



# ارزیابی فرایند بازپخت ورق پلی کربنات جهت رفع تنش‌های پسماند

مهناز ذاکری

استادیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران  
تهران، صندوق پستی ۱۶۷۶۵-۳۳۸۱، m.zakeri@kntu.ac.ir

**چکیده-** در این تحقیق فرایندهای حرارتی برای رفع تنش‌های پسماند از صفحات پلی کربنات، بررسی و با آزمایش‌های گسترده ارزیابی می‌شوند. در هر مرحله از این آزمایش‌ها با تغییر و تصحیح مناسب پارامترهای سیکل حرارتی، عملیات بازپخت متعددی به صورت سعی و خطا بر روی قطعات اجرا می‌شود. در نهایت با بررسی نتایج حاصله، فرایند حرارتی اصلاح شده‌ای پیشنهاد می‌شود که ضمن کاهش زمان و هزینه بازپخت، امکان تنش‌زدایی از ورق پلی کربنات را فراهم نماید. در این فرایند، ابتدا دمای قطعه تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد با نرخ ۲۰ °C/h افزایش داده می‌شود. نمونه‌ها برای خشک شدن به مدت ۳ ساعت در این دما نگه داشته شده و سپس افزایش دما تا دمای انتقال شیشه‌ای، با نرخ ۵ °C/h ادامه می‌یابد. پس از آن نمونه‌ها با نرخ ۱ °C/h گرم می‌شوند تا به دمای  $T_{max} = 156\text{ }^{\circ}\text{C}$  برسند. پس از رسیدن به این دما، بلافاصله خنک‌کاری آغاز می‌شود و نرخ خنک‌کاری، مشابه نرخ گرم کردن نمونه‌ها خواهد بود.

**کلیدواژگان:** بازپخت، فرایند حرارتی، تنش پسماند، پلی کربنات، حاشیه هم‌تنش.

## Evaluation of annealing process of polycarbonate sheet for residual stress removing

M. Zakeri

Assis. Prof., Aerospace Eng., K. N. Toosi Univ. of Tech., Tehran, Iran  
P. O. B. 16765-3381 Tehran, Iran. m.zakeri@kntu.ac.ir

**Abstract-** In this research, thermal processes for removing the residual stresses from polycarbonate sheet are evaluated using extensive experiments. In each step, by making suitable alterations and modifications on the heating cycle parameters, annealing operations are performed on the samples during a try and error process. Finally, appraising the obtained results, a modified thermal cycle is presented which can remove the residual stress from the polycarbonate sample, while reducing the time and cost of the annealing process. According to this process, the specimen temperature is raised to 100°C at the heating rate of 20°C/h. The samples are kept at this temperature for 3 hours to become dried and then, the heating is continued up to glass transition temperature at the rate of 5°C/h. Then, the specimens are heated at the rate of 1°C/h until temperature of  $T_{max} = 156\text{ }^{\circ}\text{C}$ . After reaching this temperature, the samples are cooled immediately, and the cooling rates are same as the heating rates.

**Keywords:** Aneling, Thermal Process, Residual Stress, Polycarbonate, Isochromatic Fringe.

### ۱- مقدمه

مقاومت ضربه‌ای بالایی دارد، عملیات شکل‌دهی و قالب‌گیری بر روی آن به راحتی امکان‌پذیر است و برای محدوده دمایی گسترده‌ای قابل استفاده است [۱]. مزایای فوق سبب کاربرد وسیع ورق پلی کربنات در فضاهای ورزشی، صنعت

پلی کربنات (PC)، ماده پلیمری شفاف است که معمولاً به شکل صفحاتی با سطح صاف یا عاج‌دار در بخش‌های مختلف سازه‌ها استفاده می‌شود. این ماده خواص نوری مناسب و

منظور پیشنهاد شده‌اند بسیار اندک است.

در این مقاله، ابتدا به چگونگی ایجاد تنش‌های پسماند در صفحات پلی کربنات پرداخته و سپس با معرفی مختصر روش آزمایشگاهی فتوالاستیسیته، نقش تنش‌های پسماند در ایجاد خطا در ارزیابی تجربی میدان تنش روشن می‌شود. پس از آن، نحوه رفع تنش‌های پسماند در مواد پلیمری از دیدگاه علم مواد بیان شده و روش‌های موجود برای رفع این تنش‌ها از صفحات PC معرفی می‌شوند. نکته قابل توجه این است که با وجود کاربردهای فراوان ماده پلی کربنات، روش‌های بکار رفته برای تنش‌زدایی آن، اگرچه ارزشمند هستند، کارایی لازم را نداشته و یا بسیار طولانی و پرهزینه می‌باشند. هدف از این مطالعه، تغییر و تصحیح این روش‌ها در جهت افزایش کارایی و کاهش زمان و هزینه فرایند است. به این منظور آزمایش‌های بازپخت طی سیکل‌های حرارتی مختلف بر روی قطعاتی با هندسه‌ها و ضخامت‌های گوناگون انجام گرفته است که با جمع‌بندی آنها، در نهایت فرایند حرارتی اصلاح شده‌ای ارائه می‌شود.

## ۲- تنش‌های پسماند در ورق پلی کربنات

منظور از تنش‌های پسماند، تنش‌هایی است که پس از بارگذاری و برداشتن بار خارجی، آزاد نشده و در جسم الاستیک محبوس می‌شوند. حرارت و فشار اعمال شده در مراحل تولید صفحات پلی کربنات و نیز در طی فرایندهای ماشین‌کاری و ساخت قطعه، مهمترین عوامل ایجاد تنش‌های پسماند در آن هستند. بطور کلی فرایند تولید صفحات تخت پلی کربنات، مانند اغلب ورق‌های پلاستیک، اکستروژن است. اساس مکانیکی فرایند اکستروژن به این شکل است که ابتدا بیلت<sup>۱</sup> یا قطعات و ذرات آماده شده‌ای از ماده را در محفظه دستگاه قرار می‌دهند. سپس ماده تا دمای معینی پیش‌گرم شده و با اعمال فشاری که بصورت هیدرولیکی یا مکانیکی توسط سنبه<sup>۲</sup> به آن وارد می‌شود، از داخل قالبی که در اتصال با محفظه است به سمت بیرون جریان می‌یابد. طوری که شکل و اندازه سطح مقطع ماده عبور داده شده از مجرا، همان شکل و اندازه منفذ قالب خواهد شد. طرح‌واره‌ای از فرایند اکستروژن مستقیم در شکل ۱ نشان داده شده است [۱۲].

تغییر دمای قطعه کار (ماده پلی کربنات) در فرایند

ساختمان‌سازی و صنایع حمل و نقل شده است. همچنین ورق‌های پلی کربنات به جای شیشه‌های پنجره در کابین شفاف آسانسور و انواع وسائل نقلیه مانند قطار، هلیکوپتر و هواپیماهای مسافری و نظامی استفاده می‌شوند. این کاربردهای گسترده، لزوم شناخت رفتار ورق‌های پلی کربنات و بررسی مقاومت آن در برابر تنش‌های ناشی از بارهای وارده را، جهت تأمین ایمنی سازه‌ها نشان می‌دهد.

از سوی دیگر، پلی کربنات ماده‌ای فتوالاستیک با خاصیت شکست دوگانه نور<sup>۱</sup> است که در مقابل اعمال تنش بسیار حساس بوده و شکست دوگانه قوی بر روی نور انجام می‌دهد. از آنجا که این ماده شفافیت بالایی نیز دارد در پژوهش‌های زیادی مانند [۲-۴] برای انجام آزمایش‌های فتوالاستیسیته و بررسی توزیع تنش، به ویژه در شرایط تمرکز تنش به کار رفته است. با این حال، تنش‌های پسماند به سادگی در صفحات پلی کربنات ایجاد می‌شوند. اعمال حرارت و فشار در حین تهیه و شکل‌دهی صفحات پلی کربنات و نیز تنش‌های حرارتی و فشاری در طی فرایندهای ماشین‌کاری و ساخت قطعات، منجر به ایجاد تنش‌های پسماندی می‌شود که گاهی اثرات مخربی بر عمر مفید قطعه دارند. حضور این تنش‌ها در آزمایش‌های مربوط به ارزیابی میدان تنش با روش‌های تجربی، سبب ایجاد خطا در نتایج آزمایش خواهد شد. از این‌رو شناخت تنش‌های پسماند زاید و رفع آن، نقش مهمی در ارزیابی صحیح میدان تنش و تخمین عملکرد قطعات دارد.

بررسی تنش‌های پسماند از دیرباز برای طراحان صنعتی مهم بوده است. در سال ۱۹۵۱ هنریکسن [۵] با انجام آزمایش‌هایی بر روی فرایند ماشین‌کاری متعامد نشان داد که عملیات ماشین‌کاری منجر به ایجاد تنش‌های پسماند با مکانیزم‌های مکانیکی و حرارتی می‌شوند. سپس در سال ۱۹۷۲، اوکوشیما و کاکینو [۶] با ارائه یک مدل اجزای محدود و انجام آزمایش‌هایی نتیجه گرفتند که تنش‌های پسماند کششی و فشاری در فلزات به ترتیب حاصل مکانیزم‌های حرارتی و مکانیکی هستند. گرچه تاکنون پژوهشگران زیادی ایجاد تنش‌های پسماند ناشی از اثرات برش و فشار و اعمال تنش‌های حرارتی را بررسی کرده‌اند مانند [۷-۱۱]، اما مطالعاتی که در مورد حذف این تنش‌ها از صفحات پلی کربنات انجام شده‌اند بسیار محدود بوده و تعداد روش‌هایی که برای این

2. Billet  
3. Ram

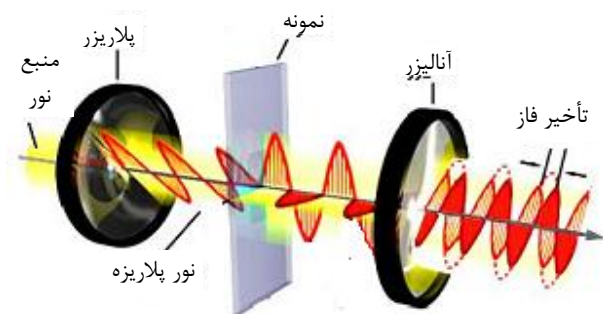
1. Double Refraction

پیش‌بینی نبوده و بررسی آنها جز از طریق آزمایش تجربی امکان ندارد. در ادامه، روش آزمایشگاهی فتوالاستیسیته به عنوان روشی ساده برای مشاهده و بررسی جریان تنش به اختصار معرفی می‌شود.

## ۲-۱- معرفی روش فتوالاستیسیته

روش فتوالاستیسیته، روش تجربی شناخته شده‌ای برای بررسی میدان‌های تنش الاستیک در اطراف نقاط تمرکز تنش مانند سوراخ و شکاف است. در برخی مواد غیربلوری که در شرایط بدون تنش از لحاظ نوری همسانگرد هستند، هنگامی که جسم تحت اثر نیروهای خارجی قرار می‌گیرد و در آن تنش‌های داخلی ایجاد می‌شود، یک ساختار کریستالی غیر همسانگرد تشکیل می‌شود. پس از حذف نیروی خارجی، ساختار این مواد دوباره به حالت اولیه باز می‌گردد. چنین موادی فتوالاستیک نامیده می‌شوند و این رفتار در این نوع مواد، شکست دوگانه لحظه‌ای<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. روش فتوالاستیسیته بر مبنای این رفتار فیزیکی مواد استوار است، زیرا با تابیدن نور پلاریزه به مدل‌هایی از اجسام حقیقی که دارای شرایط فوق باشند، توزیع تنش‌های داخلی قابل مشاهده خواهد بود.

ابزار اپتیکی که برای مشاهده خطوط جریان تنش یا حاشیه‌های هم تنش<sup>۳</sup> استفاده می‌شود، پلاریسکوپ نام دارد که در آن، با قرار گرفتن نمونه مورد آزمایش در فاصله بین دو عدسی، نور پلاریزه بر آن تابیده می‌شود (شکل ۲).



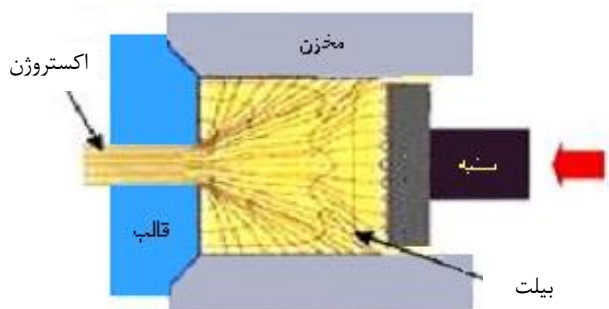
شکل ۲ ترتیب قرارگیری اجزای پلاریسکوپ صفحه‌ای و تابش نور پلاریزه شده به نمونه آزمایش [۱۳].

نمونه آزمایش یا مدل فتوالاستیسیته، در میان دو عدسی دستگاه به نام‌های پلاریزر و آنالیزر قرار گرفته و با اعمال بار

اکستروژن به سه دلیل ممکن است روی دهد: پیش‌گرم کردن بیلت یا ذرات اولیه ماده، کار پلاستیک در مناطقی که تغییر شکل پلاستیک دارند، اصطکاک بین ذرات جامد اولیه در ناحیه تغذیه، بین ذرات با دیواره سیلندر و همچنین بین ابزار و قطعه کار و مقاومت آن در مقابل حرکت که سبب تغییر دما در سطح قطعه می‌شود. در پایان عملیات اکستروژن، قطعه کار از مجرای قالب خارج شده و به صورت ورق شکل می‌گیرد. سپس این ورق‌ها از بین غلطک‌هایی با دمای پایین عبور داده می‌شوند تا خنک شده و شکل آنها تثبیت شود. تغییرات موضعی دما در طی این فرایند باعث انقباض غیریکنواخت محصول در مرحله سرد شدن می‌شود که به نوبه خود منجر به ایجاد تنش‌های پسماند خواهد شد.

از سوی دیگر، در حین انجام عملیات ماشین‌کاری و ساخت قطعه از صفحات پلی کربنات نیز، به دلیل فشار اعمال شده و حرارت تولید شده ناشی از اصطکاک، تنش‌های پسماند در سطوح ماشین‌کاری شده و به ویژه در اطراف مکان‌های تمرکز تنش ایجاد می‌شوند.

در صورتی که تکان و لرزش و یا کجی و انحراف<sup>۱</sup> بین ابزار و ورق پلی کربنات در حین ماشین‌کاری وجود داشته باشد توزیع مقدار تنش‌های پسماند تغییر خواهد کرد [۴]. همچنین تمام پارامترهای ایجاد کننده یا شدت دهنده فرایندهای فشاری و برشی و نیز پارامترهایی که بر درجه حرارت قطعه کار در حین عملیات ماشین‌کاری اثر می‌گذارند، می‌توانند بر تنش‌های پسماند تاثیر بگذارند [۷].



شکل ۱ طرحواره روش اکستروژن مستقیم.

با توجه به تاثیرگذاری هم‌زمان دو پارامتر دما و فشار در ایجاد تنش‌های پسماند، معمولاً نحوه توزیع این تنش‌ها قابل

2. Temporary Double Refraction  
3. Isochromatic Fringes

1. Tilting

به علاوه، حضور تنش‌های پسماند خطر افزایش موضعی تنش تا مقادیر بحرانی را در بر دارد که از عوامل اصلی تخریب در بسیاری از قطعات مهندسی است. بنابراین، به دلایل صنعتی باید این تنش‌ها مورد بررسی قرار گرفته و در صورت امکان، حذف شوند.

برای برطرف کردن این تنش‌های زاید، لازم است که ماده تا دمای بالاتر از دمای انتقال شیشه‌ای<sup>۲</sup> حرارت داده شود تا به حالت خمیری درآید و تنش‌های موجود در آن آزاد شوند. سپس ماده سرد می‌شود تا بار دیگر به حالت جامد درآید. در ادامه، ابتدا نحوه رفع تنش‌های پسماند در مواد پلیمری از دیدگاه علم مواد به اختصار بیان شده و سپس روش‌های موجود برای فراوری حرارتی پلی کربنات بررسی می‌شود.

## ۲-۲- ساختار پلیمرها و انتقال شیشه‌ای در آنها

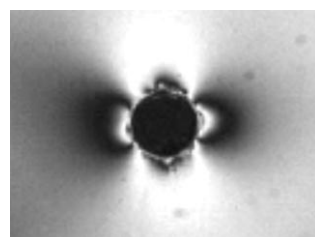
پلی کربنات، نمونه‌ای از پلیمرهای بی شکل<sup>۳</sup> است که در حالت جامد نیز آرایش مولکولی مشابه با حالت مذاب دارند یعنی توزیع تصادفی مولکولها بدون هیچ نظمی. رفتار عمومی پلیمرهای بی شکل معمولاً در رابطه با دمای انتقال شیشه‌ای آنها ( $T_g$ ) تعیین می‌شود. در کمتر از این دما، ماده در فاز جامد و صلب بوده و رفتار ترد دارد. وقتی دما تا بالای  $T_g$  افزایش یابد مولکولها مقداری آزادی برای حرکت چرخشی حول باندهای شیمیایی دارند. صلبیت به تدریج کاهش یافته و ماده ویژگی‌های الاستومری نشان می‌دهد، پس فرایندهایی مثل شکل‌دهی حرارتی و قالب‌گیری امکان‌پذیر خواهد بود [۱۴].

دمای انتقال شیشه‌ای، پارامتر بسیار مهمی است که دمای کاربرد و دمای فرایندهای حرارتی گوناگون برای یک ماده پلیمری را تعیین می‌کند. اما به دلیل پیچیدگی بسیار در فیزیک آن، با وجود روش‌های مختلف برای اندازه‌گیری  $T_g$ ، اختلاف قابل توجهی بین نتایج این اندازه‌گیری‌ها برای یک ماده دیده می‌شود که ممکن است به بزرگی ۱۵-۱۰ درجه باشد [۱۵]. در واقع، مرحله ناپایدار حالت شیشه‌ای مرز بین حالت فوق پایدار<sup>۴</sup> پلیمر و حالت مایع متعادل است که با در نظر گرفتن حجم ویژه به عنوان تابعی از دما بیان می‌شود.

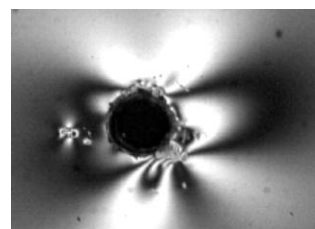
شکل ۴ روند عمومی پدیده انتقال شیشه را در یک پلیمر

خارجی بر آن، حاشیه‌های هم‌تنش بصورت حلقه‌هایی در آن مشاهده می‌شود. شکل‌گیری حاشیه‌های هم‌تنش در نمونه مورد آزمایش و افزایش تعداد و اندازه حلقه‌های قابل مشاهده با افزایش مقدار بار خارجی، نشان دهنده بالا رفتن میزان تنش در نقطه مورد نظر خواهد بود. شکل ۳ نمونه‌هایی از حلقه‌های فتوالاستیک هم‌تنش در اطراف یک سوراخ پیچ را طبق مرجع [۴] نشان می‌دهد که توزیع تنش‌های پسماند ناشی از سوراخ‌کاری<sup>۱</sup> صفحات پلی کربنات را نشان می‌دهد. با توجه به حساسیت بالای این صفحات، ایجاد چنین تنش‌هایی در سطوح ماشین‌کاری شده به دلیل فشار اعمال شده و حرارت تولید شده در حین انجام ماشین‌کاری، غیر قابل اجتناب است.

هنگام آزمایش نمونه‌های مورد نظر برای بررسی میدان تنش به روش فتوالاستیسیته، باید در نظر داشت که حضور تنش‌های پسماند، بر شکل حاشیه‌های هم‌تنش مورد مطالعه تأثیر گذاشته و مسیر آنها را منحرف می‌کند. عدم توجه به این امر می‌تواند سبب ایجاد خطاهای قابل توجه در نتایج آزمایش و تخمین غیرصحيح تنش شود. از سوی دیگر، تنش‌های پسماند در اطراف عوامل تمرکز تنش می‌تواند پس از ساخت قطعه و در حین کار، اثرات مخربی روی هندسه قطعه گذاشته و سبب شود که قطعات در اثر آزاد شدن کرنش‌های پلاستیک، به تفرانس‌های مورد نظر نرسند.



الف- سوراخ‌کاری قائم



ب- سوراخ‌کاری با زاویه انحراف ۲ درجه.

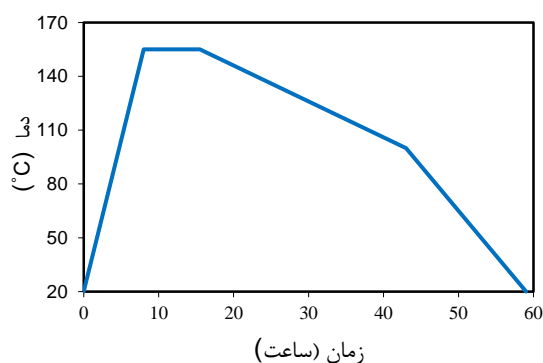
شکل ۳ نمونه‌هایی از تنش پسماند ناشی از سوراخ‌کاری [۴]

2. Glass Transition Temperature  
3. Amorphous Polymers  
4. Meta-stable

1. Drilling

در این فرایند، قطعه مورد نظر از دمای محیط تا دمای ۱۵۵ درجه سلسیوس با نرخ ۲۰-۱۵ درجه در ساعت حرارت داده شده و به مدت ۱۰-۵ ساعت در این دما نگه داشته می‌شود. سپس با نرخ خنک‌کاری ۲ °C/h سرد می‌شود تا به دمای ۱۰۰ درجه برسد. پس از آن نرخ خنک‌کاری به ۵ °C/h افزایش می‌یابد تا این که قطعه به دمای اتاق برسد. اگر دمای اتاق ۲۰ درجه باشد، این سیکل به‌طور متوسط در حدود ۵۹ ساعت به طول می‌انجامد. شکل ۵ نموداری از این فرایند را نمایش می‌دهد.

در سال‌های اخیر، روش پیشنهادی پاپالتر و سان‌جیراردی [۲۰، ۱۹] در پژوهشی توسط پیسی<sup>۲</sup> و همکاران [۳] تصحیح شده و به صورت دو مرحله مجزا به‌کار رفته است. در این روش، مرحله اول از عملیات حرارتی برای خشک کردن پلی کربنات و جلوگیری از ایجاد حباب در آن انجام می‌گیرد. بدین ترتیب که دمای قطعات پلی کربنات تا دمای ۱۲۵ درجه سانتی‌گراد افزایش داده می‌شود که بین نقطه جوش آب و دمای انتقال شیشه پلی کربنات قرار دارد. قطعات به مدت دو روز در این دما نگه داشته شده و سپس خنک‌کاری می‌شوند تا به دمای اتاق برسند. پس از آن مرحله دوم سیکل حرارتی اعمال می‌شود. در این مرحله، قطعات پلی کربنات با نرخ ۵ °C/h گرم می‌شوند تا به دمای ۱۴۵° (نزدیک به  $T_g$ ) برسند و به دنبال آن، افزایش دما تا ۱۶۵ درجه با نرخ ۱ °C/h انجام می‌گیرد. پس از رسیدن به دمای مذکور، کاهش دما با نرخ ۱ °C/h آغاز می‌شود تا قطعات به دمای ۱۴۵ درجه برسند و سپس خنک‌کاری با نرخ ۵ °C/h تا رسیدن به دمای اتاق ادامه می‌یابد.



شکل ۵ سیکل حرارتی برای تنش‌زدایی پلی کربنات بر اساس مرجع [۱۹]

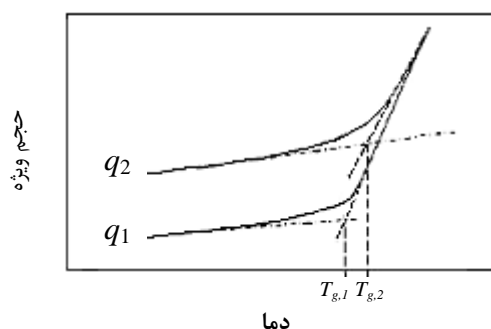
بی‌شکل، برای دو نرخ مختلف تغییر دما ( $q_1$  و  $q_2$ ) نشان می‌دهد که در آن  $q_2 > q_1$  است [۱۶]. ملاحظه می‌شود که مرحله انتقال کاملاً تدریجی بوده و تعیین نقطه  $T_g$  از روی منحنی به سادگی امکان‌پذیر نیست. از این‌رو مقدار آن با انجام برون‌یابی خطی دو منحنی و تعیین نقطه برخورد آنها تخمین زده می‌شود. برای دمای انتقال شیشه‌ای پلی کربنات در مراجع مختلف [مانند ۱۷، ۱۹] مقادیری بین ۱۴۵ تا ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد بیان شده است و در این تحقیق، مشابه با بیشتر مراجع موجود، مقدار متوسط آن یعنی ۱۴۷ درجه در نظر گرفته می‌شود.

### ۳- روش‌های موجود برای رفع تنش پسماند از صفحات پلی کربنات

مطالعه تنش‌های پسماند ناشی از ماشین‌کاری پیشینه‌ای بیش از نیم قرن دارد. جهت رفع این تنش‌های زاید، قطعه باید تحت عملیات بازپخت حرارتی قرار گیرد. در این بخش، ابتدا به معرفی روش‌های موجود برای رفع تنش‌های پسماند از صفحات پلی کربنات پرداخته و سپس نتایج حاصل از کاربرد هر یک از این روش‌ها با انجام آزمایش بررسی می‌شود.

#### ۳-۱- پیشینه پژوهش

با مرور منابع موجود، ملاحظه می‌شود که تاکنون سه فرایند بازپخت حرارتی برای این ماده استخراج شده و به‌کار رفته است. نخستین سیکل توسط پاپالتر<sup>۱</sup> و سان‌جیراردی<sup>۲</sup> پیشنهاد شده است [۲۰، ۱۹].



شکل ۴ تعیین دمای پدیده انتقال شیشه‌ای برای یک پلیمر بی‌شکل [۱۶]

1. Pappalettere
2. Sangirardi



شکل ۸ نمونه‌هایی از صفحات پلی کربنات با ضخامت‌های مختلف

در هر مرحله از این آزمایش‌ها، دو نمونه آزمایشگاهی از هر یک از صفحات پلی کربنات با نام‌های تجاری بارلو پی‌سی<sup>۱</sup> محصول شرکت بارلو پلاستیک به ضخامت ۱۰ mm، PMS-1 محصول شرکت ویشی<sup>۲</sup> به ضخامت ۶ mm و پلی کربنات لکسان<sup>۳</sup> محصول شرکت جنرال الکتریک به ضخامت ۳ mm تهیه شده و برای تولید تنش‌های پسماند، شکاف‌هایی با ضخامت کم در آنها ایجاد شد.

برای ارزیابی نتایج حاصل از فرایند پیشنهاد شده در مرجع [۱۹]، ۶ نمونه پلی کربنات با ضخامت‌های مختلف به شرح فوق، در کوره قرار گرفته و طبق سیکل شکل ۵ بازپخت شدند. سپس وضعیت تنش‌های موجود در آنها، به کمک دستگاه پلاریسکوپ مشاهده شد.

بررسی خطوط تنش در این قطعات نشان می‌دهد که روش فوق قادر به رفع تنش‌های پسماند موجود در برخی از این صفحات نبوده و گاهی تغییر شکل‌های موضعی در قطعه به وجود می‌آید که با سرد شدن قطعه، حتی سبب افزایش میزان تنش‌های محبوس می‌شود. برای مثال، شکل ۹ یک قطعه آزمایشی را نشان می‌دهد که پس از انجام عملیات حرارتی، لبه‌های شکاف دچار تغییر شکل‌های موضعی شده و در نتیجه، تنش‌های پسماند اطراف شکاف به مقدار قابل توجهی افزایش یافته‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود صدمات سطحی پراکنده نیز در این قطعه ایجاد شده است.

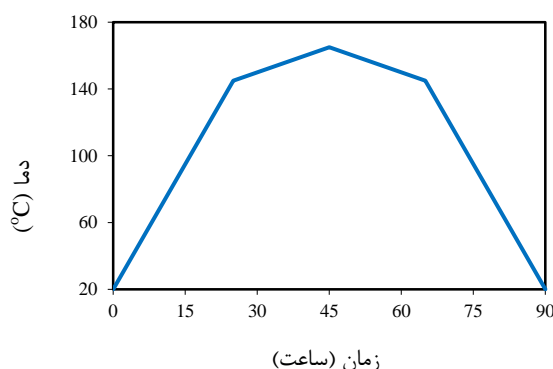
برای ارزیابی نتایج حاصل از فرایند پیشنهاد شده در مرجع [۳] نیز آزمایش‌هایی بر روی ۶ نمونه آزمایشگاهی تهیه شده از هر یک از انواع صفحات پلی کربنات انجام گرفت.

نمودار مرحله دوم این فرایند بازپخت در شکل ۶ نشان داده شده است. در این روش، مجموع زمان لازم برای دو مرحله بازپخت در حدود ۱۳۶ ساعت/بیش از ۵ روز می‌باشد.

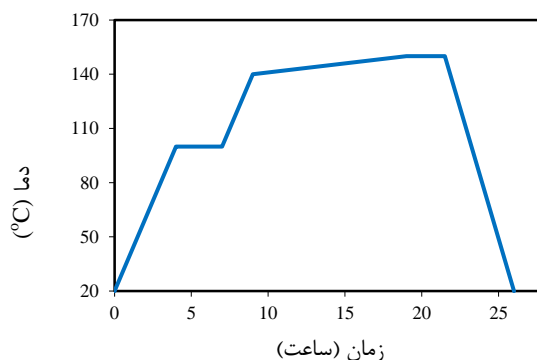
سیکل حرارتی دیگری که پیش از این برای بازپخت صفحات پلی کربنات ارائه و استفاده شده است [۱۸]، یک مرحله‌ای می‌باشد. روند گرم کردن و خنک‌کاری نمونه‌ها در این روش، طبق نمودار شکل ۷ است. در این فرایند، ابتدا قطعات به مدت ۳ ساعت در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد نگه داشته می‌شوند تا خشک شده و از تشکیل حباب در آنها جلوگیری شود. حداکثر دمای این سیکل ۱۵۰°C بوده و قطعه به مدت ۲/۵ ساعت در این دما نگه‌داشته می‌شود.

### ۲-۲- انجام آزمایش طبق روش‌های موجود

در پژوهش حاضر، ابتدا آزمایش‌هایی در سه مرحله برای ارزیابی نتایج حاصل از سه فرایند بازپخت پیشنهاد شده در مراجع پیشین انجام گرفت. برای انجام این آزمایش‌ها از صفحاتی با ضخامت‌های مختلف (شکل ۸) استفاده شده است.



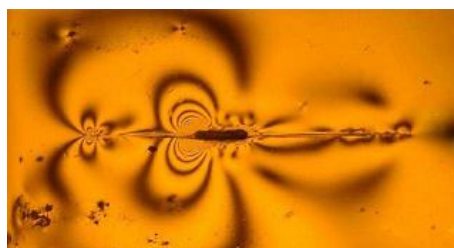
شکل ۶ مرحله دوم سیکل حرارتی برای بازپخت پلی کربنات [۳]



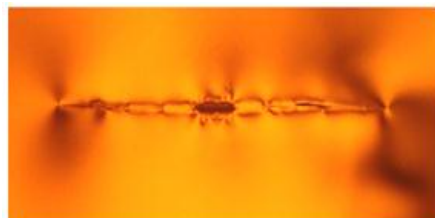
شکل ۷ سیکل حرارتی بازپخت پلی کربنات طبق مرجع [۱۸]

1. Barlo PC
2. Vishay
3. GE Lexan

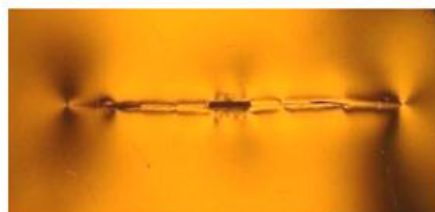
حرارتی اصلاح شده‌ای برای صفحات پلی کربنات در نظر گرفته شد. سپس با انجام مجموعه‌ای از آزمایش‌های سعی و خطا بر روی قطعات، نتایج این تغییرات بررسی شد که جزئیات آن در ادامه شرح داده می‌شود.



شکل ۹ افزایش تنش‌های پسماند پس از بازپخت نمونه پلی کربنات طبق سیکل مرجع [۱۹]



الف- قبل از بازپخت



ب- پس از بازپخت طبق فرایند مرجع [۱۸]

شکل ۱۰ تنش‌های پسماند در قطعه پلی کربنات به ضخامت ۱۰ mm

#### ۴- بحث روی نتایج و انجام تصحیح برای استخراج فرایند مناسب

همان طور که در بخش قبل بیان شد، برای بازپخت صفحات پلی کربنات و رفع تنش‌های پسماند بر اساس سه روش موجود، آزمایش‌هایی بر روی ۱۸ نمونه انجام گرفت. در این بخش بر روی نتایج این آزمایش‌ها بحث شده و سپس با در نظر گرفتن تمام پارامترهای موثر، فرایند اصلاح شده برای تنش‌زدایی این ماده بررسی می‌شود. پارامترهای مهم و تأثیرگذار در عملیات تنش‌زدایی عبارتند از: دمای بازپخت، نرخ افزایش دما هنگام گرم کردن و سپس کاهش دما در مرحله خنک‌سازی، مدت زمان نگهداری قطعه در دمای تنش‌زدایی.

آزمایش‌های صورت گرفته به روش مرجع [۱۹] نشان داد که با وجود رفع تقریبی تنش‌های زاید از صفحات کم ضخامت (لکسان به ضخامت ۳ mm)، روش فوق کارایی مناسبی برای رفع تنش‌های پسماند در صفحات ضخیم‌تر (ضخامت‌های ۶ mm و ۱۰ mm) نداشته و تغییر شکل‌هایی نیز در این قطعات به وجود می‌آید. با توجه به اینکه تمام آزمایش‌های انجام شده

نتایج نشان می‌دهد که این روش به خوبی قادر به رفع تنش‌های پسماند و حلقه‌های هم‌تنش در اطراف محل بریدگی است، اما متأسفانه مدت انجام آن بسیار طولانی (بیش از ۵ روز) است که استفاده از آن را با مشکل مواجه می‌کند، زیرا علاوه بر افزایش زمان و هزینه بازپخت، امکان نوسان یا قطعی برق در این مدت طولانی بیشتر است که در این صورت، قطعات در داخل کوره آسیب دیده و دیگر قابل استفاده نخواهند بود.

در ادامه، آزمایش‌های بازپخت بر اساس فرایند حرارتی شکل ۷ بر اساس مرجع [۱۸] بر روی ۶ نمونه تهیه شده از محصولات شرکت‌های بارلو پلاستیک، ویشی، و جنرال الکتریک با ضخامت‌های گوناگون صورت گرفت، اما مشاهده شد که بیشینه دمای ۱۵۰ درجه برای رفع تنش‌های موجود در این قطعات (به ویژه در قطعات ضخیم) کافی نیست و به نظر می‌رسد که این دما باید افزایش داده شود تا ماده کاملاً وارد حالت خمیری شده و تنش‌های پسماند آزاد شوند. شکل ۱۰ یک نمونه از قطعات به ضخامت ۱۰ mm را نشان می‌دهد که پس از بازپخت بر اساس سیکل حرارتی مرجع [۱۸]، توزیع و اندازه حاشیه‌های هم‌تنش مربوط به تنش‌های پسماند موجود در آن تغییر چندانی نکرده است. همچنین نرخ خنک‌کاری قطعات در این روش بسیار بالا است که در ناحیه انتقال شیشه‌ای، گاهی منجر به انقباض سریع و ایجاد تغییر شکل خارج صفحه‌ای به صورت اعوجاج در نمونه‌های ضخیم‌تر می‌شود.

پس از انجام آزمایش‌هایی در سه مرحله (طبق آنچه شرح داده شد) برای بررسی روش‌های موجود، مشکلات ناشی از کاربرد هر روش برای رفع تنش پسماند و ایرادهایی که در قطعات پس از بازپخت وجود داشت، مشخص شدند. با در نظر گرفتن عواملی که منجر به ایجاد این مشکلات می‌شوند، و با انجام تغییراتی کوچک در سیکل‌های موجود، سیکل‌های

مختلفی به صورت سعی و خطا اجرا شدند. تغییرات انجام گرفته بر روی فرایندهای بازپخت در کوره شامل تغییر در حداکثر دمای چرخه ( $T_{max}$ )، مدت نگهداری در دمای  $T_{max}$  و نیز نرخ خنک کاری نمونه‌ها بود. هر چرخه حرارتی جدید با رعایت نکات کلیدی در فراوری حرارتی، برای ۳ نمونه با ضخامت‌های مختلف مورد آزمایش قرار گرفته و پس از بررسی میزان تأثیر این تغییرات بر نتایج، از جمله کاهش آسیب‌های ایجاد شده مانند اعوجاج و تغییر شکل‌های ناخواسته در قطعات آزمایش و نیز مشاهده میزان رفع تنش‌های پسماند به کمک پلاریسکوپ، تصحیح دیگری اعمال شد.

نحوه انجام تغییرات در سیکل‌های حرارتی به این شرح بود که ابتدا، بیشینه دمای  $T_{max}$  هر بار به اندازه  $2^{\circ}\text{C}$  افزایش داده شد تا محدوده مناسب برای رفع تنش‌های پسماند قطعات مشخص شود. به این منظور، فرایندهای بازپخت با حداکثر دمای  $160^{\circ}\text{C}$  و  $158^{\circ}\text{C}$  و  $156^{\circ}\text{C}$  و  $154^{\circ}\text{C}$  و  $152^{\circ}\text{C}$  اجرا شدند. سپس با توجه به مشاهده نتایج بهتر در محدوده میانی این دماها (یعنی حالت  $T_{max} = 156^{\circ}\text{C}$ ) فواصل دمایی کوچکتر در این محدوده نیز مورد آزمایش قرار گرفته و فرایندهایی با حداکثر دماهای  $157^{\circ}\text{C}$  و  $155^{\circ}\text{C}$  انجام شدند.

گرچه تغییر دادن  $T_{max}$  در حین این آزمایش‌ها نتایج را برای کاهش تنش‌های پسماند بهتر می‌کند، اما اعوجاج و تغییر شکل خارج صفحه‌ای در لبه‌های شکاف همچنان وجود خواهد داشت. برای رفع این مشکل، می‌توان نرخ خنک کاری نمونه‌ها را کاهش داده و بجای مقدار اولیه  $29^{\circ}\text{C/h}$ ، از مقداری معادل با نرخ گرم کردن قطعات یعنی  $10^{\circ}\text{C/h}$  استفاده شود. با انجام این تصحیح و اجرای فرایند بر روی ۶ نمونه آزمایشی با ضخامت‌های گفته شده، مشاهده می‌شود که مشکل ایجاد تغییر شکل خارج صفحه‌ای در قطعات، دیگر اتفاق نمی‌افتد.

پارامتر دیگری که در این تحقیق برای تصحیح سیکل حرارتی مورد بررسی قرار گرفته است، مدت نگهداری قطعات در دمای  $T_{max}$  می‌باشد. طبق سیکل حرارتی مرجع [۱۸] که در شکل ۷ نشان داده شد، قطعات باید به مدت ۲/۵ ساعت در دمای  $T_{max}$  نگه داشته شوند. اعمال این فرایند بر روی ۶ نمونه آزمایشی نشان داد که این امر در مورد قطعات با ضخامت کم ( $3\text{ mm}$ ) تأثیر نامطلوبی بر نتایج ندارد. اما در مورد قطعات ضخیم، طولانی شدن مدت نگهداری در دمای  $T_{max}$  منجر به تغییر شکل‌های نسبی بین سطوح بالا و پایین قطعه می‌شود که

توسط پاپالتر [۲۰] بر روی صفحات کم ضخامت (حداکثر  $3\text{ mm}$ ) بوده است، به نظر می‌رسد که کاربرد این فرایند در مورد نمونه‌های ضخیم چندان مفید نیست. در واقع، قطعه باید به قدر کافی در دمای بالاتر از  $T_g$  بماند تا رهاسازی تنش<sup>۱</sup> در ساختار آن بطور مؤثر صورت گیرد. در این صورت عمده غیر همسانگردی در زنجیره‌ها از بین رفته و زنجیره تقریباً در وضعیت بدون بهم ریختگی قرار می‌گیرد.

اما از سوی دیگر، در دماهای بالاتر از  $T_g$ ، ماده کاملاً شکل‌پذیر بوده و با نگه داشتن آن به مدت طولانی در یک دمای ثابت، ممکن است تغییر شکل‌های موضعی در اثر وزن قطعه روی دهد. این امر در مورد صفحات ضخیم اهمیت بیشتری می‌یابد. همچنین در این حالت چسبندگی بین قطعه و سینی کوره افزایش یافته و صدمات سطحی مانند لکه به وجود می‌آید. شکل ۱۱ نمونه‌ای از این آسیب‌های سطحی را نشان می‌دهد. بر اساس بررسی‌های انجام گرفته در این پژوهش، برای اینکه قطعه در حین تنش‌زدایی در اثر وزن خود دچار تغییر شکل‌های خزشی و اعوجاج نشود، باید بعد از رسیدن به حداکثر مقدار دما بلافاصله کاهش دما آغاز شود.

همان‌طور که پیش از این بیان شد، انجام فرایند مطرح شده در مرجع [۱۸] نیز کارایی لازم برای تنش‌زدایی از صفحات پلی کربنات مورد مطالعه را ندارد. گرچه تکرار آزمایش‌ها برای سطوح بالاتر دمایی ( $154^{\circ}\text{C}$  و  $152^{\circ}\text{C}$ )، نتایج را برای رفع تنش‌های زاید بهبود می‌بخشد، اما بررسی نمونه‌ها پس از بازپخت نشان می‌دهد که نرخ بالای خنک کاری به ویژه در محدوده ناحیه انتقال شیشه‌ای، بعضاً سبب تاب برداشتن قطعات و ایجاد تغییر شکل‌های خارج صفحه‌ای می‌شود.



شکل ۱۱ نمونه‌ای از آسیب‌های سطحی پس از بازپخت

در آخرین مرحله از این پژوهش، آزمایش‌هایی بر مبنای اعمال تغییرات در سیکل‌های موجود انجام گرفت و سیکل‌های

#### 1. Stress Relaxation

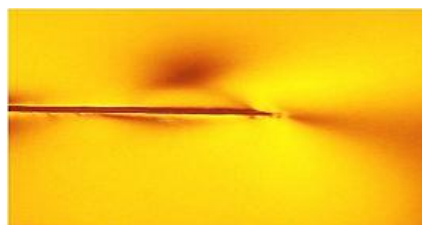


[۱۸] انتخاب شده است، تنش‌های پسماند نیز به خوبی برطرف می‌شوند. بهترین نتایج برای حذف تنش‌های زاید در سیکل اصلاح شده، در دمای  $T_{max} = 156^{\circ}\text{C}$  به دست آمد.

شکل ۱۳ نمونه‌هایی از نتایج حاصل با  $T_{max} = 156^{\circ}\text{C}$  را در پلاریسکوپ نشان می‌دهد. عدم حضور حلقه‌های هم‌تنش فتوالاستیسیته در اطراف محل برشکاری و بویژه در نوک شکاف، نشان دهنده رفع تنش‌های پسماند به نحو مطلوب است. در پایان این مرحله و بعد از انجام آزمایش‌های متعدد بر روی نمونه‌هایی با هندسه و ضخامت‌های گوناگون و جمع بندی نتایج، در نهایت چرخه حرارتی اصلاح شده برای بازپخت صفحات پلی کربنات طبق شکل ۱۴ پیشنهاد می‌شود.

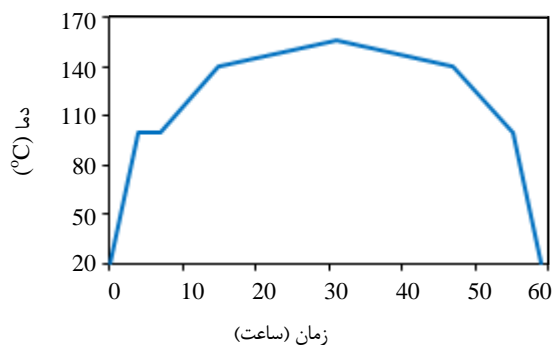


الف- ورق به ضخامت ۳ mm



ب- ورق به ضخامت ۱۰ mm

شکل ۱۳ حذف تنش‌های پسماند در اطراف شکاف با اعمال فرایند بازپخت اصلاح شده



شکل ۱۴ سیکل حرارتی نهایی برای تنش‌زدایی از ورق پلی کربنات

نرخ تغییر دما در بخش‌های مختلف این سیکل حرارتی

این پدیده، از تأثیر نیروی وزن قطعات بر ماده در حالت خمیری ایجاد می‌شود. شکل ۱۲ نمونه‌ای از قطعات با ضخامت ۱۰ mm را نشان می‌دهد که در آن، پس از اعمال فرایند بازپخت بر روی قطعه شکل ۱۲-الف، لبه‌های شکاف طبق شکل ۱۲-ب از هم باز شده‌اند.

به نظر می‌رسد که با توجه به پایین بودن حداکثر دما در سیکل مرجع [۱۸]، نگهداری نمونه‌ها در دمای  $T_{max}$  برای رفع تنش‌های پسماند در قطعات کم ضخامت مفید بوده است (زیرا در این مرجع فقط قطعات با ضخامت ۳ mm یا کمتر آزمایش شده‌اند). اما در مورد قطعات ضخیم، با توجه به وزن بالاتر قطعه و شکل‌پذیری ماده در دمای  $T_{max}$ ، نگهداشتن نمونه‌ها به مدت طولانی در این دما باعث تغییر شکل‌های موضعی ناشی از خزش خواهد شد. برای رفع این مشکل، مدت نگهداری قطعات در حداکثر دمای چرخه، مشابه با مرجع [۳] انتخاب شده (شکل ۶) و پس از رسیدن به  $T_{max}$ ، بلافاصله خنک‌کاری قطعات آغاز می‌شود.

اعمال این تغییر و انجام سه مرحله آزمایش مجدد بر روی نمونه‌هایی با ضخامت ۳ mm، ۶ mm و ۱۰ mm با حداکثر دماهای  $156^{\circ}\text{C}$  و  $155^{\circ}\text{C}$  نشان داد که با انجام این تصحیح، تغییر شکل‌های موضعی ناشی از وزن قطعات ایجاد نمی‌شوند.



الف- شکاف اولیه



ب- باز شدن لبه‌های شکاف پس از بازپخت

شکل ۱۲ باز شدن لبه‌های شکاف در ورق پلی کربنات پس از بازپخت

ضمناً با توجه به اینکه حداکثر دمای سیکل بالاتر از مرجع

با اجرای عملیات حرارتی بر روی نمونه‌های پلی کربنات طبق هر یک از مراجع موجود، ملاحظه شد که روش‌های موجود برای رفع تنش‌های پسماند، کارایی لازم را نداشته و یا بسیار طولانی و پرهزینه هستند. از این رو با مطالعه فرایندهای گوناگون و انجام تغییر و تصحیح آنها، مجموعه‌ای از عملیات بازپخت حرارتی بر روی نمونه‌هایی با ضخامت‌های مختلف (۳mm، ۶mm و ۱۰mm) اجرا شد. در نهایت فرایند حرارتی اصلاح شده‌ای به طریق آزمون و خطا به دست آمد که امکان تنش‌زدایی از صفحات پلی کربنات را ضمن کاهش زمان و هزینه عملیات حرارتی بازپخت فراهم می‌کند.

## ۶- مراجع

- [1] Quinn Plastics- Product Information, QUINN Group, 2009. at <http://www.quinn-plastics.com>.
- [2] Takahashi S., Suetsugu M., Shimimoto A., "A Basic Study of Plastic Strain Freezing by Photoelastic Experiments", *JSME Int. Journal*, Vol. 30, No. 266, 1987, pp.1237-1242.
- [3] Pacey M.N., James M.N., Patterson E.A. "On the Use of Photoelasticity to Study Crack Growth Mechanisms", *The Ninth Int. Cong. Experimental Mech.*, Orlando, USA, 2000.
- [4] Wang W.C., Shih H.C., "Hybrid Investigation on Residual Stresses Induced by Self-Drilling Screw on Polycarbonate Plates" *Optics and Lasers in Eng.*, Vol. 38, 2002, pp. 97-113.
- [5] Henriksen E.K., "Residual Stresses in Machined Surfaces", *J. Applied Mech*, Vol. 73, 1951, pp. 69-76.
- [6] Okushima K., Kakino Y., "A Study of Residual Stress Produced by Metal Cutting", *Mem. Fac. Eng.*, Japan Vol. 34, 1972, pp. 234-248.
- [7] Scholtes B., "Residual Stress Induced by Machining", *Advances in Surfaces Treatments*, Vol. 4, 1987, pp. 59-71.
- [8] Lieven N.A.J., Greening P.D., "Effect of Experimental Pre-stress and Residual Stress on Modal Behavior", *Phil. Trans. R Soc. London*, Ser. A 359, 2001, pp. 97-111.
- [9] Ya M., Xing Y., Dai F., Lu K., Lu J., "Study of Residual Stress in Surface Nanostructured AISI 316L Stainless Steel Using Two Mechanical Methods", *Surface and Coatings Tech*, Vol. 168, 2003, pp. 148-155.
- [10] Nelson D.V., "Residual Stress Determination by Hole Drilling Combined with Optical Methods", *Exp Mech*, Vol. 50, 2010, pp.145-158.
- [11] Schajer G.S., "Advances in Hole-drilling Residual Stress Measurements", *Exp Mech*, Vol. 50, 2010, pp. 159-168.

طبق نمودار شکل ۱۴ است، به این صورت که نرخ افزایش دما از دمای محیط تا زمان رسیدن به دمای ۱۰۰ درجه که دمای جوش آب است،  $20^{\circ}\text{C/h}$  می‌باشد. سپس قطعات به مدت ۳ ساعت در این دما نگه‌داشته می‌شوند. در واقع، این مرحله برای خشک شدن ماده انجام می‌گیرد تا از تشکیل حباب در آن جلوگیری شود. پس از آن افزایش دما با سرعت کمتری انجام می‌شود ( $5^{\circ}\text{C/h}$ ) تا به دمای  $140^{\circ}\text{C}$  درجه سلسیوس برسد که نزدیک به دمای انتقال شیشه این ماده است. در ادامه، قطعه به کندی (با نرخ  $1^{\circ}\text{C/h}$ ) گرم‌تر می‌شود تا به آرامی از مرحله انتقال شیشه‌ای عبور کند و زنجیره‌های پلیمری تدریجاً به وضعیت متعادل برسند.

همان طور که ملاحظه می‌شود مرحله خشک‌کاری نیز با همان نرخ‌ها در جهت کاهش دما ادامه می‌یابد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که سرعت پایین کاهش دما در ناحیه انتقال از حالت مایع متعادل به حالت پایدار جامد، و سپس کاهش دما تا  $100^{\circ}\text{C}$  درجه، مانع از اعمال گرادیان‌های حرارتی بالا شده و مشکل تاب برداشتن نمونه‌ها و اعوجاج‌های ناخواسته را کاملاً برطرف می‌کند. پس از آن می‌توان قطعات را با سرعت بیشتری خنک کرد که طبق آزمایش‌های انجام گرفته، نرخ  $20^{\circ}\text{C/h}$  نتایج قابل قبولی خواهد داشت.

مدت زمان این سیکل حرارتی برای  $T_{\max} = 156^{\circ}\text{C}$  معادل با ۵۹ ساعت است. مدت انجام این سیکل در مقایسه با فرایند موجود در مرجع [۳] به نحو مطلوبی کمتر بوده و مشاهده قطعات بازپخت شده در پلاریسکوپ نشان می‌دهد که برخلاف سیکل‌های مراجع [۱۸، ۱۹]، سیکل پیشنهاد شده قادر به رفع تنش‌های زاید بدون ایجاد تغییر شکل‌های ناخواسته در قطعات است.

## ۵- جمع‌بندی

وجود تنش‌های پسماند، از عوامل اصلی خطا در ارزیابی میدان تنش و تخمین عملکرد قطعه است که در طی آزمایش‌های فتوالاستیسیته نیز، توزیع تنش را تحت تأثیر قرار می‌دهد. برای رفع این تنش‌های زاید، باید ماده تا دمای بالاتر از دمای انتقال کریستالی حرارت داده شود تا زنجیره‌های مولکولی آن، بار دیگر همسانگرد شده و تنش‌های محبوس در آن آزاد شوند. این بازپخت حرارتی طی فرایندی خاص صورت می‌گیرد که جزئیات آن در این پژوهش مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت.

- [16] Boit K.A., *Residual Stresses in Thin Polymer Films*, MSc. Thesis, Texas Tech University, 2008.
- [17] Dawling N.E., *Mechanical behavior of materials*, 2th Ed., Prentice Hall, New York. 1999.
- [18][18] Renato T., *Valutazione Tramite Analisi Fotoelastica Dei Fattori di Intensificazione Degli Sforzi per Una Rotaia Ciccata*, Masters Thesis, Politecnico di Milano, Italy, 2004.
- [19] Pappalettere C., Sangirardi M., “Determinazione Sperimentale del Coefficiente di Concentrazione delle Sollecitazioni in Giunti Saldati a Croce”, *VIII AIAS National Congress*, Florence, Italy, 1980.
- [20] Pappalettere C., “Annealing Polycarbonate Sheets”, *J. Strain*, Vol. 20, No. 4, 1984, pp. 179-18.
- [12] H. Aali, Introduction to manufacturing processes, Emam Hossein University’s Publisher, Tehran, 1996. (In Persian)
- [13] Doyle J.F., *Modern Experimental Stress Analysis*, First Ed., John Wiley & Sons, England, 2004.
- [14] DuPont™ Delrin Acetal Resin, *Technical Information*, USA, 2006. See also URL <http://www.plastics.dupont.com>.
- [15] McKenna G.B., Simon S.L., “The Glass Transition- Its Measurement and Underlying Physics”. *HDBK of Thermal Analysis and Calorimetry*, S.Z.D. Cheng, ed., 3: App Polymers and Plastics, Elsevier Science B.V., Chapter 1, 2002.