



دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر  
فصلنامه‌ی کاربرد شیمی در محیط زیست

سال نهم، شماره‌ی ۳۳  
زمستان ۱۳۹۶، صفحات ۸-۱

## جذب یون مس از پساب‌های صنعتی توسط هیدروژل‌های کامپوزیتی بر پایه پلی وینیل الکل و پلی ساکارید

ندا پاوندی

گروه مهندسی شیمی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

نویده انرجان

گروه مهندسی شیمی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

Email: anarjan@iaut.ac.ir

### چکیده

آلودگی ناشی از یون‌های فلزات سنگین موجود در پساب‌های صنعتی از مهم‌ترین و خطرناک‌ترین آلوده‌کننده‌های محیط‌زیست می‌باشند که در صورت عدم حذف آن‌ها ضمن ورود به آب‌های سطحی و زیر زمینی، موجب تشکیل کمپلکس‌های سمی شده و خطرات بالقوه‌ای را برای انسان و اکوسیستم ایجاد می‌نماید. هدف از این پژوهش جذب یون‌های فلز سنگین مس از پساب‌های صنعتی با استفاده از هیدروژل‌های کامپوزیتی پلی وینیل الکل / کربوکسی متیل سلولز (PVA/CMC) می‌باشد که با روش انجماد- یخ‌زدایی انجام می‌گیرد. روش رویه پاسخ جهت بهینه‌سازی و تعیین بهترین شرایط تولید هیدروژل‌ها استفاده گردید. هیدروژل‌های بهینه شده قادر به حذف درصد بالایی از یون مس می‌باشد و می‌تواند جهت تصفیه فاضلاب‌های آلوده به فلزات سنگین با موفقیت استفاده گردد.

**کلید واژه:** پلی وینیل الکل، کربوکسی متیل سلولز، انجماد- یخ‌زدایی، بازیافت یون‌های فلزی، هیدروژل‌های PVA/CMC.

## مقدمه

هیدروژل‌ها شبکه پلیمری سه بعدی آبدوست با پیوند عرضی و غیر محلول می‌باشند که می‌توانند آب را جذب کرده و متورم شوند شبکه‌های پیوند عرضی سه بعدی هیدروژل‌های متخلخل با ظرفیت جذب بالا در چندین دوره استفاده شدند [۱-۲]. پورجوادی و همکاران هیدروژل‌هایی بر اساس کربوکسی متیل سلولز (CMC) و سدیم آلژینات به‌عنوان سوپر جاذب تهیه کردند که ظرفیت تورم ( $\frac{water}{g\ hydrogel}$ ) ۲۲۱/۳ در ۸۵ درجه سانتی‌گراد را نشان داد [۳]. مشابه آن گروه تحقیقی دیگری هیدروژل‌های کوپلیمر پلی و نیل الکل PVA/CMC برای حذف رنگ‌ها را تهیه کردند. نتایج نشان دادند ظرفیت بالای جذب هیدروژل‌های سنتز شده می‌تواند (۱۴۰ میلی‌گرم رنگ/ گرم هیدروژل) جذب کنند [۴]. در کاربردهای دیگر Nugent نمودار هیدروژل-های NaOH /PVA تشکیل شده با فیلم‌های پلی‌اکریلیک اسید را برای تهیه دارو ارائه کرد و هیدروژل‌های کامپوزیتی ترکیب شده با تئوفیلین که از مدل Fickian تبعیت کردند. اخیراً هیدروژل‌هایی مخصوص به‌عنوان جاذب در حذف یون‌های فلزی سنگین از پساب‌های صنعتی مورد استفاده قرار گرفت، که آب موجود در هیدروژل‌ها، یون‌های فلزی را در شبکه‌های پلیمری نگهداری می‌کند. سپس گروه‌های عاملی هیدروژل‌ها مانند هیدروکسیل- آمین - کربوکسیل - فسفات و سولفید می‌توانند به‌عنوان محل نافذ برای گرفتن یون‌های فلزی که ممکن است از یون‌های فلزی محلول‌های آبی حذف شده باشند، عمل کنند [۵].

هیدروژل‌ها می‌توانند توسط تشکیل پیوندهای فیزیکی و شیمیایی سنتز شوند. هیدروژل‌های فیزیکی تشکیل شده توسط پیوند عرضی به‌واسطه پیچش‌های مولکولی، یون‌های واکنش‌دهنده، باند هیدروژن، پروتئین واکنش‌دهنده یا کریستالیزاسیون سنتز می‌شوند. هیدروژل‌های تهیه شده به روش فیزیکی مانع از استفاده واسطه‌ها یا آغازگرها در پیوند عرضی می‌شوند، که در زیست پزشکی و کاربردهای دارو-سازی مقرون به صرفه هستند [۶]. یکی از روش‌های فیزیکی

برای تهیه هیدروژل‌ها کریستالیزاسیون می‌باشد که اولین بار توسط Peppas پیشنهاد شد. او روش انجماد- یخ زدایی را برای تهیه هیدروژل‌ها پیشنهاد کرد. هیدروژل‌ها به واسطه فاز جدا کننده در محلول پلیمر بعد از چرخه انجماد- یخ زدایی تشکیل یافتند. هیدروژل‌ها به واسطه جداسازی فاز در محلول پلیمر بعد از تکرار چرخه تشکیل یافتند. علاوه بر این زمانی که پلیمر تحت دمای پایین قرار گرفت بلورهای پلیمر تشکیل شدند که به‌عنوان محل اتصال شبکه‌های پلیمری نامحلول عمل کرد [۷].

در این تحقیق برای تهیه هیدروژل‌های PVA/CMC با روش فیزیکی چرخه انجماد- یخ‌زدایی انتخاب شد. خاصیت فیزیکی هیدروژل‌های PVA/CMC از جمله کریستالیزاسیون، کسر ژل و نسبت تورم در مقدار CMC بررسی شد. برای بررسی میزان جذب یون توسط هیدروژل‌ها بر پایه PVA/CMC به محیط  $Cu^{2+}$  اضافه شدند. انتظار می‌رود از این روش برای بازیافت فلزات سنگین از پساب‌های صنعتی و دیگر حالت‌های خطرناک استفاده کرد. هیدروژل‌های تهیه شده به روش انجماد- یخ زدایی بیش تر کشیده شدند چون خاصیت الاستیک بهتری از هیدروژل‌های تهیه شده به روش شیمیایی دارند. بعلاوه خاصیت مکانیکی هیدروژل‌ها را می‌توان با تغییر دادن در تعداد مراحل چرخه انجماد- یخ زدایی تعدیل کرد. چرخه‌های انجماد- یخ زدایی با آب شدن بلورهای یخ در مرحله یخ‌زدایی باعث ایجاد فضای خالی و ساختار متخلخل در هیدروژل‌ها می‌شوند [۸].

## مواد و روش‌ها

- مواد

PVA و CMC از شرکت مرک آلمان خریداری شدند. سولفات مس نیز از شرکت متان تهیه گردید.

- تهیه هیدروژل‌ها

تهیه محلول PVA : PVA با غلظت ۵ گرم در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب دیونیزه ۹۰ درجه سانتی‌گراد حل گردید.

$$\text{Swelling ratio}\% = (W_t - W_d)/W_d \times 100\% \quad (2)$$

جدول ۱- طراحی آزمایشگاهی و متغیرهای مستقل و وابسته

sample	cycle	Freeze (h) time	Gel fraction	Swelling
۱	۸	۹	۷۸	۱۱۹
۲	۸	۹	۶۹	۱۱۲
۳	۸	۹	۷۸	۱۱۰
۴	۸	۹	۶۶	۱۱۰
۵	۸	۹	۷۰	۱۱۴
۶	۸	۱۰	۷۶	۱۱۶
۷	۵	۹	۸۸	۱۱۰
۸	۱۰	۷	۹۴	۱۳۰
۹	۶	۷	۸۸	۱۴۵
۱۰	۱۰	۱۱	۸۸	۱۴۵
۱۱	۶	۱۱	۹۴	۱۰۴
۱۲	۸	۹	۶۹	۱۱۰
۱۳	۸	۹	۷۷	۱۱۰
۱۴	۸	۹	۶۹	۱۱۰
۱۵	۸	۶	۷۷	۱۲۲
۱۶	۱۱	۹	*	*

### یافته‌ها و بحث

نتایج در جدول ۲ آورده شده است.

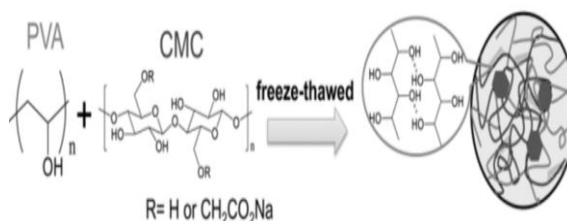
جدول ۲- نتایج آنالیز واریانس برای درصد تورم

Term	T-Value	P-Value
Constant	50.69	0.000
Freeze time	-2.36	0.043
cycle	1.91	0.089
Freeze time*Freeze time	1.90	0.090
cycle*cycle	2.86	0.019
Freeze time*cycle	4.41	0.002
Model Summary	R-sq(adj): 74.94%	
	R-sq: 83.89%	

مدل پیشنهادی تحلیل رگرسیون نیز به صورت زیر می‌باشد:

تهیه محلول CMC: ۱ گرم CMC در ۱۰۰ میلی لیتر آب ۲۵ درجه سانتی گراد حل شد.

محلول PVA با نسبت ۲ به ۱ با محلول CMC مخلوط گردیده و طبق جدول ۱ تحت فرآیند انجماد-یخ‌زدایی قرار گرفت. انجماد در فریزر خانگی (Sumsung618L) و یخ-زدایی در ماکروویو (Media34A26) انجام گرفت. شماتیک تهیه هیدروژل در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: شماتیک تهیه هیدروژل‌های کامپوزیتی PVA/CMC به روش انجماد-یخ‌زدایی [۸]

بعد از تکمیل سیکل‌های فرآیند انجماد-یخ‌زدایی کسر ژل و درصد تورم آن‌ها به صورت زیر اندازه‌گیری شد که نتایج در جدول ۱ ارائه شده است.

نمونه‌ها با اندازه  $1\text{cm}^2 \times 1\text{cm}^2$  در  $37^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت خشک شدند که با  $W_0$  نشان داده شد. نمونه‌ها سپس در آب دیونیزه در دمای اتاق به مدت ۲۴ ساعت غوطه‌ور شدند تا بخشی از محلول حذف شود، که با خشک کردن نمونه‌ها در  $37^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت با  $W_1$  علامت‌گذاری شد. مقدار کسر ژل از رابطه زیر محاسبه شد [۹]:

$$\text{Gel fraction}\% = \left(\frac{w_1}{w_0}\right) \times 100\% \quad (1)$$

نسبت تورم با فرو بردن هیدروژل‌های PVA/CMC خشک شده  $W_d$  در مقدار زیادی آب دیونیزه تحت دمای اتاق به مدت ۴۸ ساعت تا رسیدن به تعادل اندازه‌گیری شد.

جرم هیدروژل‌های مرطوب  $W_t$  بعد از حذف کامل آب سطحی اندازه‌گیری شد. نسبت تورم هیدروژل‌ها با معادله زیر محاسبه شد:

جدول ۳- نتایج آنالیز واریانس برای کسر ژلی نمونه‌ها

Term	T-Value	P-Value
Constant	1.95	37.08
Freeze time	-0.37	0.722
cycle	0.96	0.361
Freeze time*Freeze time	2.16	0.059
cycle*cycle	4.02	0.003
Freeze time*cycle	-1.09	0.305
Model Summary	R-sq(adj): 66.26%	
	R-sq:78.31	

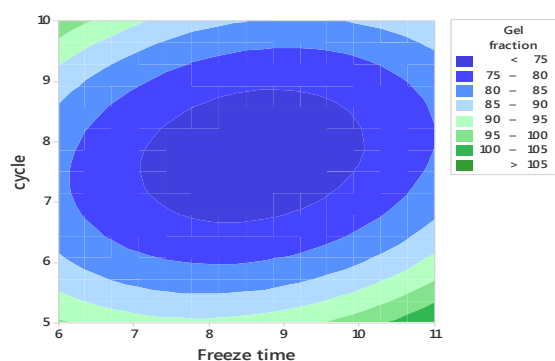
$$\text{Swelling} = 592.7 - 55.3 \text{ Freeze time} + 60.8 \text{ cycle} + 1.433 \text{ Freeze time} * \text{Freeze time} + 2.122 \text{ cycle} * \text{cycle} + 3.5 \text{ Freeze time} * \text{cycle}$$

نمودار مقطعی حاصل از میزان تغییرات درصد تورم هیدروژل‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. با افزایش چرخه انجماد-یخ زدایی میزان انطباق کامپوزیت‌ها افزایش یافته در نتیجه هیدروژل‌ها بیش تر کشیده شده و نشان می‌دهد کراسلینگ در درصد بالایی قرار دارد و در نتیجه میزان تورم افزایش یافته است.

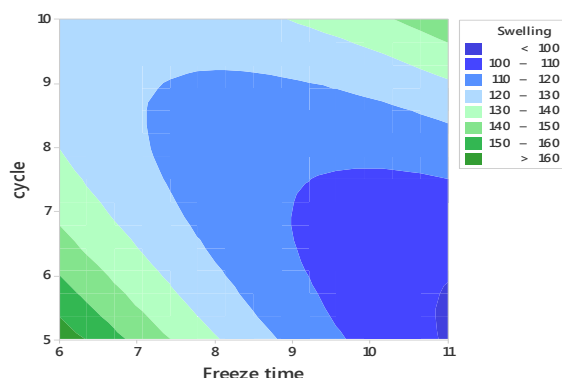
مدل پیشنهادی تحلیل رگرسیون برای کسر ژلی نیز به صورت زیر می‌باشد.

$$\text{Gel fraction} = 281.8 - 18.4 \text{ Freeze time} - 33.7 \text{ cycle} + 1.413 \text{ Freeze time} * \text{Freeze time} + 2.584 \text{ cycle} * \text{cycle} - 0.750 \text{ Freeze time} * \text{cycle}$$

در جدول آنالیز واریانس ترم‌های دارای P کم تر و قدر مطلق T بیش تر دارای بالاترین تاثیر روی تغییرات متغیر پاسخ مربوطه می‌باشند. لذا برهم کنش زمان انجماد و سیکل و توان دوم سیکل دارای بیش ترین تاثیر به ترتیب بر روی درصد تورم و کسر ژلی نمونه‌ها می‌باشند. نمودارهای ارائه شده نیز قادر شدند ۸۳٪ رفتار میزان تورم و ۷۸٪ رفتار کسر ژلی را به صورت تابعی از متغیرهای مستقل انتخابی پیش‌بینی کنند. نمودار مقطعی میزان تغییرات کسر ژل هیدروژل‌های تولیدی با توجه به زمان انجماد و تعداد سیکل در شکل ۴ نشان داده شده است. با افزایش چرخه انجماد-یخ زدایی و زمان انجمادی میزان کسر ژل افزایش می‌یابد.

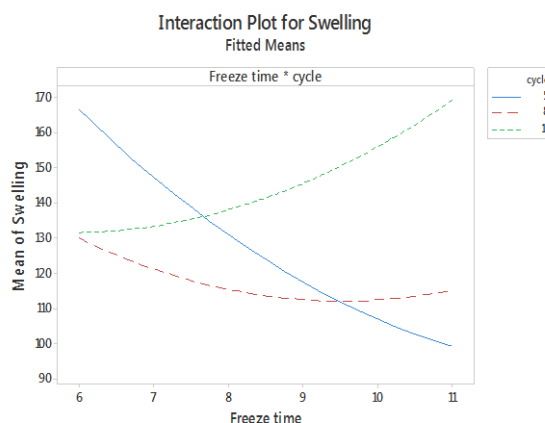


شکل ۴: نمودار مقطعی تغییرات میزان کسر ژلی به صورت تابعی از تعداد سیکل و زمان انجماد



شکل ۲: نمودار مقطعی تغییرات میزان تورم به صورت تابعی از تعداد سیکل و زمان انجماد

میزان برهم کنش تغییرات تورم با توجه به مراحل انجماد-یخ زدایی و سیکل فرآیند در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: نمودار برهم کنش کلی تغییرات میزان تورم به صورت تابعی از تعداد سیکل و زمان انجماد

نتایج آنالیز واریانس برای کسر ژلی نمونه‌ها در جدول ۳ آورده شده است.

مطالعات نشان داده‌اند که هرچه مقدار CMC بیش تر شود میزان کسر ژل کاهش می‌یابد.

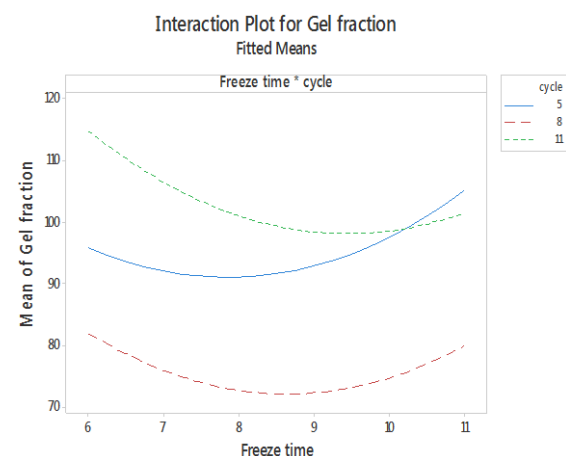
برای هیدروژل‌های PVA خالص کسر ژل در حدود ۹۶٪ است و بدین معنی است که پیوندهای عرضی در درجه بالایی قرار دارد. در طول فرآیند انجمادی پیوند هیدروژنی بین زنجیره‌های پلیمری با افزایش درجه پیوندهای عرضی، افزایش می‌یابد و کریستالیت هیدروژل‌ها منجر به افزایش کسر ژل می‌شود. حضور CMC باعث کاهش واکنش‌های پیوندهای عرضی و بلورینگی بین PVA و زنجیره‌های پلیمری می‌شود و به همین ترتیب باعث کاهش کسر ژل PVA/CMC می‌شود. همچنین افزودن CMC به PVA منجر به افزایش انطباق کامپوزیت‌ها می‌شود. افزایش کسر ژل در هیدروژل‌های PVA/CMC نشان می‌دهد که فرآیند انجمادی یک روش امیدوارکننده برای تولید هیدروژل‌ها می‌باشد. در مقایسه با سایر مطالعات که زمان انجمادی زیاد است. برای فرآیند انجمادی جهت تولید ژل‌ها، این رویکرد به‌عنوان یک روش کارآمد پیشنهاد شده است. در مقابل کسر ژل حضور CMC اثر مثبت بر غوطه‌وری و تورم PVA/CMC نشان می‌دهد.

همچنین مشاهده شد که هیدروژل‌های PVA/CMC جذب آب بالاتری داشته و درجه تورم بالاتری دارد، که این امر احتمالاً به دلیل افزایش آبدوستی توسط CMC است. علاوه بر این با افزایش مقدار PVA، تراکم پیوندهای عرضی فیزیکی در هیدروژل‌ها افزایش می‌یابد، که برای نفوذ مولکولی آب مفید است و سبب بهبود توانایی تورم می‌شود [۸-۹].

### بهینه‌سازی تولید هیدروژل‌های کامپوزیتی PVA/CMC

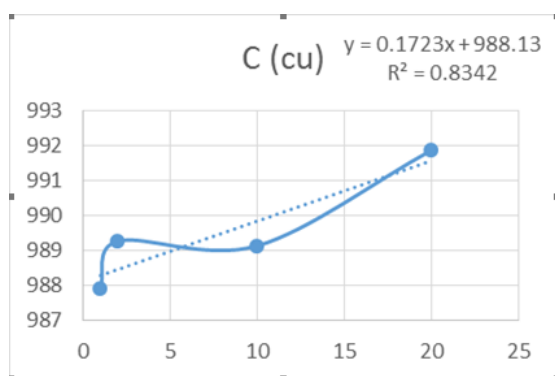
شکل ۶ بهینه‌سازی گرافیکی متغیرها را جهت حصول هیدروژل با بالاترین میزان تورم و کسر ژلی را نشان می‌دهد.

هیدروژل‌ها به واسطه جداسازی فاز در محلول پلیمر بعد از تکرار چرخه انجماد-یخ‌زدایی تشکیل یافتند. علاوه بر این زمانی که پلیمر تحت دمای پایین قرار گرفت بلورهای پلیمری تشکیل شدند که به‌عنوان محل اتصال شبکه‌های پلیمری نامحلول عمل کرد. در این روش خاصیت مکانیکی هیدروژل‌ها را می‌توان با تغییر دادن در تعداد مراحل چرخه انجماد-یخ‌زدایی تعدیل کرد. چرخه‌های انجماد-یخ‌زدایی با آب شدن بلورهای یخ در مرحله یخ‌زدایی باعث ایجاد فضای خالی و ساختار متخلخل در هیدروژل‌ها شدند. شکل ۵ نمودار برهم‌کنش تغییرات کسر ژل هیدروژل‌های تولیدی با توجه به سیکل و زمان انجماد را نشان می‌دهد [۸-۹].



شکل ۵: نمودار برهم‌کنش کلی تغییرات میزان کسر ژل به صورت تابعی از تعداد سیکل و زمان انجماد

در طول مرحله انجماد، آب درون PVA و CMC با محلول فریز شده مخلوط شده است که سبب تشکیل دو فاز مجزا فاز غنی از پلیمر و فاز غنی از آب شده است. زنجیره‌های پلیمری مجاور در فاز غنی از پلیمر در نتیجه تشکیل پیوند هیدروژنی و کریستالی ایجاد شده است. علاوه بر این فرآیند انجمادی نواحی کریستالی بین پلیمرهای باقی‌مانده را تسهیل می‌کند، که منجر به تشکیل شبکه‌های هیدروژلی می‌شود. کریستال‌های یخ در هنگام تشکیل هیدروژل‌ها به‌عنوان پروژن عمل می‌کند و سبب تشکیل ساختار متخلخل آن می‌شود [۷-۹]. حضور CMC سبب کاهش کسر ژل می‌شود.



شکل ۷: نمودار سینتیک جذب یون مس با غلظت ۱۰۰۰ ppm در طی ۲۴ ساعت توسط هیدروژل‌های کامپوزیتی PVA/CMC

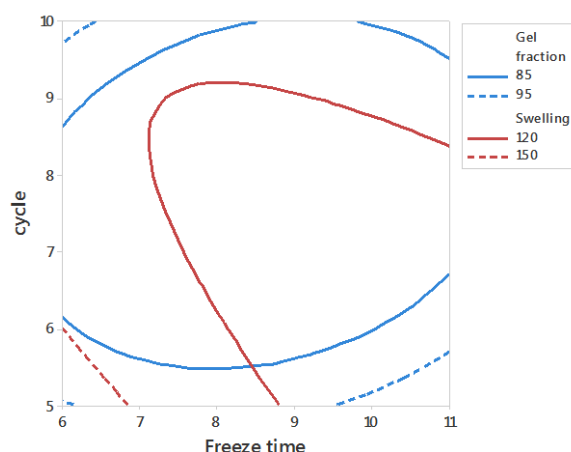
بررسی‌های سینتیک جذب یون‌های مس از پساب‌های سنتزی توسط هیدروژل‌های تولیدی انجام گرفت طبق (جدول ۴). مدل‌سازی معادلات در برنامه Excel صورت گرفت. با توجه به نتایج حاصل از میزان  $R^2$  معادله خطی برای این مدل مناسب می‌باشد.

جدول ۴- معادلات سینتیک جذب یون‌های فلزی مس توسط هیدروژل‌های کامپوزیتی PVA/CMC

	Equation	$R^2$
Rate=K (linear)	$C = 0.1723t + 988.13$	0.834 2
Rate=KC (1 <sup>st</sup> order)	$\ln C = 0.0002t + 6.8958$	0.834 1
Rate=KC <sup>2</sup> (2 <sup>nd</sup> Order)	$1/C = -2E-07t + 0.001$	0.834 0
Rate= KC/(Vm+KC) (Michaelis-Menten)	$1/C = 3E-06 \cdot (1/t) + 0.001$	0.596 8
C=K. T <sup>n</sup> (Logarithmic)	$\ln C = 0.001x \cdot (\ln t) + 6.8957$	0.705 2

### ایزوترم‌های جذب

برای تجزیه و تحلیل ICP هیدروژل‌ها، آن‌ها را در داخل پساب‌های سنتزی حاوی یون مس با غلظت‌های ۵۰۰-



شکل ۶: نمودار بهینه‌سازی گرافیکی متغیرها جهت حصول مطلوب‌ترین هیدروژل

بهینه‌سازی عددی نیز نشان داد که انجماد پلیمرها به مدت ۶ ساعت در فریزر و تکرار سیکل انجماد-یخ‌زدایی به تعداد ۹ مرتبه بهترین هیدروژل را به دست می‌دهد که دارای درصد تورم به مقدار ۱۲۶٪ و بیش‌ترین مقدار کسر ژل ۷۶٪ خواهد بود. این نمونه ساخته شده و جهت جذب یون مس استفاده گردید.

### سینتیک جذب

ظرفیت جذب هیدروژل‌های PVA/CMC تهیه شده با غوطه‌ورسازی در پساب‌های شبیه‌سازی شده حاوی یون مس صورت گرفت.

هیدروژل‌ها هر کدام به اندازه‌های  $1\text{cm}^2 \times 1\text{cm}^2$  برش داده شدند و جهت جذب یون‌ها هیدروژل‌ها، در داخل پساب سنتزی ۱۰۰۰ppm حاوی یون مس غوطه‌ور شدند. هیدروژل‌های کامپوزیتی PVA/CMC به مدت ۲۴ ساعت غوطه‌ور شدند و در فواصل زمانی متفاوت در زمان‌های ۱-۲-۴-۱۰-۲۰ ساعت از پساب‌ها نمونه‌برداری شد و آنالیزهای ICP با دستگاه جذب اتمی شعله‌ای انجام گرفت.

### نتیجه‌گیری

این پژوهش با روش انجماد - یخزدائی برای تهیه هیدروژل‌های کامپوزیتی PVA/CMC انجام شد. هیدروژل‌های PVA/CMC با بیش‌ترین درجه پیوند عرضی توانستند به آسانی فلزات سنگین را جذب کنند. با افزایش سیکل و زمان انجماد هیدروژل‌های تهیه شده توانستند با بیش‌ترین نسبت تورم بیش‌ترین جذب را داشته باشند. با استفاده از روش رویه پاسخ و تعیین شرایط بهینه هیدروژل‌های کامپوزیتی تولید شدند و برای جذب یون‌های فلزی مس در پساب‌های سنتزی برای ارزیابی رفتار جذب به کار برده شدند. در نتیجه هیدروژل‌های کامپوزیتی PVA/CMC تهیه شده توانستند با جذب فوق‌العاده مقدار زیادی مس را از پساب حذف کنند. هیدروژل‌های تولیدی به دلیل مزایایی از قبیل ارزانی، زیست تخریب‌پذیری، سفتی زیاد و خواص مکانیکی خوب، قدرت جذب و تورم بالا، به عنوان یک فوق جاذب پلیمری شناخته شدند. در اینجا همچنین، پلی وینیل الکل پلیمری محلول در آب، نیمه بلورین، کاملاً زیست تخریب‌پذیر، غیرسمی و زیست سازگار است. از این رو، این کامپوزیت‌ها نگرانی‌های زیست محیطی نداشته و در طبیعت به راحتی از بین می‌رود و خواص مکانیکی خوبی را نیز از خود نشان می‌دهند. هیدروژل‌های کامپوزیتی غیر محلول PVA/CMC با ظرفیت جذب عالی یون‌های فلزی با روش اقتصادی و ذخیره انرژی تهیه شدند. هیدروژل‌های PVA/CMC تهیه شده با کاربرد پتانسیلی برای حذف یون‌های فلزی سنگین و تصفیه فاضلاب معرفی شدند و همچنین در زمینه زیست پزشکی نیز کاربرد دارند. روش انجماد - یخزدائی به دلیل مزایای عمده از جمله: صرفه جویی در زمان تولید هیدروژل‌ها، ایمنی در روند آزمون، زیست تخریب‌پذیر و از نظر اقتصادی نسبت به روش‌های دیگر مقرون به صرفه بوده و می‌تواند در صنعت جایگزین روش‌های شیمیایی باشد [۱۰].

۱۰۰۰-۱۵۰۰-۲۰۰۰ ppm غوطه‌ور کرده و پس از ۲ ساعت از پساب سنتزی نمونه‌برداری شد و آنالیزهای جذب اتمی مورد بررسی قرار گرفت. ایزوترم‌های جذب بر اساس معادلات خطی، لانگمیر و فرن‌دلیچ در برنامه Eexcel طبق جدول ۵ مدل‌سازی شدند. پس از بررسی معادلات و مقایسه آن‌ها معادله جذب به صورت خطی تعیین شد.

جدول ۵- ایزوترم‌های جذب یون‌های فلزی مس توسط هیدروژل‌های

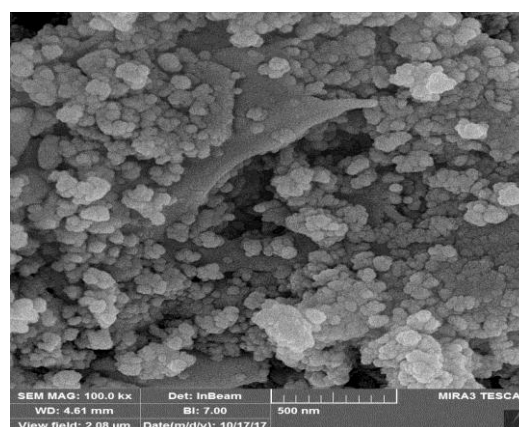
کامپوزیتی PVA/CMC

	Equation	R <sup>2</sup>
Linear	$c = 0.9983t - 151.85$	0.9706
longmir	$c = 2.4792t - 0.001$	0.9583
freandlich	$c = 1.4471t - 3.3697$	0.9520

### مورفولوژی مقطع عرضی از هیدروژل‌های-

#### کامپوزیتی PVA/CMC

تصاویر مقطعی FE-SEM از هیدروژل‌های آماده شده نشان داد که همه هیدروژل‌ها PVA/CMC ساختار کاملاً متخلخل بوده و کروی شکل است (شکل ۸). ساختار متخلخل توسط فرآیند انجمادی تشکیل می‌شود و قطعه‌های یخی درون هیدروژل را به وجود می‌آورد. بعد از انجماد کریستال‌های یخ ذوب می‌شود و ساختار متخلخل را ترک می‌کند. مورفولوژی شبکه با توزیع نامنظم منافذ به وجود آمد.



شکل ۸: عکس FE-SEM مورفولوژی مقطع سطحی از هیدروژل‌های

کامپوزیتی PVA/CMC

## منابع

- [1] Chang, C.; Zhang, L.; Zhou, J.; Zhang, L.; Kennedy, J. F., 2010, *Carbohydr. Polym.*, 82, 122–127.
- [2] Hoffman, A. S., 2012, *Adv. Drug Delivery Rev.* 64, 18–23.
- [3] Pourjavadi, A.; Barzegar, S.; Mahdavinia, G. R., 2006, *Carbohydr. Polym.* 66, 386–395.
- [4] Taleb, M. F.; El-Mohdy, H. L.; El-Rehim, H. A. J. *Hazard.*, 2009, *Mater.* 168, 68–75.
- [5] Nugent, M. J. D.; Higginbotham, C. L. *Eur. J. Pharm., Biopharm.* 67, 377–386.
- [6] Gulrez, S. K. H.; Al-Assaf, S.; Phillips, G. O., 2011, In *Progress in Molecular and Environmental Bioengineering—From Analysis and Modeling to Technology Applications*; Carpi, A., Ed.; Intech.
- [7] Yang, X.; Liu, Q.; Chen, X.; Yu, F.; Zhu, Z., 2008, *Carbohydr. Polym.* 73, 401–408.
- [8] Qi, X.; Hu, X.; Wei, W.; Yu, H.; Li, J.; Zhang, J.; Dong, W., 2015, *Carbohydr. Polym.* 118, 60–69.
- [9] Yang, S.; Fu, S.; Liu, H.; Zhou, Y.; Li, X. J. 2011, *Appl. Polym. Sci.* 119, 1204–1210.
- [10] Özkahraman, B.; Acar, I.; Emik, S., 2011, *Clean: Soil, Air,* 39, 658–664.