

## اثر افزایش الیاف PP و ذرات نانوسیلیس بر خواص مکانیکی

### کامپوزیت‌های اپوکسی

شهرام مرادی دهقی\*، حسین کمالی\*\*، محمدرضا کوشش\*\*\*

حمید صادق‌زاده\*\*\*\*، الله‌داد شبابی\*\*\*\*\*، مهران دوکلو\*\*\*\*\*

#### چکیده

یکی از مهم‌ترین اهداف در صنعت کامپوزیت، یافتن مواد و بهینه‌سازی است که بتوان خواص کامپوزیت‌ها را بهبود بخشید. در این تحقیق، اثر افزایش الیاف پلی پروپیلن (PP) و همچنین ذرات نانوسیلیس بررسی شد. رزین اپوکسی با استفاده از روش لایه‌گذاری دستی با الیاف شیشه سوزنی CSM و الیاف کوتاه PP تقویت شد. با توجه به نتایج آزمون‌های خواص مکانیکی، شامل آزمون‌های ضربه، کشش و خمش، مشاهده شد که افزودن الیاف پلی پروپیلن در بهبود مقاومت ضربه‌پذیری کامپوزیت‌هایی که الیاف شیشه کم (۳۰ phr - ۲۲/۵) دارند، تأثیر مثبت، و بر روی کامپوزیت‌هایی که الیاف شیشه زیاد دارند (۳۷/۵ phr)، تأثیر منفی می‌گذارد. همچنین افزودن ذرات نانوسیلیس تا ۰/۴ phr مقاومت ضربه‌پذیری را افزایش می‌دهد و مقادیر بیشتر ذرات نانوسیلیس، تأثیر معکوس بر مقاومت ضربه‌پذیری دارد. همچنین، استحکام کششی، و مدول کششی، با

---

\* عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد تهران - شمال

\*\* کارشناس ارشد شیمی

\*\*\* مدرس دانشگاه آزاد شیراز

\*\*\*\* کارشناس ارشد شیمی

\*\*\*\*\* کارشناس ارشد شیمی دانشگاه پیام‌نور مرکز گیلان غربی

\*\*\*\*\* عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد تهران - شمال

افزایش الیاف پلی پروپیلن تا میزان معینی افزایش می‌یابد و اگر الیاف پلی پروپیلن از حد معینی بیشتر شود استحکام و مدول کششی کاهش می‌یابد. همچنین، افزایش ذرات نانوسیلیس تا ۰/۴ phr، استحکام و مدول کششی را افزایش می‌دهد، و در مورد آزمون خمش نیز مشاهده شد که با افزودن الیاف PP تا میزان مشخصی، استحکام خمشی و مدول خمشی افزایش می‌یابد، اما افزودن ذرات نانوسیلیس استحکام و مدول خمشی را کاهش می‌دهد.

### کلیدواژه

الیاف پلی پروپیلن، ذرات نانوسیلیس، رزین اپوکسی، پارچه الیاف سوزنی (نمدی)، ضربه، کشش، خمش.

### مقدمه

عده دارند. زمینه چندسازه دو نقش اساسی به عده دارد: انتقال بار به تقویت‌کننده و محافظت از آثار محیطی ناسازگار که عموماً اپوکسی‌ها از این نظر خوب عمل می‌کنند (فیروزش، ۱۳۷۹).

خواص گروه‌های شیمیایی موجود در رزین اپوکسی عبارت‌اند از:

پیوند اتری که مقاومت شیمیایی را موجب می‌شود، پیوند متیل سبب انعطاف و سختی زنجیره می‌شود، گروه هیدروکسیل عامل چسبندگی به سطح است، حلقه آروماتیک مقاومت دمایی و سختی را افزایش می‌دهد، و حلقه اپوکسید فقط در دو انتهای زنجیره قرار دارد که عامل ایجاد شبکه سه‌بعدی است (فره‌ویسکی [ترجمه]، ۱۳۸۲).

به منظور پخت محیطی رزین‌های اپوکسی، از آمین‌ها و پلی آمیدهای آلیفاتیک، و برای پخت حرارتی از آمین‌های آروماتیک استفاده می‌شود (بهشتی، ۱۳۸۴).

از ذرات نانوسیلیس به عنوان رویه، به منظور افزایش پیوند الیاف به زمینه استفاده می‌شود (Ramos et.al. 2005). رویه طوری انتخاب می‌شود که با تقویت‌کننده و زمینه، سازگاری

امروزه در بسیاری از کاربردهای مهندسی، به تلفیق خواص مواد نیاز است و امکان استفاده از یک نوع ماده که بتواند همه خواص مورد نظر را برآورده سازد، وجود ندارد. مواد کامپوزیت یا چندسازه راه‌حلی است که با استفاده از چند جزء مختلف، در خواص ماده بهبود حاصل می‌گردد؛ به نحوی که خواص کامپوزیت از هر کدام از اجزای تشکیل‌دهنده آن بهتر است، ضمن آنکه اجزای مختلف، کارایی یکدیگر را بهبود می‌بخشند (بهشتی، ۱۳۸۴).

کامپوزیت‌ها خواص مکانیکی برجسته‌ای داشته، از انعطاف‌پذیری مناسبی در طراحی برخوردارند و روش‌های ساخت آنها نسبتاً آسان است. کامپوزیت‌ها موادی سبک، مقاوم در برابر خوردگی و ضربه، دارای مقاومت خستگی عالی، مستحکم و بادوام‌اند (همان). رزین اپوکسی، متداول‌ترین ماده زمینه، برای چندسازه‌های پیشرفته در انواع مصارف است. اپوکسی‌ها به دلیل چسبندگی عالی، استحکام، جمع‌شدگی کم، محافظت در برابر خوردگی، تنوع در فرآورش و بسیاری از خواص دیگر، این نقش اساسی را بر

و در روش دیگر با نسبت‌های مختلف ذرات نانوسیلیس (۰/۴phr - ۰/۲ - ۰/۱) و مقدار ثابت از الیاف پلی پروپیلن (۳/۰phr) مخلوط می‌کنیم. ساخت چندسازه‌ها به روش لایه‌گذاری دستی انجام شد و بعد از تهیه قطعات کامپوزیتی، بر طبق استاندارد ASTM برای هریک از آزمون‌های خواص مکانیکی، قطعات را با دستگاه، برش می‌دهیم.

آزمون ضربه آیزود با شکاف ۰/۱inch بر طبق استاندارد ASTM D256 انجام شد که ابعاد نمونه‌ها طول ۶۴ mm و پهنا ۱۰/۱۶ mm = ۲/۵۴ - ۱۲/۷ دارند و ضخامت‌های بین ۳ الی ۱۳ میلی‌متر بر طبق این استاندارد مجاز است (Standard Test, 1998). با دستگاه آزمون ضربه آیزود انرژی جذب‌شده نرمال را اندازه‌گیری می‌کنیم.

برای آزمون کشش بر طبق استاندارد ASTM D 638-99 که به شکل دمبلی است و با طول ۱۶ mm و با پهنا ۱۹ mm بین ۱۳ mm و در ضخامت‌های کمتر از ۵ mm برش داده می‌شود و با دستگاه کشش استحکام کششی برحسب MPa و مدول کششی برحسب GPa اندازه‌گیری می‌شود (Standard Test, 1991).

برای آزمون خمش به روش سه‌نقطه‌ای، بر طبق استاندارد ASTM D 790 نمونه‌ها به اندازه‌هایی با طول ۱۰۰ mm و با پهنا ۱۳ mm و به ضخامت ۴/۸ mm برش داده می‌شود (Standard Test, 1992).

داشته باشد. غالباً مولکول‌های دارای دو گروه عاملی متفاوت در دو انتها، این منظور را برآورده می‌سازند. رویه مناسب برای الیاف شیشه و اپوکسی ممکن است در یک انتها، ترکیبی از گروه‌های آلی سیلیسیم سازگار با شیشه و در انتهای دیگر ترکیبی از یک آمین سازگار با اپوکسی داشته باشد و در نتیجه، بهبود لازم در خواص مکانیکی چندسازه‌ها را فراهم آورند (Albala et.al. 2004).

پلی پروپیلن یک بسپار خطی است که ساختاری شبیه به پلی اتیلن دارد، اما حضور گروه متیل چسبیده به انتهای کربن یک در میان بر روی استخوان‌بندی زنجیر، خواص بسپار را از جنبه‌های مختلف تغییر می‌دهد. وجود این حالت تا حدی سبب سخت شدن زنجیر شده، تقارن مولکولی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. اولین اثر منجر به افزایش دمای ذوب بلورین شده، درحالی‌که تأثیر بر تقارن مولکولی از این اثر می‌کاهد (امیدیان و وفائیان [ترجمه]، ۱۳۷۵).

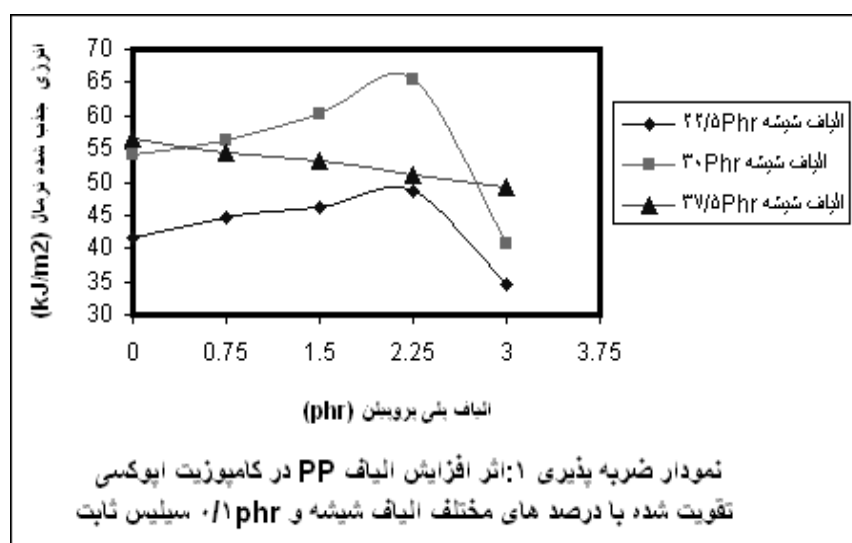
## مواد و روش‌ها

**مواد:** رزین اپوکسی Shell، هاردنر (سخت‌کننده) پلی آمید، الیاف شیشه سوزنی Chopped (CSM) strand Mat با وزن واحد سطح ۴۰۰ g/cm<sup>2</sup> محصول CNBM چین، الیاف پلی پروپیلن با طول ۱۲ mm، ذرات نانوسیلیس.

**روش‌ها:** ابتدا رزین اپوکسی و به نسبت مناسب از هاردنر پلی آمید را یک بار با ۰/۱ phr ذرات نانوسیلیس ثابت کرده و مقادیر متغیر از الیاف PP را (۰/۰۰ - ۰/۷۵ - ۱/۵۰ - ۲/۲۵ - ۳/۰۰phr)،

جدول ۱. انرژی جذب شده نرمال برحسب  $\text{kJ/m}^2$  با  $\text{phr}$  ۰/۱ سیلیس ثابت

الیاف PP الیاف شیشه	۰/۰۰ phr	۰/۷۵ phr	۱/۵۰ Phr	۲/۲۵ phr ۴۸/۵	۳/۰۰ phr
۲۲/۵ phr	۴۱/۷	۴۴/۸	۴۶/۱		۳۴/۷
۳۰/۰ phr	۵۴/۰	۵۶/۴	۶۰/۳	۶۵/۴	۴۰/۷
۳۷/۵ phr	۵۶/۷	۵۴/۵	۵۳/۱	۵۱/۲	۴۹/۱



## نتایج و بحث

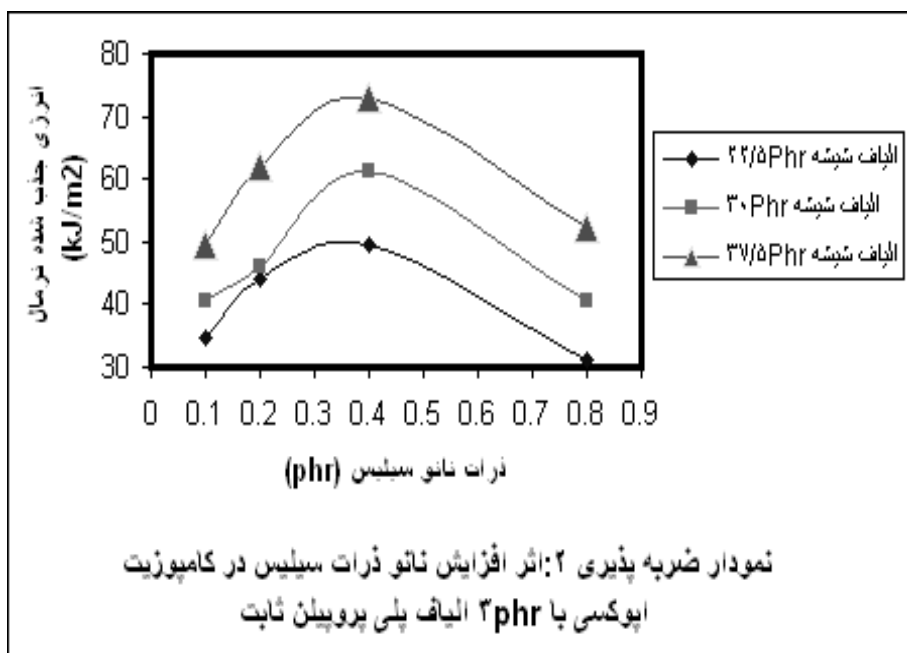
### آزمون ضربه

الیاف پلی پروپیلن در  $\text{phr}$  ۲/۲۵ بود. وقتی مقدار الیاف شیشه را از  $\text{phr}$  ۳۰/۰ به  $\text{phr}$  ۳۷/۵ افزایش دادیم، میزان بهینه، در  $\text{phr}$  ۰/۰۰ الیاف PP بود که نتیجه می گیریم افزودن الیاف PP برای نمونه هایی با الیاف شیشه تا  $\text{phr}$  ۳۰/۰، تأثیر مثبت و برای نمونه هایی با الیاف شیشه بیشتر از مقدار ذکر شده، تأثیر معکوس دارد

براساس نتایج به دست آمده (جدول ۱ و نمودار ۱) ملاحظه می شود که انرژی جذب شده نرمال برای  $\text{phr}$  ۲۲/۵ الیاف شیشه، بر اثر افزایش الیاف پلی پروپیلن از  $\text{phr}$  ۰/۰۰ تا  $\text{phr}$  ۳/۰۰ میزان بهینه در  $\text{phr}$  ۲/۲۵ الیاف پلی پروپیلن مشاهده شد و برای نمونه هایی با  $\text{phr}$  ۳۰ الیاف شیشه میزان بهینه برای

جدول ۲. انرژی جذب شده نرمال بر حسب  $\text{kJ/m}^2$  با  $\text{phr}$  ۳/۰۰ الیاف پلی پروپیلن ثابت

الیاف شیشه	۰/۱ Phr	۰/۲ phr	۰/۴ phr	۰/۸ phr
۲۲/۵ phr	۳۴/۷	۴۳/۹	۴۹/۷	۳۱/۳
۳۰/۰ Phr	۴۰/۷	۴۶/۲	۶۱/۴	۴۰/۶
۳۷/۵ Phr	۴۹/۵	۶۳/۰	۷۳/۰	۵۲/۲



تأثیر معکوس مشاهده می شود.

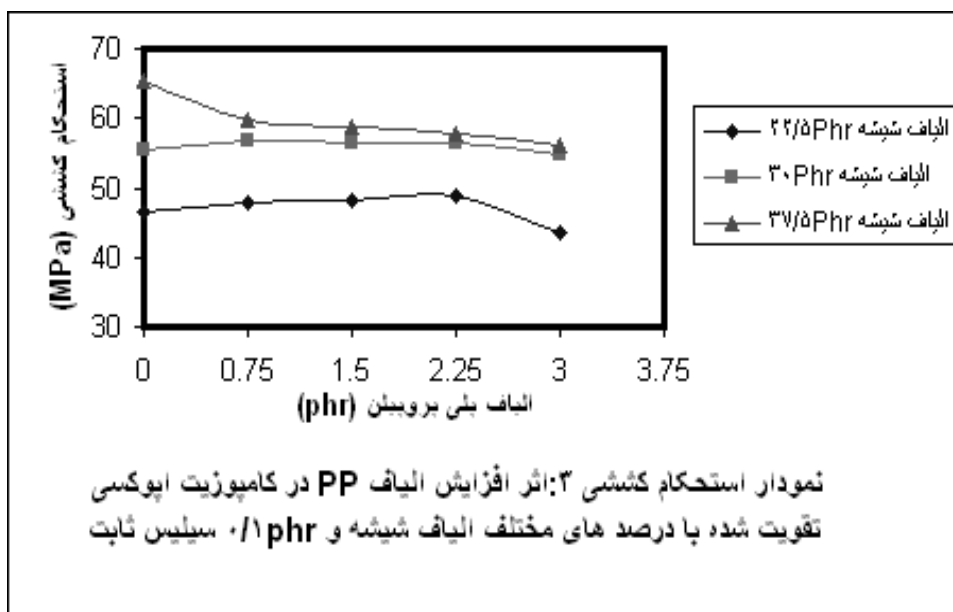
می توان نتیجه گرفت که اگر ذرات نانوسیلیس تا حد معینی بیشتر شود، اولاً الیاف و رزین همدیگر را کاملاً خیس نمی کنند؛ یعنی نوعی حالت اشباع شدگی ایجاد می شود. ثانیاً، انرژی جذب شده نرمال کاهش می یابد

بر طبق جدول و نمودار ۲ ملاحظه می شود که

اثر افزایش ذرات نانوسیلیس تا ۰/۴ phr انرژی جذب شده نرمال افزایش می یابد، زیرا ذرات نانوسیلیس پیوند بین الیاف شیشه و رزین اپوکسی را بیشتر می کند. اما وقتی مقدار ذرات نانوسیلیس را دو برابر می کنیم، یعنی تا ۰/۸ phr افزایش می دهیم،

جدول ۳. استحکام کششی بر حسب MPa با phr ۰/۱ سیلیس ثابت

الیاف شیشه	الیاف PP	۰/۰۰ phr	۰/۷۵ phr	۱/۵۰ phr	۲/۲۵ phr	۳/۰۰ Phr
۲۲/۵ phr		۴۶/۵	۴۷/۹	۴۸/۲	۴۸/۷	۴۳/۷
۳۰/۰ phr		۵۵/۵	۵۶/۹	۵۶/۶	۵۶/۳	۵۴/۷
۳۷/۵ Phr		۶۵/۵	۵۹/۹	۵۷/۸	۵۸/۸	۵۶/۱



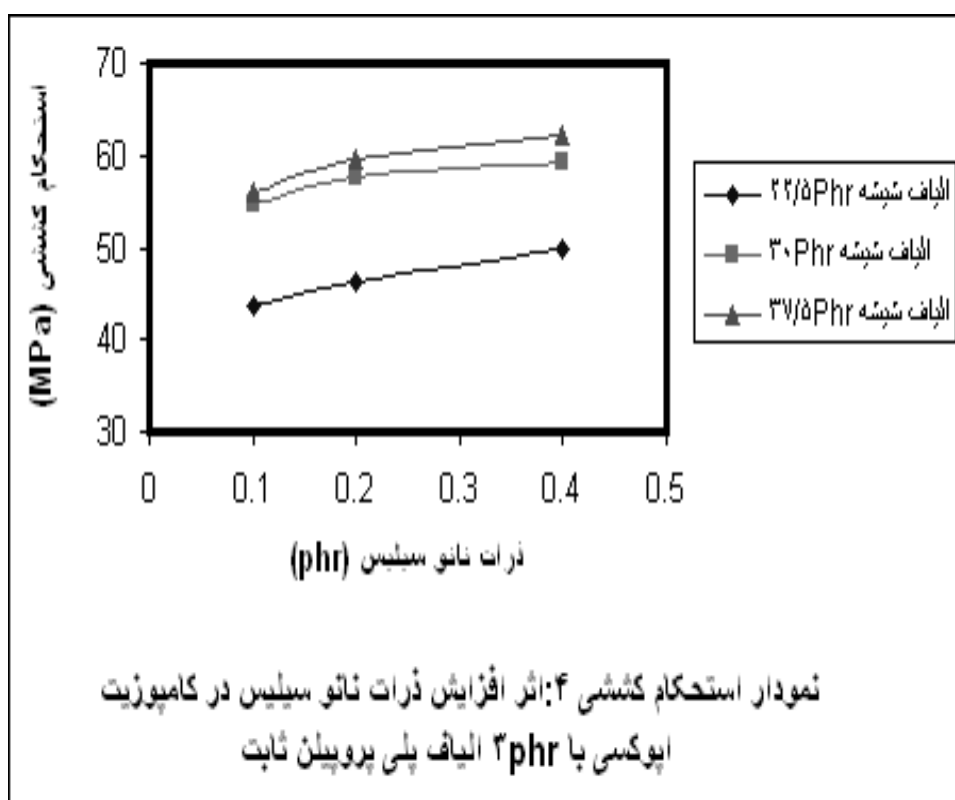
### آزمون کشش

بر طبق جدول ۳ و نمودار ۳ مشاهده می شود که استحکام کششی برای نمونه هایی با ۲۲/۵ phr الیاف شیشه، میزان بهینه افزایش الیاف PP، ۳۰/۰ phr می باشد، اما برای نمونه هایی با ۳۰/۰ phr الیاف شیشه، میزان بهینه افزایش الیاف PP، ۳۷/۵ phr مشاهده شد، و برای نمونه هایی با ۳۷/۵ phr الیاف شیشه، نمونه های بدون الیاف PP (phr)

۰/۰۰) بیشترین استحکام کششی را نشان می دهند؛ یعنی برای درصدهای پایین الیاف شیشه، افزایش الیاف PP استحکام کششی را بالا می برد، در حالی که در نمونه هایی با درصدهای الیاف شیشه بیشتر، کاهش الیاف PP استحکام کششی را بالا می برد.

جدول ۴. استحکام کششی برحسب MPa با ۳/۰۰ phr الیاف پلی پروپیلن ثابت

الیاف شیشه	سیلیس	۰/۱ phr	۰/۲ phr	۰/۴ Phr
۲۲/۵ Phr	۴۳/۷	۴۶/۴	۴۹/۷	
۳۰/۰ phr	۵۴/۷	۵۷/۸	۵۹/۲	
۳۷/۵ phr	۵۶/۱	۵۹/۶	۶۲/۳	

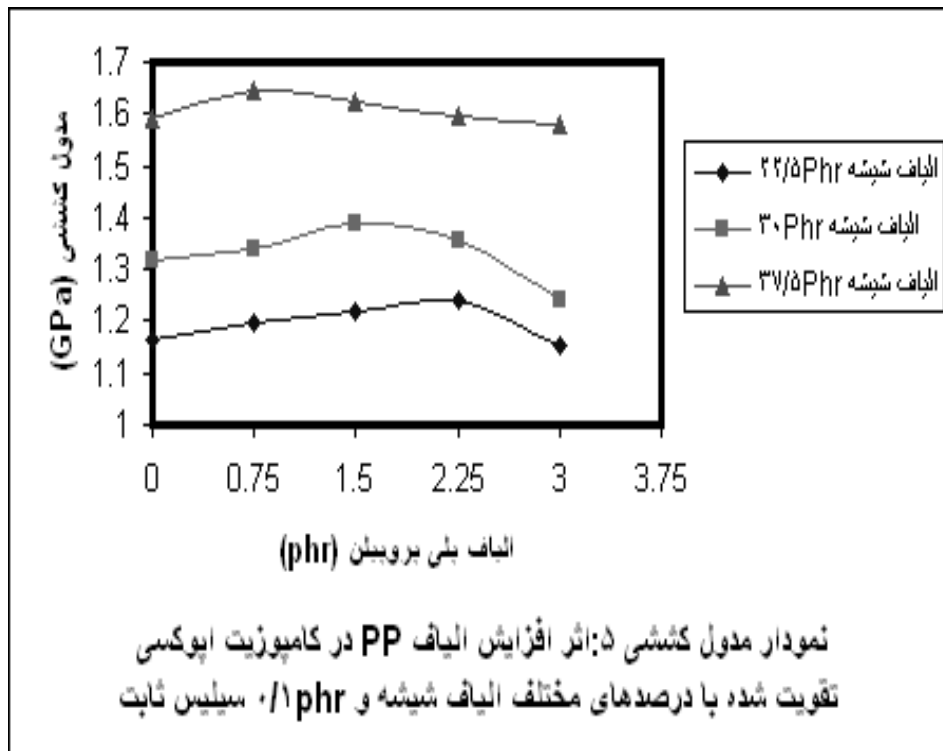


می‌دهد. این افزایش به این دلیل است که ذرات نانو سیلیس تنش بین الیاف و رزین را بالا می‌برد

بر طبق جدول و نمودار ۴ افزایش ذرات نانو سیلیس استحکام کششی را تا ۰/۴ phr افزایش

جدول ۵. مدول کششی برحسب GPa با phr ۰/۱ سیلیس ثابت

الیاف PP	۰/۰۰ phr	۰/۷۵ phr	۱/۵۰ phr	۲/۲۵ phr	۳/۰۰ phr
الیاف شیشه	۱/۱۶۲			۱/۲۳۹	
۲۲/۵ Phr		۱/۱۹۷	۱/۲۱۷		۱/۱۵۳
۳۰/۰ Phr	۱/۳۱۷	۱/۳۳۹	۱/۳۸۷	۱/۳۵۸	۱/۲۳۹
۳۷/۵ Phr	۱/۵۹۳	۱/۶۴۵	۱/۶۲۱	۱/۵۹۷	۱/۵۷۸



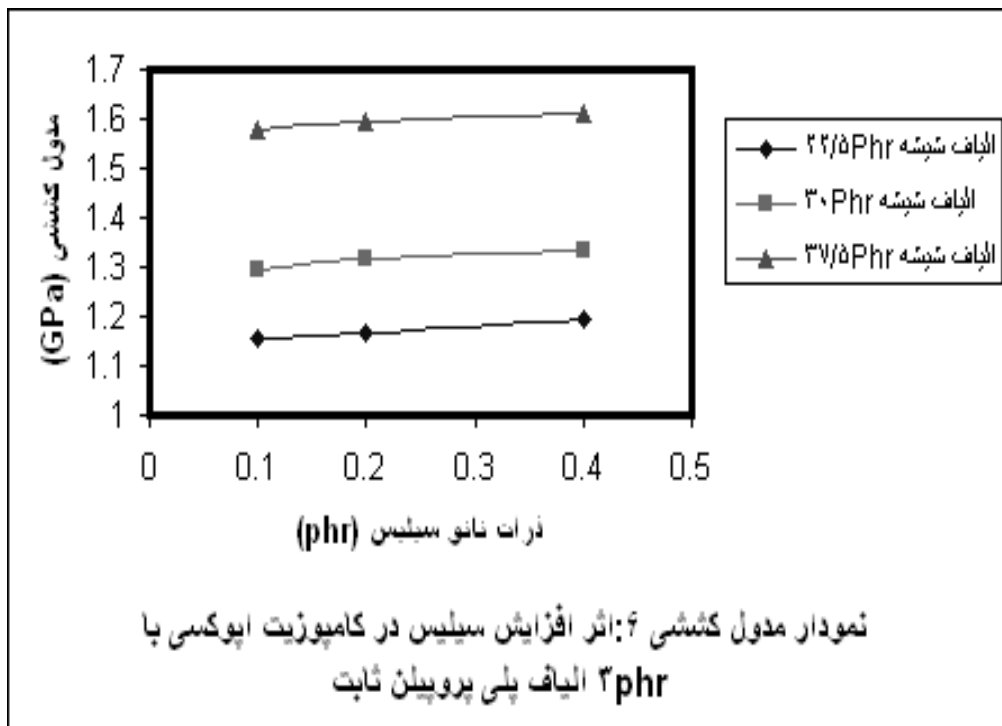
مشاهده شد. پس برای درصد‌های کم الیاف شیشه، افزودن الیاف PP نسبت تنش به کرنش را بالا می‌برد و در نتیجه مدول کششی نیز افزایش می‌یابد، اما برای درصد‌های بالای الیاف شیشه، کاهش الیاف PP نسبت تنش به کرنش را افزایش می‌دهد.

برای مدول کششی در نمونه‌هایی با ۲۲/۵ phr الیاف شیشه، میزان بهینه اثر افزایش الیاف PP در ۲/۲۵ phr بود و برای نمونه‌هایی با ۳۰/۰ phr الیاف شیشه، میزان بهینه بر اثر افزایش الیاف PP در ۱/۵۰ phr است. وقتی الیاف شیشه را به ۳۷/۵ phr رساندیم، میزان بهینه الیاف PP، در ۰/۷۵ phr



جدول ۶: مدول کششی برحسب  $\text{phr}$  با ۳ الیاف پلی پروپیلن ثابت

الیاف شیشه	سیلیس	۰/۱ Phr	۰/۲ phr	۰/۴ phr
۲۲/۵ Phr	۱/۱۵۳	۱/۱۶۷	۱/۱۹۳	
۳۰/۰ Phr	۱/۲۹۳	۱/۳۱۸	۱/۳۳۲	
۳۷/۵ Phr	۱/۵۷۸	۱/۵۹۴	۱/۶۰۹	

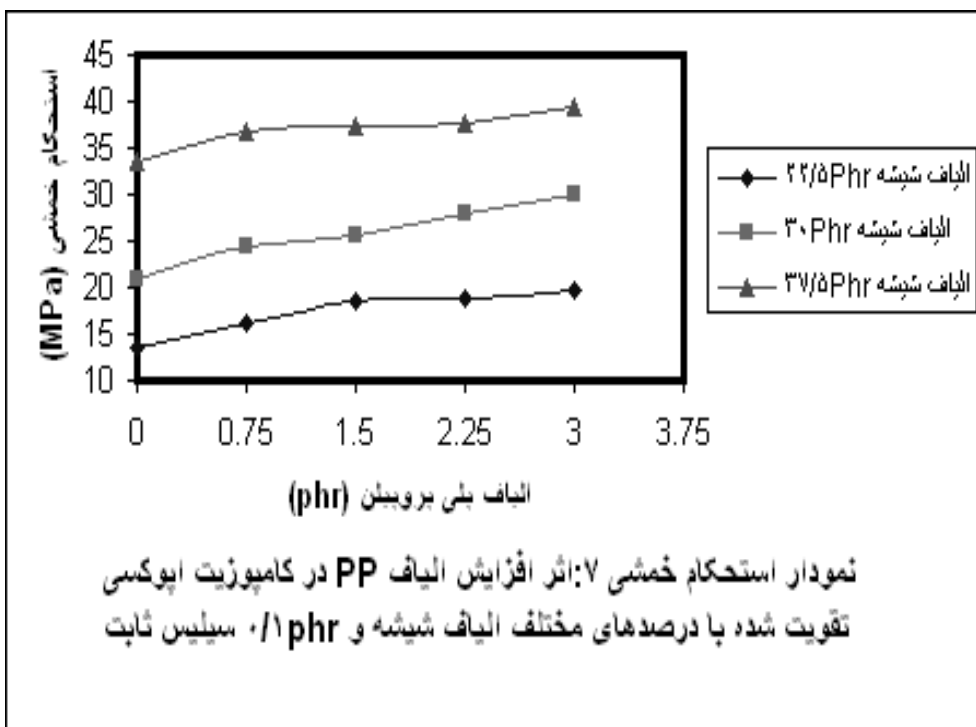


کششی افزایش می یابد، زیرا نیرو بر واحد سطح افزایش می یابد.

برطبق جدول و نمودار ۶ ملاحظه می شود که بر اثر افزایش ذرات نانو سیلیس بر روی درصد های مختلف الیاف شیشه با ۳/۰۰ phr الیاف PP، مدول

جدول ۷. استحکام خمشی بر حسب MPa با phr ۰/۱ سیلیس ثابت

الیاف PP	۰/۰۰ phr	۰/۷۵ phr	۱/۵۰ phr	۲/۲۵ phr	۳/۰۰ phr
الیاف شیشه				۱۸/۸۳	
۲۲/۵ Phr	۱۳/۴۹	۱۶/۱۰	۱۸/۳۹		۱۹/۵۷
۳۰/۰ Phr	۲۰/۷۸	۲۴/۳۷	۲۵/۶۳	۲۷/۹۱	۳۰/۱۳
۳۷/۵ phr	۳۳/۶۵	۳۶/۷۹	۳۷/۳۱	۳۷/۶۵	۳۹/۵۳



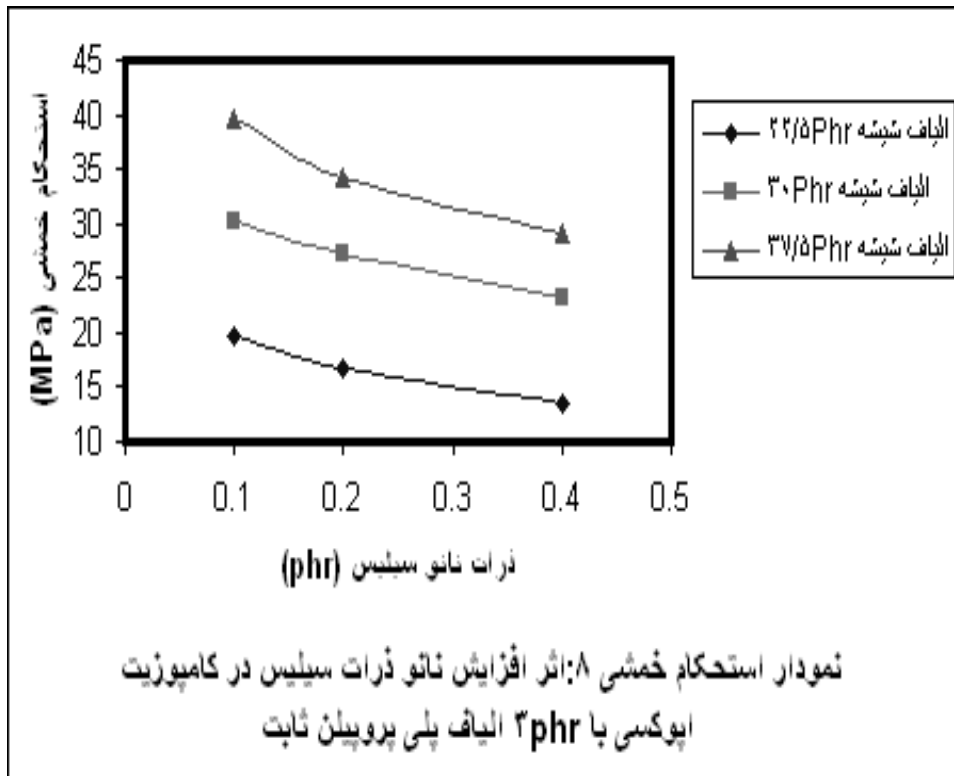
### آزمون خمش

می یابد؛ به این دلیل که با افزایش الیاف PP تنش بین الیاف شیشه پخش می شود و در نتیجه استحکام خمشی افزایش پیدا می کند.

همان طور که در نمودار و جدول ۷ مشاهده می شود، استحکام خمشی، هم با افزایش الیاف شیشه و هم با افزایش الیاف پلی پروپیلن افزایش

جدول ۸. استحکام خمشی برحسب MPa با ۳/۰۰ phr الیاف پلی پروپیلن ثابت

الیاف شیشه	۰/۱ phr	۰/۲ phr	۰/۴ phr
۲۲/۵ phr	۱۹/۵۷	۱۶/۸۶	۱۳/۴۰
۳۰/۰ phr	۳۰/۱۳	۲۷/۳۵	۲۳/۱۸
۳۷/۵ phr	۳۹/۵۳	۳۴/۱۳	۲۹/۲۲

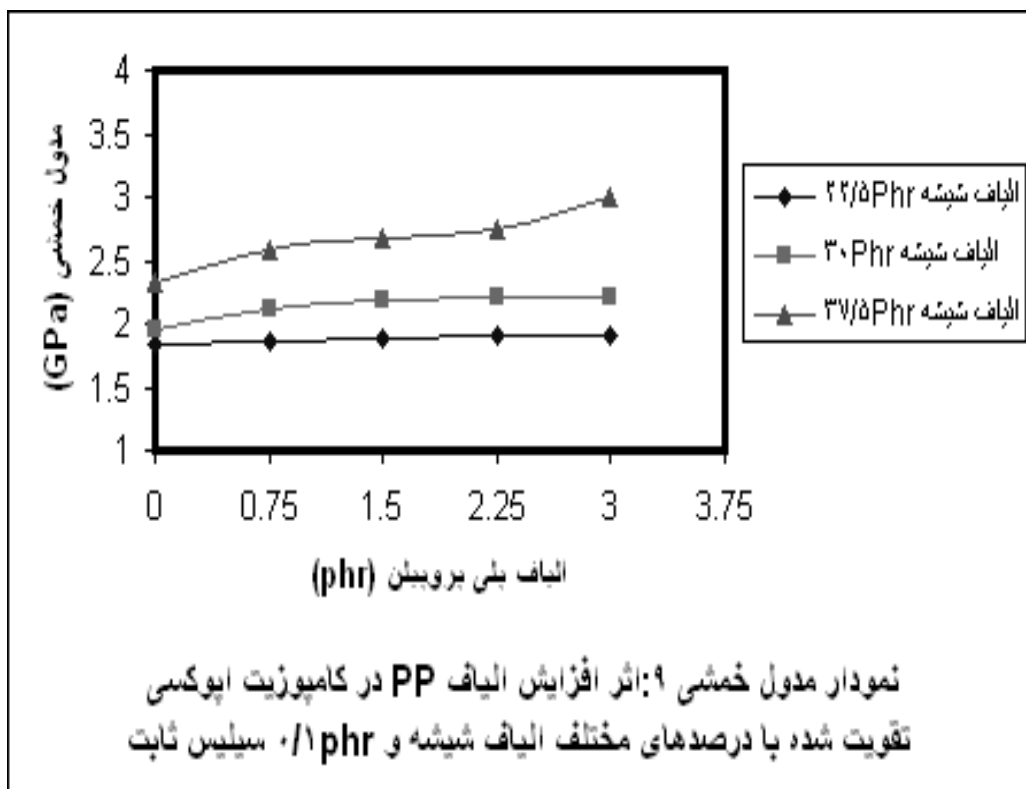


زیرا ذرات نانوسیلیس تنش را کاهش می‌دهند و در نتیجه استحکام خمشی کاهش می‌یابد.

بر طبق جدول و نمودار ۸ افزایش ذرات نانوسیلیس استحکام خمشی را کاهش می‌دهد،

جدول ۹. مدول خمشی برحسب GPa با phr ۰/۱ سیلیس ثابت

الیاف PP	الیاف شیشه	۰/۰۰ Phr	۰/۷۵ phr	۱/۵۰ phr	۲/۲۵ phr	۳/۰۰ phr
۲۲/۵phr		۱/۸۳۳	۱/۸۵۹	۱/۸۸۹	۱/۹۰۰	۱/۹۱۳
۳۰/۰Phr		۱/۹۴۹	۲/۱۰۹	۲/۱۸۷	۲/۱۹۹	۲/۲۱۴
۳۷/۵Phr		۲/۳۱۹	۲/۵۷۲	۲/۶۷۴	۲/۷۳۸	۲/۹۹۴

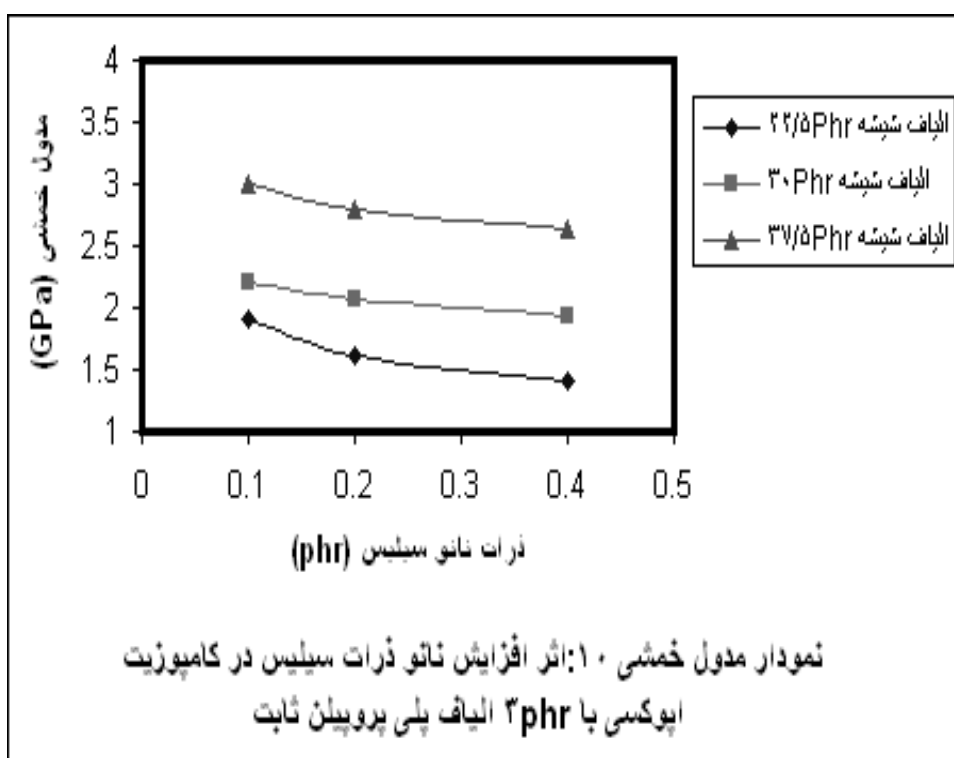


است که نیرو افزایش می‌یابد و چون نیرو با تنش رابطه مستقیم دارد، در نتیجه مدول خمشی افزایش می‌یابد.

برطبق نتایج مندرج در جدول و نمودار ۹ مدول خمشی با افزایش الیاف شیشه و الیاف پلی پروپیلن افزایش می‌یابد. دلیل این افزایش این

جدول ۱۰. مدول خمشی برحسب GPa با ۳/۰۰ phr الیاف پلی پروپیلن ثابت

الیاف شیشه	۰/۱ phr	۰/۲ phr	۰/۴ phr
۲۲/۵ phr	۱/۹۱۳	۱/۶۲۵	۱/۴۰۳
۳۰/۰ Phr	۲/۲۱۴	۲/۰۷۷	۱/۹۳۳
۳۷/۵ phr	۲/۹۹۴	۲/۷۸۹	۲/۶۳۱



تأثیر مثبت دارد، اما برای درصدهای بیشتر الیاف شیشه، افزودن الیاف پلی پروپیلن تأثیر منفی می‌گذارد. همچنین، افزایش ذرات نانو سیلیس، به میزان معینی، ضربه‌پذیری را افزایش می‌دهد، اما اگر ذرات نانو سیلیس از این میزان معین، بیشتر شود، تأثیر معکوس می‌گذارد.

۲. همچنین می‌توان با افزایش مقدار معینی از الیاف پلی پروپیلن به نمونه‌هایی با درصدهای کم الیاف شیشه، استحکام و مدول کششی نمونه‌ها را

بر طبق نتایج مندرج در جدول و نمودار ۱۰ با افزایش ذرات نانو سیلیس مشاهده می‌شود که مدول خمشی کاهش پیدا می‌کند. دلیل این کاهش این است که تنش کاهش و کرنش افزایش پیدا می‌کند، در نتیجه مدول خمشی کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

۱. در آزمون ضربه، برای درصدهای پایین و متوسط الیاف شیشه، افزودن الیاف پلی پروپیلن

پروپیلن، استحکام و مدول خمشی افزایش می‌یابد، زیرا با افزایش الیاف پلی پروپیلن نیروهای خمشی، که عمود بر محور طولی نمونه اعمال می‌شود، افزایش می‌یابد، اما با افزایش ذرات نانو سیلیس، مرکز تغییر شکل، کاهش و در نتیجه استحکام و مدول خمشی کاهش می‌یابد.

افزایش داد، به طوری که با استحکام و مدول کششی نمونه‌هایی با درصدهای بالای الیاف شیشه برابری کنند. همچنین، با افزایش مقدار معینی از ذرات نانوسیلیس می‌توان استحکام و مدول کششی را بهبود بخشید.

۳. برای آزمون خمش، با افزایش الیاف پلی

### منابع

قره‌ویسکی، غلامرضا (۱۳۸۲)، شناخت رنگ [ترجمه]، انتشارات نیکتاب؛ امیدیان، حسین و مهدی وفائیان (۱۳۷۵)، مواد پلاستیک [ترجمه]، مرکز نشر دانشگاهی؛

بهشتی، محمدحسین و امیرمسعود رضا دوست (۱۳۸۴)، پلاستیک‌های تقویت‌شده (کامپوزیت‌ها)، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران؛ فیروزمنش، محمدرضا (۱۳۷۹)، مواد کامپوزیت با نگرشی بر روش‌های نوین آنالیز حرارتی، انتشارات دانش؛

**Albala, R. et.al.** (2004), "Fluorescent labels to study thermal transition in epoxy/silica composites", *Journal of Colloid Interface Science* 277: 71 – 78;

Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics (1998), No. 256-297;

**Ramos, Valeria D. et.al.** (2005), "Modification of epoxy resin: a comparison of different types of elastomer", *Polymer Testing* 24: 387-394;

Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics (1999), No. D638-699;

Standard Test Methods for Flexural Properties of Un reinforced and Reinforced Plastics and Electrical Isolating Materials (1992), No. D790-792 ■

Standard Test Methods for Determining the