



نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری کامپوزیت

http://jstc.iust.ac.ir



## طراحی و مشخصه‌یابی نوری و حرارتی پنجره هوشمند نانوکامپوزیت خودتمیزشونده با ویژگی تغییر حالت انکساری شفاف-کدر

مهدی جعفری وردنجانی<sup>1\*</sup>، محسن صفوی<sup>2</sup>، مهدی کاروان<sup>3</sup>

1- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

2- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

3- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

\* تهران، کد پستی 14357-61137، m-jafari@tvu.ac.ir

## چکیده

## اطلاعات مقاله:

امروزه پنجره‌های هوشمند پایه پلیمری به واسطه قابلیت‌های نوری و دمایی خود به منظور کاهش مصرف انرژی در ساختمان مورد توجه قرار گرفته‌اند. موضوع مهم در مورد این محصولات هوشمند، طراحی و ساخت بهینه آن‌ها می‌باشد که محور اصلی مقاله حاضر را تشکیل می‌دهد. پنجره پیشنهادی به گونه‌ای عمل می‌کند که درصد عبور نور از پنجره به میزان تطابق ضریب شکست نانوسیال داخل پنجره و صفحات پلیمری وابسته است. همچنین فیلم نانوکامپوزیت جهت فراهم آوردن ویژگی خودتمیزشوندگی و رفتار فوتوکاتالیستی در سطوح خارجی مورد استفاده قرار گرفته است. مواد مورد استفاده شامل پلیمر پلی متیل متاکریلات (صفحات)، سیال متیل سالیسیلات، و نانوذرات اکسید روی است. این مواد برای ساخت فیلم نانوکامپوزیت (نانوذرات و پلیمر) و نانوسیال (نانوذرات و سیال) نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند. پس از انجام مراحل طراحی و ساخت، آزمایشات مشخصه‌یابی به منظور تعیین خواص مکانیکی (استحکام کششی، چقرمگی، استحکام خمشی)، فیزیکی (زاویه تماس)، ساختاری (اندازه و شکل نانو ذرات)، نوری (میزان عبور نور)، و حرارتی (محدوده‌های دمایی، ضریب انتقال حرارت) بیان شده است. همچنین عملکرد پنجره از لحاظ میزان مصرف انرژی و عبور نور، در یک تحلیل کمی و به کمک دو پارامتر بی‌بعد نسبت عبور نور و تفاضل دما، مورد تحلیل و مقایسه با سایر پنجره‌های هوشمند قرار گرفته است. با توجه به نتایج حاصل از این تحلیل، بازه تغییر شفافیت پنجره پیشنهادی بیش از 2 برابر حداکثر این مقدار برای سایر پنجره‌های هوشمند بوده، راندمان آن در حیطه مصرف انرژی و تعدیل دما در فصول گرم و سرد 2.1 برابر سایر پنجره‌های هوشمند بوده است.

دریافت: 1400/01/17

پذیرش: 1400/08/15

## کلیدواژگان

پنجره هوشمند، نانوکامپوزیت، عبور نور، خودتمیزشوندگی، ضریب شکست نور

## Design and Characterization of Thermal and Optical Properties of Nano-Composite Self-Cleaning Refractive Transparent-Opaque Smart Window

Mehdi Jafari Vardanjani<sup>1\*</sup>, Mohsen Safavi<sup>2</sup>, Mehdi Karevan<sup>3</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Esfahan University of Technology, Esfahan, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Esfahan University of Technology, Esfahan, Iran

\* P.O.B. 14357-61137, Tehran, Iran, m-jafari@tvu.ac.ir

## Keywords

Smart window, Nano-composite, Light transmission, Self-cleaning, Refractive index

## Abstract

Today, polymer-based smart windows have been considered for their thermal capabilities to reduce energy consumption in the buildings. The important issue about these smart products is their optimal design and construction which is the main focus of this study. The proposed window operates the way that the percentage of the light passing through the window depends on the degree of conformity of the refractive index of the nanofluid inside the window and the polymeric plates. Nanocomposite film has also been used to provide self-cleaning and photocatalytic behavior on the external surfaces. The materials used include polymethyl methacrylate (plates), methyl salicylate (fluid), and zinc oxide nanoparticles, which have been used to fabricate the nanocomposite, and nanofluid. After accomplishing the design and fabrication steps, characterization tests have been performed to determine mechanical (tensile strength, toughness, flexural strength), physical (contact angle), structural (size and shape of nanoparticles), optical (light transmission rate), and thermal (temperature ranges, heat transfer coefficient) properties. In addition, the performance of the window has been analyzed and compared with the other smart windows in terms of energy consumption and light transmission, in a quantitative analysis by two dimensionless parameters of light transmission ratio and temperature difference. According to the results, the range of variation in the transparency has been more than the maximum for other smart windows by 2 times while its energy consumption and temperature adjustment performance index has been higher than the other smart windows by 2.1 times.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Jafari Vardanjani, M., Safavi, M., Karevan, M., "Design and Characterization of Thermal and Optical Properties of Nano-Composite Self-Cleaning Refractive Transparent-Opaque Smart Window", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 2, pp. 1479-1493, 2021. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2021.527470.1715>

## 1- مقدمه

قرار داده، کاهش 50 درصدی مصرف انرژی را در مقایسه با پنجره‌های استاندارد ثابت کرده‌اند.

عملکرد ترموکرومیک ذرات میکرو هیدروژل کopolymer شده با تنظیم اندازه ذرات و ساختار آن‌ها جهت بررسی تغییرات مصرف انرژی در این نوع پنجره‌ها مورد بررسی قرار گرفتند [7]. صرف نظر از هزینه تولید پنجره‌های هوشمند ترموکرومیک، کاربرد بالقوه آن‌ها در اهداف اتوماسیون ساختمان نیاز به بررسی عمیق‌تری دارد، ضمن اینکه باید به پیچیدگی روند طراحی و ساخت چنین پنجره‌هایی توجه نمود [8].

آلن<sup>4</sup> و همکاران [1] با در نظر گرفتن ماهیت متغیر پنجره‌های هوشمند کنترل بیشتری را در مقایسه با رفتار ثابت پنجره کم‌گسیل بر جذب انرژی خورشیدی به دست آوردند. به عنوان مثال پنجره هوشمند هیدروکسی پروپیل سلولزی 74٪ نور خورشید را در حالت شفاف، و 11٪ نور را در حالت کدر انتقال می‌دهد. این مقدار برای پنجره کم‌گسیل، مقدار ثابت 53٪ است. بنابراین در دوره‌های سرد سال درصد پائین عبور نور در پنجره کم‌گسیل باعث از دست دادن انرژی مفید خورشیدی شده، انرژی اضافی مورد نیاز برای گرمایش افزایش می‌یابد. در مقابل، پنجره هوشمند هیدروکسی پروپیل سلولزی مورد نظر نویسنده، میزان انرژی مورد نیاز انرژی خورشیدی را در فصل سرما کاهش می‌دهد. اگرچه این مزیت به دلیل ویژگی‌های ذاتی مواد بکار رفته در پنجره‌های هوشمند منطقی به نظر می‌رسد، لیکن میزان دقیق برتری آن نسبت به پنجره‌های کم‌گسیل باید در سطح وسیع‌تری مورد آزمایش قرار گیرد.

## 1-2- مکانیزم‌های عملکرد پنجره‌های هوشمند

پنجره‌های هوشمند الکتروکرومیک معمولاً از چند لایه تشکیل شده‌اند که در آن‌ها فرآیند تغییر حالت با فرایندهای اکسیداسیون- احیا و انتشار یون‌های فعال شده خارجی به دست می‌آید [9]. در این پنجره‌ها می‌توان با اعمال اصلاحاتی، برخی از ویژگی‌ها را از قبیل زمان تغییر حالت و میزان عبور نور تا حد معینی به کمک میزان ولتاژ خارجی اعمال شده تحت کنترل قرار داد [10]. اگرچه این نوع پنجره‌ها در موارد خاص پر کاربرد هستند، لیکن برای آماده‌سازی مواد و ساخت لایه‌های آن‌ها به مراحل مختلف و پیچیده‌ای نیاز است که صرفه اقتصادی محصول را تحت تأثیر قرار می‌دهد [11]. علاوه بر این، از آنجا که این پنجره‌ها بر اساس فرایندهای اکسیداسیون و احیا عمل می‌کنند [9]، ممکن است واکنش‌های الکتروشیمیایی صورت گرفته بین الکترولیت و مواد فعال به تولید ترکیبات شیمیایی جانبی ناخواسته و بعضاً سمی منجر شود که این قضیه می‌تواند باعث کاهش راندمان عملکرد محصول نیز گردد [12, 13].

تلاش‌های قابل توجهی برای تولید پنجره‌های فتوکرومیک و گازوکرومیک صورت گرفته است. مدت زیادی است که در ساخت عینک‌های هوشمند از فن‌آوری فتوکرومیسم استفاده می‌شود. در مقایسه دو روش گازوکرومیسم و الکتروکرومیسم به نظر می‌رسد که فرآیند گازوکرومیسم اقتصادی‌تر باشد [3]. در این رابطه، وو<sup>5</sup> و همکاران [14] با قرار دادن مواد آلی رنگی در یک ماتریس مبتنی بر سل-ژل، از فیلم‌های فتوکرومیک شفاف برای کاربردهای پنجره هوشمند استفاده کرده‌اند. میزان اتصال پوشش ماتریس و انواع ترکیبات آلی بر انتقال نور مرئی و میزان سفید شدن شیشه تأثیرگذار بوده است. در این راستا با تغییر میزان غلظت رنگ در پوشش و همچنین ضخامت آن، میزان انتقال نور نیز بین 30 تا 60٪ تنظیم شده است. به گفته نویسنده کاربرد این محصول به

طبق تحقیقات انجام‌شده در حال حاضر ساختمان‌ها 40 درصد مصرف انرژی و بنابراین 36 درصد انتشار دی‌اکسید کربن را بر عهده دارند [1]. این امر نشان‌دهنده اهمیت مطالعه ساختمان‌ها از لحاظ مصرف انرژی و حفظ محیط‌زیست می‌باشد. در حال حاضر پنجره‌های استاندارد معمولاً یک سوم کل انرژی مورد استفاده برای گرمایش و تهویه را تلف می‌کنند؛ بنابراین تلاش‌ها بر روی بهبود پنجره‌ها و استفاده از فناوری مناسب برای کاهش این اتلاف انرژی متمرکز شده است [2]. شیشه متغیر (شفاف-کدر) که برای عبور یا بازتاب درصد قابل توجه نور خورشید بر اساس نیاز کاربر به کار می‌رود، راه حلی منطقی در این زمینه به شمار می‌رود. این المان‌ها برای کاهش هزینه‌های تهویه مطبوع طراحی شده‌اند که این کار را از طریق مسدود نمودن بخش عمده نور خورشید در تابستان و افزایش عبور نور در زمستان انجام می‌دهند. مکانیزم اساسی این المان‌ها مبتنی بر قابلیت تنظیم میزان نور عبوری است که عموماً در پاسخ به انرژی اعمال‌شده یا تغییر در شرایط محیطی (همچون دما) عمل می‌کند [3]. در حال حاضر مسئله مورد توجه این المان، استفاده از فن‌آوری‌ها و راه‌کارهای جدید جهت بهبود ویژگی‌های حرارتی و نوری به منظور کاهش هزینه‌های ساخت و تولید آن است. پنجره‌های هوشمند مبتنی بر پلیمر راه حل معقولی برای رفع این مشکل به شمار می‌آید که می‌توان با بکارگیری آن در تجهیزات از ویژگی‌های مطلوب آن بهره برد. قابلیت طراحی و تولید اقتصادی، انعطاف‌پذیری، خواص نوری-حرارتی، و سازگاری آن با فن‌آوری نانو از دلایل اصلی تمرکز این مطالعه بر روی پنجره‌های هوشمند مبتنی بر پلیمر است. این نوع پنجره‌های هوشمند از نظر طراحی، ساخت، و کاربرد یکی از انعطاف‌پذیرترین محصولات به شمار می‌روند. پنجره‌های هوشمند مبتنی بر پلیمر را می‌توان به سادگی در ساختمان‌ها و وسایل نقلیه تعبیه نمود تا علاوه بر کاهش مصرف انرژی و ارتقای سطح اتوماسیون در آن‌ها، ایمنی محدوده مورد نظر را با مسدود کردن دید در زمان مناسب بهبود بخشد. پلیمرهای شفاف معمولاً خواص نوری مختلفی از خود نشان می‌دهند که شامل ویژگی‌های قابل تنظیم میزان جذب و انعکاس نور به واسطه تنظیم ضریب شکست می‌باشد. از آنجائیکه این ویژگی‌ها در پلیمرها قابلیت‌های بالقوه‌ای همچون ویژگی‌های نوری و الکترونیکی ایجاد می‌کند، معمولاً مورد توجه قرار می‌گیرند [4]. مطالعات صورت‌گرفته در زمینه طراحی و کاربرد پنجره‌های هوشمند را می‌توان در مقوله‌های مختلفی از قبیل مدیریت مصرف انرژی، نوع مکانیزم تغییر حالت به کاررفته، و شبیه‌سازی عملکرد مورد بررسی قرار داد. در اینجا تعدادی از این تحقیقات به صورت طبقه‌بندی شده اشاره شده است.

## 1-1- بهینه‌سازی مصرف انرژی

هافمن<sup>1</sup> و همکاران [5] اثرات تغییر دما را در یک وضعیت آب و هوای سرد، و یک وضعیت گرم و مرطوب، روی پنجره‌های هوشمند ترموکرومیک بررسی کردند. مشخص شد که در مقایسه با پنجره‌های استاندارد جدید کم‌گسیل<sup>2</sup>، یک پنجره ترموکرومیک با تغییر حالت در دمای پایین، 10 تا 17 درصد، انرژی کمتری را در این مناطق آب و هوایی مصرف می‌کند. این نتایج فقط در مناطق خاص جغرافیایی مذکور اعتبارسنجی شده است، با این حال وارویک<sup>3</sup> و همکاران [6] این نوع پنجره را تحت شرایط گسترده‌تری مورد تجزیه و تحلیل

<sup>4</sup> Allen  
<sup>5</sup> Wu

<sup>1</sup> Hoffmann  
<sup>2</sup> Low-Radiation (LE)  
<sup>3</sup> Warwick

- محدودیت زمانی (فصلی) و مکانی (جغرافیایی) در دستیابی به راندمان مفید محصول
- هزینه بالای ساخت
- پیچیدگی‌های نسبی ساختاری موجود در پلیمرها و مواد مورد استفاده
- پیچیدگی ساخت محصول و تجهیزات مورد نیاز
- وابستگی عمده تغییر حالت به انرژی حرارتی
- عدم دستیابی به درصد شفافیت بالا
- زمان نسبتاً بالای تغییر حالت
- محدودیت موقعیت نصب پنجره به دلیل جلوگیری از دید در هنگام افزایش دما

در مطالعه حاضر، طرح نوینی از پنجره هوشمند با بهره‌گیری از انطباق ضریب شکست نور بین المان‌های پنجره و استفاده از سیستم تخلیه-تزریق ساده ارائه شده است. بدین ترتیب، شفافیت پنجره هوشمند را می‌توان در زمان دلخواه و بدون نیاز به رسیدن به آستانه دمایی تغییر حالت کنترل نمود. پنجره هوشمند طرح پیشنهادی به گونه‌ای عمل می‌کند که درصد عبور نور از آن به وجود یا عدم وجود سیال (نانوسیال) بین دو دیواره (صفحات پلیمری) و انطباق ضریب شکست بدست آمده با توجه به درصد نانوذرات موجود در آن بستگی دارد. بنابراین درصد انتقال نور در غیاب سیال در حداقل مقدار خود (45 درصد)، و در حضور سیال در حداکثر مقدار (80 درصد) خواهد بود. مواد مورد استفاده در این مطالعه شامل پلی متیل متاکریلات<sup>۳</sup> بعنوان صفحات پنجره، متیل سالیسیلات<sup>۴</sup> بعنوان سیال، و پودر اکسید روی<sup>۵</sup>، بعنوان نانوذرات مورد استفاده در ساخت نانوسیال و فیلم نانوکامپوزیت می‌باشد. از دلایل انتخاب پلی متیل متاکریلات، در دسترس بودن، شفافیت بالا در محدوده مرئی و نزدیک به مادون قرمز [18]، و جرم مخصوص کمتر در مقایسه با سیلیکا (شیشه) می‌باشد. ویژگی نوری این پلیمر باعث می‌شود که یافتن سیالی با ضریب شکست نوری نزدیک به آن و پوشش نانوی مناسب جهت افزودن سایر قابلیت‌ها دشوار نباشد. بنابراین سیال متیل سالیسیلات با ضریب شکست نزدیک به پلیمر مذکور مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله ویژگی‌های مهم این سیال ویسکوزیته نسبتاً کم و مناسب برای مکانیزم تغییر حالت به کاررفته، شفافیت بالا، دمای نقطه جوش و اشتعال مناسب برای محدوده دمایی کاری مورد نظر، و تطابق زیست-محیطی آن است. همچنین نانوذرات اکسید روی به عنوان یک پرکننده غیرارگانیک چندمنظوره که دارای ویژگی‌های برجسته‌ای از قبیل ضریب شکست نور بالا، انتقال حرارت خوب، رفتار خودتمیزشوندگی، رفتار فوتوکاتالیستی<sup>۶</sup>، حفاظت در مقابل پرتوی فرابنفش [19]، و خواص ضدعفونی‌کننده است [20]، برای ساخت فیلم نانوکامپوزیت مناسب می‌باشد. به این ترتیب پلیمر مورد نظر در مجموعه بدست آمده نقش ماده‌ای جهت فراهم آوردن قابلیت‌های فرآیندپذیری مناسب، شفافیت، و انعطاف‌پذیری را ایفا می‌کند [21]، در حالیکه نانوذرات به کاررفته ویژگی مطلوب حرارتی و نوری را ارائه می‌دهد. در بخش‌های زیر، پس از معرفی مشخصات فنی مواد، مراحل ساخت، آزمایشات مشخصه‌یابی، و نتایج حاصل، با ارائه یک تحلیل کمی روی

طور قابل توجهی باعث کاهش انرژی در مناطق گرمسیر شده است. لازم به ذکر است که مدت زمان تغییر حالت نسبتاً بالا، و پیچیدگی ساختار از معایب این طرح به شمار می‌رود.

در مطالعه دیگری که توسط فنگ<sup>۱</sup> و همکاران انجام شد [15]، پنجره‌های گازوکرومیک هوشمند از نظر ویژگی‌های نوری و حرارتی و بهره‌وری انرژی مورد آزمایش قرار گرفتند. این کار با شبیه‌سازی مصرف انرژی در یک ساختمان انجام شد. این مطالعه نشان داد که بهترین مناطق برای استفاده از این نوع پنجره مناطقی با زمستان‌های سرد و تابستان‌های گرم است. استفاده این محصول در این مناطق باعث کاهش مصرف انرژی مصرف‌شده در تهویه، خنک‌سازی، و گرمایش شده است. با این وجود، محدودیت موقعیت جغرافیایی مناسب و تجهیزات نسبتاً پیچیده مورد نیاز برای تولید گاز مورد نیاز، از محدودیت‌های این طرح به شمار می‌رود.

### 1-3- شبیه‌سازی

شبیه‌سازی عددی عملکرد پنجره‌های هوشمند هنوز بین محققان متداول نشده است. با این وجود تلاش‌هایی برای تحقق این امر مشاهده شده است. یک مطالعه عددی در مورد عملکرد یک پنجره هوشمند چند لایه تعبیه‌شده در سلول‌های خورشیدی نسل سوم توسط سبری<sup>۲</sup> و همکاران انجام شده است [16] که در آن پارامترهای بهینه‌سازی سیستم مانند نسبت غلظت نور و جریان خنک‌کننده (آب) برای جلوگیری از افت عملکرد سلول مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار تجزیه و تحلیل سیالات، مدل‌سازی دقیقی روی ویژگی‌های حرارتی پنجره انجام شده است. سرانجام با در نظر گرفتن انتقال حرارت رسانشی، جابجایی، و تابشی در محفظه داخلی و خارجی سیستم پنجره هوشمند نتایج حل عددی ارائه شده است.

در مطالعه دیگری اثر سیستم تهویه غیرفعال و پنجره‌های هوشمند در یک ساختمان سازگار با شرایط آب و هوایی مختلف، توسط خالصی و همکاران [17] بررسی شده است. توزیع دما و شرایط هوا برای دو منبع گرما، پنجره‌های هوشمند، و دو نوع تهویه در نرم‌افزار تحلیل سیالات بررسی شده است. شاخص آسایش دما نیز توسط یک مدل معتبر برای پنجره‌های هوشمند تعیین شده است. نتایج تجزیه و تحلیل نشان می‌دهد که پنجره‌های هوشمند از نظر تحقق شاخص‌های آسایش نسبت به سایر پنجره‌ها برتری دارند. همچنین این امر به صورت تئوری اثبات شد که می‌توان به کمک پنجره‌های الکتروکرومیک اختلاف دما را بین کف و سقف تا 50 درصد کاهش داد.

گرچه فناوری اکثر پنجره‌های هوشمند تأثیر مثبتی در مدیریت انرژی دارد، لیکن هزینه قابل توجه ساخت اکثر آن‌ها مانع اصلی به شمار می‌رود. پنجره‌های هوشمند کنونی که بر اساس میزان شدت دریافتی نور خورشید تحریک می‌شوند، نه تنها هزینه نسبتاً بالایی به مجموعه اعمال می‌کنند، بلکه در مدت طولانی نیز به خوبی کار نمی‌کنند. علاوه بر این در فرآیند ساخت اکثر این نوع پنجره‌ها معمولاً از مواد سمی استفاده می‌شود که می‌تواند خطرات قابل توجهی برای طبیعت و سلامت انسان ایجاد کند. بنابراین به طور کلی برخی از محدودیت‌های موجود در مطالعات قبلی و محصولات ارائه‌شده را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود:

<sup>1</sup> Feng  
<sup>2</sup> Sabry  
<sup>3</sup> Poly(methyl methacrylate) (PMMA)

<sup>4</sup> Methyl salicylate  
<sup>5</sup> Zinc oxide (ZnO)  
<sup>6</sup> Photocatalytic behavior

مونتاز شده این محصول، نمونه با تزریق سیال به داخل صفحات پلیمری آماده شده، سطوح خارجی با فیلم نانوکامپوزیت پوشیده شده است.

جدول 2 مشخصات فنی نانوذرات اکسید روی

ویژگی‌های حرارتی	
$25 \frac{W}{m \cdot K}$	ضریب انتقال حرارت رسانشی
ویژگی‌های اپتیکی	
2.008	ضریب شکست
ویژگی‌های شیمیایی	
81.38 gr/mol	جرم مولکولی
ویژگی‌های فیزیکی	
5670 kg/m <sup>3</sup>	چگالی
2250 K	دمای ذوب
17 - 48 nm	ابعاد ذرات نانو
0.020 - 0.047 $\frac{gr}{L}$	انحلال پذیری در آب

جدول 3 مشخصات فنی سیال متیل سالیسیلات

عمومی	
39256-L05	کد محصول
ویژگی‌های شیمیایی	
C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	ترکیب شیمیایی
ویژگی‌های حرارتی	
-8 °C	دمای ذوب
222 °C	دمای جوش
96 °C	دمای اشتعال
248.9 $\frac{J}{mol \cdot K}$	ظرفیت گرمایی
ویژگی‌های اپتیکی	
1.54	ضریب شکست
ویژگی‌های فیزیکی	
0.7 $\frac{gr}{L}$	انحلال پذیری در آب
1180 $\frac{kg}{m^3}$	چگالی
0.000442 $\frac{N}{cm}$	کشش سطحی

#### الف - صفحات پلیمری

پس از بررسی هندسه‌های مختلف مشخص شد که هندسه مکعب دوران یافته انتخاب بهتری برای این صفحه می‌باشد. در این شکل هندسی مکعب‌های دوران یافته به صورت حفره‌هایی در داخل صفحه در نظر گرفته شده است. شکل 3 جزئیات این طرح را نشان می‌دهد. به کمک این طرح پرتوی نور به طور متوالی دچار شکست شده، هنگامی که سیال در داخل آن قرار ندارد، درصد عبور نور به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. در مقابل هنگامی که سیال وجود داشته باشد میزان عبور نور به واسطه تطابق بالای ضریب شکست سیال و صفحات پلیمری افزایش می‌یابد.

قابلیت‌های پنجره هوشمند پیشنهادی، عملکرد آن با سایر پنجره‌های هوشمند موجود مورد مقایسه قرار گرفته است.

#### 2- مواد و روش‌ها

##### 1-1- مواد

پلیمر مورد استفاده در این طرح، پلی متیل متاکریلات (محصول کشور چین) است که مشخصات فنی آن در جدول 1 ذکر شده است.

جدول 1 مشخصات فنی پلی متیل متاکریلات

عمومی	
25034-86-0	کد محصول
ویژگی‌های شیمیایی	
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	ترکیب شیمیایی
ویژگی‌های مکانیکی	
2.45 GPa	مدول الاستیسیته
62 MPa	مقاومت کششی
6 %	تغییر شکل پلاستیک
134 MPa	مقاومت خمشی
19 Knoop	سختی
0.215 J/cm	مقاومت به ضربه
ویژگی‌های حرارتی	
$70 \times 10^{-6} \frac{1}{K}$	ضریب انبساط
$0.2085 \frac{W}{m \cdot K}$	ضریب انتقال حرارت رسانشی
$1466 \frac{J}{kg \cdot K}$	ظرفیت گرمایی ویژه
105 °C	دمای انتقال شیشه‌ای
160 °C	دمای ذوب
-40 °C	حداقل دمای کاری
90 °C	حداکثر دمای کاری
ویژگی‌های اپتیکی	
1.492	ضریب شکست
ویژگی‌های فیزیکی	
1185 kg/m <sup>3</sup>	چگالی
0.54	ضریب اصطکاک
0.35 %	جذب آب

پوشش نانوکامپوزیت مورد نظر برای این منظور اکسید روی-پلی متیل متاکریلات است. نانوذرات اکسید روی (محصول شرکت مرک<sup>1</sup> کشور آمریکا)، با مشخصات فنی جدول 2 مورد استفاده قرار گرفت.

سیال مورد نظر در این محصول متیل سالیسیلات (جدول 3) (محصول شرکت SDFCL کشور هند) است که پس از افزودن نانوذرات اکسید روی به نانوسیال تبدیل می‌شود.

##### 2-2- ساخت

به طور کلی مراحل تجربی، شامل فرآیند ساخت و آزمایشات مشخصه‌یابی شده است (شکل 1). با توجه به تصویر مفهومی ارائه شده در شکل 2 از نمونه

<sup>1</sup> Merck

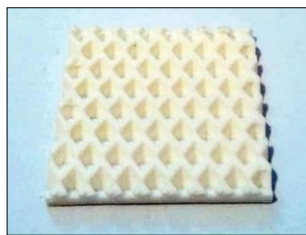


Fig. 4 3D printed polymeric prototype of panel.

شکل 4 نمونه پلیمری چاپ شده سه بعدی صفحه



(الف-ا)



(ب-ب)

Fig. 5 Resin mold preparation; (a) Before curing; (b) After curing.

شکل 5 آماده‌سازی قالب رزینی؛ (الف) قبل از انجماد؛ (ب) بعد از انجماد

ب- فیلم نانوکامپوزیت

مقادیر درصد مورد نظر نانوذرات در جدول 4 ارائه شده است. باید توجه داشت که بر اساس تحقیقات انجام شده [22]، بیشترین غلظت قابل دستیابی نانوذرات در ماتریس پلیمری در حدود 10 درصد وزنی (10 wt%) است که به دلیل انرژی سطحی بالا و انحلال پذیری پائین نانوذرات است. بنابراین مقادیر کمتر از 10 wt% برای تولید این نانوکامپوزیت در نظر گرفته شده است. همچنین با توجه به بررسی‌های اولیه و مطالعات [23] انجام شده مشخص شد که درصد وزنی بالاتر از 6، برای این نانوذرات تأثیر نسبتاً نامطلوبی بر شفافیت مورد نظر این نانوکامپوزیت می‌گذارد.

جدول 4 درصد نانوذرات در نانوکامپوزیت

Table 4 Nano-particle percentage in nano-composite

نمونه	جرم PMMA (gr)	جرم ZnO (gr)
NCS <sub>1</sub> *	0.99	0.01
NCS <sub>2</sub>	0.98	0.02
NCS <sub>3</sub>	0.95	0.05

\*NCS: Nano-composite sample

جهت مخلوط نمودن و انحلال پلیمر در داخل حلال، از یک همزن-گرم‌کن مغناطیسی (RH-Basic، محصول شرکت IKA کشور چین) با دمای بیشینه

نمونه‌های پلیمری در ابتدا به وسیله روش چاپ سه بعدی (Trust L Pro) شرکت توسعه‌گران بعد سوم کشور ایران) و با جنس پلی اتیلن<sup>1</sup> ایجاد شدند (شکل 4). سپس قالب رزینی به کمک نمونه پلیمری تولید شد (شکل 5). در نهایت، صفحات پلی متیل متاکریلات با تزریق پلیمر در داخل قالب رزینی تقویت شده ساخته شدند.

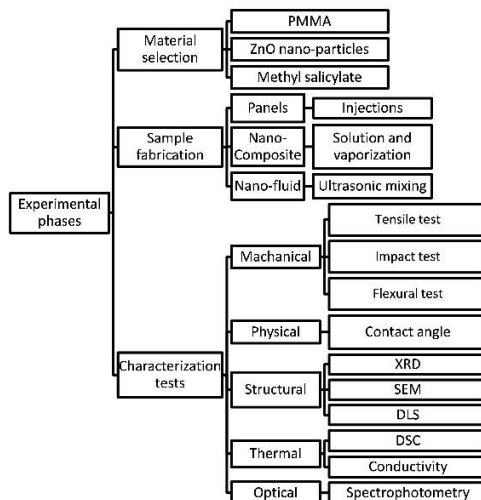


Fig. 1 Experimental steps

شکل 1 مراحل تجربی

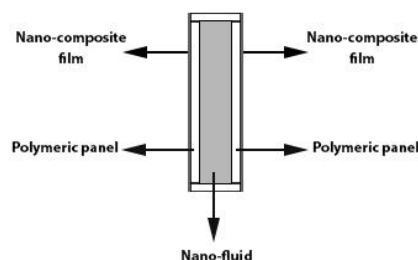
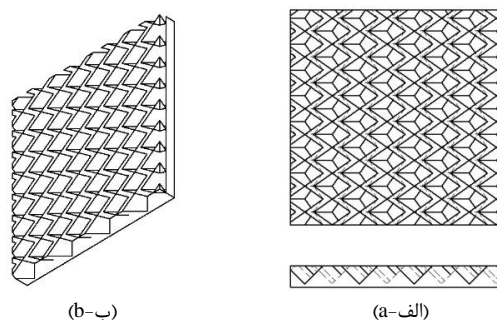


Fig. 2 Schematics of assembled sample Schematics of assembled sample

شکل 2 نمای شماتیک نمونه مونتاژ شده



(ب-ب)

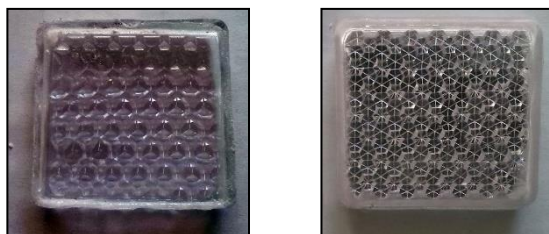
(الف-ا)

Fig. 3 Window panel with rotated cubes pattern; (a) Two-dimensional view; (b) Three-dimensional view.

شکل 3 صفحه پلیمری پنجره با هندسه مکعب دوران یافته؛ (الف) نمای دوبعدی؛ (ب) نمای سه بعدی

<sup>1</sup> Polyethylene (PE)

درصدهای مختلف نانوسیال و نانوکامپوزیت بدست می‌آید که این مسأله روی مجموعه صفحات پلیمری، نانوسیال، و نانوکامپوزیت در آزمایشات مورد بررسی قرار گرفته است، بنابراین در وضعیت عدم وجود نانوسیال، به دلیل شکست بالای نور در صفحات پلیمری، عدم شفافیت (شکل 7) امری طبیعی می‌باشد.



(b-ب)

(الف-ا)

**Fig. 7** The PMMA plates; (a) external view; (b) Internal view (Disassembled)

شکل 7 صفحات پلیمری ایجادشده؛ (الف) نمای خارجی؛ (ب) نمای داخلی (پیش از مونتاژ)

### 2-3-3- آزمایشات

آزمایشات مشخصه‌یابی در حوزه خواص مکانیکی، مکانیکی، حرارتی، ساختاری، و نوری، روی اجزاء انجام شد که در اینجا تشریح می‌شوند.

#### 2-3-1- خواص فیزیکی

##### الف - آزمون زاویه تماس

آزمایشات زاویه تماس بر اساس ASTM D7490 [24] و با هدف تشخیص میزان مطابقت بین سیال و پلیمر مورد استفاده، در نمونه انجام شد. جهت انجام این آزمایش روش اندازه‌گیری زاویه تماس و کشش سطحی قطرات در دستگاه CA-ES10 (محصول شرکت ازدیاد برداشت فارس کشور ایران) مد نظر قرار داده شد. آزمون زاویه تماس برای صفحات پلیمری و فیلم نانوکامپوزیت، در مقابل آب، سیال، و نانوسیال با دو بار تکرار، در دمای 25 °C انجام شد. نمونه پلیمری با ابعاد 50 × 15 × 4 mm<sup>3</sup> (شکل 8) برای این آزمون مورد استفاده قرار گرفت.



**Fig. 8** PMMA samples for contact angle test.

شکل 8 نمونه پلیمری مورد استفاده در آزمایش تعیین زاویه تماس

### 2-3-2- خواص مکانیکی

#### الف- آزمون کشش

آزمون کشش صفحات پلیمری بر اساس ASTM D638 [25]، با نرخ  $\frac{5 \text{ mm}}{\text{min}}$ ، در دمای 25 °C، با دو بار تکرار روی نمونه‌ها انجام شد (شکل 9). ابعاد نمونه در شکل 10 نمایش داده شده است. جهت انجام این آزمون دستگاه ST-100 (محصول شرکت تینیوس السن<sup>1</sup> کشور آمریکا) مورد استفاده قرار گرفت.

120 °C استفاده شد (شکل 6). محلول پلیمر-سیال (پلی متیل متاکریلات) (1 gr / 50 ml سیال)

به صورت مایع سفید غلیظی حاصل شد. از آنجائیکه پودر اکسید روی به صورت نانوذرات تهیه شده است، نیازی به سنتز اولیه این ماده جهت تولید پودر اکسید روی نبوده است. بنابراین پودر به طور مستقیم استفاده شد. مقادیر مختلف نانوذرات اکسید روی به محلول اضافه شد و در مرحله بعد، نمونه برای مدت 60 h در محدوده دمایی 60 °C تا 65 °C قرار گرفت و محصول نسبتاً سفیدرنگی حاصل شد. در گام بعدی، محصول ژله‌ای روی صفحه شیشه‌ای قرار داده شد تا فیلم بدست آید. در نهایت فیلم تهیه شده برای مدت 11 min در دمای 60 °C قرار داده شد تا حلال از نمونه حذف گردد. ضخامت نمونه در نقاط مختلف اندازه‌گیری شد تا از ضخامت 30 μm آن اطمینان حاصل گردد.



**Fig. 6** Dissolving polymer in propanone (acetone).

شکل 6 حل کردن پلیمر در پروپانن (استون)

### پ- نانوسیال

جهت آماده‌سازی نانوسیال مطلوب، نانوذرات اکسید روی اضافه شدند و با غلظت‌های 0.1، 0.5، و 1 درصد وزنی در نظر گرفته شد (جدول 5). سپس محلول قبل از انجام فرآیند مافوق صوت جهت اطمینان از پراکندگی کامل نانوذرات در سیال پایه، روی همزن مغناطیسی قرار گرفت و مجدداً هم زده شد.

#### جدول 5 درصد نانوذرات در نانوسیال

**Table 5** Nano-particle percentage in fluid.

مقدار ZnO (wt%)	نمونه
0.1	NFS <sub>1</sub> *
0.5	NFS <sub>2</sub>
1	NFS <sub>3</sub>

\*NFS: Nano-fluid sample

### ت- محصول مونتاژشده

جهت ساده‌سازی روند تولید و مونتاژ نمونه، ابعاد مورد نظر برای نمونه 0.1 × 0.1 m<sup>2</sup> در نظر گرفته شد. صفحات پلیمری ایجادشده در دو نما در شکل 7 نشان داده شده‌اند. لازم به ذکر است که نحوه عملکرد پنجره هوشمند پیشنهادی به گونه‌ای است که میزان شفافیت حاصل بر اساس میزان تطابق ضریب شکست نانوسیال و صفحه پلیمری و فیلم نانوکامپوزیت، و با توجه به

<sup>1</sup> Tinius Olsen

جهت انجام آزمون DSC دستگاه SA059 (محصول شرکت سنتام کشور ایران) مورد استفاده قرار گرفت.

ب- آزمون سنجش ضریب انتقال حرارت

جهت شناسایی ضریب انتقال حرارت سطوح داخلی و خارجی محصول، آزمون سنجش ضریب انتقال حرارت بر اساس ASTM D5930 [28] و به کمک دستگاه SDK-TCC001 (ساخته‌شده توسط نگارنده) (شکل 12) انجام شد. ابعاد نمونه مورد نظر  $20 \times 20 \times 3 \text{ mm}^3$  بوده است.



Fig. 12 Heat transfer conductivity measuring device used in experiments

شکل 12 دستگاه اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت مورد استفاده در آزمون حرارتی

#### 4-3-2- خواص نوری

##### الف- طیف‌سنجی فرابنفش<sup>۲</sup>

آزمون طیف‌سنجی جهت ارزیابی میزان عبور و جذب صورت‌گرفته در آلمان‌های پنجره به کمک دستگاه V670 (محصول شرکت جسکوی<sup>۳</sup> کشور آلمان)، بر اساس ASTM E1348 [29] انجام شد. این آزمون برای ترکیب‌های مختلف اجزاء شامل صفحات پلیمری ساده، به همراه و بدون فیلم نانوکامپوزیت و نانوسیال، با دو تکرار، روی نمونه‌هایی به ابعاد  $20 \times 20 \times 3 \text{ mm}^3$  انجام شد. برای نمونه حاوی سیال، نمونه به صورت مجموعه مکعب مستطیل با ابعاد دیواره  $20 \times 20 \times 3 \text{ mm}^3$ ، و فاصله 5 mm بین دو دیواره انجام شد.

##### 2-3-5- ویژگی‌های ساختاری

##### الف- ریزسنجی نوری و الکترونی روبشی<sup>۴</sup>

مشخصه‌یابی ساختاری و نانوکامپوزیت و سیال به طور جداگانه برای هر یک، جهت شناسایی ساختار این مواد انجام شد. این کار برای نانوذرات با تفرق اشعه ایکس، و به کمک دستگاه D8-Advance (محصول شرکت براکر<sup>۵</sup> کشور آمریکا)، با دو تکرار، و بر اساس ASTM D5357 [30] انجام شد. جهت انجام این آزمون، ذرات پس از آماده‌سازی مافوق صوت پودر، با توجه به مطالعات مشابه گذشته [31, 32] طی مدت 20 min، با توان 150 W، و فرآیند تفرق اشعه ایکس با مشخصات 40 kV و 20 mA انجام شد. گام روبش برای هر مرحله، در دستگاه مورد استفاده  $0.0167^\circ$  و فاصله زمانی هر گام 0.3 s بیان شده است. ابعاد شبکه کریستالی ذرات اکسید روی به کمک رابطه (1) [33] بدست آمد.



Fig. 9 PMMA sample for tensile test.

شکل 9 نمونه پلیمری مورد استفاده در آزمون کشش

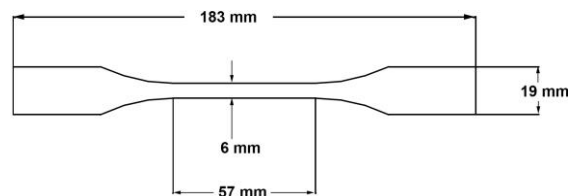


Fig. 10 Specimen dimensions for tensile test based on ASTM D638 (Thickness = 4 mm)

شکل 10 ابعاد نمونه پلیمری مورد استفاده در آزمون کشش طبق ASTM D638 (ضخامت نمونه برابر 4 mm است).

#### ب- آزمون خمش

آزمون خمش صفحات پلیمری بر اساس ASTM D790 [25] با دو بار تکرار و نرخ جابجایی  $2 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ ، در دمای  $25^\circ\text{C}$ ، روی نمونه‌ها انجام شد (شکل 11). جهت انجام این آزمون از دستگاه Tinius-Olsen ST100 استفاده شد.



Fig. 11 PMMA samples for flexure test ( $125 \times 12.7 \times 3.2 \text{ mm}^3$ )

شکل 11 نمونه پلیمری آزمون خمش با ابعاد  $125 \times 12.7 \times 3.2 \text{ mm}^3$

#### ب- آزمون ضربه

آزمون ضربه آیزود با هدف بررسی مقاومت به ضربه و چقرمگی و بر اساس ASTM D4812 [26] روی نمونه‌هایی با ابعاد  $100 \times 10 \times 4 \text{ mm}^3$ ، در دمای  $25^\circ\text{C}$  انجام شد. جهت انجام این آزمون دستگاه ضربه PIT-501A (محصول شرکت نوآندیشان صنعت و تجارت سمن کشور ایران) استفاده شد.

#### 2-3-3- خواص حرارتی

##### الف- آزمون گرماسنجی تفاضلی روبشی<sup>۱</sup>

از آنجائیکه پلی متیل متاکریلات یک پلیمر ترموپلاستیک است، تعیین محدوده دمایی شیشه‌ای شدن ( $T_g$ ) و دمای ذوب ( $T_m$ ) (محدوده دمایی فرآیندپذیری)، و دمای کریستالیزاسیون جهت انجام مراحل ساخت و تعیین محدوده دمایی کاری اهمیت خواهد داشت [27]. آزمون DSC برای پلیمر و نانوکامپوزیت، و بر اساس ASTM D3418 [26] انجام شده است. نمونه‌ها با شکل گرانول استوانه‌ای در دستگاه آزمون DSC مورد بررسی قرار گرفتند.

<sup>4</sup> Optical and Scanning Electron Microscopy (SEM)

<sup>5</sup> Bruker

<sup>1</sup> Differential Scanning Calorimetry (DSC)

<sup>2</sup> UV-Vis NIR Spectroscopy

<sup>3</sup> JASCO

جدول 6 نتایج مهم آزمون کشش نمونه پلیمری

Table 6 Important results of tensile test on polymeric samples

مقدار میانگین	پارامتر	عنوان
17.60 MPa	$S_y$	تنش تسلیم کششی
8.5 GPa	$E$	مدول الاستیسیته کششی
0.21%	$e_f$	ازدیاد طول

• آزمون ضربه

بر اساس نتایج به دست آمده از آزمون ضربه (جدول 7)، چقرمگی میانگین اندازه‌گیری شده برابر  $1.5 \frac{kJ}{m^2}$  مشاهده شده است. در اکثر مطالعات [39, 40]، پلی متیل متاکریلات معمولاً به صورت غیر خالص و با افزودنی‌های متفاوت از لحاظ استحکام ضربه‌پذیری مورد بررسی قرار گرفته‌اند، بنابراین نتایج بدست آمده در این مطالعات در مقادیر بالاتر از  $1.5 \frac{kJ}{m^2}$  قرار می‌گیرد، اما با بررسی مقدار استحکام ضربه‌ای اغلب انواع شیشه‌های متداول مورد استفاده در پنجره‌های موجود، طبق تحقیقات انجام شده [41-43] در محدوده پایین‌تر از  $1.2 \frac{kJ}{m^2}$  قرار گرفته است که تقریباً 20% پایین‌تر از مقدار بدست آمده برای پلیمر مورد استفاده است.

جدول 7 نتایج آزمون ضربه در دمای 25 °C

Table 7 Impact test results in 25 °C

نمونه	استحکام ضربه‌ای ( $kJ/m^2$ )
نمونه 1	1.55
نمونه 2	1.48
نمونه 3	1.46
نمونه 4	1.51

پ- آزمون خمش

نتایج آزمون خمش روی صفحات پلیمری در شکل 14 نمایش داده شده است. جهت محاسبه استحکام خمشی از رابطه زیر استفاده شد:

$$S_{yb} = \frac{3L \cdot F}{2bt^2} \quad (2)$$

که در آن  $S_{yb}$  استحکام خمشی،  $L$  فاصله بین دو نقطه اتکا،  $F$  نیروی محوری وارد شده،  $b$  عرض نمونه، و  $t$  ضخامت نمونه است. طبق نتایج بدست آمده در شکل 14، ابعاد نمونه مورد استفاده (شکل 11)، و با توجه به رابطه (2)، مقدار بدست آمده برای تنش تسلیم خمشی برابر  $61.007 \text{ MPa}$  می‌باشد که در مقایسه با مقدار بدست آمده در مطالعه مشابه [36] برای پلی متیل متاکریلات خالص ( $59 \text{ MPa}$ ) به میزان 3% بالاتر است. بنابراین با توجه به کاربرد مورد نظر، استفاده از این پلیمر در پنجره هوشمند منطقی به نظر می‌رسد.

2-3- آزمون فیزیکی

الف- زاویه تماس

نتایج آزمون زاویه تماس بین سیال و پلیمر در جدول 8 ارائه شده است. نمونه‌ای از تصویر این آزمون در شکل 15 نمایش داده شده است.

$$d = \frac{K \cdot \lambda}{\beta \cdot \cos \theta} \quad (1)$$

که در آن  $d$  فاصله کریستالی،  $K$  فاکتور شکل بدون بعد با مقدار نزدیک به مقدار واحد،  $\lambda$  طول موج پرتو،  $\theta$  زاویه تابش، و  $\beta$  عرض نصف مقدار بیشینه در قله است.

برای فیلم نانوکامپوزیت، آزمون ساختاری با ریزسنجی الکترونی روبشی و به کمک دستگاه Philips XL30 (محصول دانشگاه لون<sup>3</sup> کشور بلژیک)، با دوبار تکرار، و بر اساس ASTM E2015 [34] انجام شد. بنابراین ریخت‌شناسی و ترکیب شیمیایی فیلم نانوکامپوزیت با مکش پائین و ولتاژ 10 kV انجام شد. برای نانوسیال، روش پراکندگی نور پویا<sup>2</sup> بر اساس ASTM E2490 [35]، و به کمک دستگاه Nano-Partica SZ 100V2 (محصول شرکت هوریبای<sup>3</sup> کشور ژاپن) با دو بار تکرار انجام شد. تحلیل اندازه ذرات نانو در محلول به کمک پرتوری لیزر با طول موج استاندارد انجام شد.

3- نتایج و بحث

3-1- آزمون‌های مکانیکی

الف- صفحات پلیمری

• آزمون کشش

نتایج آزمون کشش انجام شده روی صفحات پلیمری در شکل 13 نشان داده شده است. مقدار میانگین بدست آمده نیز در جدول 6 ارائه شده است. با توجه به کاربرد مورد نظر و مطالعه انجام شده در زمینه ویژگی‌های مکانیکی پلیمر به کاررفته [36]، و مقایسه مقادیر بدست آمده با استحکام تسلیم شیشه متداول مورد استفاده در پنجره‌های کنونی، نتایج قابل استناد می‌باشد. طبق مطالعه انجام شده در زمینه ویژگی‌های مکانیکی شیشه متداول مورد استفاده در اکثر پنجره‌ها [37, 38]، مقدار استحکام تسلیم برابر  $7 \text{ MPa}$  می‌باشد که در مقایسه با مقدار بدست آمده برای پلیمر مورد نظر (جدول 6)، تقریباً به میزان 58% پایین‌تر است. بنابراین پلیمر مورد نظر استحکام لازم را در پنجره هوشمند پیشنهادی فراهم می‌نماید.

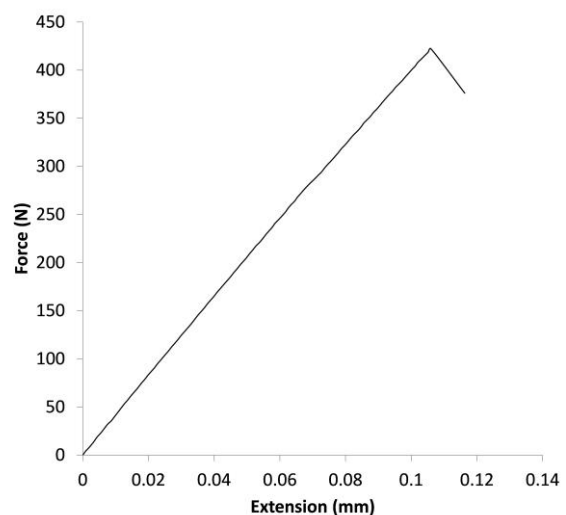


Fig. 13 Polymeric sample tensile test results.

شکل 13 نتایج آزمون کشش نمونه پلیمری

<sup>3</sup> Horiba

<sup>1</sup> KU Leuven

<sup>2</sup> Dynamic Light Scattering (DLS)



ویژگی خودتمیزشوندگی نخواهد شد و باید تعادلی بین وضعیت سیال‌گریزی و قابلیت تمیزشوندگی با سیال و پاک‌سازی آلودگی‌های خشک وجود داشته باشد. به عبارت دیگر ویژگی سیال‌گریزی در صورتی که سطح در معرض آلودگی هوای مرطوب نباشد، تأثیر کمتری خواهد داشت. از آنجائیکه سطح خارجی پنجره می‌تواند در معرض آلودگی قرار داشته باشد، امکان چسبندگی ذرات معلق وجود داشته، به واسطه سیال‌دوستی پائین، نیاز به شستشو وجود دارد. البته سیال‌گریزی سطوح داخل پنجره باعث خودتمیزشوندگی داخلی پنجره می‌شود، زیرا سطوح داخلی صرفاً در معرض سیال مورد نظر قرار خواهند داشت. همچنین همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد مقدار زاویه برای فیلم نانوکامپوزیت و سیال، در هر مورد افزایش یافته است که سیال‌گریزی بیشتری را نشان می‌دهد و مقدار بیشینه برای فیلم نانوکامپوزیت و نانوسیال بدست آمده است.

### 3-3- آزمون ساختارسنجی

#### الف- نانوذرات

- آزمون تفرق اشعه ایکس

نتایج آزمون تفرق اشعه ایکس روی نانوذرات در شکل 16 اشاره شده است.

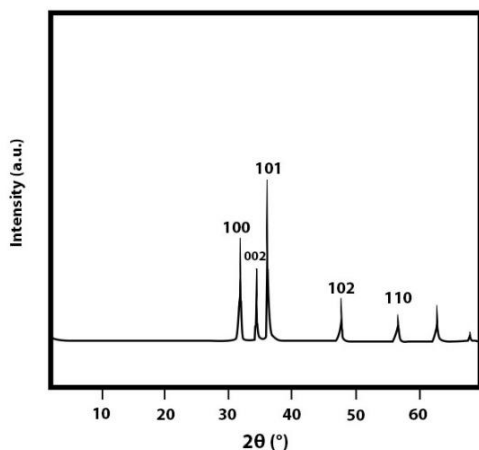


Fig. 16 XRD pattern obtained for ZnO nano-particles with Ethanol.

شکل 16 الگوی تفرق اشعه ایکس بدست‌آمده برای نانوذرات اکسید روی با اتانول

- آزمون ریزسنجی الکترونی روبشی

یک ناحیه از نتایج آزمون ریزسنجی الکترونی نانوکامپوزیت در شکل 17 نمایش داده شده است. این تصویر نشان‌دهنده دانه‌ای شدن عمومی نانوذرات اکسید روی در نانوکامپوزیت است.

طبق نتایج بدست‌آمده در شکل 16 ابعاد ذرات اکسید روی در داخل محدوده استاندارد مربوط به نانوکامپوزیت و نانوسیال مورد نظر بوده است. همچنین، همان‌طور که در شکل 17 نشان داده شده است، سطح بدست آمده از فیلم نانوکامپوزیت در شرایط مناسبی قرار دارد. این امر در مقایسه با نتایج مطالعات مشابه نیز قابل اثبات است. با توجه به مطالعه انجام شده توسط هم‌مانی<sup>1</sup> [19] بر روی نانو ذرات اکسید روی، الگوی تفرق اشعه ایکس مشابه با شکل 16 می‌باشد. در این مطالعه قید شده است که با توجه به الگوی بدست آمده و

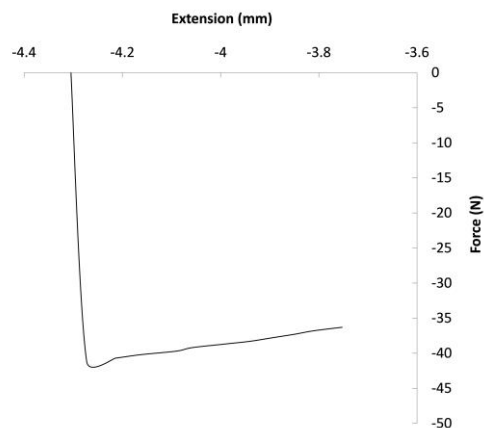


Fig. 14 Polymeric sample flexural test results.

شکل 14 نتیجه آزمون خمش نمونه پلیمری



Fig. 15 Photograph of a contact angle test between polymeric sample and water.

شکل 15 تصویر زاویه تماس نمونه پلیمری و آب

جدول 8 نتایج مهم آزمون زاویه تماس

Table 8 Contact angle test results.

نمونه	زاویه تماس (مقدار میانگین) (°)
صفحات پلیمری و آب	74
صفحات پلیمری و سیال	76
صفحات پلیمری و نانوسیال	78
فیلم نانوکامپوزیت و آب	76
فیلم نانوکامپوزیت و سیال	79
فیلم نانوکامپوزیت و نانوسیال	81

با توجه به نتایج بدست‌آمده در جدول 8، نتایج مربوط به صفحات پلیمری و آب طبق مطالعه انجام‌شده [44] که در آن این زاویه به طور تقریبی 69° معرفی شده است، منطقی بوده است. همچنین در این مطالعه مطرح شده است که این زاویه مربوط به وضعیت آب‌دوستی این پلیمر می‌شود، بنابراین زوایای بالاتر بدست‌آمده در جدول 8 برای فیلم نانوکامپوزیت و نانوسیال باعث نزدیک شدن به وضعیت سیال‌گریزی می‌شود که ویژگی‌های خودتمیزشوندگی را تسهیل می‌کند. البته باید توجه داشت که لزوماً سیال‌گریزی بالا باعث ایجاد

<sup>1</sup> Hammani

مطالعات قبلی [45]، اندازه نانو ذرات در حد 40 nm و کمتر می‌باشد که از آن در مراحل بعدی مطالعه، جهت ساخت فیلم نانوکامپوزیت پلی متیل متاکریلات-اکسید روی استفاده شده است. بنابراین نانوذرات حاصل در این آزمایش نیز در محدوده مناسب برای ساخت فیلم نانوکامپوزیت مورد قرار داشته است.

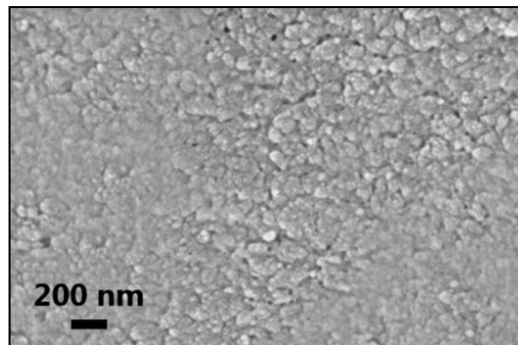


Fig. 17 SEM photo obtained from nano-composite film.

شکل 17 تصویر ریزسنجی روبش الکترونی بدست آمده از فیلم نانوکامپوزیت

ب- نانوسیال

• آزمون پراکنش نوری پویا

نتایج آزمون DLS روی نانوسیال، در محدوده 0 – 100 nm، پراکندگی قابل قبول نانوذرات را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که ابعاد بخش عمده ذرات بین 3.5 nm تا 12 nm بوده است (شکل 18) که با توجه به مطالعه انجام شده توسط ساگدوان [46] در محدوده قابل قبول در داخل نانوسیال اکسید روی محسوب می‌شود. در این مطالعه دیده می‌شود که ابعاد نانوذرات اکسید روی با کاربرد حرارتی مورد نظر بین 35 nm تا 50 nm بوده است که عملکرد مطلوب را از لحاظ انتقال حرارت در نانوکامپوزیت ساخته شده داشته است، همچنین طبق مطالعات انجام شده در زمینه عملکرد نوری و اندازه‌گیری درصد عبور نور در ترکیبات حاوی نانوذرات اکسید روی [47-49]، این نتیجه به دست آمده است که اندازه نانوذرات کمتر از 40 nm، عملکرد نوری مورد نظر (عبور 80 تا 90 درصد) را ارائه می‌دهد.

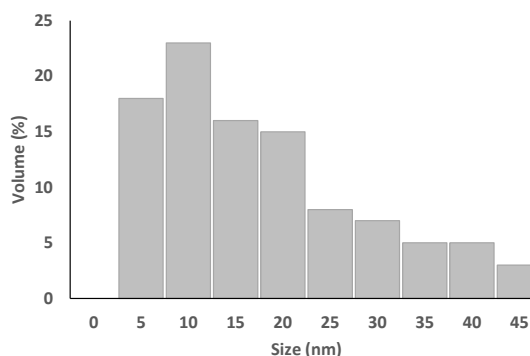


Fig. 18 ZnO Nano-particle size percentage in nanofluid

شکل 18 توزیع ابعاد نانوذرات اکسید روی در نانوسیال

### 3-4- آزمون حرارتی

الف- آزمون گرماسنجی تفاضلی روبشی

نتیجه آزمون گرماسنجی روبشی تفاضلی روی پلیمر مورد نظر در شکل نشان داده شده است. سایر نتایج با مقادیر متفاوت درصد اکسید روی در جدول 9 نمایش داده شده‌اند. همان‌طور که داده‌ها نشان می‌دهد،  $T_g$  در فیلم نانوکامپوزیت بالاتر از پلیمر خالص است. این مقدار با افزایش درصد نانوذرات اکسید روی افزایش یافته است.  $T_g$  پلیمر خالص در حدود  $90.5^\circ\text{C}$  است. همچنین محدوده شیشه‌ای شدن و ذوب پلیمر برای ساخت آن مناسب می‌باشد. نکته مهم این نتایج آن است که  $T_g$  با افزایش درصد اکسید روی افزایش یافته است که می‌تواند به دلیل کمبود حلالیت پلیمر در حلال و کاهش توزیع وزن مولکولی باشد. این قضیه به واسطه رابطه مستقیم مقدار  $T_g$  با قابلیت جابجایی زنجیره پلیمر است [50].

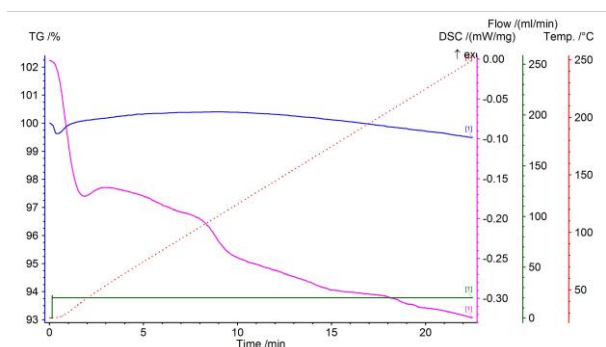


Fig. 19 DSC test result on PMMA.

شکل 19 نتیجه آزمون گرماسنجی تفاضلی روبشی روی پلیمر

گرچه  $T_g$  لزوماً روی عملکرد پنجره تأثیر ندارد، لیکن آگاهی از ویژگی‌های حرارتی آن می‌تواند باعث شناسایی محدوده ایمن دمایی لازم در شرایط کاری باشد.

جدول 9 نتایج آزمون گرماسنجی تفاضلی روبشی روی نانوکامپوزیت (مقادیر درصد اکسید روی در جدول اشاره شده است).

Table 9 DSC test results on nano-composite (ZnO percentages referred in Table 4)

نمونه	$T_g$ ( $^\circ\text{C}$ )
NCS <sub>1</sub>	90.5
NCS <sub>2</sub>	94.6
NCS <sub>3</sub>	97.8

ب- آزمون ضریب انتقال حرارت

نتایج آزمون ضریب انتقال حرارت رسانشی در جدول ارائه شده است. طبق این نتایج، ضریب انتقال حرارت رسانشی با افزایش درصد نانوذرات اکسید روی اندکی افزایش یافته است. گرچه این پارامتر تأثیر قابل توجهی روی عملکرد مطلوب پنجره ندارد، لیکن امکان دارد پارامترهایی از قبیل اتلاف حرارت یا ورود حرارت ناخواسته از محیط خارج تحت تأثیر آن قرار گیرد. با

<sup>1</sup> Sagadevan

جدول 11 نتایج آزمون عبور نور ( $\lambda = 500 \text{ nm}$ )

Table 11 Light transmission test results

درصد عبور نور (میانگین)	نمونه
87	صفحات پلیمری ساده
45	صفحات پلیمری چندوجهی
82	صفحه پلیمری ساده و نانوکامپوزیت (NCS <sub>3</sub> ) (طبق جدول)
85	صفحه پلیمری ساده و نانوسیال (NFS <sub>3</sub> ) (طبق جدول)
80	مجموعه کامل (صفحات پلیمری چندوجهی، فیلم نانوکامپوزیت (NCS <sub>3</sub> )، و نانوسیال (NFS <sub>3</sub> )) (طبق جدول و جدول)

### 3-6-1- مقایسه مکانیزم‌های مورد استفاده در پنجره‌های هوشمند

در اینجا مقایسه مختصری از لحاظ مکانیزم و قابلیت‌های پنجره، بین نمونه‌های موجود پنجره هوشمند و پنجره هوشمند پیشنهادی انجام شده است. جدول 12 مواد و سازوکارهای مورد استفاده برای تغییر وضعیت پنجره‌ها را ارائه می‌دهد. مطابق جدول 12 مهم‌ترین معایب پنجره‌های هوشمند موجود، صرف نظر از محدوده کوچک ضریب بهره حرارت خورشیدی<sup>1</sup> در هر دو حالت کدر و شفاف، مربوط به هزینه بالای مواد به کار رفته و مکانیزم پیچیده آن‌ها است. در پنجره پیشنهادی، پلی متیل متاکریلات به عنوان صفحه شفاف پنجره به راحتی در دسترس بوده، مکانیزم تغییر حالت مبتنی بر انطباق ضریب شکست صفحه و نانوسیال، به همراه عملیات تزریق و تخلیه، ساز و کار این پنجره را تا حد امکان تسهیل نموده است. همچنین از آنجائیکه استفاده از نانوکامپوزیت، عمدتاً به بهبود خواص خود تمیزشوندگی و فرآیند فوتوکاتالیز کمک می‌کند، می‌تواند به عنوان یک جزء اختیاری این پنجره محسوب شود.

جدول 12 مقایسه اجمالی مواد و مکانیزم‌های پنجره هوشمند پیشنهادی با سایر انواع پنجره‌های هوشمند موجود

Table 12 Brief comparison of materials and mechanisms of current smart windows and proposed type

پنجره هوشمند	اجزا	مکانیزم
الکتروکرومیک	شیشه چند لایه	ارتباط مستقیم ولتاژ اعمال شده با سطح کدورت ناشی از انتقال یون
فتوکرومیک	شیشه یا پلی کربنات، یا پلیمر خاص دیگر	واکنش شیمیایی برگشت پذیر بین برخی از امان‌های داخل شیشه از قبیل کلر و نقره جهت کاهش شفافیت
گازوکرومیک	پلیمر، اکسید تنگستن، و گاز هیدروژن	واکنش شیمیایی برگشت پذیر گاز و پلیمر جهت کاهش شفافیت
سایر انواع	هیدروژن، شیشه کم گسیل، ...	کاهش شفافیت به کمک فرآیند نوین شیمیایی، الکتریکی، و ...
پنجره پیشنهادی	پلیمر، نانوسیال، نانوکامپوزیت	عدم تطابق ضریب شکست پلیمر و نانوسیال جهت کاهش شفافیت

### 3-6-2- میزان عبور نور

در این بخش عملکرد پنجره‌های هوشمند موجود و پنجره هوشمند پیشنهادی از لحاظ درصد عبور نور مورد مقایسه قرار گرفته است. این کار با در نظر گرفتن یک پارامتر بی بعد با عنوان نسبت عبور نور ( $R_p$ ) انجام شده است:

توجه به مقادیر به دست آمده در جدول و مقایسه آن‌ها با ضریب انتقال حرارت رسانشی مواد رسانا و عایق [51, 52]، به طور کلی می‌توان گفت که بیش از آن که صفحات پنجره به عنوان هادی حرارت عمل کند، به عنوان عایق ضعیف عمل خواهند کرد.

جدول 10 نتایج آزمون ضریب انتقال حرارت (مقادیر درصد اکسید روی در جدول 4 اشاره شده است).

Table 10 Thermal conductivity coefficient test results (ZnO percentages refereed in Table 4)

ضریب انتقال حرارت	نمونه
رسانشی (میانگین) ( $\frac{W}{m \cdot K}$ )	
0.193	صفحات پلیمری
0.215	فیلم نانوکامپوزیت (NCS <sub>1</sub> )
0.220	فیلم نانوکامپوزیت (NCS <sub>2</sub> )
0.291	فیلم نانوکامپوزیت (NCS <sub>3</sub> )

### 3-5- آزمون اپتیکی

شکل 20 و جدول 11 نتایج آزمون طیفسنجی عبوری پلیمرها، نانوکامپوزیت‌ها، و نانوسیال را در محدوده نور مرئی و فرابنفش، در دمای اتاق نشان می‌دهد. نتایج صفحات پلیمری ساده و نقش دار به همراه و بدون سیال، با مقادیر درصد مختلف نانوذرات اکسید روی در جدول 11 اشاره شده است. طبق نتایج حاصل، محدوده درصد عبور نور برای حالت کدر و شفاف بین 30 تا 80 درصد بوده است. لازم به ذکر است که حالت کدر زمانی رخ می‌دهد که پنجره حاوی سیال نباشد و حالت شفاف زمانی رخ می‌دهد که مجموعه (به همراه سیال) مورد استفاده قرار گیرد. بررسی و تحلیل کمی این نتایج به همراه مقایسه با سایر پنجره‌های هوشمند در بخش بعد ارائه شده است.

### 3-6- عملکرد پنجره

در این بخش عملکرد پنجره هوشمند پیشنهادی به طور کمی و تحلیلی با کمک دو پارامتر بدون بعد مربوط به میزان عبور نور و اختلاف دما مورد بررسی قرار گرفته، با سایر نمونه‌ها مقایسه شده است.

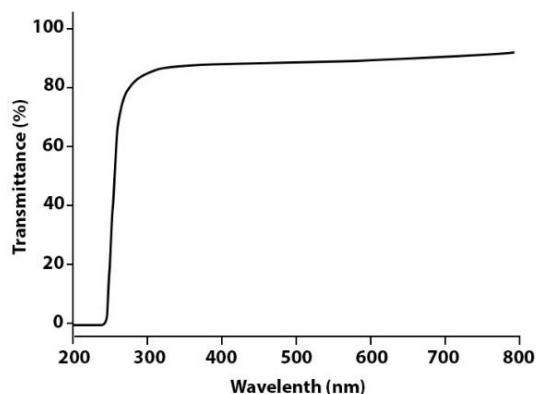


Fig. 20 UV-Vis transmission curve, obtained for simple polymeric panels

شکل 20 منحنی آزمون طیفسنجی عبوری بدست آمده برای صفحه پلیمری

<sup>1</sup> Solar Heat Gain Coefficient (SHGC)

استفاده از  $R_{\Delta}$ ، یک اتاق آزمایشی فراهم شد تا تغییرات دمای آن در مدت زمان معین مورد بررسی قرار گیرد. به منظور دستیابی به پایداری دما، این آزمایش طی مدت زمان یک ساعت انجام شد، در حالی که اتاق از لحاظ حرارتی تحت کنترل قرار گرفت؛ به طوری که تنها نور خورشید مؤثرترین منبع حرارتی مؤثر بر تغییرات دما واقع شود. نتایج تجربی و عددی جدول 14 برای پنجره هوشمند پیشنهادی بدست آمد. از نرم‌افزار Energy Plus نیز به عنوان ابزار شبیه‌سازی جهت محاسبه نتایج عددی استفاده شد. ویژگی‌های نوری و حرارتی ضروری آزمایش شده در بخش‌های قبل برای محاسبه نتایج، در نرم‌افزار تعریف شد. اختلاف قابل قبولی بین نتایج تجربی و عددی جدول 14 مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده قابلیت اطمینان نتایج شبیه‌سازی است.

**جدول 14**  $R_{\Delta}$  تجربی و محاسبه‌شده بین ساعات 00:12 تا 00:13 برای پنجره هوشمند پیشنهادی

**Table 14** Experimental and predicted value of  $R_{\Delta}$  during 12:00 to 13:00 for proposed smart window.

نتایج تجربی			نتایج محاسبه‌شده			حالت پنجره	شرایط کیفی دمای محیط
$R_{\Delta}$	$T_I$	$T_E$	$R_{\Delta}$	$T_I$	$T_E$		
0.06	33	35	0.09	32	35	شفاف	گرم
0.26	26	35	0.23	27	35	کدر	گرم
0.05	19	20	0.1	18	20	شفاف	سرد
0.3	14	20	0.25	15	20	کدر	سرد

در مورد  $R_{\Delta}$  باید توجه داشت که در هوای گرم، مقادیر بالا و در هوای سرد مقادیر پایین بیانگر عملکرد بهتر پنجره هوشمند می‌باشد. بنابراین باید پیش از مقایسه مقادیر  $R_{\Delta}$  برای پنجره‌های هوشمند مختلف، ابتدا شرایط دمایی هوا در نظر گرفته شود.

مقادیر پیش‌بینی شده  $R_{\Delta}$  بر اساس مقادیر  $P_H$  و  $P_L$ ، و سایر ویژگی‌های نوری و حرارتی پنجره‌های هوشمند محاسبه شده، در جدول و شکل مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. طبق نتایج شکل 22، پنجره هوشمند پیشنهادی در هوای گرم بالاتر و در هوای سرد پایین‌تر از سایر پنجره‌های هوشمند است که بیان‌کننده عملکرد قابل اعتماد نمونه پیشنهادی از لحاظ بازده انرژی است. بر این اساس، هر چه مقدار اختلاف  $R_{\Delta}$  هوای سرد و گرم بالاتر باشد، عملکرد پنجره هوشمند بهتر محسوب می‌شود. با توجه به نتایج جدول 15 این اختلاف برای پنجره پیشنهادی به مقدار 0.21 رسیده است که 2.1 برابر پنجره هوشمند فوتوکرومیک با بالاترین اختلاف (0.1) در سایر پنجره‌ها می‌باشد.

با توجه به مقادیر به دست آمده برای پارامترهای  $R_{\Delta}$  و  $R_p$ ، نمونه پیشنهادی پنجره هوشمند از لحاظ مصرف انرژی لازم جهت تنظیم دما در مقایسه با سایر انواع پنجره‌های هوشمند مورد توجه می‌باشد. علاوه بر این، طراحی کارآمد مکانیزم تغییر حالت، باعث مستقل شدن حالت پنجره از وضعیت دمایی آن می‌شود، بنابراین می‌توان با صرف انرژی اندک، تحریک لازم را برای انجام فرآیند کم‌مصرف و برگشت‌پذیر تغییر حالت پنجره نیز انجام داد.

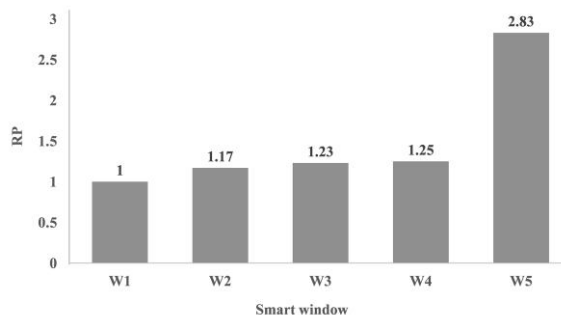
$$R_p = \frac{P_H}{P_L} \quad (1)$$

که در آن  $P_H$  و  $P_L$  درصد عبور نور به ترتیب در وضعیت شفاف و کدر پنجره هستند. مقادیر  $R_p$  برای پنجره‌های مختلف در جدول 13 و شکل 21 مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

**جدول 13** انواع مختلف پنجره هوشمند [3, 8, 53]

**Table 13**  $R_p$  for different types of smart windows [3, 8, 53]

$R_p$	$P_H$	$P_L$	پنجره هوشمند
1	0.9	0.9	شیشه ( $W_1$ )
1.17	0.8	0.6	گازوکرومیک ( $W_2$ )
1.23	0.74	0.6	الکتروکرومیک ( $W_3$ )
1.25	0.7	0.56	فوتوکرومیک ( $W_5$ )
2.83	0.85	0.3	پنجره پیشنهادی ( $W_5$ )



**Fig. 21**  $R_p$  for different types of smart windows according to Table 13

شکل 21  $R_p$  پنجره‌ها هوشمند مختلف طبق جدول 13

همان‌طور که در شکل 21 دیده می‌شود، پارامتر  $R_p$  برای پنجره هوشمند پیشنهادی مقدار بالاتری را نسبت به سایر موارد بررسی شده به خود اختصاص می‌دهد که نشان‌دهنده اختلاف بیشتر درصد عبور نور در دو حالت شفاف و کدر است. به عبارت دیگر وسعت تغییرات درصد عبور نور در پنجره پیشنهادی، تقریباً 2.2 برابر حداکثر وسعت این تغییرات برای سایر پنجره‌های هوشمند است.

### 3-6-3- میزان اختلاف دما

در اینجا پارامتر بدون بعد تفاضل دما ( $R_{\Delta}$ ) جهت مقایسه دقیق‌تر عملکرد پنجره پیشنهادی نسبت به سایر پنجره‌های هوشمند، در وضعیت هوای گرم و سرد، تعریف و محاسبه شده است:

$$R_{\Delta} = \frac{|\Delta T|}{T_E} = \frac{|T_E - T_I|}{T_E} \quad (1)$$

که در آن  $T_I$  و  $T_E$  به ترتیب دمای خارجی و داخلی اتاق مورد آزمایش هستند. این پارامتر میزان انتقال نور خورشید (میزان شفافیت پنجره) را در هوای سرد، و میزان عدم انتقال نور خورشید (میزان کدورت پنجره) را برای هوای گرم بیان می‌کند. به منظور ارزیابی عملکرد پنجره هوشمند پیشنهادی با

تغییر حالت پنجره پیشنهادی با سایر پنجره‌های هوشمند، این مدت زمان برای پنجره‌ای با بیشترین مساحت عنوان شده در مطالعات مربوط به سایر پنجره‌های هوشمند و با توجه به دبی ورودی نانوسیال بدست آمد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، پنجره در ساز و کار پیشنهادی به صورتی عملی می‌کند که وجود با عدم وجود سیال (نانوسیال) داخل پنجره و تطابق ضریب شکست بین سیال (نانوسیال) و صفحات، باعث شفافیت یا کدورت آن می‌شود.

گرچه افزایش مساحت پنجره و هزینه‌بر بودن نسبی نانوسیال مورد استفاده می‌تواند باعث افزایش زمان مورد نیاز به تغییر حالت پنجره و افزایش هزینه تمام‌شده آن گردد، لیکن این مسائل را می‌توان به کمک تدابیری مرتفع نمود. به عنوان مثال افزایش توان پمپ تغذیه می‌تواند باعث کاهش زمان تغذیه و تغییر حالت پنجره شود لیکن باید به هزینه پمپ مورد استفاده نیز توجه نمود. همچنین استفاده از سیال یا نانوسیال ارزان‌تر نیز می‌تواند باعث کاهش هزینه سیال مورد استفاده گردد که این امر نیاز به بررسی و آزمایش سیال‌ها و نانوسیال‌های مختلف و میزان تطابق آن‌ها با صفحات پلیمری مورد استفاده خواهد داشت. البته استفاده از روش سیال کدر و پلیمر شفاف نیز به عنوان مکانیزم جایگزین می‌تواند منجر به تسهیل و تسریع عملکرد پنجره و کاهش هزینه نهایی شود که این قضیه نیز مستلزم انجام مراحل تحقیقاتی مجزاً خواهد بود.

#### 4- نتیجه‌گیری

در این مطالعه مراحل طراحی، ساخت، و مشخصه‌یابی پنجره هوشمند مبتنی بر میزان تطابق ضریب شکست نانوسیال و صفحات پلیمری، ارائه شد. مواد به کار رفته در این پنجره شامل صفحات پلیمر پلی متیل متاکریلات، متیل سالیسیلات به عنوان سیال، و نانوذرات اکسید روی بوده است. نانوذرات مذکور جهت ساخت نانوکامپوزیت و نانوسیال مورد استفاده قرار گرفته است. فیلم نانوکامپوزیت (نانوذرات اکسید روی به همراه پلی متیل متاکریلات) به عنوان پوشش صفحات، و نانوسیال (نانوذرات اکسید روی به همراه سیال متیل سالیسیلات) به عنوان مایع تطبیق‌دهنده ضریب شکست مورد استفاده قرار گرفته‌اند. پس از طراحی شکل هندسی مطلوب و ساخت نمونه اولیه این پنجره هوشمند با مدل‌سازی انجام‌شده و تزریق، آزمایشات مشخصه‌یابی روی آن صورت گرفت. با توجه به نتایج آزمایشات و تحلیل‌های انجام‌گرفته در رابطه با عملکرد نوری و حرارتی این محصول، نتایج زیر قابل ذکر می‌باشد:

- قابلیت دسترسی مواد مورد استفاده پنجره هوشمند پیشنهادی شامل پلیمر متیل متاکریلات، سیال متیل سالیسیلات، و نانوذرات اکسید روی، همراه با نحوه عملکرد این پنجره مبتنی بر میزان مطابقت ضریب شکست نور المان‌های تشکیل‌دهنده آن، در مقایسه با سایر مکانیزم‌های پیچیده به کار رفته در پنجره‌های هوشمند موجود، منجر به تسهیل روند ساخت و تولید آن شده است.
- با توجه به پارامتر نسبت عبور نور معرفی‌شده ( $R_p$ )، وسعت تغییرات درصد عبور نور در پنجره پیشنهادی، تقریباً 2.2 برابر حداکثر وسعت این تغییرات برای سایر پنجره‌های هوشمند است

جدول 15 مقادیر محاسبه‌شده  $R_\Delta$  بین ساعت 00:12 تا 00:13 برای پنجره‌های هوشمند مختلف

Table 15 Predicted value of  $R_\Delta$  during 12:00 to 13:00 for different smart windows.

پنجره هوشمند	هوای گرم (حالت کدر)	هوای سرد (حالت شفاف)
شیشه ( $W_1$ )	0.09	0.08
گازوکرومیک ( $W_2$ )	0.18	0.14
الکتروکرومیک ( $W_3$ )	0.19	0.13
فوتوکرومیک ( $W_5$ )	0.21	0.11
پنجره پیشنهادی ( $W_5$ )	0.26	0.05

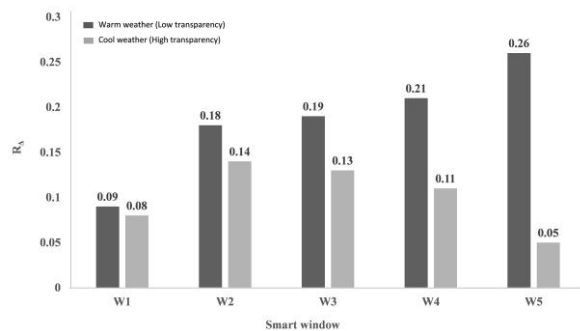


Fig. 22 Comparison of predicted  $R_\Delta$  for different smart windows in warm (low transparency) and cool (high transparency) weather conditions

شکل 22 مقایسه  $R_\Delta$  محاسبه‌شده برای پنجره‌های هوشمند در شرایط هوای گرم (شفافیت پائین) و سرد (شفافیت بالا)

#### 3-6-4- مدت زمان تغییر حالت

باید توجه داشت که یکی از ویژگی‌های مهم پنجره هوشمند، زمان مورد نیاز جهت تغییر حالت آن است. طبق مطالعات گذشته این روند در پنجره‌های ترموکرومیک، الکتروکرومیک، و گازوکرومیک به واسطه فرآیندهای شیمیایی مورد نیاز نسبتاً زمان‌بر بوده است. این قضیه در مورد سایر انواع پنجره‌های هوشمند نیز به کلی مرتفع نشده است. برای مثال پنجره‌های هوشمند حاوی هیدروژل برای تغییر حالت خود نیاز به مدت زمانی در حدود 40 min دارد تا به تعادل دمایی رسیده، تغییر حالت به طور کامل انجام گیرد [54]. در نوع پیشرفته‌تر این پنجره که حاوی میکروژل است، این زمان حدوداً به 4 min کاهش یافته است [55]. همچنین این مدت زمان در مورد پنجره حاوی سلولز متیل هیدروکسی پروپیل که بر اساس تغییرات دما کار می‌کند، در حدود 6 min است [56]. گرچه تلاش‌هایی که در این مطالعات دیده می‌شود در جهت کاهش این مدت زمان بوده است، لیکن همواره این مدت زمان بیش از حدود 2 min بوده است، در حالیکه در پنجره پیشنهادی، این مدت زمان به واسطه استفاده از مکانیزم ساده تزریق و تخلیه به حدود 1 min کاهش یافته است. مدت زمان تغییر حالت پنجره برابر با مدت زمان پر شدن پنجره از نانوسیال مورد استفاده است. بدین ترتیب دبی ورودی نانوسیال و حجم پنجره دو فاکتور مؤثر محسوب خواهد شد. جهت انجام مقایسه صحیح مدت زمان

[12] Hu, K., Blair, A. D., Piechota, E. J., Schauer, P. A., Sampaio, R. N., Parlane, F. G. L., Meyer, G. J. and Berlinguette, C. P., "Kinetic Pathway for Interfacial Electron Transfer from a Semiconductor to a Molecule" *Nature Chemistry*, Vol. 8, No. 9, pp. 853-859, 2016.

[13] Wang, J., Zhang, L., Yu, L., Jiao, Z., Xie, H., Lou, X. W. D. and Sun, X. W., "A Bi-Functional Device for Self-Powered Electrochromic Window and Self-Rechargeable Transparent Battery Applications" *Nature communications*, Vol. 5, No. 1, pp. 1-7, 2014.

[14] Wu, L. Y. L., Zhao, Q., Huang, H. and Lim, R. J., "Sol-Gel Based Photochromic Coating for Solar Responsive Smart Window" *Surface and Coatings Technology*, Vol. 320, pp. 601-607, 2017.

[15] Feng, W., Zou, L., Gao, G., Wu, G., Shen, J. and Li, W., "Gasochromic Smart Window: Optical and Thermal Properties, Energy Simulation and Feasibility Analysis" *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 144, pp. 316-323, 2016.

[16] Sabry, M., Eames, P. C., Singh, H. and Wu, Y., "Smart Windows: Thermal Modelling and Evaluation" *Solar Energy*, Vol. 103, pp. 200-209, 2014.

[17] Javad, K. and Navid, G., "Thermal Comfort Investigation of Stratified Indoor Environment in Displacement Ventilation: Climate-Adaptive Building with Smart Windows" *Sustainable Cities and Society*, Vol. 46, pp. 101354, 2019.

[18] Zettl, M., Mayer, O., Klampaftis, E. and Richards, B. S., "Investigation of Host Polymers for Luminescent Solar Concentrators" *Energy Technology*, Vol. 5, No. 7, pp. 1037-1044, 2017.

[19] Hammami, S., Barhoum, A. and Bechelany, M., "Fabrication of Pmma/Zno Nanocomposite: Effect of High Nanoparticles Loading on the Optical and Thermal Properties" *Journal of Materials Science*, Vol. 53, No. 3, pp. 1911-1921, 2018.

[20] Sun, D., Miyatake, N. and Sue, H.-J., "Transparent Pmma/Zno Nanocomposite Films Based on Colloidal Zno Quantum Dots" *Nanotechnology*, Vol. 18, pp. 215606, 2007.

[21] Dai Prè, M., Martucci, A., Martin, D. J., Lavina, S. and Di Noto, V., "Structural Features, Properties, and Relaxations of Pmma-Zno Nanocomposite" *Journal of Materials Science*, Vol. 50, No. 5, pp. 2218-2228, 2015.

[22] Kalantari, S., Amini, M. and Shokoohfar, A., "Synthesis, Characterization and Application of Mesoporous Silica/Maghemite Nanocomposite in Removal of Heavy Metal Ions from Aqueous Solution" *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 7, No. 3, pp. 1013-1020, 2020.

[23] Kadkhodae, M., Abdollah-zadeh, A., Assadi, H. and Seraj, R. A., "Investigation of Tribological Properties of Zn/Zno Nanocomposite Targets Produced by Cold Spray Process" *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 7, No. 2, pp. 823-832, 2020.

[24] ASTM, "Annual Book of Astm Standards: Tests for Chemical, Physical, and Optical Properties ; Appearance. Paints, Related Coatings, and Aromatics. Paint", American Society for Testing and Materials, 2012.

[25] ASTM, "Volume 08.01 Plastics (I): C1147 D3159", ASTM International, 2012.

[26] ASTM, "Volume 08.02 Plastics (Ii): D3222-D5083", American Society for Testing and Materials, 2012.

[27] Soltani, M., Yousefpoor, M. and Taherian, Z., "Design, Preparation, Characterization and Biological Investigation of Sodium Alginate/Flourohydroxyapatite Composite Scaffold for Bone Tissue Engineering Application" *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No. 3, pp. 481-490, 2019.

[28] ASTM, "Volume 08.03 Plastics (Iii): D5117 - Latest; Reinforced Plastic Piping Systems and Chemical Equipment; Plastic Building Products", American Society for Testing and Materials, 2016.

که دلیل عمده آن تطابق ویژگی‌های پلیمر و نانوسیال، و مکانیزم تغییر حالت مورد استفاده می‌باشد.

- با توجه به پارامتر نسبت تفاضل دما ( $R_{\Delta}$ )، عملکرد پنجره پیشنهادی در حیطه انرژی، 2.1 برابر عملکرد بیشینه سایر پنجره‌های هوشمند بوده است که این امر به طور مستقیم باعث کاهش مصرف انرژی تعدیل دما در فصول گرم و سرد می‌شود.
- روش تحقیق نشان داده است که زمان تغییر حالت پنجره هوشمند ارائه شده در مقایسه با سایر پنجره‌های هوشمند موجود به کمتر از 1 دقیقه کاهش یافته است که به واسطه استفاده از مکانیزم تزریق-تخلیه ساده است، البته مساحت پنجره و سرعت جریان سیال نیز دو عامل تأثیرگذار بر این امر هستند.

### 5-تقدیر و تشکر

این مقاله تحت حمایت صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور<sup>1</sup> با شماره طرح 97025260 نگارش یافته است.

### 6-منابع

[1] Allen, K., Connelly, K., Rutherford, P. and Wu, Y., "Smart Windows—Dynamic Control of Building Energy Performance" *Energy and Buildings*, Vol. 139, pp. 535-546, 2017.

[2] Donaldson, L., "Cheaper and Easier Smart Windows" *Materials Today*, Vol. 21, No. 6, pp. 584, 2018.

[3] Sala, R. L., Gonçalves, R. H., Camargo, E. R. and Leite, E. R., "Thermosensitive Poly(N-Vinylcaprolactam) as a Transmission Light Regulator in Smart Windows" *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 186, pp. 266-272, 2018.

[4] Demir, M. M., Koynov, K., Akbey, Ü., Bubeck, C., Park, I., Lieberwirth, I. and Wegner, G., "Optical Properties of Composites of Pmma and Surface-Modified Zincite Nanoparticles" *Macromolecules*, Vol. 40, No. 4, pp. 1089-1100, 2007.

[5] Hoffmann, S., Lee, E. S. and Clavero, C., "Examination of the Technical Potential of near-Infrared Switching Thermo-chromic Windows for Commercial Building Applications" *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 123, pp. 65-80, 2014.

[6] Warwick, M. E. A., Ridley, I. and Binions, R., "The Effect of Transition Gradient in Thermo-chromic Glazing Systems" *Energy and Buildings*, Vol. 77, pp. 80-90, 2014.

[7] Li, X.-H., Liu, C., Feng, S.-P. and Fang, N. X., "Broadband Light Management with Thermo-chromic Hydrogel Microparticles for Smart Windows" *Joule*, Vol. 3, No. 1, pp. 290-302, 2019.

[8] Piccolo, A. and Simone, F., "Performance Requirements for Electrochromic Smart Window" *Journal of Building Engineering*, Vol. 3, pp. 94-103, 2015.

[9] Baetens, R., Jelle, B. P. and Gustavsen, A., "Properties, Requirements and Possibilities of Smart Windows for Dynamic Daylight and Solar Energy Control in Buildings: A State-of-the-Art Review" *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 94, No. 2, pp. 87-105, 2010.

[10] Wu, C.-C., Liou, J.-C. and Diao, C.-C., "Self-Powered Smart Window Controlled by a High Open-Circuit Voltage Ingan/Gan Multiple Quantum Well Solar Cell" *Chemical Communications*, Vol. 51, No. 63, pp. 12625-12628, 2015.

[11] Chen, Z., Cao, C., Chen, S., Luo, H. and Gao, Y., "Crystallised Mesoporous Tio2(a)-Vo2(M/R) Nanocomposite Films with Self-Cleaning and Excellent Thermo-chromic Properties" *Journal of Materials Chemistry A*, Vol. 2, No. 30, pp. 11874-11884, 2014.

<sup>1</sup> Iran National Science Foundation: INSF

- [47] Huaxu, L., Fuqiang, W., Dong, L., Jie, Z. and Jianyu, T., "Optical Properties and Transmittances of ZnO-Containing Nanofluids in Spectral Splitting Photovoltaic/Thermal Systems" *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 128, pp. 668-678, 2019.
- [48] Mohammed, M. I., "Optical Properties of ZnO Nanoparticles Dispersed in Pmma/Pvdf Blend" *Journal of Molecular Structure*, Vol. 1169, pp. 9-17, 2018.
- [49] Soni, G., Gouttam, N. and Soni, P., "Optical Properties of Pmma/Zno/Sio2 Composite Thin Film" *Materials Today: Proceedings*, Vol. 30, pp. 35-38, 2020.
- [50] Kim, D., Jeon, K., Lee, Y., Seo, J., Seo, K., Han, H. and Khan, S., "Preparation and Characterization of UV-Cured Polyurethane Acrylate/Zno Nanocomposite Films Based on Surface Modified ZnO" *Progress in Organic Coatings*, Vol. 74, No. 3, pp. 435-442, 2012.
- [51] Carvill, J., "3 - Thermodynamics and Heat Transfer" in: J. Carvill, *Mechanical Engineer's Data Handbook*, Eds., pp. 102-145, Oxford: Butterworth-Heinemann, 1993.
- [52] Masoumi, A. A., Rahimi Sharbaf Moghadas, G. H. and Liyaghat, G. H., "Transient Heat Transfer Analysis in Composite Metal Cylindrical Vessel Using the Layerwise Theory and Differential Quadrature Method" *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 4, No. 3, pp. 347-358, 2017.
- [53] Cao, S., Zhang, S., Zhang, T., Yao, Q. and Lee, J. Y., "A Visible Light-near-Infrared Dual-Band Smart Window with Internal Energy Storage" *Joule*.
- [54] Gyenes, T., Szilágyi, A., Lohonyai, T. and Zrínyi, M., "Electrically Adjustable Thermotropic Windows Based on Polymer Gels" *Polymers for Advanced Technologies*, Vol. 14, No. 11-12, pp. 757-762, 2003.
- [55] Wang, M., Gao, Y., Cao, C., Chen, K., Wen, Y., Fang, D., Li, L. and Guo, X., "Binary Solvent Colloids of Thermosensitive Poly(N-Isopropylacrylamide) Microgel for Smart Windows" *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 53, No. 48, pp. 18462-18472, 2014.
- [56] Kiruthika, S. and Kulkarni, G. U., "Energy Efficient Hydrogel Based Smart Windows with Low Cost Transparent Conducting Electrodes" *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 163, pp. 231-236, 2017.
- [29] ASTM, "Volume 06.01 Paint—Tests for Chemical, Physical, and Optical Properties; Appearance", American Society for Testing and Materials, 2018.
- [30] ASTM, "Volume 05.06 Gaseous Fuels; Coal and Coke; Catalysts; Bioenergy and Industrial Chemicals from Biomass", American Society for Testing and Materials, 2017.
- [31] Askarinejad, A., Alavi, M. and Morsali, A., "Sonochemically Assisted Synthesis of ZnO Nanoparticles: A Novel Direct Method" *Iran. J. Chem. Chem. Eng.*, Vol. 30, pp. 75-81, 2011.
- [32] Mahdavi, R. and Ashraf Talesh, S. S., "The Effect of Ultrasonic Irradiation on the Structure, Morphology and Photocatalytic Performance of ZnO Nanoparticles by Sol-Gel Method" *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 39, pp. 504-510, 2017.
- [33] Gopi, D., Kavitha, L., Ramya, S. and Rajeswari, D., "Chapter 15 - Chemical and Green Routes for the Synthesis of Multifunctional Pure and Substituted Nanohydroxyapatite for Biomedical Applications" in: A. M. Grumezescu, *Engineering of Nanobiomaterials*, Eds., pp. 485-521: William Andrew Publishing, 2016.
- [34] ASTM, "Volume 03.01 Metals – Mechanical Testing: Elevated and Low-Temperature Tests; Metallography", American Society for Testing and Materials, 2015.
- [35] ASTM, "Volume 14.02 Particle and Spray Characterization; Forensic Sciences; Accreditation & Certification; Forensic Psychophysiology; Nanotechnology; Forensic Engineering", American Society for Testing and Materials, 2019.
- [36] Zebarjad, S., Sajjadi, S., Ebrahimi Sadrabadi, T., Yaghmaei, A. and Naderi, B., "A Study on Mechanical Properties of Pmma/Hydroxyapatite Nanocomposite" *Engineering*, Vol. 3, pp. 1, 2011.
- [37] Kaspar, T., Ryan, J., Pantano, C., Rice, J., Trivelpiece, C., Hyatt, N., Corkhill, C., Mann, C., Hand, R., Kirkham, M., Crawford, C., Jantzen, C., Du, J., Lu, X., Harrison, M., Cushman, C., Linford, M. and Smith, N., "Physical and Optical Properties of the International Simple Glass" *npj Materials Degradation*, Vol. 3, 2019.
- [38] Kasunic, K. J., "Optomechanical Systems Engineering", Wiley, 2015.
- [39] Alhareb, A., Md Akil, H. and Ahmad, Z., "Impact Strength, Fracture Toughness and Hardness Improvement of Pmma Denture Base through Addition of Nitrile Rubber/Ceramic Fillers" *The Saudi Journal for Dental Research*, Vol. 8, 2016.
- [40] Seldén, R., "Fracture Energy Measurements in Polycarbonate and Pmma" *Polymer Testing*, Vol. 7, No. 3, pp. 209-222, 1987.
- [41] Johnson, W., "Impact Strength of Materials" 00466136 ed., Transport Research Laboratory, pp. 361, 1983.
- [42] Onodera, Y., Kohara, S., Salmon, P. S., Hirata, A., Nishiyama, N., Kitani, S., Zeidler, A., Shiga, M., Masuno, A., Inoue, H., Tahara, S., Polidori, A., Fischer, H. E., Mori, T., Kojima, S., Kawaji, H., Kolesnikov, A. I., Stone, M. B., Tucker, M. G., McDonnell, M. T., Hannon, A. C., Hiraoka, Y., Obayashi, I., Nakamura, T., Akola, J., Fujii, Y., Ohara, K., Taniguchi, T. and Sakata, O., "Structure and Properties of Densified Silica Glass: Characterizing the Order within Disorder" *NPG Asia Materials*, Vol. 12, No. 1, pp. 85, 2020.
- [43] Tsesarsky, M., Peled, A., Katz, A. and Anteby, I., "Strengthening Concrete Elements by Confinement within Textile Reinforced Concrete (Trc) Shells – Static and Impact Properties" *Construction and Building Materials*, Vol. 44, pp. 514-523, 2013.
- [44] Ma, Y., Cao, X., Feng, X., Ma, Y. and Zou, H., "Fabrication of Super-Hydrophobic Film from Pmma with Intrinsic Water Contact Angle Below 90°" *Polymer*, Vol. 48, No. 26, pp. 7455-7460, 2007.
- [45] Yadav, A., Prasad, V., Kathe, A. A., Raj, S., Yadav, D., Chandrasekaran, S. and Nandanathangam, V., "Functional Finishing in Cotton Fabrics Using Zinc Oxide Nanoparticle" *Bulletin of Materials Science*, Vol. 29, pp. 641-645, 2006.
- [46] Sagadevan, S. and Shanmugam, S., "A Study of Preparation, Structural, Optical, and Thermal Conductivity Properties of Zinc Oxide Nanofluids" *Journal of Nanomedicine & Nanotechnology*, Vol. 2015, pp. 0-0, 2015.