



## تهیه و مطالعه خواص نوری ساختارهای چند لایه نانو ذرات کلوییدی پلیمری

محمد رضا شمشیری<sup>۱</sup>، علی اکبر یوسفی<sup>۲\*</sup>، فرهاد عامری<sup>۳</sup>

۱- کارشناس ارشد، گروه پژوهشی فیزیک رنگ، پژوهشگاه علوم و فناوری رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵۴

۲- دانشیار، گروه پژوهشی پلاستیک، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۴۹۶۵-۱۱۵

۳- استادیار، گروه پژوهشی فیزیک رنگ، پژوهشگاه علوم و فناوری رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵۴

تاریخ دریافت: ۸۹/۸/۱۱ تاریخ پذیرش: ۸۹/۱۱/۲۰ در دسترس به صورت الکترونیکی از: ۱۳۹۰/۳/۲۰

### چکیده

بلورهای فوتونیک سی‌بعدی یا نانوکلوئیدها، به دلیل ساختار تناوبی که دارند دارای خواص نوری مفیدی چون هدایت نور و موج‌بری هستند. قرارگیری این نانوساختارها در میان فیلم‌های پلیمری متشکل از چند لایه، موجب بهبود این خواص در مقایسه با فیلم‌های تک لایه دارای ساختار نانو می‌شود. در این تحقیق، ابتدا پلیمرهای پلی‌متیل‌متاکریلات و پلی‌استایرن به ترتیب در حلال‌های استون و سیکلوهگزان (به همراه ۵ ml تتراکلریدکربن به ازای ۹۵ ml سیکلوهگزان) حل شدند و سپس به همراه سوسپانسیون از نانوذراتی بر پایه استایرن، توسط دستگاه نشانش لوله‌ای بطور متناوب روی یکدیگر قرار گرفتند. خواص نوری فیلم‌های ریخته‌گری شده به روش اسپکتروفوتومتری بررسی گردید. این مطالعات نشان داد که افزودن لایه‌های پلیمری بر روی ساختارهای سی‌بعدی باعث تغییر رنگ ناشی از آنها می‌گردد. به کمک این داده‌ها تغییر رنگ از آبی به سبز به شکست پرتوهای نور در لایه‌های پلیمری ارتباط داده شد. واژه‌های کلیدی: بلورهای فوتونیک، موج‌بر، نانوکلوئید، چرخ‌ریزی، پلی‌استایرن، پلی‌متیل‌متاکریلات.

## Preparation and Characterization of Multi-layer Structures of Polymeric Colloid Nano-particles

M. Shamshiri<sup>1</sup>, A. A. Yousefi<sup>\*2</sup>, F. Ameri<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Color Physics, Institute for Color Science and Technology, P.O. Box: 16765-654, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Department of Plastic Processing & Engineering, Iran Polymers and Petrochemicals Institute, P.O. Box 14965/115, Tehran, Iran

### Abstract

Due to their periodic structures, three dimensional photonic crystals possess some useful optical properties such as wave guiding. Sandwiching these structures between multilayered polymer films improves such properties compared to those of single-layer films because they form a nano structure. In the present investigation polymethyl methacrylate and polystyrene were dissolved in proper solvents namely, acetone and cyclohexane (plus 5ml carbon tetrachloride per 95ml of cyclohexane). Solutions and suspension of nano particles were spin-casted rotationally using specially designed machine to produce a periodic structure. The optical properties of the cast films were studied using spectrophotometric techniques. It was found that cladding three-dimensional polymer films induced a color change. A color-shift from blue to green was found to be related to refraction of light amongst polymer layers. J. Color Sci. Tech. 5(2011), 69-75 © Institute for Color Science and Technology.

**Keywords:** Photonic crystals, Waveguide, Nano-colloid, Spin-casting, Polystyrene, Polymethyl methacrylate.

## ۱- مقدمه

فوتونیک یکی بعدی، روی هم چیدن لایه‌های نازک دارای ضریب شکست بالا و پایین به صورت متناوب است. با انتخاب ضخامت و ضریب شکست لایه‌های روی هم چیده شده می‌توان خواص نوری را اصلاح کرد و علاوه بر بازتابش زیاد به خواص دیگری نیز دست یافت. با توجه به تئوری فیبرهای نوری با اختلاف ضریب شکست کم، طول موج مرکزی نوار گاف فوتونیک بازتابنده،  $\lambda_c$  از رابطه ۲ به دست می‌آید [۱۹].

$$\frac{\lambda_c}{2} = d_h \sqrt{n_h^2 - n_c^2} + d_l \sqrt{n_l^2 - n_c^2} \quad (2)$$

که  $n_c$  ضریب شکست هسته،  $n_h$  و  $n_l$ ، ضریب شکست و  $d_h$  و  $d_l$  ضخامت لایه‌های پلیمری می‌باشد. بنابراین با تغییر ضخامت لایه‌ها و نوع پلیمرها می‌توان مقدار  $\lambda_c$  را تغییر داد [۱۹]. از محصولات این فناوری که به سهولت در دسترسند، آینه‌های کامل و لایه‌های ضدبازتابش کامل می‌باشند که هر دو را می‌توان به نحوی تنظیم نمود که به طول موج‌های خاصی پاسخ دهند. انواع فیلترهای نوری نیز از دیگر محصولات این فناوری هستند. ساخت چنین دستگاه‌هایی به مهندسی لایه‌های نازک معروف است [۱۸، ۲۰]. روش‌های مختلفی را می‌توان برای ساخت ساختارهای فوتونیک بکار گمارد. از جمله این روش‌ها می‌توان به پلیمریزاسیون دوفوتونی [۲۱]، نانونقش‌زنی، لایه‌نشانی توسط نیروی گریز از مرکز و غیره اشاره نمود.

در این تحقیق، با استفاده از دستگاه لایه نشان لوله‌ای که قبلاً تهیه شده است، محلول‌های پلی‌متیل‌متاکریلات و پلی‌استایرن و همچنین سوسپانسیون‌های نانوذرات استایرن که دارای پوسته آکریلاتی می‌باشد، بر روی هم نشانده شده و به مطالعه خواص نوری آنها پرداخته شده است.

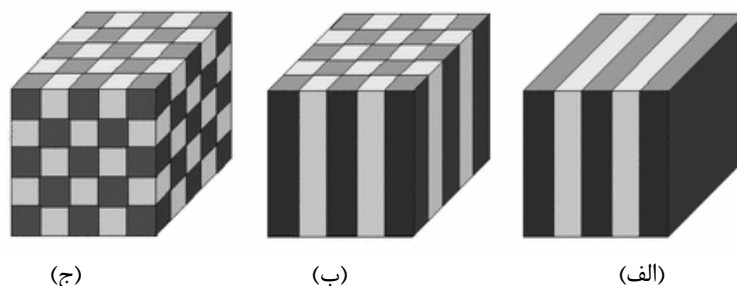
در سال‌های اخیر، یکی از شاخه‌های جدید و مهم علوم فوتونیک<sup>۱</sup> یا مهندسی نور می‌باشد. حوزه کاربردهای این فناوری شامل تمامی بخش‌های مورد نیاز بشر از جمله هوا و فضا، امور دفاعی، پزشکی و غیره می‌گردد [۱]. در واقع فوتونیک عبارت است از مجموعه علوم و فناوری‌های مربوط یا به کار گیرنده نور و فوتون (ذره بنیادی نور) که به برهم کنش‌های بین نور و ماده می‌پردازند. این حوزه در سال ۱۹۸۷ میلادی، توسط یابلانویچ<sup>۲</sup> و جان<sup>۳</sup> معرفی گردید [۲]. به هر ساختاری که ضریب شکست آن به طور متناوب تغییر کند یک بلور فوتونیک می‌گویند. اگر این تکرار در یک بعد باشد بلور تشکیل شده، بلور فوتونیک یک بعدی می‌باشد. تکرار ساختار متناوب در دو و سه بعد نیز بلورهای فوتونیک دو و سه بعدی را به وجود خواهد آورد [۳-۶] (شکل ۱). در بلور فوتونیک، شدت انتقال از میان آنها به تناوب و مقدار اختلاف ضریب شکست‌ها بستگی دارد. برخی بسامدها به طور شدیدتری باز می‌تابند و تقریباً از بلور عبور نمی‌کنند. این گستره از بسامدها به نوار گاف فوتونیک<sup>۴</sup> موسومند [۷-۹] (شکل ۲).

پلیمرها، از جمله موادی هستند که امروزه در ساخت بلورهای فوتونیک مورد توجه قرار گرفته‌اند. اقتصادی بودن، سهولت فرآیندپذیری و زیست‌سازگار بودن این مواد، از دلایل به کارگیری روزافزون آنها می‌باشد [۱۱].

طول موج نور،  $\lambda$  که به وسیله بلورهای فوتونیک پلیمری سه بعدی به طور هم‌رس<sup>۵</sup> منتشر می‌شود را می‌توان با تقریب و با استفاده از قوانین براگ<sup>۶</sup> و اسنل<sup>۷</sup> به خصلت تناوبی ماده،  $d$  مرتبط ساخت [۳] (رابطه ۱).

$$\lambda k = 2d(n_{\text{eff}}^2 \sin^2 \theta)^{0.5} \quad (1)$$

که در این رابطه،  $k$  ضریب انکسار،  $n_{\text{eff}}$  ضریب شکست مؤثر بلورهای فوتونی پلیمری و  $\theta$  زاویه برخورد نور نسبت به بردار نرمال بلورهای فوتونیک پلیمری می‌باشد. در ضمن، در صورت استفاده از مدل هگزاگونال، مقدار  $d$  را می‌توان ۱٫۶۳ برابر مقدار شعاع کره‌ها در نظر گرفت [۱۸-۱۲]. از طرفی دیگر، روش معمول برای ساخت بلورهای



شکل ۱: طرح‌واره‌ای از بلورهای فوتونیک (الف) یک، (ب) دو و (ج) سه بعدی [۱۰].

- 1- Photonic
- 2- Yablonovitch
- 3- John
- 4- Photonic Bandgap
- 5- Coherent
- 6- Bragg
- 7- Snell

۲۵٪ در استون حل شد و محلول حاصل در دو بازه ۱۵ دقیقه‌ای تحت امواج فراصوت و سپس به مدت یک شبانه‌روز در دمای آزمایشگاه قرار گرفت. مقادیر مناسبی از محلول ۲۵٪ پلی‌متیل‌متاکریلات در محفظه تفلونی تزریق و محفظه به دستگاه نشانش لوله‌ای بسته شد (شکل ۳). دستگاه در ۳۰۰۰ دور بر دقیقه و برای مدت ۲ ساعت روشن شد. پس از حصول اطمینان از خشک شدن نسبی فیلم پلیمری، محفظه از دستگاه جدا شده و به مدت ۳ ساعت در آن خلا و در دمای  $35^{\circ}\text{C}$  و سپس در دمای  $45^{\circ}\text{C}$  قرار گرفت. سپس مقدار مناسبی از محلول ۱۰٪ پلی‌استایرن در محفظه تزریق شد. دستگاه برای مدت دو ساعت و با دور ۲۷۵۰ دور بر دقیقه روشن شد. پس از گذشت این زمان، محفظه از دستگاه جدا شده و به مدت ۳ ساعت در آن خلا و در دمای  $35^{\circ}\text{C}$  و سپس در دمای  $45^{\circ}\text{C}$  قرار گرفت. این بار مقدار مناسبی از محلول ۱۰٪ پلی‌متیل‌متاکریلات در محفظه تزریق و با همان دور قبلی دستگاه و به مدت دو ساعت روشن شد. همانند لایه پلی‌استایرن، این لایه نیز به مدت ۳ ساعت در آن خلا و در دمای  $35^{\circ}\text{C}$  و سپس در  $45^{\circ}\text{C}$  قرار گرفت. این روند یعنی نشانش لایه‌های پلی‌استایرنی و پلی‌متیل‌متاکریلاتی تا ۳ مرتبه (۶ لایه) تکرار شد. آنچه در شکل ۴ مشاهده می‌شود تصویر فیلم ۷ لایه‌ای است که پس از جداسازی از محفظه به صورت باز درآورده شده است (نمونه S6).

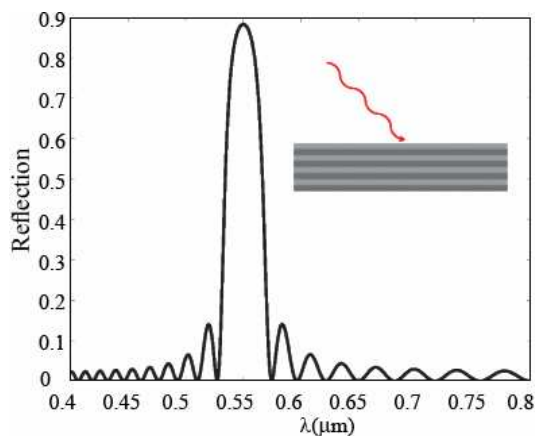


شکل ۳: تصویر دستگاه نشانش لوله‌ای.



شکل ۴: تصویر سطح فیلم ۷ لایه‌ای متشکل از ۳ لایه پلی‌متیل‌متاکریلات و ۳ لایه پلی‌استایرن و یک لایه ضخیم پلی‌متیل‌متاکریلات به عنوان زیرآیند.

عکس رنگی در نشانی [www.jstc.icrc.ac.ir](http://www.jstc.icrc.ac.ir) قابل دسترس است.



شکل ۲: نمودار مربوط به میزان انتقال از میان یک فیلم چند لایه [۱۱].

## ۲- بخش تجربی

### ۲-۱- مواد

در این تحقیق از پلی‌متیل‌متاکریلات ساخت شرکت آرکما<sup>۱</sup> و با کد تجاری Plexiglas HFI-10-101 استفاده شده است که دارای ضریب شکست ۱,۴۹ می‌باشد. پلی‌استایرن مصرفی نیز ساخت شرکت پتروشیمی تبریز و گرید ۱۵۴۰ و ضریب شکست ۱,۵۹ می‌باشد. تمامی حلال‌های مصرفی نیز ساخت شرکت مرک می‌باشد. سوسپانسیون استفاده شده، براساس آنچه در مرجع ۲۲ آمده به روش هسته- پوسته‌ای تهیه گردیده و دارای هسته‌ای از جنس پلی‌استایرن و پوسته‌ای از جنس کوپلیمر بوتیل‌آکریلات و متیل‌متاکریلات می‌باشد. متوسط اندازه ذرات آن در حدود ۱۶۰ نانومتر و ضریب شکست آن ۱,۵۶ است.

### ۲-۲- روش کار

#### تهیه فیلم‌های چند لایه

حلال‌های مورد استفاده باید به نحوی باشند که برای پلیمر مربوط به خود حلال مناسبی بوده و حال آنکه لایه قبلی که از جنس دیگری می‌باشد را در خود حل نکنند و در واقع برای آن یک ضد حلال باشد. برای این منظور از استون برای پلی‌متیل‌متاکریلات و از سیکلوهگزان برای پلی‌استایرن استفاده کردیم. البته به ازای هر ۹۵ ml سیکلوهگزان، ۵ ml نیز تتراکلریدکربن استفاده شد تا بتواند چسبندگی کمی میان لایه‌ها ایجاد نماید [۱]. محلول‌های پلیمری با نسبت (wt/vol) ۱۰٪ تهیه شد و آنها در دو بازه ۱۵ دقیقه‌ای تحت امواج فراصوت و سپس به مدت یک شبانه‌روز در دمای آزمایشگاه قرار گرفتند. پس از آن محلول‌ها از صافی عبور داده شدند. برای تهیه زیرآیند، پلی‌متیل‌متاکریلات با درصد وزنی به حجمی

1- Arkema

این نمونه‌ها بترتیب S3 و S4 نامگذاری شدند. در جدول ۱ مشخصات نمونه‌های تهیه شده ارائه شده است.

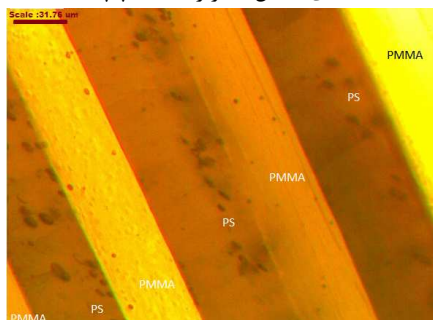
طیف انتقالی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر UV-VIS-IR (SPECORD 250) تهیه شد. طیف انعکاسی نمونه‌ها نیز با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر انعکاسی-انتقالی UV-VIS (ColorEye 7000 A) اندازه‌گیری گردید.

### ۳- نتایج و بحث

برای اطمینان از تشکیل لایه‌ها در نمونه S6 از سطح مقطع آماده‌سازی شده، با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان شکل ۶ تهیه شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود فصل مشترک لایه‌ها کاملاً صاف می‌باشد. در ضمن ضخامت هر یک از این لایه‌ها در حدود  $50 \mu\text{m}$  می‌باشد.



شکل ۵: یک پیش‌ساخته ۷ لایه‌ای (شکل الف) و همچنین فیلم‌های ۴ و ۷ لایه‌ای (شکل ب از راست به چپ).

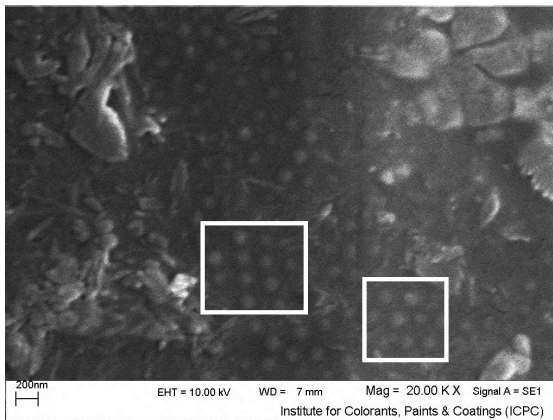


شکل ۶: تصویر فیلم ۷ لایه‌ای متشکل از ۳ لایه پلی‌متیل متاکریلات و ۳ لایه پلی‌استایرن و یک لایه ضخیم پلی‌متیل متاکریلات به عنوان زیرآیند با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان. عکس رنگی در نشانی [www.jest.irc.ac.ir](http://www.jest.irc.ac.ir) قابل دسترس است.

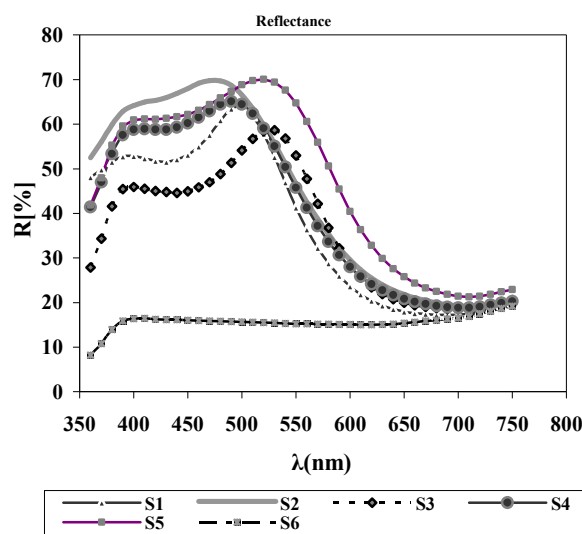
این بار روند بالا به همراه سوسپانسیون انجام شد. مقادیر مناسبی از محلول ۲۵٪ پلی‌متیل متاکریلات را در محفظه تغلونی تزریق و محفظه به دستگاه بسته شد. دستگاه در ۳۰۰۰ دور بر دقیقه تنظیم و به مدت ۲ ساعت روشن بود. پس از حصول اطمینان از خشک شدن نسبی فیلم پلیمری، محفظه را از دستگاه جدا کرده و به مدت ۳ ساعت در آن خلا و دمای  $35^{\circ}\text{C}$  و سپس در دمای  $45^{\circ}\text{C}$  قرار گرفت. با توجه به آنکه محیط آبی تأثیر کمتری بر لایه پلی‌متیل متاکریلاتی دارد، این لایه پس از اعمال لایه پلی‌متیل متاکریلات قرار گرفت. به این ترتیب که مقدار مناسبی از سوسپانسیون پایه آب در محفظه تزریق و محفظه به دستگاه بسته شد و دستگاه برای مدت ۳ ساعت و با دور ۲۷۵۰ دور بر دقیقه روشن نگاه داشته شد. پس از حصول اطمینان از خشک شدن نسبی این لایه، محفظه از دستگاه جدا گردید و به مدت ۲ ساعت در آن خلا و در دمای  $25^{\circ}\text{C}$  و سپس به مدت یک شبانه‌روز در دمای  $35^{\circ}\text{C}$  نگهداری شد. سپس مقدار مناسبی از محلول ۱۰٪ پلی‌استایرن در محفظه تزریق گردید. دستگاه برای مدت دو ساعت و با دور ۲۷۵۰ دور بر دقیقه روشن بود. پس از گذشت زمان یاد شده، محفظه از دستگاه جدا شده و به مدت ۳ ساعت در آن خلا و در دمای  $35^{\circ}\text{C}$  و سپس در دمای  $45^{\circ}\text{C}$  قرار گرفت. این بار مقدار مناسبی از محلول ۱۰ درصدی پلی‌متیل متاکریلات در محفظه تزریق گردید و با همان دور قبلی دستگاه و بمدت دو ساعت روشن شد. همانند لایه پلی‌استایرن، این لایه نیز به مدت ۳ ساعت در آن خلا و در دمای  $35^{\circ}\text{C}$  و سپس در دمای  $45^{\circ}\text{C}$  قرار گرفت. این روند یعنی نشانش لایه‌های سوسپانسیونی، پلی‌استایرنی و پلی‌متیل متاکریلاتی برای ۱ مرتبه (۳ لایه) و ۲ مرتبه (۶ لایه) تکرار شد. آنچه در شکل ۵-الف و ۵-ب مشاهده می‌شود یک پیش‌ساخته ۷ لایه‌ای (شکل ۵-الف) و همچنین فیلم‌های ۴ و ۷ لایه‌ای (شکل ۵-ب) است که پس از جداسازی از محفظه به صورت باز درآورده شده است.

جدول ۱: مشخصات نمونه‌های تهیه شده.

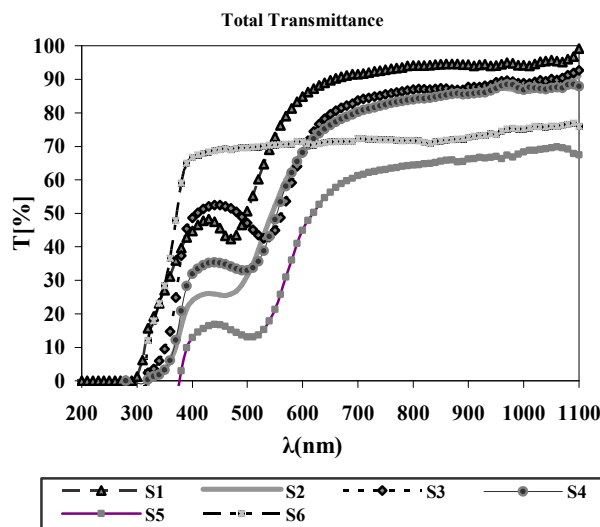
نمونه	مشخصات
S1	متشکل از یک لایه سوسپانسیونی تهیه شده بوسیله فیلم‌کش
S2	متشکل از یک لایه زیرآیند و یک لایه سوسپانسیونی خشک شده تهیه شده بوسیله دستگاه لایه نشان
S3	متشکل از یک لایه زیرآیند و یک تناوب پلی‌متیل متاکریلات/سوسپانسیون خشک شده/پلی‌استایرن تهیه شده به وسیله دستگاه لایه نشان
S4	متشکل از یک لایه زیرآیند و دو تناوب پلی‌متیل متاکریلات/سوسپانسیون خشک شده/پلی‌استایرن تهیه شده به وسیله دستگاه لایه نشان
S5	متشکل از یک لایه زیرآیند و سه تناوب پلی‌متیل متاکریلات/سوسپانسیون خشک شده/پلی‌استایرن تهیه شده به وسیله دستگاه لایه‌نشان
S6	متشکل از یک لایه زیرآیند و سه تناوب پلی‌متیل متاکریلات/پلی‌استایرن تهیه شده به وسیله دستگاه لایه نشان



شکل ۸: تصویر SEM از سطح نمونه S2.



شکل ۹: نمودار مربوط به طیف انعکاسی نمونه‌ها.

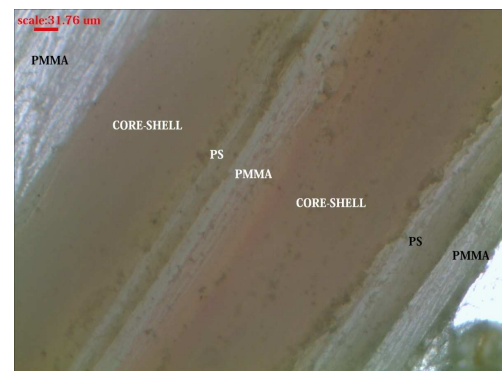


شکل ۱۰: نمودار مربوط به انتقال کلی نمونه‌ها.

رنگ نمونه‌های ارائه شده در شکل ۵ که دارای تناوب پلی‌متاکریلات/ سوسپانسیون خشک شده/ پلی‌استایرن می‌باشند، بیشتر رو به سبز می‌باشد. در حالی که نمونه‌ای که دارای این تناوب نبوده (نمونه S2) و یا بدون فرآیند قالب‌ریزی چرخشی تهیه شده (نمونه S1)، بیشتر به سمت رنگ آبی گرایش دارد. البته با توجه به آنکه متوسط اندازه ذرات سوسپانسیون در حدود ۱۶۰ نانومتر می‌باشد، بنابراین خصلت تناوبی نمونه d، ۱۳۰،۶۴ نانومتر می‌گردد. از آنجاکه ضریب شکست مؤثر نمونه ۱،۵۶ می‌باشد و برای به دست آوردن  $\lambda$  بیشینه، زاویه در معادله مربوطه صفر درجه می‌باشد، بدین ترتیب از معادله ۱،  $\lambda$  بیشینه حدوداً ۴۱۰ نانومتر به دست می‌آید که در محدوده آبی قرار می‌گیرد.

بنابراین رنگ آبی نمونه‌های S1 و S2 در زوایای کم قابل توجهی می‌باشد. برای حصول اطمینان از تشکیل لایه‌ها از سطح مقطع آماده‌سازی شده، با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان شکل ۷ تهیه شد. وضوح کم مرز بین لایه‌ها به دلیل مشکل بودن آماده‌سازی نمونه می‌باشد. اما محدوده لایه‌ها قابل تشخیص می‌باشد. ضخامت هر یک از لایه‌های پلی‌متیل-متاکریلات و پلی‌استایرن، همانند قبل در حدود ۵۰ میکرون و هر یک از لایه‌های خشک‌شده سوسپانسیونی در حدود ۱۵۰ میکرون می‌باشد. در ضمن از سطح نمونه S2 تصویر SEM تهیه شد که در شکل ۸ مشاهده می‌شود. نواحی که در شکل ۸ مشخص شده است نظم ایجاد شده توسط ذرات پلیمری نانومتری را نشان می‌دهد که رنگ آبی نمونه S2 ناشی از اثرات فوتونیک این ساختارهای سه بعدی می‌باشد. آنچه در شکل ۹ مشاهده می‌شود، نمودار مربوط به طیف انعکاسی نمونه‌ها می‌باشد که به وسیله پشت‌پوش نمودن نمونه‌ها به دست آمده است.

در ضمن مولفه‌های مربوط به رنگ نمونه‌ها نیز تحت منبع نوری استاندارد D65 و مشاهده کننده استاندارد  $10^\circ$  در جدول ۲ آورده شده است. مطابق جدول ۲ و با توجه به مقادیر زاویه فام، نمونه‌های S3، S4 و S5 که دارای تناوب می‌باشند دارای رنگ سبز بوده، در حالی که نمونه‌های S1 و S2 ماهیتی سبز - آبی دارند.



شکل ۷: تصویر میکروسکوپ پلاریزان از فیلم ۷ لایه‌ای متشکل از ۲ لایه پلی‌متیل‌متاکریلات، ۲ لایه پلی‌استایرن، ۲ لایه حاصل از خشک شده سوسپانسیون و یک لایه ضخیم پلی‌متیل‌متاکریلات به عنوان زیرآیند. عکس رنگی در نشانی [www.jcst.icrc.ac.ir](http://www.jcst.icrc.ac.ir) قابل دسترس است.

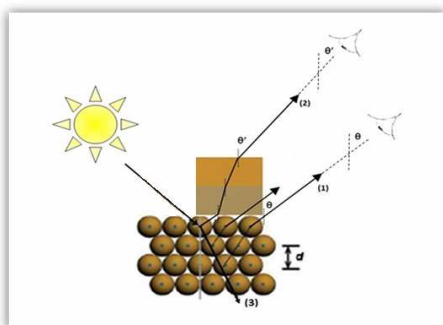
جدول ۲: مولفه‌های مربوط به رنگ نمونه‌ها براساس طیف انعکاسی.

نمونه	$h^\circ$	$C^*$	$b^*$	$a^*$	$L^*$	رنگ
S1	۲۰.۸	۳۰.۳	-۱۴.۵	-۲۶.۶	۶۸.۲	سبز مایل به آبی
S2	۲۳۲	۲۷.۹	-۲۲.۳	-۱۶.۹	۷۲.۵	آبی مایل به سبز
S3	۱۸۴	۲۸.۹	-۲.۵	-۲۸.۸	۷۳.۸	سبز
S4	۱۹۲	۲۲.۹	-۵.۱	-۲۲.۴	۷۳.۵	سبز
S5	۱۸۵	۲۲.۷	-۲.۰	-۲۲.۷	۷۹.۰	سبز
S6	۲۶۵	۲.۸	-۲.۸	-۰.۲	۴۸.۰	نسبتاً بی‌رنگ

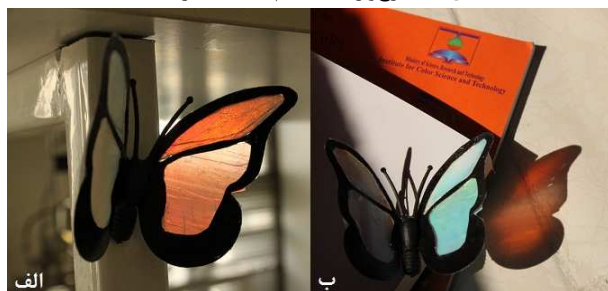
جدول ۳: مولفه‌های رنگی نمونه‌ها بر اساس طیف انتقالی.

نمونه	$h^\circ$	$C^*$	$b^*$	$a^*$	$L^*$	رنگ
S1	۶۹	۲۵.۴	۲۳.۷	۹.۱	۸۷.۰	نارنجی مایل به زرد
S2	۵۴	۲۲.۶	۱۸.۱	۱۳.۶	۷۷.۰	نارنجی مایل به زرد
S3	۲۱	۱۹.۱	۶.۹	۱۷.۸	۷۸.۰	نارنجی مایل به قرمز
S4	۳۷	۲۲.۹	۱۳.۹	۱۸.۳	۷۶.۰	نارنجی مایل به قرمز
S5	۳۴	۲۶.۱	۱۴.۸	۲۱.۴	۷۰.۰	نارنجی مایل به قرمز
S6	۸۵	۱.۳	۱.۳	۰.۱	۸۷.۰	بیرنگ

در ضمن پرتو عبوری ۳، در واقع رنگ مکمل پرتوهای بازگشتی می‌باشد. همانطور که در شکل ۱۲- الف مشاهده می‌شود در صورتی که منبع نور در پشت لایه‌ها قرار داشته باشد طول موج‌هایی که به ما می‌رسد در ناحیه نارنجی- قرمز یعنی مکمل ناحیه سبز- آبی می‌باشد.



شکل ۱۱: طرح‌واره مکانیسم شکست در لایه‌ها.



شکل ۱۲: پروانه‌ای که بال‌های آن از نمونه S3 تهیه شده است در شکل الف منبع در پشت نمونه و در شکل ب در پشت سر ناظر می‌باشد. عکس رنگی در نشانی [www.jest.icrc.ac.ir](http://www.jest.icrc.ac.ir) قابل دسترس است.

در مورد نمونه S6، با توجه به معادله ۲ و ضخامت ۵۰ میکرومتری لایه‌ها، در ناحیه مرئی باند گاف فوتونیکی اتفاق نمی‌افتد.

در شکل ۱۰ نمودارهای مربوط به طیف انتقالی نمونه‌ها نشان داده شده است. با توجه به اینکه فیلم‌های تهیه شده کاملاً شفاف نیستند و تا حدودی نیمه شفاف می‌باشند، بنابراین بررسی رفتار نوری آنها در حالت انتقال کلی انجام گرفت. رنگ پرتوهای انتقالی تحت منبع نوری استاندارد D65 و مشاهده کننده استاندارد  $2^\circ$  در جدول ۳ آورده شده است.

مطابق جدول ۳ و با توجه به مقادیر زاویه فام مشخص می‌گردد که اولاً کلیه نمونه‌ها در محدوده فام‌های زرد تا قرمز قرار دارند و ثانیاً رنگ پرتوهای انتقالی به سمت طول موج‌های مکمل پرتوهای بازتابی پیش می‌رود. مطابق شکل ۱۱، این پدیده را می‌توان این گونه تفسیر نمود که هنگامی که پرتویی از منبع نوری به ساختاری که ترسیم شده برخورد می‌کند پس از رسیدن به نانوذرات پلیمری به دو بخش تقسیم می‌شود: بخشی از پرتو تابیده شده، از ساختار مربوطه بازتاب شده و رنگ آبی را تشکیل می‌دهد. در صورتیکه لایه‌ای بر روی آن نباشد چشم ما رنگ آبی را در یک مکان مشخص مشاهده می‌کند.

در صورتی که ما سوسپانسیون را در ساختاری مانند ساختارهای موجود در نمونه S3، S4 و S5 قرار دهیم، مسیر پرتو خروجی، در اثر شکست‌های متوالی، مسیری شبیه به مسیر پرتو ۲ می‌شود که دلیل آن اختلاف ضریب شکست لایه‌ها می‌باشد. در این حالت پرتو خروجی ۲ با زاویه متفاوتی نسبت به پرتو خروجی ۱ وارد محیط می‌شود.

ساندویچ شد. تصاویر SEM تهیه شده از سطح مقطع نمونه‌ها فصل مشترک قابل تفکیکی را میان لایه‌ها نشان می‌دهد. ضمناً با توجه به مطالعات اسپکتروفوتومتری می‌توان نتیجه‌گیری نمود که افزودن لایه‌های پلیمری بر روی ساختارهای سه بعدی باعث تغییر رنگ ناشی از آنها می‌گردد. به کمک این داده‌ها تغییر رنگ از آبی به سبز به شکست مجدد نور در لایه‌های پلیمری ارتباط داده شد. با توجه به حذف محدوده‌ای از طول موج‌ها از پرتو عبوری در نمونه‌ی S3 به نظر می‌رسد از این نمونه بتوان در ساخت فیلترهای تداخلی استفاده نمود. در ضمن با توجه به استفاده از لایه‌های با ضریب شکست مختلف احتمال حذف برخی از طول موج‌ها بدلیل تشکیل زاویه حد بالا می‌رود که این امر به محدود کردن فیلتر در یک گستره طول موجی خاص کمک می‌نماید.

اما در صورتی که منبع نور پشت سر ناظر باشد، همان پرتوهای بازگشتی مشاهده می‌شود. آنچه در شکل ۱۲- ب نیز مشاهده می‌کنیم همین واقعیت را تایید می‌کند؛ در این شکل بال پروانه از نمونه S3 ساخته شده است. منبع نور (خورشید) در پشت سر ناظر قرار دارد. بنابراین بال پروانه به رنگ سبز دیده می‌شود. در صورتی که سایه روشن تشکیل شده بر روی پرده، به رنگ نارنجی- قرمز می‌باشد که از طول موج عبوری آن ناشی می‌شود. از این اثر می‌توان در ساخت فیلترهای تداخلی استفاده نمود.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، با استفاده از روش چرخ‌ریزی، نانو ذرات پلیمری در میان فیلم‌های نازکی از پلیمرهای پلی‌متیل متاکریلات و پلی‌استایرن

#### ۵- مراجع

1. M. Skorobogatiy, Consecutive solvent evaporation and corolling techniques for polymer multilayer hollow fiber preform fabrication. *J. Mater. Res.* 21(2006), 2246-2254.
2. B. Lange, N. Metz, M. Tahir, P. Theato, F. Fleischhaker, H. Schroder, W. Muller, W. Tremel, R. Zentel, Functional polymer-opals from core-shell colloids. *Macromol. Rapid Commun.* 28(2007), 1987-1994.
3. C. Paquet, E. Kumacheva, Nano-structured polymers for photonics. *Mater. Today.* 11(2008), 48-56.
4. K. Kuriki, O. Shapira, S. D. Hart, G. Benoit, Y. Kuriki, J. F. Viens, M. Bayindir, J. D. Joannopoulos, Y. Fink, Hollow multilayer photonic bandgap fibers for NIR applications. *Optics Express.* 12(2004), 1510-1517.
5. A. C. Edrington, A. M. Urbas, P. De Rege, C. X. Chen, T. M. Swager, N. Hadjichristidis, M. Xenidou, L. J. Fetters, J. D. Joannopoulos, Y. Fink, E. L. Thomas, Polymer-based photonic crystals. *Adv. Mater.* 13(2001), 421-425.
6. T. Ruhl, P. Spahn, G. P. Hellmann, Artificial opals prepared by melt compression. *Polym.* 44(2003), 7625-7634.
7. M. Skorobogatiy, J. Yang, Fundamentals of photonic crystal guiding. Cambridge University Press, New York. 2009, 32-36.
8. M. Skorobogatiy, N. Guo, Bandwidth enhancement by differential mode attenuation in multimode photonic crystal Bragg fibers. *Opt. Lett.* 32(2007), 900-902.
9. M. Skorobogatiy, Polymer micro-structured and photonic crystal poly-fibers, *Springer.* 2007, 21-45.
10. B. Lange, F. Fleischhaker, R. Zentel, Chemical approach to functional artificial opals. *Macromol. Rapid Commun.* 28(2007), 1291-1311.
11. K. Stoeffler, C. Dubois, A. Ajji, N. Guo, F. Boismenu, M. Skorobogatiy, Fabrication of All-Polymeric photonic bandgap bragg fibers using rolling of coextruded PS/PMMA multilayer films. *Polym. Eng. Sci.* (2010), 1-6.
12. B. Lange, F. Fleischhaker, R. Zentel, Functional 3D photonic films from polymer beads. *Phys. Stat. Sol. (A)* 204(2007), 3618-3635.
13. M. Egen, R. Zentel, Surfactant-free emulsion polymerization of various methacrylates: Towards monodisperse colloids for polymer opals. *Macromol. Chem. Phys.* 205(2004), 1479-1488.
14. M. Egen, R. Voss, B. Griesebuch, R. Zentel, Heterostructures of polymer photonic crystal films. *Chem. Mater.* 15(2003), 3786-3792.
15. M. Egen, L. Braun, R. Zentel, K. Tannert, P. Frese, O. Reis, M. Wulf, Artificial opals as effect pigments in clear coating. *Macromol. Master. Eng.* 289(2004), 158-163.
16. B. Lange, F. Fleischhaker, R. Zentel, Functional 3D photonic films from polymer beads. *Phys. stat. sol.* 204, 11(2007), 3618-3635.
17. R. Tilley, Colour and optical properties of material, *Wiley,* 1999, 135-140.
18. S. Baghshahi, Color and optical properties of matters, *ICST publisher,* Tehran, 2007, 77-140 (in persian).
19. B. Gauvreau, N. Geo, K. Schicker, K. Stoeffler, F. Boismenu, A. Ajji, R. Wingfield, C. Dubois, M. Skorobogatiy, Color-changing and color-tunable photonic bandgap fiber textiles. *Optics Express.* 16(2008), 15677-15693.
20. A. R. Parker, Natural photonic engineers. *Materials Today.* 5(2002), 26-31.
21. A. Ostendorf, B. N. Chichkiv, Two photon polymerization: A new approach to micromachining. *Photonics spectra.* 10(2006).
22. M. Shaghghi, MSc Thesis, Synthesis and characterization of polymeric nano-particles suspension, Institute of Color Science and Technology, Tehran, Iran, 2010, (in persian).