

Numerical Investigation of the Behavior of Concrete beam Reinforced with FRCM and TRM Composites

Bizhan Karimi Sharafshadeh

PhD student, Department of Civil Engineering, Qeshm Branch, Islamic Azad University, Qeshm, Iran

Mohammad Amiri*

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Hormozgan University, Bandar Abbas, Iran

Mohammad Javad Ketabdari

Department of Maritime Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
Farhood Azarsina

Department of Marine Structures, Technical and Engineering Faculty, Science and Research Unit, Islamic Azad University, Tehran, Iran

amirii@hormozgan.ac.ir

DOI : 10.30495/CIVIL.2023.706895

Keywords:

carbon fiber matrix,
TRM composite,
FRCM composite,
natural fiber matrix,
reinforced mortar.

Abstract

Reinforcement of cement-based matrix composites with TRM and FRCM fibers have been utilized to improve the behavioral performance of reinforced concrete beams subjected to destruction in the past decades. Reinforcement and strengthening of the structural surfaces requires the use of fibers and mortar to link between them. The complexity of the interfaces between the fibers and matrix does not allow a simple and accurate model. This research created a numerical analysis approach based on the measuring and evaluating of the strength capabilities of two TRM and FRCM composites under the influence of bending stress conditions in terms of strengthening the external surfaces of the structure. In this regard, six sections of reinforced concrete beams with FLAT, STRIP and U-shaped patterns reinforced by TRM and FRCM composites under three-point loading and one beam were considered as reference. For this purpose, the impact of the link mechanism and bending moment, ultimate load capacity, energy absorption and dissipation, elastic stiffness and finally using the β reduction factor, the ultimate moment and yield stress were calculated by Abaqus software. According to behavioral results, reinforced sections with different FRCM composite patterns exhibit about 18% better performance than TRM composite.

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

(این نشریه تحت قانون بین المللی کپی رایت Creative Commons: BY-NC می باشد).

بررسی عددی رفتار تیر بتن تقویت شده با کامپوزیت‌های TRM و FRCM

بیژن کریمی شرفشاده

دانشجو دکتری، دانشکده مهندسی عمران، واحد قشم، دانشگاه آزاد اسلامی، قشم، ایران

محمد امیری*

دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

محمد جواد کتابداری

استادیار گروه مهندسی دریانوردی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

فرهود آذر سینا

استادیار گروه سازه های دریایی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی،

تهران، ایران

amirii@hormozgan.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۰ تیر ۱۴۰۲

تاریخ دریافت: ۱۴ اسفند ۱۴۰۱

چکیده

مقاوم‌سازی کامپوزیت‌های ماتریس تقویت‌شده مبتنی بر سیمان با الیاف TRM و FRCM برای بهبود عملکرد رفتاری تیرهای بتن مسلح در معرض تخریب در دهه‌های گذشته مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مقاوم‌سازی و تقویت سطوح سازه مستلزم استفاده از الیاف و ملات جهت پیوند بین آن‌ها است. پیچیدگی رابط‌های بین الیاف و ماتریس امکان مدل ساده و دقیق را نمی‌دهد. به همین جهت این مقاله یک رویکرد تحلیل عددی مبتنی بر سنجش و بررسی قابلیت‌های استحکام دو کامپوزیت TRM و FRCM تحت تأثیر شرایط تنش خمشی از نظر ساختار تقویت سطوح خارجی سازه را ایجاد کرد. در این راستا، شش مقطع تیر بتنی مسلح با الگوهای STRIP, FLAT و U-شکل تقویت‌شده با دو کامپوزیت TRM و FRCM تحت بارگذاری سه نقطه‌ای و یک تیر به عنوان مرجع در نظر گرفته شد. برای این منظور تأثیر مکانیزم پیوند و لحظه خمش، ظرفیت بارنهایی، جذب و اتلاف انرژی، سختی الاستیک و در نهایت با استفاده از ضریب کاهش β گشتاور نهایی و تنش تسلیم توسط نرم‌افزار Abacus محاسبه گردید. بر اساس نتایج رفتاری، مقاطع تقویت‌شده با الگوهای مختلف کامپوزیت FRCM حدود ۱۸ درصد عملکرد مطلوبتری نسبت به کامپوزیت TRM را نشان می‌دهد.

کلید واژگان: ماتریس الیاف کربن؛ کامپوزیت TRM؛ کامپوزیت FRCM؛ ماتریس الیاف طبیعی؛ ملات تقویت شده

۱- مقدمه

امروزه بسیاری از سازه‌های زیربنایی بخصوص اسکله‌ها در کشور ما نیازمند مقاوم‌سازی هستند. قدمت ساخت، عدم انطباق با آیین‌نامه‌های جدید طراحی، تخریب در اثر عوامل خوردنده طبیعی و نیز آسیب‌دیدگی از زلزله‌ها و حوادث طبیعی دیگر می‌تواند از جمله دلایل نیاز به مقاوم‌سازی سازه‌ها به شمار می‌آید. روش‌های مقاوم‌سازی و همچنین ترمیم و مرمت سازه‌ها، از جمله موارد و موضوعاتی است که در محافل علمی به طور گسترده در حال بررسی و پیشرفت بوده و تلاش‌های فراوانی در راستای شناخت عوامل مخرب بر سازه‌های بتنی و فلزی که باعث بروز خسارت‌های مالی شدیدی می‌شوند به عمل آمده است؛ هرچند مقاوم‌سازی در سازه‌های بتنی و فولادی با توجه به خصوصیات سازه‌ای و مصالح به کار رفته در هر کدام متفاوت است. هدف از این مقاله ارائه نوع پیشرفته‌تر مقاوم‌سازی و جایگزینی سیستم سنتی جهت درک بهتر پارامترهای رفتار اجزاء تقویت شده است. به همین منظور، انجام این مطالعه عددی جهت تعیین پارامترها، پذیرش و طراحی و اجرای آن، دارای اهمیت ویژه‌ای است.

نخست، معرفی ملات کامپوزیتی TRM^۱ و FRCM^۲ و تشریح ساختاری، و در ادامه به بررسی مقاطع تقویت‌شده و نهایت سنجش این دو کامپوزیت خواهیم پرداخت. الیاف ماتریس تقویت شده مبتنی بر سیمان TRM و FRCM بخشی از یک خانواده بزرگتر از کامپوزیت‌های ماتریس الیافی^۳ ترد یا BMC^۴ هستند که می‌توان جهت مقاوم‌سازی و ترمیم سازه‌ها از آن‌ها استفاده نمود [۱]. در سال‌های اخیر، روش اجزای از این کامپوزیت‌ها به صورت تقویت‌کننده سطوح خارجی^۵ اجزای سازه بتنی بوده است. پیشرفت علمی ملات مبتنی بر سیمان و آهک با استفاده از الیاف پلیمری و طبیعی جایگزین مناسبی، برای پلیمرهای تقویت شده با رزین اپوکسی یا همان FRP^۵ است [۲]. TRM و FRCM فناوری‌های جدید با پتانسیل بالا در مهندسی عمران هستند که در چندین پروژه اجرا شده‌اند. طبق استانداردهای ایالات متحده، کامپوزیت‌های FRCM و TRM مبتنی بر ملات سیمان یا آهک تعریف شده‌است با این حال، ملات تقویت‌شده با الیاف معمولاً به ندرت کاربرد داشته و نیاز به درک بیشتر دارند. یکی از جنبه‌هایی که نیاز به مطالعه بیشتر دارد، بررسی پارامترهای بدست آمده از مدل رفتاری الیاف و ملات کامپوزیت

TRM و FRCM است [۳-۴]. در اروپا، کمیته علمی بین المللی آزمایشگاه‌ها و کارشناسان مصالح ساختمانی^۶، و مؤسسات استاندارد (سطح ملی و اتحادیه اروپا) برای راهنمایی و ارتقای دانش در این زمینه ایجاد گردید. با این حال، روش طراحی الیاف مش (پیوسته) یا خردشده (پراکنده) بدون توجه به خصوصیات مکانیکی استاندارد و قابلیت اطمینان آنها نامشخص و پیچیده است [۵]. مطابق جدول ۱ طبقه بندی کلی کامپوزیت‌های BMCs را نشان می‌دهد [۶].

جدول ۱- طبقه بندی کامپوزیت‌های مبتنی بر سیمان

سرامیک کامپوزیت های ماتریس شکننده (BMCs)					
ماتریس سیمانی					ماتریس سیمانی (CMC)
الیاف پراکنده خردشده (کوتاه)			الیاف مش (پیوسته)		
FRC, GRC, SFRC	HPFRC, UHPFRC, SHCC	ECC	Ferrocement	TRC, TRM, MBC	FRCM, FRFRM

معیارهای پذیرش کامپوزیت مبتنی بر سیمان حاوی الیاف خردشده توسط استاندارد ICC-ES^۷ با این بیان که عملکرد این نوع کامپوزیت‌ها با استفاده از الیاف مش پلیمری و طبیعی با کارایی بالا^۸ جهت پیوند لایه‌های محصورشده و اتصال آن با سطوح خارجی است ثبت شد [۷-۸]. از الیاف معمول پلیمری در صنعت مقاوم‌سازی می‌توان به کربن، شیشه، آرامید، بازالت، پارافنیل بنزو بیس اکسازول^۹ که به گونه مش یا پیوسته^{۱۰} جهت محصور نمودن و الیاف پراکنده یا خرد شده^{۱۱} که پایه ساختار ملات هستند اشاره نمود که برای اولین بار در ایالات متحده با نام اختصاری FRCM ثبت شد. [۹-۱۰]. پژوهشگران عملکرد نوعی ملات سبز جهت سازگاری با محیط زیست، با استفاده از خاک رس کلسینه شده، خاکستر بادی، پودر سنگ آهک و با الیاف خردشده هیبریدی با ترکیب درصدی مختلف را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج از کاهش تخمینی انتشار CO₂ را نشان داد [۱۱]. پلیمرهای تقویت شده با الیاف FRP دارای خواص مطلوبی است با این حال این تکنیک چند اشکال که عمدتاً مرتبط با رزین‌های اپوکسی است مواردی همچون هزینه بالا، عملکرد ضعیف در دمای بالا، عدم اجزای بر روی سطوح مرطوب و ناسازگاری با مواد زیرلایه باعث گردید تا محققان جایگزینی مواد آلی (رزین‌های اپوکسی) با ملات مبتنی بر سیمان

6 International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures

7 . ICC-ES

8 High Performance Fibers

9 Paraphenyl benzobis oxazole (PBO)

10 Mesh

11. Dispersed

1. Textile Reinforced Mortar

2 . Fabric Reinforced Cementitious Matrix

3 . Brittle Matrix Composites

4 Externally Bonded Reinforcement

5 Fiberglass Reinforced Plastic

و آهک را پیشنهاد کرده‌اند. مطالعات و کمبود منابع باعث گردید به لحاظ شباهت ساختاری، این دو کامپوزیت TRM و FRCM را با عملکرد یکسان می‌دانند در صورتی که با توجه به ساختار آن‌ها نوع الیاف طبیعی و پلیمری و مصالح بکار گرفته شده، می‌توان به راحتی تفاوت آن را احساس نمود. با در نظر گرفتن دسته‌بندی BMC ها ابتدا کامپوزیت TRM وارد عرصه مقاومت سازی شد.

نفوذ و اشباع در لایه‌های الیاف، به دلیل اندازه دانه‌های موجود در ملات بسیار دشوار است. حتی ملات حاوی ریزدانه نمی‌تواند مشابه رزین‌ها الیاف را آغشته کند. بهبود شرایط پیوند بین الیاف و ماتریس در ملات کامپوزیتی مبتنی بر سیمان زمانی حاصل شد که الیاف مش طبیعی جایگزین الیاف پلیمری شدند. در اروپا ابتدا، مواد کامپوزیتی جدید مبتنی بر الیاف خردشده طبیعی در عمل‌آوری بتن را TRC^{۱۲} و ملات تقویت‌شده را TRM لقب داده اند. TRM در سال‌های اخیر با موفقیت برای تقویت عناصر ساختاری مختلف استفاده شده است. نتایج بسیاری از مطالعات منجر به توسعه دستورالعمل‌های طراحی برای استفاده از این نوع تقویت کننده شده است که در حال حاضر عمدتاً به CI 549.4R-20 آمریکای شمالی و -CNR DT 215 ایتالیایی محدود گردید[۵-۱۰]. الیاف کتان، جوت و کنف بزرگترین منابع مورد استفاده توسط تولیدکنندگان است که می‌توان تولید آنها را به صورت سالانه تجدید کرد. الیاف طبیعی دسته‌های مختلفی از جمله منشا حیوانی، گیاهی و معدنی را شامل می‌شوند. منشا گیاهی، به طور کلی مواد زائد چوب یا استخراج شده از ساقه، برگ یا دانه هستند. نمونه‌ای دیگری از الیاف‌های طبیعی^{۱۳} یا NFCs هستند که در زمینه‌ی زیرساخت‌ها و حمل و نقل کاربرد فراوان دارند. اهمیت پایداری NFC در مقایسه با الیاف مصنوعی، دوام در انواع شرایط آب و هوایی است. علائم محیطی NFC از نظر انرژی و انتشار در مقایسه با نمونه‌های معمولی بسیار کاهش می‌یابد [۱۲]. کامپوزیت TRM با مزایایی همچون مقاومت بالا در برابر دمای بالا و عدم محدودیت در اجرای بر روی سطوح مرطوب و دمای بالا است. برخی از مطالعات نشان می‌دهد که ملات کامپوزیت TRM را می‌توان بدون استفاده از الیاف مش طبیعی مورد استفاده قرار داد [۱۳]. همچنین محققان با استفاده ساقه گیاهان در ساختار کامپوزیت TRM را مورد بررسی قرار دادند که باعث کاهش وزن حدود ۱۰ تا ۳۰ درصد سازه بعد از مقاومت‌سازی نسبت به کامپوزیت FRP گردید [۱۴]. کاربرد TRM در سال‌های اخیر در مقام‌سازی سازه‌های بنایی، تقویت دیوارها، محصور کردن ستون‌ها یا طاق‌ها با موفقیت ای مورد استفاده قرار

گرفته است [۱۵]. از جمله اهداف دیگر در مورد سازه‌های بتنی افزایش ظرفیت اجزای خمشی تیرها یا دال است. برای توصیف رفتار مکانیکی کامپوزیت TRM بسیاری از آزمون‌های راند رایین^{۱۴} با مشارکت آزمایشگاه‌های مختلف اروپایی انجام شده است [۱۶]. علیرغم مزایای ارائه شده توسط TRM، توجه به این نکته مهم است که چسبندگی بین الیاف و ماتریس‌های معدنی به اندازه FRCM موثر نیست. چرا که در ترکیب ساختار ملات کامپوزیتی TRM، ماسه بکار رفته بزرگتر از ۳ میلی‌متر نسبت به ملات کامپوزیت FRCM است و این باعث می‌گردد ملات نتواند در بین الیاف نفوذ و آن را کاملاً آغشته کند که پیامد آن عدم انتقال یکنواخت تنش بین الیاف و ماتریس ملات که منجر به «شکست تلسکوبی» می‌شود. هر چند که برای لایه‌های میانی الیاف که نسبتاً آزاد هستند می‌توان تا حدی با آغشته کردن مش‌ها به رزین اپوکسی یا سایر محصولات مشابه بر روی سطوح، بهبود بخشید اما باید این نکته را در نظر گرفت که به لحاظ ناهمگون بودن در ترکیب ملات، ریسک‌پذیری بالایی دارد [۱۷-۱۸]. با توجه شناخت ارائه شده در خصوص کامپوزیت TRM بر آن داشت تا ضمن رفع نواقص به ارزیابی مدل دیگری از کامپوزیت مبتنی بر سیمان و آهک با نام اختصاری FRCM پرداخته شود. سیستم کامپوزیت FRCM که در مطالعه حاضر در نظر گرفته شده است مزایایی را نسبت به سیستم FRP مبتنی بر رزین اپوکسی همچون هزینه کم، مقاومت در برابر آتش بالا، مقاومت در برابر رطوبت، قابلیت بازیافت، قابلیت اجرا بر روی بستر مرطوب را دارد. این کامپوزیت مشابه TRM یک محصول مبتنی بر سیمان و یا آهک است با این تفاوت که الیاف پلیمری جهت پوشش و ماسه ریزدانه کمتر از ۳ میلی‌متر جهت اشباع مش در لایه‌های میانی و چسبندگی با سطوح کاربرد دارد. ماتریس‌های تقویت‌شده با الیاف مبتنی بر سیمان FRCM یکی از تکنیک‌های جدید مقاومت‌سازی برای اجزای بتن مسلح هستند [۱۹]. این ماتریس کامپوزیتی استفاده بدون محدودیت از سایر محصولات شیمیایی جهت پیوند و سازگاری بهتر و رفع معایب کامپوزیت مبتنی بر رزین اپوکسی را کاهش می‌دهد [۲۰]. کامپوزیت‌های مبتنی بر سیمان توسط چندین محقق به صورت تجربی جهت شناخت رفتار خمشی در اجزای سازه بتن مسلح، مورد مطالعه قرار گرفت [۹-۲۰]. برهمکنش‌های ماتریس - بستر که باعث افزایش غیر بهینه ظرفیت کششی نهایی الیاف را فراهم می‌کند. همچنین در مطالعه‌ای دیگر از سیستم‌های پلیمر/گروت تقویت‌شده با فولاد (SRP/SRG) استفاده گردید [۲۱]. در یک مطالعه تجربی و تحلیلی، جهت پیش‌بینی ظرفیت کششی تیر بتنی محصورشده با الیاف و ملات کامپوزیت FRCM

¹⁴ Round-robin (RR) is one of the algorithms employed by process and network schedulers in computing

¹²Textile Reinforced Concret

¹³ Natural Fiber Composites

های قدرتمند FEM است. این برنامه اغلب از توابع چند جمله ای از جمله؛ عملکرد و خواص مصالح و تنش‌های پسماند با استفاده از جایجایی در گوشه‌های هر عنصر تعریف می‌شود. این معادلات بسته به محل قرارگیری عناصر با در نظر گرفتن نیروهای خارجی و شرایط گره‌ای یک طرفه و متعادل هستند. همچنین اعمال مرز شرایط رفتار ستون‌ها و تیرها را تعیین می‌کند. برای شبیه سازی تیرهای بتن مسلح با استفاده از کامپوزیت‌های TRM و FRMC، لازم است تغییرات رفتار غیرخطی ناشی از سفتی سازه ناشی از خواص مواد در نظر گرفته شود. در این بخش خصوصیات ساختار الیاف و ملات کامپوزیتی TRM و FRMC جهت پارامترها مدل‌سازی جمع‌آوری و مورد استفاده قرار گرفت. جدول‌های ۲ تا ۷ خواص الیاف و مواد کامپوزیتی را نشان می‌دهد [۲۰-۲۱].

جدول ۲- خواص الیاف کربن خردشده

ویژگی	برحسب	مقادیر
مقاومت کششی	(GPa)	۰/۱
ازدیاد طول	L	۰/۰۲۴
مدول کششی	(GPa)	۵
قدرت خمشی	(GPa)	۱۳۴
مدول خمشی	(GPa)	۱۶
طول الیاف	mm	۳-۵

جدول ۳ - خواص الیاف کربن متعامد

الیاف کربن متعامد		
تعداد رشته	۱۲۰۰۰	
b*	۰/۰۵	[mm]
t*	۳/۵	[mm]
E	۲۴۰	(GPa)
دانسیته	۱/۸۱	g/cm ³
ft,f	۱۹۷۰	(MPa)
εu	۱/۲	(%)
σ* (CoV)	۴۳۳۰ (۰/۰۸۳)	(MPa)

بر روی سطوح خارجی نشان داد، استفاده از الیاف مش کربن با دولایه عملکرد مطلوبتری نسبت به مش چند لایه دارد [۲۲]. نتایج مطالعه دیگری نشان می‌دهد، الیاف متعامد در اثر حالت‌های ترک و شکست ناشی از فشار نقش پُل‌زدن را ایفاء می‌نمایند افزایش یا کاهش محتوای الیاف خردشده در ملات بیک تنش دینامیکی و کرنش تحت تاثیر قرار خواهد گرفت [۲۳]. همچنین اثرات الیاف رسانا و ملات FRMC با استفاده از سه نوع الیاف کربن بکر (VCFs)، الیاف کربن بازیافت شده (RCFs) و الیاف فولادی با پوشش برنجی (BSFs) مورد بررسی قرار گرفت تا رفتار مکانیکی ملات تعیین شود. نتایج نشان می‌دهد که RCF عملکرد ظرفیت خمشی و کششی را تا حدود ۱۰۰ درصد افزایش می‌دهد در حالی که BSF مقاومت فشاری را تا ۳۸ درصد بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، فیبرها جذب آب را تا ۳۹ درصد کاهش می‌دهند. همچنین نتایج ثبت شده آزمایش‌های هدایت الکتریکی نشان داد که RCF مقاومت الکتریکی ملات را در آستانه نفوذ تا ۰/۲-۰/۱ درصد حجمی کاهش می‌دهد [۲۴]. اثر جایگزینی سیمان پرتلند با متاکائولین بر رفتار مکانیکی ماتریس‌های سیمانی تقویت شده با کتان (TRCM) با آزمایش خمش سه نقطه‌ای انجام شد. نتایج نشان داد که جایگزینی با متاکائولین محیطی عاری از هیدروکسید کلسیم را برای الیاف طبیعی فراهم می‌کند و از تخریب جلوگیری می‌کند. همچنین تأثیر بیشتری بر شکل‌پذیری مواد کامپوزیتی مبتنی بر سیمان دارد [۲۵]. دیگر نتایج آزمون مزوسکوپی ملات کامپوزیتی CFRCC حاوی الیاف خردشده کربن نشان داد که حالت‌های شکست به طور قابل توجهی تحت تأثیر پراکنده نیست [۲۶]. با توجه به ارائه مطالعات انجام شده در خصوص دو کامپوزیت در ادامه این پژوهش عددی، ابتدا مدل‌سازی یک تیر مرجع به عنوان معیار اندازه‌گیری، سپس تیرهای بتنی تقویت شده با کامپوزیت‌های FRMC و TRM به روش تقویت سطوح خارجی EBR با سه الگوی مختلف FLAT، STRIP، و U-شکل انجام گردید. همچنین در پایان هریخش خصوصیات کششی الیاف و ملات کامپوزیتی، ضریب کاهش استحکام و گشتاور و لنگر خمشی بر اساس عملکرد مطلوبتر الگو، انتخاب و پاسخ مورد تحلیل قرار گرفت.

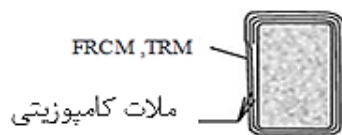
۲- مدل‌سازی تیر کنترل و الگوهای تقویت شده با کامپوزیت های TRM و FRMC

برای شناخت و ارزیابی کامپوزیت‌ها، تحقیقات بیشتری با توجه به پارامترهای رفتاری جهت طراحی مورد نیاز است. دستورالعمل‌های استفاده از TRM و FRMC برای ساخت و ساز را می‌توان در ACI یافت [3, 18]. یکی از روش‌های مفید برای تجزیه و تحلیل مسائل مهندسی، حل عددی به روش اجزای محدود FEM است که به طور فزاینده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. کورانت اولین کسی بود که در سال ۱۹۶۰ این مشکل را به صورت دو بعدی حل کرد. تسهیل مشاهده تنش‌ها در قسمت‌های مختلف سازه یکی از ویژگی

جدول ۷- خواص مکانیکی مشترک الیاف و کامپوزیت TRM و FRCM

واحد	مقادیر	مشخصات کامپوزیت
(MPa)	۱/۱۶	نسبت تنش تسلیم فشاری دو محوری به تنش و TRM تسلیم فشاری تک محوری کامپوزیت FRCM
θ	۱۰	FRCM و TRM زاویه انبساط کامپوزیت
θ	۳۳٫۶	FRCM و TRM زاویه اتساع کامپوزیت
UV x,y	۰/۱	FRCM و TRM پتانسیل جریان کامپوزیت
e	۰/۱	FRCM و TRM خروج از مرکز کامپوزیت
μ (mu)	۰/۰۱	FRCM و TRM ویسکوزیت کامپوزیت
(u)	۰/۲۵	FRCM و TRM نسبت پواسون کامپوزیت
[mm]	۵۰۰	FRCM و TRM طول الیاف کامپوزیت
layer	۳	FRCM و TRM تعداد لایه پیچیده شده کامپوزیت

در این بخش از پژوهش، سه روش مدل سازی STRIP، FLAT و U شکل با استفاده از دو ملات کامپوزیت TRM و FRCM انجام شد مطابق شکل ۱-۳ مدل سازی انجام گردید.



روی زیرلایه، بین لایه ها و

در قسمت بیرونی



شکل ۱- تیر بتنی تقویت شده با کامپوزیت TRM و FRCM با الگوی STRIP

جدول ۴- خواص مکانیکی الیاف طبیعی

الیاف	مدول الاستیسیته ویژه (GPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	استحکام کششی (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	دانسیته (g/cm ³)
کتان	۳/۵-۸/۱	۵/۵-۱۲/۶	-۲۶۷ ۲۵۰	۴۰۰	۵/۱-۱/۶
کناف	۳۶/۵	۵۳	۶۴۱	۹۳۰	۱/۵۴
سیزال	۶/۳-۱۴/۷	۹/۴-۲۲	-۳۴۱ ۴۲۳	-۵۱۱ ۶۳۵	۱/۵

جدول ۵- مقاومت فشاری و کششی ملات کامپوزیت FRCM

مصالح	کششی نهایی FRCM (MPa)	σ Fu (GPa)	ε (%)	f_c, m (MPa)
ملات کامپوزیت FRCM	۱/۳۵۲	۴/۸۰	۱/۸۰	۷۱/۵ (CoV0/06)

جدول ۶- خصوصیات ملات تقویت شده کامپوزیت TRM

ضخامت ملات جهت تقویت	۴	tp [mm]
مدول الاستیسیته ملات با تقویت	۲۰۶۰۰۰	Ep [MPa]
مدل الاستیسیته ملات بدون تقویت	۷۰۰۰	Ec [Mpa]
مقاومت خمشی	۰/۰۳۱	(MPa)
انحراف استاندارد	۱/۳۰	(MPa)
مقاومت فشاری	۱/۱۳	(MPa)

ویژگی های این نوع منحنی های کششی ایده آل این است که ابتدا الیاف مش مبتنی بر سیمان شروع به ترک خوردن نموده، سپس در مرحله خطی ظرفیت باربری ادامه تا به ظرفیت نهایی خود یعنی نقطه شکست برسد.

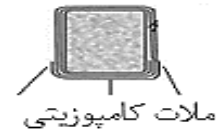
با توجه به جدول ۸ - ۱۰ مدل سازی در دو گروه کامپوزیت با سه نوع الگوی مختلف با استفاده از بتن با مقاومت ۳۵ مگاپاسکال، با مقطع مستطیلی به ابعاد $200 \times 150 \times 150$ میلی متر و میلگردهای طولی با قطر ۱۶ و عرضی ۱۰ میلی متر در محیط نرم افزار آپاکوس انجام گردید. سایر جزئیات مربوط به تیر بتنی در شکل ۴ - ۵ را نشان می دهد.

جدول ۸- خواص مکانیکی میلگردهای تقویت کننده فولادی

پارامتر	مقادیر	مولفه
مدول الاستیک	۱۹۰۰۰۰	(MPa)
نسبت پواسون	۰/۳	ν
تنش تسلیم	۵۴۱/۶۹	(MPa)
کرنش در نقطه تسلیم	۰/۰۰۱۵۷	ϵ_{au}
تنش گسیختگی	۶۴۲/۸۴	(MPa)
فشار در نقطه شکست	۰/۰۷۸۸۷	f_s

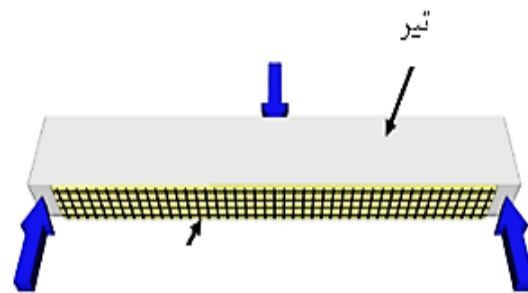
جدول ۹- خواص مکانیکی مشترک

سختی پارامتر	ماتریس مش	مولفه
سختی نرمال	۲۰	(N/mm ³)
سختی در جهت برشی	۱۰	(N/mm ³)
مقاومت در جهت نرمال	۰/۰۱	(N/mm ²)
مقاومت در جهات برشی	۰/۶۴	(N/mm ²)
انرژی شکست	۲	(N/mm)



ملات کامپوزیتی
روی زیرلایه، بین لایه ها و
در قسمت بیرونی

شکل ۲- تیر بتنی تقویت شده با کامپوزیت TRM و FRM با الگوی U

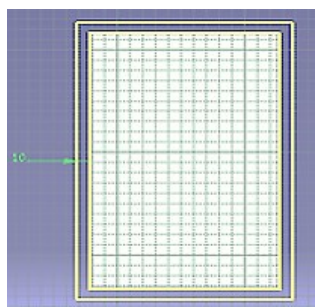


لایه چینی الیاف و کامپوزیت
TRM and FRM

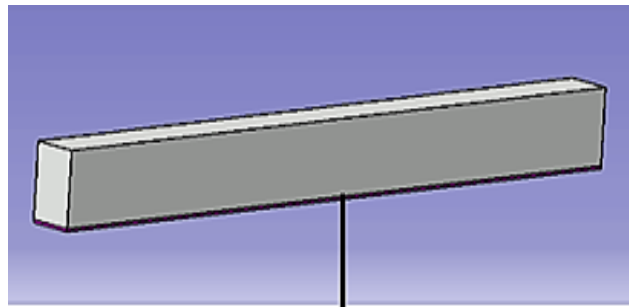
شکل ۳- تیر بتنی تقویت شده با کامپوزیت TRM و FRM با الگوی FLAT

همانگونه که قبلاً اشاره شد، با توجه به استفاده دو نوع کامپوزیت در مرحله ی آغاز شبیه سازی با هدف حذف اجزای همجوار و پیچیدگی های زائد هندسی در مقطع بتنی و همچنین خصوصیات پارامتری هر یک از کامپوزیت ها انجام پذیرفت. الیاف مش کربن متعامد برای کامپوزیت FRM و الیاف مش کناف TEMPO^{۱۵} برای کامپوزیت TRM با ساختار ملات بر مبتنی بر سیمان مورد استفاده قرار گرفت. معیار فون میزس جهت تحلیل بر اساس عملکرد که ساختار ماده و کرنش تشکیل شده ناشی از رفتار غیرخطی و شکست الاستیک استو عمده تاً برای بتن مسلح و فلزات استفاده می شود در نظر گرفته شد. این معیار موجب می گردد تا به دلیل خواص و رفتار کامپوزیت در طی فرآیند بارگذاری تغییر داده و ورود مواد کامپوزیتی به ناحیه پلاستیک (تنش تسلیم) شده و پدیده ای غیرخطی را ایجاد می کند. لازم به ذکر است که مقدار کرنش پلاستیک مربوط به اولین نقطه ورودی صفر در نظر گرفته شده است.

^{۱۵} Tempo Communications

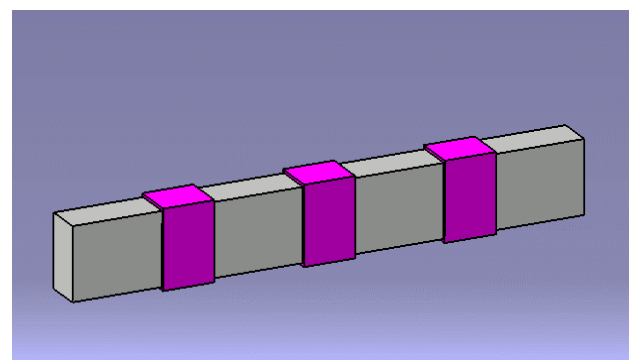


شکل ۶- ضخامت الیاف و ملات کامپوزیت TRM و FRCM

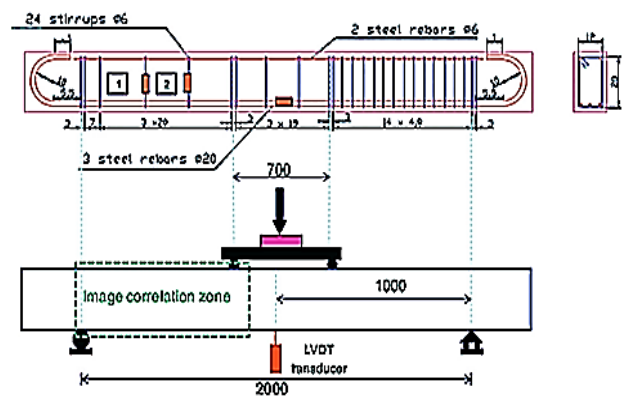


TRM and FRCM FLAT

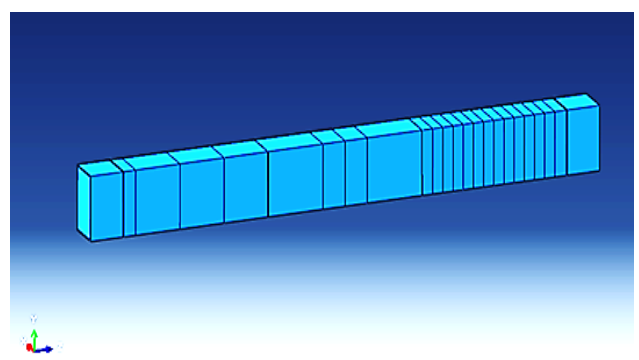
شکل ۷- تیر بتنی تقویت شده با کامپوزیت TRM و FRCM با الگوی FLAT



شکل ۸- تیر بتنی تقویت شده با کامپوزیت TRM و FRCM با الگوی Strip



شکل ۴- جزئیات مدل سازی تیر بتنی کنترل



شکل ۵- مدل سازی هندسی تیر کنترل با برنامه ABAQUS

بعد از ثبت پارامترهای الیاف و کامپوزیت در نرم افزار ABAQUS، مدل سازی تیرهای بتنی تقویت شده با کامپوزیت TRM و FRCM با الگوهای تقویتی مختلف با عنوان، U شکل و FLAT و STRIP مطابق جدول ۱۰ و شکل ۶-۹ با ضخامت ثابت ۱۰ میلی متر مدل سازی گردید.

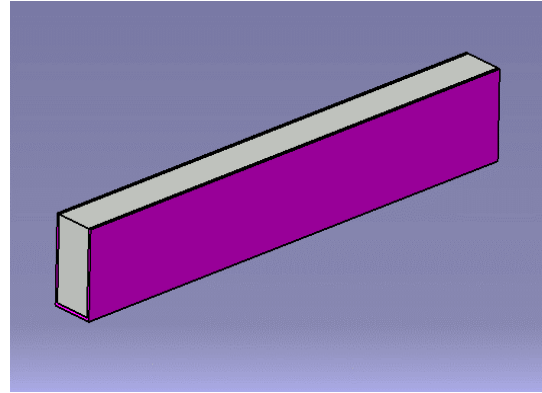
جدول ۱۰- مدل سازی تیرهای تقویت شده کامپوزیت TRM و FRCM با الگوهای مختلف

مشخصات	ضخامت
تیر بتنی تقویت شده با الگوی TRM-FLAT	10 mm
تیر بتنی تقویت شده با الگوی TRM-STRIP	
شکل TRM-U تیر بتنی تقویت شده با الگوی	
FRCM-FLAT تیر بتنی تقویت شده با الگوی	
FRCM-STRIP تیر بتنی تقویت شده با الگوی	
شکل FRCM-U تیر بتنی تقویت شده با الگوی	

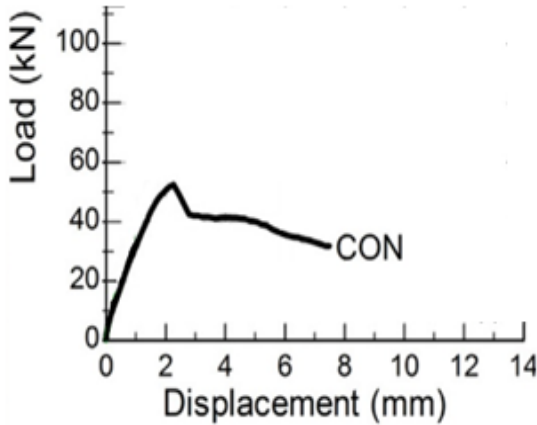


جدول ۱۲- حداکثر گشتاور خمشی و لنگر خمشی تسلیم تیر کنترل

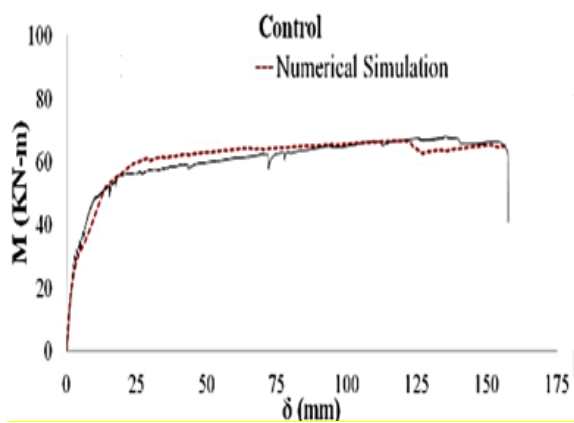
نمونه	$M_{max,num}$ (kN-m)	M_y,num (kN-m)	$\delta_{Max,num}$ (mm)	δ_y,num (mm)
تیر کنترل Δ_{exp}	۶۶/۶	۵۰/۰۱	۱۳۸/۶۸	۱۲/۶۱



شکل ۹- تیر بتنی تقویت شده با کامپوزیت TRM و FRCM با الگوی U



شکل ۱۱- منحنی بار-جابجایی تیر کنترل



شکل ۱۲- منحنی حداکثر گشتاور خمشی و لنگر تسلیم تیر کنترل

۳-مدل سازی تیر تقویت شده با کامپوزیت FRCM

رفتار کششی در دو نوع کامپوزیت TRM و FRCM اساساً از سه مرحله متمایز پیروی می کند: (۱) در مرحله اول ماتریس الیاف و ملات بدون ترک باقی می ماند و با استفاده از شیب منحنی تنش-کرنش مدول الاستیسیته TRM و FRCM، را می توان با توجه به بخش همگن بودن ماتریس و الیاف تخمین زده شود (۲) ترک خوردگی به خواص الیاف

نامگذاری الگوها از عبارت سه قسمتی، به ترتیب نوع کامپوزیت- نوع الگو و در انتها ضخامت استفاده شد. به عنوان مثال TRM-U-10 نشان دهنده نوع کامپوزیت بکار گرفته شده با الگوی U شکل و ضخامت ۱۰ میلی متر است. پس از انجام مدل سازی، در مرحله Ran ابتدا تیر کنترل جهت کالیبراسیون با اعمال بار ۵۰ کیلو نیوتن نتایج تا مرحله گسیختگی انجام پذیرفت. نتایج منحنی جابجایی-نیروی، به عنوان پارامترهای مورد نظر بدست آمد. که سطح زیر منحنی بیانگر میزان انرژی ناشی از بارگذاری را نشان می دهد. هر چه سطح بزرگتر باشد، درجه شکل پذیری مقطع افزایش و پتانسیل اتلاف انرژی بیشتری شود در نتیجه توجه به این نکته در مناطق لرزه خیزی که طراحی بر اساس افزایش شکل پذیری سازه است، بسیار مهم است. لازم به ذکر است که نتایج بدست آمده بر اساس منحنی نیرو - جابجایی است. مطابق جدول ۱۱ و ۱۲ شکل ۱۰ - ۱۱ منحنی نیرو - جابجایی تیر کنترل به دلیل مکانیسم شکست و ترک در تکیه گاه ها در طول بارگذاری و حداکثر گشتاور خمشی ($M_{max,exp}$)، گشتاور خمشی تسلیم (M_y,num) و انحرافات ثبت شده در دهانه میانی و زمانی حداکثر گشتاور خمشی ($\delta_{max,num}$) و لنگر خمشی تسلیم (δ_y,num) ثبت گردید.

جدول ۱۱- خصوصیات تیر کنترل

	E (MPa)	مقاومت فشاری بتن (MPa)	مقاومت کششی بتن (MPa)
تیر کنترل	۱۰/۶۶۶	۳۲/۲۰	۱/۲۸

جدول ۱۳- خصوصیات ملات کامپوزیت FRCM. جهت مدلسازی

پارامترها	FRCM -U-10	بر حسب
ملات E	۸۹۴۱/۵۳	(MPa)
مقاومت فشاری ملات	۲۴/۹۵	(MPa)
مقاومت کششی ملات	۰/۹۰	(MPa)
E ₁ الیاف	۲۴۰۰۰۰	(MPa)
استحکام کششی الیاف $\beta \times$	*	(MPa)

جدول ۱۴- پارامترهای تیر کنترل و تیر تقویت شده با کامپوزیت FRCM.

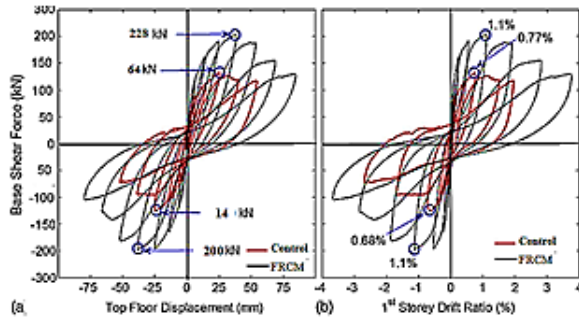
پارامترها	FRCM -U-10	کنترل	بر حسب
ملات E	۱۰۶۶۶	۱۰۶۶۶	(MPa)
مقاومت فشاری ملات	۳۲/۳۳	۳۲/۲۰	(MPa)
مقاومت کششی بتن	۱/۲۸	۱/۲۸	(MPa)
E ₁ الیاف	۶۱۸۷/۰۰	-	(MPa)
استحکام کششی الیاف $\beta \times$	*	*	(MPa)

۱-۳ . نتایج تیر تقویت شده با کامپوزیت FRCM

هنگامی که منحنی نیرو-جابجایی تیر تقویت شده با کامپوزیت FRCM به دست آمد، مدول الاستیسیته از شیب اولیه در ناحیه پلاستیک به عنوان خواص مکانیکی معرفی شدند. در شکل ۱۳ نمودار کلی، بارنهایی را در حالتی نشان می‌دهد که کامپوزیت به مقاومت کششی که به عنوان معیار شکست در نظر گرفته شده است، می‌رسد.

و توانایی پیوند آن با ملات بستگی دارد که در این مرحله با افزایش کرنش‌ها و تأثیر بسیار محدود بر تنش کششی، باعث کاهش مدول الاستیسیته می‌شود (در واقع، بخش دوم منحنی تنش-کرنش مدول برابر با صفر) است. و در آخر (۳) هنگامی که ترک خوردگی کامپوزیت سطح به طور کامل ایجاد شد، تنش‌ها به طور کامل به ملات و الیاف منتقل و در نتیجه بصورت خطی ایجاد می‌شود که شیب آن با سختی الیاف مورد استفاده، مشخص می‌شود. البته توجه به این نکته حائز اهمیت است که در بسیاری از موارد و بسته به کامپوزیت مورد استفاده، این سه فاز را نمی‌توان به وضوح از یکدیگر متمایز کرد. از نظر حالت‌های شکست، معمولاً سه نوع مختلف مشاهده می‌شود: (الف) گسیختگی الیاف در ناحیه مرکزی (ب) گسیختگی الیاف در مجاورت با تکیه‌گاه در اثر لنگر و (ج) لغزش ماتریس الیاف نسبت به ملات، که معمولاً در نزدیکی تکیه‌گاه رخ می‌دهد. با توجه به شرایط مرزی و خمشی چهار نقطه‌ای اتخاذ شده اندازه شبکه ای المان ۰,۰۵، انتخاب شد. برای ایجاد ثابت در مدل عددی، جابجایی در جهات "y" و "x" در یک تکیه‌گاه و جابجایی در جهت "y" و "z" در دیگری مهار گردید. همچنین برای شناسایی و بررسی شرایط شکست، مقاومت کششی فولاد (۶۳۴ مگاپاسکال) به عنوان معیار در نظر گرفته شد. در نهایت تیرهای تقویت شده با الیاف مش کربن و ملات کامپوزیت FRCM مقاومت فشاری بتن مربوطه (f_c) برابر با ۳۲ مگاپاسکال ارایه شد. برای تعریف خواص مکانیکی کامپوزیت FRCM، نیاز به تعریف خصوصیات الیاف و ملات و تعیین رفتار کششی آن بود. برهمکنش بین مواد و الیاف در مدل‌سازی FRCM از روش سطح تعبیه بر روی سطح یا همان EBR استفاده شد. این پیوند یک نوع محدودیتی است که امکان اتصال بهتر را فراهم می‌کند، حتی اگر مش‌های ایجاد شده روی سطوح نواحی از نظر هندسی متفاوت باشند، می‌توان پیوند کامل تیر و کامپوزیت FRCM را فرض کرد. شرایط مرزی مشابه با تیر کنترل اعمال شد. تمام پارامترهای ورودی مورد استفاده در این مدل‌سازی در جدول ۱۳ و ۱۴ خلاصه شده است. لازم به ذکر است جهت محاسبه گشتاور خمشی با استفاده از ضریب اثربخشی β مقاومت کششی الیاف و ملات کامپوزیت در پایان همین بخش انجام خواهد شد.

سازه، جهت نیروی ناشی از زلزله استفاده نمود. در شکل ۱۴ منحنی‌های پاسخ هیستری براساس عملکرد مطلوبتر نمونه FRCM-U-10 نسبت به سایر الگوهای تقویتی جهت سنجش با تیر کنترل را نشان می‌دهد.



شکل ۱۴- منحنی هیستری تیر کنترل و تیر تقویت شده با الگوی

FRCM-U-10

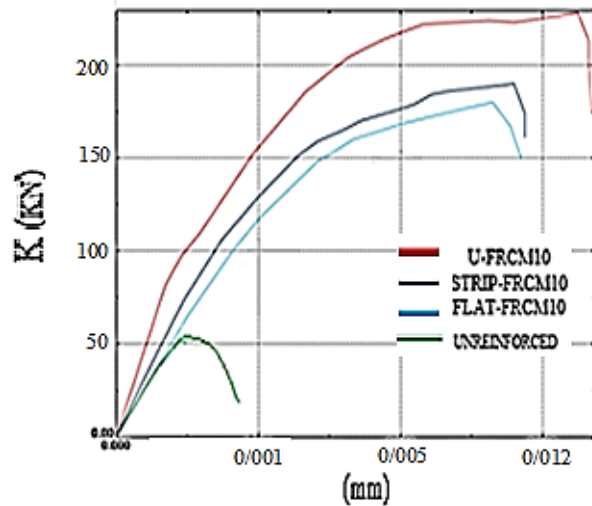
همچنین جهت تعیین سختی الاستیک موثر تیر تقویت شده با کامپوزیت FRCM می‌توان از شیب منحنی نیرو-جابجایی استفاده نمود. نتایج سختی اولیه مقطع تقویت شده با الگوی FRCM-U-10، نسبت به سایر الگوها رده خود تاثیر فوق العاده‌ای در افزایش سختی الاستیک دارد که در جدول ۱۶ تغییرات سختی الاستیک بدست آمده سه الگو مختلف را نشان می‌دهد.

جدول ۱۶- تغییرات سختی الاستیک تیر بتنی تقویت شده با الگوهای مختلف

کامپوزیت FRCM

نمونه الگوها	K (KN/m)
FRCM-U-E-10	۵۸/۵۲
FRCM-STRIP-E-10	۳۸
FRCM-FLAT-E-10	۳۲/۴
تیر کنترل	۳۰

استهلاک و جذب انرژی دیگر پارامتر مهم در ارزیابی رفتار یک سازه در هنگام وقوع زلزله و نیروهای دینامیکی است. سطح زیر منحنی جابجایی در محدوده الاستیک-پلاستیکی مقدار انرژی از دست رفته از تیر تقویت شده در حین بارگذاری است. بطوری که برای محاسبه انرژی ورودی برابر با مساحت زیر منحنی در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، هر چه سطح زیر منحنی بیشتر باشد، انرژی بیشتری در هنگام بارگذاری بتنی تقویت شده جذب و مستهلک می‌شود. در جدول ۱۷ نتایج نشان داد مقدار جذب و



شکل ۱۳- منحنی بار - جابجایی تیر کنترل و الگوهای تقویت شده با کامپوزیت FRCM

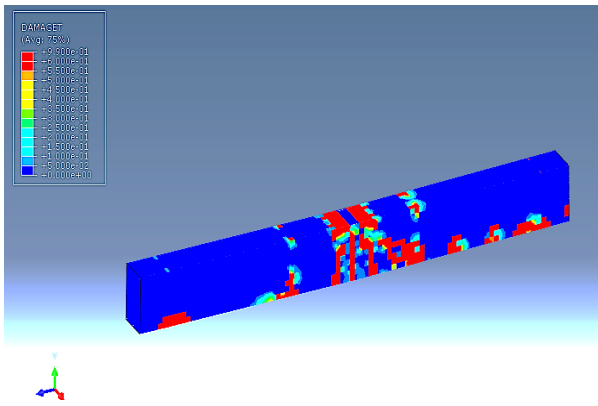
نتایج ظرفیت بار نهایی با در نظر گرفتن منحنی نیرو - جابجایی تیر کنترل و تقویت شده با کامپوزیت FRCM به سه روش الگو و ضخامت ۱۰ میلیمتر، در جدول ۱۵ نشان داده شده است.

جدول ۱۵- نتایج ظرفیت بار نهایی تیر کنترل و الگوهای تقویت شده با

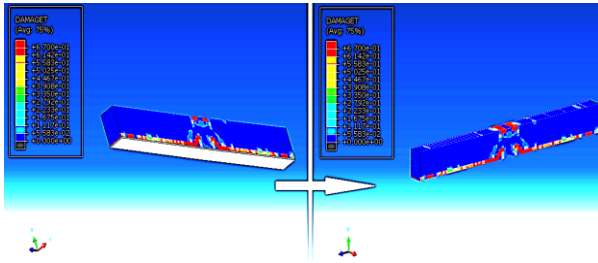
کامپوزیت FRCM

نمونه الگوها	P_u (KN)
FRCM-U-10	۲۲۸
FRCM-STRIP-10	۱۹۱
FRCM-FLAT-10	۱۸۲
تیر کنترل	۶۴

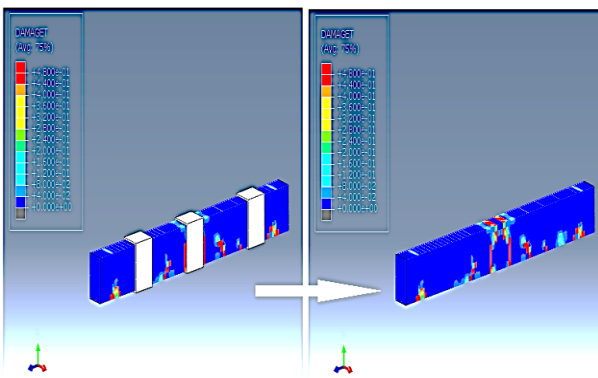
الگوی FRCM-U-10 با ظرفیت نهایی ۲۲۸ کیلونیوتن و مقدار جابجایی ۱۳/۳۳ میلی‌متر ثبت گردید. در ادامه بررسی منحنی نیرو-جابجایی تیرهای تقویت شده با کامپوزیت FRCM مقدار جابجایی کامپوزیت به دلیل سختی اولیه به صورت خطی افزایش و پس از آن، روند تغییر و به تدریج به یک مقدار ثابت می‌رسد. بنابراین منحنی دارای مقطع خطی است که رفتار کشسان سازه را نشان می‌دهد و در نقطه انتهایی رفتار غیرخطی مقطع تقویت شده مشاهده می‌شود که با استفاده منحنی هیستری روند بار افقی F_h در برابر جابجایی افقی به دلیل مکانیسم شکست و ترک در تکیه‌گاه‌ها در طول بارگذاری منجر به یک منحنی پیوسته در سیکل‌های متوالی می‌توان به عنوان معیار عملکرد



شکل ۱۵- ترک خوردگی و آسیب ناشی از خمش تیر کنترل



شکل ۱۶- ترک خوردگی و آسیب ناشی از خمش در تیر تقویت شده با الگوی FRCM- FLAT-10



شکل ۱۷- ترک خوردگی و آسیب ناشی از خمش در تیر بتنی تقویت شده با الگوی FRCM- STRIP- 10

استهلاک انرژی با استفاده از الگوی FRCM-U-10 با مقدار ۲۲/۲ نسبت به سایر الگوهای هم رده خود افزایش داشته است.

جدول ۱۷- تغییرات استهلاک و جذب انرژی تیر بتنی تقویت شده با کامپوزیت FRCM

نمونه الگوها	E (KJ)
FRCM-U-E -10	۲/۲
FRCM-STRIP-E -10	۱/۵
FRCM- FLAT- E-10	۱/۳
تیر کنترل	۱/۱

با افزایش بار، ترک خوردگی و آسیب تیر اجتناب ناپذیر است. از آنجایی که این اتفاق عمر مفید سازه را کاهش می دهد، شناسایی آسیب وارده به تیر قبل از رسیدن به حالت بحرانی بسیار مهم است. این امر به ویژه در سازه های مهمی که خسارات اقتصادی و تلفات جانی زیادی به بار می آورد، اهمیت دارد. مقدار ترک خوردگی و آسیب ناشی از بارگذاری تیرهای کنترل و سایر الگوهای تقویت شده با در نظر گرفتن نتایج نشان داد، الگوی FRCM-U-10، اثرات ترک خوردگی و بحرانی نسبت به سایر الگوهای هم رده خود مشهود است. همچنین الگوی FRCM- FLAT- E-10 با توجه به نوع ترک ها می توان گفت این نوع تقویت، کارایی مطلوبی ندارد. در جدول ۱۸ و شکل های ۱۵- ۱۸ تاثیرات کاهش آسیب های ناشی از ترک خمشی در تیر کنترل و سایر الگوهای مختلف تقویت شده را نشان می دهد.

جدول ۱۸- نتایج ترک خوردگی و آسیب ناشی از خمش در تیرهای بتنی تقویت شده با کامپوزیت FRCM با الگوهای مختلف

نمونه الگوها	DAMAGE T (%)
FRCM-U-E -10	0/41
FRCM-STRIP-E -10	0/47
FRCM- FLAT- E-10	0/48
تیر کنترل	0/99

ضریب β کاهش می‌یابد تا اثر لغزش نخ ها در داخل ماتریس جبران شود. از این رو، سهم کامپوزیت استحکام موثر بر مقاومت کل مقطع است. خروج از مرکز توسط نرم‌افزار Abaqus برابر با ۰/۱ است، که نشان می‌دهد زاویه اتساع^{۱۶} به دلیل همگرایی این مقدار ۳۰ در نظر گرفته شد. پارامتر سطح پلاستیزه (K) برابر با ۳/۲ و رابطه بین حداکثر تنش فشاری تک محوری و دو محوری در ابتدای فرآیند بارگذاری (f_{b0}/f_{c0}) برابر با ۱،۱۶ و تنظیم ویسکوپلاستیک همگرایی بهتر مدل مقادیر 5×10^{-5} در نظر گرفته شد. خواص کامپوزیت با مقاومت فشاری در ناحیه پلاستیک که منجر به تغییر مدول شکل مقطع (Eci) و مقاومت کششی مشخصه $f_{ct,k}$ می‌شود از معادلات ۱-۳ محاسبه گردید.

$$(۱) \quad E_{ci} = 8500 \sqrt[3]{f_c}$$

$$(۲) \quad f_{ct,m} = 0.3 f_c^{2/3}$$

$$(۳) \quad f_{ct,k} = 0.7 f_{ct,m}$$

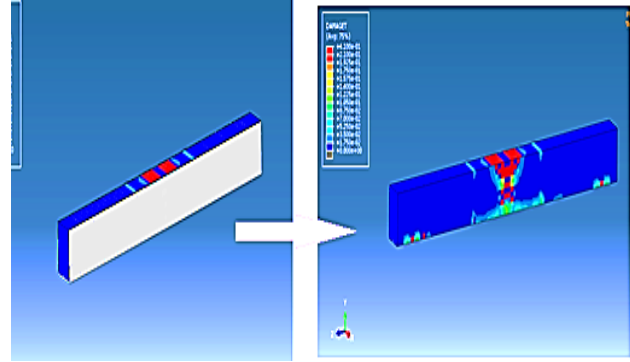
ضریب β مشخص شده برای کامپوزیت با الگوی FRCM-U-10 مقدار ۰/۵۴ بدست آمد. نتایج به دست آمده در جدول ۲۰-۲۲ و شکل ۱۹-۲۰ در حالت کلی برای تیر تقویت‌شده با الگوی FRCM-U-10، جهت تعیین ضریب اثربخشی کششی الیاف و ملات کامپوزیت β و حداکثر گشتاور خمشی ($M_{max,exp}$)، گشتاور خمشی تسلیم (M_y,num) و انحرافات ثبت شده در دهانه میانی و زمانی حداکثر گشتاور خمشی ($\delta_{max,num}$) و لنگر خمشی تسلیم (δ_y,num) ارائه گردید.

جدول ۲۰- نتایج مقاومت کششی الیاف و ضریب اثربخشی β و ملات

کامپوزیت

FRCM-U-10

کامپوزیت FRCM-U-10		
استحکام کششی الیاف $\times \beta$	(MPa)	۲۰۴۸
E الیاف	(MPa)	۲۴۰۰۰۰
مقاومت کششی ملات	(MPa)	۰/۹۰
مقاومت فشاری ملات	(MPa)	۲۴/۰۲
a	(KN-m)	۸/۴۳
K	(KN-m)	۱۹/۳۰
E ملات	(MPa)	۸۹۰۵/۵۴



شکل ۱۸- ترک‌خوردگی و آسیب ناشی از خمش تیر بتنی تقویت شده با

الگوی FRCM-U-10

جدول ۱۸- نتایج نهایی تیرهای بتنی تقویت شده با الگوهای مختلف

کامپوزیت FRCM

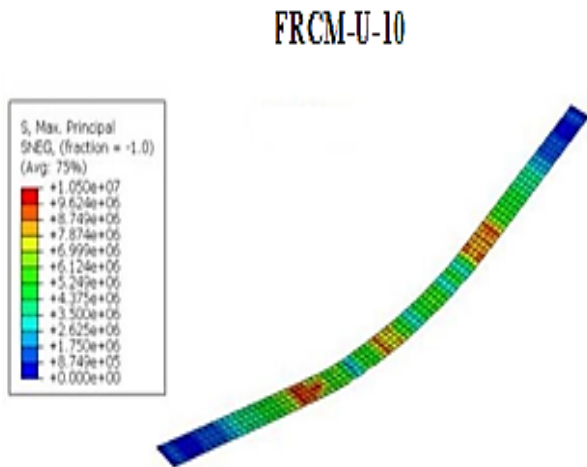
نمونه الگوها	P_u (KN)	K $\left(\frac{KN}{m}\right)$	E (Kj)
FRCM-U-E-10	۲۲۸	۵۸/۵۲	۲/۲
FRCM-STRIP-E-10	۱۹۱	۳۸	۱/۵
FRCM-FLAT-E-10	۱۸۲	۳۲/۴	۱/۳
تیر کنترل	۶۱	۳۰	۱/۱

به راحتی می‌توان درک کرد که پیچیدگی رابط ها و مکانیسم شیمیایی در بین نخ، مش، پوشش و ملات که توزیع تنش را در مواد کامپوزیت تعیین می‌کند، موضوعی است که بسیار فراتر از محدوده کار حاضر است. این یک مسئله بسیار پیچیده است که نیازمند یک رویکرد چند مقیاسی با ارزیابی شیمیدانان و فیزیکدانان است.

با در نظر گرفتن نتایج عملکرد مطلوبتر الگوی FRCM-U-10 جهت بررسی قابلیت‌های استحکام تحت شرایط تنش کششی انجام گردید. این بخش تحلیل حداکثر گشتاور خمشی را با استفاده از ضریب کاهش (β) اعمال شده به ظرفیت کششی نهایی الیاف و ملات کامپوزیتی پیش‌بینی می‌کند. از این رو، از یک ساده‌سازی به مسئله نزدیک می‌شود و پیچیدگی را به یک ظرفیت استحکام الیاف و ملات مؤثر محدود شده توسط β کاهش می‌دهد. به همین منظور نیاز به پارامترهایی است که توسط الیاف و ملات پس از رسیدن به حداکثر گشتاور لنگر خمشی $M_{max,exp}$ پشتیبانی می‌شود عبارتند از: $\varepsilon_c, f_c, f_{s,u}, f_{s,uk}, \varepsilon_c, f_c, f_{s,u}, f_{s,uk}$ ؛ که هر دوی آنها برای به دست آوردن ضریب اثربخشی (β) مهم است. از آنجایی که کرنش نهایی آرماتور فولادی ۹۰ درصد ($\varepsilon_{s,u}$) و کرنش نهایی بتن در تراکم ۳،۵ درصد در نظر گرفته می‌شود ظرفیت کششی نهایی الیاف و ملات با

۱۶ . It is a phenomenon that shows the amount of material volume changes during shear deformations

کامپوزیت FRCM-U-10



شکل ۲۰- حداکثر وضعیت تنش FRCM-U-10

۴-مدل سازی تیر تقویت شده با کامپوزیت TRM

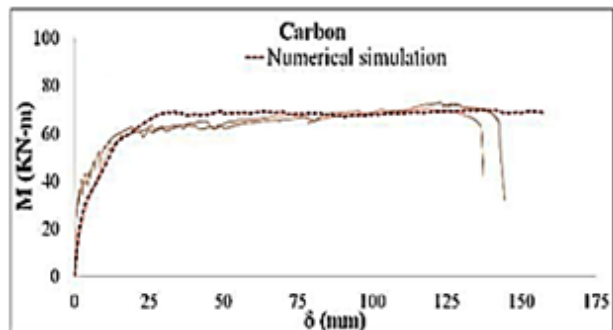
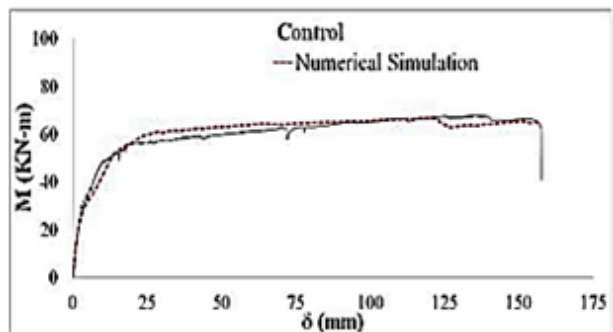
همان طور که قبلاً گفته شد، رفتار کششی ناشی از خمش کامپوزیت TRM مشابه کامپوزیت FRCM از سه مرحله یاد شده پیروی می کند که در مرحله اول ماتریس الیاف و ملات بدون ترک باقی می ماند و با استفاده از شیب منحنی تنش-کرنش مدول الاستیسیته TRM و FRCM، را می توان با توجه به بخش همگن بودن ماتریس و الیاف تخمین زده شود (2) ترک خوردگی به خواص الیاف و توانایی پیوند آن با ملات بستگی دارد که در این مرحله با افزایش کرنش ها و تأثیر بسیار محدود بر تنش کششی، باعث کاهش مدول الاستیسیته می شود (در واقع، بخش دوم منحنی تنش-کرنش مدول برابر با صفر) است. و در آخر (۳) هنگامی که ترک خوردگی کامپوزیت سطح به طور کامل ایجاد شد، تنش ها به طور کامل به ملات و الیاف منتقل و در نتیجه بصورت خطی ایجاد می شود که شیب آن با سختی الیاف مورد استفاده مشخص می شود. البته توجه به این نکته حائز اهمیت است که در بسیاری از موارد و بسته به کامپوزیت مورد استفاده، این سه فاز را نمی توان به وضوح از یکدیگر متمایز کرد. در این بخش مشابه کامپوزیت FRCM، رفتار تیرهای تقویت شده با کامپوزیت TRM با سه روش الگوی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. منحنی نیرو-جابجایی بار نهایی (Pu)، سختی الاستیک (K) و انرژی مستهلک سازه (E) و در پایان ضریب اثربخشی β مقاومت کششی الیاف و ملات

جدول ۲۱- نتایج مقاومت کششی ملات و ضریب اثربخشی β تیر تقویت شده با کامپوزیت FRCM-U-10

FRCM-U-10 کامپوزیت		تیر کنترل	
استحکام کششی ملات $\times \beta$	۹/۳۲	-	(MPa)
E تیر بتنی	۱۰/۶۶	۱۰/۶۶	(MPa)
مقاومت کششی تیر	۱/۲۸	۱/۲۸	(MPa)
مقاومت فشاری تیر	۴۲/۳۵	۴۲/۳۵	(MPa)
E ₁ تیر تقویت شده (اولین شیب)	۶۱۵۷	-	(MPa)

جدول ۲۲- نتایج حداکثر گشتاور خمشی و گشتاور خمشی تسلیم

نمونه	$M_{max,num}$ (kN-m)	M_y,num (kN-m)	$\delta_{max,num}$ (mm)	δ_y,num (mm)
تیر کنترل Δ_{exp}	۶۶/۶	۰/۰۱	۱۳۸/۶۸	۱۲/۶۱
تیر با کامپوزیت FRCM-U- 10 Δ_{exp}	۶۹/۷۸	۰۴/۸۰	۱۱۹/۰۸	۱۳/۲۸

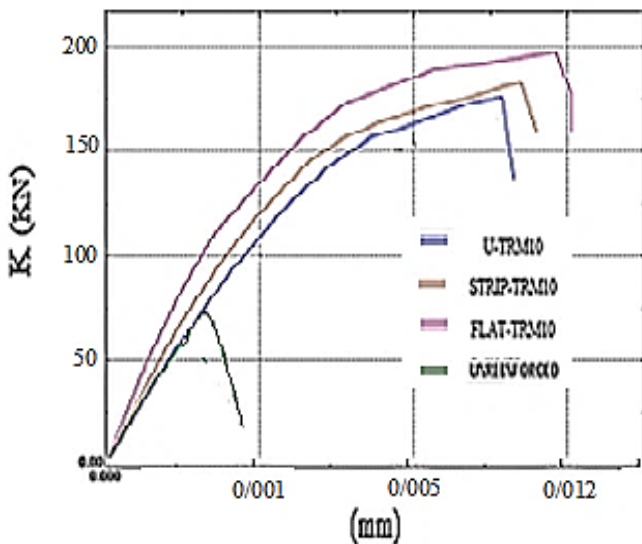


شکل ۱۹- منحنی حداکثر گشتاور خمشی و گشتاور خمشی تسلیم

شیب به آرامی و به تدریج به مقدار ثابتی می رسد. بنابراین، منحنی دارای مقطع خطی است که رفتار کشسان سازه را نشان می دهد و در نقطه انتهایی رفتار غیرخطی مشاهده می شود مطابق جدول ۲۵ و شکل ۲۱ با در نظر گرفتن منحنی های نیرو - جابجایی و ظرفیت بار نهایی تیر بتنی تقویت شده با کامپوزیت TRM و الگوی U-شکل برابر با؛ TRM-U-197 KN = 10 در میان رده تقویتی خود را نشان می دهد. بر این اساس با در نظر گرفتن منحنی نیرو - جابجایی الگوی تقویت شده TRM-U-10 مقدار بار نهایی برابر با ۱۹۷ کیلو نیوتن را نشان داد که نسبت به سایر الگوهای هم رده خود ۲۰/۱۲ درصد، ظرفیت پذیری بیشتری را دارد. هنگامی که منحنی تنش- کرنش شکل... TRM به دست آمد، مدول الاستیسیته از شیب اولیه به دست آمد و داده های تنش و کرنش در ناحیه پلاستیک TRM به عنوان خواص مکانیکی معرفی شدند. رای برهمکنش بین مواد و الیاف، از پوشش EBR استفاده شد.

جدول ۲۵- نتایج ظرفیت بار نهایی تیر کنترل و تقویت شده با کامپوزیت TRM

نمونه الگوها	P_u (KN)
TRM-U-E-10	۱۹۷
TRM-STRIP-E-10	۱۸۲
TRM-FLAT-E-10	۱۷۶
تیر کنترل	۶۱



شکل ۲۱- منحنی بار نهایی - جابجایی تیر کنترل و تقویت شده با الگوهای مختلف کامپوزیت TRM

کامپوزیت و تعیین حداکثر گشتاور خمشی ($M_{max,num}$) محاسبه شد. تمامی الگوها به سه روش مختلف؛ TRM-U، TRM-STRIP و TRM-FLAT با ضخامت ۱۰ میلی متر مدل سازی گردید. شناسایی و بررسی شرایط شکست، مقاومت کششی فولاد (۶۳۴ مگاپاسکال) و مقاومت فشاری بتن مربوطه (f_c) برابر با ۳۲ مگاپاسکال و سایر پارامترهای مشابه بخش قبل در نظر گرفته شد. خواص الیاف و ملات کامپوزیتی TRM مورد استفاده در مدل سازی در جدول ۲۳ و ۲۴ ارائه شده است.

جدول ۲۴- پارامترهای تیر کنترل و تقویت شده با کامپوزیت TRM

پارامترها	TRM-U-10	کنترل	بر حسب
ملات E	۱۰۶۶۶	۱۰۶۶۶	(MPa)
مقاومت فشاری ملات	۳۷/۹۸	۳۲/۲۰	(MPa)
مقاومت کششی بتن	۱/۲۸	۱/۲۸	(MPa)
E_1 الیاف	۳۵۱۷/۰۰	-	(MPa)
استحکام کششی الیاف $\times \beta$	*	*	(MPa)

جدول ۲۳- خصوصیات ملات کامپوزیت TRM جهت مدلسازی

پارامترها	TRM-U-10	بر حسب
ملات E	۸۹۴۱/۵۳	(MPa)
مقاومت فشاری ملات	۲۴/۹۵	(MPa)
مقاومت کششی ملات	۰/۹۰	(MPa)
E_1 الیاف	۲۴۰۰۰۰	(MPa)
استحکام کششی $\times \beta$	*	(MPa)

نوع تقویت الیاف مش کف و ملات بر روی سطح تعبیه شده بدون لغزش الیاف می باشد. این پیوند یک نوع امکان اتصال بهتر را فراهم می کند، حتی اگر مش های ایجاد شده روی سطوح نواحی متفاوت باشند، بنابراین می توان پیوند کامل تیر و کامپوزیت TRM را فرض کرد. شرایط مرزی مشابه با تیر کنترل اعمال شد.

۱-۴. نتایج تیر تقویت شده با کامپوزیت TRM

به دلیل سختی اولیه منحنی ها که به صورت خطی افزایش اما پس از یک جابجایی مشخص، روند خطی تغییر نموده و با افزایش جابجایی،

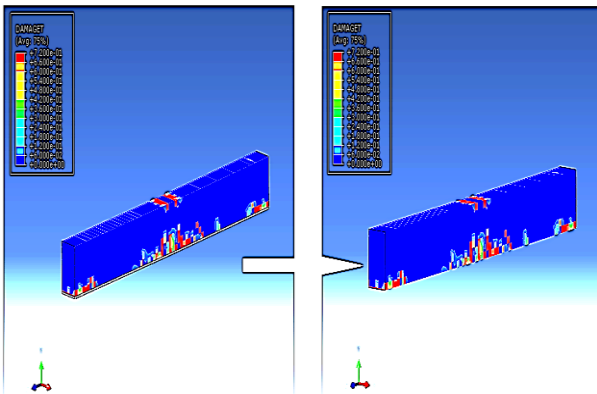
جدول ۲۷- مقادیر جذب انرژی تیر کنترل و تقویت شده با الگوهای مختلف کامپوزیت TRM

نمونه الگوها	$E(Kj)$
TRM-U-E -10	۱/۶
TRM-STRIP-E -10	۱/۴
TRM- FLAT- E-10	۱/۲
تیر کنترل	۱/۱

بررسی معیار آسیب دیدگی تیر بتنی تقویت شده با الگوهای مختلف کامپوزیت TRM ناشی از ترک عملکرد و تاثیرات آن با توجه به جدول ۲۸ و شکل ۲۳-۲۵ نشان می دهد، نقاط تحت اعمال نیروی بار در تیر تقویت شده با الگوی TRM-U-10 نسبت به سایر الگوهای رده خود تأثیر مطلوبتری در کاهش آسیب دارد. همچنین میزان ترک خوردگی در مدل STRIP نسبت به مدل FLAT کمتر بوده و عملکرد بسیار بهتری را نشان می دهد.

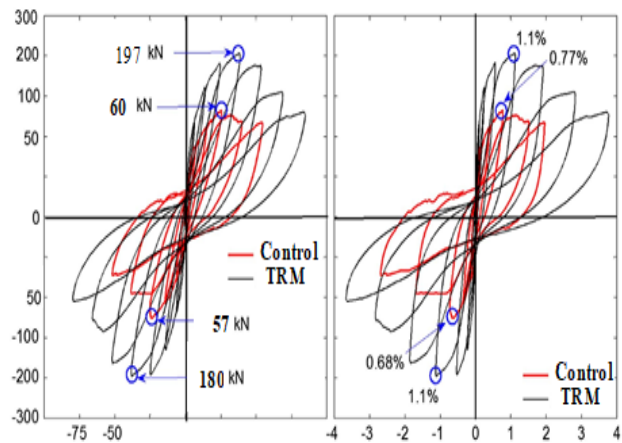
جدول ۲۸- نتایج آسیب ناشی از ترک خوردگی در تیر کنترل و تقویت شده با الگوهای مختلف کامپوزیت TRM

نمونه الگوها	میزان آسیب دیدگی T (%)
تیر کنترل	0/99
TRM-U-E -10	0/45
TRM-STRIP-E -10	0/72
TRM- FLAT- E-10	0/54



شکل ۲۳- میزان آسیب در تیر تقویت شده با الگوی TRM-FLAT-10

به دلیل عملکرد مطلوبتر TRM-U-10 جهت پردازش منحنی هیستری انتخاب و با نمونه کنترل مقایسه گردید. مقادیر متوالی چرخه تکرار بار در شکل ۲۲ نشان می دهد.



شکل ۲۲- منحنی هیستری تیر کنترل و الگوی TRM-U-10

همانطور که گفته شد؛ سختی موثر تیر بتنی جهت ارزیابی رفتار لرزه‌ای با در نظر گرفتن شیب منحنی و جابجایی قابل محاسبه است لذا با توجه به منحنی یاد شده، نتایج بدست آمده در جدول ۲۶ نشان داد، الگوی تقویت شده با کامپوزیت TRM-U-10 نسبت به سایر الگوها مقدار $93/45$ کیلو نیوتن/متر را نشان داد.

جدول ۲۶- نتایج سختی الاستیک تیر کنترل و تقویت شده با الگوهای مختلف کامپوزیت TRM

نمونه الگوها	$K(KN/m)$
TRM-U-E -10	۴۵
TRM-STRIP-E -10	۳۵
TRM- FLAT- E-10	۳۰
تیر کنترل	۳۰

همچنین استهلاک و قابلیت جذب انرژی تیرهای تقویت شده با توجه به روش‌های مختلف الگو و منحنی‌های نیرو-جابجایی مطابق جدول ۲۷ بیشترین جذب انرژی و استهلاک مربوط به الگوی TRM-U-10 با مقدار $69/1$ انرژی ثبت گردید.

به همین منظور استفاده از پارامترهایی همچون؛ $\varepsilon_c, f_c, \varepsilon_s, f_s, f_{s,u},$ که هر دو $k, a \cdot f_{f,ib,u} = \beta f_{f,ib,u}$ که $t, b, a, f_{s,u}, f_{f,u}$ آنها برای به دست آوردن ضریب اثربخشی (β) مهم است مطابق کامپوزیت FRM در نظر گرفته شد سپس با اعمال پارامترها جهت تحلیل این بخش مطابق جدول خواص کامپوزیت جهت مدل سازی تیر تقویت شده با کامپوزیت TRM-U-10 انجام گردید. نتایج به دست آمده از ضریب اثربخشی کششی الیاف و ملات کامپوزیت β جهت تعیین حداکثر گشتاور خمشی ($M_{max,exp}$)، گشتاور خمشی تسلیم (M_y,num) و انحرافات ثبت شده در دهانه میانی و زمانی حداکثر گشتاور خمشی ($\delta_{max,num}$) و لنگر خمشی تسلیم ($\delta y,num$) در جدول ۲۹- ۳۱ و شکل منحنی ۲۶ و ۲۷ ارائه گردید.

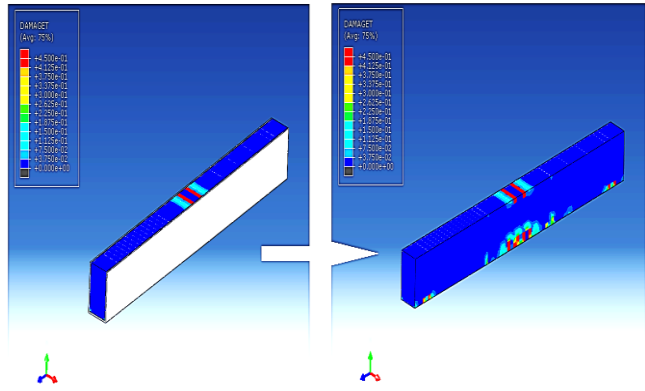
جدول ۲۹- نتایج مقاومت کششی الیاف و ضریب اثربخشی β و ملات کامپوزیت TRM-U-10

کامپوزیت TRM-U-10		
β استحکام کششی الیاف \times	(MPa)	۱۶۵۸
E	(MPa)	۹۵۰۰
مقاومت کششی ملات	(MPa)	۰/۸۹
مقاومت فشاری ملات	(MPa)	۲۴/۰۲
a	(KN-m)	۸/۴۳
K	(KN-m)	۱۵/۶۵
E ₁	(MPa)	۸۹۰۵/۵۴

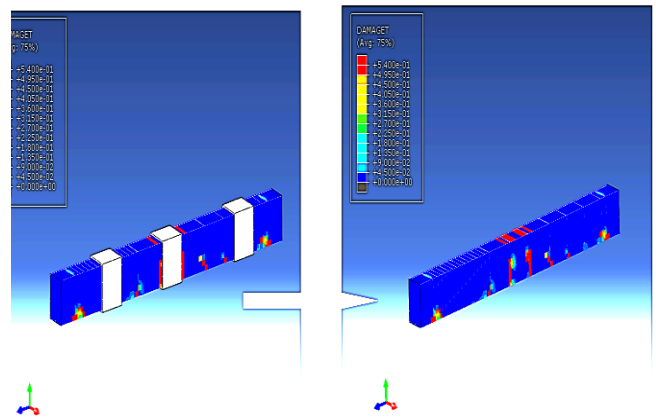
جدول ۳۰- نتایج مقاومت کششی ملات و ضریب اثربخشی β تیر تقویت شده با

کامپوزیت TRM-U-10

کامپوزیت TRM-U-10		تیر کنترل	
استحکام کششی ملات $\times \beta$	۱/۴۶	-	(MPa)
E تیر بتنی	۳۵۱۸	-	(MPa)
مقاومت کششی تیر	۱/۲۸	۱/۲۹	(MPa)
مقاومت فشاری تیر	۴۲/۳۵	۴۲/۳۵	(MPa)
E تیر تقویت شده (اولین شیب)	۱۰/۶۶	۱۰/۶۶	(MPa)



شکل ۲۴- میزان آسیب در تیر تقویت شده با الگوی TRM-U-10



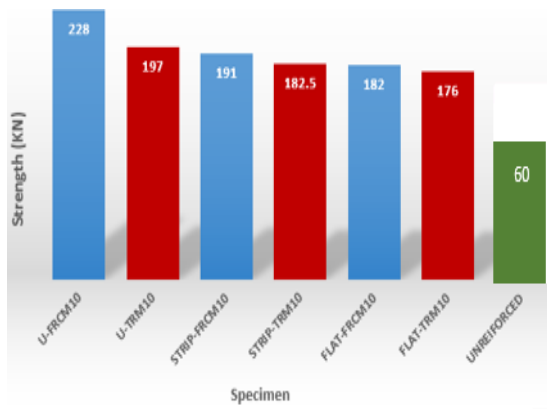
شکل ۲۵- : میزان آسیب در تیر تقویت شده با الگوی TRM-STRIP-10

جدول ۲۸- نتایج کلی تیر کنترل و تقویت شده با الگوهای مختلف کامپوزیت TRM

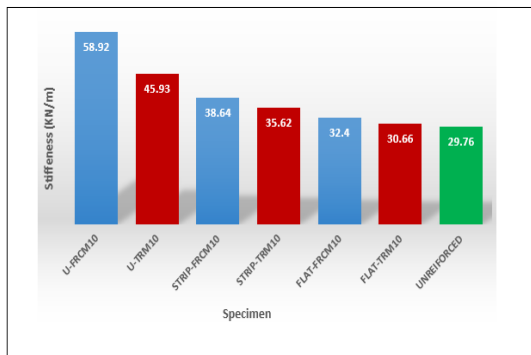
نمونه الگوها	P_u (KN)	K $\left(\frac{KN}{m}\right)$	E (Kj)
TRM-U-10	۱۹۷	۴۵	۱/۶
TRM-STRIP-10	۱۸۲	۳۵	۱/۴
TRM- FLAT-10	۱۷۶	۳۰	۱/۲
تیر کنترل	۶۰	۳۰	۱/۱

به لحاظ عملکرد یکسان در مدل سازی کامپوزیت TRM، جهت درک بهتر پیچیدگی ارتباط و مکانیسم شیمیایی که در بین نخ، مش، پوشش و ملات که توزیع تنش را در مواد کامپوزیت تعیین می کند، مشابه بخش قبل با در نظر گرفتن عملکرد مطلوبتر الگوی TRM-U-10 جهت بررسی قابلیت های استحکام تحت شرایط تنش کششی صورت گرفت.

نتایج بدست آمده جهت سنجش دو کامپوزیت در شکل - نشان می‌دهد، کامپوزیت FRCM نسبت به TRM اثر مطلوبتری دارد.



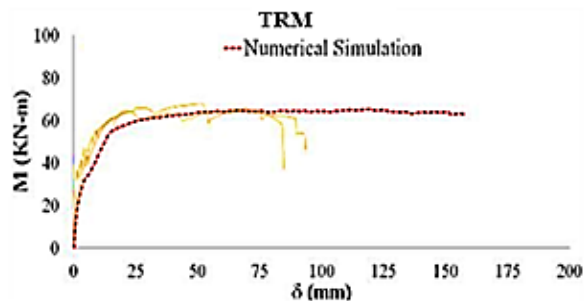
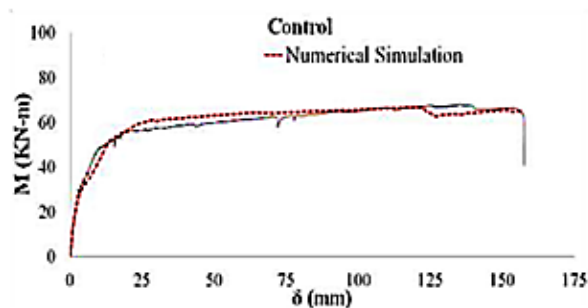
شکل ۲۸- نتایج ظرفیت بار نهایی تیرهای تقویت شده با کامپوزیت TRM و FRCM با الگوهای مختلف



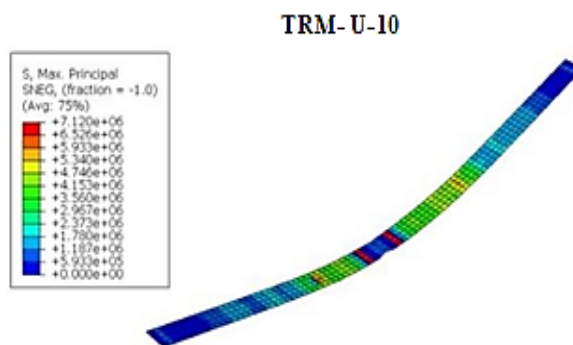
شکل ۲۹- نتایج سختی الاستیک تیرهای تقویت شده با کامپوزیت TRM و FRCM با الگوهای مختلف

جدول ۳۱- نتایج حداکثر گشتاور خمشی و گشتاور خمشی تسلیم

نمونه	$M_{Max,num}$ (kN-m)	M_y,num (kN-m)	$\bar{\delta}_{Max,num}$ (mm)	$\bar{\delta}_y,num$ (mm)
تیر کنترل Δ_{exp}	۵۰/۰۱	۵۲	۱۲۰/۷۰	۱۲/۶۱
تیر تقویت شده با کامپوزیت TRM- U-10 Δ_{exp}	۶۶/۰۱	۸۲/۱۰	۱۱۹/۰۸	۱۴/۲۵



شکل ۲۶- منحنی حداکثر گشتاور و لنگر خمشی کامپوزیت TRM-U-10



شکل ۲۷- حداکثر وضعیت تنش اصلی TRM-U-10

انتخابی کامپوزیت بر اساس عملکرد مطلوبتر، جهت بررسی کاهش ظرفیت کششی الیاف و ملات با بدست آوردن ضریب کاهش β ، گشتاور و لنگر خمشی مورد تحلیل قرار گرفت.

• تجزیه و تحلیل کامپوزیت FRCM-U-10 نشان داد که نوع ماتریس استفاده شده به شدت بر پارامتر کاهش کشش الیاف تأثیر می گذارد، به این معنی که لازم است یک پایگاه داده از نتایج تجربی برای هر ترکیبی از ماتریس و شبکه مورد استفاده ایجاد شود. بنابراین، استفاده از ترکیبی از شبکه‌ها و ماتریس‌ها برای ساخت FRCM که توسط ارائه‌دهنده تضمین نشده‌اند، باید با دقت زیادی انجام شود.

• با مقایسه انواع مختلف الگوهای تقویت کننده در کامپوزیت FRCM-U-10، کمترین کاهش ظرفیت کششی الیاف را نسبت به کامپوزیت TRM-U-10 ایجاد کرد. از این رو، کاهش ظرفیت کششی الیاف را احتمالاً به دلیل وجود ماسه بزرگتر از ۳ میلی‌متر و ناتوانی ماتریس مربوطه در اشباع کامل الیاف خشک را تشکیل می‌دهند، بود.

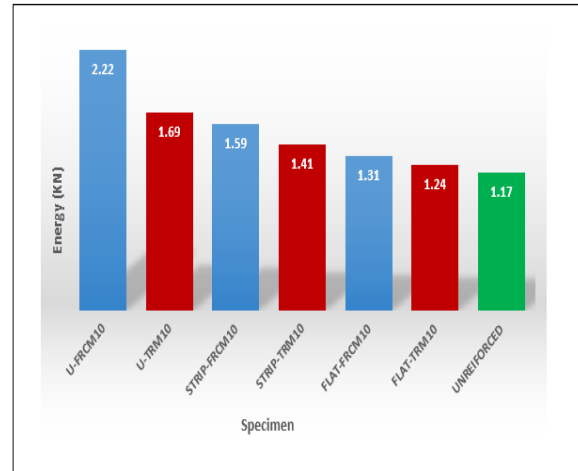
• ضریب کاهش استحکام کششی الیاف در نمونه TRM-U-10 برابر با ۱۶۵۸ و نمونه FRCM-U-10 برابر با ۲۰۴۸ مگاپاسکال را نشان داد.

• ضریب کاهش استحکام کششی ملات در نمونه TRM-U-10 برابر با ۱/۴۶ و نمونه FRCM-U-10 برابر با ۹/۳۲ مگاپاسکال را نشان داد.

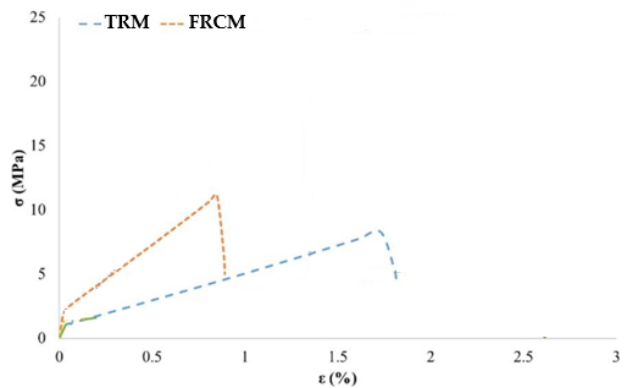
• همچنین مقاومت کششی ملات و بتن در نمونه TRM-U-10 به ترتیب ۰/۸ و ۲۴ و نمونه FRCM-U-10 به ترتیب ۰/۹ و ۲۴ مگاپاسکال بدست آمد که در مقاومت فشاری دو کامپوزیت عملکرد یکسانی داشتند.

• تیرهای تقویت شده برای پیش بینی لنگرهای خمشی و جابجایی (تغییر بین ۷درصد تا ۳۱ درصد) به دلیل ضریب β تعیین شده در رویکرد تجربی را نشان داد. با این حال، در مورد معیار شکست در کامپوزیت FRCM-U-10 نسبت به کامپوزیت TRM-U-10 انحراف کمتری (تغییر ۵ درصد) به دست آمد.

• به طور خلاصه می توان گفت که اگرچه شواهد تجربی محدودی برای تعیین ضریب β وجود دارد، اما می توان از آن به عنوان



شکل ۳۰- نتایج جذب و اتلاف انرژی تیرهای تقویت شده با کامپوزیت TRM و FRCM با الگوهای مختلف



شکل ۳۱. منحنی تنش-کرنش TRM و FRCM

در پایان، برای یکپارچگی و عملکرد بهتر، استفاده از الگوی کامپوزیت FRCM-U-10 به عنوان شرایط بهینه جهت تقویت سطح خارجی اجزای سازه‌ای بتنی توصیه می‌شود. همچنین ملات با ساختار الیافی جهت پیوند بهتر بین لایه‌ها در کامپوزیت‌های BMC می تواند جایگزین مناسبی در نظر گرفته شود.

۵- نتیجه گیری

تیرهای تقویت شده برای پیش بینی لنگرهای خمشی و جابجایی این کار یک رویکرد مطالعه عددی برای تعیین ظرفیت خمشی نهایی تیر بتنی که با کامپوزیت‌های TRM-U-10 و FRCM-U-10 جهت استحکام موثر تقویت شده‌اند، ارائه می‌کند. همچنین الگوی

loads. An experimental approach. Engineering Structures. 2021 Mar 15;231:111742.

- [4] Le Bourhis E, Touchard F. Mechanical properties of natural fiber composites. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. 2021.
- [5] Nanni A. Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Systems for Repair and Strengthening Concrete and Masonry Structures. American Concrete Institute.
- [6] Nanni A. Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Systems for Repair and Strengthening Concrete and Masonry Structures. American Concrete Institute.
- [7] ACI Committee. ACI 549.4 R-13: Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Systems for Repair and Strengthening Concrete and Masonry Structures. In American Concrete Institute 2013.
- [8] Nanni A. "Acceptance criteria for masonry and concrete strengthening using fiber-reinforced cementitious matrix (FRCM) composite systems." 2013
- [9] Astm D. 3039. Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. 2008.
- [10] Nanni A. Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Systems for Repair and Strengthening Concrete and Masonry Structures. American Concrete Institute. 2013
- [11] Antonietta AM, Ascione L, Baratta A, Bilotta A, Camata G, Borri A, Carloni C, Giulia CF, Casadei P, Claire G, Cersosimo G. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded Fibre Reinforced Inorganic Matrix Systems for Strengthening Existing Structures. 2018
- [12] Wu Z, Zhang J, Yu H, Ma H, Wang H, Zhang G, Yan B. Experiment and mesoscopic modelling on the dynamic

پارامتری به عنوان کاهش استحکام کششی نهایی الیاف و رویکرد امیدوارکننده را جهت مدل‌سازی انواع مختلف کامپوزیت مبتنی بر سیمان استفاده کرد.

• همچنین با بررسی سختی الاستیک تیرهای تقویت شده با کامپوزیت FRCM-U-10، افزایش ۲۳ درصدی و مقدار جذب و استهلاک بتنی تقویت شده انرژی جذب شده با استفاده از الگوی FRCM-U-10 نسبت به سایر الگوهای هم رده خود ۱۷ درصد افزایش ثبت گردید.

• حالت‌های شکست و ترک در کامپوزیت TRM به دلیل لغزش الیاف طبیعی در نقطه بار اعمال شده مشهود و افزایش را نشان می‌دهد.

• افزایش آسیب دیدگی در مقطع تقویت شده با TRM-U-10 نسبت به مقطع FRCM-U-10 افزایش را نشان می‌دهد.

• در دو نمونه مقطع تقویت شده با کامپوزیت FRCM-FLAT-10 و TRM-FLAT-10 هیچ یک کارایی مطلوبی نداشتند.

در مجموع کامپوزیت‌های TRM و FRCM نسبت به بتن کنترل عملکرد رفتاری مطلوبتری دارند.

یاد و خاطره استاد فقید جناب آقای پرفسور کتابداری گرامی باد

- [1] Wakjira TG, Ibrahim M, Ebead U, Alam MS. Explainable machine learning model and reliability analysis for flexural capacity prediction of RC beams strengthened in flexure with FRCM. Engineering Structures. 2022 Mar 15;255:113903.
- [2] Tetta ZC, Koutas LN, Bournas DA. Textile-reinforced mortar (TRM) versus fiber-reinforced polymers (FRP) in shear strengthening of concrete beams. Composites Part B: Engineering. 2015 Aug 1;77:338-48.
- [3] Torres B, Ivorra S, Baeza FJ, Estevan L, Varona B. Textile reinforced mortars (TRM) for repairing and retrofitting masonry walls subjected to in-plane cyclic



- Masonry Structures. In American Concrete Institute 2013.
- [21] Ivorra S, Torres B, Baeza FJ, Bru D. In-plane shear cyclic behavior of windowed masonry walls reinforced with textile reinforced mortars. *Engineering Structures*. 2021 Jan 1;226:111343.
- [22] Estevan L, Baeza FJ, Bru D, Ivorra S. Stone masonry confinement with FRP and FRCM composites. *Construction and Building Materials*. 2020 Mar 20;237:117612.
- [23] Dawood ET, Mohammed WT, Plank J. Performance of sustainable mortar using calcined clay, fly ash, limestone powder and reinforced with hybrid fibers. *Case Studies in Construction Materials*. 2022 Jun 1;16:e00849.
- [24] Babaeidarabad S, Loreto G, Nanni A. Flexural strengthening of RC beams with an externally bonded fabric-reinforced cementitious matrix. *Journal of Composites for Construction*. 2014 Oct 1;18(5):04014009.
- [25] Bilotta A, Ceroni F, Lignola GP, Prota A. Use of DIC technique for investigating the behaviour of FRCM materials for strengthening masonry elements. *Composites Part B: Engineering*. 2017 Nov 15;129:251-70
- [26] Belli A, Mobili A, Bellezze T, Tittarelli F. Commercial and recycled carbon/steel fibers for fiber-reinforced cement mortars with high electrical conductivity. *Cement and Concrete Composites*. 2020 May 1;109:1035.
- compressive behaviors of a new carbon fiber-reinforced cement-based composite. *Cement and Concrete Composites*. 2022 Jul 1;130:104519.
- [13] Babaeidarabad S, Loreto G, Nanni A. Flexural strengthening of RC beams with an externally bonded fabric-reinforced cementitious matrix. *Journal of Composites for Construction*. 2014 Oct 1;18(5):04014009.
- [14] Kariou FA, Triantafyllou SP, Bournas DA. TRM strengthening of masonry arches: An experimental investigation on the effect of strengthening layout and textile fibre material. *Composites Part B: Engineering*. 2019 Sep 15;173:106765.
- [15] Bertolesi E, Buitrago M, Giordano E, Calderon PA, Moragues JJ, Clementi F, Adam JM. Effectiveness of textile reinforced mortar (TRM) materials in preventing seismic-induced damage in a U-shaped masonry structure submitted to pseudo-dynamic excitations. *Construction and Building Materials*. 2020 Jul 10;248:118532.
- [16] D'Antino T, Papanicolaou C. Mechanical characterization of textile reinforced inorganic-matrix composites. *Composites Part B: Engineering*. 2017 Oct 15;127:78-91.
- [17] Torres B, Varona FB, Baeza FJ, Bru D, Ivorra S. Study on retrofitted masonry elements under shear using digital image correlation. *Sensors*. 2020 Apr 9;20(7):2122.
- [18] Li B, Xiong H, Jiang J, Dou X. Tensile behavior of basalt textile grid reinforced Engineering Cementitious Composite. *Composites Part B: Engineering*. 2019 Jan 1;156:185-200.
- [19] Nanni A. Acceptance criteria for masonry and concrete strengthening using fiber-reinforced cementitious matrix (FRCM) composite systems. 2013
- [20] ACI Committee. ACI 549.4 R-13: Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Systems for Repair and Strengthening Concrete and