

# بهینه‌سازی تهیه فراصوتی و بررسی تورم ژل ابرجاذب با شبکه‌ساز متیلن بیس آکریل آمید

رجبعلی ابراهیمی\*<sup>+</sup>

تاکستان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان، گروه شیمی

سید جلال حسینی

تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز، گروه شیمی

صدف لباسچی

تاکستان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان، گروه شیمی

**چکیده:** در این پژوهش، در محیط دوتایی گلیسرین/آب و دمای بدن، ابرجاذب، از منومرهای آکریلی و عامل شبکه‌ساز به دست آمد. از کاوشگر و حمام فراصوت به عنوان منبع تابش استفاده شد. نتیجه‌های مربوط به اثر حلال، قدرت یونی، pH، توان و چرخه فراصوت مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتیجه‌های پژوهش نشان داد که با تغییر محیط واکنش، گرانیروی تغییر کرده و سرعت واکنش تشکیل تغییر چشمگیری می‌کند. با افزایش توان صوتی و چرخه فراصوت، واکنش سریع‌تر انجام می‌شود چراکه این امر حفره‌سازی زیادتر و تولید رادیکال بیشتر از این راه را به دنبال دارد. این بررسی نقش پارامترهای مؤثر بر فرایند پلیمری شدن ابرجاذب را نمایان ساخته و کنترل آنها را در آزمایشگاه و صنعت امکان‌پذیر می‌سازد. برای بررسی اثرات تورمی ابرجاذب به دست آمده از فراصوت، آزمایش‌های مربوط به آن pHهای گوناگون انجام شد. نتیجه‌های بررسی‌ها نشان داد که ابرجاذب آکریلی به دست آمده، حساسیت بالایی به pH داشته و با توجه به ساختار با تخلخل بالا و قابلیت کنترل تورم با این پارامترها، می‌توان از این ژل‌های حساس در جذب و رهایش سریع داروها بهره برد.

**واژه‌های کلیدی:** ابرجاذب، حمام فراصوت، گرانیروی، تورم، اثر دما و pH

**KEY WORDS:** Super-absorbance, Ultrasonic bath, Viscosity, Swelling, Temperature & pH effects.

## مقدمه

(در پزشکی) و امواج عرضی که در جامدها منتشر می‌شوند [۱]. امروزه استفاده از امواج فراصوت به صورت یک روش تشخیصی و درمانی مهم درآمده و پیشرفت روز به روز انواع دستگاه‌های تولید امواج فراصوت، تحولات شگرفی در تشخیص و درمان در پزشکی و صنایع دیگر به وجود آورده است [۲]. در بازه‌ی فراصوت قوی یعنی

امواج فراصوت، شکلی از امواج مکانیکی هستند که بسامد آنها بالاتر از حد شنوایی انسان (۲۰kHz) می‌باشد. هر موج (شنوایی) یا فراصوت یک آشفتگی مکانیکی در یک محیط گازی، مایع و یا جامد است که با سرعتی یکنواخت و معین حرکت می‌کند. این امواج دو دسته‌اند، امواج طولی که در بافت‌های بدن

\*عهده دار مکاتبات

+E-mail: pr\_ebrahimi\_r@yahoo.com

واکنش ناشی از آن، شرایط بهینه برای تثبیت آنزیم داخل سلول با شرایط در نظر گرفته شده برای آنزیم آزاد تفاوت دارد [۲۳]. تاکنون روش‌های زیادی برای استخراج و بهبود کیفیت ژل‌ها انجام شده است [۲۵ - ۲۱]. سیف‌کردی و همکاران نشان دادند که افزودن مواد قندی به ژل پکتین به دست آمده از تفاله چغندر قند باعث افزایش جهندگی و سختی در ژل به دست آمده از پکتین تفاله چغندر قند می‌شود، در حالی که میزان جذب آب کاهش می‌یابد [۲۴]. افزایش غلظت پکتین باعث افزایش سختی این ژل می‌شود در حالی که در مورد جهندگی و جذب آب دارای یک مقدار بیشینه است. در نتیجه میزان آن باید بهینه باشد. افزودن کلسیم بر میزان سختی و درصد جذب آب تأثیر مثبت دارد اما باید میزان آن نیز بهینه باشد. میزان آنزیم پراکسیداز افزوده شده تأثیر مهمی بر میزان جهندگی و سختی ژل پکتین یاد شده دارد و در نتیجه باید میزان آن بهینه باشد [۲۵].

در کار پژوهشی حاضر، ابرجاذب آکریلی با عامل شبکه‌ساز متیلن بیس آکریل‌امید در شرایط بهینه در حضور فراصوت ساخته شد و اثر برخی پارامترهای مهم بر این واکنش تولید بررسی شد. سپس تورم، سرعت و قدرت جذب آب آن مطالعه شد. در فرایند حاضر برتری‌های روشنی از جمله آسان بودن و سرعت بالای بسپارش، ساختار شیمیایی و ویژگی‌های دلخواه هیدروژل به دست آمد. همچنین ژل به دست آمده به کمک فراصوت از حساسیت خوبی در میزان تورم خود، نسبت به محیط‌های با اسیدیته و کاتیون‌های گوناگون برخوردار بوده و در نتیجه می‌توان از آن در سامانه‌های ره‌ایش دارو به خوبی استفاده کرد فرایند ساده و سریع بوده و از نظر هزینه به صرفه است. تغییرات عمده و بزرگی در ساختار شیمیایی و ویژگی‌های واکنشگرها صورت نمی‌گیرد و سرانجام اینکه، این فرایند تهیه را می‌توان به سایر ابرجاذب‌ها و ژل‌ها تعمیم داد.

### بخش تجربی

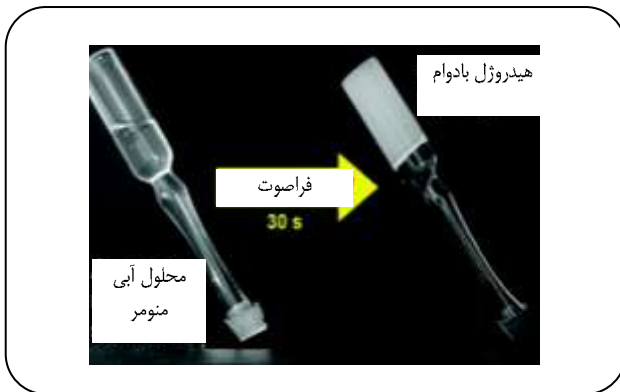
#### مواد اولیه و واکنش آنها

آب اکسیژنه ۳۵٪، سدیم هیدروکسید، سدیم کلرید، کلسیم کلرید، پتاسیم هیدروژن فتالات، پتاسیم دی‌هیدروژن فسفات، سدیم تترابورات و سدیم بی‌کربنات (همگی از مرک آلمان) بدون خالص‌سازی بیشتر به کار رفتند. آکریلیک‌اسید (مرک آلمان) پس از تقطیر در خلا به کار گرفته شد. آکریل‌امید (فلوکای آلمان) و متیلن بیس آکریل‌امید (فلوکای آلمان)، با تبلور دوباره خالص شدند. حلال مورد استفاده، آب مقطر دو بار تقطیر و گلیسیرول (مرک آلمان) خالص بود.

از حدود ۲۰ kHz تا ۱۰۰ kHz، حفره‌هایی در مایع به وجود می‌آیند که پس از چند مرحله رشد نوسانی به یک اندازه ناپایدار رسیده و متلاشی می‌شوند [۱،۲]. در هنگام فروپاشی یک حباب، دما تا حدود ۶۰۰۰ K افزایش می‌یابد. اثر حفره‌سازی فراصوتی بر یک سامانه شیمیایی از روش تولید رادیکال‌هایی باشد که در حفره در حال رشد به وجود آمده و پس از فروپاشی آن، در محیط واکنش رها می‌شوند. این رادیکال‌ها می‌توانند نقش آغازگر را در واکنش‌های پلیمرشدن و واکنش‌های تشکیل ژل بازی کنند. حضور مواد افزودنی محلول در آب مانند گلیسیرول برای این کار الزامی است [۳]. به طور کلی ارزیابی گرانبوی یکی از بهترین راه‌های عملی برای دنبال کردن تشکیل / تخریب پلیمرها در یک محلول است. از این روش می‌توان در تشکیل / تخریب ابرجاذب در محیط‌های زنده و تهیه مواد زیستی نیز استفاده کرد [۴،۵].

فرایندهای پلیمری شدن به کمک فراصوت بر روی منومرهای آکریلی، بوتیل آکریلات، استایرن، یورتان و استر، دی فنیل متان و وینیل کلرید صورت گرفته است [۹-۶]. در مطالعه‌های انجام شده اثر پارامترهای محیطی (غلظت، دما، pH و مواد افزودنی) و پارامترهای دستگاهی (توان و چرخه فراصوت) مورد بررسی قرار گرفته است. با این حال، گزارش‌چندانی در مورد تهیه ابرجاذب در حضور فراصوت در دسترس نیست و این کار تنها در غیاب فراصوت انجام شده است [۱۲ - ۱۰]. آکریل‌امید (AAM) و آکریلیک‌اسید (AA) از جمله مهم‌ترین منومرهای صنعتی هستند که مطالعه‌های زیادی بر روی ژل‌های به دست آمده از آنها و همچنین برخی از هیدروژل‌های دیگر صورت گرفته است [۱۷ - ۱۳]. با تغییرهای اسیدیته محیط [۱۷،۱۸] و دما [۲۰ - ۱۸] می‌توان نفوذ پیشرفته‌ای از این ژل‌ها به داخل بافت‌های زنده را انتظار داشت.

امروزه ژل‌های طبیعی و سنتزی دارای کاربردهای زیادی در صنایع گوناگون دارویی، بهداشتی، پزشکی، زیست فناوری و کشاورزی هستند. در این میان کاربردهای آنها به عنوان عدسی‌های روی چشم، مواد پرکننده کانال دندان، قرنیه مصنوعی، زجاجیه، نای مصنوعی و برخی دیگر اعضای مصنوعی بدن به طور ویژه‌ای مورد توجه قرار گرفته است [۲۱]. آزمایش‌های مربوط به عملکرد ژل‌های پلیمری روی کاهش تولید آب اضافی، با ترکیب‌های متفاوتی از ژل‌پلیمرها و همچنین بررسی اثر پارامترهای متفاوت (دما، فشار، pH درصد شوری) به طور جداگانه انجام شده و ژل بهینه روی چندین مدل فیزیکی دربرگیرنده شرایط مورد نظر، ارزیابی شده است [۲۲]. به دلیل وجود ژل پلیمری کلسیم آلزینات در اطراف سلول و افزایش



شکل ۱- فراصوت محلول آبی منومر را به ژل پایدار تبدیل می‌کند.

و کاوشگر تشکیل شد لکن زمان واکنش در حمام خیلی بیشتر و در عوض، مقدار فراورده هم زیادتر بود. استفاده از آغازگر در هر دو سامانه، روی زمان و مقدار فراورده‌ی به‌دست آمده تأثیر چشمگیری نداشت. در دمای بالاتر فراورده سریع‌تر به‌دست آمد و سرانجام بدون استفاده از گلیسرین به عنوان حلال، فراورده تنها با زمان تابش طولانی و چند روز بعد دیده شد.

مقدارهای ژل خشک به‌دست آمده تأیید می‌کند که منومر به‌طور کامل به ژل تبدیل شده است. تورم نمونه‌های خشک بین ۱۲۵ تا ۱۵۰ (گرم بر گرم) بود. با زیاد شدن غلظت شبکه‌ساز در مخلوط واکنش، محتوی ژل زیاد و تورم آن کاهش، اما سختی و استحکام کششی ژل افزایش می‌یافت. با کنترل میزان اتصالات عرضی می‌توان این دو خاصیت را موازنه کرد.

#### اثر عامل‌های واکنش

##### الف) اثر گرانی

با افزایش نسبت گلیسرول به آب، گرانی زیاد شده و واکنش سرعت گرفت (شکل ۲). با این کار حفره‌سازی در حضور فراصوت افزایش چشمگیری داشته و زمان انجام واکنش کاهش می‌یافت. با درصد گلیسرول بالاتر از ۸۲٪ گرانی با شیب بیشتری زیاد و سرعت واکنش خیلی زیاد می‌شد به‌طوری که در گلیسرول خالص، واکنش در طول چند ثانیه کامل می‌شد.

##### ب) اثر NaOH

برای کاربردهای صنعتی تهیه هیدروژل به کمک فراصوت، می‌توان فراورده آکرلی را با هر درصد خنثی شدن و با هر pH مورد نظر تهیه کرد. زیرا همان‌گونه که شکل ۳ نشان می‌دهد تغییر معناداری در زمان و سرعت انجام واکنش رخ نمی‌دهد موقعی که

مقدارهای بهینه برای شرایط محیطی و عامل‌های دستگامی به صورت زیر بود: ۱۴ گرم حلال ۷۵٪ گلیسرول، مخلوط مونومری شامل ۰/۷۵ گرم آکریل‌آمید و ۰/۷۵ گرم آکرلیک‌اسید که با محلول سود تا ۳۰ درصد خنثی شده و ۰/۱ گرم عامل شبکه‌ساز متیلن بیس آکریل‌آمید واکنش در فشار محیط و دمای ثابت ۳۷ درجه سلسیوس انجام شد. فراصوت از یک سامانه کاوشگر و یک حمام فراصوت به مخلوط واکنش تأیید شد. هیچ‌گونه نمونه‌برداری از مواد داخل ظرف صورت نگرفت. از همزن مغناطیسی یا مکانیکی استفاده نشد. در پایان واکنش، فراورده‌ی ابرجاذب در چند مرحله با آب و اتانول شستشو داده شد و سرانجام در آن ۵۰ درجه خشک شد.

#### اندازه‌گیری گرانی و جذب آب

گرانی نمونه‌ها بعد از زمان‌های تابش معینی، با استفاده از یک گرانی‌سنج چرخشی در دمای بدن انسان اندازه‌گیری شد. برای کار با نمونه‌های کم حجم، از یک Small Sample Adapter با یک اسپیندل استوانه‌ای توپر استینلس استیل (شماره ۶۲) با قابلیت ترموستات شده و سرعت چرخش ۱۰۰ دور بر دقیقه استفاده شد. گرانی‌های گزارش شده بر حسب mPa.s یا cP، در بازه‌ی عددی بین ۲۰ تا ۵۰۰ قرار داشتند.

یک نمونه ۰/۱ گرمی از ژل خشک در ۱۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر در دمای محیط قرار گرفت. در فاصله‌های دمایی معینی نمونه از محیط تورم جدا و توزین شد و دوباره به آن محیط برگردانده شد تا به تورم خود ادامه دهد. برای ساخت بافرها از محلول‌های ۰/۱ مولار سود و هیدروکلریک اسید، پتاسیم هیدروژن فتالات (KHF)، پتاسیم دی‌هیدروژن فسفات، سدیم تترابورات (STB) و سدیم بی‌کربنات استفاده شد. برای مثال برای ساخت بافر با pH برابر با ۵، مقدار ۱۰/۲۱ گرم KHF به ۲۲۶ میلی‌لیتر محلول ۰/۱ مولار سود اضافه شد و برای تهیه بافر با pH برابر ۹ نیز ۴/۷۷ گرم STB در ۴۶ میلی‌لیتر محلول ۰/۱ مولار HCl حل شد.

#### نتیجه‌ها و بحث

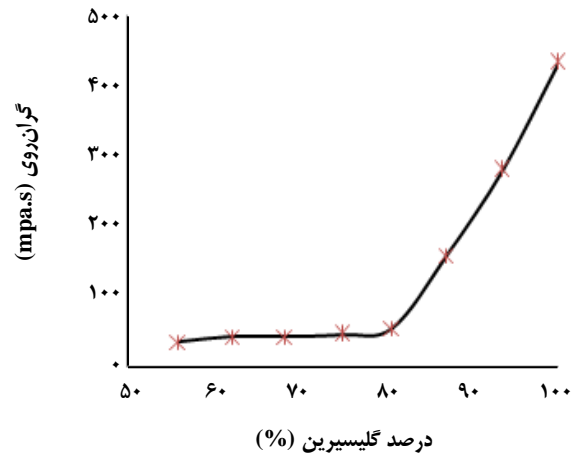
##### تبدیل ابرجاذب به کمک فراصوت

در شرایط بهینه یاد شده در بخش تجربی، ژل تشکیل شد و تن صوتی دستگاه فراصوت به خاطر افزایش گرانی محیط تغییر کرد. تشکیل رادیکال‌های فعال در فرایند حفره‌سازی تنها در محیط گرانی‌پذیر است. هیدروژل در هر دو سامانه حمام فراصوت

مقدارهای سود در مخلوط اولیه تغییر داده شد تا آکرلیک اسید در ساختار ژل به طور جزئی تا کامل خنثی شود.

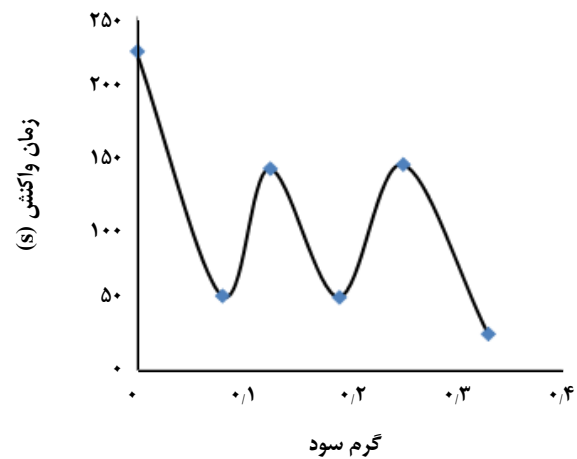
#### ج) اثر NaCl

به مخلوط اولیه واکنش نمک طعام خالص اضافه شد. این بار هم تغییر معنی‌داری در زمان و سرعت واکنش دیده نشد. نتیجه اینکه تغییر قدرت یونی محیط واکنش هم تأثیری بر این فرایند ندارد. در واقع در سامانه واکنش مورد مطالعه، حفره‌سازی با فراصوت تحت تأثیر اسیدیته و قدرت یونی محیط قرار نمی‌گیرد. در نتیجه در انتخاب مقادیر این دو پارامتر در تهیه ژل در حضور فراصوت محدودیتی وجود ندارد.



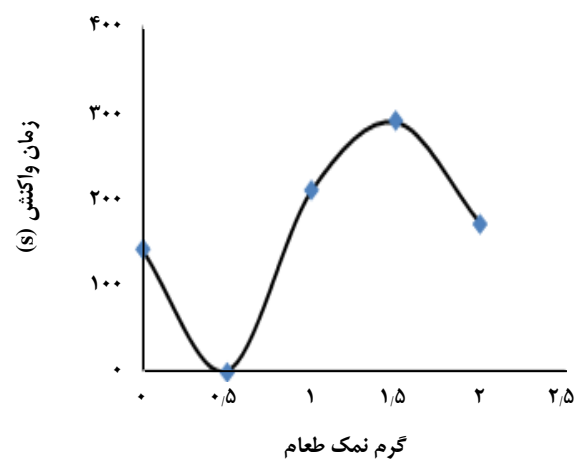
شکل ۲- تغییرهای گرانروی حلال بر حسب درصد گلیسرول.

**د) اثر آب اکسیژنه**  
در حضور آب اکسیژنه، زمان لازم برای انجام واکنش ابتدا زیاد شده و سپس کاهش یافت. با تشکیل حفره با تابش فراصوت، آب اکسیژنه به داخل حفره رفته و پس از فروپاشی حفره رادیکال‌های هیدروکسی را تولید کرد. این رادیکال‌ها با حمله به پیوند دوگانه در منومر، آنها را به رادیکال برای شروع پلیمرشدن تبدیل کردند. با مقادیر بیشتری آب اکسیژنه حفره‌ها سریعتر تشکیل و منجر می‌شوند و اثرات شیمیایی آنها کمتر می‌شود [۱، ۲].



شکل ۳- تغییر زمان واکنش تشکیل با مقدار سود در محیط.

**ه) اثر دما**  
رابطه عکس بین دما و زمان واکنش یک رفتار طبیعی در سینتیک است هر چند که در این حالت یک رابطه آرنوسی بین سرعت و دما دیده نمی‌شود. در دمای بالا، رادیکال‌ها که عامل اصلی پیشروی واکنش هستند سریعتر به وجود آمده و در مخلوط واکنش، سریعتر نفوذ می‌کنند.



شکل ۴- تغییر زمان واکنش تشکیل با مقدار نمک طعام.

**و) اثر توان**  
با افزایش توان فراصوت، زمان انجام واکنش به طور چشمگیری کاهش می‌یابد و این رفتار برای سایر پلیمرها نیز گزارش شده است [۶، ۷]. افزایش توان به حفره‌سازی زیادتری منجر می‌شود. در بالاتر از آستانه حفره‌سازی، حفره‌ها به شعاع بیشینه بیشتری رسیده و اندازه این شعاع بیشینه متناسب با ریشه دوم شدت است [۹]. حفره‌های بزرگ‌تر هنگام فروپاشی، رادیکال‌های بیشتری آزاد نموده در نتیجه ژل در شدت‌های بالاتر سریعتر تشکیل می‌شود [۱].

بیشتر به دست آمده‌اند ظاهری شیری رنگ داشتند در مقابل نمونه‌های به دست آمده با شبکه‌ساز کمتر، شفاف و چسبناک بودند.

#### ز) اثر pH بر تورم

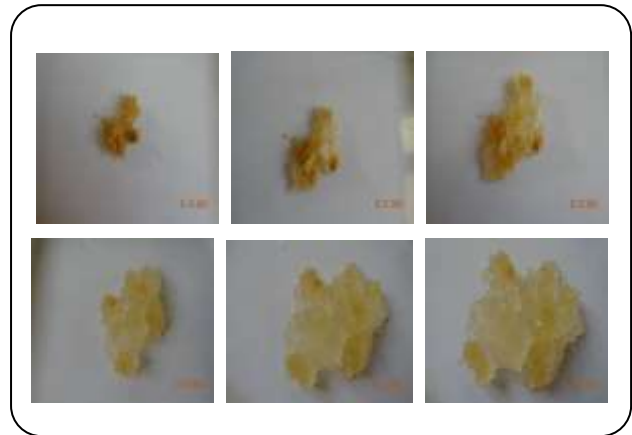
برای بررسی میزان حساسیت ابرجاذب، رفتار تورمی آن در بافرهایی با pH ۷، ۹ و ۱۱ مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۵). بخش بیشتر تورم نمونه‌ها و جذب آب در ۲۰ دقیقه اول انجام شد و بیشترین تورم ژل در PH برابر با ۹ به دست آمد. در محیط اسیدی، گروه آمونیوم ( $\text{NH}_3^+$ ) و در محیط بازی یون کربوکسیلات ( $\text{COO}^-$ ) روی ژل تشکیل می‌شوند، در pH های بیش از ۶، گروه‌های اسیدی کربوکسیلیک یونیزه می‌شوند که این امر منجر به افزایش جذب آب در pH های قلیایی می‌شود اما در pH بیشتر از ۹ و کمتر از ۵، به دلیل اثرات همپوشانی بار، جذب آب کاهش می‌یابد.

#### نتیجه‌گیری

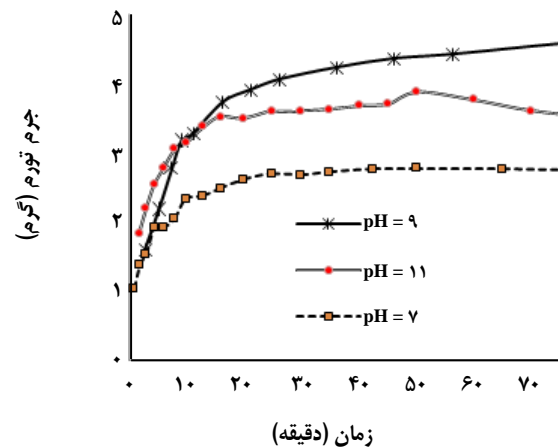
فناوری‌های تابش به دلیل نیاز نداشتن به آغازگر و کنترل آسان فرایند، ابزارهای بسیار مناسبی برای سنتز زیست‌مواد از جمله ابرجاذب‌ها هستند. ابرجاذب بر پایه آکرلیک اسید و آکریل آمید با عامل شبکه‌ساز متیلن بیس آکریل آمید، در حضور فراصوت سنتز و تأثیر برخی عامل‌های محیطی و صوتی بر فرایند ساخت آن مطالعه شد. گر انرژی حلال بیشتر تأثیر را بر سرعت واکنش پلیمری شدن در حضور فراصوت دارد. همچنین واکنش تشکیل در دماهای بالاتر، سریعتر انجام می‌شود. توان و چرخه فراصوت اثر مستقیمی بر سرعت این واکنش دارد. این ابرجاذب، حساس به pH محیط است و بر طبق نتیجه‌ها بررسی‌ها، در pH های پایین (محیط اسیدی) کمترین مقدار تورم در ژل دیده می‌شود. از ابرجاذب سنتز شده با فراصوت، به دلیل خاصیت تورم خوب، انعطاف‌پذیری و قابلیت کنترل توسط محرک‌های خارجی می‌توان در دارورسانی ویژه روده، ساخت پانسمان، دارورسانی موضعی به صورت پماد، ترمیم غضروف، مهندسی بافت، کاربردهای آرایشی و بوتاکس هم بهره گرفت.

#### قدردانی

بخش بیشتر این پژوهش در آزمایشگاه شیمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان انجام شده است. در نتیجه، از معاون و مدیر محترم پژوهشی دانشگاه، کارشناس محترم آزمایشگاه و دانشجویان عزیز که در این راه، نویسنده را کمک کردند تشکر و قدردانی می‌شود.



شکل ۵- تصویرهایی از فرایند تورم ژل بعد از هر دو دقیقه.



شکل ۶- اثر pH محلول بافاری بر ظرفیت تورم ابرجاذب.

#### ز) اثر چرخه

نظیر اثر توان، زمان تشکیل ژل با بالا رفتن چرخه فراصوت نیز کاهش می‌یابد. در چرخه‌های کمتر از ۳، زمان واکنش بیشتر از ۲۰ دقیقه بود. همچنین با افزایش چرخه فراصوت، افزایش دما چشمگیرتر بوده و سردسازی ضرورت بیشتری پیدا می‌کند. چرخه ۷ به معنی آن است که در هر یک ثانیه، ۰/۷ ثانیه فراصوت می‌تابد و ۰/۳ ثانیه نمی‌تابد. چرخه ۵ به معنی آن است که در هر یک ثانیه نیمی از آن را تابش وجود دارد و در نیمی دیگر نیست. بدون چرخه (عدد ۱۰ در شکل) مربوط به تابش کامل و بدون وقفه فراصوت است. چرخه باعث می‌شود زمان تابش، متفاوت از زمان واکنش تخریب شود. به عبارت دیگر، وقتی چرخه تغییر می‌کند زمان تابش هم تغییر می‌کند در حالی که زمان واکنش ثابت است.

شکل ۵ تصویرهایی از تورم و جذب آب را نشان می‌دهد که با دوربین دیجیتال گرفته شده است. نمونه‌هایی که با مقدار شبکه‌ساز

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۲/۱۲ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۲/۸

## مراجع

- [۱] ابراهیمی، رجبعلی؛ میسون، تیموتی؛ مقدمه‌ای بر سونوشیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین، فصل اول، زمستان (۱۳۸۹).
- [2] Mason T.J., Lorimer J.P., "Applied Sonochemistry: Uses of Ultrasound in Chemistry and Processing", Wiley-VCH, Verlag GmbH, Weinheim (2002).
- [3] Cass P., Knowler W., Pereira E., Holmes N., Hughes T., Preparation of Hydrogels via Ultrasonic Polymerization, *Ultrason. Sonochem.*, **17**: 326-332 (2010).
- [4] Lawal O.S., Storz J., Storz H., Lohmann D., Lechner D., Kulicke W.M., Hydrogels Based on Carboxymethyl Cassava Starch Cross-Linked with di- or Polyfunctional Carboxylic Acids: Synthesis, Water Absorbent Behavior and Rheological Characterizations, *Europ. Polym. J.*, **45**: 3399-3408 (2009).
- [5] Sakurada I., Shape of Threadlike Molecules in Solution and Relationship Between Solution Viscosity and Molecular weight, *Polym. J.* **44**: 5-10 (2012).
- [6] Teo B.M., Prescott S.W., Ashokkumar M., Grieser F., Ultrasound Initiated Miniemulsion Polymerization of Methacrylate Monomers, *Ultrason. Sonochem.*, **15**: 89-94 (2008).
- [7] Anbarasan R., Jayaseharan J., Sudha M., Gopalan A., Sonochemical Polymerization of Acrylic Acid and Acrylamide in the Presence of a New Redox System, *J. Appl. Polym. Sci.*, **89**: 3685-3692 (2003).
- [8] Qiu G., Nie M., Wang Q., Ultrasonically Initiated Emulsion Polymerization of Styrene in the Presence of Fe<sup>2+</sup>, *Ultrason. Sonochem.* **15**: 269-273 (2008).
- [9] Price G.T., Recent Developments in Sonochemical Polymerization, *Ultrason. Sonochem.* **10**: 277-283 (2003).
- [10] Sachin R., Shirath, Removal of Brilliant Green from Wastewater using Conventional and Ultrasonically Prepared Poly(Acrylic Acid) Hydrogel Loaded with Kaolin Clay: A Comparative Study, *Ultrason. Sonochem.* **20**: 914-923 (2013).
- [11] Rosiak J.M., Janik I., Kadlubowski S., Kozicki M., Kujawa P., Stasica P., Ulanski P., Nano-, Micro- and Macroscopic Hydrogels Synthesized by Radiation Technique, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sec. B.*, **208**: 325-330 (2003).
- [12] Norisuye T., Strybulevych A., Scanlon M., Page J., Ultrasonic Investigation of the Gelation Process of Poly(acrylamide) Gels, *Macromol. Symp.*, **242**: 208-215 (2006).
- [13] Isik B., Kıs M., Preparation and Determination of Swelling Behavior of Poly(acrylamide-co-acrylic acid) Hydrogels in Water, *J. Appl. Polym. Sci.*, **94**: 1526-1531 (2004).
- [14] Xie J., Liu X., Liang J., Absorbency and Adsorption of Poly(acrylic acid-coacrylamide) Hydrogel, *J. Appl. Polym. Sci.*, **106**: 1606-1613 (2007).
- [15] Park J., Kim D., Effect of Polymer Solution Concentration on the Swelling and Mechanical Properties of Glycol Chitosan Superporous Hydrogels, *J. Appl. Polym. Sci.*, **115**: 3434-3441 (2009).

- [16] Yin Y., Yang Y.J., Xu H., [Hydrophobically Modified Hydrogels Containing Azoaromatic Cross-Links: Swelling Properties, Degradation in Vivo and Application in Drug Delivery](#), *Europ. Polym. J.*, **38**: 2305-2311 (2002).
- [17] Turan E., Caykara T., [Swelling and Network Parameters of pH-Sensitive Poly\(acrylamide-co-acrylic acid\) Hydrogels](#), *J. Appl. Polym. Sci.*, **106**: 2000-2007 (2007).
- [18] Iqbal M.C., Amin M., Ahmad N., Halib N., Ahmad I., [Synthesis and Characterization of Thermo- and pH-Responsive Bacterial Cellulose/Acrylic Acid Hydrogels for Drug Delivery](#), *Carbohydrate Polym.*, **88**: 465-473 (2012).
- [19] Pars R., Quijada-Garrido I., [Swelling Behaviour of Thermo-Sensitive Hydrogels Based on Oligo\(ethylene Glycol\) Methacrylates](#), *Europ. Polym. J.*, **45**: 3418-3425 (2009).
- [20] Xiao L., Isner A.B., Hilt J.Z., Bhattacharyya D., [Temperature Responsive Hydrogel with Reactive Nanoparticles](#), *J. App. Polym. Sci.*, **128**: 1804-1814 (2013).
- [۲۱] سربلوکی، محمدنبی؛ کاربرد پلیمر در پزشکی و درمان، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۱) ۲۲ : ۱ تا ۲۸ (۱۳۸۲).
- [۲۲] وفایی سفتی، محسن؛ نادری، حسن؛ باغبان صالحی، مهسا؛ هاشمی‌نسب زواره، سیدرضا؛ احمد سجادیان، ولی؛ حسن، علی؛ مطالعه آزمایشگاهی عملکرد ژل پلیمرها به منظور جلوگیری از تولید آب در چاه‌های تولیدی نفت، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۲) ۲۷ : ۲۱ تا ۳۰ (۱۳۸۷).
- [۲۳] وزیر یزدی، علی؛ اوتادی، مریم؛ سلطانی، فاطمه؛ سیف کردی، علی‌اکبر؛ خیرالعموم، آزاده؛ بهینه‌سازی شرایط تولید ۶-APA بوسیله سلول ۱۱۱۰۵E.coliATCC تثبیت شده در ژل کلسیم آلزینات، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۲) ۲۵ : ۹۷ تا ۱۰۳ (۱۳۸۵).
- [۲۴] ابراهیمی حسین‌زاده، بهمن؛ عالمزاده، ایران؛ سیف‌کردی، علی‌اکبر؛ تاثیر پارامترهای متفاوت بر کیفیت و میزان جذب آب به وسیله‌ی ژل حاصل از پکتین تفاله چغندر قند برای ساخت ابرجاذب، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۲) ۲۴ : ۸۳ تا ۹۲ (۱۳۸۴).
- [۲۵] مسکوکی، عبدالمجید؛ مرتضوی، سیدعلی؛ مسکوکی، آرش؛ اثر امواج فراصوت بر قابلیت تمیزکنندگی مدول‌های مختلف غشاهای پلیمری، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۳) ۲۹ : ۱۵۷ تا ۱۶۷ (۱۳۸۹).