



خواص کششی کامپوزیت‌های انعطاف‌پذیر پایه لاتکس تقویت‌شده با الیاف پنبه در حضور آلیاژهای حافظه‌دار

کاوه بستام¹، افشین زین‌الدینی^{2*}

1- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه

2- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه

* کرمانشاه، صندوق پستی 67189-97551 zeinedini@iauksh.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله:

دریافت:

پذیرش:

کلیدواژگان

کامپوزیت، لاتکس، الیاف پنبه، آلیاژ حافظه‌دار، خواص کششی

هدف اصلی این مقاله، تعیین خواص کششی کامپوزیت‌های انعطاف‌پذیر طبیعی است. برای ساخت این کامپوزیت‌ها، الیاف طبیعی پنبه و لاتکس به ترتیب بعنوان تقویت‌کننده و زمینه استفاده شدند. در گام اول، نمونه‌های لاتکس خالص ساخته شدند و تحت بار کششی آزمایش شدند. در مرحله بعد با استفاده از الیاف پنبه، لاتکس تقویت گردید و نمونه‌های ساخته‌شده تحت بار کششی قرار گرفتند. همچنین، از آلیاژ حافظه‌دار نیتینول برای بهبود خواص کششی لاتکس خالص و کامپوزیت‌های لایه‌ای پنبه/لاتکس استفاده گردید. لذا، یک، دو یا سه سیم نیتینول در نمونه لاتکس خالص و کامپوزیت‌های پنبه/لاتکس بکار برده شدند. نتایج مطالعات تجربی نشان دادند که در حضور الیاف طبیعی پنبه، استحکام لاتکس از 0.93 به 13.51 مگاپاسکال افزایش پیدا کرد. بعلاوه، مشاهده شد که به ازای افزودن یک، دو و سه سیم نیتینول، استحکام کششی نهایی نمونه‌های لاتکس خالص بطور تقریبی به ترتیب 70، 500 و 800 درصد افزایش می‌یابد. در حالیکه استحکام کششی نهایی کامپوزیت‌های لایه‌ای به ازای افزودن یک، دو و سه سیم نیتینول بطور تقریبی به ترتیب 2، 20 و 40 درصد افزایش می‌یابد. همچنین، مقایسه نتایج این تحقیق با مطالعات سایر محققین نشان می‌دهد که با کامپوزیت‌های پنبه/لاتکس تقویت‌شده با سیم نیتینول، استحکام کششی این ماده انعطاف‌پذیر از چرم‌های طبیعی و مصنوعی بطور قابل توجهی بزرگ‌تر است.

Tensile properties of flexible latex-based composites reinforced by cotton fibers in the presence of shape memory alloys

Kaveh Bastam¹, Afshin Zeinedini^{1*}

1- Department of Mechanical Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran

* P.O.B. 67189-97551, Kermanshah, Iran, zeinedini@iauksh.ac.ir

Keywords

Composites, Latex, Cotton fiber, Shape memory alloy, tensile properties

Abstract

The main purpose of this paper is to determine the tensile properties of natural flexible composites. In order to fabricate the composites, the cotton fibers and the latex were used as the reinforcement and matrix, respectively. At the first step, the latex samples were manufactured and tested under tensile loading. In the next step, using the cotton fiber the latex was reinforced and then tested under tensile loading. In addition, the NiTi shape memory alloy (SMA) wire was used to improve the tensile properties of the pure latex and the cotton/latex laminated composites. Therefore, one, two or three NiTi wires were used in the pure latex and cotton/epoxy composites samples. The results of experimental study displayed that in the presence of cotton fiber, the ultimate tensile strength of pure latex was increased from 0.93 to 13.51 MPa. Moreover, it was observed that due to adding one, two or three NiTi wires, the ultimate strength of the pure latex was enhanced almost 70, 500 and 800%, respectively. However, the ultimate tensile strength of the cotton/epoxy laminated composites in the presence of one, two and three NiTi wires was increased almost 2, 20 and 40%, respectively. In addition, comparison of the current research results with the other researchers' investigations manifests that the cotton/epoxy composites reinforced by NiTi wire, the tensile strength of this flexible material is greater than the tensile strength of natural and artificial leathers.

1- مقدمه

امروزه کامپوزیت‌ها از جایگاه ویژه‌ای در صنایع مختلف همچون هوافضا، خودروسازی، ساختمان‌سازی و امثال این‌ها برخوردار هستند. دسته‌ای از کامپوزیت‌های لایه‌ای، کامپوزیت‌های انعطاف‌پذیر هستند. کامپوزیت‌های انعطاف‌پذیر همانند دیگر کامپوزیت‌های لایه‌ای می‌توانند کاربردهای فراوانی داشته باشند. فاز زمینه در این دسته از کامپوزیت‌ها دارای خاصیت ارتجاعی قابل توجهی است. مدت زمان زیادی نیست که به کامپوزیت‌های انعطاف‌پذیر پرداخته شده است و مطالعه، ساخت و آزمایش آن‌ها بخصوص در کشورهای صنعتی دنیا صورت گرفته است. کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف طبیعی نیز در سالیان اخیر مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. لذا در ادامه به بررسی مطالعات صورت گرفته در خصوص کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف طبیعی، زمینه‌های انعطاف‌پذیر و آلیاژهای حافظه‌دار پرداخته شده است.

1-1- الیاف طبیعی

در دهه‌های اخیر، نگرانی دانشمندان در خصوص آلودگی زیست‌محیطی ناشی از استفاده الیاف مصنوعی، باعث ورود کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف طبیعی به بازار جهانی شده است. الیاف طبیعی به دلیل چگالی کمتر، دارا بودن قابلیت زیست‌تخریب‌پذیری و تجدیدشوندگی نسبت به الیاف مصنوعی برتری دارند. وزن کم و حجم بالای الیاف طبیعی در مقایسه با الیاف مصنوعی در کامپوزیت‌های پلیمری، بهره‌وری مصرف سوخت و کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای در صنایع مختلف را سبب گردیده است. در بین الیاف طبیعی، الیاف گیاهی بیشترین کاربرد را در کامپوزیت‌ها دارند. از جمله الیاف طبیعی می‌توان به کتان، کناف، سیسال، نارگیل، شاهدانه و امثال آن‌ها اشاره کرد [1]. این الیاف، بر اساس اینکه از کدام قسمت گیاه گرفته شده‌اند، به سه دسته الیاف میوه مثل نارگیل و پنبه، الیاف پوست یا ساقه مثل کناف، کتان و بوته شاهدانه، الیاف برگ همچون سیسال و آناناس تقسیم می‌شوند. در سال‌های اخیر محققین مطالعاتی بر کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف طبیعی انجام داده‌اند که به تعدادی از آن‌ها در ادامه اشاره شده است. الهام مرادی و همکاران [2] خواص کششی، خمشی و برشی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با سه نوع الیاف طبیعی پنبه، پشم و کنف را به دست آوردند. نتایج مطالعات تجربی نشان می‌دهد که نسبت استحکام ویژه تحت بار کششی کامپوزیت‌های پنبه/اپوکسی به کامپوزیت‌های کنف/اپوکسی و پشم/اپوکسی به ترتیب برابر 1.71 و 4.47 است. تحت بار برشی، استحکام ویژه نمونه‌ها به ترتیب با تغییر الیاف کنف و پشم به پنبه نیز 1.24 و 2.45 برابر بزرگ‌تر گردید. همچنین، استحکام خمشی ویژه نمونه‌های پنبه/اپوکسی به ترتیب 1.42 و 2.34 برابر بزرگ‌تر از نمونه‌های کنف/اپوکسی و پشم/اپوکسی به دست آمد. علاوه، انرژی جذب شده ویژه مربوط به چندلایه‌های پنبه/اپوکسی تحت بار کششی 2.7 برابر بزرگ‌تر از مقدار مربوط به چندلایه‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه است. جان و همکاران [3] مطالعاتی را پیرامون الیاف ترکیبی سیسال و نخل، و تأثیر آن بر خواص کششی کامپوزیت‌های زمینه لاستیک طبیعی انجام دادند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش نسبت حجمی الیاف سیسال تا حدود 70 درصد از کل الیاف ترکیبی، بیشترین مقادیر استحکام و مدول کششی کامپوزیت به دست می‌آیند. بالی و همکاران [4] مطالعاتی پیرامون رفتار فشاری و کششی در راستای الیاف کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف طبیعی کتان و جوت انجام داده‌اند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان می‌دهد استحکام فشاری با کسر حجمی الیاف افزایش می‌یابد. پورتلا و همکارانش [5] مطالعاتی پیرامون استفاده از الیاف پنبه و یا ترکیبی از شیشه

و پنبه برای ساخت کامپوزیت‌های پایه پلی‌استر غیراشباع انجام داده‌اند. در این تحقیق، خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها به دست آمده است و نتایج نشان می‌دهد که در مقایسه با کامپوزیت‌های تقویت‌شده با یک نوع الیاف، برای کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف ترکیبی خواص مکانیکی قابل قبولی اندازه‌گیری شدند. علاوه، تحت بارهای دینامیکی، کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف ترکیبی شیشه/پنبه خواص مکانیکی بهتری را نتیجه دادند. جمال و همکارانش [6] مطالعاتی پیرامون استفاده از الیاف شیشه بازیافتی و ترکیب آن با الیاف کنف به عنوان تقویت‌کننده مواد کامپوزیتی به جای الیاف شیشه انجام داده‌اند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که کامپوزیت‌های تقویت‌شده با ترکیبی از الیاف شیشه و کنف بازیافتی و کنف بافته‌شده در مقایسه با کامپوزیت‌های الیاف شیشه و کنف بافته‌شده، استحکام خمشی و مدول خمشی بالاتری دارد. رامش و همکارانش [7] مطالعاتی در مورد امکان استفاده از الیاف طبیعی کنف بعنوان جایگزینی الیاف مصنوعی انجام دادند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان می‌دهد در آینده الیاف طبیعی برای ساخت کامپوزیت‌ها جای الیاف مصنوعی مثل شیشه و کربن را می‌گیرند. حیدری شاهملکی و زین‌الدینی [8] در تحقیقی برای ساخت هسته و پوسته‌های ساندویچ پل‌ها از الیاف گیاهی پنبه و رزین اپوکسی استفاده کردند. این محققین از هسته موجی دو طرفه برای ساخت ساندویچ پل‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف طبیعی استفاده کردند. به علاوه، برای ارزیابی اثر نوع راسنا، انواع مختلفی از هسته‌های موجی یک‌طرفه شامل عرضی یا طولی با کمان رو به بالا یا پایین در نظر گرفته شده است. ساندویچ پل‌ها تحت بارگذاری خمشی سه نقطه قرار گرفته‌اند. نتایج تجربی نشان دادند که ساندویچ پل‌ها با هسته موجی دو طرفه تحت بارگذاری خمشی نسبت به ساندویچ پل‌ها با هسته یک‌طرفه خواص مکانیکی قابل توجهی دارد.

1-2- ماتریس‌های انعطاف‌پذیر

لاتکس پراکندگی پایدار ذرات بسیار ریز پلیمری در یک محلول آبی است که در طبیعت یافت می‌شود. لاتکس موجود در طبیعت، مایعی است سیال که در ده درصد از گیاهان گل‌دار یافت می‌شود که این ماده شیرین‌رنگ با قرار گرفتن در معرض هوا سفت می‌شود و به رنگ زرد در می‌آید. با خراشیدن پوست نوعی درخت شیره آن را جمع‌آوری کرده و مورد استفاده قرار می‌دهند [9]. بانگ و همکارانش [10] مطالعاتی را پیرامون کامپوزیت‌های انعطاف‌پذیر طبیعی ساخته‌شده با لاستیک طبیعی و الیاف چوب انجام دادند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد تمام کامپوزیت‌های ساخته‌شده توسط این روش دارای استحکام مناسبی هستند. سووت [11] مطالعاتی را پیرامون اثر حرارت بر خواص مکانیکی لاتکس انجام داد. ری و همکارانش [12] مطالعاتی پیرامون استفاده از لاتکس بعنوان لایه میانی در کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف جوت انجام دادند. کامپوزیت‌های جوت/وینیل‌استر بدون لایه میانی از ترکیب 35 درصد الیاف جوت و 65 درصد رزین وینیل‌استر ساخته شدند. در کامپوزیت‌های دارای لایه میانی، 30 درصد از رزین وینیل‌استر با لاتکس جایگزین شد. نتیجه مطالعات آن‌ها نشان می‌دهد که استحکام و مدول کششی کامپوزیت با وجود لایه میانی به ترتیب 66 و 93 کاهش یافته در حالیکه انرژی شکست 183 درصد افزایش یافته است.

1-3- آلیاژ حافظه‌دار

یکی از مشکلات مربوط به کامپوزیت‌های انعطاف‌پذیر و همچنین کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف طبیعی خواص مکانیکی پایین‌تر آن‌ها نسبت به کامپوزیت‌های لایه‌ای مرسوم است. روش‌های مختلفی برای بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌های لایه‌ای وجود دارد. یکی از این روش‌ها،

2- مواد و روش‌ها

1-2- مواد

در این تحقیق از لاتکس طبیعی %60 HA با چگالی 73 کیلوگرم بر مترمکعب از محصولات شرکت ماردک^۲ کشور مالزی استفاده شد. از الیاف متقال بعنوان فاز تقویت‌کننده استفاده شد. الیاف پنبه نوعی پارچه بافته‌شده است که قرن‌هاست در بسیاری از محصولات پارچه‌ای استفاده شده است. الیاف پنبه یا به اصطلاح متقال پارچه‌ای بسیار مقاوم، محکم و سبک است. در تحقیق حاضر از الیاف طبیعی و بافته‌شده پنبه استفاده گردید که در شکل 1 نشان داده شده است. این الیاف دارای چگالی سطحی 171 گرم بر مترمربع است. در بخش دیگری از این تحقیق از آلیاژ حافظه‌دار نیتینول برای تقویت لاتکس و یا کامپوزیت‌های پنبه/لاتکس استفاده شد. در شکل 2 تصویری از سیم‌های نیتینول استفاده شده در ساخت نمونه‌ها آمده است. هر حلقه از این سیم‌ها طولی برابر 15 فوت دارند و دارای قطر مفتول 0.3 میلی‌متر هستند. این آلیاژ حافظه‌دار ساخت شرکت هایلند متال کشور آمریکا است.



Fig. 1 The cotton fiber used in this research

شکل 1 الیاف پنبه استفاده شده در این تحقیق



Fig. 2 The SMA used in this research

شکل 2 آلیاژ حافظه‌دار استفاده شده در این تحقیق

2-2- ساخت نمونه‌ها

1-2-2- نمونه‌های لاتکس خالص

برای ساخت نمونه‌های لاتکس خالص با و بدون مفتول از استاندارد ASTM D638 استفاده شد [17]. در شکل 3 ابعاد نمونه‌های لاتکس و موقعیت مفتول‌های در این نمونه‌ها نمایش داده شده است. همچنین، ضخامت نمونه‌ها طبق این استاندارد 4 میلی‌متر در نظر گرفته شد.

استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار می‌باشد. این آلیاژها خاصیت الاستیک بالایی دارند و در صورت استفاده از آنها خاصیت الاستیک سازه به صورت چشم‌گیری در سازه بالا خواهد رفت. آلیاژ حافظه‌دار نیتینول که از نیکل و تیتانیوم ساخته‌شده است موارد استفاده زیادی دارد. علاوه بر خواص الاستیک و حافظه‌دار بودن آن، این آلیاژ ضدزنگ نیز می‌باشد. آلیاژهای نیتینول دارای دو ویژگی متمایز و منحصر به فرد هستند:

۱- حافظه‌دار بودن: حافظه‌دار بودن آلیاژ نیتینول عبارت است از توانایی این فلز در تغییر شکل در یک دمای خاص، باقی ماندن در آن شکل وقتی نیروی خارجی از بین می‌رود و سپس بازگشتن به شکل اصلی در صورت گرم شدن در دمای بالاتر از دمای تبدیل^۱ است.

۲- سوپرالاستیسیته: سوپرالاستیسیته بودن آلیاژ نیتینول به معنای آن است که این فلز تحت تغییر شکل‌های زیادی قرار می‌گیرد ولی با برداشتن بار خارجی بلافاصله به شکل اولیه یافته خود برمی‌گردد. این مواد انعطاف‌پذیری فوق‌العاده‌ای دارند که حدوداً 10 تا 30 برابر فلز معمولی است [13].

آلیاژهای حافظه‌دار به دلیل خواص منحصر به فرد مکانیکی و فیزیکی خود، در سال‌های اخیر برای تقویت کامپوزیت‌های پلیمری در زمینه‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند [14]. خلیلی و سعیدی [14] تأثیر کسر حجمی سیم‌های کوتاه حافظه‌دار و همچنین ضریب لاغری و جهت‌گیری سیم‌ها بر روی مدول الاستیک رزین اپوکسی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داده است که در کسرهای حجمی کمتر از 5٪، ضریب لاغری قابل قبول برای بهبود چشمگیر مدول الاستیک کامپوزیت در حدود 25 می‌باشد، در حالی که در کسرهای حجمی بزرگ‌تر از 15٪، ضریب لاغری مناسب مقادیر بزرگ‌تر از 40 می‌باشد. در تحقیق انجام شده توسط طاهری بهروز و کیانی [15]، اثر عوامل مختلف نظیر مقدار پیش‌کرنش سیم‌ها، دمای بارگذاری و شرایط سطح تماس میان سیم‌های حافظه‌دار و ماتریس بر خواص مکانیکی رزین اپوکسی بررسی شده است. عصفوری و همکاران [16] میزان جذب انرژی در چندلایه‌های فلز-الیاف تقویت‌شده با آلیاژ حافظه‌دار تحت بارگذاری ضربه سرعت‌پایین را مورد بررسی قرار دادند. این محققین اثر زاویه الیاف، میزان پیش‌کرنش و محل قرارگیری سیم‌های حافظه‌دار بر چندلایه فلز-کامپوزیت تحت بارگذاری ضربه‌ای را مطالعه کردند. مشخص شد که تغییرات پارامترهای پیش-کرنش سیم‌های حافظه‌دار، زاویه الیاف و محل قرارگیری این سیم‌ها در چندلایه به ترتیب به میزان 39.12 درصد، 32.13 درصد و 4.56 درصد بر روی میزان جذب انرژی چندلایه فلز-کامپوزیت تأثیرگذار می‌باشد.

همان‌طور که مشاهده گردید مطالعات بسیاری در خصوص کامپوزیت‌های طبیعی، کامپوزیت‌های انعطاف‌پذیر و یا کامپوزیت‌های تقویت‌شده با آلیاژ حافظه‌دار انجام شده است. اما بررسی خواص مکانیکی ترکیب این سه دسته از مواد کمتر مشاهده گردید. لذا هدف اصلی در این تحقیق از مواد کاملاً طبیعی لاتکس و الیاف پنبه برای ساخت کامپوزیت‌ها در حضور آلیاژ حافظه‌دار است. در این تحقیق، چهار نوع نمونه طراحی، ساخته و آزمایش شدند. این نمونه‌ها عبارت‌اند از: لاتکس خالص، لاتکس تقویت‌شده با آلیاژ حافظه‌دار، کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف پنبه و کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف و آلیاژهای حافظه‌دار. بعد از ساخت نمونه‌ها آزمایش کششی بر آنها انجام شد و خواص مکانیکی به دست آمده مقایسه شدند.

² MARDEC

¹ Transformation Temperature

همان‌طور که در شکل 5 نمایش داده شده است سیم در موقعیت مناسب و در مرکز سطح مقطع قالب قرار گرفته است. نمونه‌های حاوی دو یا سه سیم نیتینول نیز به همین صورت ساخته شدند. سپس لاتکس قالب‌ریزی و در نهایت نمونه‌ها طی چهل و هشت ساعت در دمای محیط پخت شدند.

2-2-2- نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف پنبه

برای ساخت نمونه‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف پنبه از روش چیدمان دستی استفاده شد. نمونه‌های کامپوزیتی بدون مفتول یا حاوی یک، دو و یا سه سیم نیتینول در نظر گرفته شدند. در شکل 6 ابعاد نمونه‌ها و موقعیت مفتول‌های نیتینول نشان داده شده است. ضخامت نمونه‌ها نیز در حدود 4 میلی‌متر است که از شش لایه پنبه/لاتکس تشکیل شده‌اند. لازم به ذکر است که سیم‌ها بین لایه‌های سوم و چهارم نمونه‌ها تعبیه شدند. بعد از پخت شدن در دمای محیط، نمونه‌ها برش یافتند. طول هر نمونه در حدود 25 سانتیمتر و عرض آن حدود 2.5 سانتی‌متر است. این ابعاد، طبق استاندارد ASTM D3039 [18] در نظر گرفته شدند.



Fig. 5 The location of NiTi wire in the mold of latex samples
 شکل 5 موقعیت قرارگیری سیم نیتینول در قالب نمونه‌های لاتکس

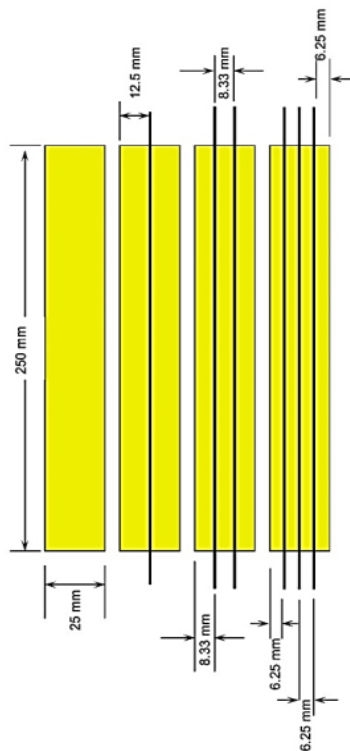


Fig. 6 Geometrical properties of cotton/epoxy laminated composite specimens with or without NiTi wires.
 شکل 6 مشخصات هندسی نمونه‌های کامپوزیت لایه‌ای پنبه/لاتکس با یا بدون سیم‌های نیتینول

در این تحقیق، در ابتدا پیش‌قالب با استفاده از دستگاه پرینتر سه‌بعدی پرینت شد. سپس، از سیلیکون جهت قالب‌گیری نمونه‌های لاتکس استفاده گردید (شکل 4). نمونه‌های لاتکس شامل چهار دسته هستند. دسته اول از لاتکس خالص ساخته شدند. به این صورت که لاتکس قالب‌ریزی شد و سپس طی چهل و هشت ساعت در دمای محیط پخت گردید. دسته دوم از نمونه‌های لاتکس حاوی یک سیم آلیاژ حافظه‌دار هستند. بطوریکه سیم در وسط نمونه قرار می‌گیرد. شکل 5 نحوه قرارگیری آلیاژ داخل قالب را نشان می‌دهد. برای ساخت این نمونه‌ها، از خاصیت قالب‌های لاتکس استفاده گردید. با عبور دادن سیم از بدنه قالب، در موقعیت موردنظر تعبیه گردید.

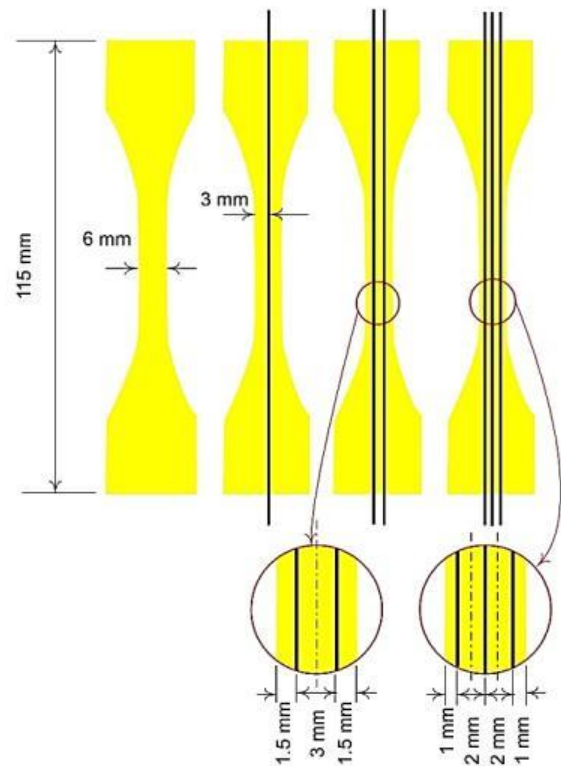


Fig. 3 Geometrical properties of latex specimens with or without NiTi wires.

شکل 3 مشخصات هندسی نمونه‌های لاتکس با یا بدون سیم‌های نیتینول

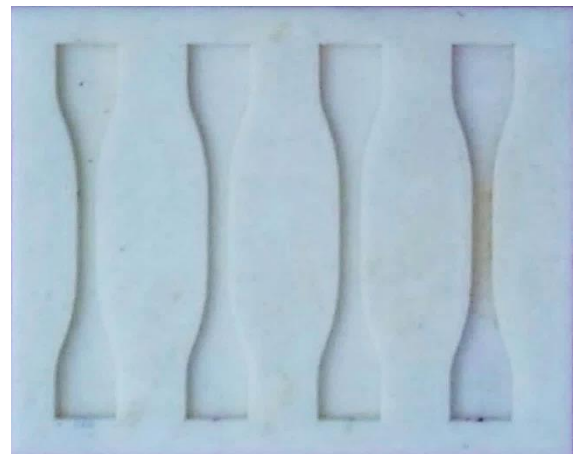


Fig. 4 The mold used to manufacture the latex samples

شکل 4 قالب استفاده شده برای ساخت نمونه‌های لاتکس

3-2- آزمایش نمونه‌ها

پس از انجام مراحل ساخت، نمونه‌ها تحت بارگذاری کششی قرار گرفتند. برای انجام آزمایش، از دستگاه سننم استفاده گردید. نمونه‌ها با سرعت 2 میلی‌متر بر دقیقه بارگذاری شدند. شکل‌های 7 و 8 به ترتیب تصاویر مربوط به آزمایش نمونه‌های لاتکس و کامپوزیتی پنبه/لاتکس را نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که آزمایش هر نمونه خاص سه بار تکرار شد.

4-2- نتایج

خروجی دستگاه سننم بصورت نمودار تنش-کرنش قابل ترسیم است. در شکل‌های 9 و 10 به ترتیب نمودارهای تنش-کرنش مربوط به نمونه‌های لاتکس خالص با یا بدون مفتول و نمونه‌های کامپوزیتی پنبه/لاتکس با یا بدون مفتول نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در شکل 9 مشاهده می‌گردد آلیاژ حافظه‌دار اثر قابل توجهی بر رفتار ماده لاتکس تحت بارگذاری کششی دارد. اما طبق شکل 10، رفتار کامپوزیت‌های لایه‌ای وابستگی کمتری به حضور آلیاژهای حافظه‌دار دارد.

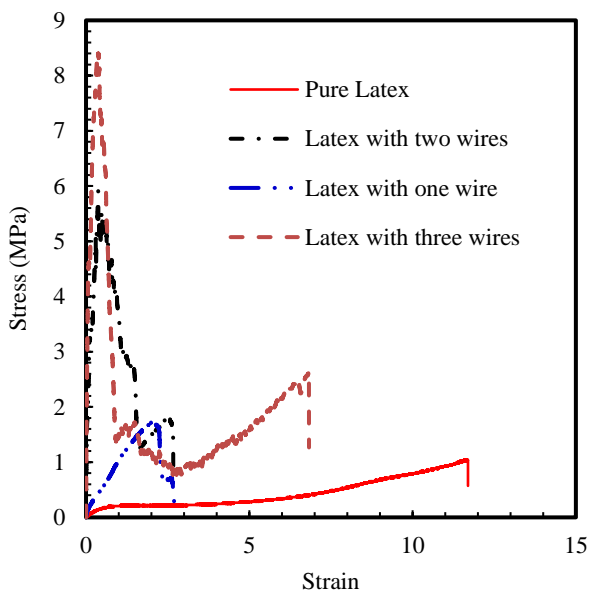


Fig. 9 The stress-strain curves of the pure latex reinforced with or without NiTi wires under tensile loading

شکل 9 نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌های لاتکس خالص تقویت‌شده با یا بدون سیم‌های نیتینول تحت بارگذاری کششی

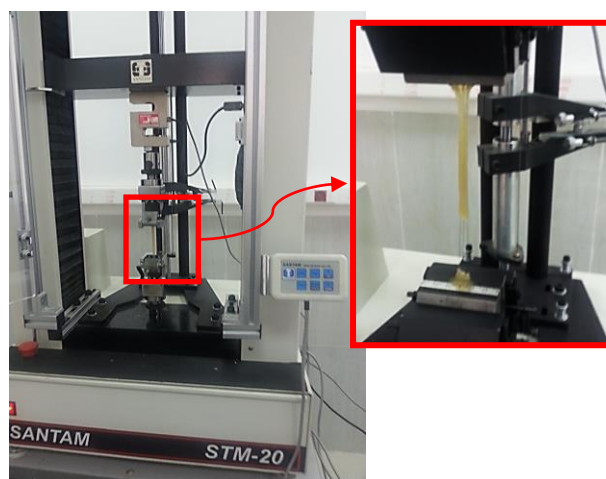


Fig. 7 Tensile test of the pure latex reinforced with NiTi wires

شکل 7 آزمون کشش نمونه لاتکس خالص تقویت‌شده با سیم‌های نیتینول

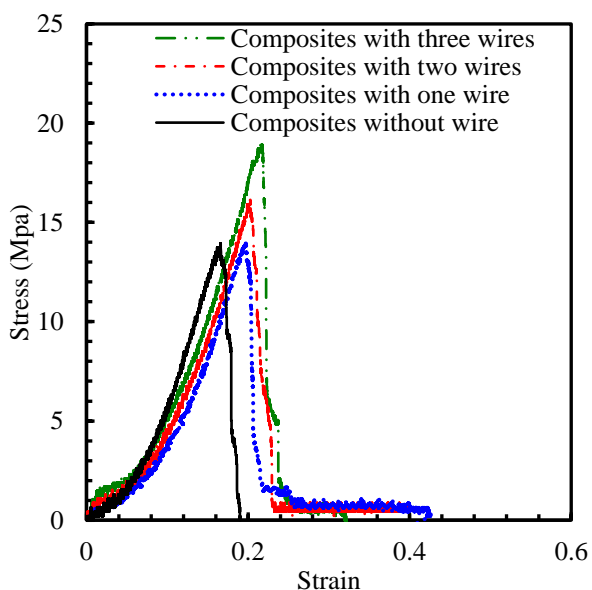


Fig. 10 The stress-strain curves of the laminated composites with or without NiTi wires under tensile loading

شکل 10 نمودارهای تنش-کرنش کامپوزیت‌های لایه‌ای با یا بدون سیم‌های نیتینول تحت بارگذاری کششی

در جدول 1 استحکام نهایی نمونه‌های لاتکس خالص با یا بدون سیم تحت بارگذاری کششی خلاصه شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌گردد با تعبیه یک سیم نیتینول در لاتکس خالص، مقدار استحکام نهایی 73.1 درصد افزایش می‌یابد. با استفاده از دو یا سه سیم نیتینول به لاتکس خالص، مقدار استحکام نهایی بطور قابل توجهی افزایش می‌یابد. از اعداد جدول می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش تعداد سیم از یک به دو، استحکام نهایی 3.55 برابر شده است. در حالیکه با افزایش تعداد



Fig. 8 Tensile test of the cotton/latex consisting of the Niti wires

شکل 8 آزمون کشش نمونه کامپوزیتی پنبه/لاتکس حاوی سیم‌های نیتینول

جدول 4 سفتی کششی کامپوزیت‌های لایه‌ای با و بدون سیم

Table 4 The tensile stiffness of the laminated composites with or without NiTi wire

درصد افزایش نسبت به نمونه بدون مفتول (٪)	سفتی کششی (مگاپاسکال)	نمونه
0.0	126 ± 5.6	کامپوزیت پنبه/لاتکس
-12.6	110 ± 6.7	کامپوزیت با یک سیم
-11.9	111 ± 4.2	کامپوزیت با دو سیم
-4.8	120 ± 8.9	کامپوزیت با سه سیم

طبق مرجع [19]، با جایگذاری سیم حافظه‌دار در کامپوزیت‌های کربن/اپوکسی، بطور منطقی باید خواص کششی نظیر مدول الاستیسیته افزایش یابد. اما برای تعداد کم سیم‌ها و یا قطرهای کم این آلیاژها، خواص کششی کامپوزیت‌های لایه‌ای تغییرات چندانی ندارد. دلیل اصلی این پدیده، یکنواخت نبودن لایه‌های کامپوزیتی و همچنین تورق لایه‌ها در حضور مفتول‌های حافظه‌دار است (شکل 11). اما با افزایش تعداد سیم‌ها، سفتی بالای این آلیاژهای حافظه‌دار، سفتی کاهش یافته به علت تورق را جبران می‌کند و سفتی کامپوزیت افزایش می‌یابد. در مقابل، با توجه به ماهیت همسانگرد بودن لاتکس خالص، با افزودن حتی یک رشته سیم نیتینول مقدار سفتی نمونه‌های لاتکس بطور قابل توجهی افزایش می‌یابد (شکل 9).

3- مدل تجربی

بر اساس نتایج به دست آمده از مطالعات تجربی مربوط به نمونه‌های ساخته‌شده از لاتکس خالص با سیم نیتینول، می‌توان دو رابطه برای پیش‌بینی مقدار استحکام نهایی و کرنش متناظر با آن استخراج نمود. برای به دست آوردن این روابط از روش برازش منحنی استفاده شد. شکل‌های 12 و 13 روابط زیر به ترتیب مقادیر استحکام نهایی (σ_u) و مقدار کرنش متناظر آن (ϵ_u) را پیش‌بینی می‌کنند:

$$\sigma_u = 1.05475553434647\epsilon_u^3 + 15.2019262418119\epsilon_u^2 - 34.9929287216548\epsilon_u + 18.6657584329933 \quad (1)$$

که

$$\epsilon_u = 0.321 + (11.7 - 0.321)/(1 + (n/0.641)^{0.3887}) \quad (2)$$

در رابطه بالا، n تعداد سیم‌های نیتینول است.

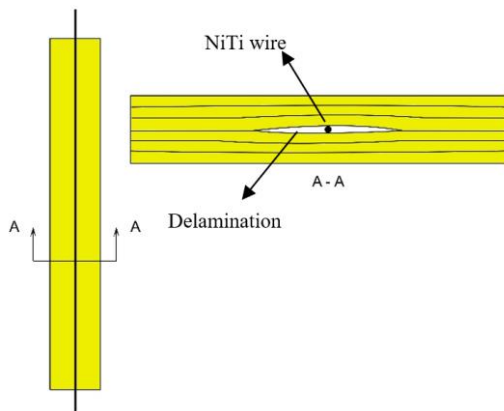


Fig. 11 The schematic of delamination phenomenon due to presence of NiTi wire in the laminated composites

شکل 11 شماتیک پدیده تورق ناشی از حضور مفتول نیتینول در کامپوزیت‌های لایه‌ای

سیم‌ها از دو به سه، استحکام نهایی 1.45 برابر بیشتر شده است. بصورت تجربی امکان تعبیه بیش از سه سیم نیتینول میسر نیست. اما از طریق تئوری می‌توان پیش‌بینی کرد که مقدار استحکام نهایی با افزایش تعداد مفتول‌ها به چهار و بیشتر، بطور قابل توجهی نسبت به نمونه حاوی سه مفتول افزایش نمی‌یابد. بدین منظور، در بخش بعد، یک رابطه نیمه تجربی برای تخمین استحکام نهایی لاتکس با حضور آلیاژهای حافظه‌دار معرفی شده است.

در جدول 2 مدول یانگ نمونه‌های لاتکس خالص با یا بدون سیم ذکر شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌گردد در حضور آلیاژ حافظه‌دار، مقدار مدول یانگ بطور چشمگیری افزایش می‌یابد.

در جدول 3 مقادیر استحکام نهایی مربوط به نمونه‌های ساخته‌شده از کامپوزیت‌های لایه‌ای پنبه/لاتکس با و بدون سیم نیتینول خلاصه شده است. با استفاده از مقایسه نتایج جدول‌های 1 و 3 می‌توان گفت که در حضور مفتول سیم، استحکام نهایی کامپوزیت‌های لایه‌ای به مراتب کمتر از استحکام نهایی لاتکس خالص بهبود می‌یابد.

در جدول 4 سفتی کششی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف یافته‌شده پنبه با و بدون آلیاژ حافظه‌دار خلاصه شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌گردد با تقویت کامپوزیت‌های پنبه/لاتکس توسط یک مفتول نیتینول به قطر 0.3 میلی‌متر، مقدار سفتی کاهش می‌یابد در حالیکه با افزودن تعداد بیشتری از مفتول‌ها این کاهش تا حدودی جبران می‌شود.

جدول 1 استحکام نهایی نمونه‌های لاتکس خالص با یا بدون سیم تحت بارگذاری کششی

Table 1 The ultimate strength of the pure latex specimens with or without wire subjected to the tensile loading

درصد افزایش نسبت به نمونه بدون سیم (٪)	استحکام نهایی (مگاپاسکال)	نمونه
0.0	0.93 ± 0.16	لاتکس خالص
73.1	1.61 ± 0.29	لاتکس با یک سیم
515.0	5.72 ± 0.57	لاتکس با دو سیم
797.8	8.35 ± 0.60	لاتکس با سه سیم

جدول 2 مدول یانگ نمونه‌های لاتکس خالص با یا بدون سیم تحت بارگذاری کششی

Table 2 The Young Modulus of the pure latex specimens with or without NiTi wire subjected to the tensile loading

درصد افزایش نسبت به نمونه بدون سیم (٪)	مدول یانگ (مگاپاسکال)	نمونه
0.0	0.35 ± 0.09	لاتکس خالص
165.7	0.93 ± 0.18	لاتکس با یک سیم
5442.9	19.4 ± 0.94	لاتکس با دو سیم
42571.4	149.35 ± 4.32	لاتکس با سه سیم

جدول 3 استحکام نهایی کامپوزیت‌های لایه‌ای با و بدون سیم تحت بارگذاری کششی

Table 3 The ultimate strength of the laminated composites with or without wire subjected to the tensile loading

درصد افزایش نسبت به نمونه بدون مفتول (٪)	استحکام نهایی (مگاپاسکال)	نمونه
0.0	13.51 ± 1.05	کامپوزیت پنبه/لاتکس
1.8	13.75 ± 0.94	کامپوزیت با یک سیم
18.3	15.98 ± 1.12	کامپوزیت با دو سیم
37.1	18.52 ± 1.20	کامپوزیت با سه سیم

جدول 5 پیش‌بینی مقدار استحکام نهایی و کرنش متناظر با آن برای نمونه لاتکس با افزودن سیم‌های نیتینول

Table 5 Prediction of the ultimate strength and the corresponded strain of the Latex sample in the presence of NiTi wires

تعداد سیم‌های نیتینول در نمونه	مقدار کرنش در استحکام نهایی	استحکام نهایی (مگاپاسکال)
0	11.7	0.93
1	2.04	1.58
2	0.456	5.77
3	0.349	8.26
4	0.330	8.73
5	0.325	8.87
6	0.323	8.92
7	0.322	8.94
8	0.321	8.95
9	0.321	8.95

روابط زیر به ترتیب مقادیر استحکام نهایی (S_u) و مقدار کرنش متناظر آن (ϵ_u) کامپوزیت‌های لایه‌ای لاتکس/پنبه را پیش‌بینی می‌کنند:

$$S_u = 0.155n^2 + 1.765n + 11.83 \quad (3)$$

که

$$\epsilon_u = 0.0064n^2 - 0.016n + 0.2074 \quad (4)$$

در رابطه بالا، n تعداد سیم‌های نیتینول است. با جایگذاری تعداد سیم‌ها از صفر تا نه در روابط 3 و 4، مقادیر استحکام نهایی و کرنش متناظر با آن برای هر نمونه کامپوزیتی تخمین زده شده‌اند. نتایج در جدول 6 خلاصه شده‌اند. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌گردد با افزایش تعداد سیم‌ها مقادیر استحکام نهایی و کرنش متناظر با آن برای نمونه‌ها به آرامی افزایش می‌یابند.

جدول 6 پیش‌بینی مقدار استحکام نهایی و کرنش متناظر با آن برای نمونه‌های پنبه/لاتکس با افزودن سیم‌های نیتینول

Table 6 Prediction of the ultimate strength and the corresponding strain of the cotton/Latex samples in the presence of NiTi wires

تعداد سیم‌های نیتینول در نمونه	مقدار کرنش در استحکام نهایی	استحکام نهایی (مگاپاسکال)
0	0.166	13.51
1	0.1978	13.75
2	0.201	15.98
3	0.217	18.52
4	0.2458	21.37
5	0.2874	24.53
6	0.3418	28.00
7	0.409	31.78
8	0.489	35.87
9	0.582	40.27

4- مقایسه خواص کششی کامپوزیت‌های لایه‌ای با مواد مختلف

برای استفاده از نتایج این تحقیق، استحکام کششی کامپوزیت‌های لایه‌ای پنبه/لاتکس تقویت‌شده با آلیاژهای حافظه‌دار با استحکام کششی مواد مختلف مقایسه گردید. جدول 7 استحکام کششی مواد مختلف مقایسه شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌گردد، استحکام کششی کامپوزیت‌های لایه‌ای پنبه/لاتکس با 9 سیم آلیاژ حافظه‌دار بطور قابل توجهی از سایر مواد بزرگ‌تر است.

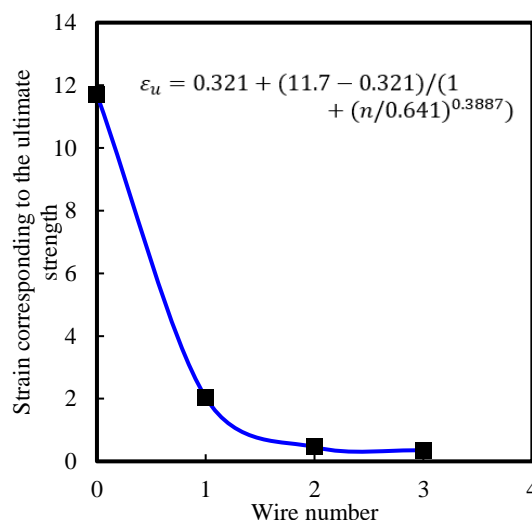


Fig. 12 The curve fitting related to the strain values corresponding to the ultimate strength of pure latex samples

شکل 12 برازش منحنی مربوط به مقادیر کرنش متناظر استحکام نهایی نمونه‌های لاتکس خالص

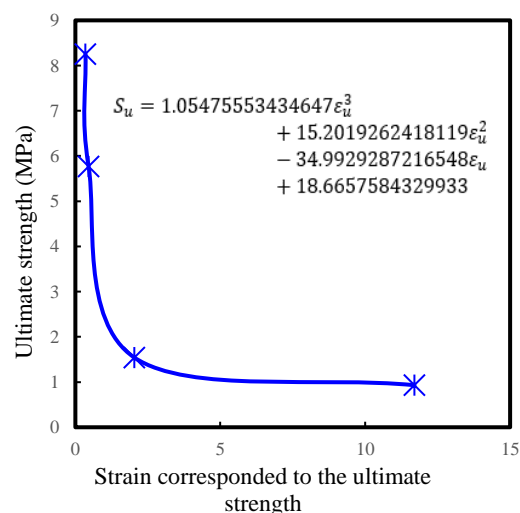


Fig. 13 The curve fitting related to the ultimate strength of pure latex samples

شکل 13 برازش منحنی مربوط به مقادیر استحکام نهایی نمونه‌های لاتکس خالص

با جایگذاری تعداد مفتول‌ها (n) در رابطه 2، مقدار کرنش متناظر با استحکام نهایی برای ماده لاتکس به دست می‌آید. همچنین، با جایگذاری مقدار کرنش هر نمونه در رابطه 1، مقدار استحکام نهایی محاسبه می‌گردد. نتایج در جدول 5 خلاصه شده است. همان‌طور که در جدول 5 مشاهده می‌گردد که برای تعداد کم سیم‌ها با افزایش آن‌ها، مقدار استحکام نهایی افزایش، اما کرنش متناظر با آن کاهش می‌یابد. نتیجه قابل توجه آن است که با افزایش تعداد آلیاژهای حافظه‌دار به بیش از 4 سیم افزایش چشمگیری در مقدار استحکام نهایی پیش‌بینی نمی‌گردد. از نقطه نظر تئوری، با افزایش تعداد سیم‌ها، استحکام نمونه وابستگی کمتری به ماده لاتکس دارد و در ادامه با افزایش تعداد سیم‌ها به 8، مقدار استحکام نهایی ثابت باقی می‌ماند.

Composites: An Overview,” *Natural Resources*, Vol. 7, No. 3, pp. 108-114, 2016.

- [2] Moradi, E., Zeinedini, A., Heidari-shahmaleki, E., “Mechanical properties of laminated composites reinforced by natural fibers of cotton, wool and kenaf under tensile, flexural and shear loadings,” In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No. 1, pp. 99-108, 2019.
- [3] John, M. J., Varughese, K. T., Thomas, S., “Green Composites from Natural Fibers and Natural Rubber: Effect of Fiber Ratio on Mechanical and Swelling Characteristics,” *Journal of Natural Fibers*, Vol 5, pp. 47-60, 2008.
- [4] Baley, C., Lan, M., Bourmaud, A., Le Duigou, A., “Compressive and tensile behaviour of unidirectional composites reinforced by natural fibres: influence of fibres (flax and jute), matrix and fibre volume fraction,” *Materials Today Communications* Vol 16, pp. 300-306, 2018.
- [5] Portella, H. E., Romanzini, D., Angrizani, C. C., Amico, S. C., Zattera, A. J., “Influence of Stacking Sequence on the Mechanical and Dynamic Mechanical Properties of Cotton/Glass Fiber Reinforced Polyester Composites,” *Materials Research*, 19(3), 2016.
- [6] Jamal, S. K., Hassan, S. A., Wong, K. J., Hanan, U.A., “Mechanical properties of hybrid woven kenaf /recycled glass fiber reinforced polyester composites. *Journal of Built Environment, Technology and Engineering*, Vol. 1, pp. 335-344, 2016.
- [7] Ramesh, M., “Kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) fibre based bio-materials; A review on processing and properties,” *Progress in Materials Science*, Vol. 78-79, pp. 1-92, 2016.
- [8] Heidari-shahmaleki, E., Zeinedini, A., “Application of cotton/epoxy laminated composites to fabricate the uni- and bi-directional cosine corrugated cores sandwich panels,” In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 2, No. 7, pp. 863-872, 2020.
- [9] El-Yamany, H. E., El-Salamawy, M. A., El-Assa T. N., “Microstructure and mechanical properties of alkali-activated slag mortar modified with latex.” *Construction and Building Materials*, Vol. 191, pp. 32-38, 2018.
- [10] Yong, K., Mustafa, A., “Natural Rubber-Rubberwood Fiber Laminated Composites with Enhanced Stab Resistance Properties,” *J. Rubb. Res.*, Vol. 17, No. 1, pp. 1-12, 2014.
- [11] South, J. T., “Mechanical Properties and Durability of Natural Rubber Compounds and Composites,” PhD thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.
- [12] Ray, D., Bose, N. R., Mohanty, A., Misra, M., “Modification of the dynamic damping behaviour of jute/vinylester composites with latex interlayer,” *Composites part b engineering*, Vol. 38, No. 3, pp. 380-385, 2007.
- [13] Lecce, L., Concilio, A., “Shape Memory Alloy Engineering for Aerospace, Structural and Biomedical Applications,” 1st Edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2015.
- [14] Khalili, S. M., Saeedi, A., “Micromechanics modeling and experimental characterization of shape memory alloy short wires reinforced composites,” In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 2, No. 1, pp. 1-6, 2015.
- [15] Taheri-Behrooz, F., Kiani, A., “Simulation of thermo-mechanical behavior of glass-epoxy composites containing shape memory alloy under static loading,” In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No. 2, pp. 111-122, 2016.
- [16] Osfouri, M., Rahmani, O., Zamani, M., “An Experimental investigation on nitinol shape memory alloy reinforced GLAREs against Charpy low velocity impact,” In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, No. 3, pp. 403-414, 2018.
- [17] Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, ASTM, D638-03, 2012.
- [18] Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials, ASTM, D3039/D M 3039, 2008.
- [19] Khazaie, M., Kazemi Nasrabadi, M., “Tensile strength of reinforced carbon-epoxy Composites with Shape Memory Alloy

جدول 7 مقایسه استحکام کششی کامپوزیت پنبه/لاتکس تقویت شده با آلیاژ حافظه‌دار با سایر مواد انعطاف‌پذیر پرکاربرد

Table 7 Comparison of the tensile strength of the cotton/latex reinforced by shape memory alloy with the other commonly used flexible materials

استحکام کششی (مگاپاسکال)	ماده
13.51	کامپوزیت پنبه/لاتکس (تحقیق حاضر)
40.27	کامپوزیت‌های لایه‌ای پنبه/لاتکس با 9 سیم آلیاژ حافظه‌دار (تحقیق حاضر)
39.5	چرم گاوی [20]
0.20	چرم قارچ (ماسکین) [20]
20.8	چرم کاکتوس [20]
14.00	چرم پوست سیب [20]
10.20	پلی‌اورتان [20]
25.00	پلی‌اورتان تقویت‌شده با نانوغرافن [21]
15.00	پلی‌اورتان تقویت‌شده با نانوسیلیکا [21]

5- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق، تعیین خواص کششی کامپوزیت‌های انعطاف‌پذیری است که در آن زمینه و تقویت‌کننده، هر دو مواد طبیعی هستند. از الیاف پنبه و لاتکس برای ساخت این کامپوزیت‌ها استفاده شد. همچنین، لاتکس خالص نیز تحت بارگذاری کششی آزمایش شد تا اثر استفاده از الیاف پنبه معین گردد. برای افزایش استحکام لاتکس و کامپوزیت‌های لاتکس/پنبه، از آلیاژ حافظه‌دار استفاده شد. اثر تعداد مفتول‌ها بر خواص کششی لاتکس و کامپوزیت‌های لایه‌ای بررسی گردید. در انتها نیز یک مدل نیمه تجربی برای پیش‌بینی اثر تعداد مفتول‌های حافظه‌دار بر استحکام نهایی و کرنش متناظر با آن برای مواد لاتکس و کامپوزیت لاتکس/پنبه ارائه گردید. تعدادی از نتایج به دست آمده در این تحقیق بصورت زیر خلاصه شده‌اند:

- بر اساس نتایج به دست آمده از مطالعه تجربی مشاهده گردید که با افزایش تعداد مفتول‌ها از 0 به 1، 2 و 3، مقدار استحکام نهایی لاتکس افزایش اما کرنش متناظر با آن کاهش می‌یابد.
- در حضور آلیاژ حافظه‌دار نیتینول، مقدار مدول یانگ لاتکس بطور چشمگیری افزایش می‌یابد. در حالیکه، تغییر چندانی در مقدار سفتی کششی کامپوزیت‌های پنبه/لاتکس مشاهده نشد.
- در حضور آلیاژهای حافظه‌دار، استحکام نهایی کامپوزیت‌های لایه‌ای تقویت‌شده با الیاف پنبه به مراتب کمتر از استحکام نهایی لاتکس خالص بهبود می‌یابد.
- بر اساس مدل نیمه تجربی، با افزایش تعداد آلیاژهای حافظه‌دار به بیش از 4 مفتول، افزایش چشمگیری در مقدار استحکام نهایی لاتکس پیش‌بینی نمی‌گردد.
- با توجه به نتایج به دست آمده از مدل نیمه تجربی، می‌توان با استفاده از تعبیه تعداد بیشتری آلیاژ حافظه‌دار در کامپوزیت‌های پنبه/لاتکس استحکام نهایی را افزایش داد و لذا کامپوزیت‌های پنبه/لاتکس تقویت‌شده با آلیاژ حافظه‌دار را می‌توان بعنوان جایگزینی مناسب برای موادی همچون چرم طبیعی معرفی نمود.

6- مراجع

- [1] Sanjay, M. R., Arpitha, G. R., Laxmana, Naik L., Gopalakrishna, K., Yogesha, B., “Applications of Natural Fibers and Its

wires,” In Persian, Mechanical Engineering Journal, Vol. 5, No. 1, pp. 81-89, 2020.

[20] Meyer, M., Dietrich, S., Schulz H., Mondschein A., “Comparison of the Technical Performance of Leather, Artificial Leather, and Trendy Alternatives.” Coatings, Vol. 11, No. 2, pp. 226-238, 2021.

[21] Liu L., Qian X., “Current Advances of Polyurethane/Graphene Composites and Its Prospects in Synthetic Leather: A Review,” European Polymer Journal, Vol. 161, 110837, 2021.