

Effect of Solid Epoxy Resin on Properties of an Epoxy/Glass Prepreg

Iman Gholipour, Iraj Amiri Amraei, Hassan Fattahi*, Mehrzad Mortezaei

Department of Polymer Engineering, Composite Research Institute, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

Received: 12 September 2021, Accepted: 8 January 2022

ABSTRACT

Hypothesis: The desirable tack and viscosity in prepregs are mostly obtained by pre-curing, but the main problem with this method is the decremental storage life of prepreg because of the ongoing curing reaction. One of the appropriate strategies to overcome this problem is to eliminate the pre-curing stage in the prepreg process and achieve the appropriate viscosity through epoxy formulations with different molecular weights. With this method, it is possible to obtain a prepreg with single-stage curability and longer storage life.

Methods: By using low molecular weight epoxy resin (Epon828) and solid epoxy resin with high molecular weight (Ker3003) in the presence of MEK as solvent, DICY as curing agent and diuron as accelerator, two types of formulations including 3S7L (30% (wt) Ker3003 and 70% (wt) Epon828) and 4S6L (40% (wt) Ker3003 and 60% (wt) Epon828) were designed. Based on the obtained formulations, prepregs were manufactured and then cured to obtain the final composites. Different characterization techniques including FTIR, DSC, DMTA, ILSS, tensile strength, viscosity and drapability were used to determine the properties of formulated resins, prepregs and composites.

Results: Appropriate prepregs were obtained based on the designed resin formulations without pre-curing stage. The results showed that the curing initiation temperatures of the formulated resins were about 15°C higher than that of Epon828 epoxy resin. The 4S6L formulation maintains the desired tack and viscosity of the prepreg up to 45°C. ILSS for composites based on 3S7L formulation was about 14% and 11% higher than the values obtained for composites based 4S6L and Epon828 resins, respectively. Flexural rigidity as representative of the drapability of the prepregs was obtained 3230 and 3460 $\mu\text{J}/\text{m}$, respectively. For prepregs based on 3S7L and 4S6L formulations, there is an indication of high drapability of the prepregs based on designed formulations.

Keywords:

epoxy prepreg,
pre-curing,
composite,
solid epoxy resin,
tack

(*)To whom correspondence should be addressed.

E-mail: Fattahi@mut.ac.ir

Please cite this article using:

Gholipour I, Amiri Amraei I, Fattahi H., Mortezaei M., Effect of Solid Epoxy Resin on Properties of an Epoxy/Glass Prepreg, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, 34, 485-497, 2022.

اثر رزین اپوکسی جامد بر خواص پیش‌آغشته اپوکسی-شیشه

ایمان قلی‌پور، ایرج امیری امرائی، حسن فتاحی*، مهرزاد مرتضایی

تهران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، پژوهشکده مهندسی کامپوزیت، گروه مهندسی پلیمر،

صندوق پستی ۱۷۷۴-۱۵۸۷۵

دریافت: ۱۴۰۰/۶/۲۱، پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۸

دسترس پذیر در نشانی: <http://jips.ippi.ac.ir>

مجله علوم و تکنولوژی پلیمر،

سال سی و چهارم، شماره ۵،

صفحه ۴۹۷-۴۸۵، ۱۴۰۰

ISSN: 1016-3255

Online ISSN: 2008-0883

DOI: 10.22063/JIPST.2021.2994-2097

چکیده

فرضیه: دستیابی به گران‌روی و چسبناکی مطلوب در پیش‌آغشته‌های بر پایه رزین‌های اپوکسی به‌طور عمده با روش پیش‌پخت انجام می‌شود. اما، مشکل اصلی این روش، کاهش زمان انبارداری پیش‌آغشته به‌دلیل پیشرفت واکنش است. یکی از راهکارهای مناسب برای غلبه بر این مشکل، حذف مرحله پیش‌پخت در فرایند پیش‌آغشته‌سازی و دستیابی به گران‌روی مناسب به‌کمک فرمول‌بندی رزین‌های اپوکسی با وزن‌های مولکولی مختلف است. با این روش، امکان رسیدن به پیش‌آغشته‌ای با قابلیت پخت تک‌مرحله‌ای و زمان انبارداری طولانی‌تر مهیا می‌شود.

روش‌ها: با استفاده از رزین اپوکسی مایع با وزن مولکولی کم (Epon828) و رزین اپوکسی جامد با وزن مولکولی زیاد (Ker3003) در مجاورت حلال متیل اتیل کتون (MEK)، عامل پخت دی‌سیان‌دی‌آمید (DICY) و عامل شتاب‌دهنده دیوران (Diuron)، دو نوع فرمول‌بندی 3S7L (دارای wt % ۳۰ رزین Ker3003 و wt % ۷۰ رزین Epon828) و 4S6L (دارای wt % ۴۰ رزین Ker3003 و wt % ۶۰ رزین Epon828) طراحی شدند. بر اساس فرمول‌بندی‌های به‌دست‌آمده، پیش‌آغشته‌ها تهیه و سپس به کامپوزیت نهایی پخت شدند. آزمون‌های مختلفی همچون طیف‌نمایی زیرقرمز تبدیل فوریه (FTIR)، گرماسنجی پویایی تفاضلی (DSC)، تجزیه دینامیکی- مکانیکی گرمایی (DMTA)، استحکام برشی بین‌لایه‌ای (ILSS)، استحکام کششی، چسبناکی و قابلیت شکل‌پذیری برای تعیین خواص رزین‌های فرمول‌بندی‌شده، پیش‌آغشته‌ها و کامپوزیت‌ها به‌کار گرفته شدند.

یافته‌ها: بر پایه فرمول‌بندی‌های طراحی‌شده، پیش‌آغشته‌های با خواص مطلوب بدون نیاز به مرحله پیش‌پخت به‌دست آمدند. نتایج نشان داد، دمای شروع پخت رزین‌های فرمول‌بندی‌شده نسبت به رزین اپوکسی Epon828، حدود 15°C بیشتر است. فرمول‌بندی 4S6L چسبناکی و گرانروی مطلوب برای پیش‌آغشته را تا دمای 45°C حفظ می‌کند. فرمول‌بندی 3S7L به‌ترتیب حدود ۱۴٪ و ۱۱٪ از نظر خواص استحکام برشی بین‌لایه‌ای نسبت به فرمول‌بندی 4S6L و Epon828 بیشتر است. سفتی خمشی برای پیش‌آغشته‌های ساخته‌شده بر اساس فرمول‌بندی‌های 3S7L و 4S6L به‌ترتیب برابر 3230 و $3460 \mu\text{J/m}$ به‌دست آمد که حاکی از قابلیت زیاد شکل‌پذیری هر دو فرمول‌بندی است.

واژه‌های کلیدی

پیش‌آغشته اپوکسی،

پیش‌پخت،

کامپوزیت،

رزین اپوکسی جامد،

چسبناکی

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

Fattahi@mut.ac.ir

مقدمه

یکی از مهم‌ترین مواد اولیه در ساخت کامپوزیت‌های ماتریس پلیمری، پیش‌آغشته‌ها هستند [۱]. پیش‌آغشته‌ها برتری‌های همچون آسانی استفاده [۲]، کنترل مقدار رزین [۳،۴]، کنترل ضخامت لایه‌ها [۵]، تمیزی فرایند، تکرارپذیری و باکیفیتی [۶،۷] را دارند. پیش‌آغشته‌ها در زمینه‌های گسترده‌ای در هوافضا [۸]، صنایع الکتریکی [۹]، توربین‌های بادی [۱۰]، صنایع خودرو [۱۱] و کالاهای ورزشی [۱۳،۱۲] به کار گرفته می‌شوند. پیش‌آغشته‌ها با دو فرایند اصلی حلالی و مذاب [۱۶-۱۴] تولید می‌شوند.

خواص پیش‌آغشته‌های تولیدشده با استفاده از فرمول‌بندی‌های مختلف به کمک عواملی همچون درصد پیش‌پخت، چسبناکی، مقدار رزین و قابلیت شکل‌پذیری کنترل می‌شود [۱۹-۱۷]. کنترل درصد پیش‌پخت یکی از مهم‌ترین نکاتی است که در ساخت پیش‌آغشته باید مورد توجه قرار گیرد، زیرا اگر مقدار درصد پیش‌پخت افزایش یابد، موجب کاهش چسبناکی، کاهش قابلیت شکل‌پذیری و نیز از بین رفتن کارایی پیش‌آغشته به دلیل ادامه واکنش فعال‌شده در مرحله پیش‌پخت می‌شود [۲۲-۲۰]. راهکارهای مختلفی برای کنترل مقدار پیش‌پخت استفاده شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به استفاده از عوامل پخت تأخیری [۲۵-۲۲] و عوامل پخت دوگانه [۲۸-۲۶] اشاره کرد.

استفاده از عامل پخت تأخیری-گرمایی در تولید پیش‌آغشته‌ها به منظور افزایش زمان انبارداری و ارائه فرمول‌بندی تک‌جزئی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. زیرا، هنگامی که یک عامل پخت معمولی (مثل انیدریدها و آمین نوع سوم) با رزین اپوکسی مخلوط می‌شود، حتی اگر آمیزه برای پخت کامل به گرما نیاز داشته باشد، باز نیز واکنش پخت در دمای محیط شروع می‌شود. دی‌سیان‌دی‌آمید (DICY) یکی از عوامل تأخیری دارای هیدروژن فعال در ساخت پیش‌آغشته است. انتخاب این نوع عامل پخت به دلیل دمای پخت زیاد آن و عمر مفید یا زمان بهره‌برداری با توجه به شرایط به‌کارگیری است [۲۵]. از عیب‌های اساسی این عامل پخت در تهیه پیش‌آغشته‌ها، فعال‌بودن واکنش در مرحله پیش‌پخت در مجاورت شتاب‌دهنده و کاهش زمان انبارداری و ایجاد ضایعات صنعتی است.

یکی از پژوهش‌هایی که اخیراً انجام شده استفاده از سامانه پخت دوگانه است که در این پژوهش از عامل پخت دی‌اتیلن تری‌آمین (DETA) به عنوان عامل پیش‌پخت در دمای محیط و از DICY/Diuron به عنوان عامل پخت نهایی استفاده شد [۲۸]. در این فرمول‌بندی، امکان کنترل خواص پیش‌آغشته مانند چسبناکی و قابلیت شکل‌پذیری بر اساس کنترل درصد پیش‌پخت وجود دارد. با وجود این، به دلیل

گرمای تولیدشده در مرحله پیش‌پخت، تا حدودی امکان فعال‌شدن عامل پخت مرحله دوم و مشکلات ناشی از آن وجود دارد. بنابراین، به نظر می‌رسد، حذف مرحله پیش‌پخت، ایده‌آل‌ترین راهکار در تهیه پیش‌آغشته و اجتناب از مشکلات انبارداری، از بین رفتن خواص و هدررفت مواد باشد.

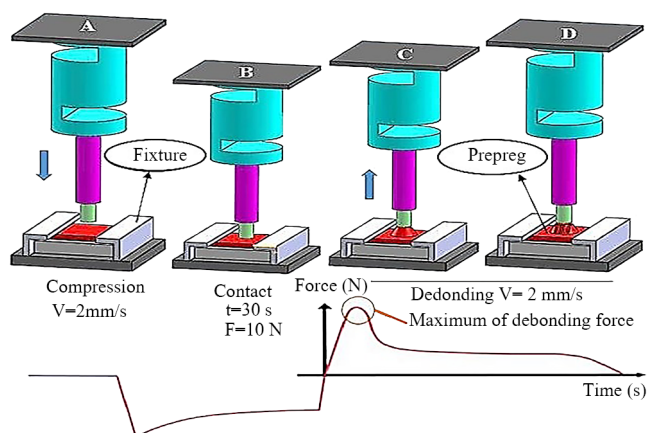
استفاده از ترکیب رزین‌های اپوکسی در طراحی فرمول‌بندی و بهره‌گیری از ویژگی‌های هر یک از اجزا برای کنترل برخی خواص ویژه، مورد توجه قرار گرفته است [۳۳-۲۹]. Poynton [۳۲] فرمول‌بندی را ارائه کرد که مشکل واکنش‌پذیری و گران‌روی زیاد رزین‌های اپوکسی تتراگلیسیدیل دی‌آمینودی‌فنیل متان (TGDDM) و تری‌گلیسیدیل پارا‌آمینوفنول (TGPAP) را با استفاده از ترکیب بهینه از رزین اپوکسی دی‌گلیسیدیل اتر بیس فنول F (DGEBF)، برطرف کرد. Cleaver و Suffok [۳۳] از فرمول‌بندی سه نوع رزین اپوکسی که شامل رزین اپوکسی چندعاملی، رزین اپوکسی جامد بر پایه بیس فنول A و رزین فنولی بود، برای بهبود عملکرد پیش‌آغشته اپوکسی استفاده کردند که سبب تثبیت دمای انتقال شیشه‌ای، جذب رطوبت کمتر و اتصال پیش‌آغشته به فلز شد.

با توجه به پژوهش‌های گذشته درباره ترکیب رزین‌های اپوکسی در کنترل خواص مدنظر، ایده طراحی فرمول‌بندی رزین‌های اپوکسی با وزن‌های مولکولی مختلف برای کنترل گران‌روی ارائه شد. در فرمول‌بندی‌های بدون پیش‌پخت، وزن مولکولی رزین استفاده‌شده از عوامل بسیار مؤثر در دست‌یابی به پیش‌پخت در دمای محیط است. افزایش وزن مولکولی رفتاری مشابه با افزایش درصد پیش‌پخت، اما از نوع درهم‌گیری‌های فیزیکی را ایجاد می‌کند. زمانی که رزین جامد به یک رزین مایع افزوده می‌شود، تعداد درهم‌گیری‌ها را افزایش می‌دهد و سبب افزایش گران‌روی رزین مایع می‌شود. بنابراین، هدف این پژوهش رسیدن به فرمول‌بندی از ترکیب دو نوع رزین اپوکسی با وزن‌های مولکولی مختلف است تا بتواند خواص پیش‌آغشته مطلوبی را بدون مرحله پیش‌پخت مهیا کند. با حذف مرحله پیش‌پخت در فرایند تولید پیش‌آغشته، می‌توان از مشکلات ناشی از این مرحله شامل پیشرفت ناخواسته واکنش پخت، کاهش زمان انبارداری، کاهش کارایی پیش‌آغشته و نیز ضایعات صنعتی جلوگیری کرد.

تجربی

مواد

رزین‌های اپوکسی با کد تجاری EPON828، چگالی $1/2 \text{ g/cm}^3$ و

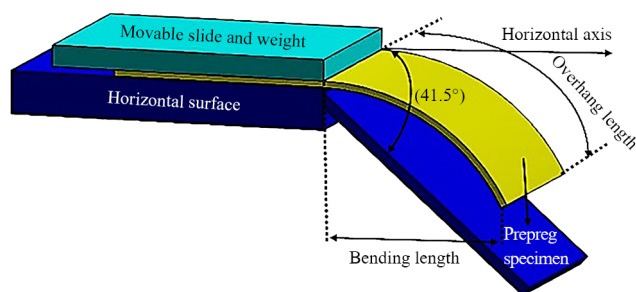


شکل ۱- طرح کلی روش آزمون چسبناکی به کمک کاوند.

Fig. 1. Scheme of probe tack test method.

سپس، در مرحله تماس، این نیرو به مدت ۳۰ s روی سطح پیش آغشته نگه داشته می شود تا خزش کامل شده و کاهش نیرو تقریباً همگرا شود. در مرحله سوم (جدایش)، کاوند با سرعت ۲ mm/min به سمت بالا حرکت کرده و بیشینه نیروی ممانعت کننده از جدایش به عنوان چسبناکی گزارش می شود.

قابلیت شکل پذیری به عنوان معیاری از قابلیت قرارگیری پیش آغشته روی سطح قالب، طبق استاندارد ASTM D1388-18 و مطابق شکل ۲ انجام شد. به طور خلاصه، برای انجام این آزمون، نوار پیش آغشته با ابعاد ۲۵ mm × ۲۵۰ mm در جهت لیاف برش داده می شود. نمونه از یک انتها نگه داشته شده و به اندازه ۱۳۰ mm در جهت طول اجازه دارد، خم شود و به صفحه دیگر دستگاه برخورد کند که زاویه $41/5^\circ$ با محور افقی دارد. زمانی که نمونه زاویه $41/5^\circ$ با محور افقی را می سازد، طول افتادگی اندازه گیری می شود. بر اساس طول اندازه گیری شده، طول خمش و سفتی خمشی ظاهری پیش آغشته به ترتیب از معادله های (۱) و (۲) اندازه گیری می شود:



شکل ۲- طرح کلی روش اندازه گیری صلبیت خمشی پیش آغشته.

Fig. 2. The schematic of prepreg flexural rigidity measurement method.

وزن هم ارز ۱۸۳-۱۸۸ g/mol از شرکت مهندسی مواد مکرر ایران و رزین اپوکسی با کد تجاری KER3003، چگالی $1/22 \text{ g/cm}^3$ و وزن هم ارز ۷۹۴-۷۰۴ g/mol از شرکت Kumha کره جنوبی خریداری شدند. دی سیان دی آمید (DICY) به عنوان عامل پخت و دیوران (Diuron) به عنوان عامل شتاب دهنده از شرکت Sigma-Aldrich تهیه شد. حلال متیل اتیل کتون (MEK) از شرکت Merck خریداری شده و برای ساخت پیش آغشته، از پارچه شیشه بافته شده از نوع ساتین با وزن 300 g/m^2 از شرکت Colan استرالیا استفاده شد.

دستگاه ها

در این پژوهش، برای مخلوط کردن رزین های اپوکسی، عوامل پخت و شتاب دهنده از همزن مکانیکی مدل RW 20 digital ساخت IKA آلمان استفاده شد. برای ساخت نمونه های آزمون کشش و از بین بردن حباب های ایجاد شده به واسطه اختلاط، از پمپ خلأ و برای ساخت کامپوزیت از دستگاه پرس گرم مدل P E 200 ساخت شرکت COLLIN آلمان استفاده شد. گران روی رزین ها با گران روی سنج چرخشی مدل RV-2T ساخت شرکت Brookfield آمریکا طبق استاندارد ASTM D 2196 و اسپیندل شماره ۶ تعیین شد.

گرماسنج پویشی تفاضلی (DSC) مدل 200F3 ساخت شرکت NETZSCH آلمان با سرعت گرمادهی $10^\circ\text{C}/\text{min}$ از دمای 25°C تا 250°C برای انجام آزمون های گرماسنجی پویشی تفاضلی روی آمیزه های مختلف به کار گرفته شد. برای بررسی واکنش پخت رزین فرمول بندی شده، از طیف سنج زیرقرمز تبدیل فوریه (FTIR) مدل NICOLET 800 ساخت شرکت Thermo Fisher Scientific آمریکا در محدوده عدد موجی 400 cm^{-1} تا 4000 cm^{-1} استفاده شد. بررسی خواص مکانیکی، با دستگاه آزمون خواص مکانیکی مدل SANTAM 4.2 ساخت شرکت سنتام ایران مطابق استاندارد ASTM D 638 انجام شد. تجزیه دینامیکی-مکانیکی گرمایی (DMTA) طبق استاندارد ASTM D1161 و به وسیله دستگاه DMTA مدل 8000 ساخت شرکت Perkin Elmer آمریکا انجام شد. آزمون استحکام برشی بین لایه ای (interlaminar shear strength, ILSS) کامپوزیت طبق استاندارد ASTM D 2344 با دستگاه ساخته شده در دانشگاه صنعتی مالک اشتر انجام شد.

با توجه به نبود روش ثابت استاندارد جهانی برای تعیین مقدار چسبناکی پیش آغشته، در این پژوهش با توجه به شباهت بسیار زیاد روش آزمون به کمک کاوند با روش سنتی سنجش چسبناکی، از دستگاه Probe دانشگاه صنعتی مالک اشتر استفاده شد. کاوند استفاده شده در این آزمون با قطر ۸ mm بوده که مطابق شکل ۱ در مرحله اول (فشار)، ۱۰ N نیرو را به سطح پیش آغشته اعمال می کند.

تهیه کامپوزیت

برای ساخت کامپوزیت و تعیین آزمون استحکام برشی بین‌لایه‌ای، ابتدا لایه‌چینی پیش‌آغشته روی صفحه فلزی پوشش‌یافته با ورقه تفلون انجام شد. سپس برای پخت، پیش‌آغشته به مدت ۲ h تحت دمای ۱۴۰°C و فشار ۸ bar قرار گرفت.

نتایج و بحث

بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی رزین‌های فرمول‌بندی شده

گران‌روی سنجی

یکی از عامل‌های اساسی در دست‌یابی به پیش‌آغشته‌ای مطلوب، آغشته‌سازی مناسب تقویت‌کننده با رزین است. زیرا، با نفوذ مناسب رزین به درون تقویت‌کننده در این مرحله، انتقال تنش از ماتریس به تقویت‌کننده در کامپوزیت نهایی به‌خوبی اتفاق می‌افتد و باعث خواص مکانیکی بهتر کامپوزیت می‌شود. یکی از مهم‌ترین عوامل در کنترل کیفیت آغشته‌سازی، گران‌روی رزین است که لازم است، حتماً در محدوده مناسبی باشد. زیرا، گران‌روی زیاد به آغشته‌سازی نامناسب و گران‌روی خیلی کم و در نتیجه جریان‌یافتگی رزین و دست‌نیافتن به مقدار رزین مناسب منجر می‌شود.

برای ارزیابی قابلیت استفاده از فرمول‌بندی‌ها در تهیه پیش‌آغشته در دماهای مختلف، گران‌روی مربوط به دو فرمول‌بندی انتخاب شده (3S7L و 4S6L) در دو دمای ۳۰°C و ۴۵°C اندازه‌گیری شد تا تغییرات گران‌روی و عملکردی پیش‌آغشته‌های تولیدشده با استفاده از این فرمول‌بندی نسبت به رزین خالص Epon 828 مشخص شود. در شکل ۳ دیده می‌شود، در دمای ۳۰°C به دلیل بیشتر بودن درصد رزین اپوکسی با وزن مولکولی زیاد (KER3003) و ایجاد درهم‌گیری‌های فیزیکی در فرمول‌بندی 4S6L، گران‌روی نسبت به فرمول‌بندی‌های 3S7L و رزین خالص Epon 828 بیشتر است. با افزایش دما تا ۴۵°C، گران‌روی فرمول‌بندی 4S6L تا ۱۸۶۲۰ cP کاهش می‌یابد. با افزایش دما از ۳۰°C تا ۴۵°C، همچنان مقدار گران‌روی و چسبناکی

$$C = \frac{O}{2} \quad (1)$$

$$G = 1.421 \times 10^{-5} \times W \times C^3 \quad (2)$$

در این معادله‌ها، C طول خمش (mm)، O طول افتادگی (mm)، G سفتی خمشی ظاهری (μJ/m) و W وزن پارچه به‌ازای واحد سطح (g/m²) است.

روش‌ها

تهیه فرمول‌بندی

برای دست‌یابی به فرمول‌بندی مطلوب با استفاده از ترکیب دو نوع رزین اپوکسی با وزن مولکولی کم (Epon 828) و زیاد (KER3003) در ساخت پیش‌آغشته بدون واکنش پیش‌پخت، ترکیب درصدی‌های مختلفی از این رزین‌ها از نظر خواص چسبناکی و گران‌روی، ارزیابی اولیه شدند. در نهایت، فرمول‌بندی‌های نشان داده‌شده در جدول ۱ برای تعیین خواص، آزمایش و بررسی شدند. برای آماده‌سازی فرمول‌بندی‌ها، ابتدا رزین اپوکسی جامد در حلال MEK حل شده و سپس رزین اپوکسی مایع اضافه شد. پس از اختلاط کامل رزین‌ها، عامل پخت DICY اضافه شد. اختلاط کامل، به‌کمک همزن مکانیکی با سرعت ۱۳۰۰ rpm به مدت ۴ h انجام شد. در مرحله آخر، عامل شتاب‌دهنده دیوران افزوده شد و به مدت ۱ h اختلاط با همزن مکانیکی ادامه یافت. جزئیات درصد واکنش‌دهنده‌ها، برای تهیه فرمول‌بندی‌ها در جدول ۱ آمده است.

تهیه پیش‌آغشته با استفاده از فرمول‌بندی‌ها

برای تهیه پیش‌آغشته، پارچه شیشه بافته‌شده از نوع ساتین به‌کمک قلم‌مو با رزین‌های فرمول‌بندی‌شده آغشته شد. سپس، پارچه آغشته‌شده از بین دو غلتک برای دست‌یابی به مقدار رزین ۴۰٪ عبور داده شده و برای تبخیر حلال موجود در فرمول‌بندی گرما داده شد و در انتها بین فیلم پلی‌اتیلنی قرار گرفت.

جدول ۱- کدگذاری نمونه‌ها و مقدار واکنش‌دهنده‌ها برای هر نمونه.

Table 1. Samples coding and the amounts of reactants for each sample.

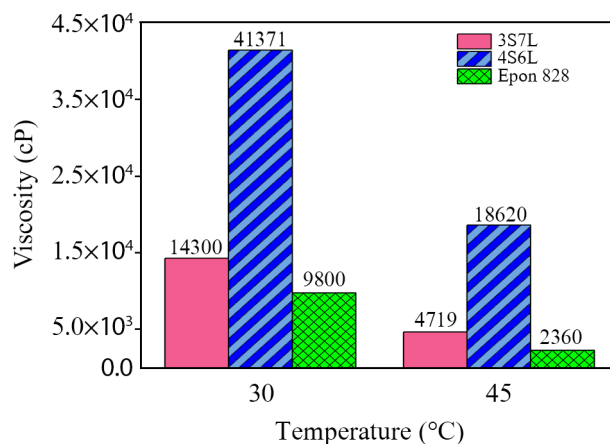
Sample	EPON 828 (%)	KER 3003 (%)	DICY (%)	Diuron (%)	MEK (%)
3S7L	70	30	4	2	9.5
4S6L	60	40	4	2	9.5
Epon 828	100	-	4	2	-

پخت DICY و شتاب دهنده دیوران، از فرمول بندی‌ها آزمون DSC گرفته شد (شکل ۴). دماهای آغاز، پیک و پایان پخت مربوط به دو فرمول بندی 3S7L و 4S6L در جدول ۲ آمده است. مطابق نتایج شکل ۴، از مقایسه داده‌های به دست آمده از فرمول بندی‌های 3S7L و 4S6L با داده‌های رزین خالص Epon 828 که پیش تر گزارش شده بود [۳۴]، مشخص شد، دمای شروع و پیک پخت فرمول بندی‌های 3S7L و 4S6L به ترتیب ۱۶ و ۶/۵°C نسبت به Epon 828 بیشتر هستند که این به دلیل وجود رزین اپوکسی با وزن مولکولی زیاد در این فرمول بندی‌هاست. رزین اپوکسی با وزن مولکولی زیاد موجب تفاوت فاصله گروه‌های اپوکسید و در پی آن کاهش احتمال واکنش گروه‌های اپوکسید با عامل پخت را به وجود می‌آورد. از طرفی وزن مولکولی زیاد در فرمول بندی‌های 3S7L و 4S6L، سبب کاهش تحرک زنجیرها می‌شود که افزایش تحرک آن‌ها و شروع واکنش پخت، نیازمند دمای بیشتر نسبت به رزین خالص Epon 828 است. افزایش ۶/۵°C دمای پیک پخت فرمول بندی‌های 3S7L و 4S6L نیز به دلیل شروع پخت این فرمول بندی‌ها در دمای بیشتر نسبت به رزین خالص Epon 828 است. بنابراین، با توجه به اختلاف دمای نه چندان زیاد (۶/۵°C) در دمای پیک پخت فرمول بندی‌ها نسبت به رزین Epon 828، می‌توان گفت، این فرمول بندی‌ها تغییر زیادی در دمای پیک پخت نسبت به یکدیگر ندارند. در این فرمول بندی‌ها فقط دمای شروع واکنش پخت به دمای بیشتر جابه‌جا شده است که با توجه به درصد بیشتر واکنش پخت در پیک، می‌توان از این فرمول بندی‌ها با قابلیت زمان انبارداری بیشتر نسبت به رزین خالص Epon 828 استفاده کرد.

در تعیین گرمای واکنش در آزمون DSC، افزون بر واکنش‌های انجام شده درون سامانه، لازم است، اثر ساختار بر سینتیک واکنش نیز در نظر گرفته شود. بر همین اساس با توجه به نتایج نشان داده شده در جدول ۲، گرمای واکنش فرمول بندی‌های 3S7L و 4S6L با وجود کاهش گروه‌های اپوکسید نسبت به رزین Epon 828، افزایش یافته است. دلیل این افزایش می‌تواند اثر سینتیک واکنش پخت باشد. زیرا

جدول ۲- نتایج رفتار پخت رزین‌های فرمول بندی شده با DSC.
Table 2. The results of curing behavior of the formulated resins with DSC.

Sample	T _i (°C)	T _p (°C)	T _f (°C)	ΔH (J/g)
3S7L	141.8	151.1	174.9	242.2
4S6L	141.2	151.2	174.6	243.7
Epon 828	125.5	144.6	174.1	232.2



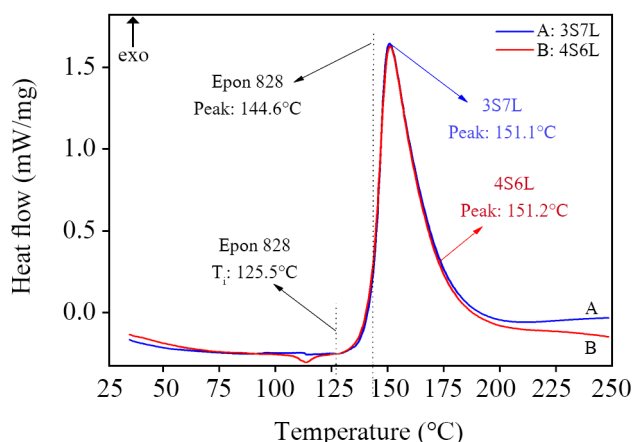
شکل ۳- گرانروی فرمول بندی‌های 3S7L، 4S6L و Epon 828 در دمای ۳۰ و ۴۵°C.

Fig. 3. The viscosity of 3S7L, 4S6L and Epon 828 formulations at 30°C and 45°C.

فرمول بندی 4S6L در شرایط مناسب کاربری است. در فرمول بندی 3S7L نیز با افزایش دما تا ۴۵°C و باز شدن درهم‌گیری‌ها، گرانروی از ۱۴۳۰۰ cP به ۴۷۱۹ cP و در رزین خالص Epon 828، گرانروی از ۹۸۰۰ cP به ۲۳۶۰ cP کاهش می‌یابد. از این رو، این مقدار از گرانروی موجب کاهش چسبناکی و استفاده نکردن از فرمول بندی 3S7L در دمای ۴۵°C می‌شود.

بررسی رفتار پخت با گرماسنجی پویایی تفاضلی (DSC)

به منظور بررسی رفتار پخت فرمول بندی‌های اپوکسی و اثر ترکیب کردن رزین‌های مختلف بر رفتار پخت، پس از افزودن عامل

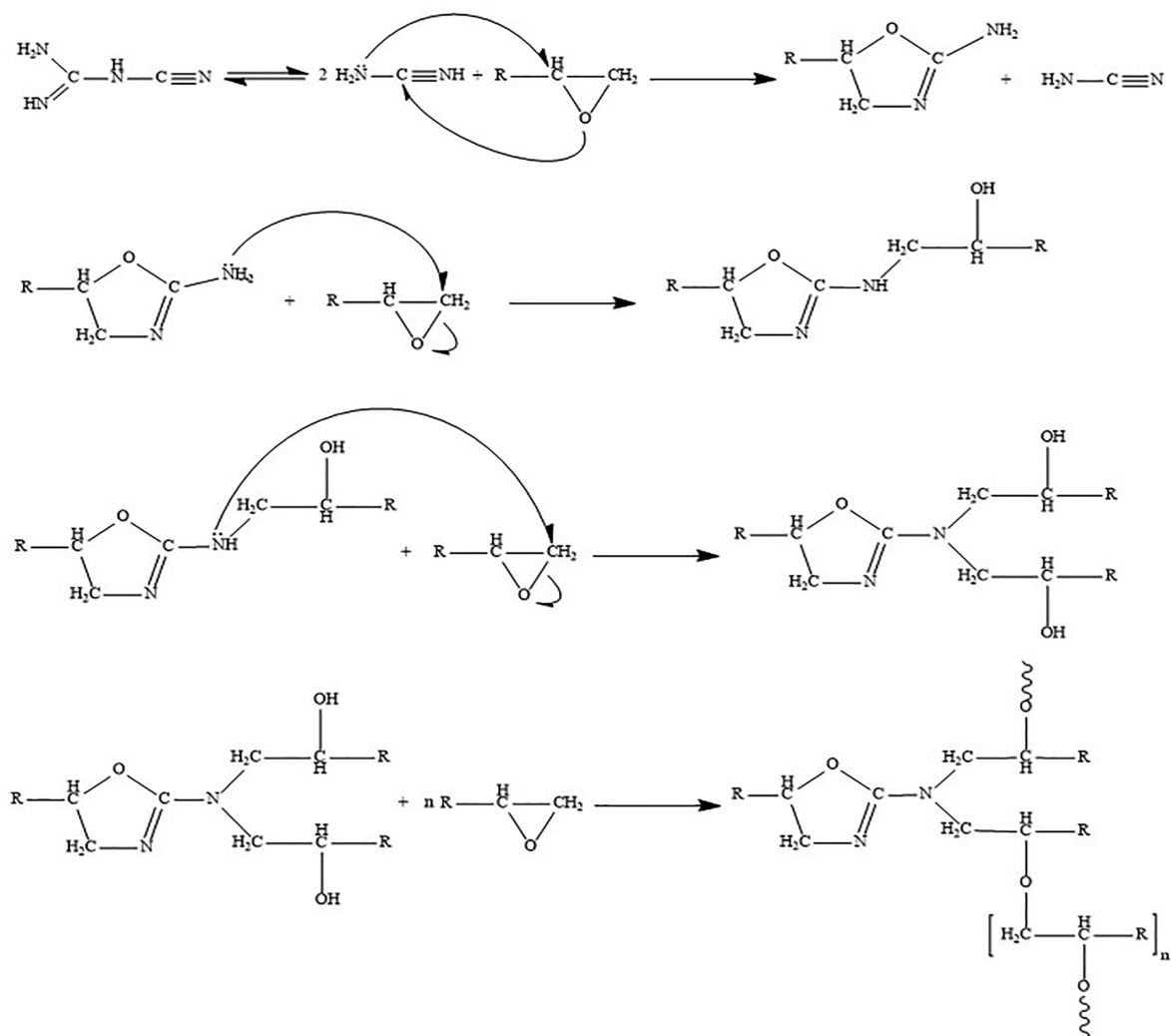


شکل ۴- منحنی‌های DSC مربوط به فرمول بندی‌های 3S7L و 4S6L.
Fig. 4. DSC curves of 3S7L and 4S6L formulations.

طیف‌نمایی زیرقرمز تبدیل فوریه (FTIR)

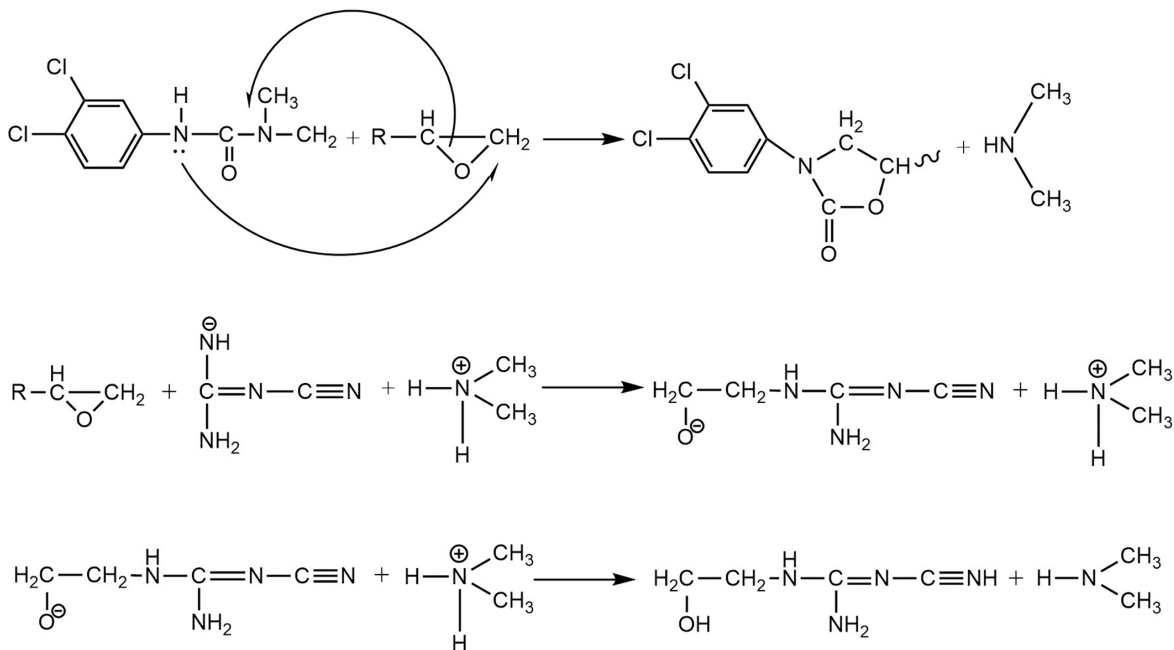
سازوکار شناخته‌شده برای پخت رزین اپوکسی با سامانه DICY/Diuron در طرح‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است [۳۵،۳۶]. مطابق طرح ۱ که مراحل واکنش بین رزین اپوکسی و DICY است، به‌طور مستقیم با اپوکسی وارد واکنش می‌شود و ۲-آمینوآکسازولین را تولید می‌کند. این ماده دارای یک آمین نوع اول است که قابلیت واکنش با دو گروه اپوکسید را دارد. ماده ایجادشده با دو انتهای گروه اپوکسید می‌تواند با n مولکول اپوکسی واکنش دهد و باعث پخت اپوکسی شود. در سازوکار طرح ۲، دیوران به‌طور مستقیم با گروه اپوکسید وارد واکنش شده و سبب آزاد شدن ۲-آکسازولیدون و دی‌متیل آمین می‌شود. در مرحله بعد، دی‌متیل آمین از راه واکنش با DICY موجب فعال‌سازی آن و مشارکت در واکنش پخت اپوکسی می‌شود. به‌منظور بررسی تکمیل شدن فرایند پخت، نمونه 4S6L پیش و پس

با افزایش در وزن مولکولی و گرانروی، تحرک زنجیرها کاهش و انتقال سینتیک واکنش پخت به‌شکل نفوذ کنترل انجام می‌شود. بنابراین، با توجه به سینتیک واکنش به‌شکل نفوذ کنترل و آهستگی واکنش پخت، نمودار گرمای آزادشده فرمول‌بندی‌های 3S7L و 4S6L، کمی به‌شکل پهن‌تری در مقایسه با رزین Epon 828 اتفاق می‌افتد. این موضوع موجب افزایش گرمای آزادشده در فرمول‌بندی‌های 3S7L و 4S6L نسبت به رزین Epon 828 می‌شود. گرمای آزادشده فرمول‌بندی 4S6L نسبت به فرمول‌بندی 3S7L کمی بیشتر است که این می‌تواند به‌دلیل اثر کاهش تحرک زنجیر و پدیده نفوذ کنترل در فرمول‌بندی 4S6L باشد. همچنین، تفاوت اندک گرمای آزادشده در این دو فرمول‌بندی می‌تواند به تفاوت غلظت ناچیز ۱۰٪ رزین اپوکسی KER3003 در آزمون DSC مربوط باشد.



طرح ۱- سازوکار پخت رزین اپوکسی با DICY.

Scheme 1. Epoxy resin curing mechanism by DICY.



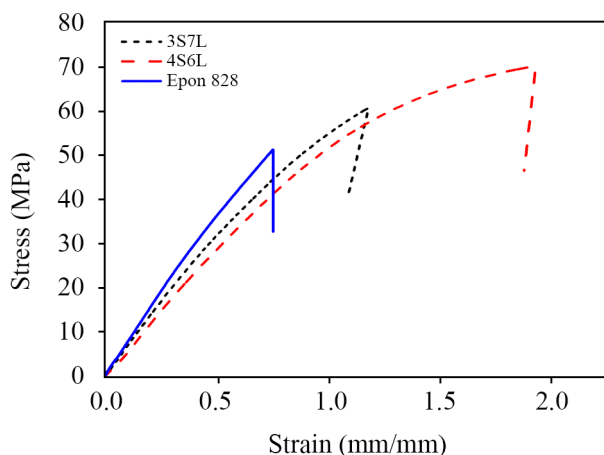
طرح ۲- سازوکار پخت رزین اپوکسی با عامل پخت DICY در مجاورت شتاب دهنده دیوران.

Scheme 2. Epoxy resin curing mechanism by DICY curing agent in the presence of Diuron accelerator.

مشتقات ۲-اکسازولیدون مطابق سازوکار اشاره شده در طرح ۲ مربوط بوده و نشان دهنده فعال شدن دیوران حین فرایند پخت است.

آزمون کشش

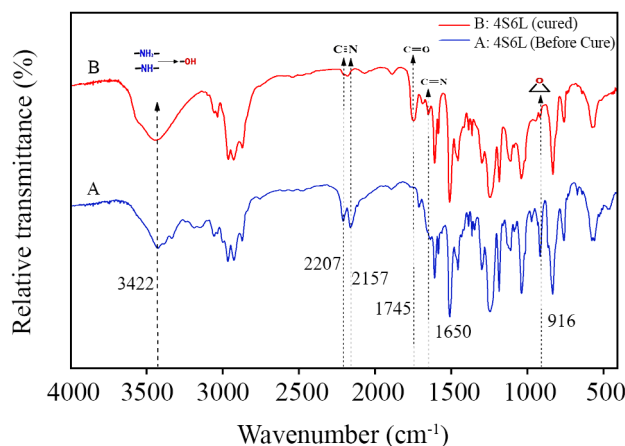
به منظور بررسی خواص مکانیکی رزین های فرمول بندی شده پس از فرایند پخت و مقایسه خواص مکانیکی آن با Epon828، از نمونه های



شکل ۶- منحنی تنش-کرنش در فرمول بندی های 3S7L، 4S6L و Epon 828.

Fig. 6. The stress - strain curve of 3S7L, 4S6L and Epon 828 formulations.

از پخت، با آزمون FTIR ارزیابی شد. مطابق شکل ۵، پیک مشخصه گروه اپوکسید موجود در 916 cm^{-1} پس از فرایند پخت، کاملاً از بین رفته که این نشانگر تکمیل فرایند پخت است. همچنین، پیک دوقلوی موجود در 2158 و 2207 cm^{-1} به یک پیک تنها در 2180 cm^{-1} تبدیل شده که حاکی از مصرف آمین های موجود در ساختار DICY، طبق سازوکار بحث شده در شکل ۵ است. همچنین، دو پیک مشخصه در 1745 و 1650 cm^{-1} به وجود آمده که به ترتیب به تشکیل گروه ایمین و



شکل ۵- ارزیابی فرایند پخت فرمول بندی 4S6L با آزمون FTIR.

Fig. 5. Evaluation of the curing process for 4S6L formulation under FTIR test.

می‌گیرد. در پژوهش حاضر، برای دست‌یابی به مقدار رزین ۴۰٪ پس از آغشته‌سازی پارچه به رزین‌های فرمول‌بندی‌شده، پیش‌آغشته از بین دو غلتک که فاصله آن به‌طور تجربی و برای دست‌یابی به مقدار رزین مدنظر تنظیم شده بود، عبور داده شد. سپس، مقدار رزین پیش‌آغشته ساخته‌شده با فرمول‌بندی‌های 3S7L، 4S6L و Epon828، از معادله (۳) تعیین شد:

$$\% \text{ Resin content} = \frac{W - F}{W} \times 100 \quad (3)$$

در این معادله، W و F به‌ترتیب وزن پارچه پیش و پس از آغشته‌سازی است. با توجه به این معادله، مقدار محتوای رزین به‌دست‌آمده برای پیش‌آغشته ساخته‌شده با فرمول‌بندی‌های 3S7L، 4S6L و Epon828 به‌ترتیب ۳۹، ۴۰ و ۴۰ بود.

سنجش مقدار شکل‌پذیری پیش‌آغشته

یکی از خواص مهم در پیش‌آغشته‌سازی، قابلیت شکل‌پذیری پیش‌آغشته تولیدشده است که با استفاده از آن، بتوان انواع مختلف سطح با هندسه و شکل متفاوت را پوشاند. برای تعیین این خاصیت، از آزمون سفتی خمشی پیش‌آغشته مطابق شکل ۲ استفاده می‌شود. با افزایش مقدار سفتی پیش‌آغشته، اصطکاک پیش‌آغشته کاهش می‌یابد که این موجب افزایش طول افتادگی و کاهش قابلیت شکل‌پذیری در پیش‌آغشته‌ها می‌شود. در پیش‌آغشته‌های ساخته‌شده با استفاده از فرمول‌بندی‌های 3S7L، 4S6L و Epon828 پیش‌پخت‌شده در محدوده ۳۰٪، صلبیت خمشی در دمای محیط (۲۵°C) به‌ترتیب برابر ۳۲۳۰، ۳۴۶۰ و ۳۱۸۰ $\mu\text{J}/\text{m}$ است. با توجه به جدول ۴، افزایش صلبیت خمشی در فرمول‌بندی‌های 3S7L و 4S6L نسبت به Epon828 به‌دلیل وجود رزین اپوکسی با وزن مولکولی زیاد که معادل افزایش درصد پیش‌پخت بدون واکنش شیمیایی است، سبب افزایش در درهم‌گیری‌های فیزیکی، گران‌روی، طول افتادگی، کاهش اصطکاک و در نتیجه افزایش صلبیت خمشی پیش‌آغشته ساخته‌شده با استفاده از این فرمول‌بندی‌ها شده است. بنابراین، صلبیت خمشی پیش‌آغشته‌های بر پایه فرمول‌بندی‌های 3S7L و 4S6L نسبت به Epon828 پیش‌پخت‌شده در محدوده ۳۰٪، افزایش نشان می‌دهد. این افزایش مقادیر صلبیت خمشی، قابلیت شکل‌پذیری پیش‌آغشته‌ها را خیلی تحت تأثیر قرار نداده و هر دو فرمول‌بندی 3S7L و 4S6L قابلیت شکل‌پذیری مناسبی برای لایه‌چینی و پوشاندن سطوح با هندسه متفاوت را نشان می‌دهند.

جدول ۳- نتایج آزمون کشش برای فرمول‌بندی 3S7L، 4S6L و Epon 828

Table 3. Results of tensile test for 3S7L, 4S6L and Epon 828 formulation.

Sample	Tensile Modulus (GPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation at break (%)
3S7L	3.5 ± 0.17	61 ± 3.24	2.3 ± 0.29
4S6L	2.76 ± 0.09	71 ± 2.81	3.9 ± 0.18
Epon 828	3.69 ± 0.11	51.4 ± 3.02	1.51 ± 0.26

پخت‌شده آزمون کشش به‌عمل آمد. شکل ۶ نتایج آزمون کشش انجام‌شده برای سه نمونه 3S7L، 4S6L و Epon 828 را نشان می‌دهد. در جدول ۳ اطلاعات به‌دست‌آمده درباره مدول کششی، استحکام کششی و افزایش طول تا پارگی سه نمونه آمده است. شکل ۶ نشان می‌دهد، با افزایش مقدار رزین با وزن مولکولی زیاد در فرمول‌بندی، افزایش طول زنجیرها، کاهش گروه‌های اپوکسید در فرمول‌بندی و افزایش فاصله گروه‌های عاملی حین پخت، سبب افزایش متوسط طول اتصال‌های عرضی در رزین فرمول‌بندی‌شده می‌شود. افزایش ۱۴٪ استحکام کششی نهایی در رزین 4S6L نسبت به رزین 3S7L نیز به‌دلیل انعطاف‌پذیری بیشتر زنجیر به‌واسطه افزایش متوسط طول اتصال‌های عرضی و آزادی عمل بیشتر زنجیرهای پلیمری است. مدول کششی رزین 3S7L نیز نسبت به مدول کششی رزین فرمول‌بندی‌شده 4S6L، ۲۱٪ افزایش یافته است که نشان‌دهنده شکنندگی بیشتر فرمول‌بندی 3S7L نسبت به فرمول‌بندی 4S6L است. همچنین نتایج داده‌های تنش-کرنش رزین Epon828 نشان می‌دهد، رزین‌های فرمول‌بندی‌شده 3S7L و 4S6L به‌دلیل زنجیرهای بلند رزین اپوکسی KER3003 در این فرمول‌بندی‌ها، به‌ترتیب ۱۴ و ۲۷٪ استحکام کششی نهایی بیشتری نسبت به رزین Epon828 را دارند. در مقابل، مدول کششی فرمول‌بندی‌های 3S7L و 4S6L به‌ترتیب به‌مقدار ۵ و ۲۵٪ نسبت به Epon828 کاهش نشان می‌دهد که می‌تواند به افزایش طول زنجیرها، افزایش متوسط طول اتصال‌های عرضی و در نتیجه تحرک‌پذیری بیشتر زنجیرها نسبت داده شود.

بررسی خواص پیش‌آغشته و کامپوزیت

آزمون تعیین محتوای رزین

مقدار محتوای رزین یکی از عامل‌های مهم پیش‌آغشته‌هاست. به‌طوری که با تغییر در آن، سایر خواص پیش‌آغشته مانند چسبناکی و قابلیت شکل‌پذیری و نیز خواص نهایی کامپوزیت ساخته‌شده تحت تأثیر قرار

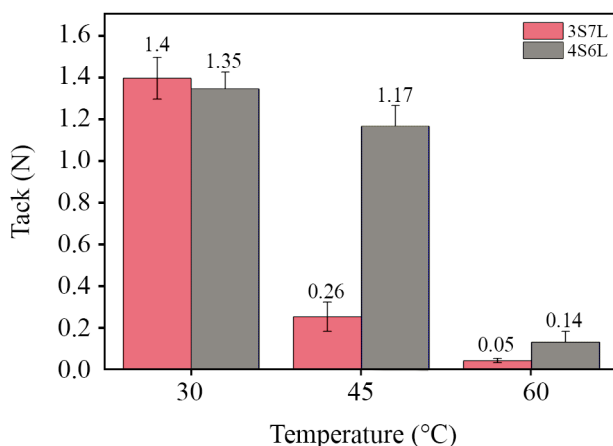
و در هم‌رفتگی زنجیرها، کاهش گرانروی به‌اندازه فرمول‌بندی 3S7L نبوده و فقط موجب کاهش ۱۳٪ چسبناکی و رسیدن آن به ۱/۱۷ N می‌شود. مقایسه مقادیر چسبناکی برای این دو پیش‌آغشته با فرمول‌بندی‌های اشاره‌شده در دمای ۴۵°C نشان می‌دهد، پیش‌آغشته بر پایه رزین 4S6L قابلیت استفاده در تولید کامپوزیت نهایی را دارد، در حالی که فرمول‌بندی 3S7L به دلیل کاهش زیاد گرانروی و چسبناکی خیلی کم، این قابلیت را ندارد.

با افزایش دما به ۶۰°C، کاهش گرانروی و بازشدن در هم‌گیری‌های فیزیکی باعث کاهش شدید چسبناکی در هر دو پیش‌آغشته بر پایه فرمول‌بندی‌های 3S7L و 4S6L و رسیدن آن به کمتر از ۰/۱۵ N می‌شود. البته این مقدار کم چسبناکی در این دما، خللی در کارایی دو فرمول‌بندی ارائه‌شده برای تهیه پیش‌آغشته ایجاد نمی‌کند، چون معمولاً دمای لایه‌چینی پیش‌آغشته‌های پلیمری همان دمای محیط است که عملاً به ۶۰°C نمی‌رسد.

با توجه به نتایج آزمون چسبناکی به‌دست‌آمده برای پیش‌آغشته‌های بر پایه دو فرمول‌بندی ارائه‌شده در دماهای مختلف، می‌توان گفت از پیش‌آغشته ساخته‌شده با فرمول‌بندی 4S6L به‌راحتی می‌توان تا دمای ۴۵°C برای لایه‌چینی استفاده کرد.

آزمون استحکام برشی بین لایه‌ای

استحکام برشی بین‌لایه‌ای (ILSS) یکی از پارامترهای بسیار اساسی در کارایی کامپوزیت‌های پلیمری است. با توجه به اینکه نوع رزین به‌کاررفته برای ساخت کامپوزیت، نقش اساسی در مقدار ILSS



شکل ۷- چسبناکی پیش‌آغشته‌های ساخته‌شده با استفاده از فرمول‌بندی‌های 3S7L و 4S6L در سه دمای ۳۰، ۴۵ و ۶۰°C.

Fig. 7. Tack of prepreps prepared by 3S7L and 4S6L formulations at 30, 45, and 60°C.

جدول ۴- صلبیت خمشی فرمول‌بندی‌های 3S7L، 4S6L و Epon 828.
Table 4. Flexural rigidity for 3S7L, 4S6L and Epon 828 formulations.

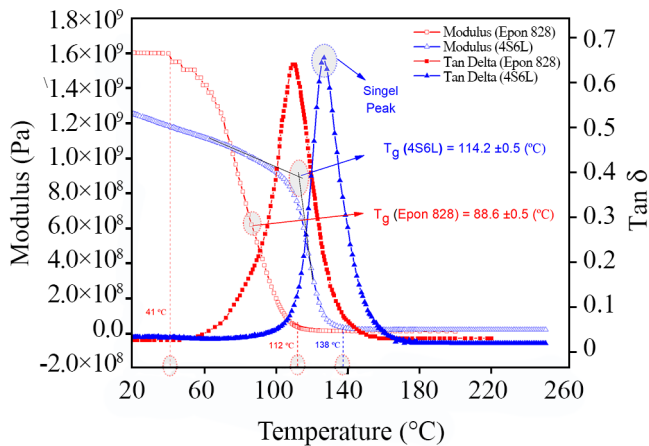
Sample	Flexural Rigidity ($\mu\text{J}/\text{m}$)
3S7L	3230 \pm 24.3
4S6L	3460 \pm 22.6
Epon 828	3180 \pm 24.9

چسبناکی

یکی از خواص مهم پیش‌آغشته‌ها چسبناکی است. چسبناکی قابلیت پیش‌آغشته برای چسبیدن به خود یا به سطوح دیگر است. چسبناکی پیش‌آغشته‌ها باید به‌گونه‌ای باشد که در زمان لایه‌چینی، به‌خوبی روی یکدیگر قرار گیرند و از مقاومت هم‌چسبی زیادی برخوردار باشد. برای تعیین مقدار چسبناکی پیش‌آغشته تهیه‌شده با استفاده از رزین‌های فرمول‌بندی‌شده، آزمون چسبناکی در سه دمای ۳۰، ۴۵ و ۶۰°C به‌کمک کاوند انجام شد. شکل ۷ نتایج اندازه‌گیری چسبناکی برای دو فرمول‌بندی 3S7L و 4S6L را در سه دمای اشاره‌شده نشان می‌دهد. مقدار چسبناکی این فرمول‌بندی‌ها، در دماهای مختلف به گرانروی رزین فرمول‌بندی‌شده بستگی دارد که گرانروی نیز به ترکیب درصد رزین‌های با وزن مولکولی مختلف وابسته است. افزایش درصد رزین با وزن مولکولی زیاد سبب افزایش در هم‌گیری‌های فیزیکی و گرانروی می‌شود و رفتاری مشابه با افزایش درصد پیش‌پخت، ایجاد می‌کند.

با توجه به شکل ۷، پیش‌آغشته‌های تولیدشده با استفاده از فرمول‌بندی 3S7L در دمای ۳۰°C، چسبناکی بیشتری نسبت به پیش‌آغشته ساخته‌شده با فرمول‌بندی 4S6L دارد، زیرا در این فرمول‌بندی، به دلیل درصد وزنی بیشتر رزین اپوکسی مایع و گرانروی کمتر آن، چسبناکی افزایش یافته است. با وجود این، اختلاف چسبناکی برای این دو فرمول‌بندی در دمای ۳۰°C اندک است و مقادیر عددی به‌دست‌آمده برای چسبناکی این فرمول‌بندی‌ها حاکی از این است که هر دو مورد برای تهیه پیش‌آغشته مناسب هستند.

با افزایش دما و رسیدن به دمای ۴۵°C، گرانروی فرمول‌بندی‌ها با بازشدن در هم‌گیری‌ها کاهش می‌یابد. در فرمول‌بندی 3S7L، مقدار گرانروی به‌حدی کاهش می‌یابد که با اعمال نیرو به‌کمک کاوند، رزین از سطح تماس کاوند با پیش‌آغشته خارج می‌شود که در پی آن موجب کاهش ۸۱٪ چسبناکی در این فرمول‌بندی می‌شود. این در حالی است که در پیش‌آغشته تولیدشده با فرمول‌بندی 4S6L با افزایش دما تا ۴۵°C، به دلیل گرانروی زیاد رزین اپوکسی جامد



شکل ۸- منحنی مدول کشسانی و $Tan\delta$ برای فرمول‌بندی 4S6L و Epon 828.

Fig. 8. Elastic modulus and $Tan\delta$ curve for 4S6L and Epon 828 formulations.

4S6L نشان می‌دهد. بر اساس این نتایج مدول کشسانی فرمول‌بندی 4S6L نسبت به رزین Epon 828 کاهش یافته است که این به دلیل وجود رزین اپوکسی با وزن مولکولی زیاد در فرمول‌بندی است. رزین اپوکسی با وزن مولکولی زیاد، موجب بی‌نظمی و ایجاد فضای آزاد درون زنجیر و در پی آن سبب کاهش مدول کشسانی فرمول‌بندی 4S6L شده است. با توجه به نمودار مدول کشسانی فرمول‌بندی‌ها در شکل ۱۰، کاهش مدول رزین Epon 828 از دمای $41^{\circ}C$ شروع و در دمای $112^{\circ}C$ پایان می‌یابد، این در حالی است که کاهش مدول در فرمول‌بندی 4S6L از دمای $23^{\circ}C$ شروع و در دمای $138^{\circ}C$ پایان می‌یابد. بنابراین، با توجه به اینکه تغییرات کاهش مدول در فرمول‌بندی 4S6L در گستره دمایی بیشتری رخ می‌دهد، می‌توان نتیجه گرفت، زمان آسایش از تنش در فرمول‌بندی 4S6L افزایش یافته است که دلیل آن وجود رزین اپوکسی با وزن مولکولی زیاد، افزایش درهم‌گیری‌های فیزیکی و بی‌نظمی موجود در زنجیرهاست. در نمودار $Tan\delta$ که از تقسیم مدول ذخیره به مدول اتلاف به دست می‌آید، با بررسی تعداد قله ظاهر شده می‌توان همگن‌بودن یا همگن‌نبودن فرمول‌بندی را تعیین کرد. در شکل ۸، نمودار $Tan\delta$ فرمول‌بندی 4S6L مشابه رزین Epon 828 تک‌قله بوده که نشان از سازگاری و همگن‌بودن فرمول‌بندی 4S6L است. افزایش ارتفاع قله $Tan\delta$ مربوط به فرمول‌بندی 4S6L نیز به دلیل افزایش فضای خالی و افزایش درهم‌گیری‌های فیزیکی است. مبنای تعیین دمای انتقال شیشه‌ای در این آزمون، اندازه‌گیری خواص مکانیکی است. با افزایش دما، خواص مکانیکی کاهش می‌یابد تا آن که به

جدول ۵- نتایج استحکام برشی بین‌لایه‌ای کامپوزیت‌های بر پایه رزین‌های 4S6L، 3S7L و Epon 828.

Table 5. Interlaminar shear strength (ILSS) results of formulated 3S7L, 4S6L and Epon 828.

Sample	ILSS (MPa)
3S7L	60.1 ± 2.61
4S6L	51.8 ± 2.75
Epon 828	53.5 ± 2.19

دارد، در این پژوهش، نیز اثر نوع فرمول‌بندی رزین، بر مقدار ILSS کامپوزیت نهایی بررسی شد. بدین منظور، پس از ساخت کامپوزیت ۱۲ لایه با استفاده از پیش‌آغشته‌های ساخته‌شده بر پایه فرمول‌بندی‌های 4S6L، 3S7L و Epon 828، آزمون خمش سه‌نقطه‌ای انجام شد. نتایج این آزمون در جدول ۵ خلاصه شده است. برای تحلیل نتایج ILSS کامپوزیت‌های ساخته‌شده بر پایه فرمول‌بندی‌های 4S6L، 3S7L و Epon 828، باید خواص استحکام کششی، مدول کششی و اثر این دو خواص بر یکدیگر مورد توجه قرار گیرد. بنابراین با توجه نتایج در جدول ۵، فرمول‌بندی 3S7L با افزایش استحکام کششی و افزایش فاصله اتصال‌های عرضی نسبت به Epon 828، موجب افزایش ۱۱٪ استحکام برشی بین‌لایه‌ای کامپوزیت شد. در فرمول‌بندی 4S6L با وجود افزایش استحکام کششی نسبت به فرمول‌بندی 3S7L، کاهش ۱۴٪ استحکام برشی بین‌لایه‌ای مشاهده شد. دلیل کاهش ILSS کامپوزیت بر پایه فرمول‌بندی 4S6L، می‌تواند ناشی از اثر کاهش شدید مدول کششی، حتی با وجود افزایش استحکام کششی در فرمول‌بندی 4S6L باشد. همچنین، مقدار ILSS کامپوزیت بر پایه فرمول‌بندی 4S6L نسبت به رزین Epon 828، ۴٪ کمتر است که این مقدار از ILSS نمی‌تواند تفاوت چندانی بین این دو فرمول‌بندی ایجاد کند. بنابراین، با توجه به مقادیر ILSS کامپوزیت‌های بر پایه فرمول‌بندی‌های 4S6L، 3S7L و Epon 828، قابلیت ساخت کامپوزیت با خواص ILSS مطلوب را دارند. اما کامپوزیت بر پایه فرمول‌بندی 3S7L، ILSS بیشتری نسبت به دو فرمول‌بندی 4S6L و Epon 828 دارد.

تجزیه دینامیکی-مکانیکی گرمایی (DMTA)

برای تعیین همگن‌بودن و اثر رزین اپوکسی جامد بر زمان آسودگی از تنش فرمول‌بندی‌های طراحی‌شده با استفاده از ترکیب دو نوع رزین اپوکسی با وزن مولکولی مختلف از آزمون DMTA استفاده شد. شکل ۸ نتایج این آزمون را برای فرمول‌بندی‌های Epon 828 و

می‌تواند موجب طولانی‌شدن زمان انبارداری پیش‌آغشته‌های تهیه‌شده بر پایه این فرمول‌بندی شود. گرانیروی و چسبناکی فرمول‌بندی 4S6L به دلیل درصد وزنی بیشتر رزین اپوکسی با وزن مولکولی زیاد و ایجاد درهم‌گیری فیزیکی، نتایج مناسبی برای استفاده از فرمول‌بندی 4S6L تا دمای 45°C را نشان داد. در فرمول‌بندی 3S7L به دلیل درصد وزنی بیشتر رزین اپوکسی با وزن مولکولی کم و فاصله اتصال‌های عرضی کمتر نسبت به فرمول‌بندی 4S6L، افزایش مدول کششی و کاهش استحکام کششی مشاهده شد. افزایش مقدار رزین اپوکسی با وزن مولکولی زیاد، موجب افزایش سفتی خمشی و کاهش قابلیت شکل‌پذیری پیش‌آغشته شد. استحکام برشی بین‌لایه‌ای تحت تأثیر دو عامل مدول کششی و استحکام کششی در رزین‌های فرمول‌بندی‌شده است که این عامل موجب افزایش ۱۴٪، ILSS فرمول‌بندی 3S7L نسبت به فرمول‌بندی 4S6L و ۱۱٪ نسبت به فرمول‌بندی EPON 828 شد. همگن‌بودن و افزایش زمان آسایش از تنش فرمول‌بندی 4S6L با استفاده از ترکیب دو نوع رزین اپوکسی با وزن‌های مولکولی مختلف، به کمک نمودار $\text{Tan}\delta$ و مدول کشسانی تأیید شد.

منطقه‌ای با جهش زیاد برسد که این منطقه به عنوان دمای انتقال شیشه‌ای در نظر گرفته می‌شود. بر همین اساس، دمای انتقال شیشه‌ای فرمول‌بندی 4S6L نسبت به رزین Epon 828، به دلیل افزایش وزن مولکولی و در نتیجه افزایش درهم‌گیری‌های فیزیکی، افزایش یافته و از دمای $88/6 \pm 0/5^{\circ}\text{C}$ به دمای $114/2 \pm 0/5^{\circ}\text{C}$ رسیده است.

نتیجه‌گیری

وجود پیش‌پخت در پیش‌آغشته‌ها به دلیل فعال‌بودن واکنش پخت، سبب کاهش زمان انبارداری، از بین رفتن خواص، هدررفت مواد و ضایعات صنعتی می‌شود. برای ساخت پیش‌آغشته بدون مرحله پیش‌پخت و اجتناب از مشکلات اشاره‌شده، از ترکیب دو نوع رزین اپوکسی با وزن‌های مولکولی مختلف استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان داد، دمای شروع پخت رزین‌های فرمول‌بندی‌شده نسبت به رزین خالص EPON 828، 15°C دمای شروع پخت بیشتری دارد که

مراجع

1. Cakir F. and Uysal H., Experimental Modal Analysis of Brick Masonry Arches Strengthened Prepreg Composites, *J. Cult. Herit*, **16**, 284-292, 2015.
2. Grunfelder L.K., Dills A., Centea T., and Nutt S., Effect of Prepreg Format on Defect Control in Out-of-Autoclave Processing, *Compos. A: Appl. Sci. Manuf.*, **93**, 88-99, 2017.
3. Jiang B., Huang Y.D., He S., Xing L.X., and Wang H.L., Quality Analysis and Control Strategies for Epoxy resin and Prepreg, *TrAC-Trends Anal. Chem.*, **74**, 68-78, 2015.
4. Hassan M.H., A Mini Review on Manufacturing Defects and Performance Assessments of Complex Shape Prepreg-Based Composites, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **115**, 3393-3408, 2021.
5. Siddiqui N.A., Khan S.U., Ma P.C., Li C.Y., and Kim J.K., Manufacturing and Characterization of Carbon Fibre/Epoxy Composite Prepregs Containing Carbon Nanotubes, *Compos. A: Appl. Sci. Manuf.*, **42**, 1412-1420, 2011.
6. Schreve K. and Van der Westhuizen J., Optical Aid for Placing Composite Material (Prepregs) in a Mould, *S. Afr. J. Ind. Eng.*, **29**, 35-48, 2018.
7. Lengsfeld H., Lacalle J., Neumeyer T., and Altstädt V., *Composite Technology: Prepregs and Monolithic Part Fabrication Technologies*, Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2021.
8. Mangalgi P.D., Composite Materials for Aerospace Applications Bulletin of Materials Science, *Bull. Mater. Sci.*, **22**, 657-664, 1999.
9. Tomioka M., Kaneko M., and Hagiwara M., Epoxy Resin Composition, Prepreg, Fiber-Reinforced Composite Material, and Housing for Electrical or Electronic Equipment, *US Pat.*, **10,364,347**, 2019.
10. Mironov G., Wind Turbine Blade, *US Pat.*, **2010/0098549**, 2010.
11. Holmes M., High Volume Composites for the Automotive Challenge, *J. Reinf. Plast.*, **61**, 294-298, 2017.
12. Rajak D.K., Pagar D.D., Menezes P.L., and Linul E., Fiber-Reinforced Polymer Composites: Manufacturing, Properties, and Applications, *Polymers*, **11**, 1667, 2019.
13. Sreejith M. and Rajeev R.S., *Fiber Reinforced Composites for Aerospace and Sports Applications*, Woodhead, Sawston, 821-859, 2021.
14. Kostadinoska B., Risteska S., and Samakoski B., Influence of the Process Parameters on Manufactured Prepregs by Solvent

- Impregnation. *Int. J. Eng. Res.*, **10**, 715-719, 2021.
15. Golfman Y., Impregnation Process for Prepregs and Braided Composites, *J. Adv. Mater-Covina*, **65**, 1-7, 2007.
 16. Seferis J.C., Velisaris C.N., and Drakonakis V.M., Prepreg Manufacturing. *Wiley Encyclopedia of Composites*, 1-10, 2011.
 17. Khalafi H.R., Mortezaei M., and Amiri Amraei I., Relationship between the Process Parameters and Resin Content of a Glass/Epoxy Prepreg Produced by Dipping Method, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **27**, 391-402, 2015.
 18. Mortezaei M., Khalafi H.R., and Amiri Amraei I., Modeling of Degree of Cure in Epoxy-glass Prepreg, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **2**, 43-48, 2015.
 19. Pouladvand A.R., and Mortezaei M., Tack Property of Prepregs: Effective Parameters, Methods of Measurement and Failure Mechanisms, *Polymerization (Persian)*, **9**, 39-49, 2019.
 20. Budelmann D., Schmidt C., and Meiners D., Prepreg Tack: A Review of Mechanisms, Measurement, and Manufacturing Implication, *Polym. Compos.*, **41**, 3440-3458, 2020.
 21. Jahani M., Fattahi H., and Mortezaei M., Effect of Aromatic Amine Structure as a Curing Agent on Molecular Packing and Mechanical Properties of Cured Epoxy Resin, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **32**, 269-278, 2019.
 22. Mozaffariafi S.M. and Beheshty M.H., Thermally-Latent Curing Agents for Epoxy Resins: A Review, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **31**, 409-426, 2019.
 23. Kuliaei A., Amiri Amraei I., and Mousavi S.R., Investigating the Relationship between Tack and Degree of Conversion in DGEBA-based Epoxy Resin Cured with Dicyandiamide and Diuron, *J. Polym. Eng.*, **41**, 537-545, 2021.
 24. Galledari N.A., Beheshty M.H., and Barmar M., Effect of NBR on Epoxy/Glass Prepregs Properties, *J. Appl. Polym. Sci.*, **123**, 1597-1603, 2012.
 25. Hayaty M., Honarkar H., and Beheshty M.H., Curing Behavior of Dicyandiamide/Epoxy Resin System Using Different Accelerators. *Iran. Polym. J.*, **22**, 591-598, 2013.
 26. Payamani M., Fattahi H., and Mortezaei M., Dual-curing Systems of Epoxy Resin for Using in Prepreg Manufacturing, *Polymerization (Persian)*, 2021. DOI: 10.22063/BASPARESH.2021.2951.1566
 27. Fernández-Francos X., Konuray A.O., Belmonte A., De la Flor S., Serra À., and Ramis X., Sequential Curing of Off-stoichiometric Thiol-Epoxy Thermosets with a Custom-Tailored Structure, *Polym. Chem.*, **12**, 2280-2290, 2016.
 28. Pouladvand A.R., Mortezaei M., Fattahi H., and Amiri Amraei I., A Novel Custom-Tailored Epoxy Prepreg Formulation Based on Epoxy-Amine Dual-Curable Systems, *Compos. A: Appl. Sci. Manuf.*, **132**, 105852, 2020.
 29. Liao C.W., Pingzhen., Hsu H., and Zhuang X., Epoxy Resin Blend. *US Pat. 9,718,986*, 2017.
 30. Suzuki T., Ishiwata T., Suzuki Y., and Numata H., Prepreg and Method for Manufacturing Same. *US Pat. 10,047,478*, 2018.
 31. Bank D.H., Chaudhary A.K., and Sun X., Process for Reclaiming Scrap or Unused Epoxy Resin Prepreg. *US Pat. 10,744,679*, 2020.
 32. Poynton G., *Multi-component Epoxy Resin Formulation for High Temperature Applications*, PhD Thesis, School of Materials, the University of Manchester, UK, 2014.
 33. Cleaver M. and Suffolk H., Epoxy Resin Formulations, *US Pat. 9,969,852*, 2018.
 34. Mousavi S.R. and Amiri Amraei I., Toughening of Dicyandiamide-Cured DGEBA-based Epoxy Resin Using MBS Core-Shell Rubber Particles, *J. Compos. Mater.*, **49**, 2357-2363, 2015.
 35. Wang Q., Storm B.K., and Houmøller L.P., Study of the Isothermal Curing of an Epoxy Prepreg by Near-Infrared Spectroscopy, *J. Appl. Polym. Sci.*, **87**, 2295-2305, 2003.
 36. Akbari R., *Toughening of Epoxy Resin by using CTBN and Flexible Amin Curing Agent and Preparation of Toughened Epoxy Glass Prepreg*, MSc Thesis, Faculty of Polymer Processing, Iran Polymer and Petrochemical Institute, Tehran, Iran, 2012.