

ارزیابی آزمایشگاهی عملکرد خمشی کامپوزیت‌های سیمانی تقویت‌شده با پارچه‌های سه‌بعدی حلقوی پودی و شبیه‌سازی رفتاری آن

بنت الهدی آدوسی^۱، سید عباس میرجلیلی^{۱*}، مصطفی آدرسی^۲
^۱دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه یزد
^۲دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران
 amirjalili@yazd.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۰۸

چکیده

اخیرا تمایل به تحقیق و استفاده از کامپوزیت‌های تقویت‌شده سیمانی توسط پارچه‌ها با توجه به خصوصیات منحصر به فرد مکانیکی آنها رواج یافته است. در این پژوهش از سه پارچه سه‌بعدی حلقوی پودی با سه طرح بافت متفاوت در لایه پایینی پارچه استفاده شده است و به بررسی نتایج آزمون خمشی کامپوزیت تقویت شده با پارچه سه‌بعدی در آزمایشگاه و نیز شبیه‌سازی آن با نرم‌افزار آباکوس و تحلیل المان محدود پرداخته شده است. نتایج نشان داد، کامپوزیت‌های تقویت شده در جهت رج دارای تنش خمشی بیشتری نسبت به جهت ردیف بوده‌اند. به این ترتیب، کامپوزیت سیمانی تقویت شده با بافت حلقه در لایه پایینی در جهت رج، در دمای عمل‌آوری ۲۳ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان عمل‌آوری ۷ روز بیشترین مقاومت خمشی را داشته است. شبیه‌سازی به روش همگن‌سازی و استفاده از یک واحد تکرارشونده و نیز به کار بردن قانون مخلوط‌های اصلاح شده، انطباق قابل قبولی در ناحیه الاستیک ایجاد کرده و قادر به پیش‌بینی خواص خمشی کامپوزیت در محدوده الاستیک بوده و تطابق خوبی را نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: کامپوزیت‌های تقویت شده، سیمان، پارچه‌های سه‌بعدی حلقوی پودی، اجزای محدود، مقاومت خمشی

Laboratory Evaluation of the Flexural Performance of Cementitious Composites Reinforced with 3D Circular Weft-Knitted Fabrics and Behavioral Simulation

Bent Al-Hoda Adousi¹, Seyed Abbas Mirjalili^{1*}, Mostafa Adrousi²

¹Faculty of Textile Engineering, Yazd University

²Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran
 amirjalili@yazd.ac.ir

Abstract

Recently, there has been a growing interest in researching and utilizing cementitious composites reinforced with fabrics due to their unique mechanical properties. In this study, three types of 3D circular weft-knitted fabrics with different weave patterns in the bottom layer were used. The research focused on investigating the results of flexural tests on 3D fabric-reinforced composites in the laboratory, as well as simulating them using Abaqus software and performing finite element analysis. The results indicated that the composites reinforced in the weft direction exhibited higher flexural stress compared to those in the warp direction. Consequently, the cementitious composite reinforced with the SF1 weave in the weft direction, cured at 23°C for 7 days, demonstrated the highest flexural strength. The simulation, using a homogenization method with a repeating unit cell and applying a modified rule of mixtures, achieved acceptable agreement in the elastic region and was capable of predicting the flexural properties of the composite within the elastic range, showing good consistency.

Keywords: Enhanced Composites, Concrete, Weft-Knitted Fabrics, Finite Elements, Flexural Strength

۱- مقدمه

یکی از صنایع مهمی که امروزه در آن از کامپوزیت‌ها استفاده می‌شود، صنعت ساختمان است. با توجه به افزایش ساخت و ساز و همچنین با توجه به اینکه یکی از مهم‌ترین و اصلی‌ترین ماده مورد استفاده در صنعت ساختمان، سیمان (بتن) می‌باشد، عملکرد و طراحی کامپوزیت سیمانی مصرفی و همچنین نحوه تهیه آن بسیار مهم و حائز اهمیت است [۱]. از موارد کاربرد کامپوزیت در صنعت ساختمان، می‌توان به بتن‌های تقویت شده با الیاف، پارچه‌های دو بعدی (تاری-پودی و حلقوی) و پارچه‌های دوجداره^۱ اشاره نمود. در سنوات قبل، بیشتر از الیاف و یا پارچه‌های دو بعدی برای تقویت کامپوزیت‌های بتنی استفاده می‌شد، اما امروزه، به کارگیری پارچه‌های دوجداره بیش از پیش مورد توجه و استفاده می‌باشد [۱]. پارچه‌های دوجداره، از دو پارچه به موازات هم تشکیل شده است که توسط یک لایه واسطه در راستای ضخامت (Z) به هم متصل شده‌اند. کامپوزیت‌های بتنی تقویت شده با منسوج، در صورت اعمال بار بسیار زیاد، شکسته می‌شوند ولی به دلیل پل زدن الیاف و یا پارچه، بین شکاف به وجود آمده، از هم گسسته نخواهند شد. در پژوهش پیش‌رو، جزء ماتریسی کامپوزیت، "زمینه (مات) سیمانی" و جزء تقویت‌کننده کامپوزیت، "پارچه سه‌بعدی حلقوی پودی" است. عامل متغیر در ساختار پارچه‌های سه‌بعدی "نوع بافت لایه‌های پایینی" است. در میان انواع سیمان‌ها، از سیمان پرتلند به جهت قیمت پایین و نیز دسترسی راحت‌تر، بیشتر استفاده می‌شود اما اخیراً، استفاده از سیمان کلسیم آلومینات^۲ (CAC) در سراسر جهان گسترده شده است. استفاده از سیمان کلسیم آلومینات نسبت به سیمان پرتلند می‌تواند باعث ارتقاء خواص مکانیکی و شیمیایی گردد.

سیمان کلسیم آلومینات یک سیمان منبسط شونده است. در عوض سیمان پرتلند یک سیمان با جمع شدگی انقباضی است. از آنجا که برای چسبندگی پارچه با الیاف و درگیر شدن بهتر اجزای پارچه (شبکه مسلح‌کننده) با خمیر سیمان نیازمند اتصال مناسب بین خمیر سیمان و شبکه پارچه است، لازم است از سیمانی استفاده شود تا با منبسط شدن به درگیر شدن بیشتر خمیر و پارچه کمک کند از این رو در این تحقیق از سیمان کلسیم آلومینات استفاده شد. همچنین این سیمان بسیار زودگیر و سخت شونده است بطوریکه در چند ساعت اولیه به مقاومت بالای ۲۰ مگا پاسکال می‌رسد که این مقاومت بالا به پایداری کامپوزیت تحت بارهای حین اجرا کمک بسزایی خواهد نمود که در سیمان‌های پرتلند این سرعت از کسب مقاومت اصلاً امکان‌پذیر نیست [۱]-[۳].

یکی از مهمترین پیش‌نیازهای لازم جهت مدل‌سازی پارچه حلقوی پودی و یا کامپوزیت ساخته شده از آن، در اختیار داشتن هندسه دقیق نخها و به عبارتی شکل حلقه‌ها و نحوه قرارگیری آنها است. مسیر حرکت نخ‌ها در حلقه‌های تشکیل‌دهنده بافت را با مدل‌های هندسی و یا معادلات مختلفی می‌توان مدل‌سازی کرد. راماکریشنا و همکاران در طی تحقیقات خود [۳-۱]، به بررسی رفتار کامپوزیت‌های تقویت‌شده با پارچه حلقوی پودی ساده پرداختند. آنها یک روش تحلیلی برای تخمین خواص کشسانی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده پارچه‌های حلقوی پودی ساده ارائه کردند و خواص کششی و مکانیزم آسیب را در این نوع کامپوزیت‌ها که از جنس شیشه/اپوکسی بودند، مورد مطالعه قرار دادند. مدول یانگ را در جهات ردیف و رج با استفاده از قانون مخلوط^۳ اصلاح‌شده، پیش‌بینی کردند. همچنین استحکام کششی کامپوزیت را با تخمین استحکام الیاف در محل شکست نمونه پیش‌بینی کردند. مدل هندسی ارائه شده توسط

¹ Spacer or 3D Fabric² Calcium aluminat cement³ Rule of mixture

واسیلیادیس و همکاران [۷]، برای تولید قطعات در شبیه‌سازی عددی یا کامپوزیت‌های تقویت‌شده با پارچه‌های حلقوی پودی استفاده می‌شود. واسیلیادیس و همکاران [۸]، به مطالعه تغییر شکل هندسی کششی، برشی و خمشی پارچه‌های حلقوی پودی ساده پرداختند. آنها با استفاده از مدل هندسی واسیلیادیس، سلول واحد این بافت را در نرم افزار انسیس مدل سازی کردند. سپس با اعمال شرایط مرزی تناوبی و وارد کردن بارگذاری مناسب با هر یک از آزمون‌های مکانیکی به وسیله روش اجزای محدود مدل‌ها را تحلیل نمودند. دین و همکاران [۹]، یک شبیه‌سازی عددی برای پیش‌بینی خواص مکانیکی پارچه‌های حلقوی پودی با استفاده از مدل هندسی واسیلیادیس ایجاد کرد. با توجه به توزیع منظم حلقه‌ها در ساختار پارچه سه‌بعدی، از نظریه همگن‌سازی استفاده کردند. بنابراین، به جای در نظر گرفتن کل نمونه پارچه تحت بارگذاری، تحلیل محاسباتی کمتری را روی یک سلول واحد تکرار شونده انجام دادند. تجزیه و تحلیل اجزای محدود غیرخطی برای تعیین تنش در واحد تکرار-شونده تحت بارگذاری کششی و برشی انجام شد. سپس تنش‌های ماکروسکوپی را از میدان‌های تنش در واحد تکرار شونده با استفاده از طرح همگن‌سازی عددی استخراج کردند. عبداللهی و همکارانش [۱۰]، به بررسی رفتار خمشی کامپوزیت‌های سیمانی تقویت شده با پارچه سه‌بعدی با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی و نیز ارزیابی به روش اجزاء محدود پرداختند. سه نوع پارچه با تفاوت زاویه قرارگیری نخ‌های میانی (۴۷، ۵۵ و ۶۵ درجه) تولید کردند. برای مدل سازی نخ‌های میانی، نخ‌ها به صورت خط صاف مدل شدند و انحناهای حقیقی نخ‌های میانی در نظر گرفته نشد. برای شبیه‌سازی کامپوزیت از مدل آگدن استفاده کردند. ولوسا و همکارانش [۱۱]، رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های ساندویچی بر اساس پارچه‌های حلقوی تار سه‌بعدی با استفاده از روش اجزای محدود را پیش‌بینی کردند. آنها از سه نوع مختلف پارچه سه‌بعدی با پارامترهای ساختاری متفاوت استفاده کردند. ساندویچ

صفحه‌ها توسط رزین پلی‌استر غیراشباع ساخته شدند. برای پیش‌بینی شکست در کامپوزیت‌ها از معیار فون میسز^۱ و از آنالیزهای خطی در شبیه سازی رفتار مکانیکی کامپوزیت‌ها استفاده شد. راوندی و همکارانش [۱۲]، یک مدل هندسی دقیق از کامپوزیت ترموپلاستیک از الیاف کربن در پارچه حلقوی پودی برای درک بهتر رفتار مکانیکی غیرخطی و مکانیسم‌های آسیب تحت تنش ارائه نمودند. برای این منظور، یک واحد تکرار شونده از کامپوزیت پارچه حلقوی پودی بر اساس ابعاد واقعی طراحی کردند. حسامی و همکاران [۱۳]، رفتار کششی و خمشی کامپوزیت دو محوره و بافت ریب حلقوی پودی را به صورت عددی و تجربی بررسی کردند. مدل‌سازی اجزای محدود چند مقیاسی برای شبیه‌سازی رفتار کششی و خمشی نمونه‌های مرکب استفاده می‌شود. در مدل‌سازی اجزای محدود، هندسه سلول واحد از هر پارچه ابتدا در نرم افزار آباکوس مدل‌سازی شده و سپس شرایط مرزی بر روی یک سلول واحد اعمال شد. ماتریس سختی برای هر ساختار توسط یک کد پایتون از طریق مدل‌سازی مقیاس مزو به دست آمد و به عنوان داده ورودی برای مدل‌سازی کلان استفاده شد. رزین اپوکسی برای ساخت کامپوزیت استفاده و پس از آن، آزمون کشش و خمش سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌های مرکب اعمال شد. نتایج اجزای محدود با نتایج تجربی در آزمون‌های کششی و خمشی مقایسه شد. نتایج مطابقت خوبی بین نتایج حاصل از شبیه سازی و نتایج تجربی در رفتار کششی و خمشی کامپوزیت‌ها نشان داده است. الر و همکارانش [۱۴]، برای مدل‌سازی کامپوزیت‌های تقویت شده از مدل‌سازی اجزای محدود استفاده کردند و گزارش نمودند که کامپوزیت تقویت شده یک ساختار ترکیبی است، یعنی خواص فیزیکی یک ماده برای مدل‌سازی کافی نیست. آنها دریافتند بدون دانستن پارامترهای صحیح مواد، و تنها با

¹ Von Mises tensions

-سطح میکرو: در این حالت آرایش یافتگی الیاف در نخ نیز مهم است و جهت آنالیز نیاز به عکس برداری دقیق از سطح نخ می باشد. طبیعی است دقت این روش بالاتر و حجم محاسبات در آن سنگین تر می باشد.

هدف پژوهش پیش رو بررسی مقاومت خمشی کامپوزیت-های تقویت شده و شبیه سازی آن توسط نرم افزار آباکوس و مقایسه نتایج حاصل از آنها با استفاده از روش اجزای محدود است. بر این اساس ابتدا نمونه های آزمایشگاهی ساخته شد و نتایج مقاومت خمشی حاصل شد. در ادامه به منظور ساخت مدل در نرم افزار آباکوس از نتایج آزمایشگاهی نمونه های خمشی استفاده شد. نتایج نشان دهنده دقت بالای پرداخت مدل در ناحیه خطی است. در واقع از سویی بررسی توامان زمان و دمای عمل آوری در ساخت کامپوزیت های تقویت شده و میزان تاثیرگذاری آنها بر مقاومت خمشی و از سوی دیگر استفاده همزمان از کدنویسی پایتون جهت مدلسازی دقیق مسیر حرکت نخهای میانی و به کارگیری روش همگن سازی و نیز قانون مخلوط های اصلاح شده، پژوهش حاضر را از مطالعات قبلی متمایز کرده است.

۲- مواد و روش انجام کار

۲-۱- تولید پارچه و کامپوزیت تقویت شده

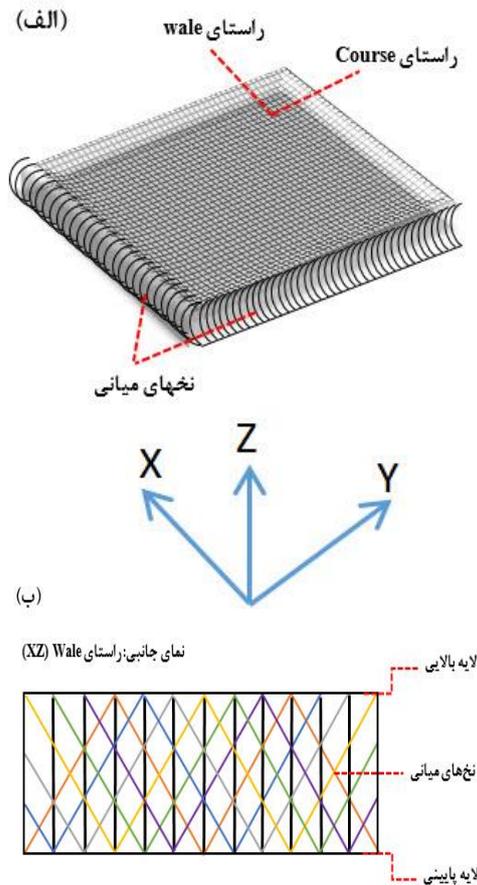
پارچه های سه بعدی حلقوی پودی توسط دستگاه تخت باف حلقوی پودی STOLL CMS T330 طراحی و تولید شد. جهت بررسی میزان تاثیرگذاری ساختار بافت پارچه بر مقاومت کششی کامپوزیت، از سه نوع پارچه سه بعدی حلقوی پودی با الگوهای متفاوت منافذ در لایه خارجی پایینی، استفاده شده است. در هر سه نوع پارچه، لایه خارجی بالایی کاملاً بسته و بدون منفذ^۱ است و عامل متغیر در پارچه ها در نوع ساختار بافت حلقه و در نتیجه شکل منافذ لایه پایینی می باشد، در پارچه SF1

استفاده از مدول یانگ، نتایج حاصل از مدل سازی و اندازه گیری های آزمایشگاهی یکسان نخواهد بود. دلآوری و همکارش [۱۵]، تأثیر جهت گیری نخ های میانی بر رفتار خمشی کامپوزیت های ساندویچی تقویت شده با پارچه های سه بعدی حلقوی پودی به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا از معادلات ریاضی برای تولید هندسه نمونه ها در آباکوس از برنامه نویسی پایتون استفاده کردند. نتایج بررسی های تجربی و عددی نشان داد که الگوی تقویت کننده ها که جهت گیری های مختلف نخ های میانی را با ارتفاع ها و زوایای مختلف ایجاد می کند، به طور قابل توجهی بر رفتار خمشی کامپوزیت های ساختار ساندویچی تأثیر می گذارد. حداکثر تنش فون میسز در نخ های میانی زمانی رخ می دهد که کامپوزیت ها در جهت ردیف خم می شوند، اما حداکثر تنش فون میسز در لایه ها زمانی که کامپوزیت ها در جهت رج خم می شوند ایجاد می شود. در نتیجه، در جهت ردیف، نخ های میانی در رفتار خمشی کامپوزیت های ساندویچی نقش اساسی دارند، در حالی که در جهت رج، لایه ها نقش اصلی را ایفا می کنند. آنها گزارش کردند که کامپوزیت های تقویت شده در جهت رج، مقاومت خمشی بیشتری داشته اند. مدل سازی منسوجات بسته به هدف مورد نظر و ساختار مورد بررسی در یکی از سه سطح زیر بیان می گردد [۱۴-۱۳]:

-سطح ماکرو: در این حالت دقت مدل نسبت به سطوح دیگر کمتر بوده و پارچه بدون توجه به طرح و ساختار آن و نوع درگیری نخها صرفاً به عنوان یک سطح یکنواخت در نظر گرفته می شود و تحلیل ها روی آن صورت می گیرد.

-سطح مزو: در این حالت نحوه تماس و درگیری نخها در پارچه اهمیت داشته و در مدل در نظر گرفته می شود و دقت مدل بالاتر از حالت ماکرو می باشد. در این حالت تماس الیاف در نخ اهمیت نداشته و نخ یک جسم پیوسته در نظر گرفته می شود.

¹ Solid fabric



شکل ۱- شماتیک پارچه سه بعدی (الف) نمای کلی پارچه،
(ب) نمای جانبی (صفحه XZ) [۱۸]

ضخامت لایه بالایی ۱ میلیمتر و ضخامت لایه پایینی نیز، ۰/۵ میلیمتر است. با توجه به روابط ارائه شده در مقالات [۱۵]، دو نوع حرکت مکمل برای نخهای میانی وجود دارد، که با توجه به پارامترهای متفاوت ساختار بافت پارچه، روابط مختص به حرکت نخهای میانی در پارچه سه بعدی مورد استفاده در این پژوهش استخراج و استفاده شد. پارامترهای ساختاری پارچه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین ساختار بافت و نمای بالا و پایین پارچه سه بعدی در جدول ۲ نشان داده شده است.

ساختار بافت حلقه در لایه پایینی "بافت"، در پارچه SF2، "بافت" و در پارچه SF3، "نیم‌بافت" است. شماتیک کلی پارچه سه بعدی در شکل ۱، نشان داده شده است.

از لایه بالایی آب به سیمان اسپری می شود و این لایه باید به قدری دارای منافذ باشد که آب بتواند به مواد سیمانی نفوذ کند و از طرفی به قدری بسته باشد که ذرات سیمان در حین فرایند تولید پارچه، حمل و نقل و اجرا به بیرون نریزند. از لایه پایینی نیز باید بتوان حین فرایند تولید، سیمان را وارد پارچه نمود. لذا باید دارای منافذ مناسبی باشد از طرفی وقتی سیمان وارد پارچه شد باید روی این ساختار منفذدار پوشیده شود تا سیمان بیرون نریزد. از آنجا که ساختار پایینی حین بارگذاری تحت تنش کششی قرار می گیرد. تمرکز بر نوع ساختار و بافت آن بسیار مهم خواهد بود. از این رو در این تحقیق سه نوع بافت مختلف برای پارچه منفذ دار پایین در نظر گرفته شد.

در آماده‌سازی این سه نوع پارچه، سعی بر آن بوده است که تراکم نخهای مونوفیلانمنت و همچنین زاویه قرارگیری آنها بین دو لایه خارجی مشابه باشد و فقط عامل متغیر را نوع بافت لایه پایینی پارچه در نظر گرفته تا تاثیرگذاری این عامل به درستی بررسی شود. نخهای میانی در هر سه پارچه، از نخ دو لا با قطر ۰/۱ میلیمتر تشکیل شده است که در محاسبات، قطر معادل نخهای میانی در هر سه نوع پارچه یکسان و معادل ۰/۲ میلیمتر در نظر گرفته شد. ضخامت لایه‌های خارجی نیز در هر سه نوع پارچه مشابه بوده است. نخ تشکیل‌دهنده لایه خارجی بالایی (نوع I)، مولتی‌فیلانمنت پلی‌استر ۱۵۰/۸ (۱۵۰ دنیر هشت لا)، لایه خارجی پایینی (نوع III)، مولتی‌فیلانمنت پلی‌استر ۱۵۰/۲ (۱۵۰ دنیر دو لا) و نخهای اتصال‌دهنده میانی (نوع II)، مونوفیلانمنت نایلون ۸۰/۲ (۸۰ دنیر دو لا) است.

جدول ۱- پارامترهای ساختاری پارچه‌های سه‌بعدی

ضخامت (mm)	تراکم حلقه‌ها در لایه بالا (Cm ⁻¹)		تراکم حلقه‌ها در لایه پایین (Cm ⁻¹)		تراکم نخ‌های میانی در راستای (Cm ⁻¹)		الگوی بافت نخ‌های میانی	کد پارچه سه‌بعدی
	CPC	WPC	CPC	WPC	رج (صفحه YZ)	ردیف (صفحه XZ)		
۵/۲۵	۸	۴	۷	۳	۷	۴	اینترلاک ۶×۶	SF1
۵/۲۵	۸	۴	۶/۲	۳/۳	۶/۳	۴/۴	اینترلاک ۶×۶	SF2
۵/۲۵	۸	۴	۶/۵	۳/۱	۶/۷	۴/۲	اینترلاک ۶×۶	SF3

جدول ۲- ساختار بافت و نمای بالا و پایین پارچه سه بعدی

تصویر لایه بالایی پارچه سه بعدی	تصویر لایه پایینی پارچه سه بعدی	الگوی تکرار شونده بافت لایه‌های خارجی		کد پارچه سه بعدی
		لایه پایینی	لایه بالایی	
				SF1
				SF2
				SF3

اجزای تشکیل دهنده، روند ساخت و شرایط عمل‌آوری کامپوزیت‌های تقویت شده در شکل ۲ نشان داده شده است.

برای ایجاد محیط آبی استاندارد و ایزوله (بدون افت دمای آب) از دستگاه Temoette junior TE-8J شرکت Techne که در واقع یک حمام آب همراه با گردش است، استفاده شد. برای ایجاد محیط آبی با دمای ۷ درجه سانتی‌گراد از یخچال و برای ایجاد محیط آبی با دمای ۲۳ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد از دو حمام آب جداگانه استفاده شده است.

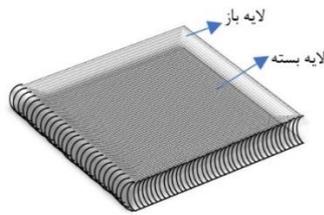
علاوه بر خصوصیات فیزیکی مانند تراکم نخ‌ها، شکل منافذ لایه‌های خارجی، میزان انحنای نخ‌های میانی و ... که صرفاً با مشاهده ظاهر پارچه و یا با پردازش تصویر به دست می‌آید، الگوی هندسی حرکت دقیق نخ‌های میانی در پارچه سه‌بعدی با استفاده از پارامترهای جداول ۱ و ۲ قابل رسم است که در شبیه‌سازی پارچه سه‌بعدی در نرم افزار آباکوس از آنها استفاده شد.

۲-۲- روش ساخت کامپوزیت‌های تقویت شده

مرحله ۱ مرحله ۲ مرحله ۳



زمینه خشک سیمانی



پارچه سه بعدی ماتریس خشک سیمانی از منافذ لایه بالایی پارچه در پارچه سه بعدی ریخته می شود و با ویبره کردن پارچه، تمامی فضای خالی بین نخها پر خواهد شد.



چسباندن (پرس کردن) یک لایه حریر توسط اتو برای جلوگیری از خروج ذرات زمینه خشک سیمانی این سمت پوشش دهی شده از نمونه در عمل روز زمین قرار میگیرد و در فرایند آزمایش روی تکیه گاه قرار داده می شود و بارگذاری می شود

مرحله ۴ مرحله ۵



برگرداندن پارچه و افزودن آب به سطح لایه بسته پارچه و نگهداری به مدت ۶ ساعت در دمای 22 ± 2 درجه سانتی گراد و رطوبت ۹۵٪ نسبت آب به مواد سیمانی ۰.۴۵ می باشد.



عمل آوری در سنین ۷،۳،۱ و ۲۸ روز در محیط آبی با دماهای مختلف ۷، ۲۳ و ۵۰ درجه سانتی گراد

شکل ۲- اجزای تشکیل دهنده، روند ساخت و شرایط عمل آوری کامپوزیت های تقویت شده



شکل ۳- تصویر نمونه در آزمایش خمش کامپوزیت تقویت شده

$$R_f = \frac{1.5 \times F_f \times L}{b \times d^2} \quad (1)$$

R_f : مقاومت خمشی (MPa)، F_f : نیروی خمشی (N)، L: فاصله مراکز غلطکهای زیرین (mm)، b: عرض نمونه (mm)، d: ضخامت نمونه (mm)

۲-۳- آزمون خمش کامپوزیت تقویت شده

آزمایش مقاومت خمشی کامپوزیت تقویت شده طبق استاندارد ASTM D8058 [۱۹]، توسط دستگاه سنتام با ظرفیت نیروی ۱۵ تن انجام شده است. ابعاد نمونه های مورد استفاده برای آزمایش خمش سه نقطه ای، $160 \times 40 \times 5$ میلیمتر و فاصله بین تکیه گاه های زیرین، ۱۰۰ میلیمتر بوده است. تصاویر نمونه ها در آزمایش خمش در شکل ۴ نشان داده شده است. مقاومت خمشی کامپوزیت ها طبق رابطه ۱ محاسبه شد.

۴-۲- شبیه‌سازی آزمون خمش کامپوزیت تقویت‌شده

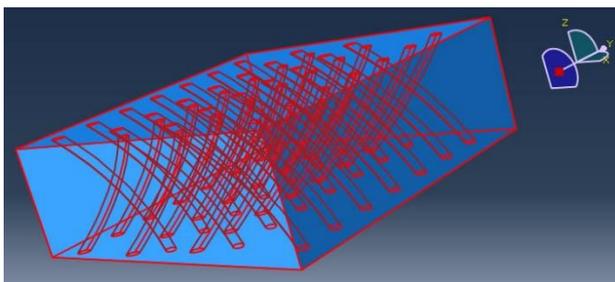
شبیه‌سازی در مقیاس ماکرو در نرم‌افزار آباکوس شامل چند مرحله اصلی بوده که در شکل ۴ ارائه شده است.

در نرم‌افزار آباکوس



شکل ۴- چارت مراحل اصلی مدل‌سازی رفتار خمشی کامپوزیت تقویت‌شده با پارچه سه‌بعدی حلقوی

برای ترسیم یک ساختار یکپارچه از کامپوزیت بهینه، صفحات بالا و پایین بر اساس ضخامت کامپوزیت و نخ‌های میانی نیز بر اساس الگوی بافت اینترلاک 6×6 و نیز تراکم در جهات رج و ردیف در ماژول Assembly در کنار هم قرار گرفتند. در شکل ۵، نمایی از ساختار پارچه سه‌بعدی در محیط نرم‌افزار نشان داده شده است.



شکل ۵- نمایی از ساختار پارچه تقویت‌کننده کامپوزیت

سیمانی

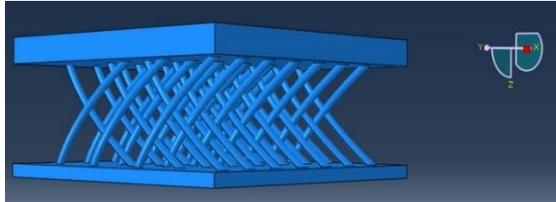
در ساخت کامپوزیت تقویت‌شده، زمینه سیمانی هر یک از لایه‌های خارجی را به طور کامل دربر نمی‌گیرد (نمی‌پوشاند) و در واقع فقط درصدی از حجم لایه‌های خارجی به زمینه سیمانی آغشته شده است. بدین ترتیب برای به دست آوردن مدول الاستیسیته لایه‌های خارجی آغشته

اطلاعات ورودی و مشخصات مکانیکی از طریق آزمون تجربی نمونه کامپوزیت تولید شده بهینه به دست آمد. در ابتدا فرضیاتی جهت ساده‌سازی مدل در نظر گرفته شد. به طور کلی، فرض شد که چگالی خطی نخ ثابت و سطح مقطع تمامی نخ‌ها، دایره‌ای شکل و غیر قابل فشردگی باشد. به دلیل پیچیدگی ساختار پارچه‌های حلقوی پودی دوجداره و عدم پشتیبانی امکانات سخت‌افزاری و نرم‌افزاری موجود برای تحلیل این پارچه‌ها به عنوان تقویت‌کننده کامپوزیت با ابعاد مد نظر این پژوهش، سه بخش صفحه بالایی، صفحه پایینی و نخ‌های میانی به عنوان سه بخش اصلی پارچه سه‌بعدی تعریف شدند. بافت رفتگی صفحات بالایی و پایینی به همراه ترکیب آنها با زمینه سیمانی، با یک مکعب مستطیل همگن با خواص مشابه این صفحات جایگزین شد.

هندسده ساختار حرکت (بافت) نخ‌های میانی، از طریق کد نوشته شده با زبان برنامه‌نویسی پایتون صورت گرفته است [۱۵]. با کمک کد نوشته شده، دو حرکت مکمل برای نخ‌های میانی پارچه سه‌بعدی در ماژول part ترسیم شد.

$$E_c = \eta_0(E_f \times V_f) + E_m \times V_m \quad (2)$$

E_c : مدول یانگ معادل، η_0 : ضریب تغییرات مدول بر اساس جهت پارچه (۳/۰ = η_0 [۱۵])، E_f : مدول نخ، V_f : درصد حجمی نخ، E_m : مدول زمینه سیمانی، V_m : درصد حجمی زمینه سیمانی



شکل ۶- نمونه تلفیق شده شامل نخ‌های میانی و زمینه سیمانی در لایه میانی (بدون در نظر گرفتن لایه‌های خارجی)

لازم به ذکر است همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است ضخامت لایه بالایی و پایینی به دلیل نوع بافت متفاوت، یکسان نیست. این صفحات با مشخصات کامپوزیت تقویت‌شده بوده که بصورت دو مکعب مستطیل 3D Deformable (solid) با ابعاد ۱۶۰×۴۰ میلی‌متر مربع به ترتیب با ضخامت‌های ۱ و ۰/۵ میلی‌متر در مدل شبیه سازی ساخته شدند. در نهایت هر یک از اجزای تشکیل دهنده کامپوزیت تقویت شده شامل لایه بالایی، لایه پایینی و نیز لایه میانی کامپوزیت تقویت‌شده، هر یک به صورت یک مکعب مستطیل با ابعاد واقعی آزمایشگاهی مدل شد و مدول‌های به دست آمده به هر یک از لایه‌ها اختصاص یافت. علاوه بر موارد بیان شده در بخش خصوصیات زمینه سیمانی، جهت تحلیل دقیق‌تر رفتار سیمان از مدل Concrete Damaged plasticity (مدل خسارت بتنی) استفاده شد.

۳- نتایج

۳-۱- نتایج آزمایشگاهی خمش کامپوزیتهای تقویت شده

کامپوزیتهای تقویت‌شده با پارچه‌های سه‌بعدی حلقوی پودی در محیط آبی با دماهای مختلف ۲۳، ۷ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد در زمان‌های ۶ ساعت، ۱، ۳، ۷ و ۲۸ روز عمل‌آوری شده و سپس تحت آزمون خمش سه‌نقطه‌ای قرار گرفت مقادیر میانگین مقاومت خمشی کامپوزیتهای

شده به زمینه سیمانی از قانون مخلوط‌های اصلاح‌شده ۱ استفاده شد. این قانون در رابطه ۴ ارائه شده است. جدول ۲ مقادیر مربوط به مدول پارچه، مدول زمینه سیمانی و مدول معادل پارچه آغشته به سیمان آورده شده است.

جدول ۳- محاسبه مدول خمشی معادل لایه‌های خارجی توسط قانون مخلوط‌ها در راستای course

درصد	لایه پایینی	درصد	لایه بالایی
۲۰٪	حجم اشغال شده توسط نخها (Vf)	۴۰٪	حجم اشغال شده توسط نخها (Vf)
۸۰٪	حجم اشغال شده توسط زمینه سیمانی (Vm)	۶۰٪	حجم اشغال شده توسط زمینه سیمانی (Vm)
۴۳۰۰	مدول نخ ۲ (Ef) (MPa)	۹۱۰۰	مدول نخ ۸ (Ef) (MPa)
۱۹۵۰۰	مدول زمینه سیمانی (Em) (MPa)	۱۹۵۰۰	*مدول زمینه سیمانی (Em) (MPa)
۱۵۸۵۸	مدول معادل (MPa)	۱۲۷۹۲	مدول معادل (MPa)

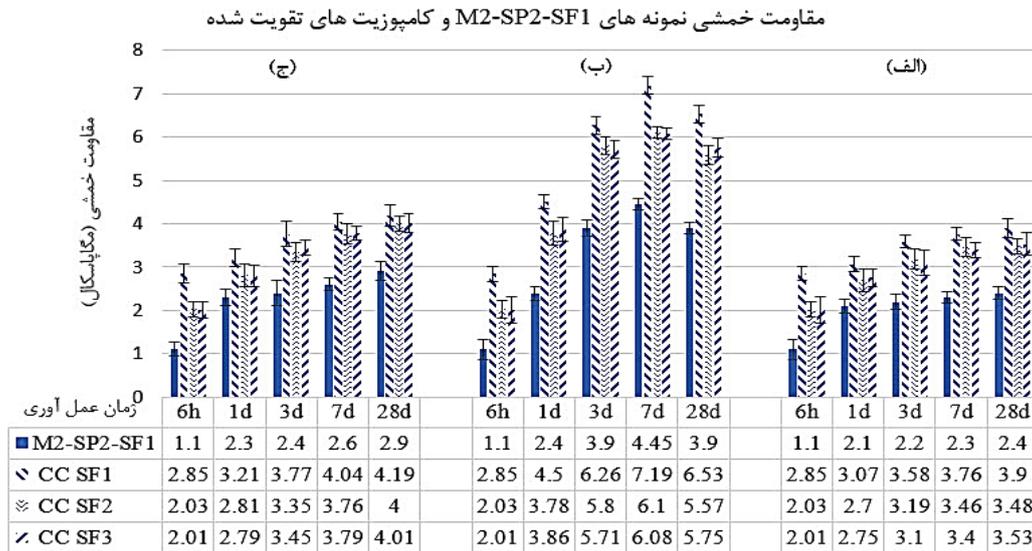
* مقدار مدول زمینه سیمانی معادل شیب ناحیه الاستیک نمودار تنش کرنش است که با توجه به نتایج آزمایشات مقاومت فشاری به دست آمد.

برای محاسبه مدول الاستیسیته قسمت میانی کامپوزیت تقویت شده (شامل نخهای میانی و زمینه سیمانی)، از همگن‌سازی طبق رابطه ۲ استفاده شده است. در ابتدا نخهای میانی که از قبل مدلسازی شده بود را در یک مکعب مستطیل با ابعاد ۱۱×۱۱ میلی‌متر مربع و ضخامت ۳/۷۵ میلی‌متر، که در واقع نماینده زمینه سیمانی قسمت میانی است، توسط آیکون Merge، تلفیق می‌شوند. در نهایت، مدول معادل و نهایی به دست آمده از این جز تکرار شونده (سل تکرار شونده)، به کل لایه میانی در مدلسازی خمشی کامپوزیت تقویت شده، اختصاص داده می‌شود. شکل ۶، تصویری از نمونه تلفیق شده نخهای میانی و زمینه سیمانی در لایه میانی کامپوزیت تقویت‌شده را نشان می‌دهد.

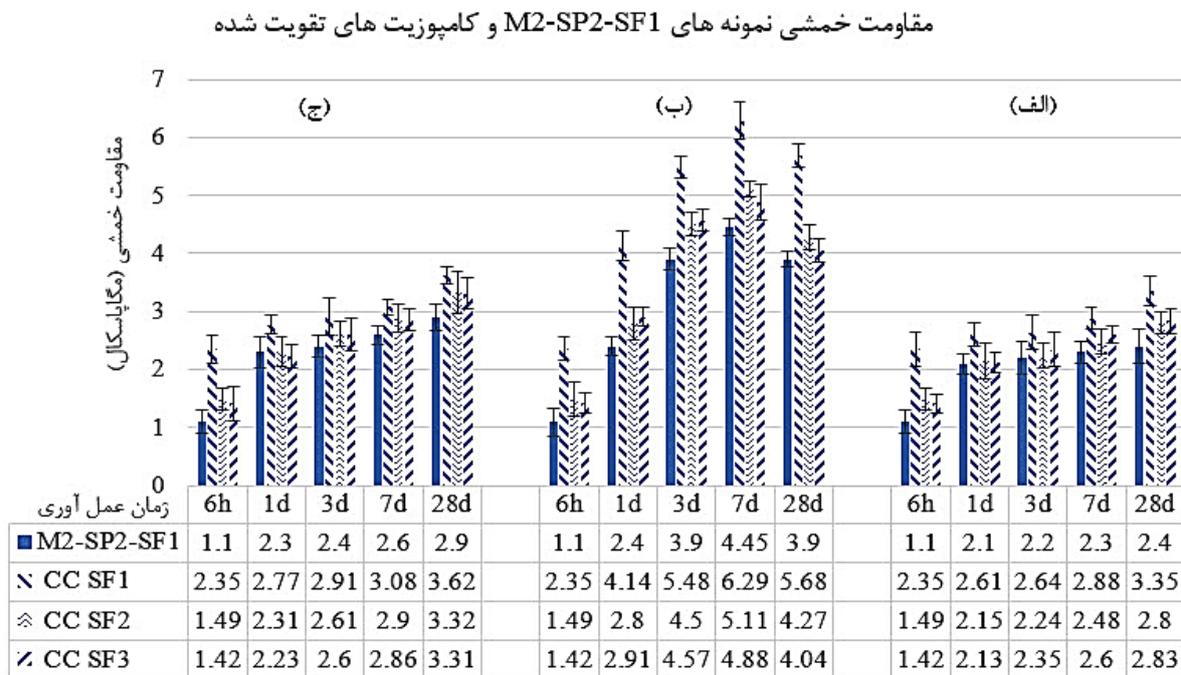
¹ Modified rule of mixture

ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ ارائه شده است. انحراف معیار نیز بر روی نمودار نشان داده شده است.

تقویت شده در جهت رج و ردیف پارچه و نیز مقاومت خمشی زمینه سیمانی خالص (M2-SP2-SF1) ترکیب سیمان کلسیم آلومینات، پودر سیلیس و سیلیکافوم) به



شکل ۷- مقاومت خمشی M2-SP2-SF1 و کامپوزیت‌های تقویت‌شده در جهت course، در سنین عمل‌آوری مختلف در آب با دمای (الف) ۵۰ درجه سانتی‌گراد، (ب) ۲۳ درجه سانتی‌گراد، (ج) ۷ درجه سانتی‌گراد



شکل ۸- مقاومت خمشی M2-SP2-SF1 و کامپوزیت‌های تقویت‌شده در جهت wale، در سنین عمل‌آوری مختلف در آب با دمای (الف) ۵۰ درجه سانتی‌گراد، (ب) ۲۳ درجه سانتی‌گراد، (ج) ۷ درجه سانتی‌گراد

این یافته از منظر شرایط اجرایی این نوع کامپوزیت حائز اهمیت است.

برای تعیین تنش و کرنش نمونه کامپوزیت سیمانی در آزمایش خمش سه نقطه‌ای، از روابط ۳ و ۴ استفاده شد.

$$\sigma = \frac{3FL}{2bd^2} \quad (3)$$

$$\varepsilon = \frac{6Dd}{L^2} \quad (4)$$

σ : تنش در لایه خارجی (بیرونی-سطحی) نمونه در نقطه میانی (Pa)
 ε : کرنش در سطح خارجی نمونه (m/m)

F: نیرو وارده به تیر (N)

L: طول نمونه (M)

b: عرض نمونه (M)

d: ضخامت نمونه (M)

D: حداکثر انحراف مرکز تیر (M)

با توجه به منحنی‌های تنش-کرنش ارائه شده در شکل ۹، می‌توان گفت رفتار کلی خمش کامپوزیت تقویت‌شده با رفتار خمش زمینه سیمانی خالص متفاوت است. زمینه سیمانی با تحمل نیروی خمشی، شکسته شده و آزمون خمش به پایان می‌رسد ($\varepsilon_f = \varepsilon_u$ و $\sigma_f = \sigma_u$)، این در حالی است که در کامپوزیت‌های تقویت‌شده با پارچه‌های سه بعدی، در ابتدا یک شکست اولیه (σ_f, ε_f) و پس از تحمل بیشینه تنش خمشی (σ_u)، شکست کامپوزیت در کرنش ε_u مشاهده شد. کامپوزیت‌های تقویت‌شده، تنش و کرنش بیشتری نسبت به زمینه سیمانی خالص داشتند. با افزایش زمان عمل‌آوری، σ_f و σ_u به جز در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد و زمان ۲۸ روز، افزایش یافته است که دلیل آن کاهش تنش در سن و دمای مذکور، پدیده "تبدیل" است. حداکثر σ_f و σ_u در کامپوزیت‌های تقویت‌شده در زمان عمل‌آوری ۲۳ درجه سانتی‌گراد، سپس در ۷ درجه سانتی‌گراد و در نهایت حداقل مقادیر آنها در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد. σ_f و σ_u کامپوزیت‌ها در راستای رج بیشتر از راستای ردیف است چون در راستای course، میزان تاثیر تقویت‌کنندگی لایه‌های خارجی و در راستای wale، تاثیر نخ‌های میانی بیشتر است.

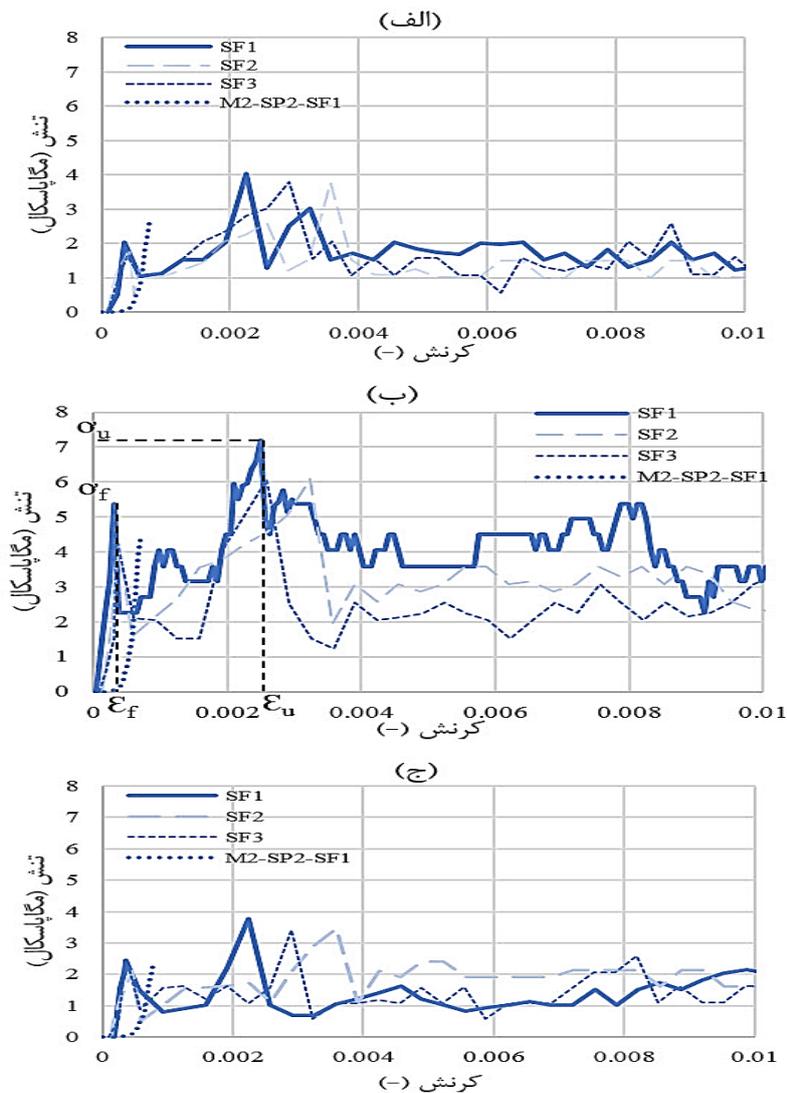
طبق شکل ۷، ۸ با افزایش دمای عمل‌آوری، مقاومت خمشی کامپوزیت‌های تقویت‌شده افزایش می‌یابد. از آنجا که با افزایش دمای عمل‌آوری، فرایند شیمیایی هیدراتاسیون سیمان تسریع می‌شود در نتیجه در زمان کمتر خمیر سیمان و به طبع آن کامپوزیت به مقاومت بیشتری می‌رسد.

با مقایسه مقاومت خمشی کامپوزیت‌های تقویت‌شده و مقاومت خمشی زمینه سیمانی خالص، افزایش مقاومت خمشی مشاهده شده است. این رفتار به خوبی نشان می‌دهد که تقویت زمینه سیمانی با پارچه سه‌بعدی حلقوی پودی (بدون در نظر گرفتن نوع بافت) تاثیر مثبتی بر مقاومت خمشی داشته است. طبق شکل‌های ۷ و ۸، با افزایش زمان عمل‌آوری، مقاومت خمشی کامپوزیت‌های تقویت‌شده افزایش می‌یابد. با توجه به روند هیدراتاسیون سیمان و پدیده "تبدیل"^۱ در سیمان‌های کلسیم آلومینات (کاهش مقاومت سیمان کلسیم آلومینات به دلیل تغییر فازها از حالت ناپایدار به حالت پایدار و اهش حجم نمونه در این فرایند مقاومت نمونه به دلیل متخلخل شدن فضای نمونه کاهش می‌یابد)، فقط در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد و در زمان ۷ روز، کاهش مقاومت خمشی مشاهده شد. نمودار تنش-کرنش آزمون خمش کامپوزیت‌های تقویت‌شده با SF1, SF2, SF3، عمل-آوری شده در مدت زمان ۷ روز و دماهای ۵۰، ۲۳ و ۷ درجه سانتی‌گراد در شکل ۹ ارائه شده است. در دمای ۷ درجه به دلیل پایین بودن دمای عمل‌آوری فرایند هیدراتاسیون به کندی رشد کرده است و کامپوزیت سیمانی نسبت به شرایط عمل‌آوری در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد از مقاومت کمتری برخوردار است. در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد فاز ناپایدار به فاز پایدار تبدیل شده است و منافذ در مخلوط افزایش یافته است که باعث کاهش مقاومت مخلوط شده است. لذا بهترین زمان عمل‌آوری این کامپوزیت سیمانی دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد است.

¹ Inversion

کمترین مقدار را به خود اختصاص داده، بنابراین حداکثر مدول را دارد و رفتار مدل تا ناحیه بروز اولین شکست از اهمیت خاصی برخوردار است. به همین دلیل رفتار مدل در ناحیه الاستیک مورد ارزیابی قرار گرفت. با افزایش زمان عمل‌آوری، مدول‌های مذکور نیز افزایش یافتند. دلیل آن را می‌توان، افزایش تنشها، توامان با افزایش دمای عمل‌آوری دانست. ϵ_f و ϵ_u کامپوزیت‌های تقویت شده در راستای رج بیشتر از ردیف است، چون با توجه به ساختار پارچه‌های حلقوی، این پارچه‌ها در راستای رج ازدیاد طول بیشتری دارند.

کرنش شکست اولیه (ϵ_f) و کرنش متناظر در تنش بیشینه (ϵ_u) در کامپوزیت‌های تقویت‌شده با SF1 کمتر از بقیه پارچه‌ها است و دلیل آن، اثرگذاری نوع بافت لایه‌های خارجی بوده است. از سوی دیگر، حداکثر مدول الاستیک (مدول تا نقطه شکست اولیه (ϵ_f))، مدول تا نقطه پیک نمودار (ϵ_u) و مدول میانگین (E_a) در راستای رج و ردیف در کامپوزیت‌های تقویت شده با SF1 بیشتر از کامپوزیت‌های تقویت شده با SF2 و SF3 می‌باشد. با توجه به اینکه در این پژوهش تنش SF1 CC در بین کامپوزیت‌ها بیشترین مقدار را داشته و کرنش CC SF1



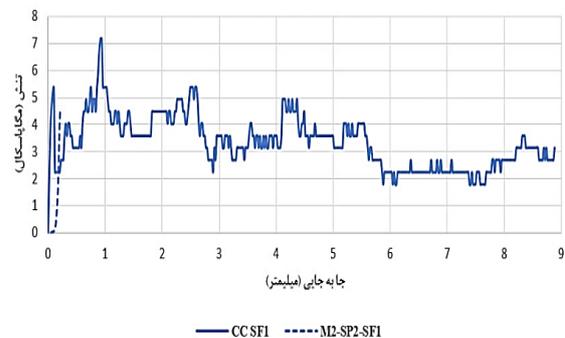
شکل ۹- خمش زمینه سیمانی بهینه و کامپوزیت‌های تقویت شده با پارچه‌های سه بعدی در راستای رج در سن عمل‌آوری ۷ روز و دمای (الف) ۷ درجه سانتی‌گراد، (ب) ۲۳ درجه سانتی‌گراد، (ج) ۵۰ درجه سانتی‌گراد

مسلح شده با دیگر پارچه ها است. در ادامه با افزایش بار به کامپوزیت، پارچه به کشش می افتد و قسمت بیرونی کامپوزیت تحت فشار قرار می گیرد. در این مرحله هرچه پارچه توانایی تحمل نیروی کششی بیشتری را داشته باشد، خیز تا لحظه شکست نهایی (پاره شدن پارچه یا خرد شدن بتن در ناحیه فشاری) افزایش می یابد که با توجه به اینکه پارچه SF1 بار بیشتری تحمل میکند، کامپوزیت مجهز به این پارچه دارای خیزی بیشتری تا مرحله شکست نهایی خواهد بود.

از این رو، از میان کامپوزیت‌های تقویت‌شده با پارچه‌های سه‌بعدی، SF1 اثر تقویت‌کنندگی بیشتری نسبت به سایر پارچه‌ها داشته است. در خمش کامپوزیت‌های تقویت شده در راستای رج، میزان تاثیر تقویت‌کنندگی لایه‌های خارجی بیشتر است، پس رفتار کششی کامپوزیت‌های تقویت شده را می‌توان با توجه به نوع بافت لایه‌های پایینی تحلیل کرد. اهمیت بررسی رفتار کششی لایه های پایینی به این دلیل است که در هنگام اعمال بار خمشی به کامپوزیت سیمانی تقویت‌شده، قسمت پایینی کامپوزیت و همچنین لایه پایینی در پارچه‌های سه‌بعدی، تحت کشش قرار دارد. نتایج آزمون کشش لایه‌های خارجی پارچه‌های سه‌بعدی در شکل ۱۱ ارائه شده است. با توجه به شکل ۱۱، تنش در نقطه پارگی برای لایه بالایی پارچه‌های سه‌بعدی، دارای بیشترین مقدار و پس از آن، لایه پایینی (SF1) و لایه پایینی (SF3) و در آخر لایه پایینی (SF2) کمترین تنش ماکزیمم (تنش در نقطه پارگی) را داشته است. در هنگام انجام آزمون خمش کامپوزیت‌های تقویت شده، میزان نیروی کششی وارده به لایه‌های پایینی و همچنین میزان خیز (تغییر طول) این لایه کم بوده و می‌توان این تغییرات طول را در حدود ناحیه الاستیک در نظر گرفت.

با توجه به اینکه کامپوزیت سیمانی تقویت‌شده با پارچه SF1 (CC SF1) در جهت رج در دمای ۲۳ درجه سانتی-گراد و زمان عمل‌آوری ۷ روز، بیشترین مقاومت خمشی را داشته است، لذا به عنوان کامپوزیت تقویت‌شده بهینه انتخاب شد. در نهایت نمودار نیرو-خیز حاصل از آزمون خمش این کامپوزیت در آزمایشگاه تا محدوده الاستیک غیر خطی با نتایج شبیه‌سازی مقایسه می‌شود. در شکل ۱۰، نمودار نتایج آزمایشگاهی تنش-خیز آزمون خمش کامپوزیت سیمانی تقویت شده با پارچه SF1 (CC SF1) و ملات سیمانی با یکدیگر مقایسه شدند.

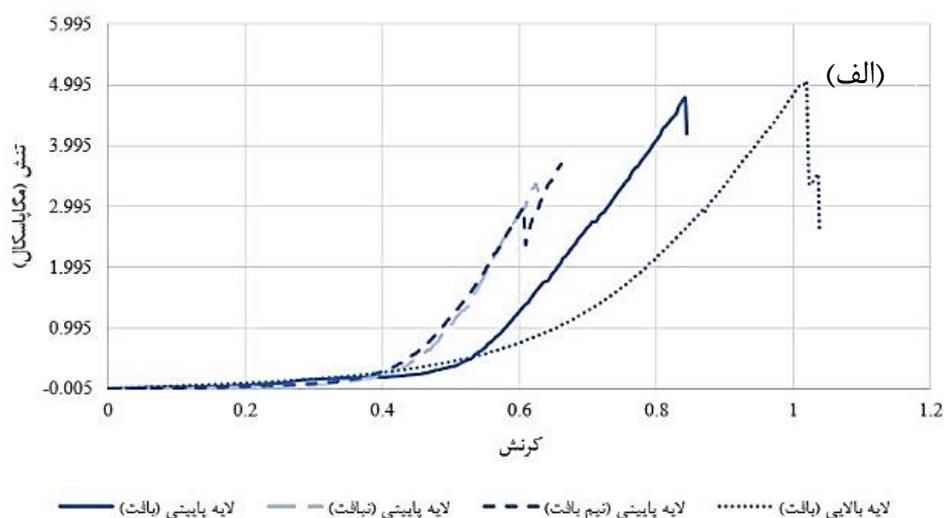
رفتار CC SF1 و ملات بهینه در سن ۷ روز و دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد



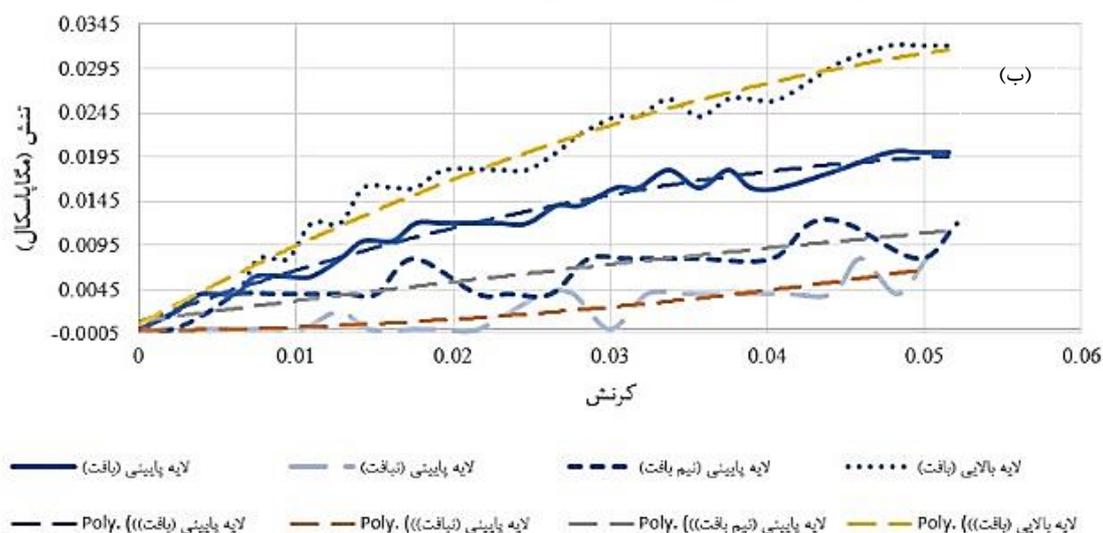
شکل ۱۰- نتایج آزمایشگاهی تنش-خیز آزمون خمش کامپوزیت تقویت‌شده با SF1 (CC SF1) در جهت رج و زمینه سیمانی خالص (M2-SP2-SF1)

با توجه به شکل ۱۰، می‌توان گفت که با تقویت ملات سیمانی توسط پارچه SF1، خیز بیشینه (نهایی) افزایش ولی خیز در نقطه شکست، به مقدار اندکی کاهش یافته است. از آنجا که مدول (سختی) بافت SF1 از دیگر بافت‌ها بیشتر است انتظار می‌رفت که خیز تا لحظه شکست اولیه (لحظه ای که بتن در قسمت کششی می‌شکند و پارچه به کشش می‌افتد) کمتر از دیگر کامپوزیت‌ها

منحنی تنش-کرنش لایه های خارجی پارچه سه بعدی



منحنی تنش-کرنش لایه های خارجی پارچه سه بعدی در ناحیه الاستیک



شکل ۱۱- منحنی تنش-کرنش لایه های خارجی پارچه سه بعدی (الف) تا انتهای آزمون، (ب) در ناحیه الاستیک

لایه پایینی در پارچه SF1 نسبت به بقیه پارچه ها، مدول الاستیسیته بیشتری داشته، پس مقاومت خمشی کامپوزیت های تقویت شده با پارچه سه بعدی SF1 نیز بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است. در جدول ۳ جزئیات بیشتری از تنش و کرنش های آزمون خمشی کامپوزیت های تقویت شده با پارچه های سه بعدی ارائه شده است.

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۳ و نیز مقایسه شکل های ۷ و ۸، می توان گفت که همه کامپوزیت های

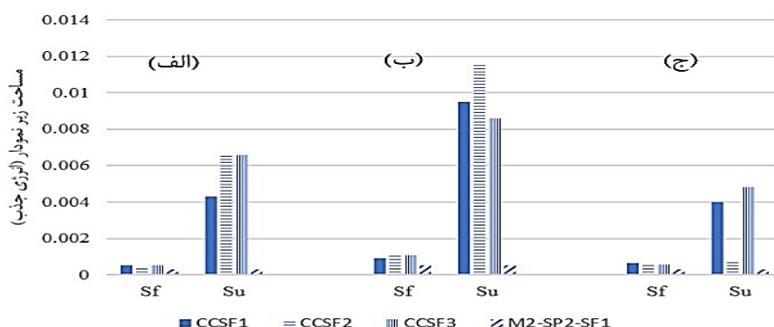
از این رو در قسمت (ب) شکل ۱۱، تنش-کرنش لایه های خارجی پارچه سه بعدی در ناحیه الاستیک به همراه منحنی برازش چندجمله ای (منحنی های نقطه چین) ارائه شد. با توجه به نتایج این قسمت می توان گفت، مدول الاستیسیته لایه بالایی پارچه های سه بعدی، بیشترین مقدار و پس از آن، لایه پایینی (SF1) و لایه پایینی (SF3) و در آخر لایه پایینی (SF2) کمترین مدول الاستیسیته را داشته است. بدین ترتیب با توجه به اینکه

روند مشاهده شده در پژوهش پیش رو، صحیح و منطقی بوده است. جهت بررسی و مقایسه میزان انرژی جذب شده توسط زمینه سیمانی و کامپوزیت‌های تقویت شده، مقادیر سطح زیر نمودار تنش- کرنش آنها در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در این شکل S_{II} ، نمایانگر سطح زیر نمودار تا نقطه بیشینه تنش و S_f نمایانگر سطح زیر نمودار تا شکست اولیه است.

تقویت شده در جهت رج دارای تنش خمشی بیشتری نسبت به جهت ردیف بوده‌اند. مقاومت خمشی کامپوزیت‌های تقویت شده در جهت wale، بیشتر متاثر از الگوی قرارگیری نخ‌های میانی است، همچنین مقاومت خمشی کامپوزیت‌های تقویت شده در جهت course، بیشتر متاثر از استحکام لایه‌های خارجی پارچه سه‌بعدی است [۱۵]. از اینرو با توجه به استحکام بخشی بیشتر لایه‌های خارجی نسبت به نخ‌های میانی، می‌توان تحلیل کرد که

جدول ۴- تنش و کرنش‌های آزمون خمشی کامپوزیت‌های تقویت شده (عمل‌آوری شده در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷ روز) در نقطه شکست کامپوزیت و تنش بیشینه

CC SF3/ course	CC SF3/ wale	CC SF2/ course	CC SF2/ wale	CC SF1/ course	CC SF1/ wale	
۴/۴۹	۴/۲۶	۴/۲۴	۴/۰۶	۵/۳۸	۴/۸۹	تنش در نقطه شکست کامپوزیت (مگاپاسکال)
~۱						خیز تا نقطه شکست (میلی‌متر)
۶/۰۷	۴/۸۸	۶/۰۹	۵/۱۰	۷/۱۹	۶/۲۸	تنش بیشینه (مگاپاسکال)
~۱						خیز تا تنش بیشینه (میلی‌متر)



شکل ۱۲- سطح زیر نمودار تنش- کرنش ماتریس سیمانی بهینه و کامپوزیت‌های سیمانی تقویت شده با پارچه‌های سه بعدی در راستای رج در سن عمل‌آوری ۷ روز و دمای عمل‌آوری (الف) ۷ درجه سانتی‌گراد، (ب) ۲۳ درجه سانتی‌گراد، (ج) ۵۰ درجه سانتی‌گراد

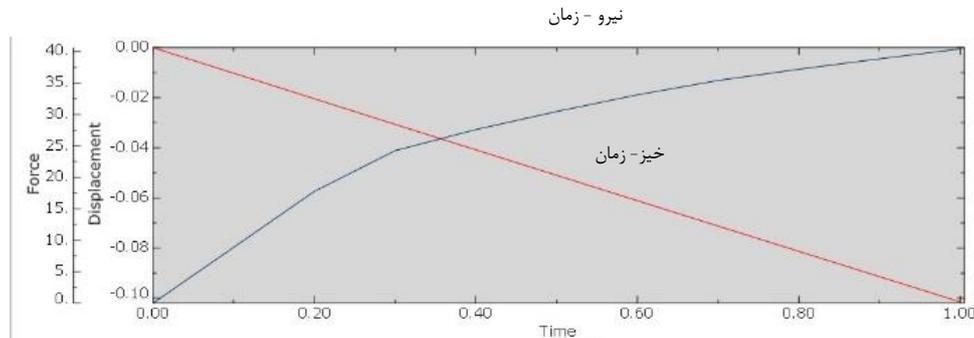
شده است. مقایسه بین جذب انرژی زمینه سیمانی خالص (M2-SP2-SF1) و کامپوزیت‌های تقویت شده، نشان می‌دهد که میزان جذب انرژی در کامپوزیت‌های تقویت شده بیشتر بوده است این رفتار نشان‌دهنده این است که پارچه به عنوان تقویت‌کننده در میزان انرژی جذب شده، تاثیرگذار بوده است. بین کامپوزیت‌های تقویت‌شده با انواع پارچه‌ها نظم مشخصی مشاهده نشد.

با توجه به مساحت‌های گزارش شده در شکل ۱۲، می‌توان مشاهده کرد که در همه دماهای عمل‌آوری، بین انرژی جذب شده در شکست اولیه و انرژی جذب شده در تنش بیشینه، اختلاف زیادی وجود دارد. این رفتار نشان می‌دهد از لحظه‌ای که شکست اولیه در کامپوزیت اتفاق می‌افتد تا لحظه‌ای که به حداکثر تنش می‌رسد، انرژی قابل توجهی جذب می‌شود. حداکثر میزان جذب انرژی در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد، پس از آن در ۷ درجه سانتی‌گراد و حداقل آن در ۵۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده

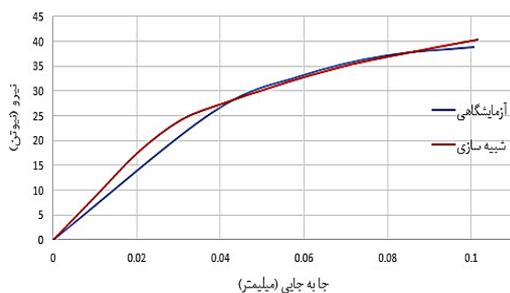
۲-۳- نتایج شبیه‌سازی آزمون خمش کامپوزیت‌های تقویت‌شده

برای مشاهده و تحلیل نتایج در ماژول Visualization ابتدا از قسمت Create XY Data و

سپس گزینه ODB filed output، گراف‌های نیرو-زمان و خیز-زمان به دست می‌آید. در شکل ۱۳ این دو منحنی نشان داده شده است.



شکل ۱۳- گراف‌های نیرو-زمان (منحنی آبی) و خیز-زمان (خط قرمز) برای نمونه شبیه‌سازی شده



شکل ۱۴- مقایسه نتایج خمش کامپوزیت تقویت شده آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده

با توجه به شکل ۱۴، می‌توان دریافت که شبیه‌سازی به روش همگن‌سازی و استفاده از یک واحد تکرار شونده و نیز به کار بردن قانون مخلوط‌های اصلاح شده، در آزمون خمش، انطباق قابل قبولی در ناحیه الاستیک داشته و قادر به پیش‌بینی خواص خمشی کامپوزیت در محدوده الاستیک (محدوده قبل از ترک اولیه کامپوزیت) می‌باشد. برای ارزیابی دقیق‌تر منحنی‌های نیرو-خیز، سطح زیر نمودارهای حاصل از آزمون خمش آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده، محاسبه و مورد مقایسه قرار گرفت. سطح زیر نمودار خمش کامپوزیت تقویت شده آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده در ناحیه الاستیک، به ترتیب $2/62$ و $2/77$ محاسبه شد. با توجه به ریز داده‌های منحنی‌های شکل ۱۴، با استفاده از محاسبه شیب خط نقطه به نقطه،

سپس با استفاده از گزینه Operate on XY Data این دو گراف را با دستور Combine، ادغام کرده و منحنی نهایی نیرو-خیز به دست می‌آید. با استفاده از مدل خسارت بتنی، رفتار خمشی و فشاری زمینه سیمانی توامان با هم بر رفتار خروجی مدل موثر است، از این رو، دلیل منحنی شدن گراف نهایی، استفاده از مدل "خسارت بتنی"^۱ می‌باشد. با توجه به اینکه در این پژوهش به طور خاص، هدف از تقویت زمینه سیمانی توسط پارچه‌های سه‌بعدی، پوشش مناسب برای آبراه‌ها بوده است، باید به این نکته توجه داشت که با بروز اولین شکست، ممکن است آب به سطح زیر کامپوزیت نفوذ کند، از اینرو رفتار مدل تا ناحیه بروز اولین شکست از اهمیت خاصی برخوردار است. به همین دلیل رفتار مدل در ناحیه الاستیک مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت نتایج به دست آمده حاصل از آزمون خمش نمونه آزمایشگاهی و نیز کامپوزیت شبیه‌سازی شده با یکدیگر مقایسه شدند. در شکل ۱۴ تطابق خوب این دو نمودار نشان داده شده است.

¹ Concrete damage plasticity

و مقایسه نتایج حاصل از آنها با استفاده از روش اجزای محدود انجام شد.

سیمان های کلسیم آلومیناتی سیمانی‌هایی منبسط شوند و زود سخت شونده‌ای هستند که رفتار آنها تابع دمای عمل آوری است. لذا رفتار کامپوزیت های سیمانی ساخته شده از آنها نیز با توجه به دمای عمل آوری تغییر می کند. نتایج نشان داد عمل آوری در دمای ۲۳ درجه سانتیگراد شرایط تبدیل فازهای ناپایدار را در این نوع سیمان ها نسبت به عمل آوری در دمای ۵۰ درجه به فاز پایدار را به تاخیر می اندازد.

از میان کامپوزیت‌های تقویت‌شده با پارچه‌های سه‌بعدی، SF1 اثر تقویت‌کنندگی بیشتری نسبت به سایر پارچه‌ها داشته است. مقاومت خمشی کامپوزیت‌های تقویت شده با SF1 نیز بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است. کامپوزیت‌های تقویت شده در جهت رج دارای تنش خمشی بیشتری نسبت به جهت ردیف بوده‌اند. به این ترتیب، کامپوزیت سیمانی تقویت شده با SF1 در جهت course، در دمای عمل آوری ۲۳ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان ۷ روز بیشترین مقاومت خمشی را داشته است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی خمش کامپوزیت‌های تقویت‌شده، مطابقت خوبی را در ناحیه خطی نشان داده است.

۵- پیشنهاد برای مطالعات آینده

تراکم نخ های میانی در پارچه های سه بعدی یک پارامتر مهم در رفتار اینگونه پارچه ها است. نخ های بیشتر فضای خمیر سیمانی را کاهش می دهد، هزینه را بالا می برد و بر نفوذ پذیری و مقاومت کامپوزیت تاثیرگذار است. اینکه حجم نخ میانی چقدر باشد تا در فرایند ساخت، سیمان بتواند به خوبی درون پارچه وارد شود و همچنین خواص مکانیکی و دوامی پارچه بهبود یابد و هزینه تولید پارچه بتنی کاهش یابد یک خلاء پژوهشی است.

۶-مراجع

[1] A. H. López, J. L. G. Calvo, J. G. Olmo, S. Petit, and M. C. Alonso, "Microstructural evolution of calcium aluminate cements hydration with silica fume and fly ash additions by scanning

electron microscopy, and mid and near-infrared spectroscopy," J. Am. Ceram. Soc., vol. 91, no. 4, pp. 1258-1265, 2008.

درون‌یابی و تفریق نیروهای حاصل از شبیه‌سازی و آزمایشگاهی، خطای شبیه‌سازی ۸/۷۱٪ محاسبه شد. یکی از دلایل اندک خطای به وجود آمده را می‌توان در وجود حفره‌های احتمالی (در مقیاس میکرو) درون ساختار کامپوزیت دانست که خود می‌تواند عامل شروع رشد ترک باشند. یکی دیگر از عوامل ایجاد خطا را می‌توان رخ دادن شکست در محل تماس نخها با زمینه دانست که سبب جدایش سطح نخ از زمینه سیمانی می‌گردد. در واقع در آزمون خمشی با اعمال بار به کامپوزیت تقویت‌شده، در ابتدا زمینه به همراه جزء تقویت‌کننده تمام بار را تحمل می‌کند تا جایی که اولین شکست در زمینه سیمانی ایجاد می‌گردد، پس از آن نیز روند صعودی نمودار تا رسیدن به نقطه بیشینه نیرو ادامه می‌یابد. بعد از رسیدن به این نقطه در نمودار نیرو-خیز، نمودار روند نزولی پیدا کرده و با توجه به خلل و فرج‌های بافت پارچه و نیز درگیری آنها با تکه‌های خرد شده زمینه سیمانی، نمودار به صورت موج‌دار (موجهای ریز، نويزدار) ادامه می‌یابد. پس از خروج نمونه از دستگاه، زمینه سیمانی در ناحیه اعمال بار به طور کامل شکسته شده ولی در لایه‌های خارجی پارچه و ظاهر کلی پارچه، هیچ پارگی مشاهده نشده است.

۴- نتیجه‌گیری

مقالات و تجربیات متعدد نشان داد که تقویت ملات سیمانی توسط پارچه می‌تواند برخی خصوصیات مکانیکی را بهبود بخشد. در پژوهش پیش‌رو، زمینه سیمانی توسط سه نوع پارچه سه‌بعدی حلقوی پودی با نوع بافتهای متفاوت در لایه پایینی تقویت شده است. پس از انجام آزمون خمشی و بررسی نتایج و انتخاب نمونه بهینه (کامپوزیت دارای بیشترین مقاومت خمشی) شبیه‌سازی خمشی کامپوزیت‌های تقویت‌شده توسط نرم‌افزار آباکوس

electron microscopy, and mid and near-infrared spectroscopy," J. Am. Ceram. Soc., vol. 91, no. 4, pp. 1258-1265, 2008.

[2] Ö. Kirca, I. Özgür Yaman, and M. Tokyay, "Compressive strength development of

- calcium aluminate cement-GGBFS blends,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 35, no. 1, pp. 163–170, 2013.
- [3] P. He, B. Zhang, J. X. Lu, and C. S. Poon, “A ternary optimization of alkali-activated cement mortars incorporating glass powder, slag and calcium aluminate cement,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 240, p. 117983, 2020.
- [4] H. H. S. Ramakrishna, N.K. Cuong, “Tensile properties of plain weft knitted glass fiber fabric reinforced epoxy composites,” *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 16, no. 10, pp. 946–966, 1997.
- [5] S. Ramakrishna, “Characterization and modeling of the tensile properties of plain weft-knit fabric-reinforced composites,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 57, no. 1, pp. 1–22, 1997.
- [6] S. Ramakrishna, “Analysis and modeling of plain knitted fabric reinforced composites,” *J. Compos. Mater.*, vol. 13, no. 1, pp. 52–70, 1997.
- [7] S. G. Vassiliadis, A. E. Kallivretaki, and C. G. Provatidis, “Geometrical modelling of plain weft knitted fabrics,” *Indian J. Fibre Text. Res.*, vol. 32, no. 1, pp. 62–71, 2007.
- [8] S. G. Vassiliadis, A. E. Kallivretaki, and C. G. Provatidis, “Mechanical simulation of the plain weft knitted fabrics,” *Int. J. Cloth. Sci. Technol.*, vol. 19, no. 2, pp. 109–130, 2007.
- [9] T. D. Dinh, O. Weeger, S. Kaijima, and S.-K. Yeung, “Prediction of mechanical properties of knitted fabrics under tensile and shear loading: Mesoscale analysis using representative unit cells and its validation,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 148, pp. 81–92, Sep. 2018.
- [10] S. B. Abdollahi, S. M. Hejazi, and H. Hasani, “Investigation of flexural behavior of 3D textile reinforced concrete using both experimental tests and finite element method,” *J. Sandw. Struct. Mater.*, vol. 20, no. 5, pp. 578–594, 2018.
- [11] J. C. Velosa, S. Rana, R. Fanguero, and S. Marques, “Predicting mechanical behavior of novel sandwich composite panels based on 3D warp-knitted spacer fabrics using Finite Element Method (FEM),” *ECCM 2012 - Compos. Venice, Proc. 15th Eur. Conf. Compos. Mater.*, no. June, pp. 24–28, 2012.
- [12] M. Ravandi, A. Moradi, S. Ahlquist, and M. Banu, “Numerical Simulation of the Mechanical Behavior of a Weft-Knitted Carbon Fiber Composite under Tensile Loading,” *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 3, 2022.
- [13] R. Hessami, A. A. Yazdi, and A. Mazidi, “Investigation of tensile and flexural behavior of biaxial and rib 1 × 1 weft-knitted composite using experimental tests and multi-scale finite element modeling,” *J. Compos. Mater.*, vol. 53, no. 23, pp. 3201–3215, 2019.
- [14] B. Eller, M. R. Majid, and S. Fischer, “Laboratory Tests and FE Modeling of the Concrete Canvas, for Infrastructure Applications,” *Acta Polytech. Hungarica*, vol. 19, no. 3, pp. 9–20, 2022.
- [15] K. Delavari and H. Dabiryan, “Effect of Z-fiber orientation on the bending behavior of sandwich-structured composite: Numerical and experimental study,” *Compos. Struct.*, vol. 256, p. 113140, 2021.
- [16] X. Chen, *Modelling and predicting textile behaviour*. Woodhead Publishing Ltd, 2009.
- [17] C. A. Felippa, *Introduction to finite element methods, lecture notes*. Department of aerospace engineering sciences of the university of Colorado, Boulder, 2004.
- [18] B. Adosi, Seyed Abbas Mirjalili, M. Adresi, Jean-Marc Tulliani, and P. Antonaci, “Experimental Evaluation of Tensile Performance of Aluminate Cement Composite Reinforced with Weft Knitted Fabrics as a Function of Curing Temperature,” vol. 13, no. 4385, 2021.
- [19] “ASTM D8058-19 - Standard Test Method for Determining the Flexural Strength of a Geosynthetic Cementitious Composite Mat (GCCM) Using the Three-Point Bending Test.