



## بررسی اثرات زمان و دمای پخت بر خواص مکانیکی و تخریب حرارتی چرم مصنوعی ساخته شده از پی‌وی‌سی

مهدی زمانی<sup>۱</sup>، محمود مهرداد شکرپه<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

\* تهران، صندوق پستی ۱۳۱۱۴-۱۶۸۴۶، shokrieh@iust.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله:

دریافت: .....

پذیرش: .....

### کلیدواژگان

پی‌وی‌سی، امولسیون، چرم مصنوعی،

دما و زمان پخت، خواص مکانیکی،

تخریب حرارتی

پلی‌وینیل کلراید بعنوان سومین پلیمر پر مصرف در دنیا از جایگاه ویژه‌ای در صنایع مختلف برخوردار است. با توجه به کاربرد روزافزون چرم مصنوعی، بررسی و بهینه‌سازی شرایط پخت یکی از خلأهای تحقیقاتی در این زمینه به‌شمار می‌رود. هدف تحقیق حاضر بررسی تأثیر دما و مدت‌زمان پخت بر خواص مکانیکی چرم مصنوعی و همچنین شناسایی دما و زمان بهینه پخت است. در پژوهش حاضر، فیلم‌های چرم مصنوعی با استفاده از روش پوشش‌دهی با تیغه تهیه شدند و سپس در دما و مدت‌زمان‌های مختلف جهت انجام فرآیند پخت قرار گرفتند. بررسی رنگ نمونه یکی از روش‌های تشخیص میزان تخریب حرارتی است. در این تحقیق با استفاده از این روش میزان تخریب حرارتی و تأثیر آن بر خواص مکانیکی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین جهت بررسی تأثیر شرایط پخت بر رفتار مکانیکی چرم مصنوعی، نمونه‌های دمبلی شکل تهیه شدند و تحت آزمون کشش تک محوری قرار گرفتند. نتایج نشان داد که به دلیل حرکات مولکولی بالای ذرات در دمای ۱۹۰°C، پلاستی‌سایزر به خوبی به زنجیره‌های پی‌وی‌سی امولسیونی نفوذ می‌کند و در نتیجه خواص مکانیکی آن را افزایش می‌دهد. افزایش مدت‌زمان پخت در دمای ثابت ابتدا سبب افزایش خواص مکانیکی می‌گردد، سپس به دلیل تخریب حرارتی، خواص مکانیکی نمونه کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج، شرایط پخت تأثیر بسزایی بر خواص مکانیکی چرم مصنوعی دارد. با شناسایی دما و زمان بهینه پخت، تولید چرم‌های مصنوعی با خواص مکانیکی بالا بدون استفاده از پرکننده‌های خاص امکان‌پذیر گردید.

## Investigation of curing time and temperature effects on mechanical properties and thermal degradation of artificial leather made of PVC

Mahdi Zamani<sup>1</sup>, Mahmood Mehrdad Shokrieh<sup>1\*</sup>

1- School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

\*P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, shokrieh@iust.ac.ir

### Keywords

Emulsion PVC; Synthetic leather; Temperature and time of curing; Mechanical properties; Thermal degradation.

### Abstract

Polyvinyl chloride owns a special place in various industries as the third most used polymer worldwide. Due to the widespread usage of synthetic leather, one of the research gaps in this field is the study and optimization of curing conditions. The present research aims to investigate the effects of temperature and time of curing on the mechanical properties of synthetic leather to establish the optimal temperature and time of curing. To this end, synthetic leather films were prepared using the knife coating technique (KCT). Then specimens were placed at different temperatures and times to perform the curing process. Thermal degradation was determined by checking the color of the samples. Also, to investigate the effect of curing conditions on the mechanical behavior of synthetic leather, dumbbell-shaped samples were prepared and subjected to uniaxial tensile tests. The results showed that due to the high molecular motions of the particles at 190°C, the plasticizer penetrates well into the chains of emulsion PVC and thus increases its mechanical properties. Additionally, the mechanical properties of the synthetic leather were enhanced by increasing the cure time at constant temperatures. Afterward, thermal degradation occurred due to the long-term curing process, reducing mechanical properties. According to the obtained results, the curing conditions can significantly affect the mechanical properties of synthetic leather. Likewise, identifying the optimal temperature and time of curing in the artificial leather industry allows the development of products with high mechanical properties without special fillers.

## 1- مقدمه

پی‌وی‌سی نام اختصاری پلی‌وینیل کلراید است که یکی از مهم‌ترین پلیمرهای ترموپلاستیک پرمصرف در جهان محسوب می‌شود. پی‌وی‌سی بعد از پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن سومین ترموپلاستیک پرمصرف در دنیا می‌باشد. با توجه به اینکه محصولات پی‌وی‌سی از طریق فرآیندهای مختلف تولید می‌گردد، به‌همین دلیل امکان دستیابی به خواص و ویژگی‌های منحصر به فردی وجود دارد [1]. در طول دهه‌های گذشته پی‌وی‌سی بعنوان یکی از پرکاربردترین پلیمرها شناخته می‌شود و به‌دلیل خواص الکتریکی، مقاومت شیمیایی، اشتعال‌پذیری کم و هزینه تولید پایین بصورت گسترده در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. صنایع مختلفی از جمله اسباب بازی کودکان، لوازم پزشکی، ساختمان‌سازی و روش‌های سیم‌های برق با پی‌وی‌سی در ارتباط است [2-4].

بهبود و تغییر خواص پی‌وی‌سی از طریق افزودنی‌های مختلف از جمله پرکننده‌های آلی و معدنی، پلاستی‌سایزر، پایدارکننده حرارتی و روان‌کننده مورد توجه محققان زیادی بوده است. تأثیر مقادیر متغیر پایدارکننده و روان‌کننده بر میزان فیوژن آمیزه پی‌وی‌سی سخت توسط بیدگلی و همکاران [5] با استفاده از دستگاه برابندر پلاستیکوردر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان می‌دهد که میزان افزودنی‌های مختلف از جمله روان‌کننده و پایدارکننده بر خواص رئولوژیکی و رفتار فیوژن پی‌وی‌سی سخت تأثیر بسزایی دارد.

تأثیر پرکننده‌ها بر خواص رزین پی‌وی‌سی به عوامل مختلفی از جمله شکل، اندازه، جنس، ویژگی‌های سطح و میزان پراکندگی در ماتریس پی‌وی‌سی بستگی دارد. در این راستا پرکننده‌های زیادی جهت تقویت خواص مکانیکی پی‌وی‌سی مورد استفاده قرار گرفته است [6-9]. رایج‌ترین پرکننده مورد استفاده در پی‌وی‌سی نرم و چرم مصنوعی کربنات کلسیم است و مصرف جهانی آن در سال‌های اخیر بیش از ده میلیون تن است [10]. چن<sup>1</sup> و همکاران [11] به بررسی تأثیر کربنات کلسیم در اندازه میکرومتر بر خواص مکانیکی و دمای انتقال شیشه‌ای پی‌وی‌سی صلب پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان می‌دهد 15PHR از میکروکربنات کلسیم سبب افزایش استحکام کششی و تنش تسلیم به ترتیب تا 7 و 11 درصد می‌گردد، همچنین دمای انتقال شیشه‌ای نیز به میزان 1.2 درجه سانتی‌گراد می‌شود. طی تحقیقات دیگر ذرات نانوکربنات کلسیم توسط نینگ چن<sup>2</sup> و همکاران [7] به ماتریس پی‌وی‌سی افزوده شد و میزان استحکام کششی نهایی با افزودن 10 PHR نانوکربنات کلسیم تا 7 درصد افزایش یافت. در تحقیقات دیگر دانه‌های شیشه<sup>3</sup> [3]، خاکستر بادی<sup>4</sup> [12]، سیلیکا<sup>5</sup> [13]، تالک<sup>6</sup> [14] و کربن سیاه<sup>7</sup> [15] نیز برای تقویت خواص مکانیکی به رزین پی‌وی‌سی افزوده شده‌است. ارمیس و همکاران [3] به بررسی تأثیر دانه‌های شیشه در مقادیر 5، 10 و 20 درصد وزنی بر خواص مکانیکی و تریبولوژی پی‌وی‌سی نرم مورد استفاده از کابل‌های برق خودرو پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان می‌دهد که افزایش میزان دانه‌های شیشه سبب کاهش مقاومت کششی، کرنش پارگی<sup>8</sup>، ضریب اصطکاک و مقادیر نرخ فرسایش می‌گردد و از طرفی مدول کششی و سختی افزایش می‌یابد.

هاشم‌نژاد و کفاشی [16] جهت بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی فوم‌های پی‌وی‌سی از پراکسید آلی و مونومر تری متیل پروپان تری متاکریلات<sup>9</sup> جهت

شبکه‌ای کردن فوم استفاده کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان می‌دهد با افزایش میزان پراکسید و مونومر تری متیل پروپان تری متاکریلات، درصد ژل تشکیل شده و چگالی شبکه افزایش می‌یابد. همچنین استحکام کششی نهایی و پایداری ابعادی در دمای بالا بهبود می‌یابد. لازم به‌ذکر است که در این تحقیقات میزان زرد شدگی و تغییر رنگ نمونه‌ها معیاری برای پایداری حرارتی در نظر گرفته شده‌است.

مقاومت شیمیایی بالای پی‌وی‌سی در برابر اسیدها، بازها و روغن‌ها سبب شده تا پی‌وی‌سی در صنایع مختلف بکار گرفته‌شود، همچنین انعطاف‌پذیری پی‌وی‌سی به کمک مقادیر مختلفی از پلاستی‌سایزرها<sup>10</sup> از جمله فتالات‌ها<sup>11</sup>، تریملیتات‌ها<sup>12</sup>، آدیپات‌ها<sup>13</sup> و روغن سویا<sup>14</sup> و روغن‌های گیاهی دیگر می‌تواند در محدوده وسیعی تغییر کند [3]. ولی‌پور و انتظام [17] در پژوهشی نیز به بررسی اثر نرم‌کننده‌های دی‌اکتیل فتالات و روغن سویا بر خواص فیزیکی و مکانیکی پی‌وی‌سی پرداختند. بخش اصلی تولید پی‌وی‌سی، ترکیب رزین پی‌وی‌سی و پلاستی‌سایزر برای تشکیل یک خمیر پی‌وی‌سی یا پلاستیسول مایع است که می‌تواند با حرارت کنترل‌شده از طریق یک فرآیند پخت به یک پلاستیسول جامد تبدیل شود. به طور سنتی، فتالات‌ها به‌دلیل هزینه پایین، به طور گسترده به عنوان پلاستی‌سایزر در پی‌وی‌سی نرم مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این وجود، به دلیل ظهور برخی مشکلات مربوط به مهاجرت مواد غذایی، استفاده از آن‌ها بعنوان پلاستی‌سایزر محدودتر شده است [18] و [19]. از آنجایی که روش تولید چرم مصنوعی بصورت پوشش‌دهی با تیغه است بنابراین عدم تورق لایه‌ها و تقویت خواص مکانیکی، دو پارامتر حائز اهمیت می‌باشد. زمانی و همکاران [20] در پژوهشی از مقادیر مختلف پی‌وی‌سی سوسپانسیونی داخل پلاستیسول چرم مصنوعی استفاده کردند که طبق نتایج بدست آمده استفاده از 6 PHR پودر پی‌وی‌سی سوسپانسیونی سبب افزایش استحکام کششی نهایی و مدول الاستیک به ترتیب تا 5 و 15 درصد می‌شود، همچنین به‌دلیل برهمکنش بهتر لایه‌ها با یکدیگر، افزایش زبری سطح بین لایه‌ها و میزان ترشوندگی پدیده تورق لایه‌ها بطور کامل مرتفع شد.

تغییر رنگ نمونه پس از پخت و خواص مکانیکی نمونه، دو راه برای بررسی میزان تخریب حرارتی و پخت کامل نمونه‌های پی‌وی‌سی نرم و چرم مصنوعی است. فنولار و همکاران [21] در تحقیقات خود به این موضوع پرداخته‌اند. علاوه بر این در برخی از تحقیقات به تأثیر افزودنی‌ها بر زمان پخت آمیزه‌های پلیمری پرداخته شده است، برای مثال شعبانی و همکاران [22] در تحقیقات خود به بررسی اثر الیاف چرم طبیعی بر خواص مکانیکی و دمای پخت آکریلونیتریل بوتادین پرداخته‌اند. اگرچه تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه شرایط پخت پلیمرها و افزایش خواص مکانیکی چرم مصنوعی و پی‌وی‌سی نرم به کمک پرکننده‌ها و افزودنی‌های مختلف انجام شده است، اما بهینه‌سازی شرایط پخت که یکی از مهم‌ترین عوامل موثر بر خواص مکانیکی به‌شمار می‌رود نیازمند بررسی دقیق می‌باشد. هدف از تحقیق حاضر بررسی تأثیر دو متغیر دما و زمان پخت بر خواص مکانیکی و میزان تخریب حرارتی چرم مصنوعی می‌باشد که با مقایسه نتایج بدست آمده دما و زمان پخت بهینه شناسایی می‌گردد. با توجه به بازه دمای پخت پی‌وی‌سی نرم که از دمای 150 درجه سانتی‌گراد تا 200 درجه سانتی‌گراد می‌باشد، دماهای 160 درجه سانتی‌گراد، 170 درجه

8 Rupture strain

9 TMPTMA

10 Plasticizer

11 Phthalate

12 Trimellitate

13 Adipate

14 Soybean Oil

1 Chen

2 Ning Chen

3 Glass bead

4 Fly Ash

5 Silica

6 Talc

7 Carbon Black

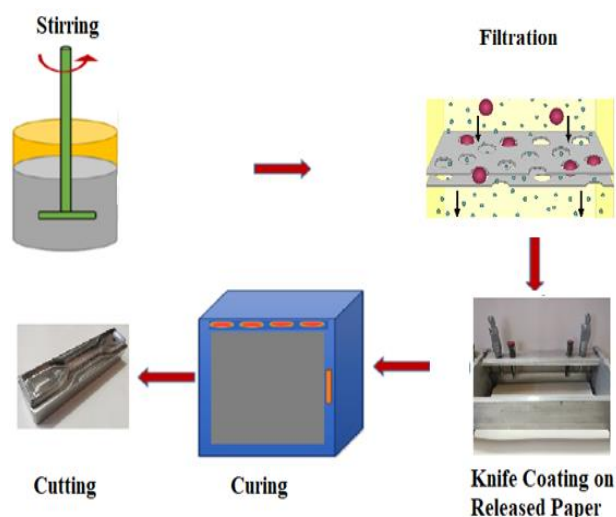
جدول ۱ فرمولاسیون پلاستیسول نمونه‌ها

**Table 1** The Plastisol formulation of samples

پی‌وی‌سی	پلاستیسایزر	روان‌کننده	پایدارکننده حرارتی
100	60	18	5

**3-2- روش ساخت**

روش ساخت نمونه‌ها در این تحقیق با توجه به روش تولید چرم مصنوعی در صنعت طراحی شد. در شکل ۱ نحوه ساخت نمونه‌ها مشاهده می‌شود، در مرحله اول اجزاء تشکیل دهنده پلاستیسول (جدول ۱)، به مدت ده دقیقه در دمای محیط توسط آمیزنده با سرعت 2000 دور بر دقیقه با یکدیگر مخلوط شدند، همچنین برای جداسازی ذرات کلوخه شده و ناخالصی، پس از اختلاط پلاستیسول از فیلتر عبور داده شد. جهت شبیه‌سازی فرآیند پوشش‌دهی با تیغه‌آدر صنعت، پلاستیسول به کمک دستگاه فیلم‌کش بصورت فیلم‌هایی با ضخامت 2 میلی‌متر، بر روی کاغذهای نسوز<sup>۵</sup> کشیده شد و جهت تکمیل فرآیند پخت، هر کدام با توجه به جدول 2 در مدت‌زمان مشخصی در دمای مشخص قرار گرفتند و در مرحله آخر به کمک سنبه نمونه‌های دمبلی شکل با توجه به استاندارد برش خوردند. لازم به ذکر است که تعداد 5 نمونه برای هر کدام از شرایط پخت که در جدول 2 با علامت ✓ مشخص شده است، برای انجام آزمون کشش تهیه شدند.



**Fig. 1** The schematic of samples preparation

شکل ۱ شماتیک آماده‌سازی نمونه‌ها

جدول ۲ دما و زمان پخت نمونه‌ها

**Table 2** Temperature and curing time of samples

زمان پخت	160°C	170°C	180°C	190°C
6 min			✓	
8 min		✓	✓	✓
10 min	✓	✓	✓	✓
12 min	✓	✓	✓	✓
14 min		✓	✓	
16 min		✓	✓	
18 min		✓		

سانتی‌گراد، 180 درجه سانتی‌گراد و 190 درجه سانتی‌گراد جهت پخت نمونه‌های تحقیق حاضر مد نظر قرار گرفتند [23]. پلاستیسول این نمونه‌ها در شرایط یکسان با ترکیبی ثابت تهیه شد و نمونه‌ها در دماهای 160 درجه سانتی‌گراد، 170 درجه سانتی‌گراد، 180 درجه سانتی‌گراد و 190 درجه سانتی‌گراد در مدت‌زمان‌های مختلف قرار گرفتند و در نهایت با بررسی هر دو رنگ نمونه‌ها پس از پخت و انجام آزمون کشش مقادیر بهینه دما و زمان پخت شناسایی شد.

نتایج حاصل از تحقیق حاضر نشان می‌دهد، افزایش زمان پخت در هر نمونه در ابتدا به دلیل نفوذ بهتر پلاستی‌سایزر در زنجیره‌های پی‌وی‌سی امولسیون‌ی سبب افزایش خواص مکانیکی و سپس به دلیل تخریب حرارتی نمونه‌ها خواص مکانیکی افت می‌کند. همچنین افزایش دما تا 190 درجه سانتی‌گراد به دلیل افزایش و تسهیل جنبش ذرات، فرآیند پخت به خوبی انجام شده و خواص مکانیکی بالاتری در مدت‌زمان کمتر مشاهده می‌شود. با توجه به نتایج، برای نمونه‌های فیلم چرم مصنوعی با ضخامت 2 میلی‌متر، دما و زمان بهینه پخت به ترتیب برابر 190 درجه سانتی‌گراد به مدت 12 دقیقه است.

**2- نوآوری و اهداف تحقیق**

میزان تقاضا برای چرم مصنوعی طی سال‌های اخیر، به دلیل کاربردهای فراوان مانند مبلمان، خودرو، لوازم جانبی الکترونیکی و پوشاک افزایش یافته‌است. هزینه پایین، رنگ‌بندی مختلف، تولید آسان و وزن پایین از دیگر مزایای چرم مصنوعی است [24]. با توجه به مصارف متعدد چرم مصنوعی، مطالعه و تقویت خواص مکانیکی آن از اهمیت بالایی برخوردار است. تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه استفاده از پرکننده‌ها و الیاف مختلف جهت تقویت خواص مکانیکی چرم مصنوعی صورت پذیرفته است اما تاکنون تأثیر شرایط پخت بر رفتار مکانیکی چرم مصنوعی مورد بررسی قرار نگرفته است. در تحقیق حاضر، بهینه‌سازی شرایط پخت چرم مصنوعی از طریق اندازه‌گیری خواص مکانیکی و بررسی میزان تغییر رنگ و تخریب حرارتی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد بررسی میزان تغییرات در خواص مکانیکی چرم مصنوعی با توجه به شرایط پخت تأثیر به‌سزایی بر نحوه تولید چرم مصنوعی در صنعت می‌گذارد. در پژوهش انجام شده، سعی بر آن شد تا با توجه به روش تولید چرم مصنوعی در صنعت، شرایط بهینه از نقطه نظر دما و مدت‌زمان پخت مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور نمونه‌های مختلف در شرایط مختلف تهیه شد و سپس جهت مقایسه خواص مکانیکی آن‌ها با یکدیگر تحت آزمون کشش قرار گرفتند، همچنین با توجه به مسئله تخریب حرارتی در پی‌وی‌سی، رنگ نمونه‌ها و مقایسه آن با نتایج آزمون کشش نیز مورد بررسی قرار گرفت.

**3- روش تحقیق**

**3-1- مواد اولیه**

همانطور که در جدول 1 نیز آمده است، فرمولاسیون پلاستیسول به کار رفته شامل رزین پی‌وی‌سی امولسیون‌ی<sup>۱</sup>، پلاستی‌سایزر از نوع روغن دی‌اکتیل فتالات<sup>۲</sup>، پایدار کننده حرارتی از نوع باریم-کادمیوم-روی<sup>۳</sup> بصورت مایع و روان‌کننده هیدروکربنی می‌باشد. با توجه به جدول 1 فرمولاسیون تمام نمونه‌ها ثابت و شرایط ساخت پلاستیسول آن‌ها یکسان است.

<sup>۱</sup> Knife Coating Technique (KCT)

<sup>۲</sup> Released Paper

<sup>۱</sup> E-PVC 6834

<sup>۲</sup> DOP

<sup>۳</sup> Ba-Ca-Zn Heat Stabilizer

4- نتایج و بحث

منظور از پخت در مرحله آخر تولید چرم مصنوعی به معنای نفوذ پلاستی‌سایزر به زنجیره‌های پی‌وی‌سی امولسیون است. جهت امتزاج<sup>1</sup> و انعقاد<sup>2</sup> ذرات پی‌وی‌سی، پلاستی‌سول تحت حرارت قرار می‌گیرد و در نتیجه استحکام پلاستی‌سول بالا می‌رود که خواص مکانیکی محصول به ترکیب پلاستی‌سول و شرایط پخت آن وابسته است [25].

با توجه به استاندارد آزمون کشش پلاستیک‌ها<sup>3</sup> [26]، نمونه‌ها در اندازه مشخص برش خوردند و آماده برای آزمون کشش شدند. جهت محاسبه مدول الاستیک، استحکام نهایی کششی و کرنش پارگی، نمونه‌ها توسط دستگاه کشش یونیورسال Santam STM-150 با نیروسنج<sup>4</sup> 500 نیوتن، فاصله بین دو گیره 65 میلی‌متر و با سرعت 50 میلی‌متر بر دقیقه تحت آزمون کشش قرار گرفت. در شکل 2 تصویری از نمونه در شروع و حین آزمون کشش آمده‌است.



Fig. 2 Sample at the beginning of the tensile test (left) and during the tensile test (right)

شکل 2 نمونه در ابتدای آزمون کشش (چپ) و حین آزمون کشش (راست)

نمودارهای تنش-کرنش برای محاسبه مدول الاستیک تمام نمونه‌ها استفاده شد و نتایج آن به صورت میانگینی با حداکثر انحراف معیار 0.2 در جدول 3 تا جدول 5 آمده‌است. لازم به ذکر است که مدول الاستیک نمونه‌ها برابر شیب نمودار تنش-کرنش از نقطه آغاز تا 20 درصد کرنش کششی است. با استفاده از روش رگرسیون خطی، تا این میزان کرنش میزان ضریب همبستگی بیشینه بود.

جدول 3 مدول الاستیک نمونه‌ها برحسب مگاپاسکال در دما و زمان پخت متفاوت

Table 3 The elastic modulus values of the samples in MPa at different temperatures and times of curing

زمان پخت	160°C	170°C	180°C	190°C
6 min	-	-	5.2	-
8 min	-	5.4	5.67	7.59
10 min	5.17	5.43	5.68	7.93
12 min	5.22	5.58	5.93	7.96
14 min	-	6.2	7.15	-
16 min	-	6.34	7.28	-
18 min	-	6.36	-	-

جدول 4 استحکام کششی نهایی نمونه‌ها برحسب مگاپاسکال در دما و زمان پخت متفاوت

Table 4 The ultimate tensile strength values of the samples MPa at different temperatures and times of curing

زمان پخت	160°C	170°C	180°C	190°C
6 min	-	-	6.87	-
8 min	-	6.33	8.02	9.58
10 min	4.33	7.46	8.11	9.79
12 min	5.46	8.03	8.13	9.83
14 min	-	8.8	9.19	-
16 min	-	8.75	9.1	-
18 min	-	8.7	-	-

جدول 5 کرنش پارگی نمونه‌ها در دما و زمان پخت متفاوت

Table 5 The rupture strain of samples at different temperatures and times of curing

زمان پخت	160°C	170°C	180°C	190°C
6 min	-	-	%135	-
8 min	-	%134	%232	%267
10 min	%126	%217	%248	%268
12 min	%142	%232	%255	%268
14 min	-	%254	%260	-
16 min	-	%255	%258	-
18 min	-	%250	-	-

جهت درک بهتر و مقایسه تغییرات خواص مکانیکی در شکل 3 تا شکل 5 نمودارهای تغییرات مدول الاستیک، استحکام کششی نهایی و کرنش پارگی با شرایط مختلف از نظر دما و مدت زمان پخت نیز آمده است. علاوه بر این، نمودار تنش-کرنش برای نمونه‌ی بهینه (نمونه‌ی پخت شده در دمای 190 درجه سانتی‌گراد به مدت 12 دقیقه) در شکل 6 مشاهده می‌شود.

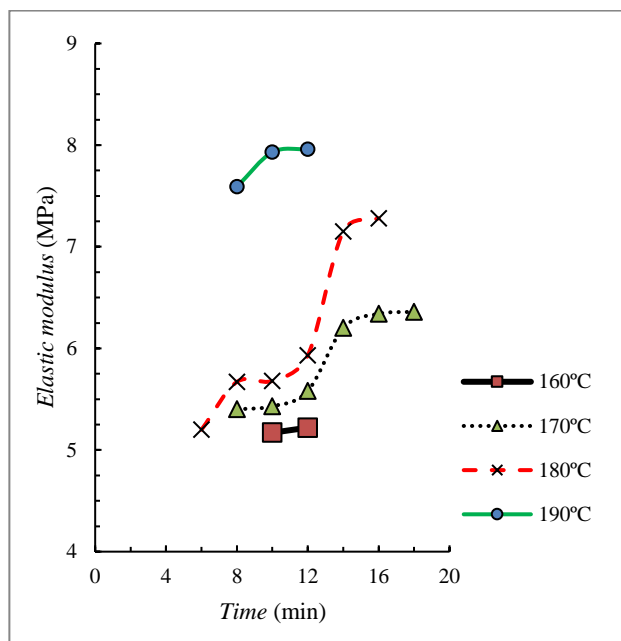


Fig. 3 Diagram of the changes in the elastic modulus of samples at various temperatures and times of curing

شکل 3 نمودار تغییرات مدول الاستیک نمونه‌ها در دماها و زمان‌های مختلف پخت

<sup>3</sup> ASTM D638

<sup>4</sup> Load Cell

<sup>1</sup> Fusion

<sup>2</sup> Gelation

ساختار، خواص مکانیکی به بالاترین حد خود در آن دما می‌رسد و پس از آن تخریب حرارتی در نمونه شدت گرفته و سبب کاهش خواص مکانیکی می‌گردد.

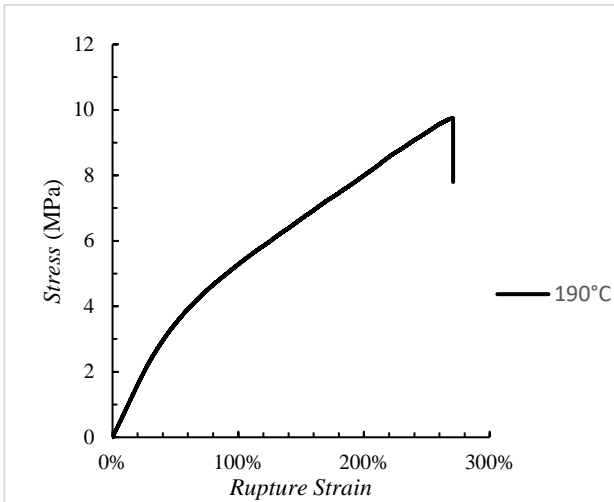


Fig. 6 The Stress-Strain diagram of the optimal specimen

شکل ۶ نمودار تنش-کرنش نمونه بهینه

در دمای 190 درجه سانتی‌گراد بدلیل جنبش مولکولی بالاتر ذرات، نفوذ پلاستی‌سایزر در ذرات پی‌وی‌سی امولسیون‌ی بهتر است و در مدت‌زمان کمتری رخ می‌دهد. علت بالاتر بودن خواص مکانیکی در مدت‌زمان پخت کمتر در این دما همین امر است. افزایش دما به میزان بالاتر از 190 درجه سانتی‌گراد به دلیل سرعت بالای تخریب حرارتی و همچنین به وجود آمدن مشکلاتی در روند تولید صنعت چرم مصنوعی در این تحقیق مورد بررسی قرار نگرفت.

تخریب حرارتی در پی‌وی‌سی به معنای جدا شدن کلر از زنجیره‌ی پلیمر است و این فرآیند موجب تغییر رنگ نمونه می‌گردد. بررسی رنگ نمونه‌ها یکی از روش‌های شناسایی تخریب حرارتی است. فنولار و همکاران [21] نیز در تحقیقات خود از این روش برای بررسی میزان تخریب حرارتی استفاده کرده‌اند. در شکل 7 تصاویر نمونه‌ها و میزان تغییر رنگ نمونه‌ها آمده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، توافق خوبی میان نتایج تخریب حرارتی در این تحقیق با تحقیقات فنولار و همکاران [21] و همچنین نتایج آزمون کشش برقرار است.

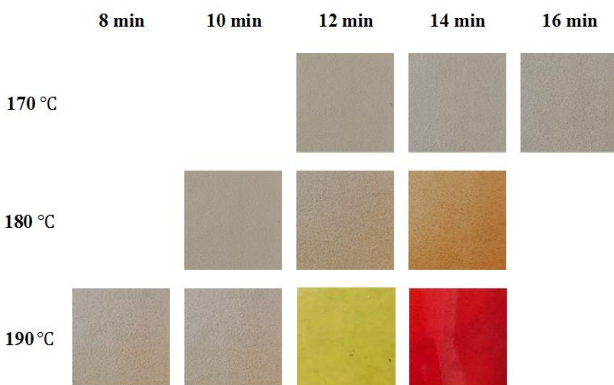


Fig. 7 The effect of temperature and time of curing on color and thermal degradation of samples

شکل ۷ تأثیر دما و مدت‌زمان پخت بر رنگ و تخریب حرارتی نمونه‌ها

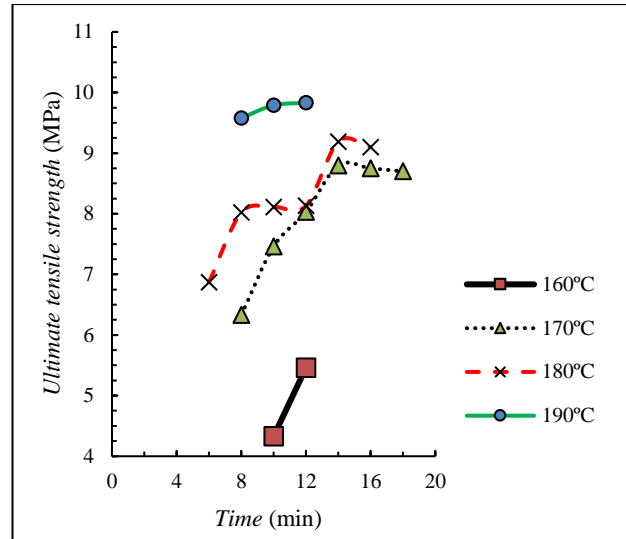


Fig. 4 Diagram of the changes in the ultimate tensile strength of samples at various temperatures and times of curing

شکل ۴ نمودار تغییرات استحکام نهایی کششی نمونه‌ها در دماها و زمان‌های مختلف پخت

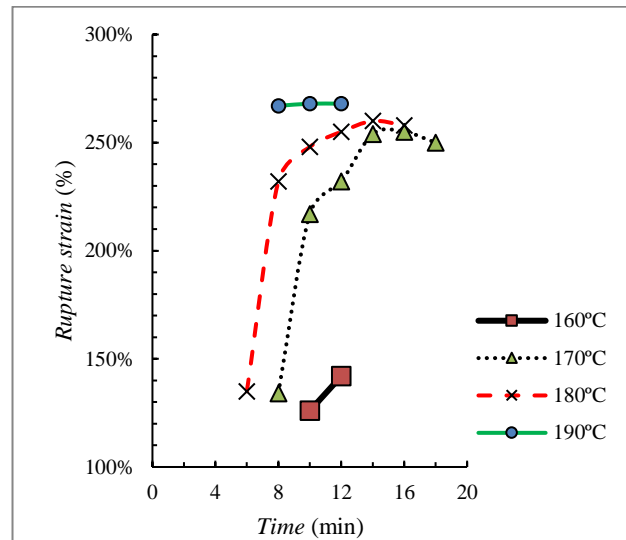


Fig. 5 Diagram of the changes in the rupture strain of samples at various temperatures and times of curing

شکل ۵ نمودار تغییرات کرنش پارگی نمونه‌ها در دماها و زمان‌های مختلف پخت

با توجه به شکل 3 تا شکل 5، دمای 160 درجه سانتی‌گراد به دلیل خواص مکانیکی بسیار پایین نمونه‌ها، دمای مناسبی برای نفوذ پلاستی‌سایزر به داخل زنجیره‌های پی‌وی‌سی نمی‌باشد. در دمای 170 درجه سانتی‌گراد و 180 درجه سانتی‌گراد با افزایش مدت‌زمان پخت بدلیل شروع نفوذ پلاستی‌سایزر ابتدا خواص مکانیکی با شیب زیاد افزایش می‌یابد و پس از نفوذ اولیه روغن دی‌اکتیل فتالات در برخی ذرات پی‌وی‌سی امولسیون‌ی، افزایش خواص مکانیکی با شیب کمتری اتفاق می‌افتد. دلیل این امر وجود ذرات کلوخه‌شده<sup>۱</sup> و با اندازه بزرگ‌تر در ساختار پلاستی‌سول پی‌وی‌سی است. نفوذ در ذرات کلوخه‌شده با اندازه‌ی بزرگ‌تر نیازمند زمان بیشتری است و تا هنگامی که نفوذ پلاستی‌سایزر در این ذرات رخ ندهد، این ذرات سبب نقص ساختاری و تمرکز تنش در نمونه می‌شود و مانع از افزایش خواص مکانیکی می‌گردند. پس از نفوذ کامل و همگن شدن

<sup>1</sup> Agglomerated particles

## 5- نتیجه‌گیری

با توجه به کاربرد و استفاده روزافزون از چرم مصنوعی، بررسی تأثیر شرایط پخت و شناسایی دما و مدت‌زمان بهینه پخت امری ضروری است. در این پژوهش به بررسی تأثیر دما و مدت‌زمان پخت بر خواص مکانیکی چرم مصنوعی پرداخته شد. نتایج نشان می‌دهد تغییرات شرایط و انتخاب دقیق زمان و دمای پخت تأثیر بسزایی بر خواص مکانیکی می‌گذارند.

بطور کلی با افزایش دمای پخت تا 190 درجه سانتی‌گراد به دلیل افزایش جنبش مولکولی ذرات، میزان نفوذ پلاستی‌سایزر به زنجیره‌های پلیمری بهبود می‌یابد و در نتیجه امکان دستیابی به خواص مکانیکی بالاتری در مدت‌زمان کم فراهم می‌شود. با افزایش مدت‌زمان پخت در دمای ثابت، ابتدا خواص مکانیکی به دلیل نفوذ پلاستی‌سایزر بین زنجیره‌های پی‌وی‌سی با شیب زیاد افزایش می‌یابد. پس از نفوذ اولیه پلاستی‌سایزر به ذرات پی‌وی‌سی با اندازه کوچک‌تر، با افزایش مدت‌زمان پخت روند افزایش خواص مکانیکی از جمله استحکام نهایی کششی و مدول الاستیک با شیب کمتری اتفاق می‌افتد، زیرا نفوذ پلاستی‌سایزر به ذرات پی‌وی‌سی کلوخه شده در ماتریس پلیمری نیازمند مدت‌زمان بیشتری است و این ذرات کلوخه شده همانند نقص در ماتریس پلیمری سبب افت خواص مکانیکی می‌شود. با شروع نفوذ پلاستی‌سایزر در ذرات کلوخه شده و همگن‌تر شدن ساختار دوباره روند افزایش استحکام کششی و مدول الاستیک با شیب بیشتری مشاهده شد و در نهایت دلیل تخریب حرارتی در مدت‌زمان‌های بالا، خواص مکانیکی افت می‌کند.

با توجه به پژوهش‌های انجام شده در حوزه تقویت خواص مکانیکی چرم مصنوعی و پی‌وی‌سی نرم با استفاده از افزودنی‌های مختلف، بهینه‌سازی شرایط پخت تأثیر به‌سزایی بر خواص مکانیکی دارد برای مثال تغییر دما از 160 درجه سانتی‌گراد به 190 درجه سانتی‌گراد سبب افزایش مدول الاستیک، کرنش پارگی و استحکام کششی نهایی به ترتیب تا 52، 89 و 80 درصد می‌گردد. با مد نظر قرار دادن نتایج این پژوهش در صنایع مرتبط با پی‌وی‌سی نرم خصوصاً صنعت چرم مصنوعی با کمترین هزینه و بدون استفاده از افزودنی‌های ویژه، می‌توان محصولاتی با خواص مکانیکی و کیفیت بالا تولید کرد.

**تقدیر و تشکر:** بدینوسیله نویسندگان از حمایت مالی بعمل آمده توسط صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور با شماره ۹۷۰۲۴۰۰۷ تقدیر و تشکر به عمل می‌آورند.

## 6- مراجع

- [1] Titow, M. V., "PVC technology," Springer Science & Business Media, 2012.
- [2] Shah, B. L. and Shertukde, V. V., "Effect of plasticizers on mechanical, electrical, permanence, and thermal properties of poly (vinyl chloride)," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 90, No. 12, pp. 3278–3284, 2003.
- [3] Ermis, K., Unal, H. and Gunay, M., "Glass bead effects on tribological and mechanical properties of plasticized polyvinyl chloride cable used in vehicles as a filler," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, Vol. 235, No. 11, pp. 2432-2439, 2021.
- [4] Somheil, T., "Study: global PVC demand to grow 3.2% annually through 2021," *Resin Pricing, Building Construction*, 2014.
- [5] Maqqari Bidgoli, M., Garmabi, H. and Akbarian, M., "Investigation of the effect of stabilizers and lubricants on the fusion rate of rigid PVC blend," In Persian, 9th National Congress of Chemical Engineering of Iran, 2004.
- [6] Yarahmadi, N., Jakubowicz, I. and Hjertberg, T., "The effects of heat treatment and ageing on the mechanical properties of rigid PVC," *Polymer Degradation Stability Journal*, Vol. 82, No. 1, pp. 59–72, 2003.
- [7] Chen, N., Wan, C., Zhang, Y. and Zhang, Y., "Effect of nano-CaCO<sub>3</sub> on mechanical properties of PVC and PVC/Blendex blend," *Polymer Testing Journal*, Vol. 23, No. 2, pp. 169–174, 2004.
- [8] Awad, W.H., Beyer, G., Benderly, D., Ijdo, W.L., Songtipya, P., del Mar Jimenez-Gasco, M., Manias, E. and Wilkie, C.A., "Material properties of nanoclay PVC composites," *Polymer Journal*, Vol. 50, No. 8, pp. 1857–1867, 2009.
- [9] Xie, X. L., Liu, Q. X., Li, R. K. Y., Zhou, X. P., Zhang, Q. X., Yu, Z. Z. and Mai, Y. W., "Rheological and mechanical properties of PVC/CaCO<sub>3</sub> nanocomposites prepared by in situ polymerization," *Polymer Journal*, Vol. 45, No. 19, pp. 6665–6673, 2004.
- [10] Rothon, R. and Chris, P., "Fillers for Polymer Applications," Springer International Publishing, Ed. 1, pp. 149-160, 2017.
- [11] Chen, C., Li, H., Teng, C. and Yang, C., "Fusion, electrical conductivity, thermal, and mechanical properties of rigid poly (vinyl chloride)(PVC)/carbon black (CB) composites," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 99, No. 5, pp. 2167–2173, 2006.
- [12] Khoshnoud, P. and Abu-Zahra, N., "The effect of particle size of fly ash (FA) on the interfacial interaction and performance of PVC/FA composites," *Journal of Vinyl and Additive Technology*, Vol. 25, No. 2, pp. 134–143, 2019.
- [13] Syabani, M., Amaliyana, I. N. A. and Hermiyati, I., "Silica from Geothermal Waste as Reinforcing Filler in Artificial Leather," *Key Engineering Materials Journal*, Vol. 849, pp. 78–83, 2020.
- [14] Tuen, B. S., Hassan, A. and Bakar, A. A., "Mechanical Properties of Talc- and ( Calcium carbonate ) -Filled Poly ( vinyl chloride ) Hybrid Composites," *Journal of Vinyl and Additive Technology*, Vol. 18, No. 2, pp. 76-86, 2012.
- [15] Islam, I., Sultana, S., Kumer Ray, S., Parvin Nur, H. and Hossain, M., "Electrical and tensile properties of carbon black reinforced polyvinyl chloride conductive composites," *Journal of Carbon Research*, Vol. 4, No. 1, pp. 15, 2018.
- [16] Hashem Nejad, M. and Babak, K., "Improving the physical and mechanical properties of PVC foams using peroxide curing system," In Persian, 8th National Congress of Chemical Engineering of Iran, 2013.
- [17] Valipoury, N. and Entezam, M., "Physico-mechanical properties of cross-linked polyvinyl chloride (PVC) by electron irradiation method: The effect of plasticizer," In Persian, 17th National Congress of Chemical Engineering of Iran, 2020.
- [18] Wang, Q. and Storm, B. K., "Separation and analysis of low molecular weight plasticizers in poly (vinyl chloride) tubes," *Polymer Testing Journal*, Vol. 24, No. 3, pp. 290–300, 2005.
- [19] Marcilla, A., García, S. and Garcia-Quesada, J. C., "Migrability of PVC plasticizers," *Polymer Testing Journal*, Vol. 27, No. 2, pp. 221–233, 2008.
- [20] Zamani, M., Shokrieh, M. M. and Rahimian-Kolour, S. M., "Study of mechanical behavior of synthetic leather in the presence of PVC suspension resin," 17th National Conference and 6th International Conference on Manufacturing Engineering, 2021.
- [21] Fenollar, O., García, D., Sánchez, L., López, J. and Balart, R., "Optimization of the curing conditions of PVC plastisols based on the use of an epoxidized fatty acid ester plasticizer," *European Polymer Journal*, Vol. 45, No. 9, pp. 2674–2684, 2009.
- [22] Shabani, M., Jalali Arani, A. and Ramezani Dakhel, H., "The Effect of Leather Fiber upon Vulcanization Characteristics and Physical-Mechanical Properties of Elastomeric Compounds," In Persian, *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, Vol. 20, No.4, pp. 391-397, 2007.
- [23] Cheremisinoff, N.P., "Advanced polymer processing operations," University Press of Mississippi, Vol. 2, No.1, pp.39-68, 1998.
- [24] Roh, E. K., Oh, K. W. and Kim, S. H., "Effect of raising cycles on mechanical, comfort, and hand properties of artificial suede," *Textile Research Journal*, Vol. 84, No. 18, pp. 1995–2005, 2014.
- [25] Rybachuk, G. V., Kozlova, I. I., Mozzhukhin, V. B. and Guzeev, V. V., "PVC plastisols: Preparation, properties, and application," *Polymer Science Series C*, Vol. 49, No. 1, pp. 6–12, 2007.
- [26] ASTM-D638, "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics 1," American Society for Testing and Materials, No. January 2004, pp. 1–15, 2006.