

## جذب آب و واکنشیدگی ضخامت طولانی مدت و تعیین مشخصه‌های آن‌ها در نانو کامپوزیت‌های آرد چوب/پلی پروپیلن/نانو سیلیس

### چکیده

این تحقیق با هدف بررسی تأثیر نانو سیلیس بر جذب آب و واکنشیدگی ضخامت طولانی مدت، ضریب انتشار رطوبت و نرخ واکنشیدگی ضخامت نانو کامپوزیت چوب پلاستیک انجام گردید. برای این منظور آرد چوب با نسبت وزنی ۶۰ درصد با پلی پروپیلن به همراه phc۲ جفت کننده انیدرید مالئیک جفت شده با پلی پروپیلن در داخل دستگاه مخلوط کن داخلی مخلوط گردید. نانو سیلیس نیز با نسبت‌های وزنی ۰، ۱، ۳ و ۵ phc به عنوان تقویت کننده مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت نمونه‌های آزمونی با استفاده از دستگاه تزریق ساخته شدند. سپس جذب آب و واکنشیدگی ضخامت طولانی مدت نمونه‌ها طی ۱۸۴۸ ساعت مطابق با استاندارد ASTM اندازه گیری شدند. ضریب انتشار رطوبت و نرخ واکنشیدگی ضخامت به منظور بررسی دقیق تر رفتار جذب آب و واکنشیدگی ضخامت طولانی مدت نانو کامپوزیت‌های چوب پلاستیک نیز محاسبه گردید. جهت اطمینان از ایجاد پیوند هیدروژنی بین گروه‌های هیدروکسیل ذرات نانو سیلیس با گروه‌های هیدروکسیل آرد چوب از طیف سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز استفاده گردید. نتایج نشان داد که رفتار جذب آب نانو کامپوزیت مورد مطالعه مطابق با قانون فیک است بعلاوه با افزایش نانو ذرات سیلیس، جذب آب و واکنشیدگی ضخامت طولانی مدت و ضریب انتشار رطوبت در نانو کامپوزیت چوب پلاستیک کاهش یافت. نتایج طیف سنجی مادون قرمز نیز حاکی از وجود پیوند هیدروژنی بین نانو سیلیس و آرد چوب بود. تجزیه و تحلیل آماری نشان داد که بعد از ۱۸۴۸ ساعت غوطه‌وری، نانو سیلیس در سطح اطمینان ۹۹ درصد بر جذب آب و واکنشیدگی ضخامت تأثیر معنی داری داشت به طوری که تیمار حاوی ۵ درصد نانو سیلیس به عنوان تیمار برتر انتخاب شد.

**واژگان کلیدی:** ضریب انتشار رطوبت، نرخ واکنشیدگی ضخامت، نانو سیلیس، طیف سنجی مادون قرمز، جذب آب طولانی مدت.

سعید اسمعیلی مقدم<sup>۱\*</sup>  
عبدالله نجفی<sup>۲</sup>  
افسانه شهرکی<sup>۳</sup>  
بهروز ملکیان<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران

<sup>۲</sup> عضو هیات علمی گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد چالوس.

<sup>۳</sup> باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران

<sup>۴</sup> باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران

مسئول مکاتبات:

[saeed.am17358@gmail.com](mailto:saeed.am17358@gmail.com)

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۴/۲۵

تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۹/۲۹

### مقدمه

استفاده از مواد لیگنوسلولزی در صنعت پلیمر منجر به تولید گروهی از فرآورده‌های مرکب به نام کامپوزیت‌های چوب پلاستیک شده است. از آنجایی که

بیش از نیمی از ترکیب کامپوزیت‌های چوب پلاستیک را مواد لیگنوسلولزی تشکیل می‌دهند، بنابراین می‌توان انتظار داشت که این فرآورده‌ها دارای خاصیت قطبی باشند. قسمت عمده جذب آب در کامپوزیت‌های چوب

مورد استفاده، نانو ذرات سیلیس است که با اندازه بسیار کوچک و سطح ویژه بسیار بالایی که دارند کاربردهای فراوانی در صنعت پلیمر دارد. پژوهشگران معتقدند که سطح نانو ذرات سیلیس دارای خاصیت قطبی و آب‌دوست است [۷]؛ اما سطح ویژه بالای این نانو ذرات واکنش‌پذیری آن‌ها را بسیار آسان نموده است. برخی از محققان تشکیل پیوند هیدروژنی بین نانو سیلیس و برخی از پلیمرهای آب‌دوست را تأیید کرده‌اند [۸، ۹، ۱۰]؛ بنابراین استفاده از ذرات در مقیاس نانو راه‌حل بسیار مناسبی جهت کاهش مقدار جذب آب و به تبع آن واکنشیدگی ضخامت و همچنین به تأخیر انداختن روند جذب آب در فرآورده‌های مرکب است. پژوهشگران تأثیر نانو ذرات سیلیس بر روی جذب آب و واکنشیدگی ضخامت نانو کامپوزیت‌های حاصل از آرد چوب-پلی‌پروپیلن را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها سطوح ۰، ۲، ۴ و ۶ درصد نانو سیلیس را به‌عنوان عامل متغیر در نظر گرفتند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش نانو ذرات سیلیس جذب آب و واکنشیدگی ضخامت در نانو کامپوزیت چوب پلاستیک کاهش می‌یابد. همچنین مشخص شد که در ساعات اولیه غوطه‌وری سرعت جذب آب در مقایسه با اواخر دوره غوطه‌وری بسیار بیشتر بود [۱۱]. پژوهشگران دیگری نانو ذرات کلوئیدی سیلیس را از پوسته برنج استخراج کردند و از این نانو ذرات برای اشباع چوب صنوبر استفاده کردند. آن‌ها از غلظت‌های مختلف نانو سیلیس برای مطالعه جذب آب طولانی‌مدت و ثبات ابعاد گونه صنوبر استفاده کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که با افزایش غلظت نانو سیلیس، در ساعات‌های اولیه غوطه‌وری جذب آب نمونه‌ها افزایش یافت، اما پس از گذشت ۸ ساعت از زمان غوطه‌وری عکس این موضوع اتفاق افتاد؛ یعنی با افزایش غلظت نانو سیلیس جذب آب در گونه صنوبر کاهش یافت. همچنین نمونه‌های اشباع‌شده با سیلیس در مقایسه با نمونه شاهد جذب آب کمتری داشتند [۱۲]. برخی دیگر از محققین، تأثیر نانولوله‌های کربنی چند دیواره بر روی جذب آب و واکنشیدگی ضخامت طولانی‌مدت کامپوزیت حاصل

پلاستیک از طریق قطبیت مواد لیگنوسولوزی و از طریق گروه‌های هیدروکسیل این مواد اتفاق می‌افتد [۱]؛ اما شکاف‌های نانومتری بین زنجیره‌های مواد پلیمری مورد استفاده نیز مقداری از جذب آب نهایی کامپوزیت‌های چوب پلاستیک را شامل می‌شود [۲]. ذکر این نکته حائز اهمیت است که به دلیل قطبیت مواد لیگنوسولوزی و عدم قطبیت مواد پلیمری، فصل مشترک ضعیفی بین این دو فاز تشکیل می‌شود [۳]. این سطح مشترک ضعیف لوله‌های مویین کوچکی را برای نفوذ آب به داخل کامپوزیت به وجود می‌آورد. مواد جفت کننده تا حد زیادی شعاع این لوله‌های مویین را کاهش می‌دهند و صعود آب به داخل این لوله‌ها را با مشکل مواجه می‌کنند، اما در هر صورت مقداری آب از طریق این لوله‌های مویین در کامپوزیت چوب پلاستیک جذب می‌شوند [۴]. جذب آب در فرآورده‌های مرکب چوبی باعث به وجود آمدن مشکلاتی در مصرف نهایی آن فرآورده خواهد شد. نظر به این که کامپوزیت‌های چوب پلاستیک در محیط‌ها و اماکن مرطوب به کار گرفته می‌شوند، مطالعه رفتار جذب آب و واکنشیدگی ضخامت طولانی مدت این فرآورده‌ها از اهمیت راه‌کارهایی که بتواند منجر به کاهش جذب آب و واکنشیدگی ضخامت در کامپوزیت‌های چوب پلاستیک شود و یا روند جذب آب را با تأخیر مواجه سازد، بسیار مورد استقبال است.

در طی سال‌های اخیر استفاده از ذرات نانو برای کاهش جذب آب و واکنشیدگی ضخامت در فرآورده‌های مرکب چوبی بسیار مورد توجه بوده است. برخی از پژوهشگران، تأثیر نانو ذرات رس بر روی جذب آب طولانی‌مدت نانو کامپوزیت‌های چوب پلاستیک را مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه علاوه بر جذب آب طولانی‌مدت، ضریب انتشار رطوبت نانو کامپوزیت‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها از ۰، ۳ و ۶ درصد نانو رس در ترکیب کامپوزیت چوب پلاستیک استفاده کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که با افزایش نانو ذرات رس جذب آب و همچنین ضریب انتشار رطوبت در نانو کامپوزیت چوب پلاستیک کاهش یافت [۴]. یکی دیگر از نانو مواد

### مواد و روش‌ها

در این تحقیق، از آرد چوب توسکا (*Alnus subcordata*) با اندازه ابعاد ۴۲۵ میکرومتر (۶۰ مش) به عنوان تقویت کننده به میزان ۶۰ درصد استفاده گردید. از پلی پروپیلن با نام تجاری V30s از محصولات کارخانه پتروشیمی اراک، با شاخص جریان مذاب ۱۸ gr/10min و دانسیته ۰/۹ گرم بر سانتی متر مکعب به عنوان ماتریس پلیمری به میزان ۴۰ درصد و از انیدرید مالئیک پلی پروپیلنی (PP-g-MA) از محصولات شرکت Slovay کشور بلژیک با نام تجاری Priex 20070 و شاخص جریان مذاب ۶۴ gr/10min و میزان انیدرید پیوند خورده ۰/۱ درصد به عنوان ماده جفت کننده به میزان ۱ phc<sup>۱</sup> استفاده گردید. محلول نانو سیلیس که مشخصات آن در جدول ۱ آمده است از شرکت وند شیمی ساختمان (تهران) تهیه گردید و با نسبت‌های ۰، ۱، ۳ و ۵ phc مورد استفاده قرار گرفت.

از پلی پروپیلن و الیاف بازیافتی کاغذهای قهوه‌ای را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که با افزودن ۱ درصد نانولوله کربنی چند دیواره، جذب آب و واکنشیدگی ضخامت در نانو کامپوزیت‌ها به مقدار فراوانی کاهش یافت اما افزودن مقادیر بیشتر نانولوله کربنی باعث افزایش جذب آب و واکنشیدگی ضخامت گردید [۱۳].

نکته‌ای که باید به آن اشاره کرد این است که مقدار جذب آب و واکنشیدگی ضخامت طولانی مدت به تنهایی نمی‌تواند بیان کننده رفتار و شدت آب دوستی و یا آب‌گریزی کامپوزیت‌ها باشد. در این راستا ضریب انتشار رطوبت و نرخ واکنشیدگی ضخامت از مهم‌ترین مشخصه‌های رفتار جذب آب و واکنشیدگی ضخامت طولانی مدت کامپوزیت‌ها است. این تحقیق به دنبال مطالعه تأثیر نانو ذرات سیلیس بر روند جذب آب و واکنشیدگی ضخامت طولانی مدت نانو کامپوزیت چوب پلاستیک و تعیین مشخصه‌های آن است.

جدول ۱- مشخصات محلول نانو سیلیس

اندازه ذرات (nm)	نوع محلول	سطح ویژه (m <sup>2</sup> /g)	گرانروی (CP)	دانسیته (g/cm <sup>3</sup> )	اسیدیته	رنگ
۷۰-۱۰۰	آب	۲۴۰	۱۵	۲/۴	۹/۱	سفید

### ساخت نانو کامپوزیت‌های چوب پلاستیک

قبل از انجام اختلاط، آرد چوب در داخل دستگاه آون به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۵±۲ سانتی‌گراد خشک گردید. فرآیند اختلاط مواد در داخل دستگاه مخلوط‌کن داخلی (HAAKE) مدل (HBI System 90, USA) واقع در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران انجام شد. ابتدا پلی پروپیلن به داخل محفظه دستگاه ریخته شد و پس از ذوب شدن پلیمر، ماده جفت کننده به داخل دستگاه اضافه گردید. در مرحله بعد، محلول نانو سیلیس با نسبت وزنی مشخص توزین شد و بر روی آرد چوب اسپری گردید و سپس به داخل محفظه دستگاه ریخته شد. فرآیند اختلاط تا ثابت شدن گشتاور پیچشی ادامه پیدا کرد که در حدود ۱۳ دقیقه برای هر تیمار بود. پس از خارج شدن مواد داغ شکل‌پذیر از داخل دستگاه مخلوط‌کن داخلی، این مواد در بین دو صفحه فلزی و

تحت فشار قرار داده شدند تا خنک شوند. پس از سرد شدن مواد، جهت تهیه گرانول وارد دستگاه خردکن نیمه‌صنعتی شرکت Wieser مدل WG-LS 200/200 ساخت کشور آلمان شدند. به منظور حذف رطوبت، گرانول‌ها به مدت ۴ ساعت در خشک‌کن با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند و نمونه‌های آزمون به روش قالب‌گیری تزریقی ساخت شرکت ایمن ماشین تهران (ایران) با دمای ۱۸۵ سانتی‌گراد و فشار ۳ مگا پاسکال مطابق با استاندارد ASTM D3641-12 [۱۴] ساخته شدند. در نهایت نمونه‌ها قبل از انجام آزمون، در دمای آزمایشگاه (۲۳ درجه سانتی‌گراد) و رطوبت نسبی ۵۰ درصد به مدت ۴۰ ساعت مطابق با استاندارد D618- ASTM 13 [۱۵] قرار داده شدند.

## اندازه‌گیری‌ها

در برابر  $t^{0.5}/L$  می‌توان نمودار ضریب پخش را رسم نمود. پس از رسم نمودار، مربع ضریب  $X$  معادله رگرسیون در عدد پی ضرب شده و بر ۱۶ تقسیم می‌شود تا ضریب انتشار رطوبت محاسبه شود.

$$\frac{Mt}{M_{sat}} = Kt^n \quad (1)$$

$$\text{LOG} \left\{ \frac{Mt}{M_{sat}} \right\} = \text{LOG}(K) + n\text{LOG}(t) \quad (2)$$

$$\frac{Mt}{M_{sat}} = \frac{4}{L} \left\{ \frac{D}{\pi} \right\}^{0.5} t^{0.5} \quad (3)$$

برای مقایسه واکنشیدگی ضخامت مواد مختلف می‌توان از مدل نرخ واکنشیدگی ضخامت استفاده نمود. در این مدل از مشخصه نرخ واکنشیدگی ( $K_{sf}$ ) بهره‌گیری می‌شود که وابسته به سرعت واکنشیدگی، واکنشیدگی ضخامت بیشینه و ضخامت اولیه نمونه است. نرخ واکنشیدگی ضخامت با استفاده از رابطه ۴ محاسبه گردید؛ که در آن  $H(t)$  واکنشیدگی ضخامت در زمان  $t$ ،  $H_0$  و  $H_s$  به ترتیب ضخامت نهایی و اولیه کامپوزیت و  $K_{sf}$  ثابت نرخ واکنشیدگی ضخامت است. میزان  $K_{sf}$  در رابطه ۴ وابسته به چگونگی شدت واکنشیده شدن ماده مرکب و نیز ضخامت نهایی و اولیه است. از روش مناسب‌سازی منحنی غیرخطی با بهره‌گیری از داده‌های تجربی برای به دست آوردن  $K_{sf}$  استفاده شده است. همچنین با استفاده از رابطه ۵ می‌توان مجموع کل مربعات مربوط به این مدل را محاسبه نمود؛ که در آن  $SS$  (مجموع مربعات)،  $y_i$  و  $\bar{y}_i$  به ترتیب مقادیر به‌دست‌آمده و پیش‌بینی شده متغیرهای وابسته هستند.

$$H(t) = \frac{H_s}{1 + \left\{ \frac{H_s}{H_0} - 1 \right\} e^{-K_{sft}}} \quad (4)$$

$$SS = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2 \quad (5)$$

جهت اطمینان از ایجاد پیوند هیدروژنی بین گروه‌های هیدروکسیل ذرات نانو سیلیس با گروه‌های هیدروکسیل آرد چوب از طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز استفاده گردید. برای این منظور از دستگاه طیف‌سنجی مادون قرمز، مدل TENSOR 27 ساخت کارخانه BRUKER آلمان

جذب آب و واکنشیدگی ضخامت طولانی مدت مطابق با استاندارد ASTM D 7031-04 [۱۶] انجام گردید. نمونه‌های آزمونی به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند و سپس وزن و ضخامت نمونه‌ها توسط ترازو با دقت ۰/۰۰۱ گرم و میکرومتر با دقت ۰/۰۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. نمونه‌ها در داخل آب با دمای آزمایشگاه قرار گرفتند و در ساعات موردنظر از داخل آب خارج شدند و وزن و ضخامت آن‌ها مجدداً اندازه‌گیری شد. این کار تا جایی ادامه پیدا کرد که نمونه‌ها کاملاً از آب اشباع‌شده بودند و تغییری در وزن آن‌ها مشاهده نشد؛ و در نهایت میزان جذب آب و واکنشیدگی ضخامت با استفاده از روابط مربوطه برای هر ساعت محاسبه گردید. از هر تیمار ۵ نمونه به ابعاد  $8.0 \times 1.0 \times 4$  میلی‌متر در نظر گرفته شد. ضریب انتشار رطوبت با استفاده از قانون فیک [۱، ۳] و نرخ واکنشیدگی ضخامت با استفاده از یک مدل ریاضی محاسبه گردید [۱۷].

از دیدگاه نظری ضریب انتشار رطوبت با شیب منحنی جذب آب و با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می‌شود؛ که در آن  $M_t$  جذب آب در زمان  $t$ ،  $M_{sat}$  میزان رطوبت اشباع،  $K$  و  $n$  نیز ضریب‌های ثابت هستند. برای محاسبه ضریب انتشار رطوبت، ابتدا باید مشخص نمود که رفتار جذب آب طولانی مدت فرآورده مرکب مطابق با نظریه فیک باشد. برای این منظور می‌توان از رابطه ۲ که لگاریتم رابطه ۱ است بهره گرفت. اگر نمودار لگاریتم زمان در برابر لگاریتم نسبت جذب آب در زمان موردنظر به بیشینه جذب آب رسم شود، ضریب  $X$  که از معادله رگرسیون آن حاصل می‌شود مقدار  $n$  خواهد بود. اگر مقدار  $n$  در این رابطه کمتر از ۰/۵ باشد نشان‌دهنده پیروی رفتار جذب آب ماده مرکب با نظریه فیک است. پس از اطمینان از پیروی رفتار جذب آب طولانی مدت فرآورده مرکب از قانون فیک، می‌توان ضریب انتشار رطوبت را محاسبه نمود. با استفاده از رابطه ۳ می‌توان ضریب انتشار رطوبت را محاسبه نمود؛ که در اینجا  $L$  ضخامت نمونه برحسب متر و  $D$  ضریب انتشار رطوبت برحسب مترمربع بر ثانیه است. با بهره‌گیری از این رابطه و با استفاده از شیب قسمت خطی منحنی

## نتایج و بحث

## جذب آب و واکنشیدگی ضخامت طولانی مدت

نتایج تجزیه و تحلیل آماری نتایج مربوط به جذب آب و واکنشیدگی ضخامت در آخرین ساعت غوطه‌وری نشان داد که در بین سطوح مختلف نانو سیلیس اختلاف معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۹ درصد وجود دارد (جدول ۲). گروه‌بندی دانکن نیز سطوح مختلف مقادیر میانگین‌ها را برای جذب آب در ۲ گروه و برای واکنشیدگی ضخامت در چهار گروه مجزا قرار داده است. به طوری که برای جذب آب، تیمار حاوی ۵ درصد نانو سیلیس در گروه اول و باقی تیمارها در گروه دوم و برای واکنشیدگی ضخامت، تیمار حاوی ۵ درصد نانو سیلیس در گروه اول و باقی تیمارها به ترتیب در گروه‌های دوم تا چهارم قرار گرفتند.

واقع در دانشگاه زابل (آزمایشگاه علوم پایه) استفاده گردید. ابتدا پودر گرانول تهیه شده با ماده برمید پتاسیم به نسبت ۱ به ۴ مخلوط و به وسیله پرس دستی فشرده شد. سپس دیسک تولید شده در داخل سلول دستگاه تحت تابش اشعه مادون قرمز در دامنه ۴۰۰ تا  $4000 \text{ cm}^{-1}$  قرار گرفت. در نهایت تجزیه و تحلیل طیف‌سنجی از طریق شدت طیف و جذب در نواحی مختلف انجام شد.

برای تجزیه و تحلیل آماری نتایج از نرم‌افزار SPSS و طرح آماری آنالیز یک‌طرفه استفاده شد و در صورت وجود تفاوت معنی‌دار بین سطوح از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح اطمینان ۹۵ درصد جهت مقایسه میانگین‌ها استفاده شد. جهت رسم نمودارها از نرم‌افزار excel استفاده گردید.

جدول ۲- جدول تجزیه واریانس برای جذب آب و واکنشیدگی ضخامت در آخرین ساعت غوطه‌وری

آزمون	آزمون	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	سطح معنی‌داری
جذب آب	تیمار	۱۴/۱۶۱	۳	۴/۷۲۰	۱۰/۸۵۱	** /۰۰۰۰
	خطا	۶/۹۶۱	۱۶	۰/۴۳۵		
	کل	۲۱/۱۲۲	۱۹			
واکنشیدگی ضخامت	تیمار	۲۲/۵۵۷	۳	۷/۵۱۹	۵۱۱/۳۲۱	** /۰۰۰۰
	خطا	۰/۲۳۵	۱۶	۰/۰۱۵		
	کل	۲۲/۷۹۲	۱۹			

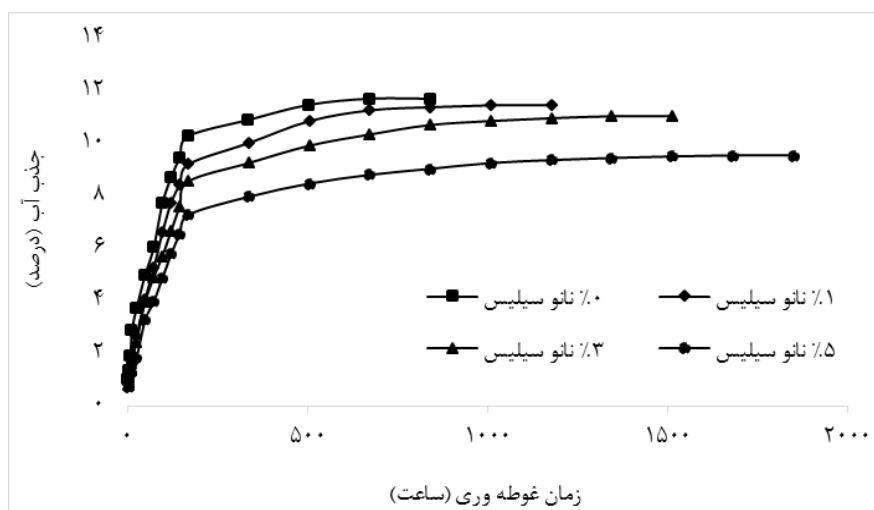
\*\* معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۹ درصد

به حداکثر جذب آب (۱۱/۰۳ درصد) و حداکثر واکنشیدگی ضخامت (۲/۹۱ درصد) و در نهایت نانو کامپوزیت حاوی ۵ درصد سیلیس، در زمان ۱۶۸۰ ساعت به حداکثر جذب آب (۹/۵۲ درصد) و حداکثر واکنشیدگی ضخامت (۲/۱۱ درصد) رسیده است. مشاهده می‌شود که با افزایش نانو ذرات تغییر فاحشی در مقدار جذب آب و واکنشیدگی ضخامت نانو کامپوزیت چوب پلاستیک رخ نمی‌دهد ولی در هر صورت این تغییر از لحاظ آماری معنی‌دار است، اما سرعت رسیدن به جذب آب و واکنشیدگی ضخامت با افزایش نانو سیلیس کاهش یافت. به عبارت دیگر می‌توان گفت که با افزایش نانو سیلیس، زمان رسیدن به شرایط اشباع طولانی‌تر گشته است. از سوی دیگر، سرعت جذب آب و واکنشیدگی ضخامت در ساعات اولیه غوطه‌وری بسیار

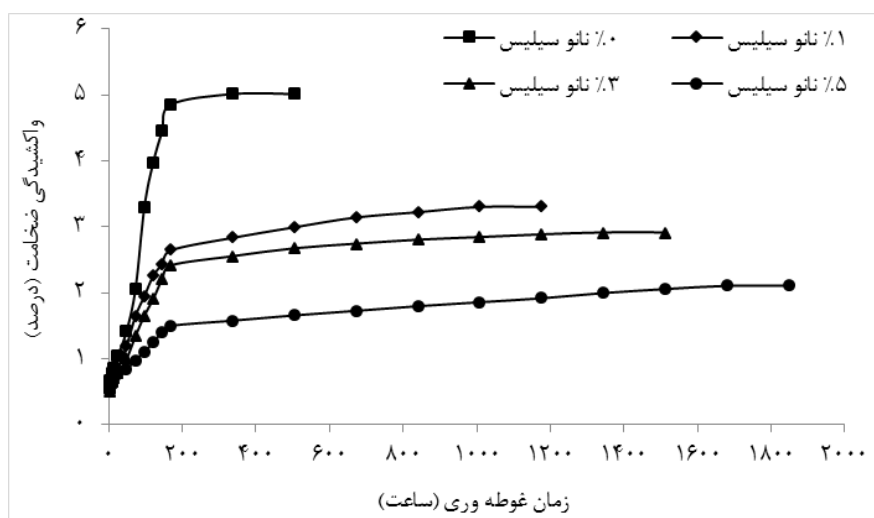
تأثیر نانو ذرات سیلیس بر روی جذب آب و واکنشیدگی ضخامت طولانی‌مدت طی ۱۸۴۸ ساعت غوطه‌وری در آب نانو کامپوزیت چوب پلاستیک در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش نانو ذرات سیلیس در ترکیب نانو کامپوزیت جذب آب و واکنشیدگی ضخامت کاهش می‌یابد. کامپوزیت فاقد نانو سیلیس در زمان ۶۷۲ ساعت به حداکثر جذب آب خود یعنی ۱۱/۶۸ درصد و در زمان ۳۳۶ ساعت به حداکثر واکنشیدگی ضخامت یعنی ۵/۰۲ درصد رسیده است. نانو کامپوزیت حاوی ۱ درصد سیلیس، در زمان ۱۰۰۸ ساعت به حداکثر جذب رطوبت (۱۱/۴۵ درصد) و حداکثر واکنشیدگی ضخامت (۳/۳۱ درصد)، نانو کامپوزیت حاوی ۳ درصد سیلیس، در زمان ۱۳۴۴ ساعت

سرعت جذب آب و واکنشیدگی ضخامت کاسته شد و در نهایت به یک مقدار ثابت رسید.

زیاد بود و بیش از ۶۰ درصد جذب آب و واکنشیدگی ضخامت نهایی نانو کامپوزیت‌ها در ۱۰۰ ساعت اولیه غوطه‌وری اتفاق افتاد؛ اما با افزایش زمان غوطه‌وری از



شکل ۱- تأثیر نانو ذرات سیلیس بر روی جذب آب طولانی مدت نانو کامپوزیت چوب پلاستیک



شکل ۲- تأثیر نانو ذرات سیلیس بر روی واکنشیدگی ضخامت طولانی مدت نانو کامپوزیت چوب پلاستیک

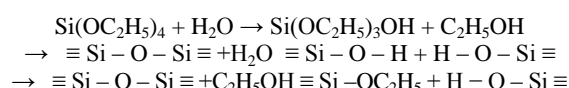
باشند؛ اما همان‌طور که در نتایج مشخص گردید، با افزایش نانو ذرات سیلیس جذب آب و واکنشیدگی ضخامت در نانو کامپوزیت چوب پلاستیک به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. دلیل این امر این است که ذرات نانو سیلیس باعث تشکیل پیوند هیدروژنی با گروه‌های هیدروکسیل آرد چوب می‌شود (شکل ۳) و در این حالت گروه‌های

از نظر شیمیایی، سطح نانو ذرات سیلیس دارای گروه‌های شیمیایی هیدروکسی، هیدروژن متصل به گروه‌های هیدروکسی و گروه‌های سیلوکسان است (رابطه ۶). دو ترکیب اول آب‌دوست، اما گروه‌های سیلوکسان آب‌گریز هستند [۱۸، ۱۹]؛ بنابراین باید انتظار داشت که نانو ذرات سیلیس دارای خاصیت قطبی و آب‌دوست

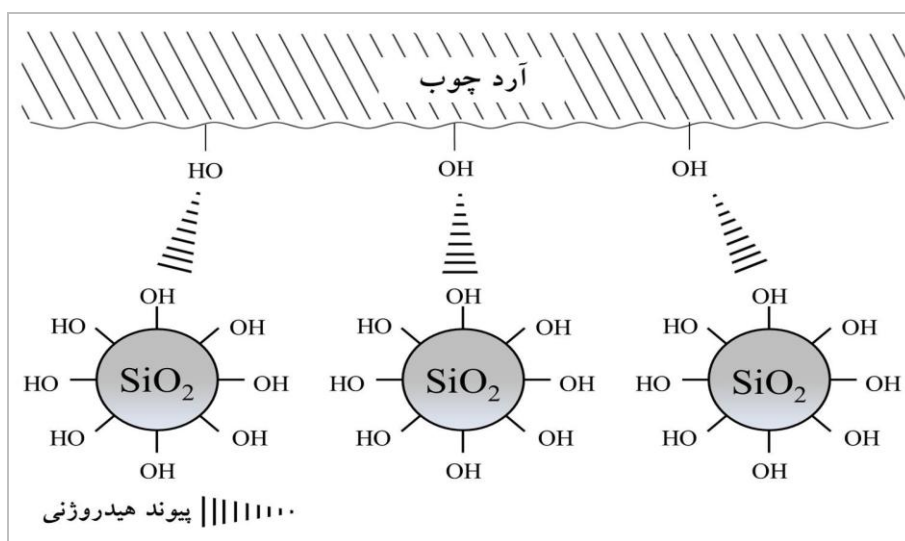
باید به آن اشاره کرد این است که فرآیندهای انتشار رطوبت به داخل فرآورده‌های مرکب چوبی از سه مکانیسم عمده ناشی می‌شود: انتشار مولکول‌های آب از طریق گروه‌های هیدروکسیل مواد لیگنوسلولوزی، انتشار مولکول‌های آب درون شکاف‌های نانومتری بین زنجیره‌های پلیمری و در نهایت انتشار مولکول‌های آب از طریق لوله‌های موئین موجود در بین اجزای تشکیل‌دهنده فرآورده‌های مرکب [۲۳، ۲۲]. نانو سیلیس از یک سو با تشکیل پیوند هیدروژنی با گروه‌های هیدروکسیل آرد چوب و از سوی دیگر با مسدود کردن تعداد زیادی از لوله‌های موئین موجود در کامپوزیت، باعث کاهش جذب آب می‌شود. مسدود شدن لوله‌های موئین کامپوزیت توسط نانو سیلیس، راه‌های نفوذ و دسترسی مولکول‌های آب به گروه‌های هیدروکسیل آرد چوب را مسدود کرده و به تبع آن واکنش‌دهی ضخامت در نانو کامپوزیت کاهش می‌یابد [۷، ۲۴].

هیدروکسیل در دسترس مولکول‌های آب برای تشکیل پیوند هیدروژنی کاهش می‌یابد. به بیان دیگر، نوعی رقابت بین گروه‌های هیدروکسیل آرد چوب و گروه‌های هیدروکسیل نانو سیلیس برای تشکیل پیوند هیدروژنی برقرار است. آرد چوب و نانو سیلیس از شانس مولکول‌های آب در این رقابت می‌کاهد [۲۰، ۲۱].

(۶)



اگرچه نانو ذرات سیلیس دارای خاصیت جذب رطوبت هستند اما در صورت تشکیل پیوند هیدروژنی بین نانو ذرات سیلیس و آرد چوب، گروه‌های هیدروکسیل هر دو ماده عملاً از دسترس و تماس با مولکول‌های آب خارج می‌شوند و جذب آب نانو کامپوزیت کاهش می‌یابد. نکته دیگری که



شکل ۳- نحوه برهمکنش گروه‌های آب دوست نانو سیلیس با گروه‌های هیدروکسیل آرد چوب

توانایی انتشار مولکول‌های آب را به درون ماده مرکب مشخص می‌کند [۱۷، ۲۵، ۲۶]. همخوانی داده‌های تجربی با ضریب انتشار رطوبت در نانو کامپوزیت‌های چوب پلاستیک در شکل ۴ نشان داده شده است. مطابق با شکل، مقدار  $n$  برای سطوح ۰، ۱، ۳ و ۵ درصد نانو سیلیس به ترتیب ۰/۲۶، ۰/۳، ۰/۳۸ و ۰/۴۶ است. با توجه به مقدار  $n$  که برای تمامی سطوح کمتر از ۰/۵ است، می‌توان دریافت

### ضریب انتشار رطوبت

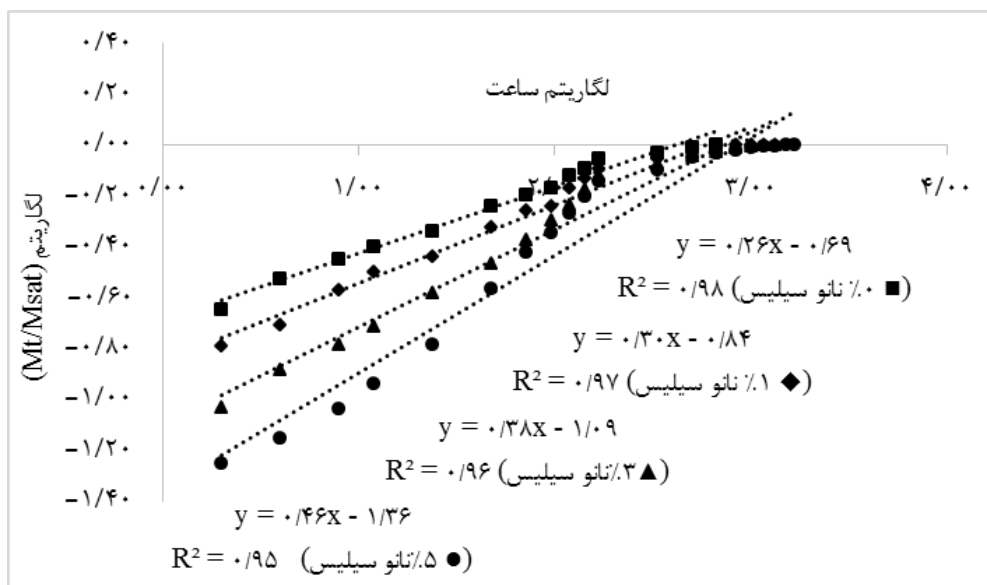
در رابطه با مطالعه رفتار جذب آب طولانی مدت فرآورده‌های مرکب چوبی، آنچه بیش از مقدار جذب آب حداکثر این فرآورده‌ها باید مورد توجه قرار گیرد، ضریب انتشار رطوبت است. ضریب انتشار رطوبت یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های مدل جذب آب طولانی مدت و مشخص نمودن سرعت جذب آب در فرآورده‌های مرکب است. این مدل



در نمونه‌های حاوی سیلیس شده است. همان‌طور که گفته شد تفاوت چندانی در بیشینه جذب آب کامپوزیت‌های حاوی و یا فاقد نانو سیلیس وجود ندارد، اما هر چه قدر به مقدار نانو سیلیس در ترکیب کامپوزیت افزوده می‌شود، سرعت جذب آب در آن فرآورده کاهش می‌یابد. این موضوعات را این‌گونه می‌توان تحلیل نمود که با افزایش مدت‌زمان غوطه‌وری نمونه‌ها در آب، آبشویی نانو ذرات سیلیس اضافی و واکنش نیافته اتفاق می‌افتد و همین عامل باعث شد تا تفاوت چندانی در جذب بیشینه نمونه‌های حاوی سیلیس و نمونه شاهد وجود نداشته باشد؛ اما مدت زمانی که طول می‌کشد تا نانو سیلیس اضافی از داخل کامپوزیت آبشویی شود باعث شد تا سرعت جذب آب کاهش یابد [۱۲].

که رفتار جذب آب در نانو کامپوزیت چوب پلاستیک از نظریه فیک تبعیت می‌کند. شکل ۵، نحوه محاسبه ضریب انتشار رطوبت در نانو کامپوزیت چوب پلاستیک را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش نانو سیلیس شیب منحنی نمودار تندتر شده و این موضوع پتانسیل نانو کامپوزیت حاوی سیلیس به جذب کمتر آب در زمان طولانی را نشان می‌دهد.

ضریب انتشار رطوبت برای سطوح مختلف نانو سیلیس در جدول ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که قابل مشاهده است، با افزایش نانو ذرات سیلیس ضریب انتشار رطوبت در نانو کامپوزیت چوب پلاستیک کاهش می‌یابد. به‌نوعی می‌توان گفت که نانو سیلیس سرعت جذب آب در نانو کامپوزیت چوب پلاستیک را کاهش داده است و همین موضوع باعث کاهش ضریب انتشار رطوبت

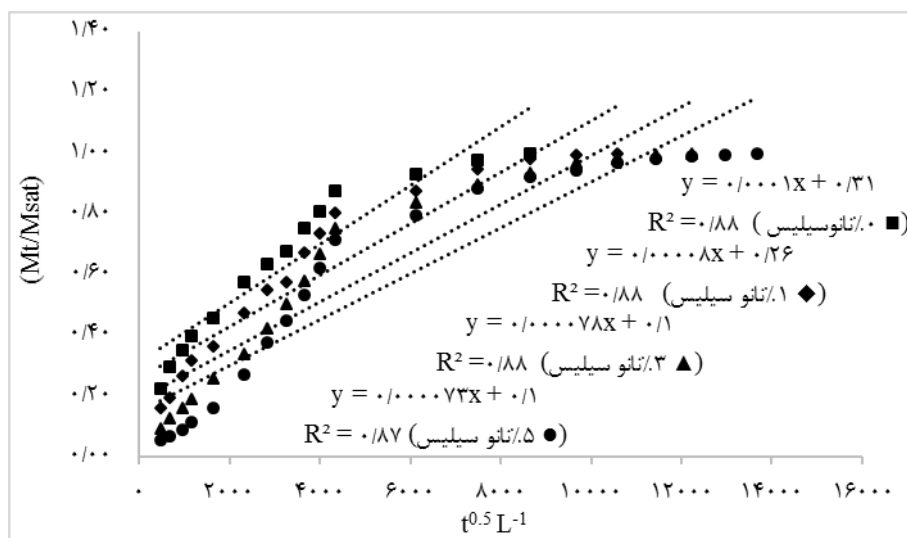


شکل ۴- همخوانی داده‌های تجربی با نظریه انتشار رطوبت در سطوح مختلف نانو سیلیس

جدول ۳- ضریب انتشار رطوبت و مشخصه‌های آن برای سطوح مختلف نانو سیلیس

ضریب انتشار رطوبت ( $m^2/s$ )	بیشینه جذب آب (%)	زمان رسیدن به نقطه اشباع (ساعت)	مقدار $n$	سطوح نانو سیلیس (%)
$1/96 \times 10^{-9}$	۱۱/۶۸	۶۷۲	۰/۲۶	۰
$1/۲۵ \times 10^{-9}$	۱۱/۴۵	۱۰۰۸	۰/۳	۱
$1/۱۹ \times 10^{-9}$	۱۱/۰۳	۱۳۴۴	۰/۳۸	۳
$1/۰۴ \times 10^{-9}$	۹/۵۲	۱۶۸۰	۰/۴۶	۵





شکل ۵- نحوه محاسبه ضریب انتشار رطوبت در نانو کامپوزیت چوب پلاستیک

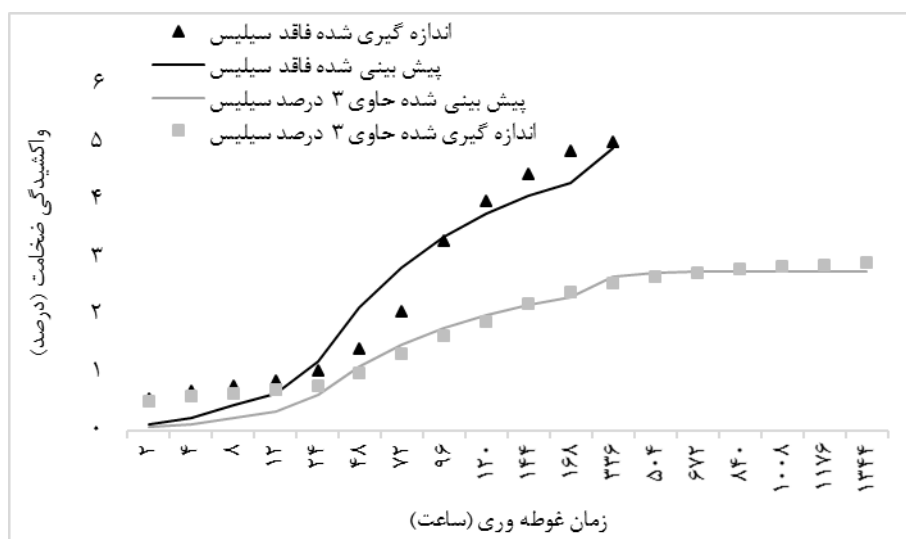
ضخامت پیش‌بینی‌شده و مقدار واکسیدگی ضخامت محاسبه‌شده اختلاف کمی وجود دارد، یا به عبارت دیگر خطای اندازه‌گیری آزمون واکسیدگی ضخامت در صورت کم بودن فاکتور SS در حداقل ممکن خواهد بود [۱۷]؛ بنابراین نانو کامپوزیت حاوی ۳ درصد نانو سیلیس دارای کمترین خطای اندازه‌گیری است و مقادیر پیش‌بینی‌شده در آن با مقادیر اندازه‌گیری شده اختلاف چندانی ندارند. شکل ۶، اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و اندازه‌گیری شده برای سطوح ۳ درصد نانو سیلیس (کمترین مقدار SS) و نمونه فاقد سیلیس (بیشترین مقدار SS) را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، اختلاف بسیار اندکی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر پیش‌بینی‌شده در سطح ۳ درصد نانو سیلیس مشاهده می‌شود، اما این اختلاف برای کامپوزیت فاقد سیلیس بسیار فاحش است.

#### نرخ واکسیدگی ضخامت

نرخ واکسیدگی ضخامت به همراه مشخصه‌های مربوط به آن در جدول ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش نانو سیلیس میزان نرخ واکسیدگی ضخامت ( $K_{sf}$ ) کاهش می‌یابد. کم بودن نرخ واکسیدگی ضخامت بیانگر این موضوع است که سرعت واکسیدگی ضخامت در کامپوزیت چوب پلاستیک کم است [۲۶، ۲۷، ۲۸، ۲۹]؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش نانو سیلیس، نمونه‌ها بسیار دیرتر به نقطه تعادل واکسیدگی ضخامت می‌رسند. در جدول ۴ همچنین میزان SS مشاهده می‌شود که با افزایش نانو سیلیس تا ۳ درصد میزان این کمیت کاهش و سپس با افزودن نانو سیلیس تا ۵ درصد این کمیت افزایش می‌یابد. مطابق با تحقیقات پژوهشگران، هر چه میزان این پارامتر کم باشد نشان‌دهنده این مطلب است که بین مقدار واکسیدگی

جدول ۴- نرخ واکسیدگی ضخامت به همراه مشخصه‌های مربوط به آن برای سطوح مختلف نانو سیلیس

نانو سیلیس (phc)	واکسیدگی ضخامت (%)	ضخامت اولیه (mm)	ضخامت نهایی (mm)	$K_{sf} \times 10^{-3} (h^{-1})$	ss
۰	۵/۰۲	۴	۴/۲۰۰	۱۲	۲/۲
۱	۳/۳۱	۴	۴/۱۳۲	۱۰	۰/۹۶
۳	۲/۹۱	۴	۴/۱۱۶	۱۱	۰/۹۱
۵	۲/۱۱	۴	۴/۰۸۴	۱۰	۱/۴۳

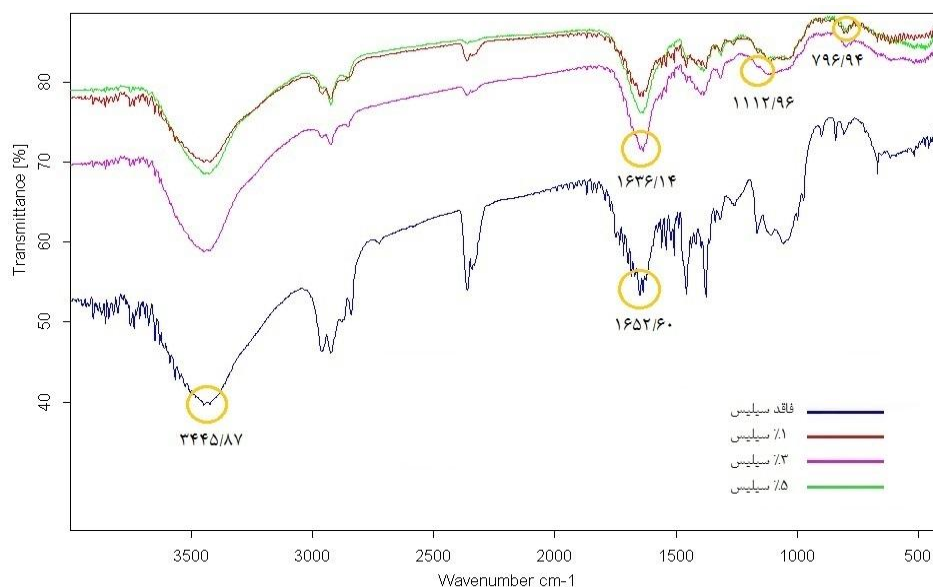


شکل ۶- اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده در آزمون واکنش‌دهی ضخامت طولانی مدت

این امر نیز می‌تواند ناشی از واکنش گروه‌های هیدروکسیل آرد چوب با ذرات سیلیس باشد که باعث کاهش گروه‌های هیدروکسیل در دسترس در هر دو ماده می‌شود. طیف‌سنجی مربوط به کامپوزیت فاقد سیلیس نشان می‌دهد که پیک موجود در ناحیه  $2922\text{ cm}^{-1}$  مربوط به مد نامتقارن  $\text{CH}_2$  کششی و ارتعاشات کششی C-H است. پیک موجود در باند جذبی  $2360\text{ cm}^{-1}$  مربوط به گروه‌های آروماتیک C=C و در نهایت پیکی که در باند جذبی  $1376\text{ cm}^{-1}$  موجود است مربوط به خمش C-H در سلولز و تغییر شکل C-H در لیگنین است. در نانو کامپوزیت‌های حاوی ۱ و ۳ درصد سیلیس پیک جدیدی در باندهای جذبی  $1110\text{ cm}^{-1}$  و  $1112\text{ cm}^{-1}$  تشکیل شده است که انتظار می‌رود این پیک‌ها مربوط به پیوندهای Si-O-Si گروه‌های سیلوکسان نانو سیلیس با C-O سلولز باشد [۳۰، ۳۲، ۳۳]. همچنین در نانو کامپوزیت حاوی ۵ درصد نانو سیلیس نیز پیک جدیدی در ناحیه  $796\text{ cm}^{-1}$  به وجود آمده است که به نظر می‌رسد این پیک مربوط به ارتعاش کششی برهمکنش پیوندهای Si-O-Si گروه‌های سیلوکسان است [۸].

#### طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز

نتایج طیف‌سنجی نانو کامپوزیت‌های حاوی سطوح مختلف سیلیس در شکل ۷ نشان داده شده است. در طیف‌سنجی مربوط به کامپوزیت فاقد سیلیس، پیک موجود در باند  $3445\text{ cm}^{-1}$  مربوط به ارتعاش کششی گروه هیدروکسیل است [۳]. این باند در نمونه حاوی ۱ درصد نانو سیلیس در ناحیه  $3421\text{ cm}^{-1}$ ، در نمونه حاوی ۳ درصد نانو سیلیس در ناحیه  $3444\text{ cm}^{-1}$  و در نمونه حاوی ۵ درصد نانو سیلیس در ناحیه  $3442\text{ cm}^{-1}$  مشاهده می‌شود. بر اساس شکل، پهنای پیک موجود در باند جذبی  $3445\text{ cm}^{-1}$  در نمونه فاقد سیلیس، در اثر افزودن نانو سیلیس مقداری کاهش یافته است که دلالت بر واکنش گروه‌های هیدروکسیل در دسترس دارد [۳۰]. شدت جذب پیک موجود در باند جذبی  $1652\text{ cm}^{-1}$  در کامپوزیت فاقد نانو سیلیس که مربوط به گروه‌های هیدروکسیل (OH) خمشی موجود بر روی آرد چوب است [۳۱]، پس از افزودن نانو سیلیس در نانو کامپوزیت‌های حاوی ۱، ۳ و ۵ درصد نانو سیلیس در باند  $1636\text{ cm}^{-1}$  مشاهده می‌شود که به مقدار فراوانی کاهش یافته است.



شکل ۷- طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز

واکسیدگی ضخامت در نانو کامپوزیت چوب پلاستیک کاهش یافت. از طرفی کمترین اختلاف بین داده‌های تجربی و مقادیر پیش‌بینی‌شده در آزمون واکسیدگی ضخامت، مربوط به نانو کامپوزیت حاوی ۳ درصد نانو سیلیس و بیشترین میزان این اختلاف در کامپوزیت فاقد سیلیس بود. نتایج طیف‌سنجی مادون قرمز نیز حاکی از وجود پیوند هیدروژنی بین نانو سیلیس و آرد چوب بود.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر نانو سیلیس بر جذب آب و واکسیدگی ضخامت طولانی‌مدت، ضریب انتشار رطوبت و نرخ واکسیدگی ضخامت کامپوزیت چوب پلاستیک مورد بررسی قرار گرفت، نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش نانو ذرات سیلیس، جذب آب و واکسیدگی ضخامت طولانی‌مدت، ضریب انتشار رطوبت و نرخ

### منابع

- [1] Espert, A., Vilaplana, F. and Karlsson S., 2004. Comparison of Water Absorption in Natural Cellulosic Fibers from Wood and one-year Crops in Polypropylene Composites and its Influence on their Mechanical Properties. *Journal of Composites Part A*, 35: 1267-1276.
- [2] Roohani, M., Kord, B., Motie, N. and Sharari, M., 2014. Biodegradation behaviors of cellulose nanocrystals --PVA nanocomposites. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 5 (2): 1-13.
- [3] Kord, B. and Taghizadeh Haratbar, D., 2014. Influence of fiber surface treatment on the physical and mechanical properties of wood flour-reinforced polypropylene bionanocomposites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, DOI: 10.1177/0892705714551592.
- [4] Ghasemi, I. and Kord, B., 2009. Long-term Water Absorption Behaviour of Polypropylene/Wood Flour/Organoclay Hybrid Nanocomposite. *Iranian Polymer Journal*, 18 (9): 683-691.
- [5] George, J., Sreekala, M.S. and Thomas, S., 2001. A review on interface modification and characterization of natural fiber reinforced plastic composites. *Polymer Engineering and Science*. 41 (9):1471-1485.

- [6] Pothan, L.A. and Thomas, S., 2004. Effect of Hybridation and Chemical Modification on the Water-absorption Behavior of Banana Fiber-reinforced Polyester Composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 91: 3856-3865.
- [7] Ismaeilimoghadam, S. Shamsian, M. Bayat Kashkoli, A. and Kord, B., 2015. Evaluation of effect of Nano SiO<sub>2</sub> on the physical, mechanical and morphological properties of hybrid Nano composite from polypropylene-wood flour. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 30 (2): 266-277.
- [8] Parvinzadeh Gashti, M., Moradian, S., Rashidi, A. and Yazdanshenas, M.E., 2012. Effect of Nanosilica Type on Properties of Polyethylene Terephthalane/Silica Nanocomposite. *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, 25 (3):203-219.
- [9] Shao, L., Mu, C., Huang, Y., Ding, S., Li, X., Bai, Y. and Huang, Y., 2011. Enhancement of Ink-receiving Properties of SiO<sub>2</sub>/PVA Composite Films by Using Rare Earth-modified SiO<sub>2</sub> Particles. *Iranian Polymer Journal*, 20 (12):955-967.
- [10] Khademian, M., Eisazadeh, H., Ghorbani, M. and Shakeri, A., 2015. Colloidal Preparation of Polyaniline-Poly (vinyl alcohol) -SiO<sub>2</sub> Nanocomposite and Study of its Anti-corrosive Properties. *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, 28 (1): 39-46.
- [11] Ismaeilimoghadam, S. Shamsian, M. Bayat Kashkoli, A. and Kord, B., 2014. Effect of type and percentage of SiO<sub>2</sub> material on the long-term water absorption and thickness swelling of polypropylene-wood flour composite. The second national conference on new technologies in the wood and paper industry, 22 and 23, October, 10, Chaloo, Iran, 152.
- [12] Hossienzadeh, S., Ghorbani, M. and Bearva, P., 2014. Effect of colloidal silica nanoparticles produced from rice husk on dimensional stability and water absorption of poplar wood (*Populus deltoides*). *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 28 (4): 763-773.
- [13] Asgary, A.R., Sepidehdam, M.J. and Latibari, A.J., 2012. Investigation on the impact of multi wall carbon nano tubes (MWCNT) addition on the mechanical properties, water absorption and thickness swelling of polypropylene/old corrugated container fibers composite. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 27 (3): 522-535.
- [14] American Society for Testing and Materials. ASTM., 2012. Standard practice for injection molding test specimens of thermoplastic molding and materials. ASTM D3641-12. Annual book of ASTM standards. Philadelphia.
- [15] American Society for Testing and Materials. ASTM., 2013. Standard practice for conditioning plastics for testing. ASTM D618-13. For testing. ASTM D618-13. Annual book of ASTM standards. Philadelphia.
- [16] American Society for Testing and Materials. ASTM. 2011. Standard guide for evaluating mechanical and physical properties of wood-plastic composite products. Annual book of ASTM standards. Philadelphia. ASTM D7031-04.
- [17] Najafi, A. and Khademi-Eslam, H., 2011, Lignocellulosic filler/recycled HDPE composites: effect of filler type on physical and flexural properties. *Bioresources*, 6(3):2411-2424.
- [18] Xanthos, M., 2005. Functional fillers for plantics. Wiley, Weinheim.
- [19] Quercia, G., Spiesz, P., Husken, G. and Brouwers, J., 2012. Effects of Amorphous Nano silica addition on mechanical and durability performance of scc mixture. *International congress on durability of concrete*, 8-12.
- [20] Roohani, M., Habibi, Y., Belgacem, N. M., Ebrahim, G., Karimi, A. N. and Dufresne, A., 2008. Cellulose whiskers reinforced polyvinyl alcohol copolymers nanocomposites. *European Polymer Journal*, 44(8):2489-2498.
- [21] Kord, B., Jari, E., Najafi, A. and Tazakorrezai, V., 2014. Effect of Nano clay on the Decay Resistance and Physico-Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Plastic Composites against White-rot Fungi (*Trametes Versicolor*). *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, DOI: 0892705714563343.
- [22] Md Akil, H., Cheng, L. W., Mohd Ishak, Z. A., Abu Bakar, A. and Abd Rahman, M. A., 2009. Water absorption study on pultruded jute fibre reinforced unsaturated polyester composites. *Composite Science and Technology*, 69(11-12):1942-1948.

- [23] Dhakal, H., Zhang, Z. and Richardson, M., 2007. Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites. *Composite Science and Technology*, 67(7-8): 1674-1683.
- [24] Ismaeilimoghadam, S., 2014. Effect of Chemical Modification of Wood Flour on the Properties of Polypropylene- Nano SiO<sub>2</sub> Hybrid Nano Composite. Master thesis Wood and Paper Science and Technology, Zabol University, pp 201.
- [25] Najafi, A., 2010. Effect of Immersion Temperature on Long-term Water Uptake Behavior of HDPE/Wood sawdust Composite. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 1(1): 37-44.
- [26] Kazemi, S., Kiaeifar, A., Tajvidi, M. and Hamidinia, E., 2007. Water Absorption Behavior and Thickness Swelling Rate of Composites from Sawdust and Recycled Plastics. *Journal of Reinforced Plastic and Composites* 26(3): 341-348.
- [27] Kazemi, S., Kiaeifar, A., Tajvidi, M. and Hamidinia, E., 2007. Hygroscopic Thickness Swelling Rate of Composites from Sawdust and Recycled Plastics. *Journal of Wood Science and Technology*, 42:161-168.
- [28]. Shi, QS. And Gardner, D.J., 2006. Hygroscopic Thickness Swelling Rate of Compression Molded Wood fiber and Wood fiber/Polymer Composite, *Journal of Composites Part A*, 37: 1276-1285.
- [29] Yang, H.S., Kim, H.J., Park, H.J., Lee, B.J. and Hawang, T.S., 2006. Water Absorption Behavior and Mechanical Properties of Lignocellulosic Filler-Polyolefin Bio-composites. *Journal of Composite Structures*, 72: 429-437.
- [30] Kalagar, M., Baziyar, B., Khademi eslam, H., Ghasmi, E. and Hemmasi, A.H., 2015. The investigation on composites produced using polylactic acid/wheat straw fibers treated with silane. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 30(2): 207-219.
- [31] Esteves, B., Velez Marques, A., Domingos, I. and Pereira, H., 2013. Chemical changes of heat treated pine and eucalypt wood monitored by FTIR. *Maderas, Cienc. Tecnol*, 15(2): 245-258.
- [32] Farhadyar, N., Rahimi, A. and Ershad-Langroudi, A., 2005. Synthesis and Characterization of Organic-Inorganic Hybrid Nano- Composite based on Tetramethoxysilane and Epoxy Resin by Sol-Gel Method, *Journal of Polymer Science and Technology*, 18: 19-27.
- [33] Rabiee, A., Ershad Langroudi, A., Jamshidi, H. and Gilani, M., 2013. Preparation and Characterization of Hybrid Nanocomposite of Polyacrylamide/Silica-Nanoparticles, *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, 25(5): 405-414.

## Long-term water absorption and thickness swelling and determination of their characteristics in wood flour/polypropylene/Nano SiO<sub>2</sub> nanocomposite

### Abstract

The objective of this study was to investigate the effect of nano SiO<sub>2</sub> on long-term water absorption and thickness swelling, humidity coefficient diffusion and thickness swelling rate of wood plastic composite. For this purpose, 60% wood flour, 40% polypropylene, 2 per hundred compounds (phc) MAPP were mixed in an internal mixer (HAAKE). Nano SiO<sub>2</sub> with 0, 1, 3 and 5 (phc) ratios as a reinforcing agent was also used. Finally, test samples were fabricated by using the injection molding machine. Then, long-term water absorption and thickness swelling of samples were measured after 1848 hours according to the ASTM standard. Humidity coefficient diffusion and thickness swelling rate were also calculated for a closer look at long-term water absorption and thickness swelling behavior in wood plastic nanocomposite. To ensure the formation of hydrogen bonds between hydroxyl groups of SiO<sub>2</sub> nanoparticles with hydroxyl group of wood flour, Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy tests was used. The results showed that water absorption behavior of nanocomposite is according to Fick's law. In addition, with an increase in SiO<sub>2</sub> nanoparticles, long-term water absorption, thickness swelling and humidity coefficient diffusion decreased in wood plastic nanocomposite. The results of infrared spectroscopy confirmed the hydrogen bond between the nano SiO<sub>2</sub> and wood flour. Statistical analysis showed that after 1848 hours of immersion, nano SiO<sub>2</sub> had a significant effect on water absorption and thickness swelling at a confidence level of 99%, so the sample with 5% silica nanoparticles was chosen as the best treatment.

**Key words:** humidity coefficient diffusion, thickness swelling rate, nano SiO<sub>2</sub>, infrared spectroscopy, long-term water absorption.

S. Ismaeilimoghadm<sup>1\*</sup>  
A. Najafi<sup>2</sup>  
A. Shahraki<sup>1</sup>  
B. Malekian<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Young Researchers and Elite Club, Chalous Branch, Islamic Azad University, Chalous, Iran

<sup>2</sup>Department of wood and paper science and technology; Islamic Azad University, chalous branch. Iran

Corresponding author:  
[saeed.am17358@gmail.com](mailto:saeed.am17358@gmail.com)

Received: 2015/07/16  
Accepted: 2015/12/20