

بررسی تأثیرات پدیده‌ی تخریب تابشی بر خواص مکانیکی کامپوزیت شیشه و پلی‌استر

محمود مهر؛ دانشکده (استاد)

علی‌رضا بیات (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

در این تحقیق اثر تخریبی اشعه فرابنفش خورشید به‌عنوان یکی از فاکتورهای مخرب محیطی، روی خواص مکانیکی کامپوزیت شیشه / پلی‌استر مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور نمونه‌های آزمون‌های استحکامی مواد از رزین پلی‌استر تهیه و تحت آزمون‌های شتاب‌دار اشعه فرابنفش قرار گرفت. برای به‌دست آوردن منحنی تغییرات زمانی پارامترهای مکانیکی و استحکامی این رزین تحت تأثیر تابش فرابنفش، نمونه‌های تهیه شده در سه بازه زمانی متفاوت (معادل سه ماه، شش ماه، و یکسال معادل ناحیه فلوریدا) تحت تابش فرابنفش قرار گرفتند. پس از انجام آزمون شرایط محیطی، به‌منظور بررسی میزان تغییرات در پارامترهای مکانیکی، آزمون‌های خواص مکانیکی روی نمونه‌های تابش شده و تابش نشده انجام گرفت.

نتایج آزمون‌های خواص مکانیکی بیانگر افت محسوس در خواص سختی عرضی و مدول برشی تک‌لایه شیشه و پلی‌استر و همچنین کامپوزیت [0/90] داشت. همچنین نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که چگونه اضافه‌کردن افزودنی‌های جاذب فرابنفش به‌منظور بالابردن مقاومت کامپوزیت در برابر تأثیر تخریب اشعه فرابنفش مؤثر است.

واژگان کلیدی: اشعه فرابنفش، کامپوزیت شیشه و پلی‌استر، استحکام کششی، مدول کششی، استحکام برشی، مدول برشی، افزودنی جاذب فرابنفش.

مقدمه

کامپوزیت‌های بسیاری و پلاستیک‌ها روز به روز جایگاه خود را در سازه‌های ساختمانی و کاربردهای بیرونی بناها، تأسیسات و سازه‌های فضایی بیشتر باز می‌کنند. این رشد چشم‌گیر به‌دلیل خواص بارزی چون «مقاومت خوردگی» یا «نسبت استحکام به وزن بالا» در مورد کامپوزیت‌هاست. استفاده از رزین‌های بسیاری در تأسیسات خارجی بناها شبهه‌هایی را در مورد اثر شرایط محیطی — به‌خصوص تابش نور خورشید — روی این مواد به وجود می‌آورد؛ به‌خصوص این که اشعه فرابنفش موجود در نور خورشید بیشترین اثر منفی را در افت خواص مکانیکی این مواد و همچنین کوتاه کردن عمر مفید این مواد دارد. در حال حاضر عمر کاربری این مواد در کاربردهای در معرض محیط، بستگی به افزودنی‌های پایاساز^۱ در مقابل نور یا روکش‌های محافظ ضد نور دارد.

عوامل دیگری مانند سوراخ‌شدن لایه‌ی ازن نیز منجر به افزایش میزان اشعه فرابنفش در تابش رسیده به زمین شده و خود موجب کاهش عمر مفید این مواد می‌شود. همچنین توأم شدن این اثر با عوامل دیگری همچون رطوبت و حرارت، خود باعث کاهش بیشتر خواص مکانیکی و عمر این مواد می‌شود. از این‌رو کشورهای در حال توسعه که مواد پلاستیکی و بسیاری جزو مواد اولیه اصلی بناها و تجهیزات آنها است تحت تأثیر عوامل محیطی هستند.

در آمریکا و اروپای غربی حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد از تولید سالیانه‌ی رزین‌های بسیاری در بخش ساختمانی به کار می‌رود.^[۱] افزایش چشم‌گیر کاربرد این مواد برای ساختمان‌ها در کشورهای توسعه‌یافته به‌دلیل قیمت پایین و سهولت به‌کارگیری این مواد — در مقایسه با فلز، شیشه، چوب، و مواد دیگر — است. لذا نقش اشعه فرابنفش در نور خورشید حتی در تعیین عمر مفید کامپوزیت‌ها و بسیاری که دارای افزودنی‌های ضد فرابنفش هستند انکارناپذیر است. اگرچه اثر نقصان لایه‌ی ازن در افزایش مقدار اشعه‌ی $UV - B$ در نور خورشید ناچیز می‌نماید، اثر این افزایش ناچیز بر روی سرعت تخریب این مواد در این طول موج به‌خصوص (۳۲۰ - ۲۸۰ نانومتر) بسیار بالا است.^[۲] در کاربردهایی مانند روکش‌های محافظه پوشش کابل‌های برق و غیره، شکست زودرس یا نابه‌هنگام این مواد ممکن است به زیان‌های اقتصادی بزرگی بینجامد تا آنجا که حتی هزینه‌ی تعویض این مواد را نیز بسیار بالاتر ببرد.

شدت نقصان در لایه‌ی ازن، و نتیجتاً افزایش اشعه فرابنفش در تابش رسیده به زمین به عرض جغرافیای منطقه‌ی مورد نظر بستگی دارد. محتوای فرابنفش تابش خورشید در عرض‌های جغرافیایی بالاتر کم‌تر است. این در حالی است که در این مناطق میانگین دمای پایین‌تری را شاهد هستیم. به‌عکس، در نقاط با عرض جغرافیایی پایین‌تر درجه حرارت بالاتری را شاهد هستیم و از طرفی میانگین محتوای

اشعه‌ی فرابنفش ($UV - B$)^۲ در نور خورشید در این مناطق بیشتر است. عمر مفید مواد کامپوزیتی در چنین شرایطی بسیار پایین است. مثلاً استحکام کششی لوله‌های PVC که به مدت ۲۴ ماه در شهر ظهران عربستان سعودی در مقابل تابش اشعه قرار داشت حدود ۴۳ درصد کاهش یافت؛ در صورتی که در همین مدت و شرایط مشابه در شهر فلوریدا کاهش خواص مکانیکی این مواد در حدود ۲۶ درصد بوده است.^{۳۱} لذا تأثیر ترکیبی درجه حرارت بالا به همراه اثر اشعه‌ی فرابنفش روی خواص استحکامی این مواد بسیار بیشتر است.

تنها اطلاعات موجود در مورد این فرایند تخریب مربوط به آزمایش‌های عملی است که در مورد چندین ماده‌ی به‌خصوص انجام پذیرفته است. سازکار تخریب در دو حالت، به‌طور هم‌زمان در یک رزین بسیاری انجام می‌پذیرد. برای نمونه، قاب پنجره‌هایی که از جنس PVC ساخته می‌شوند در مقابل تابش اشعه‌ی خورشید دچار تغییراتی مانند زردشدن، از دست دادن استحکام ضربه، و کاهش در استحکام کششی — علاوه بر تغییرات شیمیایی در ساختارشان — می‌شوند. با وجود این تغییرات، حالت اول تغییر، به‌طور عام، تعیین‌کننده‌ی عمر مفید این مواد است و مصرف‌کننده بیشتر بعد از گذشت این حالت درخواست تعویض قطعه را می‌کند.^{۳۱} در آزمایشی که روی لوله‌های PVC انجام شد مشاهده شد که یک فرایند تابشی گرمایشی^{۳۲} منجر به تشکیل پلی‌ان‌های مزدوج در بسیار می‌شود که به زردشدن لوله‌ها می‌انجامد. این فرایند تنها در سطح بسیار، به‌ویژه بسپارهایی که رنگ کدر دارند، رخ می‌دهد. این حالت برای فرابنفش‌های با طول موج بالاتر از ۴۰۰ نانومتر رخ می‌دهد.^{۳۱}

تغییرات شیمیایی در اثر اعمال اشعه‌ی ماوراء بنفش، شامل یک‌سری فرایند پیچیده از اثر ترکیبی اشعه و اکسیژن می‌شود.^{۳۱} برای حذف اثر مخرب اشعه‌ی فرابنفش، در ترکیب این بسپارها از افزودنی‌هایی استفاده می‌شود. همچنین افزودنی‌های آمینی^۴ با درصد وزنی ۲-۵ درصد در ترکیب این بسپارها به کار می‌رود.^{۳۱} داده‌های تجربی از آزمایش‌های انجام شده بر روی رزین‌ها در آب و هوای بیابانی حاکی از آن است که استفاده از این نوع مواد افزودنی عمر مفید این مواد را افزایش می‌دهد. اما فساد خود این مواد افزودنی در مقابل اشعه‌ی فرابنفش (به دلیل ظرفیت محدودشان) نیز از نگرانی‌های عمده است. تابش با طول موج‌های کوچک‌تر حاوی انرژی‌های فوتونی مرتبه بالاتر به‌صورت قوی‌تر در اغلب مواد بسپاری جذب می‌شوند و در نتیجه پتانسیل بالاتری برای شکستن پیوندهای شیمیایی در آن مواد دارند.^{۳۱} جاذب‌های اشعه‌ی ماوراء بنفش، مانند پایدارسازهای تری‌آمین، به‌عنوان افزودنی برای حذف یا کاهش تأثیرات مخرب این اشعه در پلاستیک‌هایی که در معرض نور شدید خورشید قرار دارند، به کار گرفته می‌شوند.^{۳۱}

با توجه به اهمیت اثر تخریبی اشعه‌ی فرابنفش بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های بسپاری، در این پروژه به بررسی تأثیر این پدیده بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت شیشه و پلی‌استر — یکی از کامپوزیت‌های پرکاربرد در کشور — پرداخته شد.

انتخاب و ساخت نمونه‌ها

در این تحقیق انتخاب نمونه‌ها براساس استاندارد ASTM انجام گرفته است. از آنجا که پدیده‌ی تخریب نوری توسط تابش فرابنفش یک پدیده‌ی سطحی است، برای اخذ نتایج دقیق‌تر ضخامت نمونه‌ها را برای انجام آزمون‌های کشش و برش ۱ میلی‌متر و نیز ضخامت نمونه‌های آزمون فشار را برای پیشگیری از پدیده‌ی کماتش، معادل ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شد. بدین منظور ابتدا نمونه‌های استحکامی انتخاب‌شده از این رزین، در بازه‌های زمانی متفاوت تحت آزمون‌های شتاب‌دار اشعه‌ی فرابنفش^{۳۰-۳۱} قرار می‌گیرند

و سپس از طریق انجام آزمون‌های استحکام میزبان تغییر خواص استحکامی رزین اندازه‌گیری می‌شود. برای به دست آوردن منحنی زمانی مذکور نمونه‌های استحکامی در سه بازه‌ی زمانی متفاوت در دستگاه آزمایش شرایط محیطی نگه‌داری می‌شوند. همچنین برای بررسی اثر افزودنی‌های جاذب فرابنفش در جلوگیری از کاهش خواص مکانیکی رزین پلی‌استر، برای هر یک از نقاط زمانی مذکور تعداد ۲ نمونه با استفاده از این افزودنی‌ها تهیه، و سپس آزمون‌های استحکامی روی این نمونه‌ها نیز انجام گرفت. افزودنی‌های مورد استفاده، که از خانواده‌ی بنزوتریازول^۵ها هستند، با درصد وزنی ۲۵٪ و قبل از اضافه‌کردن اسید و سخت‌کننده، به‌وسیله‌ی حلال در رزین حل می‌شوند. در ادامه، ضمن معرفی نمونه‌های انتخاب شده، هر یک از آزمون‌های انجام‌شده تشریح می‌شود.

نمونه‌های آزمون کشش

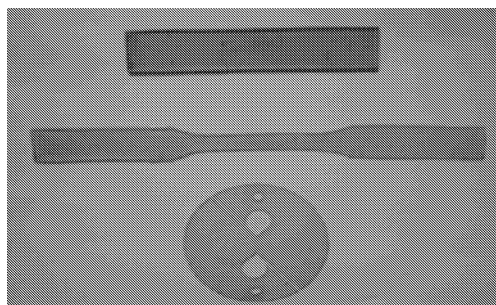
نمونه‌های انتخابی برای آزمون کشش مطابق استاندارد ASTM-D638 و ASTM-76-3039 D تعیین شدند.^{۳۳} تعداد ۳ نمونه به‌عنوان نمونه‌های اصلی (تحت تابش قرار نگرفته)، و برای هر یک از نقاط زمانی پیش‌بینی شده نیز تعداد ۳ نمونه (یعنی جمعاً تعداد ۱۲ نمونه) برای انجام آزمون کشش تهیه شد. با استفاده از آزمون کشش می‌توان استحکام کششی رزین (σ_{T1})، استحکام تسلیم (σ_{T2})، مدول کششی رزین (E_m) و نیز کرنش شکست رزین پلی‌استر را محاسبه کرد.

نمونه‌های آزمون فشار

آزمون فشار برای به دست آوردن استحکام فشاری رزین پلی‌استر تحت تأثیر اشعه‌ی فرابنفش، براساس استاندارد ASTM D3410 انجام شد.^{۳۳} ساخت این نمونه‌ها نیز با استفاده از قالب‌های سیلیکونی انجام شد. به‌منظور بررسی اثر اشعه بر خواص استحکام فشاری، از این نمونه نیز تعداد ۱۲ عدد تهیه شد که از این تعداد سه نمونه به‌عنوان نمونه‌های اصلی (تابش نشده) و برای هر یک از نقاط زمانی مذکور نیز ۳ نمونه در نظر گرفته شده است.

نمونه‌های آزمون برش

برای انجام آزمون برش روی رزین پلی‌استر از نمونه‌ی آرکان (Arcan) استفاده شد.^{۳۳} با این تفاوت که ضخامت این نمونه معادل ۱ میلی‌متر و ابعاد این نمونه نیز به دلیل محدودیت فضا در دستگاه آزمون شرایط محیطی تغییر داده شد. ساخت این نمونه‌ها نیز با استفاده از قالب‌های سیلیکونی انجام شد. آزمون برش این نمونه‌ها برای اندازه‌گیری استحکام برشی رزین (τ_{T1}) و مدول برشی و (E_{T2}) انجام شد. همانند



شکل ۱. نمونه‌های تهیه‌شده برای آزمون‌های فشار، کشش و برش (به ترتیب از بالا به پایین).

۱. بازه‌ی زمانی اول با شدت 35° وات بر متر مربع و مدت 4° ساعت (معادل تقریبی تابش در فصل زمستان، یعنی 5° ژول بر متر مربع).^[۸]
۲. بازه‌ی زمانی دوم با شدت 50° وات بر متر مربع و مدت 7° ساعت (معادل تقریبی تابش در فصل‌های زمستان و بهار، یعنی 126° ژول بر متر مربع).^[۸]
۳. بازه‌ی زمانی سوم با شدت 80° وات بر متر مربع و مدت 10° ساعت (معادل تقریبی تابش یک‌سال، یعنی 288° ژول بر متر مربع).^[۸]

براساس مطالعات قبلی و به منظور یکنواخت کردن خواص استحکامی نمونه‌ها، هرکدام از نمونه‌ها از دو طرف در مقابل تابش اشعه قرار داده شدند. پس از انجام آزمون شرایط محیطی، در نمونه‌هایی که 7° ساعت و 10° ساعت تحت تابش قرار گرفته بودند تغییر محسوس در رنگ مشاهده شد. رنگ این نمونه‌ها اندکی به قرمز متمایل شده ولی در نمونه‌هایی که 4° ساعت تحت تابش قرار گرفتند هیچ‌گونه تغییر رنگی مشاهده نشد.

نتایج آزمون‌های استحکام

پس از انجام آزمون شرایط محیطی آزمون‌های استحکام رزی نمونه‌ها انجام گرفت. آزمون‌های استحکام (کشش، برش و فشار) نمونه‌ها با استفاده از دستگاه Zwick و با سرعت ۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفت.

نتایج آزمون‌های کشش نمونه‌های پلی‌استر

پس از انجام آزمون شرایط محیطی رزی نمونه‌های پلی‌استر، نمونه‌های 7° و 10° ساعت تابش شده تغییر رنگ متمایل به قرمز پیدا کردند ولی در نمونه‌های 4° ساعت تابش شده تغییر رنگ محسوسی ملاحظه نشد. در ادامه، نمودارهای آزمون کشش رزی این نمونه‌ها ارائه شده است. براین اساس، در شکل ۳ نمودارهای تنش-کرنش برای نمونه‌های پلی‌استر تابش نشده و تابش شده ارائه شده است. در جدول ۱ نیز پارامترهای استحکامی برای این نمونه‌ها مقایسه شده است.

در شکل ۴ نمودار استحکام کششی و مدول کششی نمونه‌های پلی‌استر بر حسب زمان نشان داده شده است. نتایج حاصل از آزمون کشش نمونه‌های دمبلی شکل (شکل ۱) نشان داد که پس از 10° ساعت تابش (معادل تقریبی یکسال):

- الف) استحکام کششی نهایی $34/8$ درصد کاهش یافت؛
- ب) مدول کششی نمونه‌ها $18/9$ درصد کاهش یافت؛
- ج) کرنش شکست نمونه‌ها $15/2$ درصد کاهش یافت.

همانگونه که در شکل‌های فوق ملاحظه می‌شود تغییرات استحکام کششی و مدول کششی نمونه‌ها برحسب زمان تابش اشعه‌ی فراینش یک نمودار نزولی است. مقایسه‌ی نمودارهای شکل ۳الف با شکل ۳ب نشان می‌دهد که نمونه‌هایی که پس از 10° ساعت (معادل یک‌سال) قرار گرفتن در معرض تابش، ناحیه‌ی تسلیم مشخصی ندارند. به عبارت دیگر رفتار نمونه‌ها به ماده‌ی ترد نزدیک‌تر است $15/2$ درصد کاهش در کرنش شکست نمونه‌ها مؤید این مطلب است.

نتایج آزمون‌های کشش نمونه‌های پلی‌استر حاوی جاذب فراینش

در نمونه‌های آزمون حاوی افزودنی جاذب فراینش، پس از تابش فراینش تغییر رنگ محسوسی ملاحظه نشد. نمودارهای آزمون کشش رزی این نمونه‌ها، برای نمونه‌های

دستگاه آزمایش شرایط محیطی

دستگاه آزمایش شرایط محیطی از نوع $Xenotest - \beta$ ساخت شرکت آمریکایی Atlas است. چنان که از نام دستگاه پیداست تأمین تابش فراینش در این دستگاه با استفاده از لامپ‌های زنون انجام می‌شود که قابلیت اعمال شدت‌های متفاوت از 25° تا 1000° وات بر متر مربع را دارد. این دستگاه همچنین از قابلیت کنترل دما و رطوبت برخوردار است. شکل ۲ دستگاه آزمایش شرایط محیطی مورد استفاده را نشان می‌دهد. همچنین کلیه‌ی آزمون‌ها در دمای ثابت 3° درجه‌ی سانتی‌گراد انجام شد.^[۱۵]

زمان لازم برای انجام آزمون شتاب‌دار اشعه‌ی فراینش براساس مدل اول آزمایش شرایط محیطی، برای ناحیه‌ی فلوریدای جنوبی محاسبه و آزمون به دلیل محدودیت زمانی برای مدت معادل یک سال انجام شد.^[۸] براساس مدل اول، مقدار تابش فراینش برای یک‌سال در فلوریدای جنوبی (W) برابر 28° مگاژول بر متر مربع است. چنانچه در آزمایش از لامپی با شدت $T = 80^\circ$ وات بر متر مربع برای دستگاه استفاده شده، مدت زمان لازم برای تشعشع در دستگاه آزمایش (t) از معادله‌ی زیر به دست می‌آید:

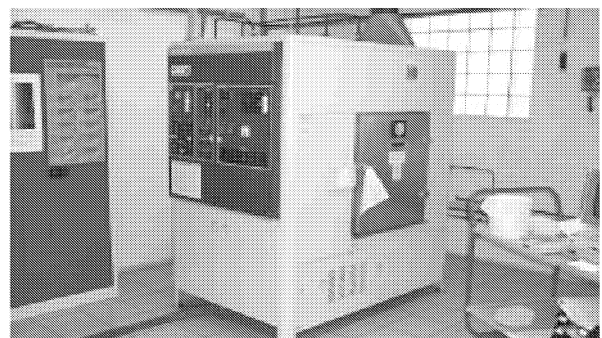
$$t = \frac{W}{T}$$

$$t = \frac{28^\circ \times 10^6}{80^\circ} = 350000s \quad (1)$$

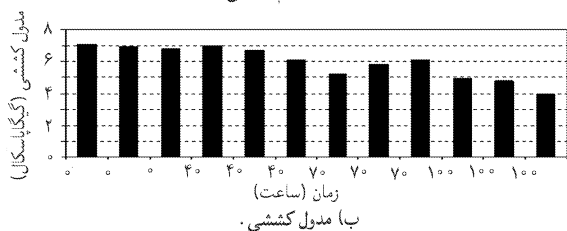
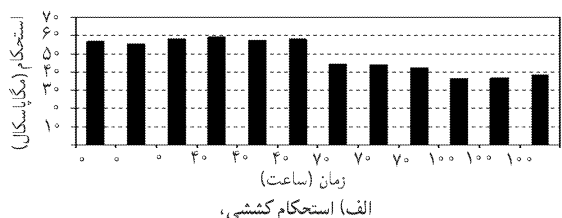
یعنی مدت زمان لازم برای مدل‌سازی این آزمون با شدت 80° وات بر متر مربع 350000 ثانیه (معادل تقریبی 10° ساعت) است. از این رو ضریب شتاب، که عبارت است از نسبت مدت زمان تابش در محیط طبیعی به مدت زمان لازم برای تأمین شدت لازم با استفاده از لامپ‌های فراینش، مساوی است با:

$$s = \frac{31536000}{350000} \approx 90$$

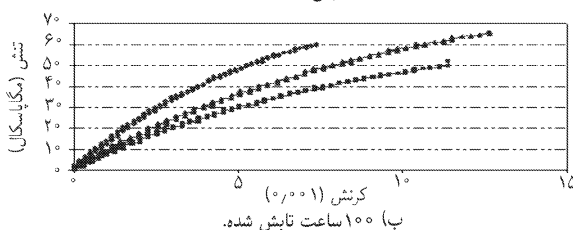
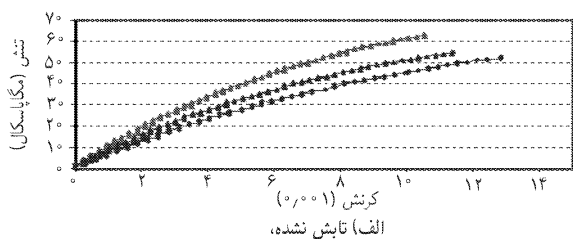
لذا برای به دست آوردن منحنی تغییرات خواص استحکامی برحسب زمان، بازه‌ی 10° ساعتی (350000 ثانیه) فوق (معادل یک سال) به سه قسمت تقسیم شده و هر سری از نمونه‌ها در این بازه‌ها در دستگاه آزمایش شرایط محیطی نگاه‌داری شد:



شکل ۲. دستگاه آزمایش شرایط محیطی.



شکل ۴. نمونه‌های پلی استر بر حسب زمان.



شکل ۵. نمودار تنش - کرنش برای نمونه‌های پلی استر حاوی جاذب فرابنفش.

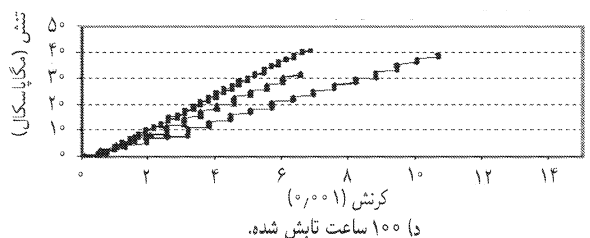
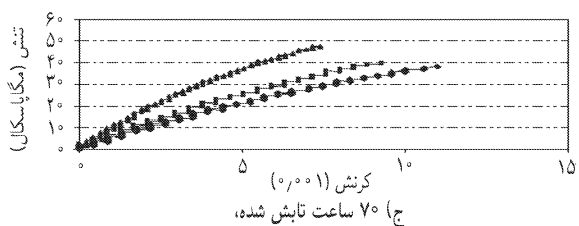
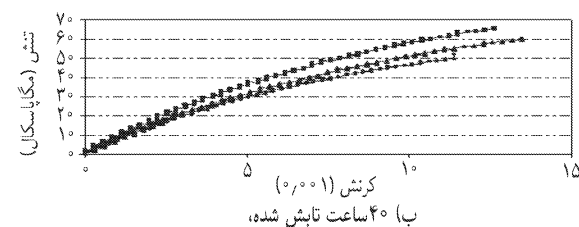
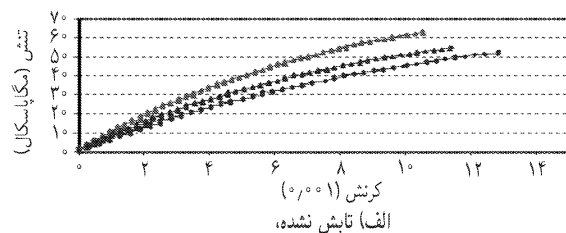
جدول ۲. مقایسه پارامترهای استحکام برای نمونه‌های کششی (ضریب ۲ در ستون‌های جاذب فرابنفش (ضریب ۲ در ستون‌های جدول به معنای این است که دو سمت قطعه تحت تابش اشعه قرار داشته است).

پارامتر	زمان (ساعت)	۰	۲ × ۴۰	۲ × ۷۰	۲ × ۱۰۰
استحکام کششی نهایی (مگا پاسکال)		۵۶٫۷۹	۵۷٫۳	۶۱٫۳	۵۹٫۲
استحکام کششی تسلیم (مگا پاسکال)		۳۳٫۳۳	۳۴٫۲	۳۳٫۸	۳۶٫۱
کرنش شکست میانگین ۱۰-۳		۱۱٫۴۶	۹٫۴۳	۱۱٫۳۴	۱۰٫۸
مدول ارتجاعی کششی (گیگا پاسکال)		۷٫۲۰۸	۷٫۰۳۲	۷٫۳۱۱	۶٫۸۲۷

الف) استحکام کششی نهایی ۴٫۲ درصد افزایش یافت. وجود ماده‌ی جاذب در وزن سبب این افزایش شده است.

ب) کرنش شکست نمونه‌ها ۵٫۷ درصد کاهش یافت. وجود ماده‌ی جاذب در وزن - علی‌رغم افزایش استحکام سبب ترد شدن آن شده است.

ج) مدول کششی نمونه‌ها ۵٫۲ درصد کاهش یافت.



شکل ۳. نمودارهای تنش - کرنش نمونه‌های پلی استر.

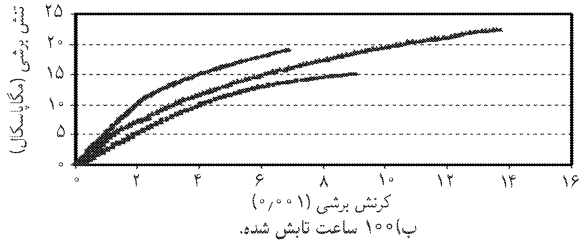
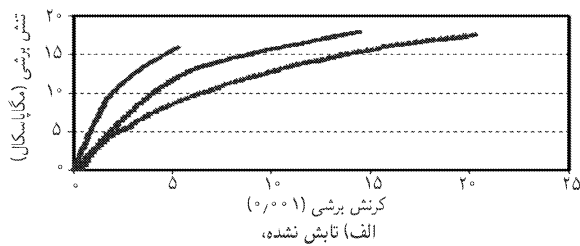
جدول ۱. مقایسه پارامترهای استحکام برای نمونه‌های کششی (ضریب ۲ در ستون‌های جدول به معنای این است که دو سمت قطعه تحت تابش اشعه قرار داشته است).

پارامتر	زمان (ساعت)	۰	۲ × ۴۰	۲ × ۷۰	۲ × ۱۰۰
استحکام کششی نهایی (مگا پاسکال)		۵۶٫۷۹	۵۹٫۲۹	۴۲٫۳۵	۳۷٫۰۳
استحکام کششی تسلیم (مگا پاسکال)		۳۳٫۳۳	۳۴٫۲	۲۸٫۸	-
کرنش شکست میانگین ۱۰-۳		۱۱٫۴۶	۱۲٫۴۸	۹٫۲۲	۹٫۷۲
مدول ارتجاعی کششی (گیگا پاسکال)		۷٫۲۰۸	۷٫۳۱۰	۵٫۹۰۳	۵٫۸۴

۱۰۰ ساعت تابش شده در شکل ۵ مقایسه شده است. در جدول ۲ نیز پارامترهای استحکامی برای این نمونه‌ها مقایسه شده است.

مقایسه‌ی نتایج آزمون‌های کشش برای نمونه‌های حاوی افزودنی جاذب فرابنفش نشان می‌دهد که پس از ۱۰۰ ساعت تابش (معادل یک‌سال) شیب ملایم منحنی تغییرات بیان‌گر این نکته است که استفاده از افزودنی‌های جاذب فرابنفش مانع از کاهش خواص استحکامی نمونه‌های پلی استر می‌شود (جدول ۲).

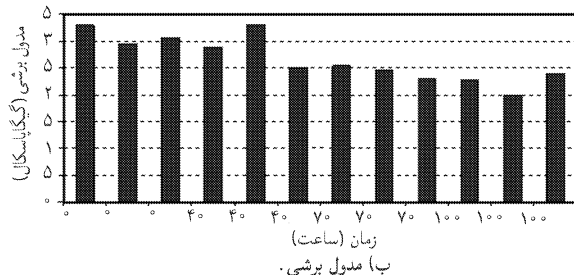
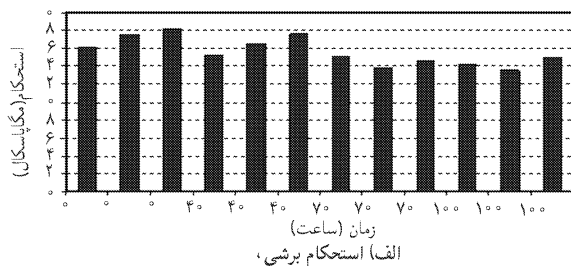
مقایسه‌ی نتایج آزمون‌های کشش نمونه‌های دمبلی شکل نشان می‌دهد که پس از ۱۰۰ ساعت تابش (معادل یک‌سال):



شکل ۷. نمودارهای تنش - کرنش برشی نمونه‌های پلی‌استر حاوی افزودنی جاذب فرابنفش.

جدول ۴. مقایسه پارامترهای استحکام برای نمونه‌های برشی حاوی افزودنی.

پارامتر (ساعت)	۰	۲ × ۴۰	۲ × ۷۰	۲ × ۱۰۰
استحکام برشی میانگین (مگا پاسکال)	۱۷٫۵	۱۷٫۲۳	۱۵	۱۶٫۹
استحکام برشی تسلیم میانگین (مگا پاسکال)	۹٫۶۶	۸٫۵	۵	۹٫۳
مدول برشی میانگین (گیگا پاسکال)	۳٫۰۶	۳٫۸۲	۲٫۹۲	۳٫۲۳



شکل ۸. نمودار نمونه‌های پلی‌استر بر حسب زمان.

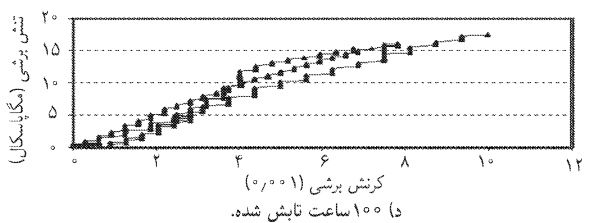
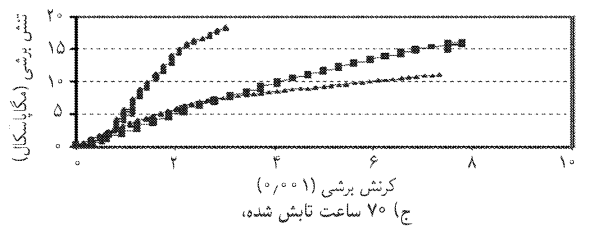
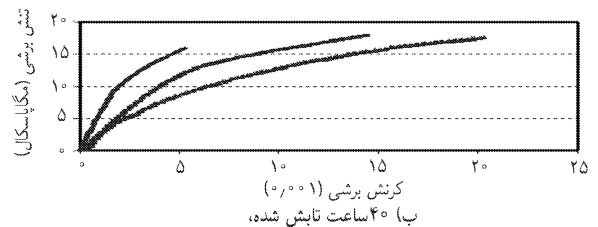
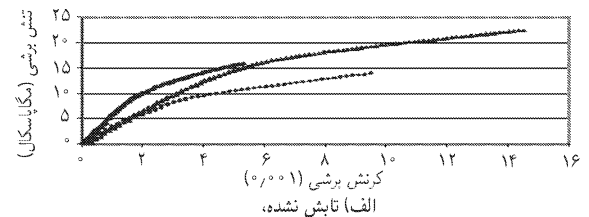
مقایسه، نمودار تنش-کرنش برشی برای نمونه‌های ۱۰۰ ساعت تابش شده در شکل ۷ آمده است. پارامترهای استحکامی این سری از نمونه‌ها نیز در جدول ۴ آمده است. شکل ۸ الف و ب نشان‌دهنده‌ی نمودارهای تغییرات خواص استحکام برشی نهایی و مدول برشی برای نمونه‌های آزمون برش هستند. چنان که ملاحظه می‌شود هر دو نمودار دارای شیب نزولی‌اند.

نتایج آزمون برش روی نمونه‌های پلی‌استر

پس از انجام آزمون تابش فرابنفش، آزمون برش نیز روی نمونه‌های پلی‌استر انجام گرفت که نتایج در نمودارهای شکل ۶ ارائه شده است. در جدول ۳ نیز پارامترهای استحکامی برای این نمونه‌ها مقایسه شده است.

نتایج آزمون‌های برش نمونه‌های پلی‌استر حاوی جاذب فرابنفش

نمونه‌های آرگان تهیه‌شده برای آزمون برش که حاوی افزودنی جاذب فرابنفش بودند نیز پس از انجام آزمون شرایط محیطی تغییر رنگ محسوس را تجربه نکردند. برای



شکل ۶. نمودارهای تنش - کرنش برشی نمونه‌های پلی‌استر.

جدول ۳. مقایسه پارامترهای استحکام برای نمونه‌های برشی فرابنفش (خریب ۲ در ستون‌های جدول به معنای این است که دو سمت قطعه تحت تابش اشعه قرار داشته است).

زمان (ساعت) پارامتر	۰	۲ × ۴۰	۲ × ۷۰	۲ × ۱۰۰
استحکام برشی میانگین (مگا پاسکال)	۱۷٫۵	۱۶٫۵	۱۴٫۶۶	۱۴٫۲
استحکام برشی تسلیم میانگین (مگا پاسکال)	۹٫۶۶	۸٫۶۲	۵٫۳	۴٫۳۲
مدول برشی میانگین (گیگا پاسکال)	۳٫۰۶	۲٫۹۱۵	۲٫۴۶	۲٫۲۸

جدول ۵. مقایسه استحکام فشاری برای نمونه‌های آزمون رزین.

پارامتر	زمان (ساعت)	۰	۲ × ۴۰	۲ × ۷۰	۲ × ۱۰۰
استحکام فشاری میانگین (مگا پاسکال)		۸۲٫۳۳	۸۳٫۱۲	۷۸٫۳۶	۷۹٫۲
استحکام فشاری میانگین (مگا پاسکال) برای نمونه‌های حاوی افزودنی جاذب فرابنفش		۸۲٫۳۳	۷۶٫۶۶	۷۸٫۳۵	۸۶٫۴۳

همچنین:

$$\frac{1}{E_r} = \frac{V^f}{E_f^f} + \frac{(1 - V^f)}{E_m^m} \quad (4)$$

که به معادله‌ی قانون ترکیب‌ها برای مدل عرضی لایه موسوم است. و برای مدل برشی یک لایه‌ی تک‌جهته:

$$\frac{1}{G_{\lambda r}} = \frac{V^f}{G_f^f} + \frac{1 - V^f}{G_m^m} \quad (5)$$

که در این روابط V^f و V^m به ترتیب درصد حجمی الیاف و ماتریس، E_r ، E_{λ} ، E_{λ} و $G_{\lambda r}$ به ترتیب ضریب پواسون، مدل کششی در جهت الیاف، مدل کششی در جهت عمود بر الیاف، و مدل برشی لایه‌ی تک‌جهته هستند.

محاسبه‌ی مقادیر E_{λ} ، E_r و $G_{\lambda r}$ تحت تأثیر خواص

تغییر یافته‌ی رزین

با استفاده از روابط ۱ و ۲ و ۳ و ۴ می‌توان خواص استحکامی تغییر یافته‌ی لایه تک‌جهته‌ی شیشه و پلی‌استر را محاسبه کرده که در آن خواص استحکامی رزین (جدول ۱ و ۳) و خواص استحکامی شیشه برابر است با:

$$\text{چگالی} = 2600 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{مقاومت کششی} = 3447.5 \text{ Mpa}$$

$$\text{مقاومت مدل} = 72.4 \text{ Gpa}$$

$$\text{مدل برشی} = 30 / 16 \text{ Gpa}$$

$$\text{افزایش طول گسیختگی} = 4.8 \text{ درصد}$$

$$\text{ضریب پواسون} = 0.2$$

همچنین درصد ترکیب الیاف از طریق آزمایش معادل با $V_f = 50\%$ است.

جدول ۶ خواص استحکامی لایه‌ی تک‌جهته‌ی شیشه / پلی‌استر را تحت تابش فرابنفش نشان می‌دهد.

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود برای لایه‌ی تک‌جهته، پس از ۱۰۰ ساعت تابش:

الف) مدل کششی طولی E_{λ} ۱۷ درصد کاهش یافته است؛

جدول ۶. پارامترهای استحکامی لایه تک‌جهته شیشه / پلی‌استر.

پارامتر	زمان (ساعت)	۰	۲ × ۴۰	۲ × ۷۰	۲ × ۱۰۰
مدل کشش رزین (گیگا پاسکال)		۷٫۲۰۸	۷٫۳۱۰	۵٫۹۰۳	۵٫۸۴
مدل برش رزین (گیگا پاسکال)		۳٫۰۶	۲٫۹۱۵	۲٫۴۶	۲٫۲۸
ضریب پواسون رزین		۰٫۱۷۷	۰٫۲۵۳	۰٫۱۹۹	۰٫۱۵۳
E_{λ} لایه تک‌جهته (گیگا پاسکال)		۳۹٫۸۰۴	۳۹٫۸۵۵	۳۹٫۱۵۱	۳۹٫۱۲
E_r لایه تک‌جهته (گیگا پاسکال)		۱۳٫۱۱	۱۳٫۲۸	۱۰٫۹۱	۱۰٫۸۱
$G_{\lambda r}$ لایه تک‌جهته (گیگا پاسکال)		۵٫۵۵۶	۵٫۳۱۶	۴٫۵۴۹	۴٫۲۳۹
ضریب پواسون لایه تک‌جهته		۰٫۱۸۸	۰٫۲۲۷	۰٫۱۹۹	۰٫۱۷۶

چنان‌که در جدول ۴ نیز ملاحظه می‌شود، مقایسه‌ی پارامترهای استحکام برای نمونه‌های آرکان حاوی افزودنی جاذب فرابنفش حاکی از تأثیر مثبت افزودنی‌ها در جلوگیری از کاهش خواص استحکامی نمونه‌های آزمون برشی است.

نتایج آزمون فشار رزی نمونه‌های پلی‌استر

در نمونه‌های آزمون استحکام فشاری نیز پس از انجام آزمون شرایط محیطی تغییر رنگ محسوس ملاحظه شد ولی همانند نمونه‌های آزمون‌های کشش و برش، نمونه‌هایی که حاوی جاذب فرابنفش بودند تغییر رنگی نداشتند. نتایج آزمون استحکام فشاری در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵ نشان‌گر تغییرات خواص استحکام فشاری در نمونه‌های پلی‌استر و نمونه‌های حاوی افزودنی است. برخلاف آنچه انتظار می‌رفت، کاهش قابل ملاحظه‌ی در خواص استحکام فشاری نمونه‌ها (مشابه نمونه‌های آزمون‌های کشش و برش) ملاحظه نشد. با توجه به این که ضخامت نمونه‌های آزمون فشاری برخلاف نمونه‌های دیگر ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شده می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات نامنظم و ملایم استحکام فشاری برحسب زمان تابش به معنی سطحی بودن پدیده‌ی تخریب تابشی است.

تحلیل خواص استحکامی کامپوزیت شیشه و پلی‌استر

تحت تأثیر تابش فرابنفش

بررسی کامپوزیت‌ها از دیدگاه برهم‌کنش‌های بین الیاف و رزین به شاخه‌ی دانش این مواد، موسوم به مایکرومکانیک، مربوط می‌شود. ترکیب خواص کشسانی الیاف و رزین به خواص کشسانی یک‌لایه‌ی کامپوزیتی منجر می‌شود. برای مثال، خواص انبساط گرمایی الیاف در تعامل با خواص انبساط گرمایی ماتریس است که منجر به خواص انبساط گرمایی یک‌لایه‌ی کامپوزیتی می‌شود. با آگاهی از خواص مکانیکی دو حالت تشکیل‌دهنده‌ی یک‌لایه‌ی کامپوزیتی (الیاف و رزین) می‌توان خواص یک‌لایه را پیش‌بینی کرد. به عبارت دیگر با دانستن خواص جداگانه‌ی الیاف و رزین می‌توان یک سازی کامپوزیتی مناسب برای بار مطلوب طراحی کرده زیرا آنچه که در نهایت ظرفیت تحمل بار یک سازی کامپوزیتی را تعیین می‌کند برهم‌کنش اجزای تشکیل‌دهنده‌ی آن در سطح مایکروسازه‌ی است. برای به دست آوردن خواص یک‌لایه‌ی کامپوزیتی با چیدمان دلخواه ابتدا به بررسی و تحلیل خواص استحکامی یک لایه‌ی تک‌جهته تحت تابش فرابنفش می‌پردازیم؛ مطابق معادله‌ی قانون ترکیب‌ها برای مدل کششی و ضریب پواسون یک‌لایه‌ی کامپوزیتی داریم: [۱۶] و [۱۷]

$$E_{\lambda} = E_f^f V^f + E_m^m (1 - V^f) \quad (2)$$

$$\nu_m = \nu_{\lambda r} = \nu_f^f V^f + \nu_m^m (1 - V^f) \quad (3)$$

ب) مدول عرضی $E_{\nu} = 17,54E$ درصد کاهش یافته است؛

ج) مدول برشی $G_{\nu} = 23,7G$ درصد کاهش یافته است.

مسئله مقدار تغییر در خواص استحکامی نمونه در جهت الیاف نسبت به تغییر این خواص در جهت عمود بر الیاف ناچیز است. از آنجا که ظرفیت تحمل بار الیاف در جهت طولی به مراتب بیشتر از رزین است، با توجه به رابطه ۱ تغییر در خواص استحکامی رزین تأثیر چندانی بر خواص استحکامی لایه نخواهد داشت؛ یعنی حاصل جمع یک عبارت خیلی بزرگ و یک عبارت خیلی کوچک در صورت تغییر در عبارت خیلی کوچک تغییر زیادی نخواهد داشت. از طرف دیگر کاهش ۱۷٫۵ درصدی در مدول عرضی مقطع نشان می‌دهد که ظرفیت تحمل بار در جهت عمود بر راستای الیاف یک لایه‌ی تک‌جهته بیشتر بر عهده‌ی رزین است، همان‌طور که از رابطه ۳ پیداست؛ از آنجا که جمله‌ی اول این رابطه نسبت به جمله‌ی دوم، یک عبارت بسیار کوچک است، لذا تغییر در جمله‌ی دوم حاصل جمع این دو جمله را نیز دستخوش تغییر تقریباً جدی خواهد کرد.

با توجه به رابطه ۴، استنباط یابد در مورد پارامتر E_{ν} و در مورد مدول برشی G_{ν} نیز صادق است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود کاهش ۲۳٫۷ درصدی در مورد این استحکام مؤید این نکته است که تحمل بار برشی در این لایه بیشتر بر عهده‌ی رزین است.

محاسبه‌ی ماتریس سفتی برای یک لایه‌ی کامپوزیتی

نامتقارن

این قسمت به بررسی ماتریس سفتی برای لایه‌های کامپوزیتی با چیدمان‌های لایه‌یی دلخواه اختصاص دارد. در این روش با استفاده از داده‌های مربوط به خواص یک لایه‌ی تک‌جهته می‌توان به خواص مکانیکی هر ترکیب دلخواه از لایه‌های کامپوزیتی دست یافت. یافتن داده‌های مربوط به یک لایه‌ی تک‌جهته می‌تواند از طریق آزمایش‌های استحکام رزی یک لایه و یا استفاده از نظریه‌های مایکرومکانیک باشد. همان‌طور که در بخش قبل به آن اشاره شد، نظریه‌های مایکرومکانیک با استفاده از خواص جداگانه‌ی الیاف و رزین، خواص لایه‌ی تک‌جهته را مورد بررسی قرار می‌دهد. هریک از خواص $E_{xx}, E_{yy}, E_{xy}, E_{\nu}$ را نیز می‌توان از طریق آزمایش محاسبه کرد.

در بخش قبل با استفاده از روابط مایکرومکانیک، خواص لایه‌یی $E_{xx}, E_{yy}, E_{xy}, E_{\nu}$ برای یک لایه‌ی تک‌جهته شیشه و پلی‌استر محاسبه شد. در این بخش با استفاده از این پارامترها خواص مکانیکی لایه‌های کامپوزیتی دلخواه به دست می‌آید. با استفاده از ماتریس سفتی یک لایه‌ی تک‌جهته‌ی کامپوزیتی می‌توان ماتریس سفتی هر لایه‌ی کامپوزیتی دلخواه را به دست آورد. ماتریس سفتی یک لایه‌ی تک‌جهته‌ی کامپوزیتی برابر است با [۱۸]:

$$Q = \begin{bmatrix} mE_{xx} & mE_{xy} & 0 \\ mE_{xy} & mE_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & E_{\nu} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$m = (1 - \nu_{xx}\nu_{yy})^{-1}$$

با استفاده از یک شناسه‌ی رایانه‌یی، ماتریس سفتی off-axis این لایه‌ی تک‌جهته برای کامپوزیت شیشه و پلی‌استر محاسبه شده است؛

برای کامپوزیت تابش نشده:

$$Q = \begin{bmatrix} 4,0273 & 0,2494 & 0 \\ 0,2494 & 1,3264 & 0 \\ 0 & 0 & 0,5556 \end{bmatrix} \times 10^{10} Pa$$

برای 10° ساعت تابش شده:

$$Q = \begin{bmatrix} 3,9458 & 0,1919 & 0 \\ 0,1919 & 1,0903 & 0 \\ 0 & 0 & 0,4239 \end{bmatrix} \times 10^{10} Pa$$

برای محاسبه‌ی ماتریس سفتی برای یک لایه‌ی کامپوزیتی دلخواه و نامتقارن با فرض ثابت بودن کرنش در بعد ضخامت لایه‌ها یک شناسه‌ی رایانه‌یی نوشته شده است که پس از محاسبه‌ی ماتریس سفتی برای لایه‌ی کامپوزیتی به محاسبه‌ی ثابت‌های مهندسی هر لایه می‌پردازد.

چون تابش فرابنفش رزی یک لایه‌ی کامپوزیتی به تغییر ضرایب استحکام یک لایه می‌انجامد، کامپوزیت مفروض را از حالت متقارن خارج کرده و به یک کامپوزیت هیبرید تبدیل می‌کند. بنابراین، بررسی و محاسبه‌ی ماتریس‌های سفتی و نرمی در کامپوزیتی که تحت تابش فرابنفش قرار گرفته باشد باید با فرض تغییر استحکام لایه‌ی اول (لایه‌یی که در معرض تابش قرار گرفته باشد) و در نتیجه یک کامپوزیت هیبرید انجام شود. به همین منظور، شناسه‌ی رایانه‌یی مذکور با فرض کامپوزیت‌های هیبرید نوشته شده است، به این معنی که امکان انتخاب ضرایب $\nu, E_1, E_2, E_3, E_{\nu}$ و G_{ν} برای هر کدام از تک‌لایه‌های تشکیل‌دهنده‌ی کامپوزیت در نظر گرفته شده است. در این برنامه ابتدا با استفاده از ضرایب ν, E_1, E_2, E_3 که تحت تأثیر خواص تغییر یافته‌ی رزین در قسمت قبل (از طریق آزمایش) محاسبه شده به محاسبه‌ی ماتریس‌های سفتی و نرمی off-axis برای یک تک‌لایه‌ی کامپوزیتی پرداخته می‌شود. سپس با استفاده از ماتریس‌های مذکور، ماتریس‌های سفتی و نرمی محاسبه و در پایان ثابت‌های مهندسی محاسبه می‌شوند. [۱۸]

مقایسه‌ی تغییر خواص استحکامی لایه‌ی کامپوزیتی

به دست آمده از شناسه‌ی رایانه‌یی با آزمایش

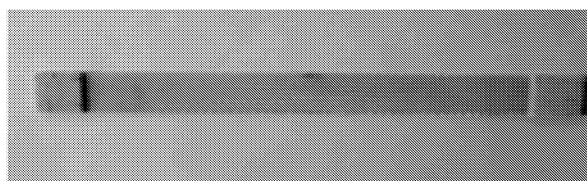
به منظور مستندسازی و مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدل مفروض، تعداد ۶ نمونه‌ی کامپوزیتی آزمون کشش (استاندارد ASTM-D3039) شیشه و پلی‌استر با چیدمان $[0/90]_S$ تهیه شد که از این تعداد ۳ نمونه به عنوان شاهد و ۳ نمونه نیز به مدت 10° ساعت در دستگاه آزمایش شرایط محیطی نگهداری شدند. شدت تابش برای این نمونه‌ها 800 وات بر متر مربع، دما ثابت و برابر 30° درجه‌ی سانتی‌گراد، و درصد رطوبت نیز برابر صفر منظور شد. نمونه‌ها از هر طرف به مدت 10° ساعت در معرض تابش قرار گرفتند. در شکل ۹ یک نمونه برای انجام آزمون کشش نشان داده شده است.

نتایج به دست آمده برای این کامپوزیت با استفاده از شناسه‌ی رایانه‌یی برای 10° ساعت تابش در زیر ارائه شده است:

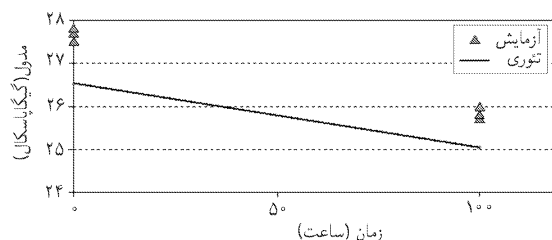
$$E_{\nu}^0 = 2,6536e10 Pa$$

$$E_{\nu}^0 = 0,5556e10 Pa \quad \text{برای نمونه‌های تابش نشده}$$

$$\nu_{\nu}^0 = 0,0932$$



شکل ۹. یک نمونه آزمون کشش [°/۹۰] کامپوزیت شیشه و پلی استر.



شکل ۱۰. نمودار نزولی مدول کششی E_p^0 بر حسب زمان برای [°/۹۰] شیشه / پلی استر با استفاده از کد رایانه‌ی و آزمایش.

$$E_p^0 = 275034e10 Pa$$

$$E_p^0 = 274239e10 Pa \quad \text{برای نمونه‌های ۱۰۰ ساعت تابش شده}$$

$$\nu_p^0 = 0.762$$

در شکل ۱۰ مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از آزمایش با نتایج حاصل از شناسه‌ی رایانه‌ی ارائه شده است:

مطابق آزمون‌های کشش انجام شده ملاحظه می‌شود که مدول کششی میانگین از ۲۷۶۹۹ گیگا پاسکال برای نمونه‌های تابش نشده به ۲۵۶۹ گیگاپاسکال برای نمونه‌های تابش شده رسیده است، و بدین ترتیب ۶۴۶ درصد افت را نشان می‌دهد. همچنین از تحلیل کامپوزیت [°/۹۰] با استفاده از شناسه‌ی رایانه‌ی مفروض پس از ۱۰۰ ساعت تابش:

الف) مدول کششی (E_p^0) ۵۶۶ درصد کاهش یافته است.

ب) مدول برشی (E_p^0) ۲۳۷ درصد کاهش یافته است.

بحث و نتایج

در این تحقیق برای به دست آوردن میزان و نحوه‌ی کاهش خواص استحکامی رزین پلی استر بر اثر تابش اشعه فرابنفش، این تغییر خواص روی نمونه‌های آزمون‌های استحکام (شکل ۱) که در سه بازه‌ی زمانی ۴۰، ۷۰ و ۱۰۰ ساعت در اتاقک آزمایش شرایط محیطی تحت تابش فرابنفش قرار گرفته بودند، بررسی شد. آزمون‌های استحکام کششی روی این رزین حاکی از آن است که:

۱. نمودار استحکام نهایی کششی نمونه‌های دمبلی شکل آزمون کشش برحسب زمان تابش یک نمودار نزولی است. میزان کاهش استحکام نهایی ۳۴/۸ درصد است، که مقدار قابل توجهی است.

۲. میزان کاهش در مدول کششی نمونه‌ها ۱۸/۹ درصد است.

۳. رزین پلی استر پس از ۱۰۰ ساعت تابش (معادل تقریبی یکسال در ناحیه‌ی فلوریدا) نوعی تغییر ماهیت از حالت نرم به ترد را تجربه می‌کند.

مقایسه‌ی نتایج آزمون‌های برش نمونه‌های آرکان نشان می‌دهد که پس از ۱۰۰ ساعت تابش (معادل یکسال):

۱. استحکام نهایی برشی ۱۸/۸ درصد کاهش یافت.

۲. مدول برشی نمونه‌ها ۲۵/۴ درصد کاهش یافت. تغییرات مدول برشی برحسب زمان نزولی است.

۳. افزودن جاذب‌های فرابنفش برای جلوگیری از کاهش خواص مکانیکی رزین مؤثر است. نتایج آزمون‌های کشش و برش بر روی نمونه‌های حاوی افزودنی نشان داد که نمودار تغییر خواص استحکامی در همه‌ی موارد یک نمودار تقریباً افقی است.

۴. رنگ ظاهری نمونه‌های پلی استر که ۷۰ و ۱۰۰ ساعت تابش شده بودند به قرمز متمایل شدند. نمونه‌های حاوی افزودنی هیچ تغییر رنگی را تجربه نکردند.

۵. افزودن جاذب‌های فرابنفش برای جلوگیری از کاهش خواص استحکامی کامپوزیت‌ها توصیه می‌شود.

۶. اثر تخریبی اشعه فرابنفش بر خواص استحکامی بسپارها یک اثر ناگهانی نیست. چنان که ملاحظه شد، خواص استحکامی در اکثر نمودارهای استحکام نمونه‌هایی که ۴۰ ساعت تحت تابش قرار گرفته بودند تغییر ناچیزی داشت. اما خواص استحکامی نمونه‌ها پس از ۱۰۰ ساعت تابش با کاهش قابل توجهی مواجه شد.

بررسی نمونه‌های آزمون فشار نشان می‌دهد که پس از ۱۰۰ ساعت تابش (معادل یکسال)، اثر تخریبی فرابنفش روی نمونه‌های با ضخامت کم، برخلاف نمونه‌های با ضخامت زیاد، قابل توجه است. در استحکام فشاری نمونه‌های با ضخامت ۳ میلی‌متر تغییر چندانی ایجاد نشد. از آنجا که ضخامت رزین در تک‌لایه‌های یک کامپوزیت بسیار کوچک است، لذا تغییر خواص در لایه‌ی اول کامپوزیت‌های در معرض تابش نسبتاً بزرگ خواهد بود.

مطالعه‌ی نظری بر اساس نتایج آزمایشی روی رزین و روش مابکرومکانیک نشان می‌دهد که:

۱. با فرض عدم تخریب الیاف تحت اثر تابش فرابنفش، میزان کاهش مدول کششی نمونه در راستای الیاف برای یک لایه‌ی تک‌جهته ناچیز است. این نکته مؤید این مطلب است که تحمل بار کششی یک لایه‌ی تک‌جهته در جهت طولی بر عهده‌ی الیاف است.

۲. مقدار کاهش مدول عرضی (راستای عمود بر جهت الیاف) برابر ۱۷/۵۴ درصد است که مقدار نسبتاً قابل توجهی است.

۳. مدول برشی لایه‌ی تک‌جهته نیز دستخوش کاهش نسبتاً بزرگی شد ۲۳/۷ درصد کاهش در مدول برشی تک‌لایه نشان‌دهنده‌ی تحمل بار برشی یک تک‌لایه توسط رزین است.

۱.۳. بررسی پدیده‌ی تابش اشعه‌ی ماوراء بنفش روی یک نمونه‌ی کامپوزیت شیشه / پلی استر [°/۹۰] نشان می‌دهد که:

مدول برشی نمونه پس از ۱۰۰ ساعت تابش ۲۳/۷ درصد کاهش می‌یابد. بدین ترتیب ملاحظه می‌شود که تغییر در خواص استحکام برشی نمونه‌های در معرض تابش نسبت به دیگر خواص استحکامی جدی‌تر است.

۲.۳. مقایسه نمودارهای تغییر خواص استحکامی و مدول (کشش و برش) نشان داد که نرخ کاهش خواص مربوطه با گذشت زمان کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

در این پروژه به بررسی و مدل‌سازی اثر تخریبی اشعه‌ی فرابنفش خورشید به‌عنوان یکی از عوامل مخرب محیطی، بر خواص مکانیکی یکی از کامپوزیت‌های پرکاربرد در کشور پرداخته شد. کامپوزیت پلی‌استر / شیشه یکی از موادی است که به‌دلیل فراوانی نسبی اجزای تشکیل‌دهنده‌ی آن، در صنایع هوافضا، کشتی‌سازی، خودروسازی، پتروشیمی، لوازم منزل، صندلی و میز، لوله‌کشی و غیره کاربرد گسترده‌ی دارد. اکثر این موارد، در تماس مستقیم با شرایط مخرب محیطی مانند اشعه‌ی فرابنفش، رطوبت و حرارت هستند.

بدیهی است که به‌دلیل ماهیت هیدروکربنی ماتریس در کامپوزیت‌های بسیاری، زنجیره‌های هیدروکربنی در مجاورت این عوامل با اکسیژن هوا ترکیب شده و موجب تغییر و عمدتاً تخریب در خواص استحکامی رزین و نتیجتاً کامپوزیت مربوطه می‌شوند. از میان عوامل محیطی مذکور، اشعه‌ی فرابنفش به‌دلیل انرژی بالای فوتون‌ها، بهترین تأمین‌کننده‌ی انرژی برای واکنش با اکسیژن و در نتیجه شکسته‌شدن

زنجیره‌های هیدروکربنی در رزین، و به‌عبارت دیگر مخرب‌ترین عامل محیطی رزی خواص رزین‌های بسیاری است. تغییر در خواص مولکولی و شیمیایی نهایتاً به تغییر ماهیت ماده و کاهش خواص مکانیکی و استحکامی آن می‌انجامد.

مدل‌سازی دقیق هر سه عامل محیطی به‌وسیله‌ی آزمون‌های شتاب‌دار در اتاقک‌های آزمایش شرایط محیطی تقریباً کار غیرممکنی است، که دلیل آن ماهیت متغیر و غیر قابل پیش‌بینی شرایط آب و هوایی به‌خصوص شدت تابش، دما و همچنین درصد رطوبت در یک ناحیه است، ولی با استفاده از مدل‌های تست شرایط محیطی می‌توان با درصد خطای قابل قبولی شرایط میانگین یک ناحیه را — که از اندازه‌گیری‌های هواشناسی به دست می‌آید — مدل‌سازی کرد.¹⁸

در این میان، دقت شبیه‌سازی در مدل اول آزمایش شرایط محیطی (فقط تابش فرابنفش) از بین مدل‌های دیگر بیشتر است. تک‌متغیر بودن آزمون، همچنین مدل‌سازی با استفاده از معادل‌سازی انرژی تابشی، و استفاده از منابع مصنوعی که با دقت قابل قبولی طیف تابشی رسیده به زمین را تولید می‌کنند از عوامل دقیق بودن این مدل است.

پانویس

1. photo stabilizers
2. ultra violet beam
3. photo-thermal
4. Hindered Amine Light Stabilizers (HALS)
5. hydroxyl phenyl benzotriazole

منابع

1. Jones, M.S. "Effects of UV radiation on building materials", Building Research Association of New Zealand (BRANZ), 26-28 March 2002, Antarctic Centre, Christchurch, New Zealand.
2. Andrady, A.L.; Hamid, S.H.; Hu, X. and Torikai, A. "Effects of increased solar ultraviolet radiation on materials", *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, **46**, pp. 96-103 (1998).
3. Owen, E.D. "Degradation and stabilization of PVC", Elsevier Applied Science, New York, p. 320, (1984).
4. Chin, J.W.; Martin, J. and Nguyen, T. "Gap analysis for durability of fiber reinforced polymer composites in civil infrastructure", Chapter 8, Effects of Ultraviolet (UV) Radiation, American Society of Civil Engineers (2001).
5. "Ultraviolet light degradation, technical note", Amoco Fabrics and Fibers Company, (1992).
6. Jacques, L.F.E. "Accelerated and outdoor/natural exposure testing of coatings", *Prog. Polym. Sci.*, **25**, pp. 1337-1362 (2000).

7. Andrady, A.L.; Hamid, H.S. and Torikai, A. "Effects of climate change and UV-B on materials", *Photochem Photobiol Sci.* **2**(1), pp. 68-72, (2003).
8. Bauer, D.R. "Interpreting weathering acceleration factors for automotive coatings using exposure models", *Polymer Degradation and Stability*, **69**, pp. 307-316 (2000).
9. Weathering Test Methods, <http://www.atlaswsg.com/testmeth.html>.
10. Bauer, D.R. "Global exposure models for automotive coating photo-oxidation", *Polymer Degradation and Stability*, **69**, pp. 297-306 (2000).
11. ASTM D 638-96, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.
12. ASTM D 3039-76, Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber-Resin Composites.
13. ASTM D 3410-87, Standard Test Method for Compressive Properties of Unidirectional Fiber-Resin Composites.
14. Adams, D.F.; Carlsson, A. and Byron Pipes, "Experimental characterization of advanced composites materials", CRC Press, (2003).
15. ASTM D 5071-91, Standard Practice for operating Xenon Arc Type Exposure Apparatus with Water for Exposure of Photodegradable Plastics.
16. Hyer, M.W. "Stress analysis of fiber-reinforced composite materials", McGraw-Hill Book Company (1997).
17. Agarwall, B.D. and Broutman, L.J. "Analysis and performance of fiber composites", John Wiley & Sons Inc., (1990).
18. Tsai, S.W. and Thomas Hahn, H. "Introduction to composite materials", Technomic Publishing Company, (1980).