

بررسی اثر مقدار هیدروژل بر خواص کامپوزیت ساخته شده بر پایه ماتریس لاستیک سیلیکون RTV و فاز گسسته پلی (آکریلیک اسید) شبکه ای شده

Effect of Hydrogel Content on Properties of a Composite Material Based on RTV Silicone
Rubber as Matrix and Cross-linked Poly(acrylic acid) Particles as the Dispersed Phase

سعید خیراندیش*^۱، اسماعیل جباری^۱، حمید میرزاده^۲

۱- دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی پزشکی، صندوق پستی ۱۵۸۷۵/۴۴۱۳

۲- پژوهشگاه پلیمر ایران، صندوق پستی ۱۴۹۶۵/۱۱۵

دریافت: ۱۳۹۷/۳۰، پذیرش: ۱۳۹۸/۱/۳۱

چکیده

ویژگیهای مربوط به آبدوستی سیلیکون قابل پخت در دمای محیط قبل و بعد از افزودن نسبتهای متفاوتی از هیدروژل ابر جاذب پلی آکریلیک اسید بررسی شده است. نتایج نشان می دهد که میزان جذب آب تعادلی با درصد هیدروژل موجود در کامپوزیت نسبت مستقیم و خطی دارد. همچنین، با افزایش درصد هیدروژل در سیستم کاهش محسوس در زاویه تماس با آب دیده می شود که مؤید آبدوست شدن نمونه هاست. میزان جذب آب کامپوزیت با درصد عامل شبکه ای کننده هیدروژل نیز نسبت مستقیم و خطی با شیب ملایم دارد. می توان گفت که درصد هیدروژل موجود در ماتریس کنترل کننده جذب آب است و نه میزان شبکه ای شدن آکریلیک اسید. با در نظر گرفتن دو اندازه مختلف برای ذرات ژل در کامپوزیت دیده می شود که میزان جذب آب تعادلی در ذرات با اندازه کوچکتر از ۱۲۰ میکرون بیش از جذب آب در ذرات با اندازه کوچکتر از ۲۵۰ میکرون است. در هر حال، اندازه ذرات نیز نمی تواند در این محدوده به عنوان عاملی مؤثر در جذب آب تعادلی در نظر گرفته شود، ولی این ویژگی در مطالعات مربوط به تأثیر زبری سطح بر زیست یا خون سازگاری قابل چشمپوشی نخواهد بود. در هر حال، مشاهده تغییرات غیر قابل پیش بینی در مورد زاویه تماس سطح و بویژه نرزی آزاد بحرانی سطح مؤید این فرض است که نحوه برهم کنش هیدروژل بونی پلی آکریلیک اسید موجود در کامپوزیت با مایعات تابعی از نحوه توزیع ژل در ماتریس است.

واژه های کلیدی: مواد کامپوزیتی، سیلیکون RTV، پلی آکریلیک اسید، آبدوستی، زاویه تماس

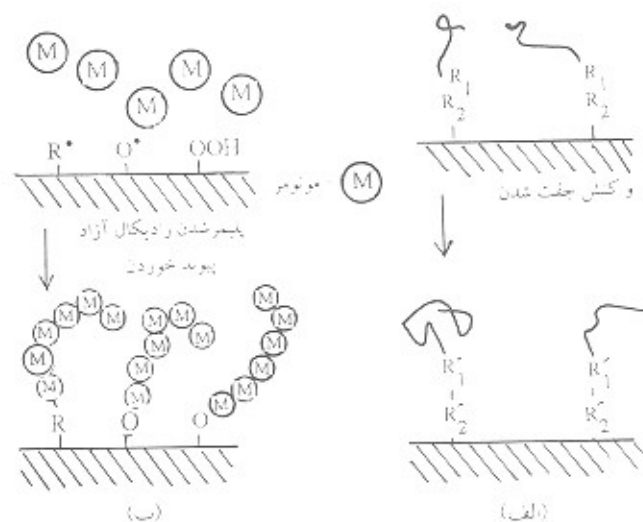
Key words: composite materials, RTV silicone, polyacrylic acid, hydrophilicity, contact angle

مقدمه

تغییر آبدوستی زیست مواد پلیمری در یک محدوده کوچک می تواند تغییرات شگرفی را در نحوه عملکرد و برهم کنش آن مواد در بدن بوجود آورد. پژوهشهای انجام شده روی اثر خواص سطح بر

پارامترهای زیست سازگاری نشان داده است که آبدوستی سطح و بارهای موجود روی سطوح مصنوعی مهمترین عوامل در تعیین زیست سازگاری یک زیست ماده است [۱]. برای مثال، دیده شده است که روکش دهی استنهای فولادی با یک پلیمر آبدوست

* مسئول مکاتبات: پدیاگاز: Kheirandish@yahoo.com



شکل ۱- دو روش اصلی متداول برای نشان دادن گروههای ویژه روی سطح: (الف) نشان دادن زنجیرهای پلیمری از پیش تهیه شده روی سطح و (ب) انجام عمل پلیمر شدن زنجیرها به شکل همزمان روی سطح.

باعث کاهش تجمع بلاکتها روی سطح زیست ماده می شود [۱۲]. در عین حال گزارش شده است که چسبندگی و نکثیر سلولهای مفید (مانند سلولهای سنگفرشی) به عنوان عامل اصلی سازگاری زیست ماده با بدن، بستگی زیادی به خواص سطح چون آبدوستی، بار الکتریکی، شیمی سطح، زبری، سختی و انرژی آزاد سطحی دارد [۸-۳]. در این میان، اثر ویژگیهای گروههای آبدوست قرار گرفته روی سطح بویژه در مورد هیدروژنهای یونی و غیر یونی به عنوان مواد افزایش دهنده زیست سازگاری اخیراً بیشتر مورد توجه قرار گرفته است [۱۱-۹]. با توجه به مطالب پیش گفته، در سالهای اخیر مطالعات زیادی روی روشهای تغییر ویژگیهای سطحی پلیمرهایی شده است که بطور ذاتی زیست سازگار نیستند. در این میان سیلیکون و پلی یورتان به دلیل داشتن ویژگیهای مناسب برای کاشت در بدن مورد توجه بیشتری قرار گرفته اند.

از میان روشهای زیست سازگارسازی پلیمرها روش ذکر شده درباره نشان دادن گروههای آبدوست و زیست با خون سازگار روی سطح پلیمرهاست. حال آنکه خواص نوده ماده در این روش تغییری نمی کند و در نتیجه آبدوستی تنها در حد محدودی باقی خواهد ماند. در شکل ۱ دو روش متداول برای نشان دادن گروههای زیست سازگار روی سطح مواد پلیمری نشان داده شده است.

اخیراً روش جدیدی برای ساخت پلیمرهای زیست سازگار گزارش شده است که طی آن یک ماده کامپوزیتی منسکل

از سیلیکون به عنوان ماتریس و هیدروژلهای آبدوست به صورت فاز گسسته بکار گرفته شده است. در این سلسله پژوهشها، تغییرات ویژگیهایی چون زیست سازگاری [۱۲]، نفوذ پذیری نسبت به مواد کوچک مولکول محلول در آب [۱۳]، توزیع فازها [۱۴]، خواص مکانیکی [۱۵]، نفوذ [۱۶] و ویژگیهای کلی [۱۷] بررسی شده است. در پژوهش دیگری که به شکل مستقل از پژوهشهای یاد شده صورت گرفته است، خواص مکانیکی و تغییرات زاویه تماس کامپوزیتهای بر پایه پلی هیدروکسی اتیل متاکریلات (PHEMA) و سیلیکون مورد بررسی قرار گرفته است [۱۸، ۱۹]. در مرجع ۱۹ با استفاده از همین فن و یا در نظر گرفتن هیدروژل پلی آکریل آمید ساخته شده به روش رسوبی برای ۱۶ درصد هیدروژل، میزان جذب آب قابل توجه ۳۰ درصد بدست آمد. در هر حال، تفاوت اصلی روش ارائه شده در این مقاله با مطالعات قبلی در روش پلیمر شدن، تهیه ذرات و نوع سیلیکون مصرفی است که در ادامه به آنها اشاره خواهد شد.

تجربی

مواد

ماتریس کامپوزیت از جنس سیلیکون قابل پخت در دمای محیط با مشخصات Medical Grade RTV-2. Rhone Poulenc بود. در مرجع [۲۰] به مواد تشکیل دهنده و نوع کاتالیزور این نوع سیلیکون اشاره شده است. این نوع سیلیکون دارای چگالی ۱،۰۰۹، زمان پخت ۱۶ تا ۲۴ ساعت، مقاومت در برابر یدرنگی 22 ± 130 Mpa، مقاومت کششی 730 ± 1030 Mpa و کرنش حد تسلیم 360 ± 730 Mpa است. محدوده دمای کاری این نوع سیلیکون بین ۵۰- و 310°C است و در نتیجه استرین سازی در دمای بالا هیچ گونه اثر منفی بر ویژگیهای آن نخواهد داشت. هیدروژل در نظر گرفته شده به عنوان فاز گسسته پلی آکرلیک اسید بود پلی آکرلیک اسید با پلیمر شدن و شبکه ای شدن آکرلیک اسید تهیه شده از شرکت مرک بدست آمد.

با توجه به ویژگیهای پلی آکرلیک اسید و با دانستن این نکته که قرار دادن این هیدروژل در معرض دماهای نزدیک به 100°C و بالاتر از آن باعث تغییر خواص آن می شود، سیلیکون قابل پخت در دماهای پایین مورد استفاده قرار گرفت. بدین ترتیب، به هنگام پخت و شکل دهی سیلیکون لرومی به رساندن کامپوزیت به دماهای بالا وجود نداشت.

جدول ۱- غلظت‌های مولی و درصد اجزای شرکت کننده در واکنش پلیمر شدن و شبکه ای شدن آکرلیک اسید.

ماده	غلظت مولی در محلول اولیه mol/L	درصد وزنی در محلول اولیه
مونومر اتیلن گلیکول دی متاکریلات	$6/28$	۴۵
آمونوم پروسولفات سدیم دی سولفیت	$4/18 \times 10^{-3}$	۰/۱۲۱
آب	$4/27 \times 10^{-3}$	۰/۰۹۷
	$2/56 \times 10^{-3}$	۰/۰۴۸
	—	۵۴/۷

دستگاهها

در این پژوهش، میکروسکوپ نوری برای بررسی ذرات هیدروژل و نمونه های سیلیکون فیل و بعد از افزودن این ذرات و چگونگی پخش آنها در ماتریس سیلیکون بکار برده شد.

آب سازگاری نمونه های اصلاح شده با روش اندازه گیری زاویه تماس قطره با سطح نمونه ها بررسی شد. برای این منظور قطره های آب به وسیله یک میکروسرنج در سه نقطه مجزا روی سطح هر نمونه قرار داده شد. سپس، به کمک دستگاه اندازه گیری زاویه تماس کراس (KRUSS) مدل K1۲۱ زاویه های مذکور اندازه گیری شد.

کشش سطحی نمونه ها به وسیله دستگاه اندازه گیری کشش سطحی کراس در حالت دینامیک در آب دوبار تظطیر شده اندازه گیری شد. این نتایج با استفاده از معادله ویلهلمی (Wilhelmi)، $\delta = f(\text{ICOS})$ بدست آمده است.

روشها

تهیه و تعیین ویژگیهای پلی آکرلیک اسید

پلی آکرلیک اسید به عنوان ماده ابر جاذب در پزشکی و صنعت دارای کاربردهای متفاوتی است [۲۱]. پلیمر شدن این ماده به عنوان یک هیدروژل یونی در محلول آبی و تأثیر pH محیط بر رفتار تورمی آن پیش از این گزارش شده است [۲۲، ۲۳]. پیش از این از آمونوم پروسولفات و سدیم بی سولفیت به عنوان آغازگرهای پلیمر شدن و اتیلن گلیکول دی متاکریلات (EGDMA) به صورت عامل شبکه ای کننده استفاده شده [۲۳] که فرایند پلیمر شدن در این مقاله نیز با توجه به همین فرمولبندی انجام شده است. در مراجع دیگر از موادی همچون ترکیبات پلی گلیسید پلی، ایوکسی هالوزن

دار و ایزوسیاناتی برای شبکه ای کردن پلی آکرلیک اسید استفاده شده است [۲۴].

از آنجا که آکرلیک اسید در دمای محیط به شکل خود بخود تشکیل هوموپلیمر می دهد، نمونه های تجاری آکرلیک اسید خالص دارای ممانعت کننده است که لازم است پیش از شروع پلیمر شدن از آکرلیک اسید زدوده شود. ترکیبات هیدروکیتون مانند مونومیل اتر هیدروکیتون از ممانعت کننده های متعارف برای آکرلیک اسیدند. همچنین، وجود اکسیژن در محیط نیز بر پلیمر شدن آکرلیک اسید اثر منفی دارد. پیش از این درباره اثر ممانعت کننده در کاهش نرخ پلیمر شدن آکرلیک اسید مطالعه شده است [۲۵، ۲۶]. پس از دوبار تظطیر مونومر در خلأ (مجموعاً به مدت ۳ ساعت) و در دمای $50-40^{\circ}\text{C}$ ، پلیمر شدن در مجاورت مایع متورم کننده، یعنی آب انجام گرفت، به شکلی که وقوع دوفاز مختلف در ساختار هیدروژل قابل پیش بینی بود که این عامل به نوبه خود باعث بوجود آمدن دو ضریب نفوذ متفاوت برای سیستم می شود [۲۷]. پلیمر شدن در دمای 50°C شروع شد و غلظت‌های مولی برای اجزای مختلف مطابق جدول ۱ در نظر گرفته شد. سیستم مورد اشاره در این جدول، سیستم متعارف اکسایش - کاهش است، ولی در موارد دیگر به آزوبیس-متیل پروپیونیتریل، سدیم دی سولفیت و آمونوم پر سولفات (هر یک به تنهایی) اشاره شده است. عامل ایجاد پیوندهای عرضی مورد استفاده در این پژوهش EGDMA بود، ولی مونومرهای چند عاملی مشابه مانند متیلن بیس آکریل آمید و گلو تار آلدهید نیز برای این منظور قابل استفاده است. همچنین، از روش ایجاد پیوندهای عرضی به وسیله پرتو گاما می توان استفاده کرد [۲۸]. ثابت شده است که استفاده از عامل ایجاد پیوندهای عرضی اثری بر سرعت واکنش پلیمر شدن ندارد [۲۴]. پس از نیم ساعت دمای محیط پلیمر شدن به 65°C افزایش یافت و به مدت یک ساعت در همین محدوده باقی ماند. سپس، به نمونه ها فرصت داده شد تا به مدت یک شبانه روز در محدوده دمایی $60-55^{\circ}\text{C}$ باقی بمانند. در ساعات اولیه پلیمر شدن لازم بود که دمای سیستم کنترل شود تا در صورت بروز مشکل ایجاد حباب در ژل، با کاهش دما از این کار جلوگیری شود. همچنین، با توجه به اینکه وجود اکسیژن در محیط مانعی در برابر پلیمر شدن آکرلیک اسید است، پلیمر شدن در یک محیط مجزا انجام گرفت. با استفاده از نتایج سینتیک پلیمر شدن آکرلیک اسید در مایع متورم کننده مشاهده شده است که جرم مولکولی عددی پلی آکرلیک اسید، M_n ، با غلظت مولی مونومر در محلول اولیه، $[M]$ ، مطابق معادله زیر تغییر می کند [۲۹]:

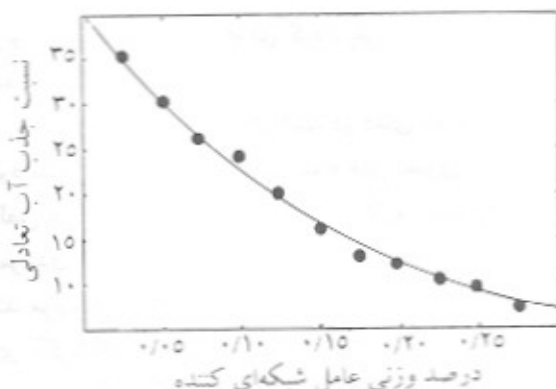
$$M_n = 1157 \times 10^6 [M]^{3/2} \quad (1)$$

زنجیره‌های بین شبکه بدست آمد. با همین روش می توان نمونه های گروه ۲ یعنی هیدروژل دارای درصدهای متفاوت از عامل ایجاد پیوندهای عرضی را نیز از یکدیگر متمایز ساخت. رفتار تورمی پلی آکریلیک اسید شبکه ای شده به وسیله ناپش پرتو گاما نیز پیش از این مورد مطالعه قرار گرفته است. در این پژوهش، مشاهده شده است که میزان ناپش پرتو به محلول آبی دارای مونومر، باعث تغییر الگوی تورمی هیدروژل می شود [۲۸].

تهیه کامپوزیت

نمونه های هیدروژل پس از آماده شدن مطابق روش پیش گفته در آب مقطر قرار گرفتند و ۲۴ ساعت در این محیط باقی ماندند. پس از حصول اطمینان از دفع مواد زاید، نمونه ها به آون با خلأ ۱۰ mmHg و دمای ۵۰ °C منتقل شده و به مدت یک ساعت در آن دما نگه داشته شدند [۳۰]. این کار برای دفع آب محبوس شده در ساختار شبکه ژل و بدست آوردن نمونه هایی که خرد کردن آنها در آسیاب ممکن باشد ضروری بود. پس از خشک کردن ذرات، نمونه ها یک بار در آسیاب معمولی و بار دوم در آسیاب گلوله ای تا رسیدن به اندازه مورد نظر خرد شدند. شکل ۳ ذرات هیدروژل را پس از خروج از مرحله دوم خرد کردن و گذشتن از الک با اندازه روزنه ۱۲۰ μ نشان می دهد.

پس از تهیه ذرات ژل، این ذرات به مخلوط سیلیکون و کاتالیزور که از قبل تهیه شده بود اضافه شد و پس از هم زدن این مخلوط تا رسیدن به یکخواختی مورد نظر، مخلوط نهایی در ظروف آلومینیومی با روکش تفلونی ریخته شد. نمونه ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط قرار گرفتند تا عمل پخت سیلیکون تکمیل



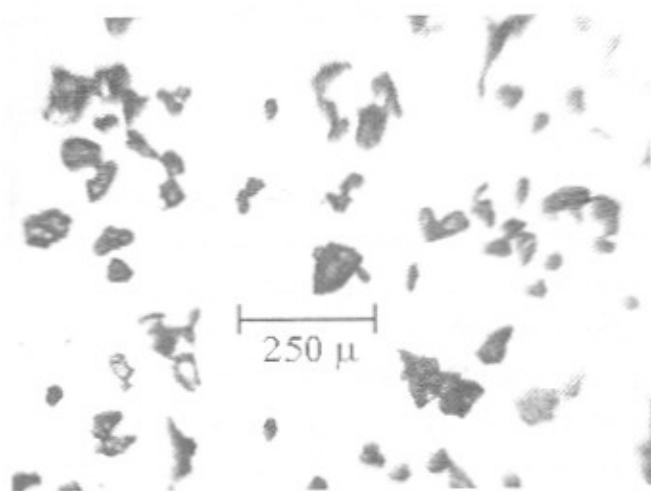
شکل ۲- رابطه نسبت تورم تعادلی با درصد وزنی عامل شبکه ای کننده (معادله ۲ به شکل تقریبی ارتباط خطی میان عامل شبکه ای کننده و نسبت جذب آب را نشان می دهد).

با قرار دادن مقدار $[M] = 6/28 \text{ mol/L}$ طبق فرمولبندی ارائه شده در جدول ۱ و برای گروه اول از نمونه های کامپوزیتی، وزن مولکولی $10^3 \times 1/82$ برای پلی آکریلیک اسید بدست می آید. از طرفی، با استفاده از معادلات تورم تعادلی زلهای یونی می توان به معادله ای نظری میان نسبت تورم تعادلی، وزن مولکولی پلیمر در حالت خطی و وزن مولکولی زنجیره‌های بین نقاط شبکه دست یافت [۲۱]. این معادله با استفاده از پارامترهای داده شده در مرجع [۲۳] برای پلی آکریلیک اسید در حالت نهایی به شکل زیر قابل بازنویسی است که در آن Q نسبت تورم تعادلی است:

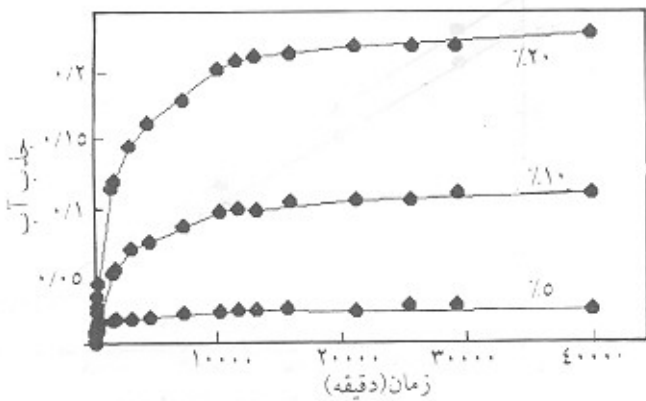
$$M_c = \frac{21.7M_n}{\frac{-0.0204(1.2Q+1)^{-1} - (1+1.2Q+1)ln\left(\frac{1.2Q}{1+1.2Q}\right)}{(1.2Q)^{2/3} - 0.5}} + 43.37 \quad (2)$$

برای بررسی رفتار تورمی و بدست آوردن جذب آب تعادلی، پلی آکریلیک اسید بدست آمده پس از پایان واکنش پلیمر شدن در آب مقطر قرار گرفت تا ضمن تورم در محیط آبی، مواد زاید مانند مونومرهای واکنش نداده، ممانعت کننده ها و غیره را زدست بدهد. میزان جذب آب نمونه ها با زمان اندازه گیری شد و برای درصدهای مختلف عامل شبکه ای کننده، مقادیر جذب آب تعادلی متفاوتی بدست آمد. در شکل ۲ رابطه میان درصد وزنی عامل شبکه ای کننده و نسبت تورم تعادلی نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۲ می توان دید که وقتی ۰/۱۲۱ درصد عامل شبکه ای کننده در ساختار ژل وجود دارد، جذب آب تعادلی برابر ۴/۲۲ است. در نهایت مقدار $M_c = 7500$ به عنوان وزن مولکولی



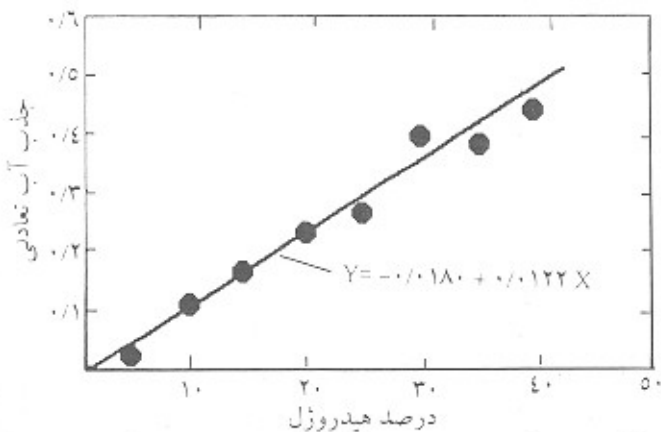
شکل ۳- ذرات هیدروژل آکریلیک اسید پس از عبور از الک با اندازه روزنه ۱۲۰ μ.



شکل ۵- سینتیک جذب آب در کامپوزیتهای سیلیکون و پلی آکرلیک اسید تهیه شده طبق فرمولبندی جدول ۲ برای نمونه های کامپوزیتی.

برای نشان دادن رفتار جذب آب از خود حتما باید در محیطی با pH بزرگتر از این مقدار فرار بگیرد [۲۸]. در شکل ۵ سینتیک رفتار تورمی نمونه های دارای ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد هیدروژل با زمان و در شکل ۶ ارتباط میان میزان هیدروژل موجود در فرمولبندی با میزان جذب آب تعادلی دیده می شود. نسبت جذب آب تعادلی زمانی اندازه گیری شد که نمونه ها قبل و بعد از آن تساوی به جذب آب بیشتر نشان ندادند. این نسبت (q) بر حسب وزن نمونه های خشک، W_d ، (پیش از جذب آب) و وزن نمونه ها پس از جذب آب، W_w ، به شکل زیر تعریف می شود:

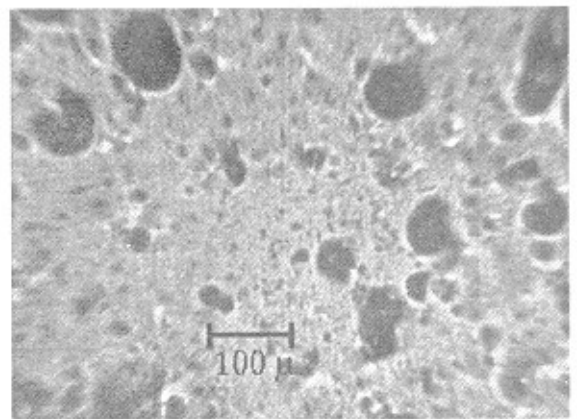
$$q = \frac{W_w - W_d}{W_d} \quad (3)$$



شکل ۶- رابطه میان درصد هیدروژل با میزان جذب آب تعادلی (پلی آکرلیک اسید با میزان عامل شبکه ای کننده ثابت و مطابق فرمولبندی جدول ۲ تهیه شد).



(الف)



(ب)

شکل ۴- نمونه های سیلیکون: (الف) قبل از افزودن ذرات هیدروژل و (ب) بعد از آن (مشاهده می شود که ذرات هیدروژل به شکل تقریباً یکپارچه در ماتریس سیلیکون پخش شده اند).

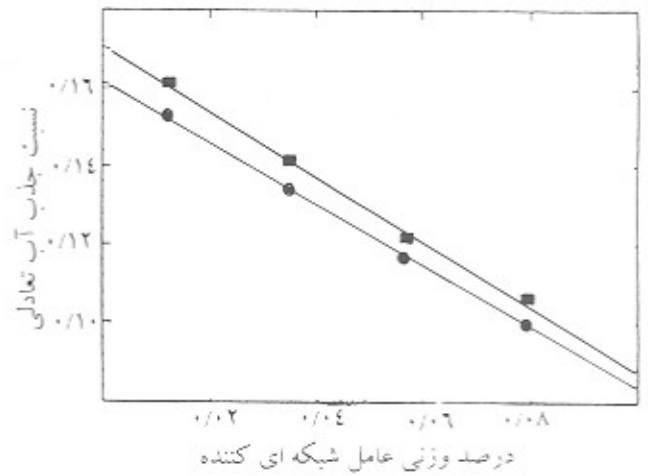
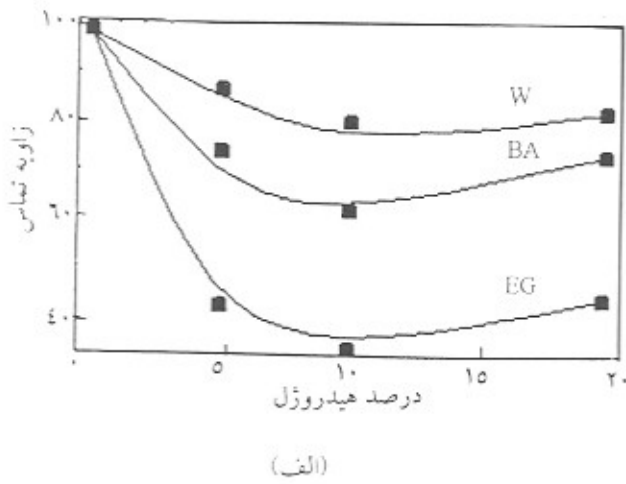
شود. شکل ۴ نمای سطح نمونه های سیلیکون را قبل و پس از افزودن ذرات ژل نشان می دهد.

نتایج و بحث

آزمایشهای جذب آب

جذب آب با تغییر درصد هیدروژل

نمونه های کامپوزیتی پس از پخت سیلیکون در محلول بافر فسفات دار $pH = 7.4$ فرار گرفتند. با این عمل محیطی شبیه به محیط بدن بوجود می آید. ضمن اینکه پلی آکرلیک اسید با $pK_{a1} = 4.5$

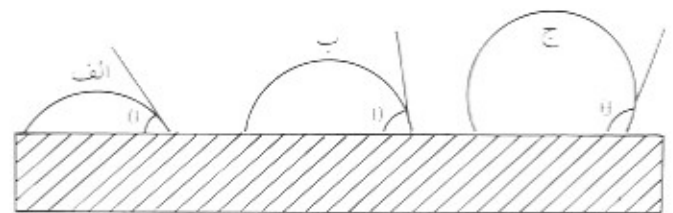


شکل ۷- ارتباط میان درصد عامل شبکه ای کننده با میزان جذب آب نمونه های کامپوزیتی آماده شده با ۱۰ درصد پلی آکرلیک اسید با اندازه ذرات دایره: ۵۰ μ و مربع: ۱۲۰ μ.

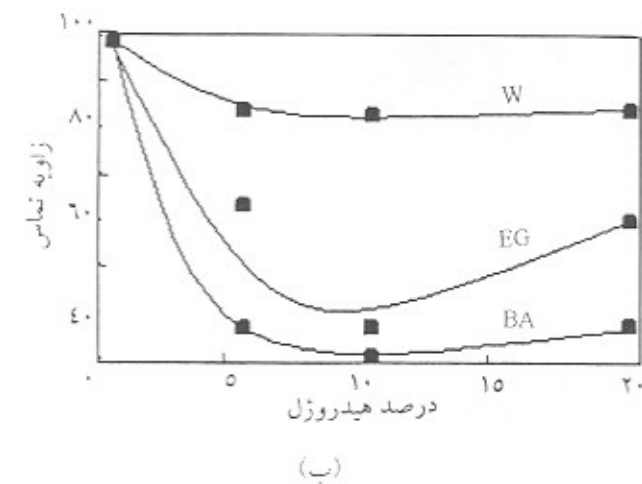
چنانکه در شکل ۶ دیده می شود، در محدوده $40 < x < 60$ درصد، رابطه ای خطی میان درصد فاز گسته و آب جذب شده وجود دارد. برای ذرات ژل با شکل هندسی کروی مشاهده می شود که سینتیک تورم در اصل تابعی از خواص مکانیکی ژل (و نه صرفاً ضریب نفوذ مایع متورم کننده) و فشار اسمزی آن است [۳۰]. با استفاده از معادلات ارائه شده [۳۱] و با داشتن خواص مکانیکی و فشار اسمزی اولیه ژل می توان پیش بینی کرد که ذرات ژل دارای شکل هندسی کروی با استوانه ای بدون اعمال محدودیت تا چه اندازه متورم می شوند [۳۱]. در هر حال، در حالت کلی می توان مشاهده کرد که جذب آب نمونه های کامپوزیتی به شکل قابل توجهی کمتر از مقدار مورد انتظار با توجه به میزان هیدروژل موجود در ماتریس است.

جذب آب با تغییر درصد عامل شبکه ای کننده و اندازه ذرات

نتایج آزمایشها نشان می دهد که تغییر اندازه ذرات، تغییرات قابل توجهی در نسبت جذب آب بوجود نمی آورد. حال آنکه انتظار



شکل ۸- تعریف زاویه تماس برای سه نوع سطح با ترشوندگی: (الف) زیاد، (ب) متوسط و (ج) کم.



شکل ۹- تغییرات زاویه تماس قطرات سه مایع آب، اتیلن گلیکول و بنزیل الکل با سطح کامپوزیت در حالت (الف) خشک و (ب) تر.

می رفت اندازه ذرات باعث ایجاد تفاوت محسوسی در نسبت جذب آب تعادلی گردد. تغییر درصد عامل شبکه ای کننده باعث بوجود آمدن تغییرات خفیفی در درصد جذب آب می شود و همان طور که انتظار می رود، افزایش عامل شبکه ای کننده به علت افزایش محدودیت زنجیرها موجب کاهش جذب آب می شود. این تغییرات در شکل ۷ نشان داده شده است.

آزمایشهای کشش سطحی و انرژی سطحی بحرانی هنگامی که قطره ای از بک مایع روی بک سطح جامد قرار می گیرد، زاویه تماس θ مایع با سطح جامد مطابق شکل ۸ تعریف می شود. طبق این تعریف، هر چه سطح قابلیت ترشوندگی بیشتری داشته باشد، زاویه تماس کوچکتر خواهد بود. در نتیجه حالت تر شدن کامل زمانی پیش می آید که $\theta = 0$ باشد. کشش سطحی در

سطحی بحرانی کامپوزیت محاسبه گردید. این مقادیر برای درصد‌های مختلف هیدروژل در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در شکل ۱۱ مقادیر زاویه تماس دینامیکی سطح کامپوزیت ارائه شده است. گرچه زاویه تماس سطح در حالت کلی تمایل به کاهش دارد، ولی نمی توان در مورد آن به یک نتیجه گیری کلی دست یافت. در پژوهشهای قبلی برای کامپوزیت سیلیکون با پلی آکریل آمید مشاهده شده است که نرخ تغییرات زاویه تماس با درصد هیدروژل در حالت پایین رونده کمی کمتر از همین مقدار برای حالت بالا رونده است. سپس نتیجه گیری شده است که این امر ممکن است به دلیل نحوه جهنگیری گروههای آبدوست در برابر آب باشد [۱۹].

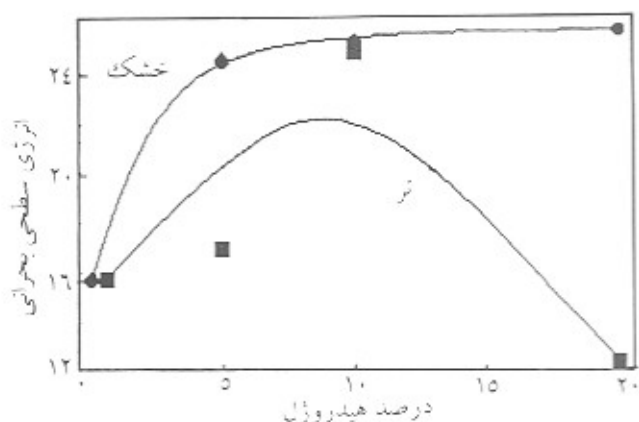
با مشاهده شکل ۱۱ نمی توان به طور مستقیم در مورد آبدوست شدن کامپوزیت نتیجه گیری کرد، ولی به هر حال تمایل به آبدوست شدن در نمونه های سیلیکون با افزودن پلی آکرلیک اسید دیده می شود. زوایای تماس دینامیکی مشاهده شده از مقادیر مربوط به پلیمرهای متعارف نجاری [۴] کمترند و چنانکه پیش از این گفته شد، این ویژگی تأثیری مستقیم بر رفتار سلول روی سطح دارد.

نتیجه گیری

افزودن پلیمر ابر جاذب پلی آکرلیک اسید به سیلیکون، چنانکه قابل پیش بینی بود، باعث آشکار شدن ویژگیهای آبدوستی در سیلیکون می شود. همچنین، مشاهده شد که در محدوده معینی از درصد هیدروژل رابطه ای خطی میان درصد هیدروژل و نسبت جذب آب وجود دارد. این مقدار اختلاف قابل توجهی با مقدار مورد انتظار (با توجه به مقدار ژل افزوده شده به ماتریس) دارد. این اختلاف قاحش احتمالاً به دلیل مساحت ماتریس الاستومری از تورم بیش از حد ذرات ژل است، ضمن اینکه تغییرات pH محیط می تواند تأثیر زیادی بر رفتار تورمی و همچنین ضریب نفوذ ژل داشته باشد. زوایای تماس استاتیک و دینامیک آب با سطح با افزایش مقدار درصد هیدروژل بطور پیوسته افزایش می یابند، ولی توجه قابل قبولی برای بیان تغییرات انرژی آزاد سطحی با تغییر درصد هیدروژل بدست نیامد.

قدردانی

بدین وسیله از مسئولان آزمایشگاه پلیمرهای زیست سازگار پژوهشگاه پلیمر ایران، دکتر محمدتقی خراسانی و مهندس دلارام فلاحی قدردانی می شود.

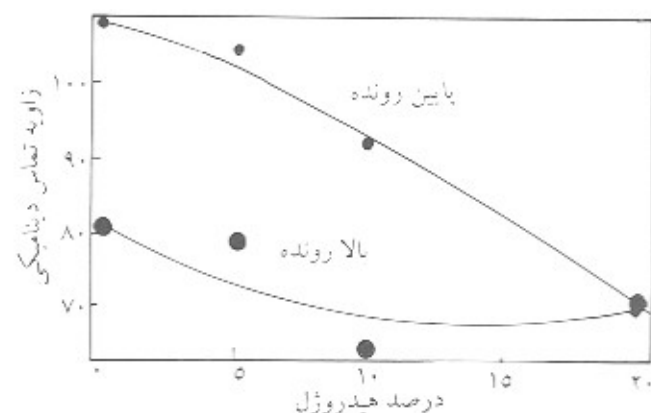


شکل ۱۰- تغییرات انرژی سطحی بحرانی سطوح با درصد هیدروژل برای نمونه های خشک و تر.

این حالت که معادل قابلیت تر شدن کامل سطح است کشش سطحی بحرانی نامیده می شود.

برای بررسی تأثیر افزودن هیدروژل به سیلیکون بر ویژگیهای سطحی آن، زاویه تماس مایعات متفاوت روی سطوح اندازه گیری شده و با استفاده از داده های بدست آمده انرژی سطحی بحرانی محاسبه شد. پیش از این نیز نحوه تأثیر روشهای اصلاح سطح بر زاویه تماس سطوح زیست مواد به تفصیل مورد مطالعه قرار گرفته است [۳۳، ۳۲، ۱۸]. زاویه تماس آب مقطر روی سیلیکون RTV قبل از اصلاح سطح برابر ۱۱۷° و پس از اصلاح به وسیله هیدروژل برابر ۴۴° گزارش شده است [۳۳].

در شکل ۹ تفاوت میان زاویه تماس نمونه های با درصد‌های مختلف هیدروژل با آب، اتیلن گلیکول و بنزین الکل نشان داده شده است. با استفاده از داده های فوق مقدار کشش



شکل ۱۱- تغییرات زاویه تماس دینامیکی نمونه های کامپوزیتی نسبت به درصد هیدروژل.

مراجع

- Hunt JA, Meijs G and Williams DF: "Hydrophilicity of polymers and soft tissue responses: a quantitative analysis"; *J. Biomed. Mat. Res.*, **36**, 542-549, 1997.
 - Seeger JM, Ingegno MD and Bigatan E: "Hydrophilic surface modification of metallic stents"; *J. Vasc. Surg.*, **22**, 3, 327-335, 1995.
 - Lee JH, Jung HW, Kang IK and Lee HB: "Cell behavior on polymer surfaces with different functional groups"; *Biomaterials*, **15**, 705-711, 1994.
 - van der Valk P, van Pelt AWJ, Busscher HJ: "Interaction of fibroblasts and polymer surfaces: relationship between surface free energy and fibroblast spreading"; *J. Biomed. Mat. Res.*, **17**, 5, 807-817, 1983.
 - Lee JH, Park JW and Lee HB: "Cell adhesion and growth on polymer surfaces with hydroxyl groups prepared by water vapour plasma treatment"; *Biomaterials*, **12**, 443-448, 1991.
 - van Wachem PB, Beugeling T, Feijen J, Bantjes A, Detmers JP and van Aken WG: "Interaction of cultured human endothelial cells with polymeric surfaces of different wettabilities"; *Biomaterials*, **6**, 403-408, 1985.
 - Mirzadeh H, Katbab AA, Khorasani MT, Burford RP, Gorgin E and Golestani A: "Cell attachment to laser-induced AAm- and HEMA-grafted ethylene-propylene rubber as biomaterial: in vivo study"; *Biomaterials*, **16**, 641-648, 1995.
 - Lewandoswka K, Pergamett E and Sukenik CN: "Cell-type-specific adhesion mechanisms mediated by fibronectin adsorbed to chemically derivatized substrata"; *J. Biomed. Mat. Res.*, **26**, 1343-1363, 1992.
 - van Kooten TG, Schakenraad JM, van der Mei HC and Busscher HJ: "Influence of substratum wettability on the strength of adhesion of human fibroblasts"; *Biomaterials*, **13**, 897-904, 1992.
 - Kishida A, Iwata H, Tamada Y and Ikada Y: "Cell behaviour on polymer surfaces with grafted with Non-Ionic and Ionic Monomers"; *Biomaterials*, **12**, 786-792, 1991.
 - Kulik E and Ikada Y: "In vitro platelet adhesion to nonionic and ionic hydrogels with different water contents"; *Biomaterials*, **30**, 295-304, 1996.
 - Cifkova I, Lopour P, Vondracek P and Jelinek F: "Silicone rubber-hydrogel composites as polymeric biomaterials: I. biological properties of the silicone rubber-p(HEMA) composite"; *Biomaterials*, **11**, 393-396, 1990.
 - Lopour P, Vondracek P, Janatova V, Sulc J and Vacik J: "Silicone rubber-hydrogel composites as polymeric biomaterials: II. hydrophilicity and permeability to water-soluble low-molecular-weight compounds"; *Biomaterials*, **11**, 397-402, 1991.
 - Ledincky F., Janatova V., and Lopour P: "Silicone rubber-hydrogel composites as polymeric biomaterials: III. an investigation of phase distribution by scanning electron micrography"; *Biomaterials*, **12**, 848-852, 1991.
 - Lopour P., Plichta Z., Volfova Z., Hron P. and Vondracek P: "Silicone rubber-hydrogel composites as polymeric biomaterials: IV. silicone matrix-hydrogel filler interaction and mechanical properties"; *Biomaterials*, **14**, 1051-1055, 1993.
 - Lopour P. and Janatova V: "Silicone rubber-hydrogel composites as polymeric biomaterials. V. transport properties in the water-swollen state"; *Biomaterials*, **16**, 633-640, 1995.
 - Hron P., Slechtova J., Smetana K., Dvorankova B. and Lopour P: "Silicone rubber-hydrogel composites as polymeric biomaterials. IX. composites containing powdery polyacrylamide hydrogel"; *Biomaterials*, **14**, 1069-1073, 1997.
18. رضایی درویشی محمود، میرزاده حمید و محراب زاده محمود، تهیه و بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی آلایز زیست سازگار بر پایه پلی دی متیل سیلوکسان و پلی ۲- هیدروکسی اتیل

مناکریلات، علوم و تکنولوژی پلیمر، سال یازدهم، شماره سوم،
مجله چهل و یکم، ۱۳۷۷.

19. Fallahi D, Mirzadeh H, Khorasani MT and Mehrabzadeh M.: "Biocompatibility evaluation of hydrophilic and hydrophobic silicone rubbers"; Proceedings of the 5th Iranian Seminar on Polymer Science and Technology; 339-342, 1999.
20. Sölradi H, Neuhauser F, Matejcek KM and Stadelmann B.: "RTV-2 silicone rubber with low compression set"; U. S. Patent 6 022 904, 2000.
21. Brannon-Peppas L (Editor) and Harland RS: *Absorbent polymer technology*; Elsevier Science Publishers, 1990.
22. Brannon-Peppas L and Peppas NA: "Equilibrium swelling behavior of dilute ionic hydrogels in electrolytic solutions"; *J. Controlled Release.*, **16**, 319-330, 1991.
۲۳. توکلی جواد، بررسی رفتار تورم هیدروژل آکرلیک اسید در میدان الکتریکی، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی پزشکی، دانشکده مهندسی پزشکی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، پاییز ۱۳۷۸.
24. Kazuo S: "Process for improving a water absorbent polyacrylic acid polymer and an improved polymer produced by said process"; U.S. Patent 4 783 510, 1988.
25. Mizutami Y: "Superabsorbent poly(acrylic acid) complex"; *J. Appl. Polym. Sci.*, **61**, 735-739, 1996.
26. Cutié SS, Henton DE, Powell C, Reim RE, Smith PB and Staples TL: "The effect of MEHQ on the polymerization of acrylic acid in the preparation of superabsorbent gels"; *J. Appl. Polym. Sci.*, **64**, 577-589, 1997.

27. Weiss N, van Vliet T. and Silberberg. A: "Permeability of heterogenous gels"; *J. Polym. Sci. Polym. Phys. Ed.*, **17**, 2229-2240, 1979.
28. Jabbari E and Nozari S; "Synthesis of acrylic acid hydrogel by γ -irradiation cross linking of polyacrylic acid in aqueous solution"; *Iranian Polym. J.*; **8**, 263-270, 1999
29. Cutié SS, Smith PB, Henton DE, Staples TL and Powell C.; "Acrylic acid polymerization kinetics"; *J. Polym. Sci. Polym. Phys. Ed.*, **35**, 2029-2047, 1997.
30. Greenberg AR. And Kusy RP.: "Influence of cross linking on the glass transition of poly(acrylic acid)"; *J. Appl. Polym. Sci.*; **25**, 785-788, 1980.
31. Tanaka T. and Fillmore DJ.: "Kinetics of swelling of gels"; *J. Chem. Phys.* **70**, 1214-1218, 1979.
32. Hsiue GH., Lee SD., Wang CC., Shiue MH and Chang PCT.: "Plasma induced graft copolymerization of HEMA onto silicone rubber and TPX filmimproving rabbit corneal epithelial cell attachment and growth"; *Biomaterials*, **15**, 163-171, 1994.
33. Hudis M. and Prescott L. E.: "A study of the contact angle on RTV-silicone treated in a hydrogen glow discharge"; *J. Appl. Polym. Sci.*; **19**, 451-459, 1975.