ظرفیتی از محلول‌های آبی بود.

**مواد و روش‌ها** این مطالعه به‌صورت تجربی و در سیستم بسته آزمایشگاهی جهت تعیین توانایی جلبک سبز *اسپیروژیرا پرتیکالیس* به شکل پودر شده در حذف کروم شش ظرفیتی از محلول‌های آبی دست‌ساز و با توجه به تأثیر پارامترهای pH، دوز جلبک، غلظت اولیه کروم شش ظرفیتی و زمان تماس انجام شد. در انجام آنالیزهای آماری، آزمون اندازه‌های تکراری و آنالیز واریانس یک‌طرفه با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۶ به‌کار رفت و  $P < 0/05$  سطح معنادار در نظر گرفته شد.

**یافته‌ها** بر اساس نتایج به‌دست‌آمده میزان حذف کروم شش ظرفیتی با افزایش دوز جلبک، غلظت اولیه کروم شش ظرفیتی و زمان تماس افزایش یافت. همچنین، بیشترین راندمان حذف در شرایط pH اسیدی مشاهده شد. مقادیر بهینه pH، دوز جلبک، غلظت اولیه فلز و زمان تماس به‌ترتیب ۳، ۱g/L، ۱g/L، ۴۰ و ۶۰ دقیقه به‌دست آمد. راندمان حذف کروم شش ظرفیتی در شرایط بهینه به میزان ۷۰ درصد مشاهده شد.

**نتیجه‌گیری** نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که توانایی پودر جلبک سبز *اسپیروژیرا پرتیکالیس* حتی با دوزهای پایین در حذف کروم شش ظرفیتی از محلول‌های آبی و فاضلاب‌های صنعتی اسیدی و حاوی مقادیر بالای کروم مطلوب است و این جلبک جاذب بیولوژیکی مؤثر، مقرون‌به‌صرفه و در دسترس برای حذف یون‌های کروم شش ظرفیتی محلول است.

## کلیدواژه‌ها:

اسپیروژیرا پرتیکالیس، جذب بیولوژیکی، فلزات سنگین، کروم شش ظرفیتی.

## مقدمه

فعالیت‌های صنعتی انسان باعث تولید و نشر آلاینده‌های مختلفی از قبیل ترکیبات آلی سمی، فلزات سنگین و مواد سرطان‌زا در محیط‌زیست می‌شود. فلزات سنگین به‌دلیل سمیت، غیرقابل تجزیه‌بودن و پایداری خود از اصلی‌ترین آلاینده‌ها در محیط‌زیست محسوب می‌شود و تهدیدی جدی

برای سلامت انسان در غلظت‌های بالاست [۱]. کروم که فلزی سنگین است، به‌صورت وسیع در صنایع آبکاری، نساجی، دباغی، چرم‌سازی و ساخت و پردازش آلیاژها و فلزات به‌کار می‌رود [۲]. این فلز در محیط‌زیست اغلب به دو شکل اکسیدشده سه ظرفیتی و شش ظرفیتی وجود دارد [۳]. خاصیت انحلال‌پذیری و انتشار کروم شش ظرفیتی در فاز محلول زیاد بالاست و به‌راحتی احیا می‌شود [۴]. سمیت کروم

\* نویسنده مسئول: حسین سیاف

نشانی: کاشان، بلوار قطب راوندی، دانشگاه علوم پزشکی کاشان، دانشکده بهداشت، گروه مهندسی بهداشت محیط، کد پستی: ۸۷۱۵۱-۸۱۱۵

تلفن: ۰۳۱-۵۵۵۴۰۰۲۱

رایانه: environmental\_sayaf@yahoo.com

مجله علمی پژوهشی دانشگاه علوم پزشکی سبزوار، دوره ۲۴، شماره ۳، مرداد و شهریور ۱۳۹۶، ص ۱۶۵-۱۷۱.

آدرس سایت: <http://jsums.medsab.ac.ir> رایانه: [journal@medsab.ac.ir](mailto:journal@medsab.ac.ir)

شاپای چاپی: ۱۶۰۶-۷۴۸۷

به‌واسطه عملکرد گروه‌های آمین، هیدروکسیل، کربوکسیل و سولفات ظرفیت بالایی در جذب فلزات دارد [۲۱]. ویژگی‌های دیگری که جلبک‌ها را گزینه مناسبی برای جذب بیولوژیایی فلزات انتخاب می‌کند عبارت است از در دسترس بودن در مقادیر فراوان، مقاومت بالا در برابر سمیت فلزات سنگین و بالابودن نسبت سطح به حجم آن [۲۲].

کومار و اومن در سال ۲۰۱۲ در بررسی حذف فلزات سنگین از منابع آبی با استفاده از جلبک سبز/اسپیروژیرا/هالیلینا مشخص کردند که توانایی جذب سرب و کبالت در این جلبک بسیار بالاست [۱۵]. راندمان بالای حذف فلزات سنگین در جلبک کلامیدوموناس در مطالعه بایراموگلا و همکاران در سال ۲۰۰۶ گزارش شد [۲۳]. مطالعه‌ای دیگر در مورد جذب بیولوژیایی فلز روی با جلبک/وسیلاتوریا را اهوچا و همکاران در سال ۱۹۹۹ انجام دادند [۲۴]. در مطالعه مشابهی نیز الشیخ و همکاران در سال ۲۰۰۵ توانایی جلبک‌های نوستوک موسکورومو/آناپنا را در حذف فلزات سنگین از فاضلاب‌های صنعتی بررسی کردند [۲۵].

مطالعه حاضر به‌منظور تعیین میزان توانایی این جلبک و کاربرد آن به‌صورت غیره زنده و با دوزهای پایین در حذف کروم شش ظرفیتی و با توجه به تأثیر پارامترهای pH، زمان تماس، دوز جلبک و غلظت اولیه کروم شش ظرفیتی در محلول‌های آبی دست‌ساز انجام گرفت.

## مواد و روش‌ها

### آماده‌سازی جاذب بیولوژیایی

اسپیروژیرا پرتیکالیس جلبکی رشته‌ای است که به‌صورت توده‌های متراکم سبز رنگ در برکه‌های آب شیرین، رودخانه‌ها و جریان‌های آبی زندگی می‌کند. در این مطالعه جلبک‌های سبز/اسپیروژیرا پرتیکالیس از طول رودخانه قهرود واقع در شهرستان کاشان جمع‌آوری شد و پس از شناسایی با میکروسکوپ نوری برای حذف آلودگی‌ها و ذرات خارجی، چندین مرتبه با آب مقطر شستشو داده شد. پس از شستشو، جلبک‌ها برای خشک‌شدن نخست دوازده ساعت در معرض هوای آزاد و سپس به‌مدت دوازده ساعت در داخل آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. در نهایت، جلبک‌ها برای جذب با میکسری خانگی در اندازه (Mesh) ۴ تا ۵ میلی‌متر و به‌صورت پودر درآمد.

### آماده‌سازی محلول‌های حاوی کروم

محلول استوک کروم شش ظرفیتی (۵۰۰ mg/L) از طریق حل کردن ۱/۴۱۷ گرم دی‌کرومات پتاسیم ( $K_2Cr_2O_7$ ) با درصد

شش ظرفیتی بیش از کروم سه ظرفیتی است، به‌طوری که کروم شش ظرفیتی برای انسان و حیوانات سرطان‌زا و جهش‌زاست. مواجهه مزمن با کروم شش ظرفیتی باعث سرطان در اندام‌های گوارشی و شش‌ها، درد در ناحیه بالایی معده، اسهال شدید و حالت تهوع می‌شود [۲]. کروم شش ظرفیتی به‌راحتی وارد سلول می‌شود و آثار سمی خود را از طریق اکسایش و تشکیل رادیکال‌های آزاد به‌جامی‌گذارد. این فلز حتی در غلظت‌های کم باعث ایجاد واکنش‌های آلرژیایی شدید مانند آسم و برونشیت می‌شود. از دیگر عوارض مهم کروم شش ظرفیتی آسیب به DNA است [۵ و ۶]. از این‌رو، طبق توصیه سازمان جهانی بهداشت (WHO) حد مجاز کروم شش ظرفیتی در آب آشامیدنی ۰/۰۵ mg/L است و میزان کروم کل در فاضلاب‌های تخلیه‌شونده به آب‌های پذیرنده باید کمتر از ۲ mg/L باشد [۷].

روش‌های مختلفی برای حذف یون‌های کروم شش ظرفیتی از محلول‌های آبی و فاضلاب‌های صنعتی وجود دارد، از جمله ترسیب شیمیایی، ترسیب الکتروشیمیایی، تعویض یونی، اسمز معکوس، فرایندهای غشایی و جذب توسط جاذب‌های مختلف [۸-۱۰]. اما، این روش‌ها دارای معایبی است، از جمله عدم حذف کامل فلزات، هزینه و انرژی مصرفی بالا، تولید لجن و مواد سمی. از این‌رو، نیاز به کاربرد روش‌های جدیدی است که دارای بازده بالا و هزینه‌های کم باشد [۱۱-۱۳].

در سال‌های اخیر، تحقیقات روی جذب بیولوژیکی فلزات سنگین محلول به‌وسیله جاذب‌های بیولوژیکی متمرکز بوده است. جذب بیولوژیکی فرایندی است که در آن حذف فلزات سنگین از طریق پیوندهای غیرفعال با میکروارگانیسم‌های غیرزنده از محلول صورت می‌گیرد [۱۴ و ۱۵]. سازوکار حذف در فرایند جذب بیولوژیایی به‌صورت غیرمتابولیکی کنترل می‌شود و یون‌های فلزی در اثر جذب روی بیومس‌ها، با آن‌ها تشکیل کمپلکس می‌دهد و در نهایت حذف می‌شود [۱۶]. جذب بیولوژیایی نسبت به روش‌های متداول مزایایی دارد، مانند قابلیت استفاده مجدد از توده‌های بیولوژیایی، قابل استفاده بودن در محل، عدم تولید لجن شیمیایی و ترکیبات ثانویه خطرناک و هزینه بهره‌برداری پایین [۱۷ و ۱۸]. انواع جاذب‌های بیولوژیایی که در حذف فلزات سنگین از محلول‌های آبی و فاضلاب‌های صنعتی استفاده می‌شود عبارت است از باکتری‌ها، ویروس‌ها، قارچ‌ها، مخمرها، کپک‌ها و جلبک‌ها [۱۹ و ۲۰].

از میان جاذب‌های بیولوژیایی، جلبک‌ها به‌دلیل وجود پلی‌ساکاریدها، پروتئین‌ها و لیپیدها در دیواره سلولی خود و

که  $q_e$  مقدار کروم شش ظرفیتی جذب شده به ازای هر گرم جلبک (mg/g)،  $V$  حجم محلول آبی (mL) و  $W$  وزن ماده جذب (g) است.

### یافته‌ها

#### اثر pH

بر اساس نتایج به دست آمده مشخص شد که فرایند حذف کروم شش ظرفیتی در مقادیر مختلف pH متفاوت است و این پارامتر بیشترین تأثیر را در راندمان حذف دارد (شکل ۱). طی این مطالعه بالاترین مقدار حذف کروم در  $pH=3$  مشاهده شد و با افزایش pH تا رسیدن به  $pH$  خنثی راندمان حذف کاهش می‌یابد. سپس در  $pH=11$  راندمان با نسبت کمی افزایش می‌یابد. در  $pH=3$  با مقدار  $1 \text{ g/L}$  بیومس و ۱ ساعت زمان تماس راندمان حذف کروم ۷۰ درصد به دست آمد. از  $pH 3$  تا ۷ راندمان حذف  $26/48$  درصد کاهش و در مقابل، از  $pH 7$  تا ۱۱ میزان راندمان  $11/93$  درصد افزایش یافت.

#### اثر دوز جلبک

طی آزمایش‌هایی که در نمونه‌های  $100 \text{ mL}$  با غلظت  $\text{mg/L}$  ۴۰ کروم شش ظرفیتی، زمان تماس یک ساعت،  $pH=3$  و با دوزهای  $0/2$ ،  $0/5$  و  $1$  گرم بر لیتر جلبک و در دمای  $25$  درجه سانتی‌گراد انجام شد مشخص گردید که میزان حذف کروم شش ظرفیتی با افزایش مقدار دوز جلبک افزایش می‌یابد، به طوری که دوز  $1 \text{ g/L}$  بیشترین راندمان حذف را نشان داد. راندمان حذف کروم از دوز  $0/2$  تا  $1$  گرم بر لیتر، حدود  $15$  درصد افزایش یافت (شکل ۱). میزان ظرفیت حذف مخصوص کروم شش ظرفیتی بر اساس یون‌های جذب شده توسط هر گرم جلبک در شکل ۲ و ۳ نشان داده شده است.

#### اثر زمان تماس

یافته‌های به دست آمده در مطالعه حاضر نشان داد که در فرایند حذف کروم شش ظرفیتی با جلبک *اسپیروژیلا پرتیکالیس* با افزایش زمان تماس، راندمان حذف افزایش می‌یابد. بیشترین میزان حذف در زمان تماس ۶۰ دقیقه اتفاق افتاد، به طوری که به ازای افزایش ۳۰ دقیقه‌ای زمان تماس، راندمان حذف کروم شش ظرفیتی ۱۸ درصد افزایش یافت (شکل ۴).

#### اثر غلظت اولیه فلز

برای بررسی اثر غلظت اولیه فلز در این مطالعه، غلظت‌های  $10$ ،  $25$  و  $40$  میلی‌گرم بر لیتر کروم شش ظرفیتی استفاده شد. بر اساس نتایج به دست آمده مشخص شد که با افزایش غلظت اولیه

خلوص ۹۹ درصد در  $1$  لیتر آب مقطر ساخته شد. سپس، محلول‌های آبی دست‌ساز حاوی مقادیر مختلفی کروم شش ظرفیتی از محلول استوک و از طریق رقیق‌سازی ساخته شد؛ به این صورت که برای ساخت محلول‌های حاوی  $10$ ،  $25$  و  $40$  میلی‌گرم بر لیتر کروم شش ظرفیتی به ترتیب مقادیر  $2$ ،  $5$  و  $8$  میلی‌لیتر از محلول استوک به  $100 \text{ mL}$  آب مقطر اضافه شد.

#### انجام آزمایش

این مطالعه به صورتی تجربی و در مقیاس آزمایشگاهی و در سیستم بسته انجام شد. آزمایش‌ها در ظروف  $250 \text{ mL}$  حاوی  $100 \text{ mL}$  نمونه دست‌ساز با غلظت‌های اولیه  $10$ ،  $25$  و  $40$  میلی‌گرم بر لیتر کروم شش ظرفیتی انجام گرفت. نمونه‌های موجود با شیکر با  $150$  دور در دقیقه در  $pH$ های  $3$ ،  $7$  و  $11$ ، دوز جلبک  $0/2$ ،  $0/5$  و  $1$  گرم بر لیتر و در زمان‌های تماس  $30$ ،  $45$  و  $60$  دقیقه و در دمای معمولی آزمایشگاه مخلوط شد. برای تنظیم pH از اسید سولفوریک  $0/5$  مولار و سودسوزآور  $1$  مولار استفاده شد. پس از سپری شدن زمان اختلاط، جداسازی جاذب با کاغذ صافی (Whatman No-1) انجام گرفت.

برای اندازه‌گیری غلظت کروم شش ظرفیتی باقیمانده، از روش رنگ‌سنجی با معرف  $50$  دی‌فنیل کاربازاید در محلول اسیدی استفاده شد؛ به این صورت که به هر  $25 \text{ mL}$  نمونه صاف شده  $0/5$  میلی‌لیتر معرف دی‌فنیل کاربازاید در محیطی اسیدی اضافه شد. شدت رنگ ایجاد شده در هر نمونه تعیین‌کننده میزان کروم شش ظرفیتی باقیمانده بود. برای قرائت میزان جذب دستگاه اسپکترو فوتومتر مرئی (مدل DR/2010, Hach, U.S.A) در طول موج  $540$  نانومتر استفاده شد [۲۶]. برای انجام آنالیزهای آماری در این مطالعه از آزمون اندازه‌های تکراری و آنالیز واریانس یک‌طرفه با کمک نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۶ استفاده شد. همچنین،  $P < 0/05$  سطح معنادار در نظر گرفته شد. در نهایت، درصد حذف کروم شش ظرفیتی پس از جذب از رابطه (۱) به دست آمد.

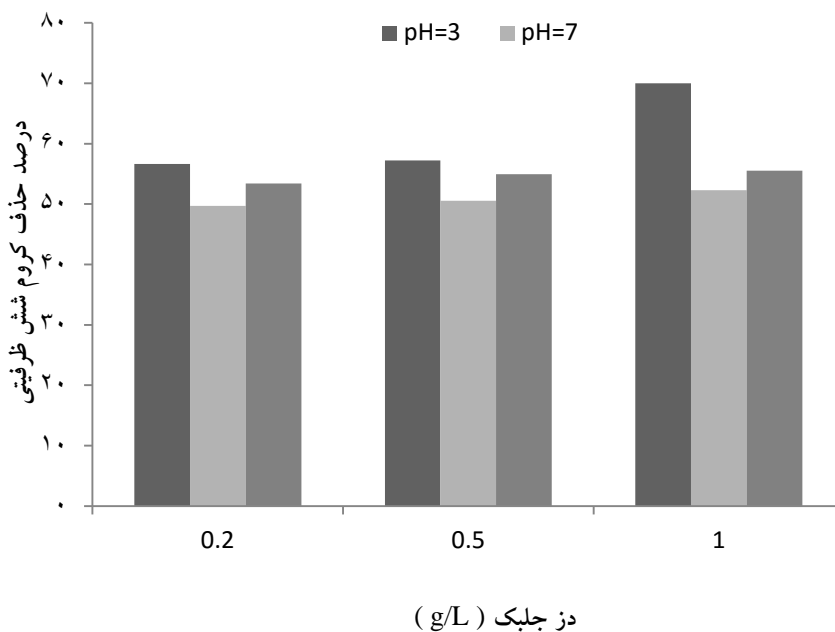
$$\text{درصد حذف کروم شش ظرفیتی} = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

که در آن  $C_0$  میزان غلظت اولیه کروم شش ظرفیتی و  $C_e$  میزان غلظت کروم شش ظرفیتی پس از تماس با جاذب است. همچنین، مقدار ظرفیت حذف مخصوص کروم شش ظرفیتی به ازای هر گرم جلبک از رابطه (۲) به دست آمد.

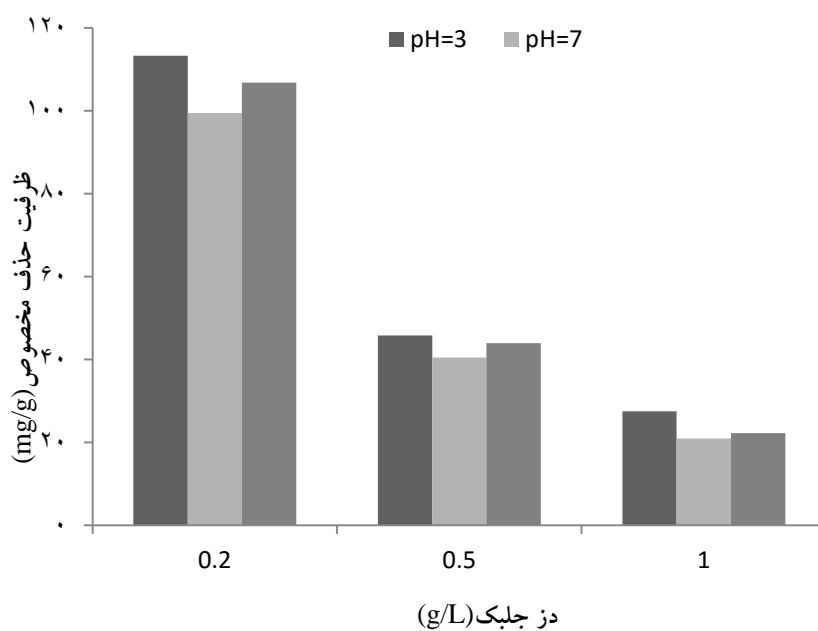
$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{1000w} \quad (2)$$

۱۱ pH از ۲/۷۳ به ۲۲/۲۳ میلی گرم بر گرم افزایش یافت. همچنین، راندمان حذف با افزایش میزان غلظت اولیه کروم شش ظرفیتی از ۱۰ تا ۴۰ میلی گرم بر لیتر حدود ۲۲ درصد افزایش یافت (شکل ۴).

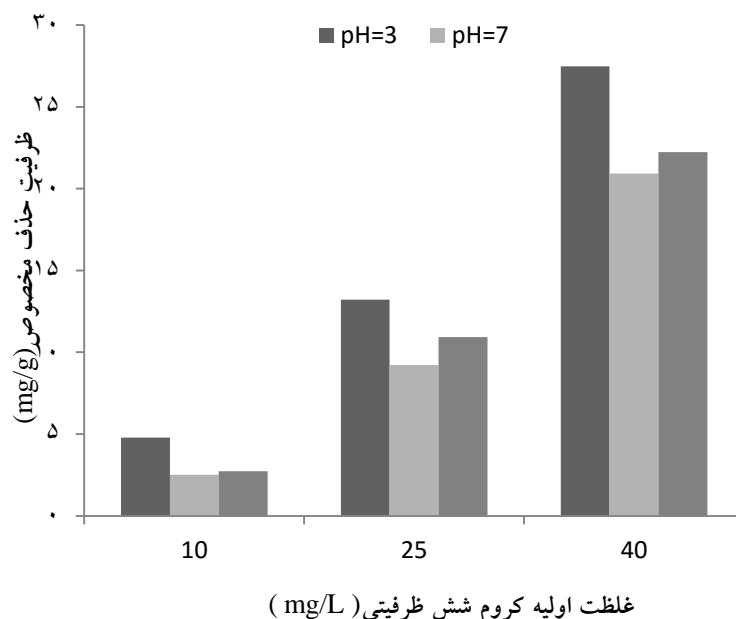
کروم شش ظرفیتی، راندمان حذف نیز افزایش می یابد. مقدار کروم جذب شده به ازای هر گرم جلبک از غلظت اولیه ۱۰ تا ۴۰ میلی گرم بر لیتر و در pH=۳ از ۴/۷۸ به ۲۷/۴۸ میلی گرم بر گرم، در pH=۷ از ۲/۵۱ به ۲۰/۹۲ میلی گرم بر گرم و در



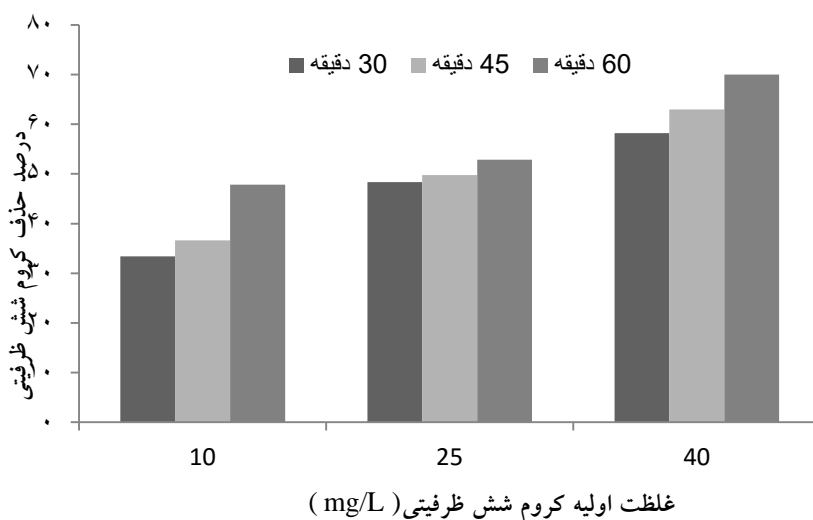
شکل ۱. اثر pH و دوز جلبک بر راندمان حذف کروم شش ظرفیتی (غلظت اولیه کروم برابر ۴۰ mg/L و زمان تماس ۶۰ دقیقه)



شکل ۲. میزان کروم شش ظرفیتی جذب شده به ازای وزن هر گرم جلبک (غلظت اولیه کروم برابر ۴۰ mg/L و زمان تماس ۶۰ دقیقه)



شکل ۳. ظرفیت حذف مخصوص با اثر pH و غلظت اولیه فلز (دوز جلبک ۱ g/L و زمان تماس ۶۰ دقیقه)



شکل ۴. تأثیر غلظت اولیه فلز و زمان تماس بر راندمان حذف کروم شش ظرفیتی (pH برابر ۳ و دوز جلبک ۱ g/L)

## بحث

منفی از طریق جذب الکترواستاتیکی روی گروه‌های عملکردی موجود در دیواره سلولی بیومس و دارای بار مثبت باند می‌شود. با نزدیک شدن pH به مقادیر خنثی بار سطحی دیواره سلولی بیومس منفی می‌شود و در نتیجه میزان جذب بیولوژیایی کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، در pH بالای ۸ میزان تشکیل یون  $\text{CrO}_4^{2-}$  در محلول افزایش می‌یابد و احتمالاً افزایش جزئی میزان راندمان حذف در  $\text{pH}=11$  به این دلیل است. از آنجا که

در محلول‌های آبی حاوی فلزات سنگین، pH از لحاظ انجام واکنش‌های شیمیایی از قبیل هیدرولیز، تشکیل کمپلکس با مواد آلی و معدنی، رسوب و احیا پارامتری تأثیرگذار محسوب می‌شود. در این مطالعه میزان حذف کروم شش ظرفیتی در  $\text{pH}=3$  بهترین نتایج را در برداشت. علت آن احتمالاً این است که در شرایط اسیدی یون‌های کروم شش ظرفیتی و دارای بار

بیشتر جاذب در محلول است. با توجه به نتایج در مقادیر ثابت pH، غلظت اولیه کروم شش ظرفیتی و زمان تماس، افزایش دوز جلبک باعث افزایش راندمان حذف می‌شود ( $P=0/001$ ) که این امر نشان‌دهنده تأثیر دوز جلبک در میزان حذف کروم شش ظرفیتی است. البته، با افزایش دوز جلبک میزان ظرفیت حذف مخصوص کروم شش ظرفیتی ( $q_e$ ) به دلیل رقابت یون‌ها برای قرارگرفتن در محل‌های در دسترس سطح جاذب، کاهش می‌یابد.

نتایج به‌دست‌آمده طی این مطالعه حاکی از این است که با گذشت زمان اختلاط به‌دلیل افزایش میزان تماس و تعداد برخورد یون‌های کروم شش ظرفیتی با جاذب و پیوند آن روی فضاهای خالی موجود در سطح دیواره سلولی جلبک، بازده حذف افزایش می‌یابد، به طوری که بین افزایش زمان تماس و افزایش راندمان حذف کروم شش ظرفیتی از محلول در همه سطوح pH ( $P=0/004$ )، دوزهای مختلف جاذب ( $P=0/001$ ) و در تمام غلظت‌های اولیه کروم شش ظرفیتی ( $P<0/001$ ) رابطه مستقیم معناداری برقرار است.

### نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که توانایی پودر جلبک سبز اسپروژیرا پرتیکالیس حتی در دوزهای پایین در حذف کروم شش ظرفیتی محلول مطلوب است و از آن می‌توان به‌عنوان جاذبی ارزان‌قیمت و در دسترس برای تصفیه فاضلاب‌های صنعتی دارای مقادیر بالای کروم و pH بین ۱ تا ۳، مستقیماً و بدون اضافه‌کردن اسید استفاده کرد. این موضوع در نهایت موجب کاهش هزینه‌های طراحی و بهره‌برداری تصفیه‌خانه‌های فاضلاب صنعتی می‌شود. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، به‌کارگیری جلبک‌های سبز به‌صورت زنده در تجمع بیولوژیایی فلزات سنگین و ترکیبات سمی موجود در محلول‌های آبی، فاضلاب‌های خانگی و صنعتی و مقایسه آن با جذب بیولوژیایی بررسی شود.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از معاونت پژوهشی دانشگاه علوم پزشکی کاشان به‌دلیل حمایت مالی در انجام این مطالعه تشکر و قدردانی به‌عمل می‌آورند.

با کاهش pH میزان حذف کروم شش ظرفیتی افزایش می‌یابد، فاضلاب‌های صنعتی دارای مقادیر بالای کروم و pH اسیدی، مستقیماً و بدون اضافه‌کردن اسید برای حذف کروم شش ظرفیتی تصفیه می‌شود. این امر در نهایت هزینه‌های طراحی و بهره‌برداری تصفیه‌خانه‌های فاضلاب صنعتی را کاهش می‌دهد [۲ و ۲۷].

در فرایند جذب بیولوژیایی هر چه میزان غلظت اولیه فلز در محلول بیشتر باشد، توانایی بیومس‌ها نیز در جذب فلزات افزایش می‌یابد. این موضوع در مطالعات گذشته به اثبات رسیده است. اهوچاو و همکاران در سال ۱۹۹۹ طی تحقیقات خود مشخص کردند که با افزایش غلظت اولیه فلز روی، میزان جذب این فلز در جلبک *اسیلاتوریا* افزایش می‌یابد [۲۴]. مهتا و گوار نیز در سال ۲۰۰۱ دریافتند که با افزایش غلظت اولیه فلزات نیکل و مس در محلول‌های آبی توانایی جذب بیولوژیایی در جلبک *کلرلا ولکاریس* افزایش می‌یابد [۲۸]. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده طی مطالعه حاضر، با افزایش غلظت اولیه کروم شش ظرفیتی در تمامی مقادیر pH، دوزهای بیومس مورد استفاده و زمان‌های تماس موجود، راندمان حذف نیز افزایش یافت. به‌نظر می‌رسد که احتمالاً علت این امر، در دسترس بودن میزان بالای یون‌های کروم شش ظرفیتی در محلول باشد. همچنین، غلظت بالای کروم شش ظرفیتی در محلول باعث افزایش نیروی غلبه بر مقاومت انتقال جرم بین فاز جامد و محلول در یون‌های فلز می‌شود.

دیواره سلولی جلبک‌ها به‌دلیل عملکرد پلی‌ساکاریدهای مختلف از قبیل سلولز، کیتین، گلیکان و نیز وجود سولفات و گروه کربوکسیل توانایی زیادی در جذب بیولوژیایی فلزات سنگین دارد. مطالعات گذشته بیانگر این امر بود. آواستی و رای در سال ۲۰۰۴ نشان دادند که جلبک *آنکستیس نیدولانس* در حذف فلزات کادمیم و نیکل و جلبک *کلرلا* در حذف فلز روی از محلول‌های آبی توانایی بسیار بالایی دارد و با افزایش دوز جلبک این میزان نیز افزایش می‌یابد [۲۹]. دنگ و همکاران در سال ۲۰۰۹ توانایی جلبک *سبز کلادوفورا آلبیدا* را در حذف کروم شش ظرفیتی از محلول‌های آبی بررسی کردند که با دوز ۱ گرم بر لیتر به حدود ۴۵ درصد حذف و با دوز بیومس ۱۰ گرم بر لیتر به راندمان حذف ۹۸ درصد دست‌یافتند [۲]. در مطالعه حاضر، با افزایش دوز جلبک، میزان حذف کروم شش ظرفیتی افزایش یافت که علت آن در دسترس بودن مقدار

### References

[1] Wuana RA, Okieimen FE. Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. *ISRN Ecology*, 2011; 402-647.

[2] Deng L, Zhang Y, Qin J, Wang X, Zhu X. Biosorption of Cr (VI) from aqueous solutions by nonliving green algae *Cladophora albida*. *Miner Eng*, 2009; 22(4): 372-7.

[3] Krishna D, Krishna KS, Sree RP. Response surface modeling

- and optimization of chromium (VI) removal from aqueous solution using *Borassus flabellifer* coir powder. *Int J Appl Sci Eng*, 2013; 11(2): 213-26.
- [4] Valli VG, Rao G, Sridevi V, Keerthi K. Optimization of process parameters for biosorption of chromium using green algae. *Int J Appl Innov Eng Manage*, 2013; 2(6): 142-7.
- [5] Li H, Li Z, Liu T, Xiao X, Peng Z, Deng L. A novel technology for biosorption and recovery hexavalent chromium in wastewater by bio-functional magnetic beads. *Bioresource Technol*, 2008; 99(14): 6271-9.
- [6] Tchobanoglous G, Kreith F. Handbook of solid waste management. 2<sup>nd</sup> ed. New York: McGraw-Hill Companies, Inc; 2002, chapter 11, p. 51.
- [7] World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality. Volume 1, 3<sup>rd</sup> edition. Geneva: Recommendations; 2008.
- [8] Krishna D, Sree RP. Removal of Chromium (VI) from aqueous solution by *Limonia acidissima* hull powder as adsorbent. *J Future Eng Technol*, 2012; 7(4): 27-38.
- [9] Park D, Yun YS, Park JM. The past, present, and future trends of biosorption. *Biotechnol Bioproc E*, 2010; 15(1): 86-102.
- [10] Jain M, Garg V, Kadirvelu K. Investigation of Cr (VI) adsorption onto chemically treated *Helianthus annuus*: Optimization using Response Surface Methodology. *Bioresource Technol*, 2011; 102(2): 600-5.
- [11] Chen YL, Hong XQ, He H, Luo HW, Qian TT, Li RZ, et al. Biosorption of Cr (VI) by *Typha angustifolia*: Mechanism and responses to heavy metal stress. *Bioresource Technol*, 2014; 160: 89-92.
- [12] Gupta S, Babu B. Utilization of waste product (tamarind seeds) for the removal of Cr (VI) from aqueous solutions: Equilibrium, kinetics, and regeneration studies. *J Environ Manage*, 2009; 90(10): 3013-22.
- [13] Hasan S, Singh K, Prakash O, Talat M, Ho Y. Removal of Cr (VI) from aqueous solutions using agricultural waste 'maize bran'. *J Hazard Mater*, 2008; 152(1): 356-65.
- [14] Reddy D, Seshaiiah K, Reddy A, Lee S. Optimization of Cd (II), Cu (II) and Ni (II) biosorption by chemically modified *Moringa oleifera* leaves powder. *Carbohydr Polym*, 2012; 88(3): 1077-86.
- [15] Kumar J, Oommen C. Removal of heavy metals by biosorption using freshwater alga *Spirogyra hyalina*. *J Environ Biol*, 2012; 33: 27-31.
- [16] Mohanty K, Jha M, Meikap B, Biswas M. Biosorption of Cr (VI) from aqueous solutions by *Eichhorniacrassipes*. *Chem Eng J*, 2006; 117(1): 71-7.
- [17] Srinath T, Verma T, Ramteke P, Garg S. Chromium (VI) biosorption and bioaccumulation by chromate resistant bacteria. *Chemosphere*, 2002; 48(4): 427-35.
- [18] Ahluwalia SS. Microbial removal of hexavalent chromium and scale up potential. *Int J Curr Microbiol App Sci*, 2014; 3(6): 383-98.
- [19] Abidin ZZ, Salleh M, Harun M, Bakar A. Biosorption of Zn (II) from aqueous solution by *Jatropha curcas* press cake. *J Sci Ind Res*, 2014; 73(3): 191-4.
- [20] Suresh B, Ravishankar G. Phytoremediation-A novel and promising approach for environmental clean-up. *Crit Rev Biotechnol*, 2004; 24(2-3): 97-124.
- [21] Deng L, Su Y, Su H, Wang X, Zhu X. Sorption and desorption of lead (II) from wastewater by green algae *Cladophora fascicularis*. *J Hazard Mater*, 2007; 143(1): 220-5.
- [22] Tien CJ. Biosorption of metal ions by freshwater algae with different surface characteristics. *Process Biochem*, 2002; 38(4): 605-13.
- [23] Bayramoğlu G, Tuzun I, Celik G, Yilmaz M, Arica MY. Biosorption of mercury (II), cadmium (II) and lead (II) ions from aqueous system by microalgae *Chlamydomonas reinhardtii* immobilized in alginate beads. *Int J Miner Process*, 2006; 81(1): 35-43.
- [24] Ahuja P, Gupta R, Saxena R. Zn<sup>2+</sup> biosorption by *Oscillatoria angustissima*. *Process Biochem*, 1999; 34(1): 77-85.
- [25] El-Sheekh MM, El-Shouny WA, Osman ME, El-Gammal EW. Growth and heavy metals removal efficiency of *Nostoc muscorum* and *Anabaena subcylindrica* in sewage and industrial wastewater effluents. *Environ ToxicolPhar*, 2005; 19(2): 357-65.
- [26] Eaton AD, Clesceri LS, Greenberg AE. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21th edition. Washington, DC : American Public Health Association; 2005. p.2001.
- [27] Barrera H, Ureña-Núñez F, Bilyeu B, Barrera-Díaz C. Removal of chromium and toxic ions present in mine drainage by *Ectodermis* of *Opuntia*. *J Hazard Mater*, 2006; 136(3): 846-53.
- [28] Mehta SK, Gaur JP. Removal of Ni and Cu from single and binary metalsolutions by free and immobilized *Chlorella vulgaris*. *Eur J Protistol*, 2001; 37(3): 261-71.
- [29] Awasthi M, Rai L. Adsorption of nickel, zinc and cadmium by immobilized green algae and cyanobacteria: a comparative study. *Ann Microbiol*, 2004; 54(3): 257-67.