مطالعه پارامترهای موثردر جذب زیستی یون مس از پساب‌های معدنی توسط جلبک‌های قهوه‌ای سارگاسوم و پادینا

عباس آقاجانی بزازی*[1] ، مجتبی گلستانی فر[2]، صنم بهزادنیا[3]

۱. عضو هیات علمی گروه مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سوادکوه، پل‌سفید.
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران.
3. School of Earth and Environmental Sciences, James Cook University, Townsville, Qld, Australia.

چکیده :

روش‌هاي مختلفي براي حذف يا كاهش غلظت فلزات سنگين وجود دارد، اما اكثر اين روش‌ها با هزينه‌هاي بالاي سرمايه‌گذاري، بهره‌برداري و نگهداري همراه مي باشند. مطالعات متعددي در سال‌های اخیر براي ابداع روش‌هاي اقتصادي شكل گرفته است. از جمله اين روش‌ها، استفاده از موادي است كه به‌عنوان جاذب كارايي داشته و تهيه آنها با هزينه كم امكان‌پذير باشد. جلبک‌های قهوه‌ای به دلیل ساختار ویژه دیواره سلولی‌شان از موثرترین جذب‌کننده‌هاي فلزات هستند. در این مقاله به منظور پیش‌بینی نتایج فرایند جذب زیستی، به طراحی یک مدل آزمایشگاهی بر اساس پارامترهای pH، غلظت اولیه محلول، زمان ماند، سرعت ارتعاش و میزان جاذب توسط روش سطح پاسخ پرداخته شده است. ۶۴ آزمایش برای مطالعه عوامل موثر در قابلیت جذب زیستي يون محلول مس توسط بايومس غيرفعال جلبك‌هاي قهوه‌اي سارگاسوم و پادينا با استفاده از يك رآكتور ناپيوسته در شرايط مختلف آزمايشگاهي انجام گرفت.

Study of Effective Parameters in Copper Ion Biosorption with Sargassum .sp and Padina .sp Brown Algae for Acid Mine Drainage

A number of methods developed for remediation of heavy metals from aqueous effluent, but generally they require high investment, operation, and maintenance costs. In recent, many studies have been done for exploration cost effective ways for this solution. Herein, make use of sorbents are interesting as an efficient materials by low cost of preparation. Brown algae are most effective sorbents in the heavy metal uptake process cause distinctive cell wall characteristics. For prediction of biosorption process outcomes, in this paper an experiment pattern was developed based on Response Surface Method. It includes 5 parameters as pH, initial concentration of solution, retaining time, shaking rate, and sorbent dosage. Sixty four number of batch experimental tests were done to assess effective parameters in biosorption of Cu (II) by dead biomasses *Sargassum* and *Padina* sps.

۱ - عهده‌دار مکاتبات (Email: abbas_aghajani_bazzazi@yahoo.com)

۱- مقدمه

آلودگی های ناشی از یون های فلزات سنگین موجود در پساب های واحدهای معدني از مهم ترین و خطرناک ترین آلوده کننده های زیست محیطی محسوب می شوند. در بسیاری از کشورهای در حال توسعه کنترل مناسبی بر سیستم های خروجی پساب که وارد محیط زیست می شوند صورت نمی گیرد. همین امر به آلودگی های حاد و مزمن جمعیت های زیستی گیاهی، حیوانی و انسانی منجر می گردد. فلزاتی مانند Cu، Cd، Pb و Hg در مقادیر بالا در بدن جانداران موجب بروز عوارض سوء متعددی می گردد. یکي از این فلزات سنگین که در صنایع معدني به وفور به چشم مي‌خورد آلودگي ناشي از پساب‌هاي حاوي Cu (II) است. قرار گرفتن در معرض مقادیر بالای مس می تواند منجر به بیماریهایی از قبیل hemolysis ، تب بخارات فلزی، Wilson's disease، زخم معده وبیماری های کلیوی، کم خونی و تغییراتی در استخوان شود. علایم ناشی از آلودگی به عنصر مس شامل سردرد و سرگیجه، سوزش دهان و بینی و خونریزی داخلی است. مس در تماس های مزمن سبب تحریک و آسیب جدی کبد، کلیه، طحال، معده و روده انسان می شود.[۱]

شناسائی روش های موثر و ارزان قیمت همواره در پیشبرد صنعت فرآوری و به طبع معدنکاری تاثیر مستقیم دارد. جذب بیولوژیکی اساس یک تکنولوژی جدید جهت حذف فلزات سنگین از محلول های رقیق توسط جاذب های بیولوژیکی است. در این راه جاذب های بیولوژیک می‌توانند به صورت زنده و غیر زنده مورد استفاده قرار گیرند. جذب بیولوژیکی روشی کارآمد و اقتصادی است که دارای مزایایی از جمله خالص سازی با درصد بالا و کاربرد ترکیبات خام ارزان قیمت به عنوان جاذب می باشد.

امروزه تحقیقات بی‌شماری بر روی جلبک ها به عنوان جاذب های بیولوژیکی جهت حذف فلزات سنگین و به طور کلی تصفیه پساب ها صورت گرفته است. در این مورد به ویژه جلبک‌های قهوه ای نسبت به سایر جلبک ها توانایی بالاتری نشان داده اند [۲ و ۳]. این امر با توجه به حضور گونه‌هاي مختلف جلبك‌هاي قهوه‌اي از جمله سارگاسوم[1] و پادینا[2] در سواحل جنوبي كشور حائز اهمیت است. توانایی بالای جذب بیولوژیکی سارگاسوم و پادینا، مربوط به گروه های عاملی موجود در دیواره سلولی آن ها می باشد. در دیواره سلولی جلبک های قهوه ای ترکیباتی از جمله آلژینات و فوکویدان وجود دارد که نقش کلیدی در جذب بیولوژیکی جلبک های قهوه ای دارند. جاذبه الکتروستاتیکی و تشکیل کمپلکس هر دو در فرآیند جذب بیولوژیکی نقش دارند. گروه های عاملی موجود در دیواره سلولی، بسیار تحت تأثیر تغییرات pH هستند و جذب کاتیون های فلزی آزاد توسط آن ها وابستگی شدیدی به pH محلول دارد [۳].

فرآیند جذب زیستی مس توسط جلبک های قهوه ای به عنوان روشی با هزینه سرمایه گذاری و عملیاتی ناچیز، دسترسی آسان و سازگاری منحصر به فرد این روش با محیط زیست، می تواند گامی موثر در راه حفاظت از محیط زیست صنایع معدنی باشد. براي دست یابي به موفقت در مورد این تکنولوژي و کاربرد عملي آن در صنایع معدني، مطالعه پارامترهای موثر در بهینه سازی کارائی فرآیند، امری حیاتی است[۴]. در این پژوهش به منظور دستیابي به این مهم استفاده از طراحي آزمایش و رگرسیون چندگانه در ستور کار قرار گرفته است.

۲- طراحي آزمایشات

متاسفانه اکثر آزمایشات صورتگرفته در خصوص چگونگي تاثیر پارامترهاي موثر در جذب زیستی به صورت بهینه سازي مرحله‌اي[3] بوده است [۴]. به‌طوري كه در هر مرحله با در نظر گرفتن تغییرات یك پارامتر و ثابت نگاه‌داشتن سایر پارامترها، میزان بهینه آن پارامتر تعیین مي‌شد. این روش معایب زیادي دارد كه از مهمترین آنها مي‌توان به نادیده‌گرفتن تاثیر متقابل پارامترها كه ممكن است موجود باشد اشاره كرد. این موضوع كه آیا رفتار پارامترها به صورت مستقل یا وابسته است در تحقیقات پیشین مشخص نشده‌است. لذا طراحي آزمایشات با فرض استقلال

1 - Sargassum sp.
2 - Padina sp.
3 - Step to Step optimization

پارامترها صورت پذیرفته است. در این پژوهش به منظور تعیین رفتار پارامترها به همراه چگونگي وابستگي آنها از روش طراحي آزمايش سطح پاسخ[1] استفاده مي‌گردد.

روش طراحی آزمایش سطح پاسخ (RSM) یکی از توانا‌ترین روشهای طراحی آزمایش است. تعداد آزمایشات این روش عموما بیشتر از روش تاگوچی[2] و کمتر از روشهایی مانند Full Factorial است. در این روش امکان مدلسازی آزمایشات بدون تعیین خطی و یا غیر خطی بودن آنها وجود دارد. همچنین ارائه روابط اندرکنش میان پارامترها و متغییر خروجی (میزان جذب زیستی) و محاسبه شرایط بهینه فرایند محیا است [۵]. در این تحقیق به منظور اجراي سازوكار لازم براي بكارگيري روش RSM از نرم‌افزار DX7 مي‌گردد كه در اين ابزار چندين الگوي مختلف براي روش RSM تعبيه شده است [۶]. در میان این مدل ها، با توجه به شرایط، اهداف و روش پیشبینی شده اجرای آزمایشات، از روش CCD[3] که بیشترین کاربرد را نیز داشته است، استفاده شده‌است. طرح CCM در واقع یک طرح عاملی دو سطحی است که نقاط گره ای میانی[4] و محوری[5] نیز به آن افزوده شده است. مدل CCM عموما دارای ۵ سطح برای متغییر ها است اما با اتخاذ مقدار Alpha=1.0 تبدیل به مدل Face-centered CCD شده که دارای ۳ سطح برای هر متغییر مي‌باشد. این مدل برای ارزیابی یک طرح درجه دو[6] مناسب است و کمتر به خطا های آزمایشات حساس است به طوری که تکرار نقاط میانی می‌تواند پیشبینی مناسبی از خطاها بدست دهد که این موضوع تاثیر زیادی بر عملکرد این روش دارد.

با توجه توضیحات ارائه شده در مورد چگونگی مدل CCD و همچنین علل انتخاب آن، طراحی آزمایشات برای دو گونه جلبک قهوه‌ای سارگاسوم و پادینا صورت پذیرفته است. برای این منظور ابتدا با رجوع به منابع علمی موجود در این خصوص، پارامترهایی که بیشترین تاثیر را در میزان جذب زیستی ایفا می‌کردند شناسایی شدند. این عوامل در هر دو گونه جلبک عبارت‌اند از pH، میزان غلظت محلول اولیه، میزان جلبک، ارتعاش و زمان ماند. به همین ترتیب مقادیر حدود متغییر های آزمایشات نیز از منابع علمی تخمین زده شده است. با احتساب مقدار Alpha=1 (حالت face-centered) و استفاده از مدل مذبور در شرایط Fraction=1/2 اطلاعات الگوي آزمايشات مطابق جدول ۱ بدست آمده است.

جدول ۱- سطوح مختلف پارامترهای موثر بر فرآیند جذب زیستی مس بر اساس روش CCD

جلبک	pH	زمان ماند (دقیقه)	میزان ارتعاش (دور در دقیقه)	غلظت اولیه (میلی گرم بر لیتر)	میزان جلبک (گرم)
Sargassum	۴، ۵، ۶	۳۰، ۶۰، ۹۰	۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰	۵۰، ۱۲۵، ۲۰۰	۲، ۳/۵، ۵
Padina	۴، ۵، ۶	۳۰، ۶۰، ۹۰	۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰	۲۰۰، ۶۰۰، ۱۰۰۰	۰/۱، ۰/۲، ۰/۳

۳- آزمایشات تعادلی

۳-۱- آماده‌سازی جاذب‌زیستي

جلبک های قهوه ای سارگاسوم و پادینا از سواحل خلیج فارس در منطقه بندرلنگه جمع آوری شدند. جلبک های تهیه شده پس از انتقال به آزمایشگاه با آب شسته شدند و سپس به منظور حذف ناخالصی ها و جداشدن یون های آزاد موجود در آب دریا (از جمله Na^+ و Ca^{2+}) با آب مقطر شستشو داده شدند. بیوماس شسته شده به منظور خشک شدن در دمای آزمایشگاه (۲۱ ±۱°C) به مدت ۲ تا ۳ روز نگهداری شد. در مرحله بعدي جلبك هاي خشك شده به كمك خردكن خرد شدند و جلبک

1 - Response Surface Merthod (RSM)
2 - Taguchi
3 - Central Composite Method (CCM)
4 - Center points
5 - Axial points
6 - Quadratic model

سارگاسوم با الک های مش ۱-۲ میلی متر و جلبک پادینا با الک های مش ۰/۵-۱ میلی متر دانه بندی شدند.

۳-۲- محلول‌سازی

به منظور تهیه و آماده سازي محلول فلز مرجع[1] مس با غلظت‌هاي ۵۰، ۱۲۵، ۲۰۰ براي گونه سارگاسوم و ۲۰۰، ۶۰۰، ۱۰۰۰ براي گونه پادینا از محلول استاندارد نیترات مس شامل ۱۰۰۰ میلی گرم بر لیتر مس (II) شرکت مرك استفاده شده است. از آنجاکه غلظت های مختلف فلز مس برای انجام آزمایشات مورد نیاز بود، با رقیق کردن محلول استاندارد اولیه با استفاده از آب مقطر، محلول های فلزی مورد نظر آماده شدند. در هر آزمایش اسیدیته محلول فلز با استفاده از NaOH ۱ مولار و HCl ۱ مولار تنظیم شد. مقادیرمس‌باقیمانده درمحیط‌جذب‌با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر جذب اتمي (SpectrAA-240VARIAN, flame mode) تعیین شدند.

۳-۳- انجام آزمایشات

برای انجام آزمایشات از ارلن‌مایرهاي ۱۰۰ میلی لیتری استفاده شد، به صورتی که هر ارلن حاوی ۵۰ میلی لیتر محلول فلز مس با غلظت های متفاوت ۵۰ تا ۲۰۰ میلی گرم بر لیتر برای سارگاسوم و ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ برای پادینا بود. میزان مشخصی از بیوماس جلبک های قهوه ای سارگاسوم و پادینا به ارلن ها اضافه گشت و روی شیکر با سرعت های مشخص و متفاوت در دمای ثابت آزمایشگاه (۲۱ ±۱°C) طی زمان مشخص قرار داده شد. در مرحله بعد پس از جداسازی جلبک ها از محلول فلز مس با استفاده از کاغذ صافی، فلز مس باقی مانده در محلول به وسیله دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد.

۴- ایزوترم‌هاي جذب

برای تطبیق داده های تجربی از مدل‌های ریاضی به منظور توصیف تعادل جذب فلز توسط جاذب در سیستم ناپیوسته استفاده می شود. بدین منظور ابتدا میزان جرم فلز معادل واحد جرم جاذب (q) از طریق موازنه جرم (رابطه ۱) محاسبه می‌گردد [۷]. در ادامه ارزیابی صحت اطلاعات از دو مدل ایزوترم جذب لانگمور[2] و فرندلیچ[3] استفاده شده است.

$$q = \frac{V(C_i - C_e)}{W} \qquad \text{(رابطه ۱)}$$

که در آن q غلظت تعادلی تجربی برحسب میلی‌گرم یون جذب شده فلزي برگرم جاذب، V حجم محلول آبی برحسب میلی‌لیتر، C_i غلظت اولیه فلز در محلول برحسب میلی‌گرم بر لیتر، C_e غلظت نهایی فلز در محلول برحسب میلی گرم بر لیتر و Wمقدار جاذب خشک برحسب میلی گرم می باشد.

۴-۱- ایزودرم لانگمور

ایزودرم جذب لانگمور برای توصیف روابط تعادلی بین یک توده جامد و فاز مایع بکار می رود. این مدل مقید بر آن است که تمامی سایت های جذبی موجود در جاذب به طور التزامی تمایل یکسانی برای جذب سطحی دارند. همچنین در ایزودرم جذب سطحی لانگمور فرض بر آن است که سطح کاملا یکنواخت بوده و جذب به صورت تک لایه است، هر مولکول جذب شونده فقط یک جایگاه سطحی را اشغال می کند، مولکول های جذب شونده هیچ بر همکنشی با هم ندارند و جذب سطحی برگشت پذیر است[۸]. وجود پارامترهای قابل شرح جزو مزایای این مدل محسوب می شود و از معایب آن می توان به عدم وجود ساختار و جذب تک لایه اشاره کرد.[۹]

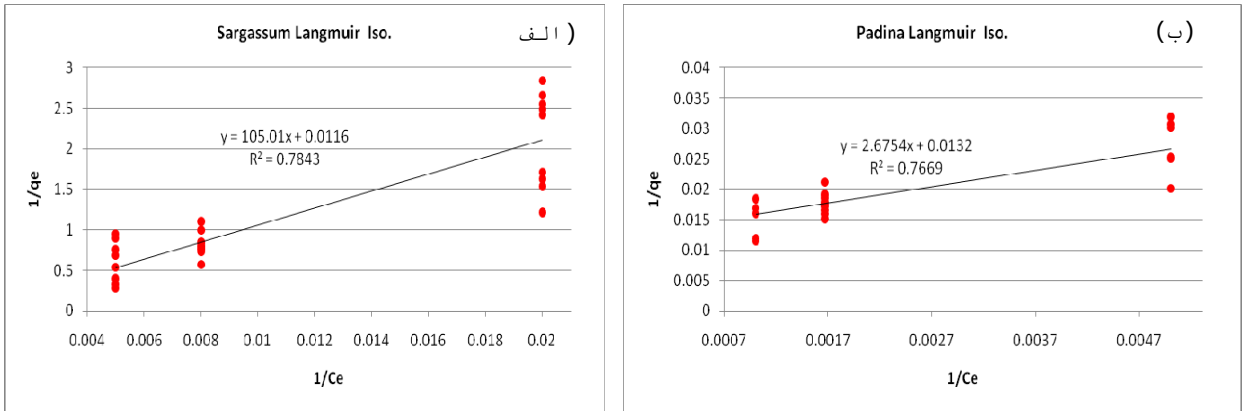
$$q = \frac{q_{\max} b c_e}{1 + b c_e} \qquad \text{(رابطه ۲)}$$

که در آن q غلظت تعادلی (میلی‌گرم یون جذب شده فلزی بر گرم از جاذب)، Ce غلظت نهایی فلز در محلول (میلی‌گرم بر لیتر)، q_{max} حداکثر ظرفیت برداشت و b ثابت مدل لانگمور، نشان دهنده میل ترکیبی جذب شونده و جاذب است. از رسم نمودار 1/ q به 1/ C_e یک خط راست با شیب 1/ $b.q_{max}$ و

---

1 - Stock solution
2 - Langmuir
3 - Freundlich

عرض از مبداء $1/q_{max}$ حاصل می‌شود که با محاسبه پارامترهای b و q_{max} و جایگزینی در معادله ۲ مقدار q قابل محاسبه است [۱]. نتایج ایزودرم لانگمور براي گونه‌هاي سارگاسوم و پادینا در شکل ۱ ارائه شده است.



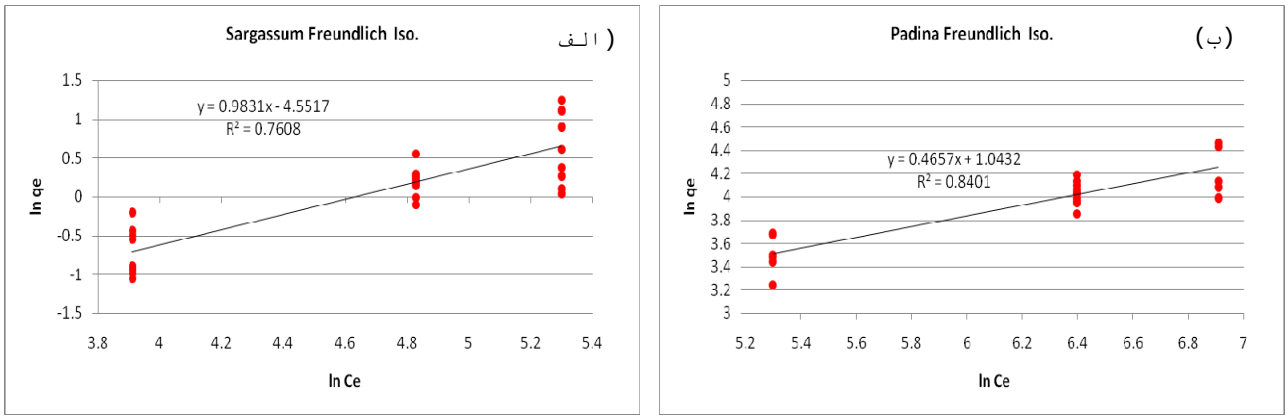
شکل ۱- نمودار لانگمور براي جذب زیستي مس در گونه‌های سارگاسوم (الف) و پادینا (ب)

۴-۲- ایزوترم فرندلیچ

در ایزوترم فرندلیچ فرض بر این است که تمامی سایتهای جذبی موجود تمایل یکسانی برای جذب سطحی ندارند و ابتدا سایتهای قوی‌تر اشغال می شوند. مزیت این مدل بیان ساده آن است ولی عدم وجود ساختار و عدم ثبات از معایب مدل فرندلیچ است. معادله فرندلیچ به شرح ذیل است [۱۰]:

$$q = K_f C_e^{1/n} \qquad \text{(رابطه ۳)}$$

که در آن q غلظت تعادلی برحسب میلی گرم یون جذب شده فلزی بر گرم از جاذب، K و n ثابت های ایزوترم فرندلیچ می باشد. از رسم نمودار Ln q در مقابل $\text{Ln } C_e$ یک خط راست با شیب 1/n و عرض از مبداء $\text{Ln } K_f$ حاصل می شود. که با محاسبه پارامترهای K_f و n و جایگزینی در معادله ۳ مقدار q قابل محاسبه است. نتایج ایزودرم فرندلیچ براي گونه‌هاي سارگاسوم و پادینا در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲- نمودار فرندلیچ براي جذب زیستي مس در گونه‌های سارگاسوم (الف) و پادینا (ب)

۵- تحلیل رگرسیون

۵-۱- ارتباط بین متغیر وابسته و متغیرهای مستقل

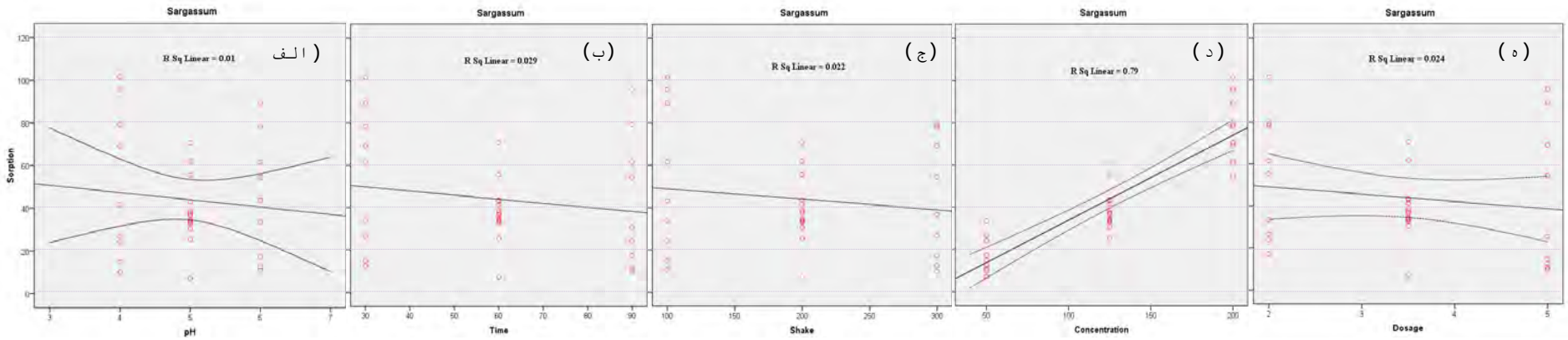
متغیرهای مستقل در این پروژه را pH ، زمان ماندگاری(دقیقه) (T)، میزان ارتعاش (دور بر دقیقه) (Sh)، غلظت اولیه (میلی گرم بر لیتر) (C) و میزان جاذب(گرم) تشکیل می دادند و متغیر وابسته که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است میزان جذب یون مس(S) (میلی گرم بر لیتر) می باشد. ابتدا، میزان ارتباط بین متغیر وابسته و هر یک از متغیرهای مستقل در

این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. نتایج براي جلبك سارگاسوم در شکل ۳ و براي گونه پادینا در شکل ۴ ارائه شده است.

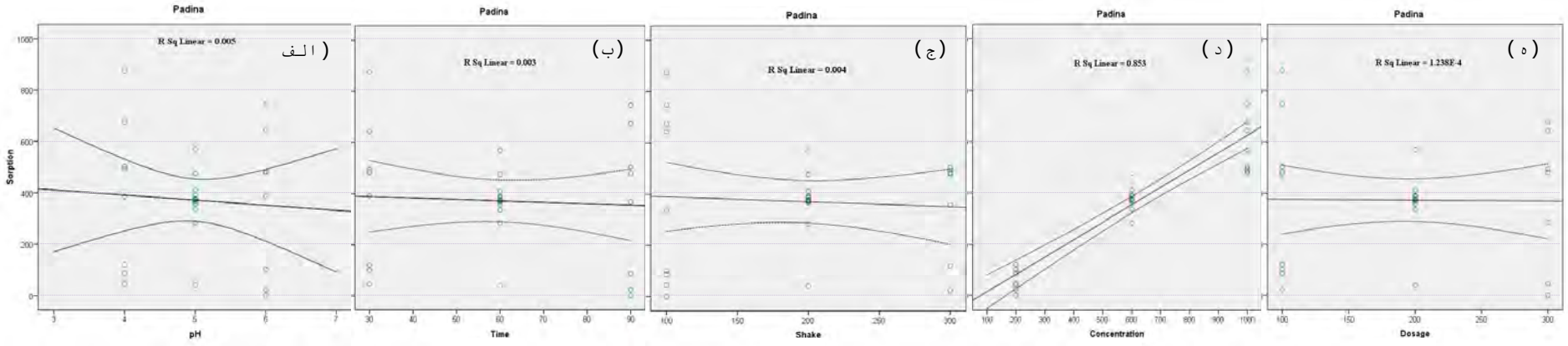
همانطور که از اشکال ۳-الف و ۴-الف ملاحظه می گردد مقدار بسیار کم ضریب همبستگی بین متغیر مستقل و متغیر وابسته بر این امر دلالت دارد که نمی توان برای پیش بینی مقدار جذب زیستی یون مس یک رابطه بین مقدار pH و متغیر وابسته بیان نمود. یکی از دلایل اصلی برای توجیه این نمودار این است که در این آزمایشات فقط سه مقدار pH (۴ و ۵ و ۶) که در حقیقت محدوده طبیعی pH در پسآب ها و آب های آلاینده معادن می باشد در نظر گرفته شده است و در صورت در نظر گرفتن مقادیر بینابین این اعداد، تعداد آزمایشات به مقدار قابل ملاحظه ای افزایش می یافت ولی در عین حال ممکن بود ضریب همبستگی نیز افزایش یابد. لازم بذکر است که در این اشکال بهترین خط برازش شده بصورت توپر دیده می شود و سطح اطمینان ۹۵ درصدی داده ها نسبت به خط رگرسیون به صورت خط- نقطه دیده می شود. همچنین میزان ضریب R^2 بیانگر ارتباط بین دو متغیر می باشد که هر چه این عدد به ۱ نزدیکتر باشد بدین معنی است که دو متغیر کاملاً با همدیگر ارتباط خطی دارند.

ارتباط بین زمان ماندگاری و میزان جذب نیز در اشکال ۳-ب و ۴-ب دیده می شود. در این تحقیق زمانهای ماندگاری ۳۰، ۶۰ و ۹۰ دقیقه در نظر گرفته شده است و با توجه به اعداد متفاوت بدست آمده برای زمانهای مختلف نمی توان استناد کرد که با افزایش زمان میزان جذب نیز افزایش می یابد زیرا ضریب همبستگی بین متغیر زمان ماندگاری و متغیر وابسته بسیار کم می باشد.

با توجه به محدویتهای موجود برای انجام آزمایشات، سه میزان ارتعاش ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ دور بر دقیقه به عنوان مقادیر متغیر برای متغیر میزان ارتعاش در نظر گرفته شد و در اشکال ۳-ج و ۴-ج ارتباط بین میزان ارتعاش و همچنین میزان جذب یون مس برای دو جلبک مذکور نشان داده شده است.



شکل ۳ – رابطه بین میزان جذب و pH (الف)، زمان ماندگاری (ب)، میزان ارتعاش (ج)، غلظت اولیه (د) و میزان جاذب (ه) برای گونه سارگاسوم



شکل ۴ – رابطه بین میزان جذب و pH (الف)، زمان ماندگاری (ب)، میزان ارتعاش (ج)، غلظت اولیه (د) و میزان جاذب (ه) برای گونه پادینا

غلظت محلول اولیه برای جلبک پادینا مقادیر ۲۰۰، ۶۰۰ و ۱۰۰۰ میلی گرم بر لیتر در نظر گرفته شده است که ارتباط بسیار خوبی بین این متغیر مستقل و میزان جذب زیستی یون مس دیده می شود بطوری که هر چه غلظت اولیه افزایش یابد میزان جذب زیستی نیز بطور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد. همچنین برای جلبک سارگاسوم مقادیر غلظت اولیه ۵۰، ۱۲۵ و ۲۰۰ میلی گرم بر لیتر در نظر گرفته شده است. همانطور که در اشکال ۳-د و ۴-د ملاحظه می گردد میزان ضریب همبستگی در مورد این متغیر بسیار بالا می باشد و می توان استناد نمود که این پارامتر تاثیر گذارترین پارامتر در جذب زیستی یون مس می باشد.

میزان جاذب مقادیر ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی گرم برای جلبک پادینا و همچنین ۲، ۳/۵ و ۵ میلی گرم برای جلبک سارگاسوم در نظر گرفته شده است و ارتباط بین میزان جاذب و مقدار جذب زیستی یون مس در اشکال ۳-ه و ۴-ه دیده می شود. بر خلاف شکال ۳-د و ۴-د، میزان ضریب همبستگی برای این متغیر مستقل با میزان جذب بسیار کم می باشد.

همانطور که در اشکال ۳ الی ۴ دیده می شود از بین پنج متغیر مستقل تنها متغیر غلظت اولیه جلبک با میزان جذب یون مس ارتباط مستقیم با ضریب همبستگی بالا از خود نشان می دهد و می-توان به این نتیجه رسید که این متغیر نسبت به سایر متغیرها تاثیر بیشتری بر روی جذب یون مس دارد.

جدول ۲- نتایج رگرسیون خطی برای دو جلبک پادینا و سارگاسوم

جلبک	میزان جلبک	غلظت اولیه	میزان ارتعاش	زمان ماند	pH
Sargassum	S=377.6-0.33D	S=-53.6+0.67C	S=408.6-0.19Sh	S=405.4-0.57T	S=470-19.9pH
Padina	S=56.26-3.5D	S=-6.335+0.4C	S=53.94-0.05Sh	S=55.48-0.19T	S=61-3.42pH

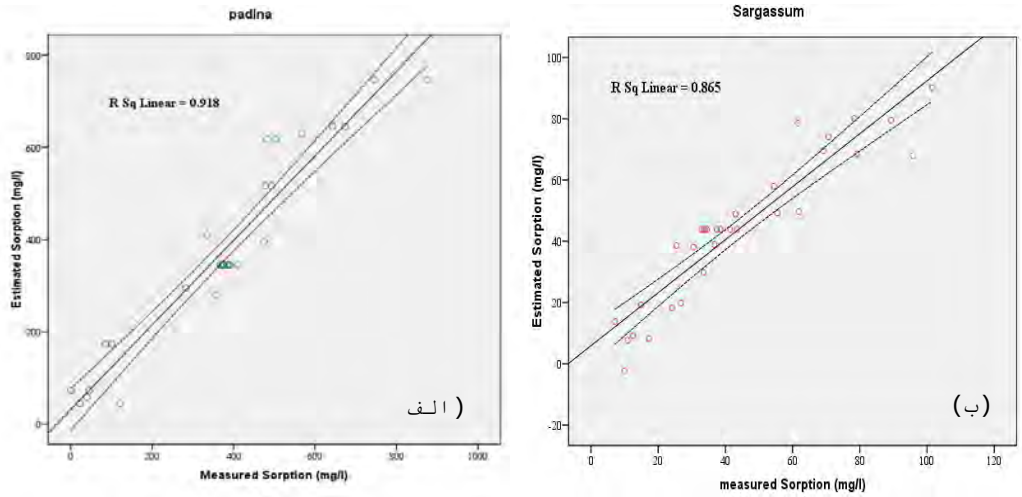
۵-۲- رگرسیون خطی چندگانه

بر اساس یافته‌ها، مقدار pH و همچنین زمان ماندگاری کمترین تاثیر را در میزان جذب دارند و در نتیجه رابطه رگرسیون خطی شامل سه متغیر میزان ارتعاش (دور بر دقیقه)، غلظت اولیه (میلی گرم بر لیتر) و میزان جاذب (میلی گرم و گرم) می باشد. این رابطه با در نظر گرفتن ضریب ثابت در معادله رگرسیون چندگانه خطی برای جلبک سارگاسوم و پادینا به ترتیب به شکل رابطه ۴ و ۵ می باشد.

$$S = 27.588 + 0.402(C) - 0.193(T) - 3.530(D) - 0.05(Sh) \quad R^2 = 0.865 \qquad \text{(رابطه ۴)}$$

$$S = 144.724 + 0.717(C) - 0.646(Sh) - 0.505(D) \quad R^2 = 0.918 \qquad \text{(رابطه ۵)}$$

در شکل ۵-الف و ۵-ب گراف‌های مقادیر اندازه گیری شده و مقادیر بدست آمده به ترتیب برای جلبک پادینا و سارگاسوم از رابطه تجربی نشان داده شده اند. نمودار حاصل دلالت بر این امر دارد که رابطه تجربی ارائه شده از دقت بسیار بالایی برای پیش بینی متغیر وابسته برخوردار است زیرا مقدار ضریب R^2 به ترتیب برابر ۰/۹۱۸ و ۰/۸۶۵ می باشد. لازم به ذکر است که روابط ارائه شده در محدوده مقادیر اندازه‌گیری معتبر است و بر اساس میزان جذب ارائه شده است.



شکل ۵- ارتباط بین مقدار جذب زیستی یون مس با مقدار بدست آمده از رابطه تجربی برای جلبک پادینا (الف) و سارگاسوم (ب)

۶- نتیجه‌گیری

فرایند جذب زیستی به دلیل هزینه پایین عملیات و صرفه اقتصادی، انجام مراحل حذف در زمان کوتاه، بهره‌گیری از تجهیزات و ابزار کار ساده و ارزان قیمت، عدم نیاز به کنترولرهای پیچیده و تخصص های خاص، بازده بالا در استخراج یونهای فلزی از حجمهای زیاد آب، کاربرد ترکیبات خام ارزان قیمت به عنوان جاذب بیولوژیکی، عدم آلودگی محیط زیست و پالایش سریع طبیعت و امکان بازیافت مجدد فلزات یک ابزار مطلوب به منظور کنترل آلودگی‌ها از پسابهای معدنی هستند. در این مطالعه پارامترهای موثر در جذب زیستی مس توسط جلبک های قهوه ای مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این مطالعات حاکی از آن است که جلبک دریایی قهوه ای سارگاسوم و پادیناجاذب مناسبی جهت حذف انتخابی یونهای فلزات سنگین از محلولهای آبی است و به نظر می رسد که اجرای این طرح در مناطق معدنی که میزان فلزات سنگین موجود در پسابهای آنها بالا است، به عنوان روشی مکمل و اطمینان بخش با نتایج کاملاً مفید حائز اهمیت می باشد.

نتایج مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که بالاترین درصد جذب یونهای مس با غلظتهای اولیه ۲۰۰، ۶۰۰ و ۱۰۰۰ میلی گرم بر لیتر به ترتیب برابر ۹۹/۲%، ۵۵% و ۵۳% در مورد گونه پادینا است. در مورد سارگاسوم بالاترین درصد جذب یونهای مس با غلظتهای اولیه ۵۰، ۱۲۵ و ۲۰۰ میلی گرم بر لیتر به ترتیب برابر ۸۸%، ۷۶% و ۷۳% است. همچنین در حدود ۸۰ تا ۹۰ درصد جذب یونهای مس در طی ۴۵ دقیقه صورت می گیرد (اگرچه زمان ماندگاری ۱۵ دقیقه ، زمان کافی و مناسبی جهت جذب بیولوژیکی بود). تغییردر مقدار جاذب تأثیر زیادی برروی میزان جذب نداشته ، اما به طور کلی مقادیر 3.5 تا 5 گرم جاذب نتایج بهتری را نشان می دهد. همچنین با افزایش غلظت اولیه محلول درصد جذب نیز افزایش یافت. مدلهای جذبی لانگمور و فرندلیچ برای تطبیق داده های تجربی به کار برده شدند . بر این اساس ماکزیمم ظرفیت جذب (q_{max}) مس ۸۱/۴ (mg/g) برای سارگاسوم و ۹۴/۴ (mg/g) برای گونه پادینا به دست آمد.

به منظور پیشبینی پارامترهای تاثیر گذار در میزان جذب، با استفاده از روش طراحی آزمایش ۳۲ آزمایش با الگوی خاص برای هر گونه جلبک طراحی شد تا تاثیر همزمان متغییر ها ارزیابی گردد. بر اساس نتایج بدست آمده، ۲ رابطه خطی برای پیشبینی میزان جذب جلبک‌ها ارائه گردید که در آنها عموما غلظت محلول اولیه و میزان جاذب از عوامل کلیدی هستند.

منابع

[1] Forster C.F., Wase D.A.J. (Eds.) (1997) Biosorbent for Metal Ions. Taylor & Francis Ltd., London.

[2] Pavasant P., Apiratikul R., Sungkhum V., Suthiparinyanont P., Wattanachira S., Marhaba T. F. (2006). Biosorption of Cu^{2+}, Cd^{2+}, Pb^{2+} and Zn^{2+} using dried marine green macroalga *Caulerpa lentillifera* . Bioresource Technology 97: 2321-2329.

[3] Vijayaraghavan K., Prabu D. (2006) Potential of Sargassum wightii biomass for copper (II) removal from aqueous solution: Application of different mathematical models to batch and continuous biosorption data. J. Hazard Materials, B 137: 558-564.

[4] Davis T.A., Volesky B. and Mucci A. (2003) A review of the biochemistry of heavy metal biosorption by brown algae. Water Research 37: 4311-4330.

[5] Montgomery D.C., (2005) Design and Analysis of Experiments, 6th ed., John Wiley and Sons, New York.

[6] User manual of Design of Experiment Software.

[7] Volesky B. and Holen Z.R., (1995) Biosorption of heavy metals. Biotechnology progress 11: 235-250.

[8] Vijayaraghavan K., Padmesh T.V.N., Palanivelu K. and Velan M. (2006) Biosorption of nickel (II) ions onto Sargassum wighitii: Application of two parameter and three parameter isotherm models. J. hazardous materials B133: 304-308.

[9] Amarasinghe B., Williams R. (2007) Tea waste as a low lost adsorbent for the removal of Cu and Pb from wastewater. Chemical Engineering Journal 132: 299-309.

[10] Volesky B. (2007) Biosorption and me. Water Research 41(18): 4017-4029.