

## ارزیابی ضریب شکست نور در لایه‌های نازک سیلیکا

رضا مظفری‌نیا

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

### چکیده

ضریب شکست نور یکی از ثوابت مهم در طراحی لایه‌های نازک اپتیکی است و بسته به ضخامت، دانسیته لایه، شبکه کریستالی و عیوب داخلی تغییر می‌کند. امواج الکترومغناطیسی تابشی بر روی سطح لایه به تناسب ضریب شکست در مقادیر مختلف، جذب، منعکس و یا عبور می‌کند و مقداری از آن نیز بدلیل معایب سطحی و داخلی لایه پراکنده می‌شود. لایه‌های نازک سیلیکا بصورت منفرد و یا در ترکیب با سایر اکسیدها در تولید خواص اپتیکی کاربردهای فراوانی دارد. در این پژوهش تأثیر ضخامت و تخلخل لایه‌های نازک سیلیکا بر روی ضریب شکست و میزان عبور از لایه‌های اعمالی مورد ارزیابی قرار گرفته است. سیلیکا به کمک روش Sol-Gel بر روی نمونه‌هایی از جنس شیشه سودا-لیم لایه نشانی شده و به منظور بررسی‌های ساختاری، تصاویر میکروسکوپی SEM، آنالیز EDAX و آنالیز XRD از سطح لایه‌های پوشش داده شده تهیه گردیده است. همچنین به کمک اسپکتروفتومتری نوری طیف پرتوهای عبور و جذب از سطح لایه‌های نازک اعمالی تهیه و با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد ضخامت و تخلخل لایه مقادیر عبور و جذب امواج تابیده شده را تحت تأثیر قرار می‌دهد و هر چه از ضخامت لایه کاسته شود مقدار ضریب شکست کاهش و قابلیت عبور نور افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: سل-ژل، ضریب شکست نور، لایه‌های نازک اپتیکی، سیلیکا، اسپکتروفتومتری

## Evaluation of light refractive index in silica thin films

R. Mozaffarinia

Department of Materials Engineering Malek-Ashtar University of Technology

**Abstract:** Light refractive index is an important constant in design of optical thin films and its value vary with variations of film thickness and density, crystal structure and internal defects. Accident electromagnetic waves on surface layer in proportion with various amounts of refractive index, absorb, reflect and or trasmit through the layer and some are diffracted because of surface and internal defects. Silica thin films in pure form or in combination with other oxides have considerable applications for optical properties.

In this research, the effects of thickness and porosity in thin films of silica on refractive index and also the degree of light transmission through deposited layers was evaluated. With the aid of Sol-Gel method, silica was deposited on soda-lime glass specimens. Structural examinations of the layers were carried out, using Scanning Electron Microscopy (SEM), Energy Dispersion Analysis of X- ray (EDAX) and X-ray Diffraction technique (XRD). Also, by using light spectrophotometry, the spectrum of transmitted and absorbed rays, from the surface layers were prepared and compared. The results indicate that the layer thickness and porosity, have an effect on the degree of transmitted and absorbed waves. As the layer thickness is reduced, the amount of refractive index is reduced and the ability of transmitted light increase.

**Keywords:** Sol-Gel, Refractive Index, Optical thin Films Silica, Spectrophotometry

**E-mail of corresponding author (s):** Mozaffarinia@mut\_es.ac.ir

## مقدمه

بازتاب بیشتری حاصل می‌شود [۴]. به طور کلی مقادیر ضریب شکست در لایه‌های نازک کمتر از ماده زیر لایه از همان جنس است. ساختمان لایه‌های نازک تأثیر بسیار مهمی در خواص اپتیکی مواد سرامیکی دارد، هر چه دانسیته لایه نازک کاهش یابد  $n$  نیز کاهش می‌یابد و در حقیقت میزان تخلخل در لایه‌های نازک تأثیر زیادی در مقدار ضریب شکست دارد [۵]. در این پژوهش تأثیر ضخامت و تخلخل لایه‌های نازک سیلیکا بر روی ضریب شکست و میزان عبور نور از لایه‌های اعمالی مورد بررسی قرار گرفته است.

## روش تحقیق

## ۱- مواد

در این پژوهش نمونه‌هایی آزمایشگاهی از جنس شیشه سودا- لیم به طول ۷۵، عرض ۲۵ و ضخامت ۱ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. ترکیب شیمیایی نمونه‌ها در جدول (۱) توسط آنالیز XRF تعیین شده است. ماده خام اصلی مورد استفاده در پوشش‌دهی الکسیدسیلیسیم با فرمول شیمیایی  $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$  و ترکیبات اتانول، اسیدکلریدریک، اسید نیتریک و آب مقطر بعنوان افزودنی برای ساخت محلول شیمیایی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

## ۲- روش لایه نشانی

برای تهیه لایه‌های نازک سیلیکا از روش Sol-Gel استفاده شد. نمونه‌ها به کمک محلول‌های تمیزکننده و با بکارگیری روش التراسونیک کاملاً مورد شستشو قرار گرفت و در اتو کلاو خشک گردیدند. محلول Sol از ماده خام و افزودنی‌ها تهیه و نمونه‌ها به روش غوطه‌وری به ترتیب در زمان‌های ۱ دقیقه، ۱ و ۲ ساعت پس از ساخت محلول Sol لایه نشانی شدند. عملیات خشک کردن نمونه‌ها در دمای  $120^\circ\text{C}$  به مدت ۲۰ دقیقه و در نهایت در دمای  $620^\circ\text{C}$  به مدت ۴ ساعت تحت عملیات پخت قرار گرفتند. یکی از نمونه‌های غوطه‌ور شده در زمان یک دقیقه پس از خشک کردن به عنوان نمونه متخلخل و به منظور

لایه‌های نازک سرامیکی برای اولین بار در مورد دستیابی به خواص اپتیکی به کار گرفته شد. در ابتدا در اواخر قرن نوزدهم و در نیمه اول قرن بیستم خواص بازتاب لایه‌های نازک فلزی در تجهیزات اپتیکی و آینه‌ها مورد استفاده قرار گرفت که بازتاب نور را افزایش و شفاف می‌نمود. متعاقب آن لایه‌های نازک سرامیکی دی الکتریک برای افزایش درصد عبور نور از سطوح عدسی‌ها و وسایل آزمایشگاهی اسپکتروسکپی توسط Fraunhofer, Rayleigh به کار گرفته شد و منجر به تولید اولین لایه‌های نازک ضد بازتاب (AR) بوسیله فرآیند انحلال شیمیایی گردید [۱]. خواص اپتیکی مواد ناشی از واکنش متقابل امواج الکترومغناطیسی نور تابشی با الکترون‌های اجسام است، بنابراین ساختمان اتمی مواد، شبکه کریستالی و عیوب و میزان ناخالصی‌های ماده زیر لایه و پوشش اعمالی تأثیر زیادی بر روی خواص ضد بازتاب نور از سطح مواد دارد. امواج الکترومغناطیسی به دلیل وجود انرژی در مواد بصورت‌های متفاوتی در فضای آن انتشار می‌یابد، از این رو در سرعت و شدت موج در مواد تغییراتی بوجود می‌آید که می‌توان آن را بوسیله ضریب شکست توجیه کرد [۲]. ضریب شکست ( $n$ ) تنها ثابت پرتوهای مؤثر در طراحی پوشش‌های اپتیکی است. در مواد سرامیکی مختلف مسیرهای پرتوهای بازتاب به دلیل تأثیر پرتوهای پراکنده شده اختلاف فاز دارند. این اختلاف فاز در شرایط خاص موجب اختلاف سرعت بین پرتوهای تابشی و پرتوهای بازتابی می‌شود [۳]. در کریستال‌های با شبکه مکعبی ضریب شکست ( $n$ ) بستگی به جهت کریستالوگرافی دارد و عموماً  $n$  در جهات کریستالی فشرده بزرگ است. در شیشه‌ها و ساختارهای فازی پلی مورفیک بازتاب کمتری نسبت به ساختمان‌های کریستالی ایجاد می‌شود. در سیلیکا ( $\text{SiO}_2$ ) با افزایش دانسیته شبکه برای شیشه، تردیمیت، کریستوبالیت و کوارتز ضریب شکست به ترتیب ۱/۴۶، ۱/۴۷، ۱/۴۹ و ۱/۶۵ افزایش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد هرچه پیوند بین اتم‌ها بیشتر از نوع کووالانت باشد تا پیوند یونی

الکترومغناطیسی در ناحیه نور مرئی بر روی زیرلایه نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود حدود ۳ درصد از پرتوهای اعمالی توسط مکانیزم‌های جذب در زیر لایه جذب، بیش از ۹۰ درصد عبور، کمتر از ۴/۵ درصد منعکس و بقیه بعلت عیوب سطحی و ترک‌های مویی پراکنده می‌شوند. ارتباط میزان پرتوهای عبور یافته و ضریب شکست بر اساس رابطه (۱) تعریف می‌شود [۶].

$$t = \frac{2n_0}{n_1 + n_0} \quad (1)$$

رابطه فوق برای یک ماده بدون پوشش است که در آن  $n_0$  ضریب شکست هوا و  $n_1$  ضریب شکست جسم و  $t$  میزان عبور پرتوهای اعمالی از جسم است. در اندازه‌گیری میزان عبور نسبت انرژی موج عبور یافته به انرژی موج اعمال شده منظور شده و در حقیقت قابلیت عبور نور از جسم مورد نظر اندازه‌گیری می‌شود. قابلیت عبور نور برابر  $T = (n_1/n_0)t^2$  و با رابطه (۲) نشان داده می‌شود [۶].

$$T = \frac{4n_0n_1}{(n_1 + n_0)^2} \quad (2)$$

ضریب شکست برای شیشه‌ها بسته به جنس و ترکیب شیمیایی و همچنین میزان معایب و عیوب داخلی بین ۱/۴۶ تا ۱/۶۵ تغییر می‌کند. با استفاده از طیف‌های بدست آمده از روی شکل (۲) می‌توان ضریب شکست شیشه زیرلایه را تعیین نمود. ماکزیمم مقدار  $T$  با استفاده از طیف عبور در محدوده طول موج‌های نورمرئی در شکل (۲) برابر ۹۱ درصد است. ضریب شکست هوا نیز  $n_0=1$  است. با قرار دادن مقادیر  $T$  و  $n_0$  در رابطه (۲) ضریب شکست زیر لایه  $n_1=1/52$  بدست می‌آید. یکی از عوامل مؤثر در ضخامت لایه‌های پوشش داده شده در روش Sol-Gel ویسکوزیته محلول است. با گذشت زمان محلول غلیظ‌تر شده و بسته به زمان غوطه‌وری ضخامت لایه افزایش می‌یابد [۷]. بنابراین برای حصول کمترین ضخامت باید در دقایق اولیه نمونه‌ها را غوطه‌ور نمود. در شکل‌های (۲) و (۳) تصاویر میکروسکپی SEM از نمونه‌های  $N_2$ ،  $N_3$  یعنی نمونه‌های پوشش داده شده سیلیکا در دقیقه اول، نشان داده شده

مقایسه رفتار اپتیکی با سایر نمونه‌ها در دسیکاتوار نگاهداری و عملیات پخت بر روی آن قرار نگرفت. در جدول شماره (۲) مشخصات نمونه‌های مورد آزمایش تنظیم گردیده است.

جدول ۱- آنالیز ترکیب شیمیایی نمونه‌های زیرلایه توسط روش XRF

۱/۱۱	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱
۴/۱۰	MgO	۲
۶/۸۷	CaO	۳
<۰/۰۸	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۴
<۰/۰۴	TiO <sub>2</sub>	۵
۷۳/۱۰	SiO <sub>2</sub>	۶
۱۴/۰۵	Na <sub>2</sub> O	۷
۰/۴۴	K <sub>2</sub> O	۸
—	MnO	۹
۰/۱۱	SO <sub>3</sub>	۱۰

جدول ۲- مشخصات نمونه‌های مورد آزمایش

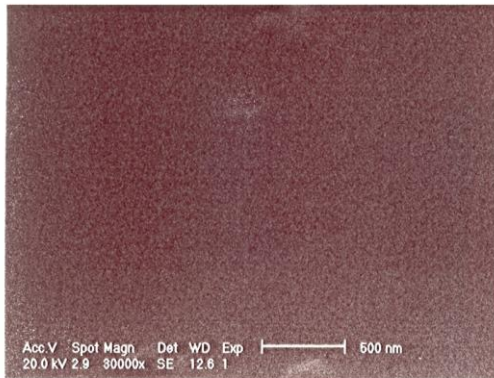
شماره نمونه	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	N <sub>3</sub>	N <sub>4</sub>
۱ ساعت	زیر لایه	۱ دقیقه	۱ دقیقه	۱ ساعت
پخت	بدون	(پخت)	(پخت)	پخت
شده	پوشش	(نشده)	(شده)	شده

### نحوه ارزیابی

به منظور بررسی‌های ساختاری، تصاویر میکروسکپی SEM و آنالیز عنصری EDAX و آنالیز فازی XRD از روی نمونه‌ها تهیه شد و رفتار اپتیکی نمونه‌ها توسط اسپکتروفتومتری نوری در ناحیه نورمرئی مورد مطالعه قرار گرفت.

### نتایج و بحث

ترکیب شیمیایی نمونه زیرلایه در جدول (۱) نشان می‌دهد جزء اصلی تشکیل دهنده آن سیلیس و مقادیر قابل توجهی از اکسیدهای CaO، Na<sub>2</sub>O، MgO و مقادیر جزئی از بقیه اکسیدها می‌باشد. در شکل (۱) نتایج آنالیز پرتوهای



شکل ۳- تصویر میکروسکوپی SEM از سطح لایه نازک سیلیکا (پخت شده  $N_3$ )

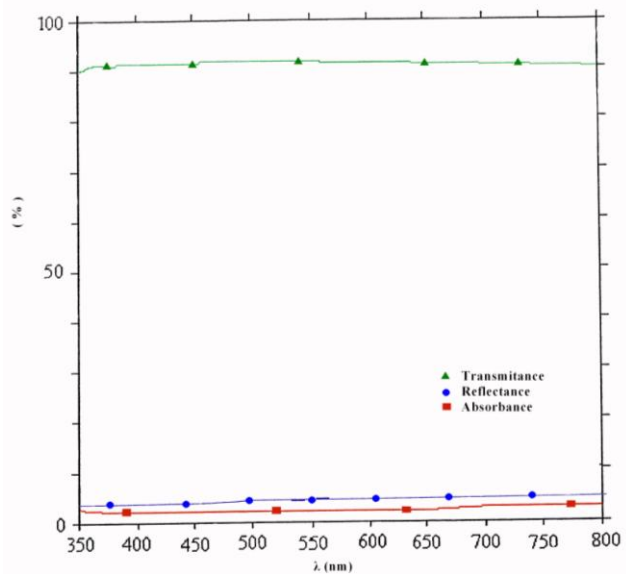
آنالیز XRD نیز از سطح سیلیکا در شکل (۵) نشان می‌دهد هیچگونه آثاری از حضور فازهای کریستالی وجود ندارد و پیک‌های آشفته فاز آمورف  $SiO_2$  تمام سطح لایه را به خود اختصاص داده است.

شکل (۶) تصویر SEM از پوشش سیلیکا در نمونه  $N_4$  است. این تصویر که از ناحیه لبه پوشش تهیه شده است لایه پوشش سیلیکا را از روی خط جداکننده پوشش از زیرلایه به خوبی مشخص می‌کند. در شکل‌های (۷) و (۸) نتایج حاصل از اعمال پرتوهای امواج الکترومغناطیسی در ناحیه نور مرئی ( $\lambda = 350 - 800 \text{ nm}$ ) بر روی نمونه بدون پوشش و کلیه نمونه‌های پوشش داده شده مشاهده می‌شود.

طیف‌های عبور و جذب در این دو شکل فقط مربوط به عبور و جذب از لایه‌های اعمالی است و تأثیر زیر لایه توسط تغییرات دستگاه اسپکتروسکوپی صفر منظور گردیده است.

همانطور که از روی شکل (۷) ملاحظه می‌شود میزان عبور نور با استفاده از اعمال لایه نازک سیلیکا بر روی شیشه زیر لایه در نمونه  $N_3$  به حدود ۹۸/۵ درصد در طول موج  $\lambda = 550 \text{ nm}$  رسیده است، این در حالی است که نمونه  $N_4$  با پوشش ضخیم دارای میزان عبوری برابر ۹۳ درصد و این میزان برای نمونه بدون پوشش ( $N_1$ ) فقط دارای ۹۱ درصد است. از طرف دیگر میزان جذب نمونه  $N_3$  حداقل و تنها

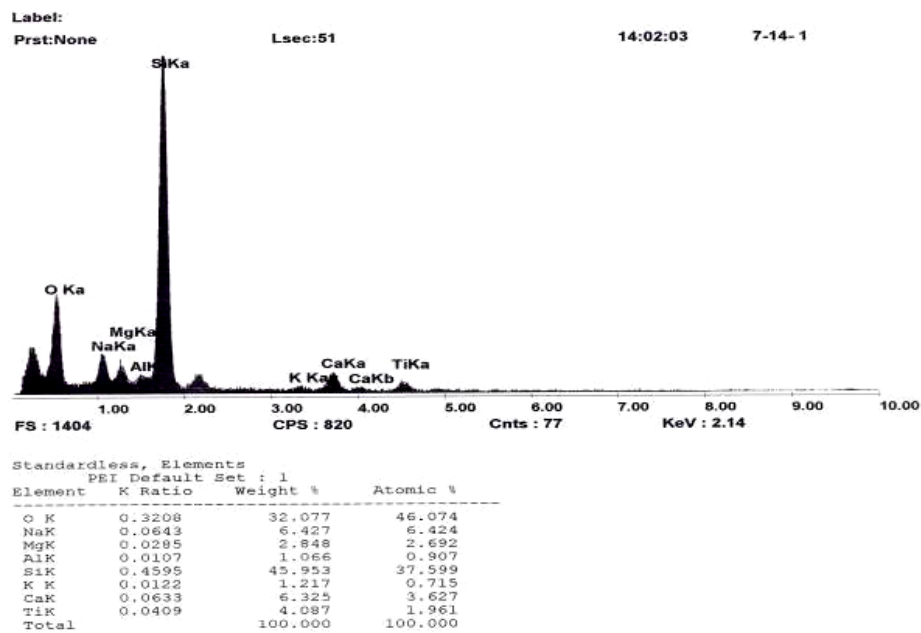
است. با توجه به اینکه عملیات پخت بر روی نمونه  $N_2$  انجام نشده است، پوشش دارای تخلخل بالایی است و بنابراین بخشی از حجم پوشش را فضای خالی با ضریب شکست هوا تشکیل می‌دهد که می‌تواند در رفتار اپتیکی پوشش مؤثر باشد. در تصویر میکروسکوپی نمونه  $N_3$  در بزرگ‌نمایی  $30000\times$  هیچگونه تخلخلی مشاهده نمی‌شود و بنابراین رفتار اپتیکی لایه فقط متأثر از ضریب شکست لایه نازک سیلیکا است. شکل (۴) آنالیز عنصری EDAX از پوشش نمونه  $N_3$  را نشان می‌دهد که حاکی از وجود مقادیر بالای سیلیس در پوشش است.



شکل ۱- نتایج آنالیز پرتوهای الکترومغناطیسی در ناحیه نور مرئی بر روی زیر لایه



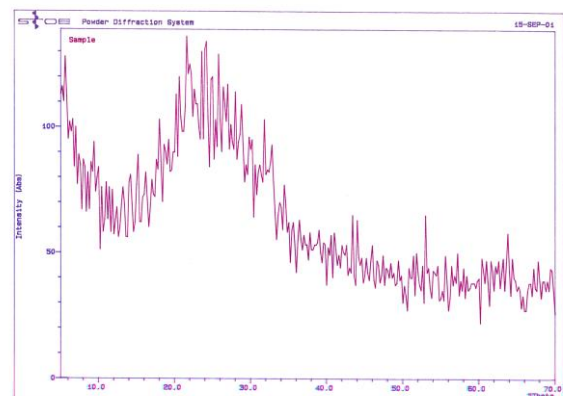
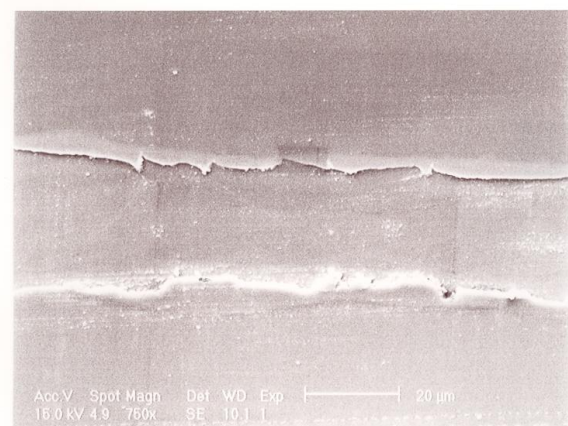
شکل ۲- تصویر میکروسکوپی SEM از سطح لایه نازک سیلیکا (پخت نشده  $N_2$ )

شکل ۴- آنالیز عنصری EDAX از سطح لایه نازک سیلیکا ( $N_3$ )

کمتر از ۱/۵ درصد از پرتوهای تابشی را به خود اختصاص داده است و درصد جذب نمونه  $N_4$  موجبات عبور پرتوهای نور تابشی را به میزان حدود ۷/۵ درصد بالاتر از میزان عبور پرتوهای اعمالی از زیر لایه فراهم کرده است. افزایش قابلیت عبور پرتوهای اعمالی به میزان تأثیرات امواج بازتاب یافته از دو فصل مشترک  $n_0/n_1$  (پوشش / هوا) و  $n_1/n_2$  (زیر لایه / پوشش) بر روی یکدیگر دارد. پرتوهای بازتاب یافته از سطح پوشش دارای یک تناوب، مرتبط با ضریب شکست و ضخامت لایه نازک هستند و ممکن است این امواج که از دو فصل مشترک بازتاب می‌یابد یکدیگر را تقویت و یا تضعیف کنند. در حالت تضعیف درصد بازتاب کاهش و میزان عبور افزایش و در صورت تقویت عکس این وضعیت اتفاق می‌افتد [۸].

$$n_1 d = \frac{\lambda}{4}, n_1 = \sqrt{n_0 n_2} \quad (3)$$

طیف‌های عبور و جذب در این دو شکل فقط مربوط به عبور و جذب از لایه‌های اعمالی است و تأثیر زیر لایه توسط تغییرات دستگاه اسپکتروسکوپی صفر منظور گردیده است.

شکل ۵- آنالیز XRD از سطح لایه نازک سیلیکا ( $N_3$ )شکل ۶- تصویر میکروسکوپی SEM از سطح پوشش سیلیکا در نمونه  $N_4$

چنانچه ذکر شد نمونه  $N_2$  بعنوان معیاری از لایه نازک پر تخلخل در این تحقیق استفاده شده است. در لایه‌های نازک متخلخل دو موضوع دارای اهمیت است. اولاً وجود تخلخل علاوه بر بالا بردن جذب پرتوهای نور میزان پراکندگی را از سطح لایه افزایش می‌دهد، در حقیقت نور در هنگام تابش به لایه پر تخلخل به سطوحی ناهموار و پیچ در پیچ برخورد کرده و ضمن روبرو با لبه‌های متعدد باعث پراکنده شدن آن در جهات مختلف می‌شود. به همین دلیل لایه‌های پر تخلخل در مقایسه با لایه‌های کم تخلخل قدری مات و تیره مشاهده می‌شود. ثانیاً هر چه دانسیته لایه نازک کاهش یابد از ضریب شکست لایه کاسته می‌شود، کم شدن ضریب شکست نیز باعث بهبود عبور پرتوهای نور می‌شود. بنابراین برآیند این دو پدیده در لایه‌های نازک متخلخل طیف عبور امواج نوری را در یک وضعیت بهینه‌ای تنظیم می‌نماید. از این رو کاهش میزان عبور نمونه  $N_2$  در مقایسه با  $N_3$  به میزان ۵ درصد ناشی از این پدیده است.

### نتیجه‌گیری

ضریب شکست نور در لایه‌های نازک سیلیکا تابع ضخامت و دانسیته لایه است. کاهش ضخامت باعث کاستن از ضریب شکست شده و قابلیت عبور پرتوهای امواج الکترومغناطیسی را افزایش و درصد جذب آنها را کاهش می‌دهد. کاهش دانسیته و یا افزایش تخلخل از یک طرف باعث بالا رفتن میزان پراکندگی نور در لایه شده و درصد جذب پرتوهای اعمالی را افزایش می‌دهد و از طرف دیگر به علت وجود فضاهای خالی در لایه باعث کاهش ضریب شکست شده و قابلیت عبور نور را بالا می‌برد. این دو پدیده در لایه‌های نازک متخلخل درصد عبور را در یک وضعیت متعادل تنظیم می‌نماید. همچنین با کاهش ضخامت درصد عبور نور در طول موج خاص به ماکزیمم میزان خود می‌رسد و در این حالت ضریب شکست لایه با جذر حاصلضرب ضرایب شکست هوا و زیر لایه برابر می‌شود.

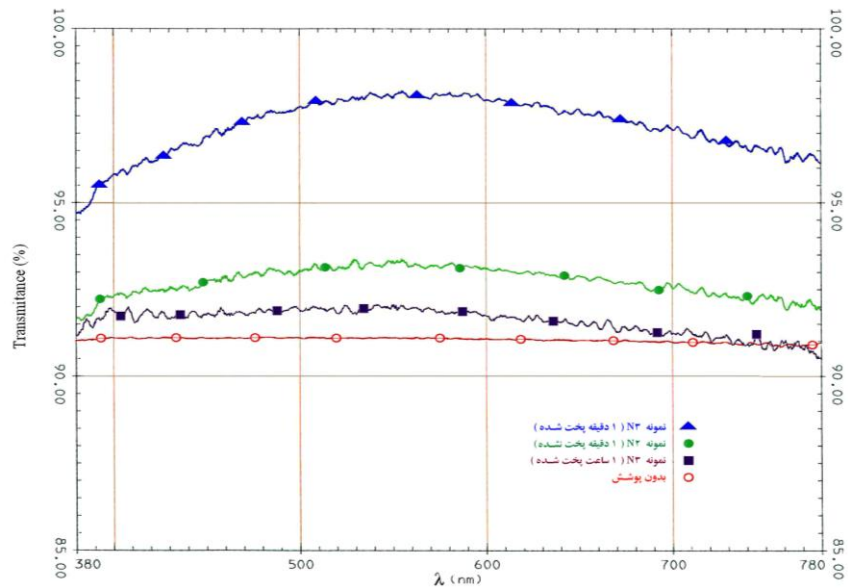
همانطور که از روی شکل (۷) ملاحظه می‌شود میزان عبور نور با استفاده از اعمال لایه نازک سیلیکا بر روی شیشه زیر لایه در نمونه  $N_3$  به حدود ۹۸/۵ درصد در طول موج  $\lambda=550\text{nm}$  رسیده است، این در حالی است که نمونه  $N_4$  با پوشش ضخیم دارای میزان عبوری برابر ۹۳ درصد و این میزان برای نمونه بدون پوشش ( $N_1$ ) فقط دارای ۹۱ درصد است. از طرف دیگر میزان جذب نمونه  $N_3$  حداقل و تنها کمتر از ۱/۵ درصد از پرتوهای تابشی را به خود اختصاص داده است و درصد جذب نمونه  $N_4$  موجبات عبور پرتوهای نور تابشی را به میزان حدود ۷/۵ درصد بالاتر از میزان عبور پرتوهای اعمالی از زیر لایه فراهم کرده است. افزایش قابلیت عبور پرتوهای اعمالی به میزان تأثیرات امواج بازتاب یافته از دو فصل مشترک  $n_0/n_1$  (پوشش/ هوا) و  $n_1/n_2$  (زیر لایه/پوشش) بر روی یکدیگر دارد. پرتوهای بازتاب یافته از سطح پوشش دارای یک تناوب، مرتبط با ضریب شکست و ضخامت لایه نازک هستند و ممکن است این امواج که از دو فصل مشترک بازتاب می‌یابد یکدیگر را تقویت و یا تضعیف کنند. در حالت تضعیف درصد بازتاب کاهش و میزان عبور افزایش و در صورت تقویت عکس این وضعیت اتفاق می‌افتد [۸].

$$n_1 d = \frac{\lambda}{4}, n_1 = \sqrt{n_0 n_2} \quad (3)$$

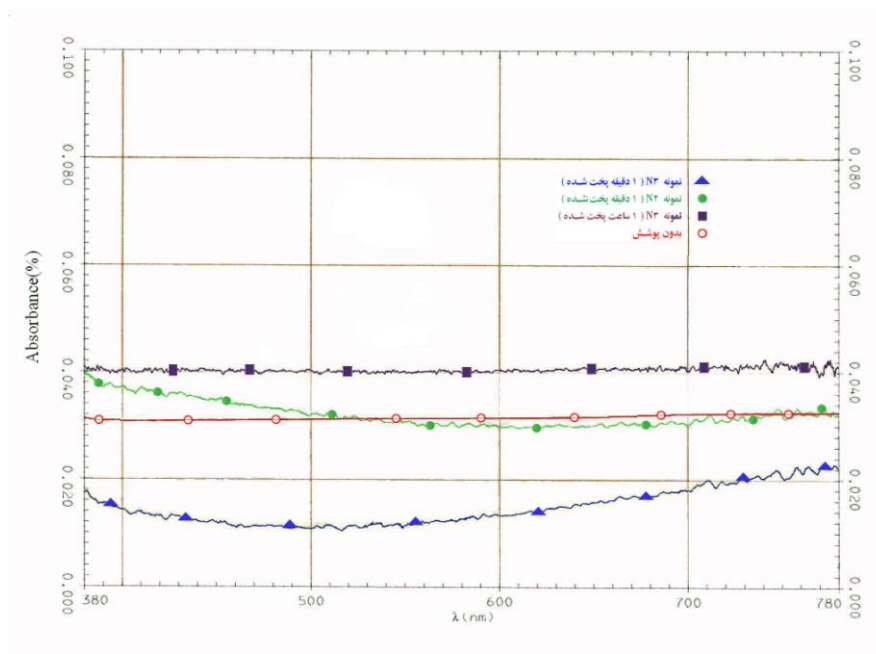
که در آن  $\lambda$  طول موجی است که میزان بازتاب در آن حداقل و یا درصد عبور در آن حداکثر و  $n_0$ ،  $n_1$  و  $n_2$  به ترتیب ضریب شکست هوا، لایه و زیر لایه و  $d$  ضخامت لایه نازک اعمال شده است. [۹].

با استفاده از روابط (۳) می‌توان ضریب شکست و ضخامت لایه نازک اعمالی را در طول موج حداکثر یعنی  $\lambda=550\text{nm}$  محاسبه نمود. با قرار دادن ضریب شکست زیر لایه ( $n_2=1/52$ ) و مقدار  $\lambda$  حداکثر در دو رابطه فوق مقادیر ضریب شکست و ضخامت لایه به ترتیب  $n_1=1/23$  و  $d=110\text{nm}$  بدست می‌آید.

نکته دیگر قابل بررسی مقایسه طیف‌های عبور و جذب در نمونه‌های  $N_2$  (پخت نشده) و  $N_3$  (پخت شده) است.



شکل ۷- مقایسه طیف پرتوهای عبور در ناحیه نور مرئی بر روی نمونه زیر لایه و نمونه‌های پوشش داده شده.



شکل ۸- مقایسه طیف پرتوهای جذب در ناحیه نور مرئی بر روی نمونه زیر لایه و نمونه‌های پوشش داده شده

### مراجع

1. H. A. Macleod, "In Applide Optics and Optical Engineering", vol.x, eds R. R. Sannon and J. C. Wyant Academic press, New York, 1987.
2. O. S. Heavens, "Optical Properties of Thin Solid Films", Dover, Newyork, 1965.
3. A. Soutar, B. Fokkink, "Sol-Gel Anti - Reflective Coatings", SIMTech Technical Report, Surface Technology Group, 2001.
4. C. Kittel, "Introduction of Solid State Physics", 4<sup>th</sup> ed, wiley, Newyork, 1971.
5. H. A. Macleod, "Thin Film Optical Filter", Adom Hilger, London, Newyork, 1987.
6. E.K. Hussmann, "key Engineering Material", Vol. 150, 1998.
7. T.S. Zeng. X. Fokkink, "Gelling Induced Autophobicity Effects of Multilayered Sol-Gel CoatingSystem", Surface modification Technology XVIII, 269-275, 1999.
8. P. Nostell, A Roos, B. Karlsoon, "Thin Solid Films", 351, 1999. PP. 170-175.

9. T. Soutar, "*Processing of Multilayered Optical Coatings*", organic-Inorganic Hybrid conference, University of surrey, Uk, 2000.
۱۰. رضا مظفری‌نیا، فخرالدین اشرفی زاده و محمدعلی گلزار، "تهیه لایه‌های نازک سرامیکی به روش Sol-Gel"، مجله استقلال، سال ۲۲، شماره ۲، اسفند ۱۳۸۲، ۱۸۹-۲۰۰.
11. T.S. Zeng, X. Fokink, "*Processing Technology of Multilayered Sol-Gel Coating System*", Surface modification Technology XVIII, conference, Singapore, 1999.
12. R. Mozafforinia, F. Ashrafizadeh, and M. Golozar, "*SiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>-ZnO Optical Multilayer Coatings Fabricated by the Sol-Gel Method*", Surface Engineering", Vol.18, No.4, 2002, 305-308.
۱۳. رضا مظفری‌نیا، "تولید و ارزیابی خواص پوشش های اپتیکی به روش Sol-Gel"، پایان نامه دکترای مهندسی مواد دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، سال ۱۳۸۱، ۵۳-۵۲.