

مانزد بهمتن سمينار ملی مهندسی سطح

پژوهشگاه مواد و انرژی ۲۹ و ۳۰ مهرماه ۱۳۹۳

## سنتز و شناسایی پوششهای شفاف و فوق آبگریز سیلیکا بر روی شیشه به روش سل-ژل

مائده رمضانی'، محمد رضا واعظی'، اصغر کاظم زاده '

<sup>۱</sup>. پژوهشکده نانو تکنولوژی و مواد پیشرفته، پژوهشگاه مواد وانرژی (دانشجوی دکترا، دانشیار) ۲. پژوهشکده نیمه هادیها، پژوهشگاه مواد وانرژی (دانشیار)

چکیدہ

در این تحقیق، لایه های سیلیکای فوق آبگریز بر روی بستر شیشه ای به روش غوطه وری از طریق فر آیند سل - ژل سنتز شدند. به همین منظور از اتیل تری اتو کسی سیلان (ETES) به عنوان پیش ماده و ایزواکتیل تری متو کسی سیلان (Iso-OTMS) به عنوان عامل اصلاح کننده سطح سیلیکا استفاده شد. در مرحله اول، نسبت مولی پیش ماده غوطه ور شدند و سپس، لایه های سیلیکا در غلظت های مختلفی از عامل آبگریز در حلال هگزان (۲/۵ تا پیش ماده غوطه ور شدند و سپس، لایه های سیلیکا در غلظت های مختلفی از عامل آبگریز در حلال هگزان (۲/۵ تا ایش ماده غوطه ور شدند و سپس، لایه های سیلیکا در غلظت های مختلفی از عامل آبگریز در حلال هگزان (۲/۵ تا لایه های سیلیکا توسط میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)، میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM)، طیف سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (AFM)، میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی اسپکتروفتومتر (FE-SEM) شناسایی شدند. تصاویر لایه سیلیکا، قبل و بعد از اصلاح سطح نشان دادند که اندازه درات سیلیکا به تر تیب MM

**واژدهای کلیدی:** سطوح فوق آبگریز؛ لایه سیلیکا؛ روش سل-ژل؛ زاویه تماس.

<sup>.</sup> M.ramezani@merc.ac.ir

مقدمه

مطالعات بر روی خواص تر شوندگی سطوح جامد در هر یک از زمینه های علمی و صنعتی بسیار حائز اهمیت مي باشند [۱ و ۲]. در سال هاي اخير، سنتز سطوح جامد ضد آب بهدليل كاربر دهاي فر اوان در صنعت از جمله يوشش هاي خود تميز شونده، ضد خوردگي، بايو تکنولوژي، يوشش هايي با اصطحکاک يايين و همچنين سیستمهای حمل دارو مورد توجه محققین قرار گرفتهاند [۳]. یدیدهٔ فوق آبگریزی در زمینههای شیمی کلوئیدی و سطح بسیار مورد توجه میباشد. سطح فوق آبگریز به عنوان سطحی که زاویه تماس فطرهٔ آب، بالاتر از °۱۵۰ و زاویه لغزندگی <sup>۲</sup> کمتر از ۱۰<sup>°</sup> دارد تعریف می شود. به عبارت دیگر، قطرهٔ آب بر روی سطوح فوق آبگریز تقريباً کروی است و به آسانی سر میخورد. به همین دلیل، انتظار میرود تا یوششهای فوق آبگریز در زمینههای گوناگونی همچون اتومبیلها، ینجرهها، لباسها، ساختمانها و رنگها کاربرد فراوانی داشته باشند (۴ و ۵]. متداول ترین اصل برای سطح خود تمیز شوندهٔ فوق آبگریز، اثر لو توس می باشد که بوسیلهٔ زبری سطح القا. مي شود. به منظور دستيابي به سطوح فوق آبگريز، يک سطح بايد داراي دو ويژگي فيزيکي شامل؛ زبري سطح و انرژی سطحی پایین باشد. اگرچه انرژی سطح یکی از مهمترین عواملی است که خاصیت ترشوندگی را تعیین مي كند، اما دستيابي به سطوح فوق آبگريز، تنها با كاهش دادن انرژي سطح امكان پـذير نيسـت. در سطوح فـوق آبگریز، زبری سطح نیز نقش مهمی را ایفا می کند، زیرا با به دام انداختن آ هوا، آبگزیری سطح به طور مؤثری تقويت مي شود [8]. اور گانوسيلان ها به عنوان عوامل مزدوج كننده ، در كامپوزيت ها و پوشش ها كاربرد فراوان دارند. تری آلکو کسی سیلان های عامل دار، ۳ (R'Si(OR از جمله موادی هستند که در صنایع مختلف به منظور افزایش چسبندگی مابین بسترهای آلی و معدنی بکار میروند [۷ و۸]. مولکول اور گانوسیلان دو عنصر اصلی دارد: بخش آلي غير قابل هيدروليز (R) كه اين بخش مي تواند با ديگر مواد شيميايي نيز واكنش يذير باشد و بخش دیگر، گروههای آلکو کسی قابل هیدرولیز (OR). سطوح فوق آبگریز را می توان با روشهای گوناگونی سنتز نمود، اما روش سل-ژل بدلیل مزایای فراوانی همچون فرایند دما یایین و خلوص بالای محصول، مدتهاست که برای ساخت سطوح فوق آبگریز مورد استفاده قرار می گیرد [۹]. گزارشات زیادی در سنتز لایه های سیلیکای آبگریز به روش سل-ژل وجود دارد، اما تاکنون هیچ گزارشی از سنتز پوشش های فوق آبگریز با استفاده از عامل سیلیلاسیون ایزو اکتیل تری متوکسی سیلان ارائه نشده است. اخیرا" اصلاح شیمیایی سطح فیلم سیلیکا با استفاده از عامل آبگریز اکتیل تری اتو کسی سیلان<sup>۷</sup> (OTES) گزارش شدهاست [۱۰ و ۱۱]. فیلمهای سیلیکای اصلاح شده با اکتیل تری اتو کسی سیلان زاویه تماسی در حدود ° ۱۰۷ و ° ۱۲۵ نشان دادند.

- <sup>°</sup>. Sliding angle
- . Trapping
- . Silane coupling agent
- °. Silylating agent
- <sup>1</sup>. Isooctyltrimethoxysilane
- . Octyltriethoxysilane

<sup>&#</sup>x27;. Contact angle

در این کار تحقیقاتی، ما توانستیم با کنترل زمان ژلاتینه شدن آلکوسل شامل پیش مادهٔ اتیل تری اتو کسی سیلان <sup>۱</sup> (ETES)، اندازه ذرات اولیه SiOr را به حدود ۲۶ نانومتر کاهش دهیم که این کاهش اندازه ذره منجر به کاهش نانوذرات نهایی اصلاح شده با ایزو اکتیل تری متو کسی سیلان گردید. در صورتیکه در مقایسه با کارهای قبلی انجام شده، اگلومره شدن ذرات، موجب افزایش اندازه ذرات سیلیکا شد. فاکتور دیگری که با کاهش اندازه نانوذرات بهبود یافت، مقدار زبری سطح بود که موجب شد، پوشش های سنتز شده علاوه بر دارا بودن خصلت فوق آبگریزی از شفافیت بالایی نیز برخوردار باشند.

## مواد و روش تحقيق

مواد شیمیایی جهت پوشش فوق آبگریز شامل؛ اتانول و هگزان (۹۹٪، مرک، آلمان) ، اتیل تری اتوکسی سیلان (۹۷٪، سیگما-آلدریچ آلمان)، ایزواکتیل تری متوکسی سیلان (۹۷٪، سیگما-آلدریچ آلمان)، آمونیاک (۲۸٪، مرک، آلمان) و آب دی یونیزه برای تهیه کاتالیزور مورد استفاده قرار گرفتند.

به منظور افزایش کیفیت پوشش، بسترهای شیشهای در اندازههای ۱× ۱/۵× ۱/۵ با محلول دترجنت و آب دیونیزه و اتانول شسته شدند. آلکوسل سیلیکا با اتیل تری اتوکسی سیلان به عنوان پیش ماده، ایزواکتیل تری متوکسی سیلان به عنوان عامل آبگریز، اتانول به عنوان حلال و در حضور آمونیوم هیدروکسید به عنوان کاتالیزور سنتز شد. به منظور مطالعهٔ اثر ایزواکتیل تری متوکسی سیلان بر روی خواص ترشوندگی، درصد عامل آبگریز از ۲/۵٪ تا ۱۵٪ تغییر داده شد. نسبتهای مولی TEOS: EtOH: H<sub>1</sub>O به ترتوندگی، درصد عامل رقیق شده و به مدت ۲۰ دقیقه هم زده شد. نسبتهای مولی از افزودن آب دیونیزه و آمونیوم هیدروکسید، سل سیلیکا به رقیق شده و به مدت ۴۰ دقیقه هم زده شد. پس از افزودن آب دیونیزه و آمونیوم هیدروکسید، سل سیلیکا به مدت یک شبانه روز هم زده شد تا فرایند هیدرولیز و تراکم کامل شود. سپس بسترها به طور عمودی در سل شفاف غوطهور شده و با سرعت حدود الاست افزاد ما حلال اضافی، اتصال کولانسی با سطح بستر ایجاد شود. پس از لایهنشانی، بسترهای پوشش داده شده در غلظتهای مختلفی از ایزو اکتیل تری متوکسی سیلان در حمام ساعت در دمای ۲۰۵۲٪ یخت شدند تا با از دست دادن حلال اضافی، اتصال کولانسی با سطح بستر ایجاد شود. پس از لایهنشانی، بسترهای پوشش داده شده در غلظتهای مختلفی از ایزو اکتیل تری متوکسی سیلان در حمام مگزان (۲/۵٪ تا ۱۵٪ حجمی) به مدت ۶ ساعت در دمای ۲۰۰۶ قرار گرفتند. سپس نمونهها با هگزان شسته شده تا عامل آبگریز واکنش نداده از سطح بستر جدا شود. سرانجام، فیلمها در دمای ۲۰۵٪ به مدت یک ساعت خشک شدند.

اندازه و مورفولوژی نانوذرات بر روی بستر پوشش داده شده با طلا بوسیلهٔ میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی ( FE-SEM ، Hitachi City، Hitachi) بررسی شد.

<sup>.</sup> Ethyltriethoxysilane

<sup>.</sup> Field emission scanning electron microscopy

مکان نگاری ۱ سطح لایه های سیلیکا بوسیلهٔ میکروسکوپ نیروی اتمی ۲(CP، RMS) زبری سطح (RMS) در مد تماسی تجزیه و تحلیل شد. مقدار میانگین جذر مربعی ۳ (RMS) زبری سطح scientific ، (ISA) در مد تماسی تجزیه و تحلیل شد. مقدار میانگین جذر مربعی ۳ (RMS) زبری سطح scientific ، (ISA) در مد تماسی تجزیه و تحلیل شد. مقدار میانگین جذر مربعی ۳ (RMS) زبری سطح scientific ، (ISA) در مد تماسی تجزیه و تحلیل شد. مقدار میانگین جذر مربعی ۳ (RMS) زبری سطح scientific ، (ISA) در مد تماسی تجزیه و تحلیل شد. مقدار میانگین جذر مربعی ۳ (RMS) زبری سطح scientific ، (ISA) در مد تماسی استفاده از نرم افزار نانو محاسبه گردید. پیوندهای آلی و معدنی مانند Si-OH ،Si-OH ،Si-C و Si-OH، Si-OH، Si-C مطوح اصلاح شده با طیف سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (ISA) مانند Perkin Elmer ،Spectrum RXI) ، ماناسایی شدند. بررسی زاویه تماس با اندازه گیری زاویه تماس ۴ میکرولیتر قطره آب بر روی سه نقطه مختلف از هر نمونه با استفاده از دستگاه اندازه گیری زاویه تماس ۴ میکرولیتر قطره آب بر روی سه نقطه مختلف از هر نمونه با استفاده از دستگاه اندازه گیری زاویه تماس ۴ میکرولیتر قطره آب بر روی سه نقطه مختلف از هر نمونه با استفاده از دستگاه اندازه گیری زاویه تماس ۴ میکرولیتر قطره آب بر روی سه نقطه مختلف از هر نمونه با استفاده از دستگاه اندازه گیری زاویه تماس مجهز به دوربین (Sataphysics) و داده شده در ناحیه مرئی استفاده از دستگاه اندازه گیری زاویه تماس مجهز به دوربین (Sataphysics) و داده شده در ناحیه مرئی استفاده از دستگاه اندازه گیری زاویه تماس ۲۰ محمد و دور بسترهای شیشه ای پوشش (Sataphysics) اندازه گرفته شد. (Sataphysics) اندازه گرفته شد. (Sataphysics) اندازه گرفته شد.

با توجه به شکل ۱، فوق آبگریزی فیلم سیلیکا بدلیل جایگزینی استخلاف آلی گروههای (Si(C<sub>A</sub>H<sub>1v</sub>) – با گروههای هیدروکسیل برروی سطح نانوذرات سیلیکا میباشد و در نتیجه سطح به طور موثری پوشیده میشود. در این مطالعه با افزایش غلظت عامل آبگریز، زاویه تماس قطره آب نیز افزایش پیدا کردهاست .

- `. Topography
- . Atomic force microscopy
- . Root-Mean-Square

خواص ترشوندگی یک سطح، به شیمی و مورفولوژی آن سطح بستگی دارد [۱۳]. خواص ترشوندگی شیشههای پوشش داده شده با اندازه گیری زاویه تماس قطره آب بر روی لایههای سیلیکا، در غلظتهای متفاوت از عامل آبگریز (. ٪، ، ۵٪، ۵٪/، ۱۰٪، ۲۰٪، ۲۰٪٪ و ۱۵٪ حجمی) اندازه گیری شد. تصاویر قطره آب بر روی فیلمهای سیلیکای تهیه شده با غلظتهای متفاوت از iso-OTMS در شکل ۲ آورده شده است. سطح اصلاح نشده (بدون افزودن عامل آبگریز iso-OTMS) زاویه تماسی در حدود °۲۸ نشان داد. تعداد زیاد گروهای هیدرو کسیل موجود بر روی سطح سیلیکا که قابلیت تشکیل پیوند هیدروژنی با مولکولهای آب را دارند، منجر به کاهش آبگریزی این سطح میشود. اما گروههای اتیل موجود در ETES منجر به خصلت آبگریزی و دافعه آب از سطح اصلاح نشده به اندازهٔ <sup>۵</sup>۸۱ شدند. پس از اصلاح سطح توسط iso-OTMS، لایه سیلیکا اصلاح نشده از خصلت آبگریزی به فوق آبگریزی تغییر پیدا کرد. همانطور که انتظار میرود با افزایش درصد عامل آبگریز در حلال هگزان، هیدروژنهای گروه هیدرو کسیل بر روی لایه سیلیکا با گروههای غیرقطبی و غیرقابل هیدرولیز آلکیل سیلیل در iso-OTMS جایگزین شده و منجر به پوشش سطحی بیشتر و افزایش زاویه تماس مورد با افزایش داویه تماس

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM) لایه سیلیکای فوق آبگریز، قبل و بعد از اصلاح نشان داد که با افزایش یافتن غلظت عامل آبگریز از ۲۰ تا ۱۵٪ حجمی، سطح نانوذرات سیلیکا توسط گروههای آلی بیشتری عامل دار شده و تشکیل لایه دو گانه را بدهند و در نتیجه پوشش بهتری از سطح صورت گیرد. شکل ۳ تصاویر FE-SEM لایههای سیلیکای اصلاح نشده و سطح اصلاح شده با iso-OTMS را نشان می دهد. اندازه ذرات لایههای سیلیکا اصلاح نشده و اصلاح شده بر روی سطح بستر به ترتیب ۲۶ m نشان می دهد. هنگامی که غلظت عامل آبگریز ۱۵٪ حجمی است، سطح بستر تقریبا<sup>"</sup> بطور کامل با -iso OTMS پوشیده شده است که زاویه تماس بالاتر را در این سطح تأیید می کند.

مکان نگاری سطح لایه های سیلیکا توسط میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) ثبت گردید. مورفولوژی سطح سیلیکای اصلاح نشده و اصلاح شده با ۱۵٪ حجمی از iso-OTMS در شکل ۴ آورده شده است. تصاویر AFM نشان میدهند که با افزایش درصد iso-OTMS مقدار جذب میانگین مربع زبری سطح از ۱۸۵ ۳ تا ۹/۱۷۲ nm افزایش پیدا می کند که بر اساس تئوری "کزی-باکسچر" با افزایش میزان زبری سطح، تماس قطره آب با سطح بستر کمتر شده و در نتیجه زاویه تماس نیز افزایش مییابد [۱۴].

طیف مادن قرمز نمونهها توسط طیف سنجی FT-IR در دمای اتاق با استفاده از روش قرص KBr انجام شد (شکل ۵). پیک جذبی شاخص در اطراف <sup>۱</sup>-۱۰۸۹ cm اطلاعاتی را در مورد ارتعاشات کششی نامتقارن پیوند سیلوکسان Si-O-Si نشان میدهد [۱۵]. نوار جذبی پهن در اطراف <sup>۱</sup>-۳۳ V۴۱۷ و نوار تیز در ناحیه <sup>۱</sup>-cm ۱۱۶۳ به ترتیب متناظر با نوار جذبی کششی و خمشی گروه هیدروکسیل میباشد. نوارهای کششی و خمشی

<sup>&#</sup>x27;. Cassie-Baxter

گروه C-H به ترتیب در اطراف <sup>(-</sup>۲۹۸۰ cm و <sup>(-</sup>۱۴۰۰ ظاهر شدند. با توجه به شکل ۵، با افزایش یافتن غلظت عامل آبگریز از ۲۰ تا ۱۵٪، شدت نوارهای O-H در اطراف <sup>(-</sup>۱۶۳۱ cm و <sup>(-</sup>۳۳۲ کاهش یافته و نوار جذبی مربوط به گروههای متیل در نواحی<sup>(-</sup>۲۹۸۰ cm و <sup>(-</sup>۱۴۰۰ افزایش پیدا می کند. این افزایش شدت، به اصلاح سطح نانو ذرات سیلیکا مربوط می باشد که منجر به افزایش آبگریزی لایههای سیلیکا شده است [19].

شفافیت و زبری سطح، خواصی هستند که با هم در رقابتند. به منظور دستیابی به شفافیت بالا در نور مرئی، اندازه زبری سطح باید از ۱۰۰ نانومتر کمتر باشد [۱۷]. درصد عبور نور فیلمهای سیلیکای اصلاح نشده و اصلاح شده با ۱۵ ٪ حجمی از عامل آبگریز ایزواکتیل تری متوکسی سیلان در ناحیه مرئی-فرابنفش در شکل ۶ آورده شدهاست. هر دو پوشش سیلیکا شفاف هستند. لایههای سیلیکا با درصد حجمی ۲ ٪ و ۱۵ ٪ بترتیب عبور نور ۹۶٪ و ۹۲٪ نشان میدهند.

نتیجه گیری ۱) فیلمهای شفاف و فوق آبگریز با حداکثر زاویه ۱۶۰° به روش سل-ژل دو مرحلهای سنتز شدند. ۲) زاویه تماس بسترهای شیشهای، به اصلاح سطح نانوذرات سیلیکا توسط پیوندهای غیرقطبی مانند Si-C و ۲- H - بستگی دارد. ۳) با کنترل اندازه ذره، این امکان وجود دارد تا لایههای فوق آبگریز شفاف با اندازه ذرات یکنواخت بر روی سطح بستر سنتز نمود. ۴) فیلمهای فوق آبگریز و شفاف در تهیه پوششهای دوستدار محیط زیست به منظور کاربردهای صنعتی حائز اهمیت هستند.

## مراجع

- 1. D.Y. Nadargi, J.L. Gurave, N.E. Hawai, A.V. Rao and M. Koebel, "Synthesis and characterization of transparent hydrophobic silica thin films by single step sol-gel and dip coating", *Journal of Alloy and Compound*, 297, 7.1., 277-221.
- Y. M. Nosonovsky and P.K Rohatgi, <u>Biomimetics in materials science: Self-Healing, Self-Lubricating, and Self-Cleaning Materials</u>, Springer Sci + Business Media., New York, Y. VY, pp. TY9-TE.
- <sup>r</sup>. A.V. Rao, S.S. Latthe, S.L. Dhere, S.S. Pawar, H. Imai, V.Ganesan, S.C. Gupta and P.B. Wagh, "Control on wetting properties of spin deposited silica films by surface silylation method", *Applied Surface Science*, 101, 1110–1111.
- T. Textor and B. Mahltig, "A sol-gel based surface treatment for preparation of water repellent antistatic textiles", *Applied Surface Science*, Yol, Yol, 1774-1795.
- •. H. Ogihara, J. Xie, T. Saji, "Factor determining wettability of superhydrophobic paper prepared by spraying nanoparticle suspensions", *Colloid and surfaces*,  $\xi \tau \xi$ ,  $\tau \cdot 1\tau$ ,  $\tau \circ \xi 1$ .

- V. R. Corriu, "Organosilicon chemistry and nano science", Journal of Organometal Chemistry, 7A7, 7..., 77-51.
- A. C.Y.K. Lung and J.P. Matinlinna, "Aspects of silane coupling agents and surface conditioning in dentistry", *Journal of Dental Materialism*, YA, YOY, ETV-EVV.
- X.F. Wen, K. Wang, P.H. Pi, J.X. Yang, Z.Q. Cai, L. Zhang, Y. Qian, Z.R. Yang and D. Zheng and J. Cheng, "Organic-inorganic hybrid superhydrophobic surfaces using methyltriethoxysilane and tetraethoxysilane sol-gel derived materials in Emulsion", *Applied Surface Science*, YoA, YOU, 991-99A.
- 1. V.G. Parale, D.B. Mahadik, S.A. Mahadik, M.S. Kavale, P.B. Wagh, S.C. Gupta and A.V. Rao, "OTES modified transparent dip coating silica coatings", *Ceramic International*, **79**, **7**.17, ATO-AE.
- 11. V. Purcar, L. Stamatin, O. Cinteza, C. Petcu, M. Ghiurea, T. Miclaus, A. Andronie, Fabrication of hydrophobic and anti reflective coatings based on hybrid silica films by solgel process, Sur. Coating. Tech. Y. J, Y. 17, 5559-550.
- NY. S.L. Dhere, S.S. Latthe, C. Kappenstein, G.M. Pajonk, V. Ganesan, A.V. Rao, P.B. Waghe and S.C. Gupta, "Transparent water repellent silica films by sol-gel process", *Applied Surface Science*, Yo7, Yo1, TTYE\_TTY.
- IT. M. Ma and R.M. Hill, "Superhydrophobic surfaces", Current Opinion Colloid & Interface Science, 11, 7...7, 197-7.
- ۱٤. N.J. Shirtcliffe, G. Mchle, M.I. Newton and C.C. Perry, "Foam structures: Organo-silica sol-gel foam", *Langmuir*, ۱۹, ۲۰۰۳, ۲۰۱۳.
- Yo. A.V. Rao, S.S. Latthe, S.A. Mahadik and C. Kappenstein, "Effect of different trimethyl silylating agents on the hydrophobic and physical properties of silica aerogels", *Applied Surface Science*, YoY, YON, OVYT-OVYT.
- 17. S.S. Latthe, H. Imai, V. Ganesan and A.V. Rao, "Ultrahydrophobic silica films by sol-gel process", *Journal of Porous and Materials*, 17, 7.1., 070-071.
- ۱۷. A. Nakajima, "Design of a transparent hydrophobic coating", *Journal of Ceramic Society*, ۱۱۲, ۲۰۰٤, ۲۳۰–۰٤۰.

درصد iso-OTMS (٪ حجمی)	زاویه تماس (θ)
•	۱۰۸
۲/۵	۱۳۰
۵	180
٧/۵	141
۱.	104
17/0	100
۱۵	18.

جدول ۱: تغییرات زاویه تماس برروی لایههای سیلیکا در درصدهای مختلف iso- OTMS در درجه حرارت °C ۲۵.



شکل ۲: تصاویر زاویه تماس بر روی فیلمهای سیلیکای تهیه شده (الف) ۰ ٪ (ب) ۷/۵ ٪ و (ج) ۱۵٪ Iso-OTMS.



شکل ۳: تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM) از سطوح (الف) اصلاح نشده (ب) اصلاح شده با ۱۵٪ حجمی iso-OTMS.



شکل ۴: تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) لایه های (الف) ۰ ٪ (ب) ۱۵٪ حجمی از iso-OTMS.



شكل ۵: طيف FT-IR (الف) ۰٪ (ب) ۵٪ و (ج) ۱۵٪ حجمي از FT-IR .



شکل ۶: طيف عبور نور پوشش (الف) اصلاح نشده (ب) اصلاح شده با ۱۵٪ حجمي از iso-OTMS.