



## Evaluation of the efficiency of biodegradable cellulose hydrogels in removing metal ions

Khadijeh Khorram<sup>1</sup>, Nooreddin Nazarnezhad<sup>2\*</sup>, Seyyed Majid Zabihzadeh<sup>3</sup>, Shaghayegh Rezanezhad<sup>4</sup>

1- Corresponding Author, associated professor, wood and cellulose product department, Sari agricultural and natural resources university, Iran. E-mail: [nazarnezhad91@gmail.com](mailto:nazarnezhad91@gmail.com)

2- Master degree, wood and cellulose product department, Sari agricultural and natural resources university, Iran

3- Associated professor, wood and cellulose product department, Sari agricultural and natural resources university, Iran

4- Ph.D. wood and cellulose product department, Sari agricultural and natural resources university, Iran

Received: October 2026

Accepted: December 2026

### Abstract

**Problem definition and objectives:** Today, the study about biodegradable and environmentally friendly adsorbents has received great attention. Cellulose-based adsorbents are considered as one of the most important adsorbents to separation and purification of heavy metals from water and wastewater in industries due to their abundance, biodegradability, and decomposition ability. Cellulose-based hydrogels are a group of polymeric materials with a three-dimensional network structure and physical or chemical crosslinks, and they are suitable materials for use as adsorbents due to their special properties such as hydrophilic nature, water absorption power, and desirable flexibility.

**Methodology:** In this study, hydrogel was prepared by using chitosan and cellulose. Chitosan and alpha-cellulose powder were mixed in equal proportions and 2 grams of each were used to prepare the hydrogel. Then, the hydrogels prepared based on chitosan-cellulose were used to treat wastewater containing heavy metals such as copper, lead, and cadmium. To simulate wastewater, an aqueous solution of heavy metals with an initial concentration of 30 ppm was prepared by diluting the standard solution with distilled water. Chitosan-cellulose hydrogel adsorbent was added in two amounts of 0.5 and 1 g to the aqueous solution containing heavy metals and was kept under continuous stirring for 24 hours. The final concentration of metals evaluated by atomic absorption spectrometry. Also, the efficiency of the hydrogel adsorbent in the adsorption of copper, lead and cadmium was studied by the hydration rate and hydrogel dissolution rate. Also, the effect of pH of aqueous solutions and amount of chitosan-cellulose hydrogel adsorbent on the adsorption of heavy metals was investigated.

**Results:** Examination of the samples by atomic absorption spectroscopy showed that the lowest amount of copper absorption was obtained in the P3C0 treatment, at 5.37 ppm, and the highest amount was obtained in the P7C1 treatment, at 1.34 ppm. The lowest amount of lead absorption was obtained in the P3C0 treatment, at 0.92 ppm, and the highest amount of lead absorption was obtained in the P5C0, P7C0, P9C0, P5C1, P7C1, and P9C1 treatments, at zero. Also, the lowest amount of cadmium absorption was in the P3C0 treatment at 13.6 ppm and the highest amount of

cadmium metal absorption was in the P7C1 treatment at 19.2 ppm. Also, the results showed that with increasing pH towards neutral and alkaline, the absorption amount decreased in all samples and adsorbent amounts. The results of the absorption of all three heavy metals with chitosan-cellulose hydrogel showed that in the adsorbent amount of 0.5 and 1 g, the absorption amount increased with increasing adsorbents amount. The average hydration rate obtained is 0.3. This means that 30% of the hydrogel volume is water. The study of the dissolution rate of chitosan-cellulose hydrogel beads in three solvents: sodium hydroxide, hydrochloric acid, and sulfuric acid showed that the highest and lowest dissolution rates were for hydrochloric acid at 1 and sodium at 0.27, respectively. The optimal amount of chitosan-cellulose hydrogel for the absorption of all three metals, copper, lead, and cadmium, was 1 g of the adsorbents. The best pH for the removal of all three heavy metals from its aqueous solution was neutral. Chitosan-cellulose hydrogel has the best efficiency in removing lead from its aqueous solution with a 100% reduction compared to the control sample.

**Conclusion:** According to the results, it can be said that hydrogel adsorbents prepared from chitosan-cellulose have a good performance in removing heavy metals. Also, these materials with a biodegradable and environmentally friendly structure are considered promising adsorbents for separating and purifying pollutants from water and wastewater. The results of the research showed that chitosan-cellulose hydrogel has a better performance in removing lead from aqueous solution than in removing copper and cadmium.

**Keywords:** Effluent, heavy metals, atomic absorption spectroscopy, chitosan-cellulose hydrogel.

## بررسی کارایی هیدروژل‌های زیست تخریب‌پذیر سلولزی در حذف یون‌های فلزی

خدیجه خرم<sup>۱</sup>، نورالدین نظرنژاد<sup>۲\*</sup>، سید مجید ذبیح زاده<sup>۳</sup>، شقایق رضانژاد<sup>۴</sup>

۱- فارغ التحصیل کارشناس ارشد، گروه صنایع چوب و فرآورده‌های سلولزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران  
 ۲- نویسنده مسئول، دانشیار، گروه صنایع چوب و فرآورده‌های سلولزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران، رایانامه: [nazamezhad91@gmail.com](mailto:nazamezhad91@gmail.com)

۳- دانشیار، گروه صنایع چوب و فرآورده‌های سلولزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

۴- دکتری صنایع خمیر و کاغذ، گروه صنایع چوب و فرآورده‌های سلولزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران

تاریخ پذیرش: آذر ۱۴۰۴

تاریخ دریافت: مهر ۱۴۰۴

### چکیده

**بیان مساله و اهداف:** امروزه مطالعه در مورد جاذب‌های زیست تخریب‌پذیر و دوست‌دار محیط زیست مورد توجه زیادی قرار گرفته است. جاذب‌های بر پایه سلولز به دلیل فراوانی ماده اولیه و زیست تخریب‌پذیری و قابلیت تجزیه یکی از مهم‌ترین جاذب‌ها جهت جداسازی و تصفیه فلزات سنگین از آب و پساب در صنایع محسوب می‌شوند. هیدروژل‌های بر پایه سلولز، دسته‌ای از مواد پلیمری با ساختار شبکه‌ای سه بعدی و دارای پیوندهای عرضی فیزیکی و یا شیمیایی هستند و به دلیل دارا بودن ویژگی‌های خاصی مانند طبیعت آبدوست، قدرت جذب آب و انعطاف‌پذیری مطلوب، موادی مناسب جهت استفاده به عنوان جاذب هستند.

**مواد و روش‌ها:** در این پژوهش با استفاده از کیتوزان و سلولز، هیدروژل تهیه شد. از کیتوزان و پودر آلفا سلولز به با نسبت برابر و از هر کدام ۲ گرم جهت اختلاط و تهیه هیدروژل استفاده گردید. سپس هیدروژل‌های تهیه شده بر پایه کیتوزان - سلولز، جهت تصفیه پساب حاوی فلزات سنگین مس، سرب و کادمیوم مورد استفاده قرار گرفت. جهت شبیه‌سازی پساب، محلول آبی فلزات سنگین با غلظت اولیه ۳۰ ppm از طریق رقیق کردن محلول استاندارد با آب مقطر تهیه شد. جاذب هیدروژل کیتوزان - سلولز با دو مقدار ۰/۵ و ۱ گرم به محلول آبی حاوی فلزات سنگین اضافه شد و به مدت ۲۴ ساعت و تحت هم‌زدن پیوسته قرار گرفت. غلظت نهایی فلزات به‌وسیله دستگاه طیف‌سنجی جذب اتمی اندازه‌گیری شد. همچنین کارایی جاذب هیدروژل در جذب مس، سرب و کادمیم با آزمون‌های نرخ هیدراسیون و نرخ انحلال هیدروژل مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین تأثیر pH محلول‌های آبی و مقدار جاذب هیدروژل کیتوزان - سلولز روی جذب فلزات سنگین بررسی شد.

**نتایج:** بررسی نمونه‌ها با طیف‌سنجی جذب اتمی نشان داد که کمترین مقدار جذب مس در تیمار P3C0، به مقدار ۵/۳۷ ppm و بیشترین آن در تیمار P7C1، به مقدار ۱/۳۴ ppm بدست آمد. کمترین مقدار جذب سرب در تیمار P3C0 به مقدار ۰/۹۲ ppm و بیشترین مقدار جذب سرب در تیمارهای P5C0، P7C0، P9C0، P5C1، P7C1 و P9C1 و به مقدار صفر بود. همچنین کمترین مقدار جذب کادمیم در تیمار P3C0 به مقدار ۶/۱۳ ppm و بیشترین مقدار جذب فلز کادمیم در تیمار P7C1 به مقدار ۲/۱۹ ppm بود. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش pH به سمت خنثی و قلیایی مقدار جذب کاهش پیدا کرده است. نتایج جذب هر سه فلز سنگین با هیدروژل کیتوزان - سلولز در مقدار جاذب ۰/۵ و ۱ گرم نشان داد که مقدار جذب، با افزایش مقدار جاذب افزایش یافته است. متوسط نرخ هیدراسیون به‌دست آمده ۰/۳ می‌باشد. این به این معنی است که ۳۰ درصد حجم هیدروژل را آب تشکیل می‌دهد. بررسی نرخ انحلال دانه‌های هیدروژل کیتوزان - سلولز در سه حلال هیدروکسید سدیم، هیدروکلریک اسید و سولفوریک اسید نشان داد که بیشترین و کم‌ترین نرخ انحلال به ترتیب مربوط به هیدروکلریک اسید به مقدار ۱ و سود به مقدار ۰/۲۷ می‌باشد. مقدار بهینه هیدروژل کیتوزان - سلولز برای جذب هر سه فلز مس، سرب و کادمیم ۱ گرم جاذب بود. بهترین pH برای حذف هر سه فلز

سنگین از محلول آبی آن در محدوده خنثی بود. هیدروژل کیتوزان - سلولز بهترین کارایی را در حذف سرب از محلول آبی آن با ۱۰۰ درصد کاهش نسبت به نمونه شاهد دارد.

**نتیجه‌گیری:** با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت که جاذب‌های هیدروژل تهیه شده از کیتوزان - سلولز، عملکرد مناسبی در حذف فلزات سنگین دارند. همچنین این مواد با ساختاری زیست تخریب‌پذیر و دوست‌دار محیط زیست، جاذب‌هایی امیدوارکننده برای جداسازی و تصفیه آلاینده‌ها از آب و پساب به شمار می‌روند. نتایج حاصل از پژوهش نشان داد که هیدروژل کیتوزان - سلولز در حذف سرب از محلول آبی عملکرد بهتری نسبت به حذف مس و کادمیم دارد.

### واژه‌های کلیدی: پساب، فلزات سنگین، طیف سنجی جذب اتمی، هیدروژل کیتوزان - سلولز

#### مقدمه

هیدروژل‌ها شبکه‌های ماکرومولکولی هستند که در پاسخ به محرک‌های محیطی ویژه، قادر به جذب و آزادسازی برگشت‌پذیر محلول‌های آبی هستند. به‌ویژه در مواردی که موضوع زیست‌محیطی و زیست‌سازگاری هم-زمان مورد توجه باشند؛ زیست‌تخریب‌پذیری شبکه هیدروژل به همراه کنترل نرخ تخریب می‌تواند به ارزش این مواد بیفزاید. پلیمرهای آب‌دوست می‌توانند با اتصالات عرضی شیمیایی و فیزیکی بین زنجیره‌های ماکرومولکولی آب را جذب و دفع کنند بدون اینکه در آن حل شوند. شبکه پلیمری حاصل از اتصالات عرضی، در حلال‌های آبی واکنشیده شده؛ تا زمانی که نیروی ترمودینامیکی واکنشیدگی معادل نیروی بازجذب اعمال شده توسط اتصالات عرضی شود. این محلول شبه جامد از پلیمر و آب در حال تعادل، هیدروژل نامیده می‌شود [۱]. مقدار آب حفظ شده توسط شبکه هیدروژل بستگی به ساختار شبکه پلیمری و شرایط محیطی مثل دما، pH و مقاومت یونی محلول آبی در تماس با پلیمر بستگی دارد. هیدروژل‌های آمورف معمولاً به صورت فیزیکی ایجاد اتصال عرضی می‌کنند؛ بنابراین ویسکوزیته آنها با جذب مایعات فیزیولوژیکی کاهش می‌یابد [۲]. قابلیت جذب آب هیدروژل‌ها از گروه‌های عاملی آب‌دوست در زنجیره‌های پلیمری شامل گروه‌های هیدروکسیل، کربوکسیل، آمین و سولفون ناشی می‌شود؛ درحالی‌که مقاومت آنها در برابر انحلال به دلیل اتصالات عرضی بین زنجیره‌های شبکه ایجاد می‌گردد [۳]. هیدروژل‌ها از لحاظ ظاهر فیزیکی به شکل‌های مختلفی از قبیل میکرو ذرات، نانو ذرات، پودر، پوشش‌ها، فیلم، غشا یا امولسیون وجود دارند. ظاهر

فیزیکی هیدروژل‌ها به روش پلیمریزاسیون در فرآیند آماده‌سازی آنها بستگی دارد [۴].

اخیراً تولید پلیمرهای زیستی به دلیل عدم سمیت در محیط، در دسترس بودن و هزینه پایین آنها، به عنوان ابزاری برای جذب عناصر سنگین مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. استفاده از پلیمرهای زیستی مانند کیتین و کیتوزان یکی از روش‌های جذب و حذف یون‌های فلزات سنگین حتی در غلظت‌های کم است [۵]. کیتین همانند سلولز یکی از فراوان‌ترین پلیمر در طبیعت است و به دلیل ساختار سلولی سخت و نیروهای بین-مولکولی از نوع پیوندهای هیدروژنی بسیار نامحلول می‌باشد و به همین خاطر واکنش شیمیایی آن ضعیف است. ممکن است به دلیل جایگزین شدن گروه استامید با گروه هیدروکسیل در محل C-2 به عنوان سلولز تلقی گردد [۶]. کیتین پلی‌ساکاریدی است که در سخت پوستان مانند میگو، خرچنگ، آرتمیا و همچنین در پوست حشرات و در دیواره سلولی بعضی از قارچ‌ها یافت می‌شود [۷]. در مجاورت محلول هیدروکسید سدیم غلیظ و گرما گروه‌های استیل آمینوکیتین به عامل‌های آمینی تبدیل می‌شوند. در واقع کیتوزان مشتق N-دی استیله از کیتین می‌باشد. یکی از مهم‌ترین خواص جالب کیتوزان توانایی شکل‌گیری غشا است. همچنین کیتوزان می‌تواند تحت شرایط اسید آبی ضعیف حل شود، کیتوزان می‌تواند به آسانی به شکل غشاء و یا فیلم و یا خواص خوب مکانیکی درآید، با خاصیت آنزیمی، کیتوزان می‌تواند به وسیله‌ی انواع مختلفی از هیدرولیز، پلیمر را به مونومر تبدیل کند. به علاوه کاملاً قابلیت تجزیه پذیری زیستی دارد. ویژگی دیگر موجود در کیتوزان، از قبیل سمیت کم و زیست

سازگاری عالی آن است. کیتوزان یک خاصیت ضد میکروبی بالا در برابر طیف گسترده‌ای از میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا و عامل فساد، نشان می‌دهد [۸]. این پلیمر زیستی در تصفیه آب و پساب کاربرد داشته و دارای توانایی‌های منحصر به فردی در انعقاد و لخته سازی ذرات معلق و کلوئیدی، جذب روغن و گریس محلول و همچنین فلزات سنگین می‌باشد. کیتوزان می‌تواند به عنوان جایگزینی مناسب برای نمک‌های آلومینیوم و پلی-الکترولیت‌های ترکیبی در تصفیه آب و پساب مورد توجه قرار گیرد. کارایی کیتوزان در انعقاد و لخته‌سازی ذرات معلق و کلوئیدی و همچنین جذب یون‌های محلول با انحلال آن در محلول اسید و حالات مختلف دی-استیل‌اسیون بهبود می‌یابد. استفاده از کیتوزان در تصفیه آب و فاضلاب دارای مزایایی از قبیل کاهش اثرات سو بهداشتی باقیمانده آلومینیوم و پلی‌مرهای مصنوعی، تولید لجن قابل تجزیه بیولوژیکی، کاهش حجم لجن دفعی، جداسازی یون‌های فلزی محلول و فلزات سنگین، نیاز کم به مواد شیمیایی تنظیم کننده pH و قلیائیت، کاهش یون‌های محلول موجود در آب و فاضلاب می‌باشد. در فرایند جذب، عملکرد کیتوزان بهتر از کیتین است زیرا دارای هر گروه هیدروکسیل و آمین بوده که می‌تواند به عنوان مکان‌های پیوندی با یون‌های فلزی وارد واکنش شوند [۷].

آب یک منبع طبیعی مهم است که حفظ آن در جهت دستیابی به اهداف توسعه پایدار بسیار اهمیت دارد. بدین جهت، جلوگیری از آلوده شدن آب توسط آلاینده‌های مختلف و تصفیه آن در بسیاری از کشورهای جهان اولویت زیادی دارد. با این وجود، برخی از فناوری‌های مورد استفاده برای تصفیه آب، آلاینده‌های ثانویه یا محصولات جانبی آزاد می‌کنند که باعث آلودگی بیشتر محیط زیست می‌شوند [۹]. بنابراین، دسترسی به روش‌های مقرون به صرفه و کارآمد برای تصفیه پساب یک ضرورت مهم محسوب می‌شود. آب کارکردهای زیادی در کاغذسازی دارد. آب به عنوان محیطی برای تعلیق و حل شدن الیاف و سایر ذرات و فاز حامل در کاغذسازی است. همچنین آب یکی از مهم‌ترین عوامل ایجاد (در تولید کاغذ) و حذف (در بازیافت کاغذ) پیوندهای هیدروژنی می‌باشد. از جمله کاربردهای آب، در آب‌پاش‌های توری کاغذسازی و پرس، به عنوان آب‌بندی تجهیزات، حامل انرژی گرمایی و عامل

بهبود عملکرد پالایش است [۸]. در مراحل مختلف فرآیند کاغذسازی مواد آلی و معدنی مختلفی مانند ذرات شن و سیلیس، گل و لای، مواد رنگی جامد و کلوئیدی و موادی مانند رس که خواص نوری کاغذ را تحت تاثیر قرار می‌دهند، در آب حل می‌شوند. همواره توجه زیادی جهت انجام تحقیقات معطوف به یافتن فناوری‌های جدید برای بازیافت پساب و کاهش مصرف آب تازه و سعی در کاهش آلاینده‌های موجود در آب‌های صنعتی بوده است. پساب‌ها، مقادیر زیادی آلودگی وارد محیط زیست می‌کند [۱۰]. مطالعات انجام شده روی ۱۵ خط تولید کاغذ بازیافتی اطلاعات جامعی درباره مقدار مواد جامد و بار اکسیژن-خواهی بیولوژیکی (BOD) پساب ارائه داده است. از ۱۵ کارخانه مورد مطالعه، ۹ کارخانه با ماشین فوردنیر (کاغذ بازیافتی و کنگره‌ای) و ۶ کارخانه مقوا بوده‌اند [۱۱]. نتایج مطالعات جامعی که روی ۸۰ درصد کارخانجات کاغذسازی آلمان منتشر شده است یک تصویر کلی از بار آلودگی آب پساب با توجه به عوامل افزایشدهنده اکسیژن-خواهی و مصرف آب تازه در کارخانجات کاغذسازی ارائه داده است [۱۲]. در عصر حاضر، حذف فلزات سنگین از پساب‌های صنعتی و شهری به عنوان یکی از مسائل جدی و چالش‌های پیشرو بشر به‌شمار می‌رود. فلزات سنگین نظیر سرب، مس، کروم، کادمیم، نیکل، آهن، روی، آرسنیک، منگنز و جیوه از جمله رایج‌ترین آلاینده‌هایی هستند که معمولاً در غلظت‌های بالا در فاضلاب صنایع یافت می‌شود و موجب آسیب به محیط‌های آبی و به مخاطره افتادن سلامت موجودات زنده به‌خصوص انسان می‌گردند [۱۳]. پساب‌های حاوی این عناصر بالقوه سمی به دلیل ماندگاری، تحرک و حلالیت بیشتر، به درستی تصفیه نمی‌شوند و ممکن است به همین صورت وارد محیط زیست و منابع آب شیرین شوند [۱۴]. این عناصر سمی می‌توانند توسط موجودات آبی، محصولات زراعی و سایر گونه‌های گیاهی جذب شوند و به زنجیره غذایی انسان راه پیدا کنند و در نتیجه اثرات منفی بر سلامت انسان بر جای بگذارند [۱۵، ۱۶ و ۱۷]. به این دلیل، حذف فلزات سنگین از پساب‌های صنعتی و شهری به عنوان یکی از مسائل جدی و چالش‌های پیشرو در عصر حاضر به‌شمار می‌رود. فلزات سنگین به آن دسته از عناصر شیمیایی گفته می‌شوند که دانسیته آنها بیش از ۵ گرم بر سانتیمتر مکعب هستند [۱۸]. حذف موثر آلاینده‌ها

مقادیر جذب و کارایی جاذب در جذب فلزات مس، سرب و کادمیم مورد مطالعه قرار گرفت.

## مواد و روش‌ها

### مواد

الیاف  $\alpha$  - سلولز از کارخانه لینتر پاک بهشهر تهیه شد. هیدروکسید سدیم (NaOH) از شرکت سیگما آلدريج، کیتوزان ( $C_6H_{11}NO_4$ )، استیک اسید ( $CH_3COOH$ )، هیدروکلریک اسید (HCL)، اسید سولفوریک ( $H_2SO_4$ )، نمک سرب ( $Pb(NO_3)_2 \cdot 2.6H_2O$ )، نمک مس ( $Ni(NO_3)_2$ ) و نمک کادمیم ( $Cd(NO_3)_2$ ) از شرکت مرک تهیه شدند.

### روش‌ها

#### تهیه دانه‌های هیدروژل کیتوزان - سلولز

برای تهیه جاذب هیدروژل کیتوزان - سلولز، ۲ گرم کیتوزان به ۱۰۰ میلی لیتر اسید استیک ۲٪ وزنی در یک بشر اضافه شد. ترکیب موجود روی یک همزن مغناطیسی در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد و ۲۰۰ دور بر دقیقه با هم ترکیب شد. سپس مقدار ۲ گرم پودر آلفا سلولز به محلول کیتوزان اضافه شد. مخلوط در دمای اتاق به مدت ۶ ساعت با سرعت ۲۰۰ دور بر دقیقه هم‌زده شد. مخلوط به صورت قطرات کوچک به داخل محلول سود یک مولار تزریق شد تا دانه‌های هیدروژل کیتوزان - سلولز شکل بگیرد. به منظور سفت شدن بیشتر و افزایش مقاومت، دانه‌های هیدروژل در محلول سود برای مدت ۱۲ ساعت به آرامی تکان داده شد. سپس دانه‌های هیدروژل، با آب مقطر تا pH خنثی شستشو شدند.

#### تهیه محلول‌های آبی فلزات سنگین

برای تهیه محلول‌های آبی از محلول استاندارد هر فلز استفاده شد. محلول استاندارد دارای غلظت ۱۰۰۰ میلی-گرم بر لیتر (ppm) بود. محلول‌های آبی با غلظت اولیه ۳۰ ppm از طریق رقیق کردن محلول استاندارد با آب مقطر تهیه شد. همچنین جهت تنظیم pH محلول‌های آبی از هیدروکسید سدیم ۰/۱ مولار و اسید مورد استفاده هیدروکلریک اسید ۰/۱ مولار استفاده شد [۲۷].

از سیستم‌های آبی همچنان به‌عنوان یک چالش مهم مطرح بوده و محققان درصدد بهبود و ابداع روش‌های نوین برآمده‌اند [۱۹]. تاکنون روش‌های متعددی به منظور کاهش خطرات محیط زیستی و بهداشتی ناشی از پساب فلزات سنگین استفاده شد که جمله آنها می‌توان به فرآیندهایی مانند فیلتراسیون غشایی، اسمز معکوس، رسوب شیمیایی و جذب سطحی/زیستی اشاره نمود [۲۰]. یکی از کاربردی‌ترین روش‌ها استفاده از جاذب‌ها می‌باشد. جاذب‌ها، ماده یا ترکیب موادی هستند که در محیط‌های مختلف عمل جذب را انجام می‌دهند. جاذب‌ها انواع مختلفی دارند و به چهار دسته طبیعی (آلی)، معدنی، سنتزی و طبیعی فرآوری شده تقسیم می‌شوند [۲۱]. جاذب بر پایه سلولز می‌تواند گزینه مناسبی برای تصفیه پساب باشد. مواد کشاورزی به‌خصوص آن‌هایی که دارای سلولز هستند پتانسیل جذب زیستی فلزات را دارند. ترکیبات اصلی توده زیستی زائدات کشاورزی شامل همی-سلولز، لیگنین، لیپیدها، پروتئین‌ها، قندهای ساده، نشاسته، گروه‌های اصلی هستند که جداسازی فلزات سنگین را از محیط آبی آسان می‌نمایند [۲۲]. مزایای فرایند جذب زیستی در مقایسه با روش‌های متداول حذف فلزات سنگین مقرون به صرفه بودن، جذب انتخابی، قابلیت احیای جاذب زیستی و بازیافت فلزات، بالابودن سرعت فرایند و عدم تولید لجن می‌باشد [۲۳ و ۲۴]. علاوه بر مزایای اولیه، این فرآیند باعث ایجاد آلودگی ثانویه ناشی از تولید محصولات جانبی نمی‌شود [۲۵]. مکانیسم‌های فعال در فرآیند جذب زیستی شامل جذب سطحی، تعویض یون، تجمع شدن و واکنش اکسید و احیا شدن می‌باشد [۲۶].

افزایش مستمر تعداد کارخانه‌های کاغذسازی و صنایع وابسته به آن و به طبع افزایش مشکلات زیست محیطی مرتبط با آن مثل افزایش بار فلزات سنگین آب‌های سطحی و عمیق همچنین افزایش مقدار پساب‌های آلوده به فلزات سنگین صنایع دیگر، لزوم مطالعه و پژوهش‌های بیشتر در خصوص روش‌های مقرون به صرفه و کارآمدتر برای کاهش بار آلودگی و تصفیه بهتر پساب‌های صنعتی را نشان می‌دهد. در پژوهش حاضر با استفاده از کیتوزان و سلولز، هیدروژل‌های زیست تخریب‌پذیر تولید شد. همچنین به روش جذب سطحی با استفاده از بیوجاذب هیدروژل کیتوزان - سلولز، جذب فلزات انجام شد و

سنجی جذب اتمی واریان مدل ContrAA 700 اندازه-گیری شدند. مقادیر درصد جذب از رابطه ۱ محاسبه شد. در این رابطه،  $C_0$  غلظت اولیه فلزات بر حسب میلی گرم بر لیتر،  $C_e$  غلظت نهایی فلزات بر حسب میلی گرم بر لیتر،  $v$  مقادیر محلول‌های آبی در هر بطری بر حسب لیتر و  $m$  وزن جاذب اضافه شده به هر بطری بر حسب گرم می-باشد. جدول ۱ کد معرف سطوح تیمار در هیدروژل کیتوزان - سلولز را نشان می‌دهد.

$$q = \frac{(C_0 - C_e)v}{m} \quad (1)$$

### تیمار محلول‌های آبی حاوی فلزات سنگین با جاذب

جاذب هیدروژل کیتوزان - سلولز با دو مقدار ۰/۵ و ۱ گرم به محلول آبی حاوی فلزات سنگین اضافه شد و در یک لرزاننده مکانیکی با دور ۲۰۰ بر دقیقه و در دمای اتاق بهم زده شد. بعد از ۴۸ ساعت نمونه‌های هیدروژل از طرف‌ها به منظور اندازه‌گیری غلظت نهایی فلزات سنگین موجود برداشته شدند. بدین منظور محتوای طرف‌ها از کاغذ صافی واتمن ۴۰ عبور داده شد تا جاذب از محلول جدا شود. غلظت نهایی فلزات به وسیله دستگاه طیف

جدول ۱- کد معرف سطوح تیمار در جاذب هیدروژل کیتوزان - سلولز

کد تیمار	شرایط تیمار	
	pH	مقدار جاذب (گرم)
P3C0	۳	۰/۵
P5C0	۵	۰/۵
P7C0	۷	۰/۵
P9C0	۹	۰/۵
P3C1	۳	۱
P5C1	۵	۱
P7C1	۷	۱
P9C1	۹	۱

پذیری دانه‌ها مورد مطالعه قرار گیرد. وزن دانه‌های موجود در هر محلول اندازه‌گیری می‌شوند. اختلاف وزن دانه‌ها اطلاعاتی راجع به پایداری دانه‌ها ارائه می‌دهد. در رابطه ۳،  $W_h$  وزن دانه‌های هیدروژل قبل از قرار دادن در محلول و  $W_d$  وزن بعد از ۲۴ است.

$$\text{نرخ انحلال} = \frac{W_h - W_d}{W_h} \quad (3)$$

### تجزیه و تحلیل آماری

در این پژوهش، جهت تجزیه و تحلیل آماری و رسم نمودار از نرم افزار SPSS 16 استفاده شد. داده‌های مربوط به جذب با استفاده از آزمون تجزیه واریانس مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفتند. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن انجام شد.

### نرخ هیدراسیون هیدروژل

مقدار مشخصی از هر دانه‌های هیدروژل وزن شده، سپس به مدت ۳ روز به منظور خشک کردن در دسیکاتور خلأ با دمای اتاق قرار گرفتند. دانه‌ها پس از خشک شدن نیز وزن شدند. نرخ هیدراسیون با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد. در این رابطه،  $W_h$  وزن دانه‌های هیدروژل قبل از خشک شدن و  $W_d$  وزن بعد از خشک شدن است.

$$\text{نرخ هیدراسیون} = \frac{W_h - W_d}{W_h} \quad (2)$$

### نرخ انحلال هیدروژل

حدود ۰/۱ گرم از دانه‌های هیدروژل کیتوزان - سلولز وزن می‌شوند و به مدت ۲۴ ساعت تحت اثر انواع مختلفی از محلول‌ها (اسید کلریدریک، اسید سولفوریک و هیدروکسید سدیم یک مولار) قرار گرفتند تا انحلال

## نتایج و بحث

## کارایی جذب فلزات سنگین توسط جاذب هیدروژل کیتوزان - سلولز

جدول ۲ کارایی جذب فلزات سنگین مس، سرب و کادمیوم توسط جاذب هیدروژل کیتوزان - سلولز را نشان می‌دهد. کمترین مقدار کارایی جذب فلز مس در تیمار P3C0، به مقدار ۵/۳۷ ppm و بیشترین آن در تیمار P7C1، به مقدار ۱/۳۴ ppm بدست آمد. کمترین مقدار کارایی جذب فلز سرب در تیمار P3C0 به مقدار ۰/۹۲ و بیشترین مقدار جذب سرب در تیمارهای P5C0، P7C0، P9C0، P5C1 و P9C1 بود که غلظت فلز سرب باقیمانده در نمونه محلول حاوی فلز به صفر رسیده و تمام فلز سرب از محلول حذف گردید. همچنین کمترین مقدار کارایی جذب کادمیوم در تیمار P3C0 به مقدار ۶/۱۳ ppm و بیشترین مقدار جذب فلز کادمیوم در تیمار P7C1 به مقدار ۲/۱۹ ppm بود. بین مقادیر کارایی جذب هر سه فلز مس، سرب و کادمیوم در تیمار محلول آبی با جاذب هیدروژل کیتوزان - سلولز در pHهای متفاوت، اختلاف معنادار وجود دارد. با افزایش pH به سمت خنثی و قلیایی مقدار حذف فلزات در نمونه‌ها و همچنین با افزایش مقدار جاذب، افزایش پیدا کرده است. نتایج کارایی

جذب فلز مس با هیدروژل کیتوزان - سلولز در مقدار جاذب ۰/۵ و ۱ گرم نشان داد که مقدار جذب فلز مس با افزایش مقدار جاذب افزایش یافته است. این امر می‌تواند به دلیل وجود ترکیبات هیدروکسیلی در سلولز، سطح فعال جاذب و عوامل دینامیکی مانند افزایش میزان برخورد فلزات موجود در محلول با جاذب باشد [۲۸]. به-طور تقریبی در بیشتر نمونه‌ها، با افزایش pH، افزایش مقدار حذف فلزات سنگین در نمونه‌ها مشاهده شد. تجزیه واریانس داده‌های حاصل از مقدار حذف فلز مس با مقادیر جاذب و در pHهای مختلف نشان داد که در سطح اعتماد ۹۵ درصد، اختلاف بین نمونه‌ها معنادار بوده است و همچنین بررسی داده‌ها با آزمون دانکن نشان داد که داده‌ها در ۴ گروه قرار دارند. کارایی حذف فلزات سنگین با هیدروژل کیتوزان - سلولز در خصوص فلز سرب نیز مشابه با فلز مس بود. به این ترتیب که با افزایش pH و مقدار جاذب، جذب فلز سرب افزایش یافت. تجزیه واریانس داده‌های حاصل از مقدار جذب فلز سرب با مقادیر جاذب و در pHهای مختلف نشان داد که در سطح اعتماد ۹۵ درصد اختلاف بین نمونه‌ها معنادار بوده است و همچنین بررسی داده‌ها با آزمون دانکن نشان داد که داده‌ها در ۳ گروه قرار دارند.

جدول ۲- کارایی جذب فلزات با جاذب هیدروژل کیتوزان - سلولز (%)

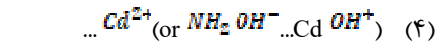
تیمار	مس	سرب	کادمیوم
غلظت اولیه محلول (شاهد)	a ۳۰	a ۳۰	a ۳۰
P3C0	b ۵/۳۷	b ۰/۹۲	b ۶/۱۳
P5C0	c ۲/۹۱	c ۰	bc ۴/۵۸
P7C0	d ۱/۵۳	c ۰	cd ۳/۹۸
P9C0	c ۲/۴۶	c ۰	bc ۴/۲۲
P3C1	b ۴/۸۹	bc ۰/۳۲	bc ۴/۱۹
P5C1	c ۲/۵۱	c ۰	bc ۲/۵۳
P7C1	d ۱/۳۴	c ۰	d ۲/۱۹
P9C1	c ۲/۱۵	c ۰	cd ۳/۶

مقدار حذف فلز کادمیوم با مقادیر جاذب و در pHهای مختلف نشان داد که در سطح اعتماد ۹۵ درصد اختلاف بین نمونه‌ها معنادار بوده است و همچنین بررسی داده‌ها با آزمون دانکن نشان داد که داده‌ها در ۴ گروه قرار دارند. کنش و واکنش الکترواستاتیک بین جاذب هیدروژل و

نتایج حاصل از تیمار محلول آبی کادمیوم با جاذب هیدروژل کیتوزان - سلولز در مقدار ۰/۵ و ۱ گرم نیز روندی مشابه با دو فلز مس و سرب نشان داد. به این ترتیب که با افزایش pH و مقدار جاذب، مقدار حذف فلز کادمیوم افزایش یافت. تجزیه واریانس داده‌های حاصل از

بنابراین حداکثر مقدار جذب در محدوده pH خنثی رخ می‌دهد [۱۸]. کارایی جذب فلز سرب بهتر از فلز کادمیوم بود. Razavi و Hoseini (۲۰۲۲)، در بررسی میزان جذب دو فلز سرب و کادمیوم، با استفاده از گیاه سیاه‌شور به نتیجه مشابهی دست یافتند. آنها گزارش کردند که دلیل این تفاوت می‌تواند مربوط به تشکیل کمپلکس‌های قوی‌تر بین ترکیبات فیتوشیمیایی گیاه سیاه‌شور با فلز سرب باشد. همچنین از آنجا که انرژی یونش مربوط به کادمیم بالاتر از فلز سرب می‌باشد بنابراین فلز سرب فعالیت بیشتری را در جذب شدن از خود نشان می‌دهد. [۲۹]. در pH پایین، غلظت زیاد یون‌های H<sup>+</sup> سبب پروتونه شدن گروه‌های عاملی سطح جاذب کیتوزان - سلولز شده و این امر منجر به ایجاد دافعه الکترواستاتیک بین گروه‌های عاملی پروتونه شده و بار مثبت Cd<sup>2+</sup> می‌شود [۳۰ و ۳۱]. علاوه بر این غلظت بالای یون‌های H<sup>+</sup> می‌تواند منجر به رقابت بین یون‌های H<sup>+</sup> و Cd<sup>2+</sup> در اشغال مکان‌های جذبی شود و قابلیت جذب در جاذب را کاهش دهد [۳۲]. همچنین در pH ۸ و بالاتر، گروه‌های عاملی OH<sup>-</sup> منجر به تشکیل کمپلکس‌های کم محلول هیدروکسیل مثل Cd(OH)<sub>2</sub> و Cd(OH)<sub>3</sub> شده که رسوب می‌کنند [۳۳]. بنابراین pH بهینه برای جذب فلزات سنگین حدود ۵ تا ۶ است [۳۴] و [۳۵]. در مقایسه بین ۳ فلز سنگین مختلف، می‌توان گفت که بیشترین کارایی جذب مربوط به فلز سرب است. Rezanezhad و همکاران (۲۰۲۰) نیز به نتیجه مشابهی دست یافتند. در تحقیقات آنها جذب فلز سرب در محلول‌های رقابتی و جاذب‌های متفاوت بالاترین مقدار را نسبت به فلزات دیگر داشته است. همچنین بازده جذب سرب بین ۹۹ تا ۱۰۰ درصد بیان شد که این نتیجه نیز با نتایج به‌دست آمده در این تحقیق هم‌خوانی دارد [۲۲]. عوامل مختلفی نظیر شعاع یون‌های فلزی، ماهیت پارامگنتیک و الکترونگاتیوی در بازدهی و قدرت جذب فلزات تأثیر دارد [۳۶].

کادمیوم تمایل به جذب را افزایش می‌دهد، اما ممکن است ظرفیت جذب با افزایش pH محلول در pH بالاتر از ۷ کاهش یابد. معادلات ۱ تا ۴ ممکن است در طی فرآیند جذب رخ دهند:



معادله (۱) واکنش هیدروژن دار شدن و از دست دادن هیدروژن گروه‌های آمین کیتوزان در محلول را نشان می‌دهد، معادله (۲) واکنش کادمیوم با گروه‌های آمین و تشکیل کمپلکس را نشان می‌دهد و معادله (۳) جذب OH<sup>-</sup> از محلول از طریق بانده هیدروژن در شرایط pH بالا را توصیف می‌کند. در مقادیر pH پایین‌تر، واکنش معادله (۱) به هیدروژن‌دار کردن گروه‌های آمین با NH<sub>3</sub><sup>+</sup> اشاره می‌کند. از آنجایی که بیشتر گروه‌های NH<sub>2</sub><sup>-</sup> به NH<sub>3</sub><sup>+</sup> تبدیل شوند، در اینجا فقط کمی از سایت‌های NH<sub>2</sub><sup>-</sup> روی سطح دانه‌های هیدروژل کیتوزان - سلولز برای جذب کادمیوم از طریق معادله ۲ در دسترس‌اند [۱۸]. از طرف دیگر با افزایش pH محلول، واکنش معادله ۳ ممکن است رخ دهد. این واکنش از طرفی می‌تواند جذب کادمیوم را از طریق تجمع سطحی در فرمول ۲ کاهش دهد اما از سوی دیگر می‌تواند سبب افزایش جذب کادمیوم توسط دانه‌های هیدروژل کیتوزان - سلولز از طریق جاذبه الکترواستاتیکی که در معادله ۴ نشان داده شد شوند. به نظر می‌رسد که در pH بالاتر از ۸ یا ۹ شکل‌گیری NH<sub>2</sub><sup>-</sup>OH<sup>-</sup> از طریق فرمول ۳ در حقیقت سبب کاهش جذب کادمیوم روی دانه‌های هیدروژل کیتوزان - سلولز می‌شود. در واقع تجمع سطحی اثر مهم‌تری بر روی جذب کادمیوم توسط دانه‌های هیدروژل نسبت به کنش و واکنش الکترواستاتیکی دارد. به همین دلیل مقدار حذف فلز کادمیوم در pH برابر با ۹ دوباره کاهش می‌یابد.

بیان مقدار آب موجود در دانه‌های هیدروژل به کار می‌رود. نرخ هیدراسیون پایین‌تر نشان‌دهنده مقاومت مکانیکی بهتر دانه‌ها می‌باشد. مهمترین مشخصه یک هیدروژل، ظرفیت نگهداری و جذب آب بالای آن است [۳۷]. وجود گروه‌های عاملی آب‌دوست و ترکیبات قطبی در ساختار هیدروژل‌ها بر میزان جذب آب توسط هیدروژل‌ها تأثیر دارد. ساختار متخلخل در سلولز موجود در هیدروژل‌ها فضای قابل دسترس برای جذب را افزایش می‌دهد. همچنین گروه‌های عاملی هیدروکسیلی با بار منفی در ساختار سلولز، جذب یون‌های فلزات سنگین با بار کاتیونی را تسهیل می‌کند [۳۸].

### نرخ هیدراسیون دانه‌های هیدروژل کیتوزان - سلولز

جدول ۳ نرخ هیدراسیون دانه‌های هیدروژل کیتوزان - سلولز را نشان می‌دهد. برای انجام این آزمون ۵ دانه هیدروژل به صورت تصادفی انتخاب شده و به شکل A, B, C, D و E نام‌گذاری شدند. بر اساس نتایج، بیشترین و کم‌ترین نرخ هیدراسیون به ترتیب مربوط به نمونه D و A به مقدار ۰/۳۹ و ۰/۲۱ می‌باشد. با توجه به نتایج به‌دست آمده از آزمون، متوسط نرخ هیدراسیون به‌دست آمده ۰/۳ می‌باشد. این به این معنی می‌باشد که ۳۰ درصد حجم هیدروژل را آب تشکیل می‌دهد. نرخ هیدراسیون برای

جدول ۳- نرخ هیدراسیون دانه‌های هیدروژل کیتوزان - سلولز

	E	D	C	B	A
وزن اولیه	۱	۱	۱	۱	۱
وزن ثانویه	۰/۶۴	۰/۶	۰/۷۲	۰/۷۸	۰/۸۲
نرخ هیدراسیون	۰/۳۶	۰/۳۹	۰/۲۵	۰/۲۳	۰/۲۱

سه حلال (سود، هیدروکلریک اسید و اسید سولفوریک) نشان داد که بیشترین و کم‌ترین نرخ انحلال به ترتیب مربوط به هیدروکلریک اسید به مقدار ۱ و هیدروکسید سدیم به مقدار ۰/۲۷ می‌باشد. نرخ انحلال پایین‌تر (کم‌تر) نشان دهنده مقاومت مکانیکی بهتر می‌باشد. تجزیه واریانس داده‌های حاصل از نرخ انحلال توسط سه حلال مختلف نشان داد که در سطح اعتماد ۹۵ درصد اختلاف بین نمونه‌ها معنادار بوده است و همچنین بررسی داده‌ها با آزمون دانکن نشان داد که داده‌ها در ۳ گروه قرار دارند. کیتوزان دارای گروه‌های فعال هیدروکسیل و آمین است که می‌توانند تحت تأثیر واکنش‌های شیمیایی مختلفی از جمله هیدروکسیل‌دار کردن، کربوکسیل‌دار کردن، آلکیل-دار کردن، آسیل‌دار کردن و استری شدن قرار گیرند [۳۹]. این واکنش‌ها با ورود گروه‌هایی به کیتوزان، بلورینگی آن را به هم می‌زنند و در نتیجه باعث افزایش حل‌پذیری کیتوزان اصلاح شده در آب می‌شوند. به‌طور کلی، از محلول‌های ۱٪ (حجمی/حجمی) استیک اسید، لاکتیک اسید یا هیدروکلریک اسید برای حل کردن کیتوزان استفاده می‌شود [۴۰]. به همین دلیل بیشترین نرخ انحلال هیدروژل‌ها در هیدروکلریک اسید است.

### نرخ انحلال دانه‌های هیدروژل کیتوزان - سلولز

جدول ۴ نرخ انحلال دانه‌های هیدروژل کیتوزان - سلولز را در سه حلال هیدروکسید سدیم (NaOH)، هیدروکلریک اسید (HCL) و سولفوریک اسید (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) نشان می‌دهد. از آنجایی که اسید و باز مورد استفاده برای تنظیم pH در فرایند جذب به ترتیب هیدروکلریک اسید و هیدروکسید سدیم بود به همین دلیل پایداری دانه‌های هیدروژل در این دو حلال و انحلال‌پذیری آن‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. برای دقت بالاتر این آزمون در چهار تکرار انجام شد و نمونه‌های هیدروژل به ترتیب A, B, C و D نام‌گذاری شدند. بیشترین نرخ انحلال مربوط به نمونه A در هیدروکسید سدیم به مقدار ۰/۴ بود. نتایج به‌دست آمده از نرخ انحلال برابر یک، برای دانه‌های هیدروژل در حلال هیدروکلریک اسید نشان داد که هیدروژل‌ها دارای حداقل مقاومت مکانیکی در این حلال هستند، به همین دلیل نرخ انحلال دانه‌ها در اسید سولفوریک نیز مورد بررسی قرار گرفت. بیشترین نرخ انحلال مربوط به نمونه D به مقدار ۰/۶۸ بود. انحلال‌پذیری هیدروژل‌ها در حلال اسید سولفوریک نسبت به هیدروکلریک اسید کم‌تر بود. بررسی نرخ انحلال دانه‌های هیدروژل کیتوزان - سلولز در

جدول ۴- نرخ انحلال هیدروژل کیتوزان-سلولز

	A	B	C	D
هیدروکسید سدیم <sup>c</sup> (NaOH)	۰/۴	۰/۲۷	۰/۳۳	۰/۲۹
هیدروکلریک اسید <sup>a</sup> (HCL)	۱	۱	۱	۱
سولفوریک اسید <sup>b</sup> (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	۰/۵۷	۰/۴۳	۰/۴۱	۰/۶۸

- [3] Morkhande, V.K., Pentewar, R.S., Gapat, S.V., Sayyad, S.R., Amol, B.D., Sachin, B. and Sandip K., 2016. A Review on Hydrogel. *Pharmacy Research*, 6, 4678-4689.
- [4] Jonoobi, M., Moradpour, P. and Tofangchi Kalle basti, A. A., 2020. Investigation off releasing mechanism off silver nitrate in the nanocellulose based hydrogel pad for burn healing. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 11(2), 333-344. (In Persian).
- [5] Rahimizadeh, Z., Hamidian, A. H. and Hosseini, S. V., 2014. Removing Heavy Metals from Aqueous Solutions Using Chitosan – Clay Nanocomposites. *Natural Environment, Iran Environment*, 69(3), pp. 669-679. (In Persian).
- [6] Pan, J. R., Huang, C. and Chen, S., 1999. Evaluation of a modified chitosan biopolymer for coagulation of colloidal particles. *Physicochemical and engineering aspects*, 147(3), pp. 359-364.
- [7] Ngah, W. S. W., Kamari, A. and Koay, Y. J., 2004. Equilibrium and kinetics studies of copper (II) on chitosan and chitosan/PVA beads. *International journal of biological macromolecules*, 34, pp. 155-166.
- [8] Desbrieres, J., Bobu, E. and Nicu, R., 2011. Chitosan as Cationic Polyelectrolyte in Wet-end Papermaking Systems. *Cellulose Chemistry and Technology*, 45(1-2), pp. 105-111.
- [9] Kwame Nti, E., Jerry Cobbina, S., Efua Attafua, E., Dziedzorm Senanu, L., Amenyeku, G., Amoah Gyan, M., Forson, D. and Safo, A. R., 2023. Water pollution control and revitalization using advanced technologies: Uncovering artificial intelligence options towards environmental health protection, sustainability and water security. *Heliyon*, 9(7), e18170. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e18170.
- [10] Hamze, Y., 2011. Water and wastewater management in pulp and paper industry. *Jahad Daneshgahi publication*. (In Persian).
- [11] Pizzichini, M., Russo, C. and Meo, C. D., 2005. Purification of pulp and paper wastewater, with membrane technology for water reuse in a closed loop. *Desalination*, 178(1-3), pp. 351-359.
- [12] Schwarz, M. and Gmeiner A., 2000, How to fulfill the new requirement of the wet end process. *TAPPI*

## نتیجه گیری

آلودگی‌های ایجاد شده توسط فلزات سنگین موجود در برخی از پساب‌های صنعتی، علاوه بر مشکلات زیست محیطی، خطرات زیادی برای سلامتی انسان ایجاد می‌کند. حذف فلزات سنگین با روش‌های مختلفی انجام می‌شود. یکی از متداول‌ترین روش‌ها، حذف به وسیله جاذب‌ها است. در پژوهش حاضر با استفاده از دو ماده طبیعی کیتوزان و  $\alpha$  - سلولز، هیدروژل جاذب تهیه شد. سپس کارایی هیدروژل‌ها در حذف فلزات سنگین سرب، مس و کادمیوم از محلول آبی، در مقادیر مختلف جاذب و pH متفاوت بررسی شد. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان گفت که هیدروژل کیتوزان - سلولز در حذف سرب از محلول آبی عملکرد بهتری نسبت به حذف مس و کادمیم از محلول آبی آنها دارد به طوری که در pH های ۵، ۷ و ۹، مقدار حذف این فلز برابر با ۱۰۰ درصد می‌باشد. همچنین میانگین نرخ هیدراسیون دانه‌های هیدروژل کیتوزان - سلولز ۰/۳ و میانگین نرخ انحلال دانه‌های هیدروژل کیتوزان - سلولز به ترتیب در حلال سود، اسید سولفوریک و هیدروکلریک اسید ۰/۳۳، ۰/۵۲ و ۱ بود. مقدار بهینه هیدروژل کیتوزان - سلولز برای جذب هر سه فلز مس، سرب و کادمیم ۱ گرم به دست آمد. بهترین pH برای حذف فلزات مس، سرب و کادمیم از محلول آبی آن در محدوده خنثی می‌باشد.

## منابع

- [1] Motie, N., Jonoobi, M., Faezipour, M. M., Mahboobian, M. M. and Borzacchiello, A., 2019. Nanocellulose based biohydrogel: preparation and characterization of some properties. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 9(4), pp. 497-509. (In Persian).
- [2] Sannino, A., Demitri, Ch. and Madaghiele, M., 2009. Biodegradable cellulose-based hydrogels: design and applications. *Materials*, 2, pp. 353-373.

- [23] Shukla, S. Roshan, R. and Pai, S., 2005. Adsorption of Cu (II), Ni (II) and Zn (II) on modified jute fibers. *Bioresource Technology*, 96, pp. 1430 – 1438.
- [24] Sud, D., Mahajan, G. and Kaur, M. P., 2008. Agricultural waste material as potential adsorbent for sequestering heavy metal ions from aqueous solutions – A review. *Bioresource Technology*, 99 (60), pp. 17–27.
- [25] Dehghani, M. H., Ahmadi, S., Ghosh, S., Othmani, A., Osagie, C., Meskini, M., Sami, AlKafaas S., Malloum, A., Ahmad Khanday, W., Oluwaseun Jacob, A., Gökkuş, Ö., Oroke, A., Martins Chineme, O., Rao Karri, R. and Lima, E. C., 2023. Recent advances on sustainable adsorbents for the remediation of noxious pollutants from water and wastewater: A critical review. *Arabian Journal of Chemistry*, 16(12), pp. 105303.
- [26] Davis, T. A., Volesky, B. and Vieira, R. H. S. F., 2005. Sargasso biomass. *Water research*, 39, pp. 239-247.
- [27] Naghizadeh, A. and Momeni, F., 2015. Evaluation of the efficiency of graphene oxide nanoparticles in the removal of chromium and lead from aqueous solutions. *Scientific Journal of Birjand University of Medical Sciences*, 22(1), pp. 27-38.
- [28] Abdel-Ghani, N., Hefny, M. and El-Chaghaby, G. A., 2007. Removal of Lead from Aqueous Solution Using Low Cost Abundantly Available Adsorbents. *Int Journal Environment Science Tech*, 4(1), pp. 67-73.
- [29] Razavi, R. and Hoseini, S. H., 2022. Removal of lead and cadmium pollutants from the environment by the Suaeda aegyptiaca as an adsorbent. *Iran Chemistry and Chemistry Engineering Journal*, 41 (3), pp. 149-154. (In Persian).
- [30] Elaigwu, S. E., Rocher, V., Kyriakou, G. and Greenway, G. M., 2014. Removal of Pb<sup>2+</sup> and Cd<sup>2+</sup> from aqueous solution using chars from pyrolysis and microwave-assisted hydrothermal carbonization of Prosopis africana shell. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20(5), pp. 3467-3473.
- [31] Liu, Z. and Zhang, F. S., 2011. Removal of Copper (II) and Phenol from aqueous solution using porous Carbons derived from hydrothermal chars. *Desalination*, 267(1), pp. 101-106.
- [32] Wang, F. Y., Wang, H. and Ma, J. W., 2010. Adsorption of cadmium (II) ions from aqueous solution by a new low-cost adsorbent-Bamboo charcoal. *Journal of Hazardous Materials*, 177(1-3), pp. 300-306.
- [33] Mohan, D., Pittman Jr, C. U., Bricka, M., Smith, F., Yancey, B., Mohammad, J., Steele, P. H., Alexandre-Franco, M. F., Gómez-Serrano, V. and Gong, H., 2007. Sorption of Arsenic, Cadmium, and Lead by Papermaking Conference, Vancouver, BC, Canada, 1,9-3, pp. 609.
- [13] Ng, J. C. Y., Cheung, W. H. and McKay, G., 2002. Equilibrium Studies of the Sorption of Cu (II) Ions onto Chitosan. *Journal of Colloid Interface*, 255(1), pp. 64-74.
- [14] Kolesnikov, S., Minnikova, T. and Kazeev, K., 2022. Assessment of the Ecotoxicity of Pollution by Potentially Toxic Elements by Biological Indicators of Haplic Chernozem of Southern Russia (Rostov region). *Water, Air, and Soil Pollution*, 233, pp. 18. doi: 10.1007/s11270-021-05496-3.
- [15] Okoro, H. K., Orosun, M. M., Oriade, F. A., Momoh-Salami, T. M., Ogunkunle, C. O. and Adeniyi, A. G., 2020. Solid waste for heavy metals adsorption features and challenges; a review. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(5), pp. 10235-10253. doi: 10.1016/j.jmrt.2020.07.045.
- [16] Radkhah, A. R., Eagderi, S. and Sadeghinejad Masouleh, E., 2022 (a). Accumulation of Heavy Metals in Fish: A Serious Threat to Food Security and Public Health. *J Mar Med*, 3(4), pp.236-245.
- [17] Radkhah, A. R., Eagderi, S. and Sadeghinejad Masouleh, E., 2022 (b). A review in Quality Water Improving in Efficiency (RAS) Systems Aquaculture Recirculatin. *Journal of water and sustainable*, 8(3), 81-88.
- [18] Li, H., Du, Y. and Xu, Y., 2004. Adsorption and Complex of Chitosan Wet-end Additives in Papermaking system. *Journal of Applied Polymer Science*, 91(4), pp. 2642-2648.
- [19] Mohammadi, M., Fotovat, A. and Haghniya, G., 2009. Efficiency of sand- soil- organic matter filter, the removal of heavy metals copper, nickel, zinc and chromium from industrial wastewater. *Journal of Soil and Water (Agricultural Science and Technology)*, 262, pp. 23-51.
- [20] Nishat, A., Yusuf, M., Qadir, A., Ezaier, Y., Vambol, V., Ijaz Khan, M., Ben Moussa, S., Kamyab, H., Sehgal, S. S., Prakash, C., Yang, H. H., Ibrahim, H. and Eldin, S. M., 2023. Wastewater treatment: A short assessment on available techniques. *Alexandria Engineering Journal*, 76, pp. 505-516. doi: 10.1016/j.aej.2023.06.054.
- [21] Ebrahimi, A. and Movahedian Attar, H., 2003. Performance Evaluation of Natural Zeolites and Synthetic Resins in Ni<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, and Cu<sup>2+</sup> Ions Removal from Industrial Wastewater. *Research in Medical Sciences*, 8(4), pp. 7580. (In Persian).
- [22] Rezanezhad, SH., Nazarnezhad, N., Resalati, H. and Zabihzadeh, S. M., 2020. Use of magnetic nano bio composites prepared from fibers, nanocrystalline cellulose and carboxy methylcellulose in adsorption of heavy metals (Nickel and Lead). *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 35 (4), pp. 332-347. (In Persian).

- chars produced from fast pyrolysis of wood and bark during bio-oil production. *Journal of Colloid and Interface Science*, 310(1), pp. 57-73.
- [34] Cheng, Q., Huang, Q., Khan, S., Liu, Y., Liao, Z., Li, G. and Ok, Y. S., 2016. Adsorption of Cd by peanut husks and peanut husk biochar from aqueous solutions. *Ecological Engineering*, 87, pp. 240-245.
- [35] Deng, J., Liu, Y., Liu, S., Zeng, G., Tan, X., Huang, B., Tang, X., Wang, S., Hua, Q. and Yan, Z., 2017. Competitive adsorption of Pb (II), Cd (II) and Cu (II) onto chitosan-pyromellitic dianhydride modified biochar. *Journal of Colloid and Interface Science*, 506, pp. 355-364.
- [36] Mehrasbi, M. R. and Farahmand kia, Z., 2008. Heavy metal removal from aqueous solution by adsorption on modified banana shell. *Iran J Health Environ*, 1(1), pp. 57-66. (In Persian).
- [37] Fan, L., Ge, X., Qian, Y., Wei, M., Zhang, Z., Yuan, W. E. and Ouyang, Y., 2020. Advances in Synthesis and Applications of Self-Healing Hydrogels, *Front. Bioeng. Biotechnol*, 8(1), pp. 654-654.
- [38] Zambili, F. and Mahmoudian, M., 2023. Investigating the Self-Healing Properties of Hydrogels of Natural Nanocomposites Modified with Polyacrylamide with Medical Applications. *Iran Chemistry and Chemistry Engineering Journal*, 42(4), pp. 31-44. (In Persian).
- [39] Zhou, H., Qian, J., Wang, J., Yao, W., Liu, C., Chen, J. and Cao, X., 2009. Enhanced bioactivity of bone morphogenetic protein-2 with low dose of 2-N,6-O-sulfated chitosan in vitro and in vivo. *Biomaterials*, 30, pp. 1715-1724.
- [40] Sahariah, P. and Másson, M., 2017. Antimicrobial chitosan and chitosan derivatives: A review of the structure-activity relationship. *Biol, Macromol.*, 18, pp. 3846-3868.