

استحکام بخشی شیشه‌های سودالایم با استفاده از روش تعویض یونی به کمک میدان

الکتریکی

امید بناپور غفاری^۱، امیررضا فدائی^۲، پوریا لطفی پور^۳، بیژن افتخاری یکتا^{۴*}

^۱تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران،omid_banapour@metaleng.iust.ac.ir

^۲تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران،amirreza_fadaei@metaleng.iust.ac.ir

^۳تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران،p_lotfipoor@metaleng.iust.ac.ir

^{۴*}تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران،beftekhari@iust.ac.ir

چکیده

تعویض یونی یکی از روش‌های استحکام بخشی شیشه‌ها می‌باشد که شامل وارد کردن شیشه حاوی محتوای قلیایی در یک حمام نمک مذاب (به عنوان مثال نیترات پتاسیم) می‌باشد. در این فرآیند یون کوچک‌تر از ساختار شیشه خارج شده و یون بزرگ‌تر وارد ساختار شیشه می‌شود. این فرآیند باعث ایجاد تنش فشاری در سطح می‌شود و در نتیجه استحکام را افزایش می‌دهد. با اعمال یک انرژی خارجی مانند میدان الکتریکی، می‌توان سرعت و راندمان فرآیند را افزایش داد. در تحقیق حاضر با استفاده از روش تعویض یونی به کمک میدان الکتریکی، به بررسی استحکام بخشی شیشه‌های سودالایم پرداخته شده است. در این پژوهش پارامترهای دما، زمان و میدان الکتریکی به هدف افزایش استحکام بررسی شدند. بیشترین استحکام، عدد سختی و بهترین شکست نگاری در نمونه‌ای مشاهده شد که تنها به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد در میدانی به شدت ۲۰۰۰ ولت بر سانتی‌متر قرار گرفت. مشاهده شد که استحکام نمونه‌ها به بیش از ۴ برابر نسبت به نمونه خام رسید. همچنین عدد سختی نمونه‌ها نیز از kgf/mm^2 55.0 ± 5.0 به 75.0 ± 5.0 افزایش پیدا کرد. علاوه بر این عمق نفوذ برای نمونه‌ای که تنها به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد تحت میدانی به شدت ۲۰۰۰ ولت بر سانتی‌متر بوده است، به ۱۱ میکرومتر رسیده است. قابل ذکر است برای نمونه‌هایی که تحت فرآیند تمپر شیمیایی بدون استفاده از میدان الکتریکی قرار گرفته‌اند، در شرایط دمایی ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴۰ دقیقه عمق نفوذ ۳ میکرومتر شد.

کلید واژه: تمپر شیمیایی، تعویض یونی، خواص مکانیکی، تنش فشاری، عمق نفوذ

۱- مقدمه و مروری بر منابع

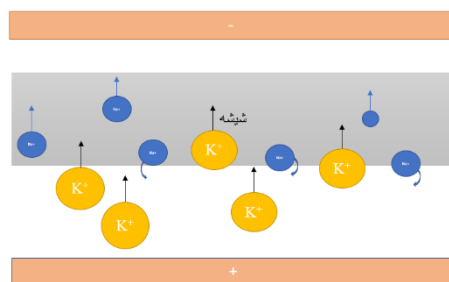
شیشه به دلیل خواص منحصر به فردش یک نقش اساسی در کاربردهای روزمره داشته است. خواص مکانیکی شیشه غالباً از توزیع و عمق عیوب سطحی تاثیر می‌پذیرد و حضور ریزترک‌های سطحی موجب افت خواص مکانیکی شیشه می‌شوند. تحقیقات گسترده‌ای جهت تقویت خواص مکانیکی شیشه بوسیله اعمال تنش فشاری صورت پذیرفته است. به عبارت دیگر، تنش فشاری، ایجاد و انتشار ترک‌ها را محدود می‌سازد [۱-۴].

روش‌های متداول استحکام بخشی شیشه‌ها شامل تمپر حرارتی و تمپر شیمیایی است. در روش تمپر حرارتی شیشه‌ها با استفاده از اعمال شیب حرارتی، تنش فشاری ماندگاری ایجاد می‌شود که از رشد ترک جلوگیری شود. اما این روش برای استحکام بخشی شیشه‌های با ضخامت کمتر از ۲-۳ میلی‌متر و همچنین شیشه‌هایی با هندسه پیچیده مناسب نمی‌باشد [۱، ۳]. روش دیگر افزایش استحکام در شیشه‌ها، تمپر شیمیایی یا استحکام بخشی شیمیایی می‌باشد. این روش از دو طریق قابل دستیابی می‌باشد. ۱. تعویض کاتیون‌های بزرگتر با کاتیون‌های کوچکتر ۲. روش دوم ایجاد تنش فشاری از طریق کاهش ضریب انبساط سطحی لایه سطحی می‌باشد که از طرق متفاوت به مانند جایگزین کردن یون‌های کوچک‌تر مثل Li^+ به جای یون‌های بزرگتر در سطح انجام می‌پذیرد [۱، ۳]. تعویض یونی در شیشه‌ها، یکی از فرآیندهایی است که پس از شکل‌دهی انجام شده و امروزه در بسیاری از کارخانجات به منظور استحکام بخشی شیشه‌های مختلف، از فرآیند تعویض یونی استفاده می‌شود. همچنین از این فرآیند به منظور تغییر ضریب شکست در یک ناحیه مشخص (در موجرها) [۱۲-۵] و کاربرهای آنتی باکتریال [۱۳-۱۷] به طور گسترده استفاده می‌شود.

دلیل افزایش استحکام، ایجاد تنش فشاری بوسیله فرآیند تعویض یونی می‌باشد. خواص تعویض یونی شیشه و استحکام ایجاد شده، بوسیله بزرگی تنش فشاری^۲ و عمق لایه تعویض یونی^۳ شده بررسی می‌شود [۱، ۳]. باید توجه کرد که خواص مذکور به شدت به ترکیب شیشه تحت فرآیند و تاریخچه حرارتی^۴ آن وابسته می‌باشد [۱۸، ۱۹]. قابل ذکر است که فرآیند تمپر شیمیایی (تعویض یونی) به دلیل ماهیت نفوذی‌ای که دارد، باید در دمای بالا (دمایی مابین دمای نقطه ذوب نمک و دمای انتقال به شیشه) انجام شود. در دمای بالا احتمال غلبه بر سد انرژی جهت جهش یون‌ها^۵ در ماتریس شیشه‌ای فراهم است [۲۰]. همچنین فرآیند مذکور می‌تواند به کمک اعمال میدان الکتریکی تسریع شود در حالی که در صورتی که فرآیند بوسیله انرژی خارجی تسریع نشود، بسته به میزان عمق نفوذ مورد نیاز ساعت‌ها زمان می‌برد [۱۸، ۲۵-۲۱]. استفاده از میدان الکتریکی، مکانیسم حاکم بر نفوذ را تغییر می‌دهد و از حالت نفوذ با نیروی پیشران شیب غلظتی به نفوذ با نیروی پیشران میدان الکتریکی تبدیل می‌کند. در روش تمپر شیمیایی یون‌های مورد نظر (به عنوان مثال پتاسیم) جایگزین یون‌های سدیم در ساختار شیشه شده و سدیم وارد مذاب می‌شود (حرکت خلاف جهت

یون میزبان و یون مهمان). اما در فرآیند تمپر شیمیایی به همراه میدان الکتریکی، هر دو یون برخلاف حالت بدون میدان در یک جهت حرکت می‌کنند که این امر به دلیل اختلاف پتانسیل می‌باشد.

با توجه به شکل ۱ مشاهده می‌شود که در اثنای فرآیند تعویض یونی به کمک میدان الکتریکی، برخی سدیم‌های موجود در لایه سطحی ساختار شیشه به مذاب منتقل شده و برخی نیز به سمت قطب منفی حرکت می‌کنند. همچنین یون‌های پتاسیم موجود در



شکل ۱. شماتیک فرآیند تعویض یونی به همراه میدان الکتریکی و نحوه حرکت یون‌ها

مذاب، به سمت ساختار شیشه (به سمت قطب منفی) حرکت می‌کنند و جانشین یون‌های سدیم می‌شوند [۲۶، ۲۷]. در روش تمپر شیمیایی در انتخاب شیشه محدودیت وجود دارد و شیشه مورد استفاده در تمپر شیمیایی سیلیکات قلیایی می‌باشد. علاوه بر این در انتخاب شیشه مورد استفاده باید توجه کرد که بستر شیشه‌ای ایده‌آل باید درصد قلیایی بالا، دوام و پایداری شیمیایی بالا در محلول‌های آبی و نمک مذاب و همچنین درصد ناخالصی پایین داشته باشد. بنابراین همانطور که گفته شد بدلیل طبیعت نفوذی تمپر شیمیایی، زمان انجام فرآیند بسیار طولانی می‌باشد و نیازمند زمان طولانی است [۲۵، ۳۰-۲۸].

۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش برای فرآیند تعویض یونی به کمک میدان از شیشه‌های سودالایم استفاده شد. این نوع شیشه‌ها کاربرد صنعتی گسترده‌ای دارند و به علت فرآوانی و برخورداری از عنصر قلیایی به میزان بالا گزینه مناسبی جهت تعویض یونی هستند. به همین منظور از شیشه‌های شرکت کورنینگ^۶ با کد ۲۹۴۷ بهره گرفته شد. ترکیب شیمیایی این شیشه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. برای انجام فرآیند از نمک نیترات پتاسیم (شرکت نترون^۷ با کد ۱-۷۹-۷۷۵۷ با خلوص ۹۹/۵) استفاده شد.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی شیشه سودالایم زیرلایه (کورنینگ ۲۹۴۷)

ترکیب شیمیایی	SiO ₂	Na ₂ O	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	trace
درصد وزنی (wt%)	۷۰/۵۶	۱۴/۵۴	۸/۹۳	۳/۴۱	۰/۵۹	۰/۸۷	۱/۱

در این پژوهش از نمونه‌های شیشه‌ای سودالایم مستطیل شکل به ضخامت ۱ میلی‌متر و طول و عرض به ترتیب ۷۵ و ۳۵ میلی‌متر مربع استفاده شد، در ابتدای هر آزمایش نمونه‌های شیشه با آب دی‌یونیزه و پاشش اتانول، تمیز شدند. برای ایجاد جریان

و رسانایی در زیر لایه شیشه‌ای، یک سوی زیر لایه شیشه‌ای به وسیله سیم مسی و چسب آلومینیومی به شکل مستطیل پوشش داده شد و در سوی دیگر، درون ستون‌های ذخیره مذاب، الکترودی از جنس آلیاژ نیکل-کروم قرار داده شد. شکل 2 طرح واره دستگاه مورد استفاده جهت تعویض یونی به کمک میدان الکتریکی را نشان می‌دهد.

مطابق شکل 2 شیشه بر روی محفظه نگهداری نمک جایگذاری شد و محفظه نگهداری نمک به همراه شیشه درون محفظه حرارتی به منظور ذوب نمک قرار گرفت. بعد از رسیدن به دمای مد نظر، میدان‌های الکتریکی اعمال شد تا تاثیر اعمال میدان بر فرآیند تعویض یونی بررسی شود. در این پژوهش استحکام خمشی سه نقطه‌ای، سختی و پروفایل غلظتی نمک پتاسیم در میدان‌هایی به شدت $\frac{400}{cm}$ ، $\frac{1000}{cm}$ ، $\frac{2000}{cm}$ و در بازه‌ی دمای ۳۷۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و همچنین در زمان‌های ۱، ۵، ۱۰، ۶۰ و ۲۴۰ دقیقه مورد مقایسه قرار گرفت. جدول ۲ شرایط آزمایش و نحوی کدگذاری نمونه‌های تعویض یونی شده را نشان می‌دهد.

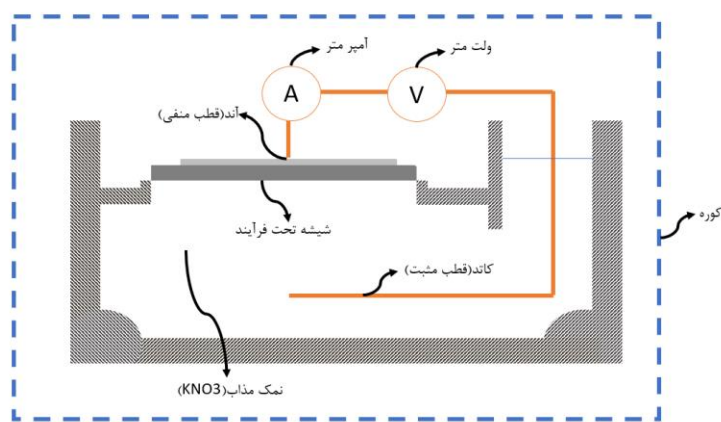
در اثنای فرآیند تعویض یونی جریان و ولتاژ کنترل می‌شد. پس از اتمام فرآیند شیشه‌ها از محفظه خارج و در مرحله‌ی آخر پس از برداشته شدن چسب آلومینیومی، بوسیله شستشو شیشه با آب دی‌یونیزه و پاشش اتانول بر شیشه‌ها، پاکسازی شیشه‌ها انجام شد تا برای انجام آزمون‌های میکرو سختی، استحکام سنجی سه نقطه‌ای و اندازه‌گیری پروفایل غلظتی آماده شود. برای بررسی سختی نمونه‌ها بعد از انجام فرآیند تعویض یونی از میکرو سختی ویکرز با استاندارد ASTM E384-84 استفاده شد. آزمون سختی سنجی در این پژوهش با اعمال نیروهای 0.1 ، 0.3 ، 0.5 و 1 kgf، زمان بارگذاری ۱۵ ثانیه، تحت اتمسفر هوا، رطوبت هوا ۳۰-۵۰ درصد و در دمای محیط انجام شد. عدد سختی توسط رابطه زیر محاسبه شد. در این رابطه F نیرو فرورفتگی بر حسب کیلوگرم است و D میانگین طول قطرهای فرورفتگی‌ها است [۳۱].

$$VHN = 1.8544 \frac{F}{D^2}$$

برای اندازه‌گیری پروفایل غلظتی سطح مقطع نمونه‌ها از یک میکروسکوپ الکترونی روبشی (TESCAN VEGA/XMU) مجهز به طیف سنج پرتو ایکس پراکنده ساز انرژی (TESCAN EssenceTM) استفاده شد. قابل ذکر است اندازه‌گیری پروفایل‌ها به صورت آنالیز خطی و توزیع عناصر انجام شد. پروفایل‌ها از سطح تا عمق ۵۰ میکرومتر در نمونه‌ها و از ۲۵۶ نقطه با فاصله زمانی ۱ ثانیه نمونه برداری شد.

جدول ۲. شرایط آماده سازی نمونه ها و نحوی کدگذاری آنها

کد نمونه	دما انجام فرآیند تعویض یونی (°C)	زمان انجام فرآیند تعویض یونی (min)	میدان اعمالی حین فرآیند تعویض یونی ($\frac{V}{cm}$)
۴۰۰-۱-۲۰۰۰	۴۰۰	۱	۲۰۰۰
۴۰۰-۵-۲۰۰۰	۴۰۰	۵	۲۰۰۰
۴۰۰-۱۰-۲۰۰۰	۴۰۰	۱۰	۲۰۰۰
۴۰۰-۶۰-۲۰۰۰	۴۰۰	۶۰	۲۰۰۰
۴۰۰-۲۴۰-۲۰۰۰	۴۰۰	۲۴۰	۲۰۰۰
۳۷۰-۱۰-۲۰۰۰	۳۷۰	۱۰	۲۰۰۰
۴۳۰-۱۰-۲۰۰۰	۴۳۰	۱۰	۲۰۰۰
۴۰۰-۱۰-۲۰۰۰	۴۰۰	۱۰	۲۰۰۰
۴۰۰-۱۰-۴۰۰	۴۰۰	۱۰	۴۰۰
۴۰۰-۱۰-۱۰۰۰	۴۰۰	۱۰	۱۰۰۰



شکل ۲. طرح واژه دستگاه مورد استفاده جهت انجام فرآیند تعویض یونی به کمک میدان الکتریکی

همانطور که گفته شد، با انجام فرآیند تعویض یونی، یونی با شعاع یونی بزرگتر جانشین یونی با شعاع یونی کوچک تر شده و به دلیل ایجاد اختلاف شعاع یونی، تنش پسماند فشاری در سطح شیشه ایجاد می شود. به طور کلی، علت ایجاد تنش پسماند فشاری در سطح به عدم تطابق شعاع یونی مابین سدیم و پتاسیم باز می گردد. در نتیجه اختلاف شعاع یونی (عدم تطابق)، تنش فشاری از لایه درونی به لایه سطحی اعمال می شود. وجود تنش پسماند فشاری در لایه سطحی، علت افزایش استحکام شیشه تعویض یونی شده نسبت به شیشه خام است. همچنین تنش پسماند فشاری در لایه سطحی موجب افزایش سختی در شیشه تعویض یونی شده

می‌شود به همین جهت اندازه‌گیری تنش پسماند فشاری در لایه سطحی شیشه حائز اهمیت است. طبق پژوهش لاون [۳۲]، یک راه نسبتاً آسان در اندازه‌گیری تنش پسماند در مواد ترد، ایجاد ترک‌های ناشی از فرورفتگی می‌باشد. لاون [۳۲] رابطه زیر را برای اندازه‌گیری تنش پسماند فشاری ارائه کرد. در این رابطه، P برابر با بار اعمالی حداکثری، d برابر با ضخامت لایه تعویض شده که به صورت میانگین عمق نفوذ در چند قسمت گزارش می‌شود. C میانگین طول ترک‌ها و χ نیز یک فاکتور بی‌بعد (بیانگر شدت تنش اعمالی) که برابر با $\frac{2}{\sqrt{\pi}}$ (برای تمام شیشه‌های سودالایم) در نظر گرفته شد. ψ فاکتور مربوط به هندسه ترک (ضریب هندسه) می‌باشد که برای تمام شیشه‌ها برابر با $0/016$ در نظر گرفته شد. همچنین E برابر با مدول الاستیسیته (برای شیشه سودالایم برابر با 75 گیگاپاسکال)، H نیز برابر با میزان سختی (برای شیشه سودالایم برابر با $5,5$ گیگاپاسکال) می‌باشد. علاوه بر این قابل ذکر است در پژوهش لاون، به گونه‌ای در نظر گرفته شد که تنش پسماند در زیر نیم دایره در سطح شیشه به طور یکنواخت توزیع شده است. توزیع تنش پسماند به صورت یکنواخت در سطح شیشه به صورت تقریبی با عمق نفوذ مرتبط دانسته شد.

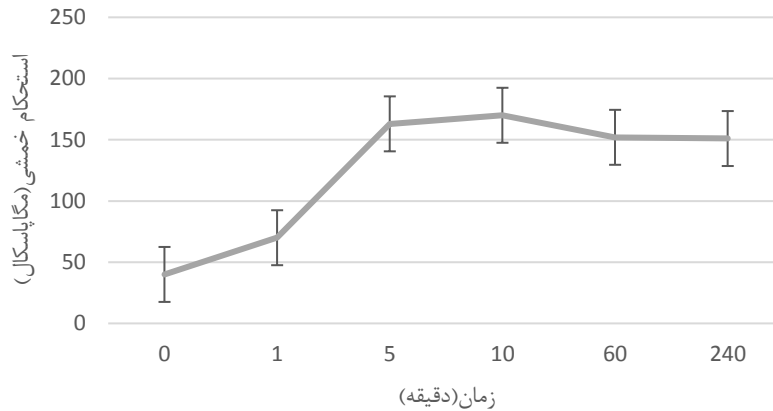
$$\sigma = \frac{3}{4\psi\sqrt{d}} \left(\frac{\chi P}{\sqrt{C^3}} - \psi P \left(\frac{E}{H} \right)^{\frac{1}{2}} C^{-\frac{3}{2}} \right) \quad [32]$$

در نهایت برای اندازه‌گیری استحکام خمشی از استاندارد ASTM-C-158-95 استفاده شد. در این پژوهش از نمونه شیشه‌ای با ابعاد $75 \times 25 \times 1$ mm استفاده شد و آزمون استحکام سنجی با نرخ اعمال نیرو $1 \frac{mm}{min}$ تحت اتمسفر هوا، رطوبت $30-50$ درصد و در دمای محیط انجام پذیرفت. همچنین فاصله تکیه‌گاه 63 mm قرار داده شد. برای آماده‌سازی نمونه‌ها ابتدا لبه هر شیشه با سمباده‌هایی از نوع $100, 200, 300, 400, 600, 800$ و 1000 صیقل داده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- استحکام خمشی سه نقطه‌ای

نمونه‌های شیشه‌ای پس از انجام فرآیند تعویض یونی پتاسیم با سدیم، هیچگونه تغییر رنگی را از خود نشان ندادند. پس از انجام فرآیند ابتدا همگی شیشه‌ها تحت آزمون استحکام خمشی ۳ نقطه قرار گرفتند که نتایج آن‌ها بر حسب زمان انجام فرآیند شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. استحکام خمشی نمونه‌های $M=2000-400$ (مدت زمان انجام آزمایش، با مقادیر ۱، ۵، ۱۰، ۶۰ و ۲۴۰ دقیقه، صفر دقیقه نشانگر نمونه خام است)

شکل ۳ نمودار تغییرات استحکام خمشی بر حسب زمان را برای نمونه‌هایی که تحت شدت میدان 2000 ولت بر سانتی متر و دمای 400 درجه سانتی گراد قرار گرفته‌اند، نشان می‌دهد. با انجام فرآیند تعویض یونی به همراه میدان الکتریکی، استحکام خمشی از 40 مگاپاسکال برای نمونه خام به 170 مگاپاسکال برای نمونه $2000-10-400$ افزایش یافته است. می‌توان مشاهده کرد که هنگامی که نمونه‌ها حتی به مدت 1 دقیقه تحت میدان 2000 ولت بر سانتی متر و در دمای 400 درجه سانتی گراد، تحت فرآیند تعویض یونی به همراه میدان قرار می‌گیرند، استحکام خمشی نمونه 30 مگاپاسکال نسبت به نمونه خام افزایش می‌یابد. علاوه بر این با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌شود که بیشینه استحکام خمشی در زمان 10 دقیقه رخ داده است و استحکام خمشی نمونه نسبت به نمونه خام 130 مگاپاسکال افزایش داشته است. همانطور که اشاره شد، افزایش استحکام خمشی به علت تنش فشاری پسماند در سطح شیشه است. علت ایجاد تنش فشاری پسماند در سطح، جایگزینی یون کوچک سدیم با یون بزرگتر پتاسیم می‌باشد.

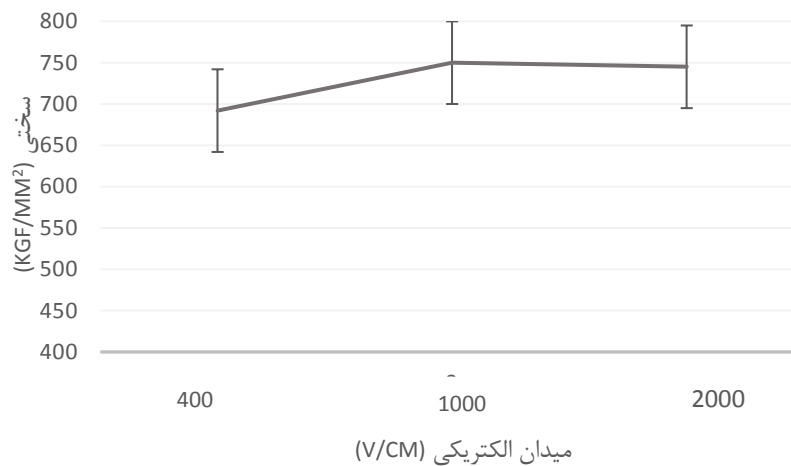
نکته قابل توجه این است که با افزایش زمان فرآیند تعویض یونی به کمک میدان الکتریکی از 10 دقیقه به 60 و 240 دقیقه، میزان استحکام خمشی از 170 مگاپاسکال به 152 و 151 مگاپاسکال کاهش می‌یابد. دلیل کاهش استحکام در زمان‌های طولانی، رهايش تنش فشاری می‌باشد. نتایجی همسو با یافته‌های بدست آمده در این پژوهش توسط وارشنیا و همکارانش [۳۳، ۳۴]، ونگ و همکارانش [۳۵] مبنی بر رهايش تنش به هنگام تعویض یونی ارائه شده است. نقش رهايش تنش در فرآیند تعویض یونی بسیار حائز اهمیت است. چرا که این عامل باعث ناهنجاری‌های پروفایل تنشی در سطح می‌شود. منظور از ناهنجاری‌های تنشی، تغییرات ایجاد شده در شدت تنش سطحی و تغییر مکان ماکزیمم تنش ایجاد شده است. به عبارت دیگر انتظار می‌رود که شدت تنش فشاری پس از فرآیند تعویض یونی در سطح شیشه به ماکزیمم مقدار خود برسد و با حرکت به سمت عمق قطعه از میزان تنش

فشاری کاسته شود؛ اما نتایج تجربی نشان دادند که مکان ماکزیمم تنش فشاری در سطح قطعه رخ نمی‌دهد بلکه با فاصله‌ای از آن در عمق قطعه اتفاق می‌افتد [۲۷، ۳۴، ۳۶]. در مواردی وی سکوزفلو به عنوان عامل رهایش تنش فشاری ایجاد شده در فرآیند تعویض یونی در نظر گرفته می‌شود [۴۰-۳۷] و با افزایش زمان ماند شیشه در دماهای بالاتر این پدیده تشدید می‌شود. بنابراین نمونه‌های ۲۰۰۰-۶۰-۴۰۰ و ۲۰۰۰-۲۴۰-۴۰۰ که در دمای بالا به مدت زمان طولانی (بترتیب ۶۰ و ۲۴۰ دقیقه) نگه‌داری می‌شوند؛ احتمال رهایش تنش در آن‌ها تشدید می‌شود. بنابراین افت تنش فشاری در سطح می‌تواند منجر به افت استحکام نمونه‌ها شود. شایان ذکر است که محاسبات تنش فشاری با استفاده از روش فرورونده‌ی ویکرز در بخش ۳-۳ ارائه شده است. این محاسبات مفروضات فوق را تایید می‌کند.

۳-۲- سختی سنجی ویکرز

شکل ۴ نتایج آزمون سختی سنجی را برای نمونه‌های N-۱۰-۴۰۰ که در آن "N" شدت میدان الکتریکی و برابر با مقادیر ۴۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ ولت بر سانتی متر است، نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که نمونه‌های تعویض یونی شده تحت میدان الکتریکی سختی بیشتری از نمونه خام داشتند.

به طور کلی هنگامی که یون بزرگتر (پتاسیم) جایگزین یونی با شعاع یونی کوچکتر (سدیم) در ساختار شیشه می‌شود، حجم مولی سطح افزایش یافته و در نتیجه موجب فشردگی بر روی سطح می‌شود. اما با انجام تعویض یونی و در نتیجه با افزایش شعاع یونی، قطبش بیشتر شده و موجب کاهش مقاومت در برابر فرورونده خارجی می‌شود. پس دو عامل ۱. افزایش تنش فشاری ناشی از تعویض یونی و ۲. افزایش قطبش، با هم در تقابل بوده که اولی موجب افزایش سختی و دومی موجب کاهش سختی می‌شود. در نتیجه تقابل این دو پارامتر تعیین کننده میزان سختی می‌باشد.

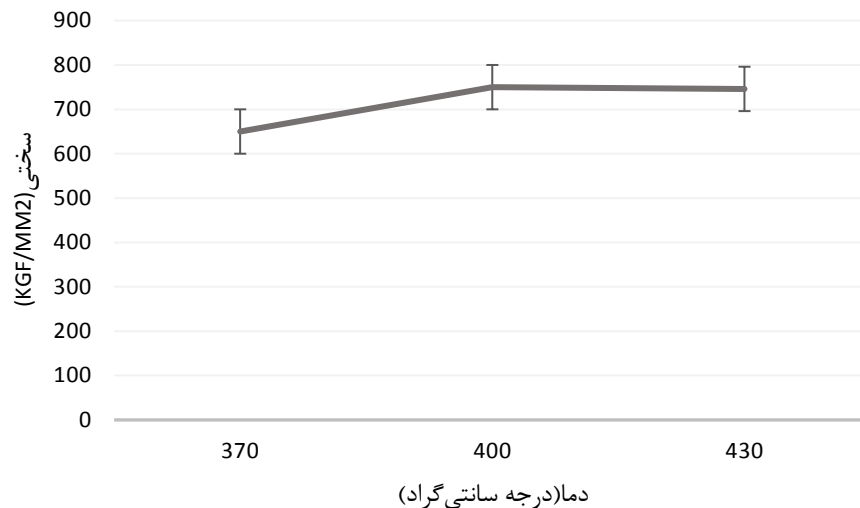


شکل ۴. تاثیر شدت میدان الکتریکی بر عدد سختی در نمونه‌های $N=10-400$ (N = شدت میدان اعمالی، با مقادیر ۴۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ ولت بر سانتی متر)

شکل ۴ نمودار تغییرات عدد سختی بر حسب شدت میدان را نشان می‌دهد. به طور کلی می‌توان مشاهده کرد که با افزایش شدت میدان در دما و زمان ثابت، عدد سختی برای نمونه‌ها افزایش پیدا کرده است. به عبارت دیگر غلظت پتاسیم بر روی سطح با افزایش شدت میدان الکتریکی، بیشتر شده است که موجب افزایش فشردگی سطحی شده و در نتیجه عدد سختی افزایش می‌یابد. همانطور که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود با افزایش میدان از ۴۰۰ ولت بر سانتی‌متر تا ۱۰۰۰ ولت بر سانتی‌متر در شرایط ثابت، میزان سختی از 692 ± 50 Kgf/mm² به 750 ± 50 Kgf/mm² افزایش پیدا کرده است. از طرفی با افزایش هر چه بیشتر شدت میدان الکتریکی از ۱۰۰۰ V/cm به ۲۰۰۰ V/cm تغییر چشمگیری در عدد سختی ملاحظه نمی‌شود. علت این امر احتمالاً به اشباع شدن سطح از غلظت پتاسیم برمی‌گردد و در نتیجه سختی ثابت می‌ماند. لازم به ذکر است که منظور از اشباع شدن سطحی تعویض کامل سدیم‌های سطحی با پتاسیم (یون مهاجم) است.

شکل ۵ سختی نمونه‌ها بر حسب دما (۳۷۰، ۴۰۰، ۴۳۰ درجه سانتی‌گراد) در شرایط زمان و شدت میدان ثابت نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود در دمای ۳۷۰ درجه سانتی‌گراد عدد سختی برابر با 650 ± 50 kgf/mm² می‌باشد و با افزایش ۳۰ درجه سانتی‌گرادی دما برای نمونه‌ای که در شرایط مشابه تحت فرآیند تعویض یونی قرار گرفته است، عدد سختی تا 750 ± 50 kgf/mm² افزایش می‌یابد. فرآیند تعویض یونی یک فرآیند نفوذی است [۲۷]؛ افزایش دما از ۳۷۰ به ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد موجب افزایش ضریب نفوذ و به تبع آن افزایش غلظت سطحی یون‌های پتاسیم وارد شده می‌گردد. افزایش هر چه بیشتر غلظت سطحی پتاسیم موجب افزایش عدد سختی می‌شود. حال آنکه با افزایش مجدد ۳۰ درجه سانتی‌گرادی دما، در شرایط یکسان، عدد سختی تغییری نمی‌کند، این امر احتمالاً به دلیل رسیدن غلظت سطحی پتاسیم به غلظت اشباع می‌باشد و نشانگر آن است که شرایط بهینه

برای فرآیند تعویض یونی به کمک میدان الکتریکی نمونه ۲۰۰۰-۱۰-۴۰۰ است. نتایج نشان داد که نمونه‌های تعویض یونی شده سختی ۲۰ الی ۴۰ درصد بیشتری نسبت نمونه‌های خام دارند.



شکل ۵. تاثیر دما بر عدد سختی نمونه‌های ۲۰۰۰-۱۰-۴۰۰ (T=دمای انجام آزمایش، با مقادیر ۳۷۰، ۴۰۰ و ۴۳۰ درجه سانتی‌گراد)

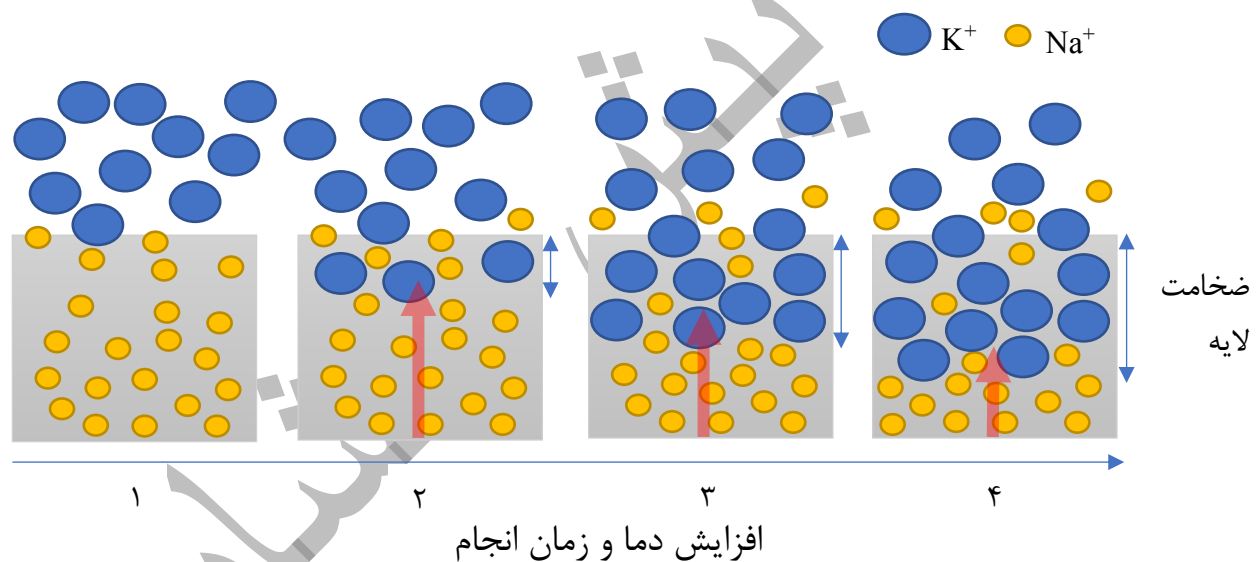
۳-۳- محاسبه تنش پسماند فشاری

جدول ۳، میزان تنش پسماند محاسبه شده بر حسب زمان را برای نمونه‌هایی که تحت میدان و دمای یکسان (۲۰۰۰ ولت بر سانتی‌متر و ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد) تعویض یونی شده‌اند نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۳ با افزایش زمان فرآیند از ۱ دقیقه به ۵ و ۱۰ دقیقه در دما و میدان ثابت، تنش پسماند افزایش چشمگیری داشته است. اما پس از گذشت ۶۰ دقیقه تنش پسماند به طور واضح کاهش یافته است.

جدول ۳. محاسبه تنش پسماند برای نمونه‌هایی با ضخامت لایه تعویض شده به عمق $10 \mu m$ ، بار اعمالی فرورونده $9/8 N$ ، مدول یانگ شیشه $75 Gpa$

کد نمونه	طول ترک (μm)	سختی (Kgf/mm^2)	تنش پسماند فشاری (Mpa)
۲۰۰۰-۱-۴۰۰	۰,۰۸۷	۵۲۰	۱۵۵,۷۱
۲۰۰۰-۵-۴۰۰	۰,۰۴۷	۵۳۰	۳۸۸,۴۹
۲۰۰۰-۱۰-۴۰۰	۰,۰۴۷	۵۲۳	۳۹۱,۰۸
۲۰۰۰-۶۰-۴۰۰	۰,۰۵۷	۵۴۱	۲۸۷,۹۲
۲۰۰۰-۲۴۰-۴۰۰	۰,۰۶۲	۵۷۰	۲۴۷,۲۶

به هنگام افزایش دما و زمان، اگرچه عمق نفوذ پتاسیم افزایش می‌یابد، اما میزان تنش پسماند فشاری در سطح شیشه افت می‌کند. به هنگام انجام فرآیند تعویض یونی، یون‌های کوچک‌تر سدیم از شیشه مادر خارج شده و به جای آنها، یون‌های پتاسیم با شعاع یونی بزرگتر وارد ساختار شیشه می‌شوند. تعویض یون‌های بزرگتر با یون‌های کوچکتر، منجر به ایجاد تنش پسماند فشاری در سطح شیشه می‌شود که دلیل این امر، اختلاف شعاع یونی مابین سدیم و پتاسیم می‌باشد. به عبارتی به دلیل وجود عدم تطابق، تنش فشاری از لایه درونی به لایه سطحی اعمال می‌شود (همانند شکل ۶). حال آنکه با افزایش عمق نفوذ یون‌های پتاسیم، غلظت پتاسیم در لایه‌های عمیق‌تر نیز افزایش یافته و میزان اختلاف شعاع یونی (عدم تطابق) میان لایه‌ها (مابین سدیم و پتاسیم) کاهش می‌یابد، در نتیجه با افزایش مدت زمان انجام فرآیند یا دمای فرآیند، عدم تطابق در لایه‌های درونی شیشه کاهش یافته و موجب کاهش تنش پسماند فشاری در سطح شیشه می‌شود. شکل ۶ نحوه ایجاد و رهایی تنش فشاری هنگام افزایش دما یا افزایش زمان را نشان می‌دهد. دایره‌های زرد زنگ نشان دهنده یون سدیم و دایره‌های آبی نشان دهنده یون پتاسیم می‌باشد، همچنین نشانگر قرمز نمایانگر تنش فشاری اعمالی از لایه درونی به لایه سطحی به هنگام تعویض یونی است.

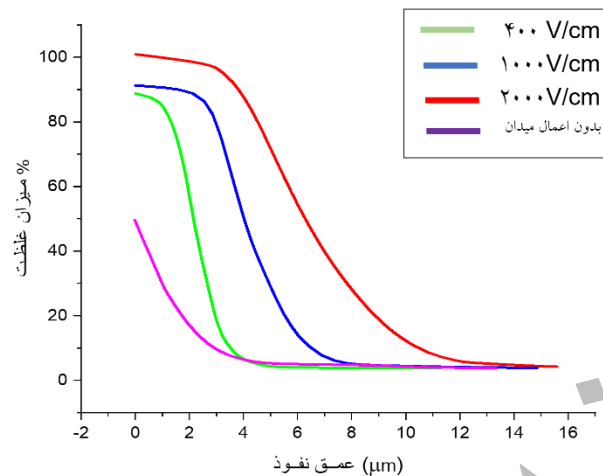


شکل ۶. شماتیک نحوه ایجاد و رهایی تنش فشاری در سطح شیشه در اثنای فرآیند تعویض یونی

۳-۴- پروفایل غلظتی

در اثنای فرآیند تعویض یونی به دلیل وجود گرادیان غلظتی و اعمال میدان الکتریکی، یون پتاسیم به داخل ساختار شیشه نفوذ کرده و یک پروفایل پله‌ای شکل ایجاد می‌کند [۲۷، ۴۳-۴۱]. شکل ۷ آنالیز خطی طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس^۱ و پروفایل غلظتی پتاسیم نفوذ کرده در سطح شیشه را نشان می‌دهد. در این آزمون ضخامت شیشه، از سطح تا عمق ۵۰ میکرومتر مورد

بررسی قرار گرفت و غلظت عناصر سیلیسیم، اکسیژن، آلومینیوم، پتاسیم، منیزیم و سدیم اندازه گیری شد و با جدول ۱ مقایسه شد.

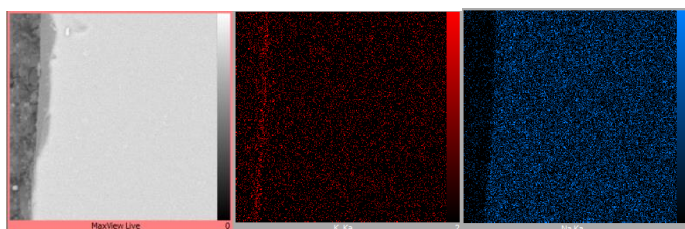


شکل ۷. پروفایل غلظتی عنصر پتاسیم برای نمونه های $N=10-400$ ($N =$ شدت میدان اعمالی، با مقادیر ۴۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ ولت بر سانتی متر)

همانطور که در شکل ۷ ملاحظه می شود، با افزایش شدت میدان الکتریکی، عمق نفوذ افزایش یافته است. همچنین با افزایش شدت میدان الکتریکی، غلظت سطحی پتاسیم نیز افزایش یافته است. افزایش شدت میدان الکتریکی، موجب افزایش نیروی لورنس وارد بر ذرات بار دار و در نتیجه افزایش موبیلیته یون های نفوذ کننده و در نهایت افزایش عمق نفوذ گردد. نتایج حاصل هم سو با نتایج تلیمیان و همکاران [۲۴] است. طبق گزارش ایشان، ضریب نفوذ یون ها افزایش یافته که به دلیل تسهیل غلبه بر انرژی اکتیواسیون و در نتیجه جابجایی راحت تر یون ها می شود.

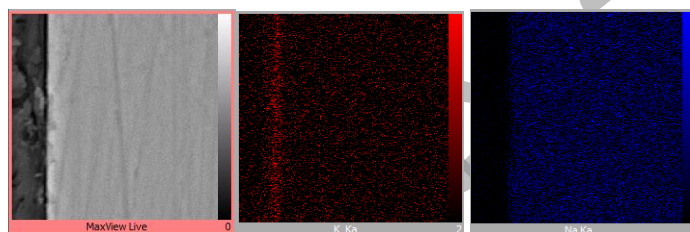
مقایسه تعویض یونی با و بدون میدان الکتریکی صورت پذیرفت. در حالت اول، تعویض یونی با کمک میدان الکتریکی ثابت و در حالت دوم تعویض یونی به روش معمول و بدون میدان الکتریکی انجام شد که نتایج آن در شکل ۷ نشان داده شده است. طبق نتایج بدست آمده، میزان عمق نفوذ یون پتاسیم در حالتی که به مدت ۱۰ دقیقه تحت میدان الکتریکی ۴۰۰ ولت بر سانتی متر و در دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد تحت فرآیند تعویض یونی قرار گرفته، با شیشه ای که به مدت ۲۴۰ دقیقه و در دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد، درون مذاب نمک قرار گرفته (تمپر شیمیایی) برابری میکند. میزان عمق نفوذ یون پتاسیم در هر دو حالت به ۳ میکرومتری رسیده است. این نتایج نشان می دهند که با استفاده از میدان الکتریکی در فرآیند تعویض یونی می توان در مدت زمان بسیار کمتر به عمق نفوذ های بالاتر در مقایسه با تمپر شیمیایی دست یافت. همچنین مشاهده می شود که شیشه هایی که تحت فرآیند تعویض یونی، به مدت زمان ۱۰ دقیقه و دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد با میدان های ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ ولت بر سانتی متر قرار گرفته اند، به ترتیب از عمق نفوذ ۷ و ۱۱ میکرومتری برخوردار می باشند.

توزیع عناصر پتاسیم و سدیم در شیشه‌های تعویض یونی شده به کمک میدان الکتریکی با شدت میدان‌های $\frac{400}{cm}$ ، $\frac{1000}{cm}$ ، $\frac{2000}{cm}$ در راستای سطح مقطع در شکل‌های ۸-۱۰ به ترتیب ارائه شده است. تصاویر با بزرگنمایی ۲۰۰۰ برابر و ولتاژ ۲۰ کیلوولت تهیه شده‌اند.



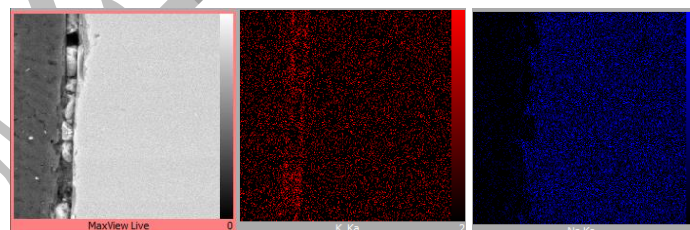
شکل ۸. توزیع عناصر سدیم و پتاسیم در سطح مقطع نمونه ی ۴۰۰-۱۰-۴۰۰

در شکل ۸ یک لایه متراکم از پتاسیم در سطح شیشه ملاحظه می‌شود. این لایه نفوذی می‌تواند استحکام و سختی شیشه را تا حد زیادی بهبود بخشد.



شکل ۹. توزیع عناصر سدیم و پتاسیم در سطح مقطع نمونه ی ۴۰۰-۱۰-۱۰۰۰

مطابق شکل ۹ مشاهده می‌شود که در شرایط یکسان، با افزایش میدان از ۴۰۰ به ۱۰۰۰ ولت بر سانتی‌متر عمق نفوذ و همچنین تراکم لایه‌ی پتاسیم در سطح شیشه افزایش یافته است.



شکل ۱۰. توزیع عناصر سدیم و پتاسیم در سطح مقطع نمونه ی ۴۰۰-۱۰-۲۰۰۰

همانطور که در شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود؛ توزیع عناصر سدیم و پتاسیم برای نمونه‌ای که تحت شدت میدان ۲۰۰۰ ولت بر سانتی‌متر و در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت زمان ده دقیقه تحت فرآیند تعویض یونی قرار گرفته است، نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش شدت میدان الکتریکی عمق نفوذ و تراکم عنصر پتاسیم بیشتر شده است. با مقایسه‌ی شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش شدت میدان الکتریکی، توزیع سطحی عنصر پتاسیم افزایش

یافته و در مقابل توزیع سطحی عنصر سدیم کاسته شده است. به عبارت دیگر با افزایش شدت میدان الکتریکی تبادل یون سدیم و یون پتا سیم بهبود یافته و همچنین غلظت یون پتا سیم در سطح افزایش می‌یابد. همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، افزایش شدت میدان الکتریکی باعث افزایش نیروی لورانس وارده بر ذرات باردار (یون‌ها) شده و موبیلیته‌ی آنها را افزایش می‌دهد که این امر موجب افزایش عمق نفوذ و غلظت سطحی برای شدت میدان‌های بالاتر می‌شود.

۴- نتیجه گیری

فرآیند تعویض یونی یا تمپر شیمیایی، یکی از فرآیندهای افزایش استحکام شیشه می‌باشد. به دلیل اینکه این فرآیند به صورت نفوذی انجام می‌شود، انجام این فرآیند به دمای بالا و زمان بسیار زیاد نیازمند است. در صورتی که فرآیند تعویض یونی با میدان الکتریکی همراه شود، زمان مورد نیاز کاهش می‌یابد. در این پژوهش فرآیند تعویض یونی به کمک میدان الکتریکی بر روی زیرلایه شیشه‌ی سودالایم صورت پذیرفت. تعویض یون پتاسیم به جای سدیم یک تنش فشاری پسماند در سطح شیشه ایجاد کرد. این تنش فشاری باعث بهبود خواص مکانیکی زیرلایه شد. با توجه به نتایج بدست آمده از آزمون استحکام خمشی و سختی پس از انجام فرآیند تعویض یونی به کمک میدان الکتریکی، مشخص شد که استحکام خمشی شیشه‌های زیرلایه از ۴۰ مگاپاسکال برای نمونه خام به ۱۷۰ مگاپاسکال برای نمونه ۱۰-۲۰۰-۴۰۰ افزایش یافت. همچنین سختی نمونه‌ی ۱۰-۲۰۰-۴۰۰ به kgf/mm^2 75.0 ± 5.0 رسید. بر اساس نتایج آزمون طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس و اندازه‌گیری پروفایل غلظتی، عمق لایه نفوذ کرده با افزایش میدان الکتریکی، افزایش یافت. این نتایج نشان داد که زیرلایه‌هایی که تحت فرآیند تعویض یونی، به مدت زمان ۱۰ دقیقه و دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد با میدان‌های ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ ولت بر سانتی‌متر قرار گرفته‌اند، به ترتیب از عمق نفوذ ۷ و ۱۱ میکرومتری برخوردار می‌باشند.

در استحکام بخشی شیشه‌های سودالایم، رهایش تنش به عنوان یک فاکتور مهم باید مد نظر قرار گیرد. رهایی تنش فشاری در نمونه‌هایی که به مدت ۶۰ دقیقه و ۲۴۰ دقیقه تحت فرآیند بودند ملاحظه شد. این اثر موجب کاهش استحکام نمونه‌ها از ۱۷۰ مگاپاسکال به ۱۵۱ مگاپاسکال شد.

به هنگام بررسی استحکام خمشی نیز مشاهده شد که با انجام فرآیند تعویض یونی حتی به میزان ۱ دقیقه تحت میدان ۲۰۰۰ ولت بر سانتی‌متر و در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، استحکام خمشی نسبت به نمونه خام، ۱,۷۵ برابر افزایش یافت. بنابراین استفاده از میدان الکتریکی جهت افزایش راندمان فرآیند و بهبود خواص مکانیکی شیشه‌ی سودالایم حائز اهمیت است.

- [1] K. V. Arun and C. M. John, *Fundamentals of inorganic glass making*. Elsevier, pp. 631-685,(2019).
- [2] J. Spirkova, P. Tresnakova-Nebolova, and M. Mika, "Optical waveguides fabricated by transition element ions exchange in some commercial and special optical glasses," *Optical Materials*, vol. 25, no. 2, pp. 101-107,(2004).
- [3] V. K. Marghussian, *Glass, structure, properties and application (In Persian)*. Iran university of Science & Technology,(2002).
- [4] W. H. Zachariasen, "The atomic arrangement in glass," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 54, no. 10, pp. 3841-3851,(1932).
- [5] T. Findakly, "Glass waveguides by ion exchange: a review," *Optical engineering*, vol. 24, no. 2, pp. 244-250,(1985).
- [6] A. Tervonen, B. R. West, and S. Honkanen, "Ion-exchanged glass waveguide technology: a review," *Optical Engineering*, vol. 50, no. 7, pp. 071107-071107-15,(2011).
- [7] R. V. Ramaswamy and R. Srivastava, "Ion-exchanged glass waveguides: a review," *Journal of lightwave technology*, vol. 6, no. 6, pp. 984-1000,(1988).
- [8] H. Yoshida and T. Kataoka, "Migration of two ions during electrolysis of glass waveguide," *Journal of applied physics*, vol. 58, no. 5, pp. 1739-1743,(1985).
- [9] E. Cattaruzza *et al.*, "Ag⁺ ↔ Na⁺ ion exchanged silicate glasses for solar cells covering: down-shifting properties," *Ceramics International*, vol. 41, no. 5, pp. 7221-7226,(2015).
- [10] J.-E. Broquin and S. Honkanen, "Integrated photonics on glass: A review of the ion-exchange technology achievements," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 10, p. 4472,(2021).
- [11] J. Kosikova, "Optical waveguides prepared by ion exchange technique," in *Photonics, Devices, and Systems II*, vol. 5036: SPIE, pp. 315-322,(2003).
- [12] L. Wang *et al.*, "The effect of substrate thickness on the fluorescence of single-doped Cu⁺ glass prepared by ion exchange," *Ceramics International*,(2024).
- [13] M. Lallukka *et al.*, "Cu-doped bioactive glass with enhanced in vitro bioactivity and antibacterial properties," *Ceramics International*, vol. 50, no. 3, Part B, pp. 5091-5103,(2024).
- [14] F. Teng *et al.*, "Study on the ion-exchange copper-loaded antibacterial glasses," *Ceramics International*, vol. 48, no. 22, pp. 32798-32803,(2022).
- [15] D. Guldiren and S. Aydın, "Antimicrobial property of silver, silver-zinc and silver-copper incorporated soda lime glass prepared by ion exchange," *Materials Science and Engineering: C*, vol. 78, pp. 826-832,(2017).
- [16] X. Jiang *et al.*, "Study on the silver-copper containing chemically strengthened antimicrobial glass prepared by ion-exchange," *Ceramics International*,(2024).
- [17] W. Wang, R. Guo, C. Niu, Z. Zhao, and K. Xu, "Diffusion and release behavior of Ag⁺ in ion-exchanged antibacterial glaze," *International Journal of Applied Ceramic Technology*,(2024).
- [18] O. Banapour Ghaffari, B. Eftekhari Yekta, and M. Zakeri-Nasrabadi, "Estimating "depth of layer" (DOL) in ion-exchanged glasses using explainable machine learning," *Materialia*, vol. 33, p. 102027,(2024).
- [19] K. A. Kirchner and J. C. Mauro, "Entropy production during ion exchange of glass," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 107, no. 2, pp. 880-896,(2024).
- [20] B. Eftekhari Yekta and O. Banapour Ghafari, "Electrical Conductivity in the Molten and Glassy States of the Li₂(O, Cl₂, I₂)-B₂O₃ system," *IUST*, vol. 20, no. 4, pp. 1-9,(2023).
- [21] V. M. S. R. Fisseha, Giovanna Pintori, "Chemical tempering of soda-lime-silicate glass by field-assisted techniques,"(2020).
- [22] S. Karlsson, B. Jonson, and C. Stålhandske, "The technology of chemical glass strengthening-a review," *Glass Technology*, vol. 51, no. 2, pp. 41-54,(2010).
- [23] A. K. Varshneya, "The physics of chemical strengthening of glass: room for a new view," *Journal of non-crystalline solids*, vol. 356, no. 44-49, pp. 2289-2294,(2010).

- [24] A. Talimian, G. Mariotto, and V. M. Sglavo, "Electric field-assisted ion exchange strengthening of borosilicate and soda lime silicate glass," *International Journal of Applied Glass Science*, vol. 8, no. 3, pp. 291-300,(2017).
- [25] G. Pintori and V. M. Sglavo, "Electric-field assisted ion-exchange of innovative float glass," *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 600, p. 121994,(2023).
- [26] D. Kapila and J. Plawsky, "Diffusion processes for integrated waveguide fabrication in glasses: a solid-state electrochemical approach," *Chemical Engineering Science*, vol. 50, no. 16, pp. 2589-2600,(1995).
- [27] J. C. Mauro, *Materials Kinetics: Transport and Rate Phenomena*. Elsevier,(2020).
- [28] İ. Erdem, D. Guldiren, and S. Aydin, "Chemical tempering of soda lime silicate glasses by ion exchange process for the improvement of surface and bulk mechanical strength," *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 473, pp. 170-178,(2017).
- [29] V. M. Sglavo, "Chemical strengthening of soda lime silicate float glass: effect of small differences in the KNO₃ bath," *International Journal of Applied Glass Science*, vol. 6, no. 1, pp. 72-82,(2015).
- [30] G. Macrelli, A. K. Varshneya, and J. C. Mauro, "Thermal treatment of ion-exchanged glass," *International Journal of Applied Glass Science*, vol. 14, no. 1, pp. 7-17,(2023).
- [31] A. K. Varshneya and J. C. Mauro, "Fundamentals of inorganic glasses,"(2019).
- [32] B. R. Lawn and E. R. Fuller, "Measurement of thin-layer surface stresses by indentation fracture," *Journal of materials science*, vol. 19, pp. 4061-4067,(1984).
- [33] A. K. Varshneya, "Chemically strengthened lithium aluminosilicate glass having high strength effective to resist fracture upon flexing," ed: Google Patents,(2012).
- [34] A. K. Varshneya, G. A. Olson, P. K. Kreski, and P. K. Gupta, "Buildup and relaxation of stress in chemically strengthened glass," *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 427, pp. 91-97,(2015).
- [35] M. Wang, M. M. Smedskjaer, J. C. Mauro, G. Sant, and M. Bauchy, "Topological origin of the network dilation anomaly in ion-exchanged glasses," *Physical Review Applied*, vol. 8, no. 5, p. 054040,(2017).
- [36] G. Macrelli, A. K. Varshneya, and J. C. Mauro, "Simulation of glass network evolution during chemical strengthening: Resolution of the subsurface compression maximum anomaly," *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 522, p. 119457,(2019).
- [37] I. S. Gutzow, O. V. Mazurin, S. V. Todorova, B. B. Petroff, and A. I. Priven, *Glasses and the glass transition*. John Wiley & Sons,(2011).
- [38] J. Shen, D. J. Green, R. E. Tressler, and D. L. Shelleman, "Stress relaxation of a soda lime silicate glass below the glass transition temperature," *Journal of non-crystalline solids*, vol. 324, no. 3, pp. 277-288,(2003).
- [39] J. Seaman, P. Lezzi, T. Blanchet, and M. Tomozawa, "Degradation of ion-exchange strengthened glasses due to surface stress relaxation," *Journal of non-crystalline solids*, vol. 403, pp. 113-123,(2014).
- [40] A. K. Varshneya, "Mechanical model to simulate buildup and relaxation of stress during glass chemical strengthening," *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 433, pp. 28-30,(2016).
- [41] A. Talimian, G. Mariotto, and V. M. Sglavo, "Electric field-assisted ion exchange strengthening of borosilicate and soda lime silicate glass," *International Journal of Applied Glass Science*, vol. 8, no. 3, pp. 291-300,(2017).
- [42] A. Talimian and V. M. Sglavo, "Electric Field-Assisted Ion Exchange of Borosilicate Glass Tubes," in *Ion Exchange-Studies and Applications*: IntechOpen,(2015).
- [43] N. Takamure, A. Kondyurin, and D. R. McKenzie, "Electric field assisted ion exchange of silver in soda-lime glass: a study of ion depletion layers and interactions with potassium," *Journal of Applied Physics*, vol. 125, no. 17,(2019).

¹ Waveguides

² Compressive stress (CS)

³ Depth of layer (DOL)

⁴ Thermal history

⁵ Ion Hopping

⁶ Corning®

⁷ Neutron

⁸ EDS-LINE

نسخه پیش انتشار