

بررسی عددی تأثیر شکل مقطع ستون، مقاومت ملات و تعداد لایه‌های TRC در رفتار لرزه‌ی ستون‌های بتنی مسلح

نرگس آزادوار (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

مژده زرگران* (استادیار)

گروه کابوویت بخش مهندسی سازه، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران

فیاض رحیم‌زاده رفوئی (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

نادر خواجه احمد عطاری (استاد)

گروه کابوویت بخش مهندسی سازه، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران

استفاده از بتن مسلح شده با منسوج TRC از روش‌های نوین تقویت سازه‌های بتنی است که به دلیل وزن کم، مقاومت بالا، عدم تغییر در ابعاد المان‌های تقویت شده و سهولت در اجرا در سال‌های اخیر به آن توجه شده است. هدف از مطالعه‌ی حاضر، بررسی کارایی استفاده از روش اخیر برای مقاوم‌سازی ستون‌های بتنی با درصد آرماتور پایین است که نیازمند تقویت هستند. در مطالعه‌ی حاضر، پس از صحت‌سنجی مدل‌های ساخته شده در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس با آزمایش‌های انجام شده، نسبت به بررسی و مقایسه‌ی اثر پارامترهای مختلف مؤثر در تقویت ستون‌های بتنی اقدام شده است. در مطالعه‌ی حاضر، پارامترهای مختلفی، مانند: شکل هندسی مقطع، مقاومت ملات، تعداد لایه‌های منسوج بررسی شده و ظرفیت نیروی جانبی، الگوی ترک و تنش در سطح بتن و ملات و تسلیم میلگردها در ستون‌های بتنی تقویت شده مقایسه و ارزیابی شده است.

مهندسی عمران شریف، پاییز ۱۴۰۰
دوری ۲ - ۳۷، شماره‌ی ۳/۲، ص. ۱۰۵-۱۱۵، (پژوهشی)

azadvar.narges@wtiau.ac.ir
m.zargaran@bhrc.ac.ir
rofooei@sharif.edu
n.attari@bhrc.ac.ir

واژگان کلیدی: TRC، ستون بتن مسلح، تقویت سازه‌ی، رفتار لرزه‌ی، روش المان محدود، منسوج.

۱. مقدمه

استفاده از الیاف FRP^۴ برخی از مهم‌ترین مشکلات آن را نیز به دلیل جایگزینی مواد چسباننده‌ی غیرآلی مانند ملات‌های سیمانی به جای استفاده از رزین‌های آلی برای چسباندن و آغشته کردن الیاف مرتفع می‌سازد. برخی از برتری‌های روش بتن مسلح شده با منسوج TRC عبارت‌اند از:

— وجود اتصال مناسب TRC روی سطوح در دماهای بالا،^[۳-۱] برخلاف رفتار ضعیف رزین‌های اپوکسی در دماهای بالاتر از دمای ذوب شیشه‌ی آن، حقیقتی است که موجب استفاده از تجهیزات خاص و گران‌قیمت محافظت در برابر آتش می‌شود.

— قیمت ارزان‌تر ملات‌های سیمانی نسبت به رزین‌های اپوکسی.

— قابلیت استفاده از TRC روی سطوح مرطوب و عدم امکان استفاده از FRP روی سطوح خیس یا در دماهای پایین.

گذشت زمان و خرابی‌های احتمالی ناشی از آن، ظرفیت باربری سازه‌های موجود را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، سازه‌ها همواره در معرض خطر زلزله هستند. بنابراین مقاوم‌سازی سازه، یک مسئله‌ی مهم اقتصادی محسوب می‌شود. مقاوم‌سازی سازه‌های موجود برای افزایش ظرفیت باربری می‌تواند به علت تغییر کاربری، طراحی ضعیف یا ساخت و ساز ضعیف و استهلاک سازه باشد. در سال‌های اخیر، استفاده از سیستم‌های کامپوزیت به منظور تقویت و بهسازی سازه‌های بتنی و بتایی در حال گسترش است. در حال حاضر روش نسبتاً جدید پیشنهادی برای مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی، استفاده از بتن مسلح شده با منسوج TRC^۱ است که به نام‌هایی چون FRCM^۲ یا TRM^۳ نیز شناخته می‌شود. روش ذکر شده علاوه بر فواید

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۱۱/۲۵، اصلاحیه ۱۴۰۰/۱/۲۱، پذیرش ۱۴۰۰/۲/۲۴.

DOI:10.24200/J30.2021.57462.2911

-- سازگاری مصالح استفاده شده در روش اشاره شده با سطح زیرین در سازه‌های بتنی و مصالح بنایی،^[۴] و عدم سازگاری رزین‌های اپوکسی و مصالح لایه‌ی زیرین.

-- بی‌نیازی به مسطح کردن سطح زیرین به خصوص در سازه‌های قدیمی.^[۵]

در چند سال اخیر، در زمینه‌ی تقویت سازه‌ها به وسیله‌ی بتن مسلح شده با منسوج، مطالعات آزمایشگاهی و عددی مختلفی صورت گرفته است که تأثیر عملکرد مناسب روش موردنظر را در زمینه‌ی تقویت و بهسازی سازه‌های بنایی،^[۷،۶] و سازه‌های بتنی،^[۸] نشان داده‌اند.

اغلب بررسی‌های صورت گرفته درخصوص تقویت ستون‌ها به وسیله‌ی TRC، بر روی نمونه‌های بتنی با سطح مقطع غیردایروی و تحت بار محوری فشاری مونوتونیک با یا بدون خروج از مرکزیت بار صورت گرفته است.^[۹،۱۰] در اغلب مطالعات اخیر، از منسوجات کربن، شیشه، بازالت، آرامید، یا^۵ به عنوان الیاف مسلح‌کننده برای تقویت استفاده شده است.^[۲]

از مطالعات انجام شده بر روی ستون‌های مربعی و دایروی می‌توان به مطالعه‌ی آزمایشگاهی و عددی انجام شده توسط کلیجانی^۶ و همکاران (۲۰۱۴)،^[۱۱] اشاره کرد که بر روی ۲۲ نمونه‌ی بتنی غیرمسلح مربعی و دایروی تحت بار مونوتونیک تک‌محوره صورت گرفته و در آن از بتن مسلح شده با منسوج از جنس PBO به منظور تقویت ستون‌ها استفاده شده است. نتایج به دست آمده نشان داده است که روش مقاوم‌سازی مذکور موجب افزایش مقاومت و شکل‌پذیری نمونه‌ها شده و مقدار افزایش ایجاد شده به عواملی چون تعداد لایه‌های منسوج و طول روی هم رفتگی آن‌ها بستگی داشته است. همچنین استفاده از ملات موجب به تأخیر افتادن فعال‌سازی سیستم محصورکننده شده است.

همچنین ایشان در مطالعه‌ی دیگری در همان سال،^[۱۲] تأثیر تعداد لایه‌های منسوج و شکل سطح مقطع ستون و زاویه‌ی گردش‌گی نمونه‌های غیردایروی در رفتار لرزه‌ی ستون‌های بتنی را بررسی و برای این منظور از ۳۰ نمونه‌ی بتنی غیرمسلح با سطح مقطع‌های دایروی و مربعی و مستطیلی تحت بار محوری فشاری چرخه‌ی و مونوتونیک استفاده کرده است. برای تقویت نمونه‌ها نیز از بتن مسلح شده با ۲، ۳ یا ۴ لایه‌ی منسوج از جنس کربن استفاده شده است. نتایج پژوهش اخیر نشان داده است که با افزایش تعداد لایه‌های منسوج، بیشینه‌ی تنش نمونه‌ها افزایش یافته است، اما تأثیر چشمگیری در افزایش بیشینه‌ی تغییرشکل نهایی و ظرفیت جذب انرژی نداشته است. همچنین در ستون‌های با سطح مقطع‌های مختلف، بیشترین تأثیر تقویت در نمونه‌های با سطح مقطع دایروی مشاهده شده است.

از جمله مطالعاتی که اثر خروج از مرکزیت در تقویت ستون‌ها در آن بررسی شده است، مطالعه‌ی انجام شده توسط تراپکو^۷ است،^[۹] که بر روی ۱۵ نمونه ستون لاغر بتن مسلح با مقطع مربع صورت گرفته و تقویت نمونه‌ها در آن به وسیله‌ی بتن مسلح شده با ۱ یا ۲ لایه‌ی منسوج از جنس PBO انجام شده است. نمونه‌ها تحت بار فشاری تک‌محوره‌ی مونوتونیک با خروج از مرکزیت‌های صفر، $h/6$ و $h/12$ قرار گرفتند. نتایج مطالعه‌ی مذکور نشان داد که انرژی تخریب^۸ (E_u) نمونه‌ها با افزایش خروج از مرکزیت کاهش یافته است، اما تعداد لایه‌های منسوج تأثیری در مقدار انرژی تخریب نداشته است.

در پژوهش دیگری در همین زمینه، امیرس^۹ و ور^{۱۰} (۲۰۱۵)،^[۱۰] به بررسی رفتار لرزه‌ی ستون‌های بتنی تقویت شده با بتن مسلح شده با ۱ یا ۲ لایه‌ی منسوج از جنس PBO بر روی ۸ نمونه ستون بتن مسلح با مقطع مربع‌شکل تحت بار محوری با خروج از مرکزیت‌های مختلف پرداختند و دریافتند که با افزایش خروج از مرکزیت بار، افزایش ظرفیت باربری حاصل از تقویت کاهش می‌یابد و تعداد

لایه‌های منسوج در مد شکست نمونه‌ها مؤثر است، اما خروج از مرکزیت تأثیری در آن ندارد. همچنین، مقاومت حاصل از تقویت نمونه‌ها، رابطه‌ی معکوس با نسبت خروج از مرکزیت بار دارد.

فالاچینی^{۱۱} و همکاران (۲۰۲۰)،^[۱۳] نیز با انجام آزمایش بر روی ۱۲ نمونه ستون بتنی با مقطع مربع و دایروی تحت بار محوری فشاری به بررسی رفتار آزمایشگاهی ستون‌های تقویت‌شده با TRC با منسوج کربن پرداختند و دریافتند که الگوی ترک در بتن کاملاً متأثر از شکل مقطع ستون است و افزایش مقاومت ستون با تعداد لایه‌های منسوج ارتباط مستقیم دارد و تأثیر آن در مقاطع با ستون دایروی بیشتر مشاهده می‌شود. در پژوهش دیگری، فالاچینی و همکاران (۲۰۲۰)،^[۱۴] از ۸ نمونه ستون مسلح بتنی استفاده کردند تا تأثیر شکل مقطع ستون (دایره یا مربع) و فاصله‌ی بین خاموت‌ها را در مقاوم‌سازی نمونه‌های تقویت شده با ۲ لایه‌ی TRC منسوج از جنس شیشه ارزیابی کنند و نمونه‌ها را تحت بار فشاری تک‌محوره قرار دادند. نتایج مطالعه‌ی ایشان نشان داد که استفاده از ژاکت‌های TRC موجب افزایش مقاومت فشاری و ظرفیت کرنش محوری و کاهش افت مقاومت برای تمام نمونه‌های آزمایشی شده است. همچنین الگوی ترک در نمونه‌های با شکل مقطع متفاوت، تفاوت‌هایی دارد و در نمونه‌های با سطح مقطع مربعی، الگوی مذکور نامنظم‌تر بوده و در گوشه‌ها، موجب ترک‌های عمیق‌تری شده است.

همچنین لی^{۱۲} و همکاران (۲۰۲۰)،^[۱۵] در بررسی عددی تأثیر عوامل مختلف در عملکرد لرزه‌ی ستون‌های مسلح بتنی تقویت شده با TRC پرداختند و دریافتند که TRC موجب محدود کردن گسترش ترک و افزایش بیشینه‌ی نیروی ستون و به تأخیر انداختن افت سختی نمونه‌ها پس از تسلیم می‌شود و ظرفیت تغییرشکل لرزه‌ی ستون‌ها را افزایش می‌دهد و ظرفیت باربری نمونه‌های تقویت شده با نسبت بار محوری فشاری نسبت مستقیم و با ضریب شکل‌پذیری لرزه‌ی و ظرفیت اتلاف انرژی رابطه‌ی عکس دارد.

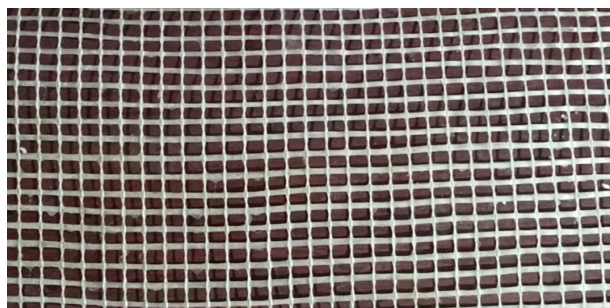
مهم‌ترین هدف نوشتار حاضر، بررسی تأثیر مقاومت ملات، شکل مقطع ستون، و تعداد لایه‌های منسوج در تقویت ستون‌های بتنی و اتصال آن به تیر تکیه‌گاهی تحت بار هم‌زمان محوری و جانبی است. برای این منظور، ۱۰ مدل در ۴ گروه به وسیله‌ی نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس،^[۱۶] شبیه‌سازی شده‌اند که گروه اول این مدل‌ها به عنوان گروه شاهد با نتایج آزمایشگاهی صحت‌سنجی و انطباق نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی کنترل شده است. برخی از پارامترهای بررسی شده در پژوهش حاضر عبارت‌اند از: ظرفیت باربری نیروی جانبی - دررفت، توزیع تنش در بتن و ملات، الگوی ترک و تسلیم میلگردها.

۲. مدل‌سازی و صحت‌سنجی

جهت صحت‌سنجی مدل‌های عددی ساخته شده در پژوهش حاضر، از نتایج آزمایش‌های انجام شده در مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی استفاده شده است.^[۱۷] که شامل دو نمونه ستون به همراه تیر تکیه‌گاهی بتنی با مقیاس ۵/۰ بودند.^[۱۷] که ابعاد آن‌ها در شکل ۱ مشاهده می‌شود. نمونه‌ها شامل ستون به ابعاد 300×300 میلی‌متر مربع و ارتفاع ۱۵۰۰ میلی‌متر و تیر تکیه‌گاهی با ابعاد 700×300 میلی‌متر مربع و طول ۱۷۰۰ میلی‌متر بوده‌اند (به منظور تمرکز خرابی‌ها در ستون، سختی تیر تکیه‌گاهی بیشتر از ستون در نظر گرفته شده است). ستون‌ها به وسیله‌ی ۸ عدد میلگرد طولی $\Phi 12$ و خاموت‌های $\Phi 10$ (در طول ۳۰۰ میلی‌متر بالای ستون با فواصل ۵۰ میلی‌متری و در ادامه با فواصل ۱۰۰ میلی‌متر) مسلح

جدول ۱. مشخصات میلگردها.

میلگردها	F_y (MPa)	F_u (MPa)
خاموت ($\Phi 10$)	۴۰۸	۶۱۵
میلگردهای طولی ($\Phi 12, \Phi 25$)	۵۲۳	۶۶۹



شکل ۳. منسوج شیشه.

جدول ۲. طرح اختلاط ملات سیمانی.

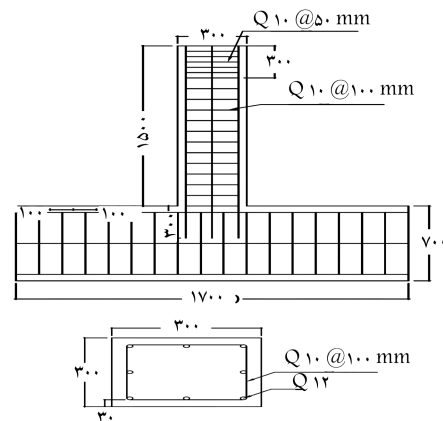
مصالح	مقدار (کیلوگرم در یک مترمکعب بتن)
ماسه	۱۲۱۴
سیمان	۷۰۰
آب	۲۸۰
فوق روان کننده	۷/۰ درصد وزن سیمان

ماتریس سیمانی داشته است (شکل ۳). فاصله‌ی مولتی فیلامنت‌ها در جهت تار و بود ۵ میلی‌متر بوده است. براساس آزمایش، مقاومت کششی بر روی مولتی فیلامنت شیشه‌یی مشخص شده است که متوسط مقاومت کششی مولتی فیلامنت ۱۰۲۰ مگاپاسکال و مدول کشسانی آن ۴۸/۵ گیگاپاسکال بوده است. براساس نتایج حاصل از آزمون فشاری ۶ نمونه‌ی استوانه‌یی مطابق با استاندارد ۲۰ - ASTM C۳۹/C۳۹M، مقاومت مشخصه‌ی فشاری ۲۸ روزه‌ی بتن برابر با ۲۸ مگاپاسکال و مدول کشسانی بتن به طور متوسط برابر با ۲۵ گیگاپاسکال بوده است.^[۱۸] که در مدل‌سازی آن از معیار شکست Concrete Damaged Plasticity استفاده شده است.

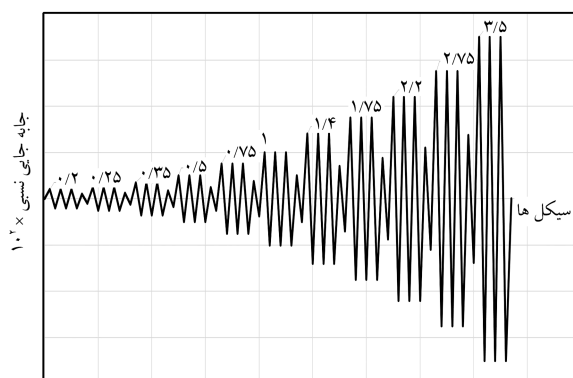
طرح اختلاط ملات سیمانی استفاده شده در آزمایش، در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین نتایج طبق آزمون ۶ نمونه‌ی مکعبی ۵۰ × ۵۰ × ۵۰ میلی‌متر مکعب تحت آزمایش فشاری مطابق با استاندارد ۲۰b - ASTM C۱۰۹/C۱۰۹M، مقاومت مشخصه‌ی فشاری ۲۸ روزه‌ی ملات بتنی برابر با ۴۰ مگاپاسکال بوده است.^[۲۰]

۱.۲. مشخصات مدل‌سازی

در نوشتار حاضر، مدل‌سازی به وسیله‌ی نرم‌افزار المان محدود آباکوس انجام شده است. به منظور مدل‌سازی مصالح مختلف نمونه‌ها، از جمله بتن و ملات‌ها المان‌های سه‌بعدی solid ۸ گره‌یی (C3D8R) و برای میلگردهای فولادی و منسوج از المان‌های یک‌بعدی دوگره‌یی خرپا (T3D2) استفاده شده است. تمامی المان‌های مربوط به مصالح میلگردها و منسوج به ترتیب در بتن و ملات مدفون شده‌اند. مشخصات مصالح مدل‌ها کاملاً مطابق بر نمونه‌های آزمایشگاهی بوده است. شرایط مرزی مدل‌ها مطابق با شرایط آزمایشگاهی بوده و در قسمت زیرین تیر



شکل ۱. جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی.



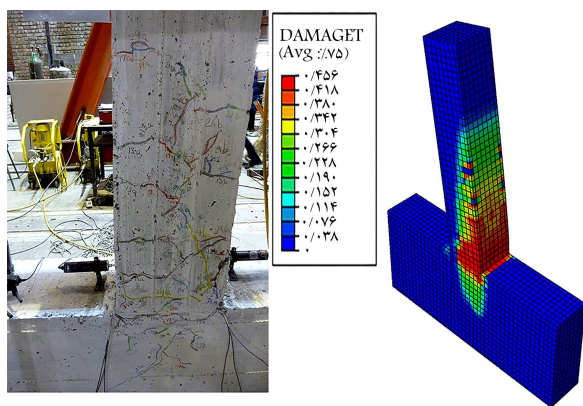
شکل ۲. الگوی بارگذاری.

شده‌اند. همچنین در تیر تکیه‌گاهی از میلگردهای $\Phi 25$ به صورت طولی و خاموت‌های $\Phi 10$ با فواصل ۱۰۰ میلی‌متری برای مسلح کردن استفاده شده است. لازم به ذکر است میلگردهای طولی ستون به طول ۳۰۰ میلی‌متر در داخل تیر تکیه‌گاهی ادامه داده شده‌اند. در شکل ۱، جزئیات نمونه‌های بتنی نشان داده شده است.

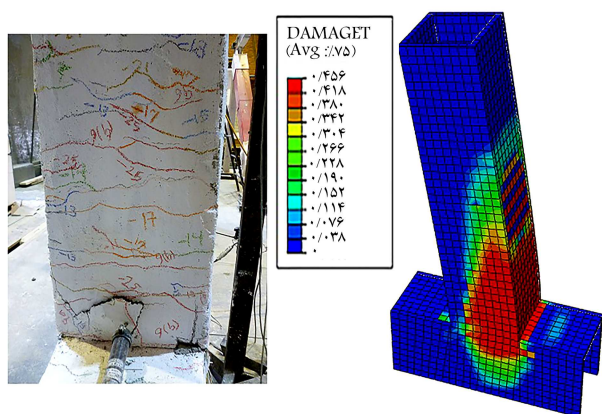
انتهای پایینی نمونه‌ها به وسیله‌ی ۴ بولت $\Phi 25$ در دو طرف تیر تکیه‌گاهی که در هنگام ساخت داخل نمونه‌ها کار گذاشته شده‌اند، به کف صلب آزمایشگاه متصل شده است. بنابراین زیر تیر به صورت اتصال گیردار عمل می‌کند. در انتهای بالایی ستون از یک جک هیدرولیکی ۱۰۰۰ کیلونیوتنی برای اعمال بار محوری و دو جک هیدرولیکی ۵۰۰ کیلونیوتنی برای اعمال بار جانبی استفاده شده است. بار محوری ۲۵۰ کیلونیوتن معادل با ۱۰٪ ظرفیت محوری ستون در مرکز ستون اعمال شده و در راستای قائم بوده (با در نظر گرفتن اثر $\Delta - p$) و با استفاده از تنظیمات ۱۳ تهیه شده در طول آزمایش همیشه به صورت قائم و در مرکز ستون باقی مانده است. از ۸ تغییر مکان سنج نیز به منظور اندازه‌گیری تغییر مکان و از ۶ استرین‌گیج به منظور اندازه‌گیری کرنش در هر نمونه در طول زمان آزمایش استفاده شده است.

الگوی بارگذاری در پژوهش حاضر براساس آیین‌نامه‌ی ۵ - ACI 374R^[۱۸] بوده است (شکل ۲). در الگوی بارگذاری اخیر، تعداد ۳۳ چرخه‌ی بارگذاری جانبی معکوس‌شونده در نظر گرفته شده و آن‌ها از دررفت ۰/۲٪ شروع و تا دررفت ۳/۵٪ ادامه یافته‌اند. نتایج حاصل از آزمایش کشش میلگردهای طولی و خاموت‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

در نمونه‌های تقویت شده از منسوج شیشه استفاده شده است که متشکل از مولتی فیلامنت‌های شیشه بوده و مقاومت مکانیکی مناسب و چسبندگی خوب با



الف) نمونه شاهد؛



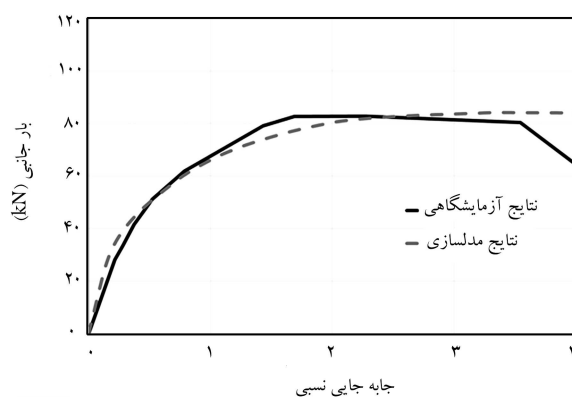
ب) نمونه تقویت شده با TRC.

شکل ۵. مقایسه‌ی الگوی ترک در آزمایش‌ها و مدل‌های شبیه‌سازی شده به وسیله‌ی نرم‌افزار المان محدود آباکوس.

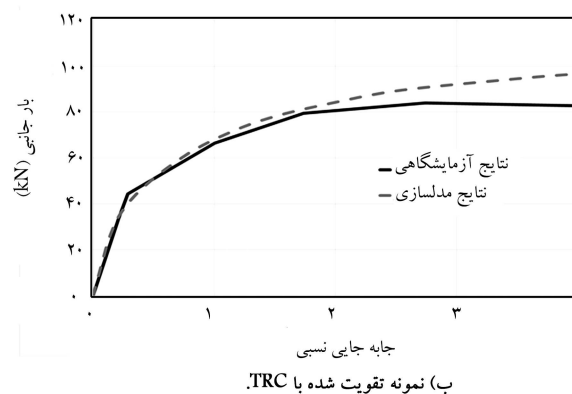
شده است. نام‌گذاری و مشخصات هر کدام از مدل‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. مدل‌های M-۱ و M-۲ به ترتیب مدل‌های ساخته‌شده براساس نمونه‌های آزمایشگاهی بدون تقویت و تقویت شده با TRC بوده و در جدول ۳ به عنوان گروه شاهد (W) دسته‌بندی شده‌اند. مدل‌های M-M^{۳۰} و M-M^{۵۰} مشابه با مدل M-۲، ولی با ملات‌های به ترتیب با مقاومت فشاری ۳۰ و ۵۰ مگاپاسکال بوده‌اند که در جدول ۳ با نام گروه A نام‌گذاری شده‌اند. همچنین مدل‌های M-WC و M-C به ترتیب مدل‌های دارای ستون‌های با مقطع دایروی به قطر ۳۵ میلی‌متر بدون تقویت و با تقویت و نیز مدل‌های M-WR و M-R به ترتیب مدل‌های با سطح مقطع مستطیل به ابعاد ۳۶۰ × ۲۵۰ میلی‌متر مربع بدون تقویت و با تقویت بوده‌اند که همگی آن‌ها در جدول با عنوان گروه B نام‌گذاری شده‌اند. مدل‌های گروه C نیز شامل مدل‌های M-۱L و M-۴L است که به ترتیب مدل‌های تقویت شده با ۱ یا ۴ لایه‌ی هم‌زمان طولی به اضافی دورپیچ بوده‌اند.

۴. نتایج و بحث

براساس نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس، این نتایج بررسی شده است:



الف) نمونه شاهد؛



ب) نمونه تقویت شده با TRC.

شکل ۴. مقایسه‌ی نتایج حاصل از آزمایش‌ها و مدل‌سازی المان محدود.

تکیه‌گاهی از تکیه‌گاه گیردار استفاده شده است. انتهای بالایی ستون‌ها نیز آزاد بوده و بار ثقلی (محوری) نیز در همان نقطه و در مرکز ستون و همانند شرایط آزمایشگاهی در راستای قائم (با در نظر گرفتن اثر $p - \Delta$) اعمال شده است. مدل‌ها در دو گام (۱). اعمال نیروی محوری، ۲. اعمال نیروی جانبی تا دریافت ۴ درصد) تحلیل شده‌اند.

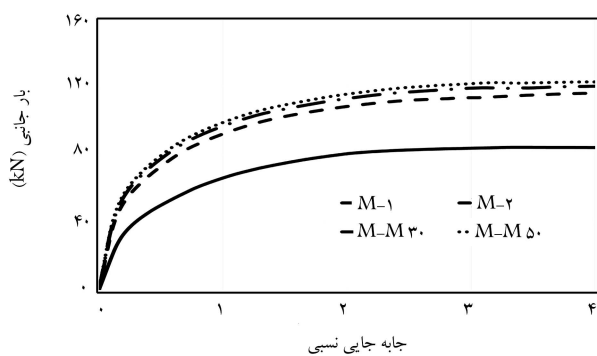
۲.۲. صحت‌سنجی مدل

در شکل ۴، منحنی مشخصه‌ی نیرو - تغییرمکان نمونه‌ها براساس نتایج حاصل از آزمایش‌ها ترسیم و با نتایج نیروی جانبی - دریافت حاصل از تحلیل مدل‌سازی المان محدود نمونه‌ها مقایسه شده است. بیشترین اختلاف نتایج حاصل از نمونه‌ی آزمایشگاهی و مدل شبیه‌سازی شده‌ی نمونه‌ی شاهد و نمونه‌ی تقویت شده با TRC تا دریافت ۳/۵، به میزان ۵۰۰ کیلوگرم بوده است.

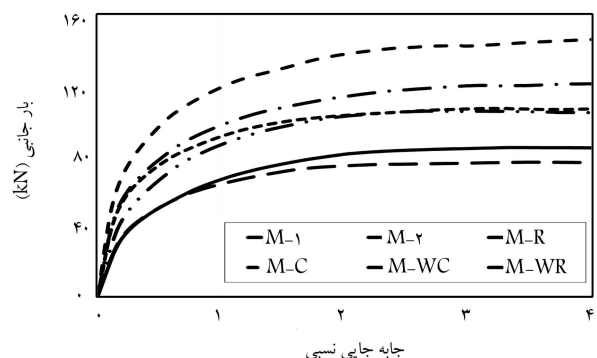
براساس نتایج حاصل از آنالیز حساسیت مش نمونه‌ی شاهد و با توجه به نزدیک بودن مدل شبیه‌سازی شده با مش با سایز ۴۰ میلی‌متر و نتایج آزمایشگاهی، سایز مش ۴۰ میلی‌متر برای تمامی مدل‌ها در نظر گرفته شده است. در شکل ۵، الگوی ترک در نمونه‌ها و مدل‌ها مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، الگوی ترک در نمونه‌ها و مدل‌های متناظر، مشابه بوده است.

۳. مدل‌سازی

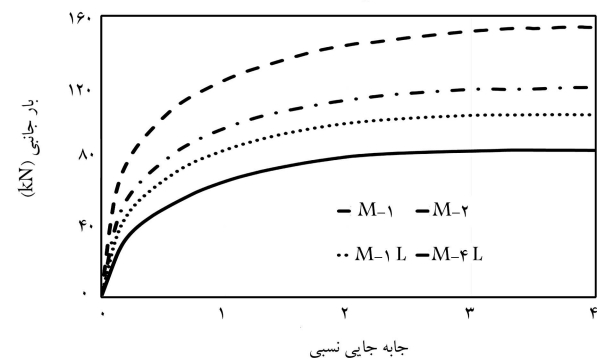
به منظور بررسی تأثیر شکل مقطع و مقاومت ملات و تعداد لایه‌های TRC در تقویت ستون‌های بتنی از ۱۰ مدل در نرم‌افزار المان محدود آباکوس استفاده



الف) مقاومت ملات (گروه A)؛



ب) شکل مقطع ستون (گروه B)؛



ج) تعداد لایه های منسوج (گروه C).

شکل ۶. نمودار پیشینه‌ی نیروی جانبی - درصد دررفت تحت تاثیر تغییر.

است. بنابراین شکل مقطع ستون تأثیر چندانی در افزایش بار جانبی در اثر TRC نداشته است. همان‌طور که در شکل ۶ ج مشاهده می‌شود، استفاده از تعداد لایه‌های مختلف منسوج همگی موجب افزایش نیروی جانبی مدل‌ها شده است. براساس نتایج، استفاده از ۱ یا ۲ یا ۴ لایه‌ی هم‌زمان طولی و دورپیچ به ترتیب موجب ۲۵، ۴۳ و ۸۷ درصد افزایش نیروی جانبی ستون در مدل‌ها شده است که نشان‌دهنده‌ی تأثیر زیاد تعداد لایه‌های منسوج در افزایش مقاومت مدل‌هاست.

۲.۴. توزیع تنش در بتن

در بخش حاضر، توزیع تنش بتن در مدل‌های مختلف در دررفت ۴٪ بررسی شده است. در شکل ۷، تنش پیشینه‌ی مدل‌های گروه‌های مختلف مشاهده می‌شود که مطابق آن، مقدار پیشینه‌ی تنش کششی منتقل شده به بتن ستون در مدل‌های تقویت شده برابر یا بیشتر از مدل تقویت نشده است، که ناشی از افزایش ظرفیت خمشی

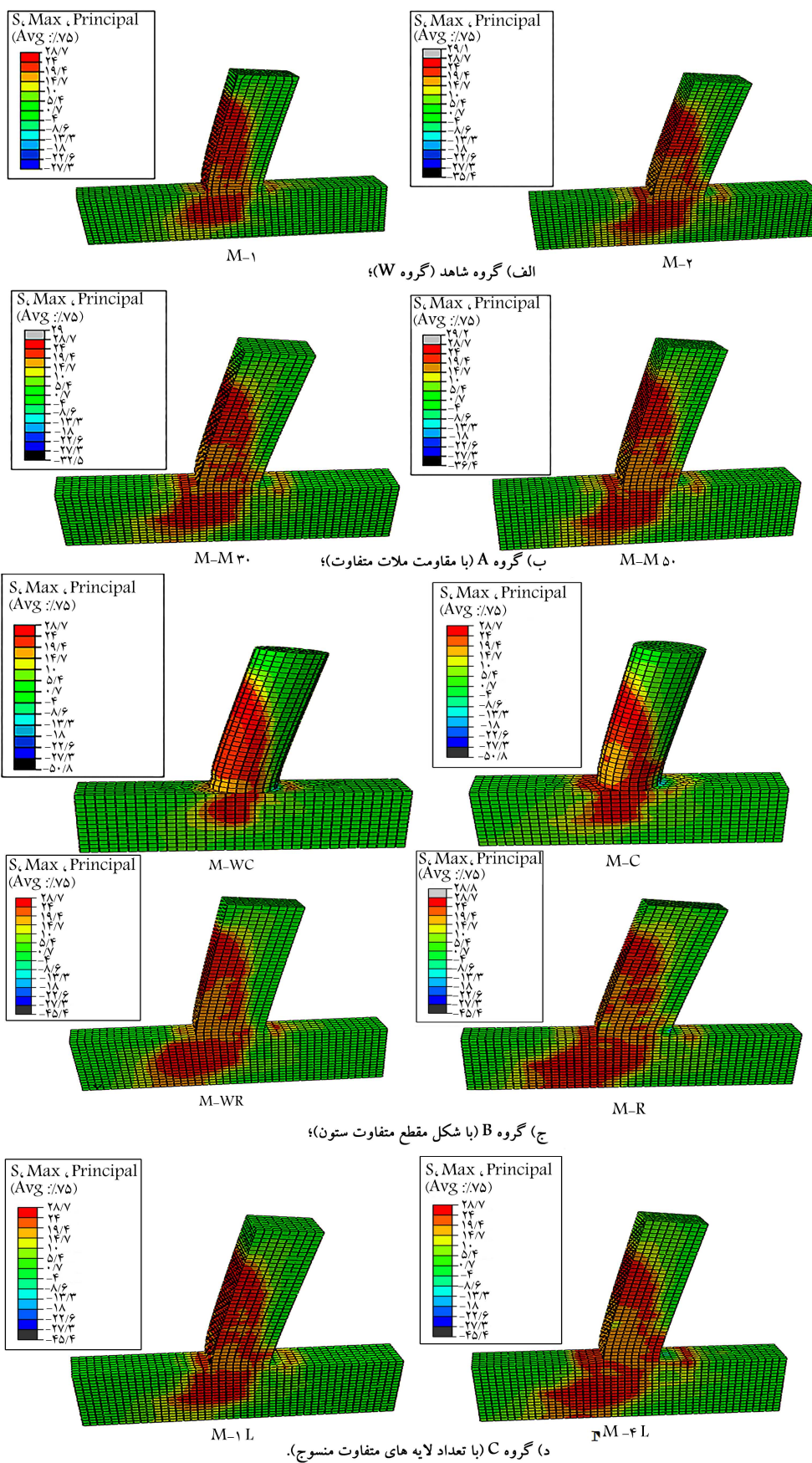
جدول ۳. نام‌گذاری مدل‌ها.

گروه	نام مدل	مقطع ستون (میلی متر)	تعداد لایه منسوج	مقاومت ملات (مگاپاسکال)
W	M-1	مربع ۳۰۰ × ۳۰۰	بدون تقویت	--
	M-2	مربع ۳۰۰ × ۳۰۰	۲ لایه طولی + ۲ لایه دورپیچ	۴۰
A	M-M30	مربع ۳۰۰ × ۳۰۰	۲ لایه طولی + ۲ لایه دورپیچ	۳۰
	M-M50	مربع ۳۰۰ × ۳۰۰	۲ لایه طولی + ۲ لایه دورپیچ	۵۰
B	M-WC	دایره به قطر ۳۵۰	بدون تقویت	--
	M-C	دایره به قطر ۳۵۰	۲ لایه طولی + ۲ لایه دورپیچ	۴۰
	M-WR	مستطیل ۲۵۰ × ۳۶۰	بدون تقویت	--
	M-R	مستطیل ۲۵۰ × ۳۶۰	۲ لایه طولی + ۲ لایه دورپیچ	۴۰
C	M-1L	مربع ۳۰۰ × ۳۰۰	۱ لایه طولی + ۱ لایه دورپیچ	۴۰
	M-4L	مربع ۳۰۰ × ۳۰۰	۴ لایه طولی + ۴ لایه دورپیچ	۴۰

۱.۴. نیروی جانبی - دررفت

در بخش کنونی، تأثیر شکل مقطع و مقاومت ملات و تعداد لایه‌های TRC در نمودار نیروی جانبی - دررفت در مدل‌ها بررسی شده است. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، مقاوم‌سازی به وسیله‌ی TRC موجب افزایش پیشینه‌ی بار جانبی در تمامی مدل‌ها شده است. بیشترین و کمترین تأثیر TRC در افزایش پیشینه‌ی بار جانبی به ترتیب در مدل‌های با ۴ و ۱ لایه‌ی منسوج و مساوی با ۸۷ و ۲۵ درصد مدل شاهد بدون مقاومت (M-1) بوده است. مطابق نمودار شکل ۶ الف، در تمامی مدل‌های گروه A استفاده از TRC موجب افزایش بار جانبی شده است، به طوری که پیشینه‌ی نیروی جانبی مدل‌های M-2، M-M30 و M-M50 نسبت به مدل M-1 به ترتیب ۳۹، ۴۳ و ۴۷ درصد افزایش یافته است. بنابراین تغییر مقاومت ملات در حدود ۲۵، تأثیر چشم‌گیری در افزایش مقاومت ستون تقویت شده با منسوج نداشته است. (حدود ۵ درصد).

مطابق شکل ۶ ب، ظرفیت مدل‌های دایروی M-WC و M-C به ترتیب کمتر از مدل مربعی بدون تقویت و با تقویت (M-2 و M-1) و ظرفیت مدل‌های مستطیلی M-WR و M-R به ترتیب بیشتر از مدل مربعی بدون تقویت و با تقویت (M-2 و M-1) بوده است. براساس نتایج، تقویت ستون مربعی، دایروی، و مستطیلی به ترتیب موجب افزایش ۴۳، ۴۰ و ۳۹ درصد ظرفیت مدل‌ها شده



شکل ۷. توزیع تنش بیشینه‌ی بتن در مدل‌های شبیه‌سازی شده به وسیله‌ی نرم‌افزار المان محدود آباکوس.

جدول ۴. درصد دریافت و نیروی جانبی اعمال شده در هنگام وقوع اولین ترک.

گروه	نام مدل	دریافت (%)	نیروی جانبی اعمال شده (kN)
W	M-۱	۰/۶۴	۵۵/۰۳
	M-۲	۰/۴۹	۷۶/۷۶
A	M-M ^{۳۰}	۰/۵۳	۷۴/۵۲
	M-M ^{۵۰}	۰/۴۹	۷۸/۸۵
B	M-WC	۰/۶۷	۵۶/۱۷
	M-C	۰/۶۳	۷۹/۵
	M-WR	۰/۵۸	۷۰/۱۶
	M-R	۰/۳۹	۸۷/۳۷
C	M-۱L	۰/۵۲	۶۷/۴۱
	M-۴L	۰/۴۶	۱۰۱/۰۵

جدول ۳ نیز دریافت و نیروی جانبی شروع ترک در بتن ستون برای مدل‌های مختلف ارائه شده است. مطابق شکل ۹، مد شکست در تمامی مدل‌ها به صورت کششی و خرابی در پای ستون و محل اتصال ستون و تیر تکیه‌گاهی بوده است. علاوه بر این، در تمامی نمونه‌های تقویت شده، شدت خرابی در دریافت ۴٪ بیشتر بوده است که در آن‌ها حتی تا کناره‌های ستون نیز ادامه یافته است. شروع ترک در مدل‌های تقویت شده نسبت به مدل‌های متناظر تقویت نشده‌ی آن‌ها در دریافت‌های پایین‌تر و تحت نیروی جانبی بیشتر رخ داده است. همچنین براساس مقایسه‌ی نتایج مدل‌ها، شروع ترک در مدل‌های با مقطع دایروی در بالاترین دریافت نسبت به سایر مدل‌ها رخ داده و بیشترین نیروی جانبی شروع ترک مربوط به مدل تقویت شده با ۴ لایه‌ی منسوج بوده است. براساس جدول ۴، در گروه W، درصد دریافت مربوط به شروع ترک در بتن ستون در نمونه‌ی تقویت شده (M-۲) نسبت به نمونه‌ی تقویت نشده (M-۱) حدود ۲۵٪ کاهش یافته و همچنین نیروی جانبی مرتبط در حدود ۴۰٪ افزایش داشته است.

براساس شکل ۹ ب، در گروه A مشاهده می‌شود که مدل‌های تقویت شده با ملات با مقاومت ۵۰ مگاپاسکال نسبت به مدل تقویت شده با ملات با مقاومت ۳۰ مگاپاسکال دچار خرابی بیشتری در دریافت مذکور شده است که می‌تواند به دلیل نیروی جانبی وارده‌ی بیشتر بر ستون مدل M-M^{۵۰} در دریافت اخیر باشد. لازم به ذکر است که شروع اولین ترک‌های کششی در مدل‌های M-M^{۳۰} و M-M^{۵۰} و به ترتیب در دریافت‌های ۵۳/۰ و ۴۹/۰ درصد و تحت بار محوری ۷۴/۵۲ و ۷۸/۸۵ در پای ستون رخ داده است.

مطابق شکل ۹ ج، خرابی در مدل‌های تقویت شده در دریافت ۴٪ بیشتر از خرابی مدل‌های تقویت نشده در همان دریافت است. همچنین مطابق شکل ذکر شده مشاهده می‌شود که شدت خرابی در مدل‌های با ستون دایروی در مقایسه با مدل‌های با ستون مستطیلی کمتر بوده است. اولین ترک‌ها در مدل‌های M-WC، M-C، M-WR و M-R به ترتیب در دریافت‌های ۶۷/۰، ۶۳/۰، ۵۸/۰ و ۳۹/۰ درصد و تحت نیروهای جانبی ۵۶/۱۷، ۷۹/۵، ۷۰/۱۶ و ۸۷/۳۷ کیلونیوتن شکل گرفته‌اند. کاهش دریافت شروع تشکیل ترک در مدل‌های با ستون‌های دایروی تقویت شده نسبت به مدل تقویت نشده، ۶٪ بوده است، اما این مقدار در ستون‌های

در مدل‌های تقویت شده در دریافت مذکور است. در شکل ۷ الف، توزیع تنش در گروه شاهد مشاهده می‌شود تا با مقایسه‌ی مدل‌های گروه شاهد با سایر گروه‌ها، تأثیر تغییرات ایجاد شده در مدل‌ها قابل بررسی باشد.

براساس مقایسه‌ی نتایج نشان داده شده از گروه A با گروه W در شکل‌های ۷ الف و ب، با افزایش مقاومت ملات از ۴۰ به ۵۰ مگاپاسکال در مدل M-۵۰، تغییر چندانی در نحوه‌ی توزیع تنش به وجود آمده در بتن مشاهده نمی‌شود. اما با کاهش مقاومت ملات از ۴۰ به ۳۰ مگاپاسکال در مدل M-۳۰، بیشینه‌ی تنش ایجاد شده در بتن ستون حدود ۹٪ کاهش یافته است که می‌تواند به دلیل عدم انتقال مناسب نیرو از طریق ملات ضعیف‌تر به بتن ستون رخ داده باشد. با توجه به شکل‌های ۷ الف و ج، توزیع تنش ایجاد شده بر روی سطح بتن در مدل‌های با مقطع مستطیلی (M-WR و M-R) با وجود تغییر در شکل مقطع ستون نسبت به توزیع تنش مدل‌های گروه شاهد گروه (W) تفاوت چندانی نداشته است که می‌تواند به دلیل گوشه‌دار بودن هر دو مقطع باشد. اما توزیع تنش در مدل‌های با مقطع دایروی (M-C و M-WC) با تمرکز تنش کمتری مخصوصاً در روی ستون همراه بوده است، که این امر به دلیل بدون گوشه بودن مقطع و توزیع مناسب‌تر تنش در این مقطع است. مطابق شکل ۷ ج، نیز نحوه‌ی توزیع تنش در مدل‌های گروه C مشابه مدل‌های شاهد بوده است، که دلیل آن، وجود شکل مقطع یکسان گروه C با مدل‌های شاهد است.

۳.۴. توزیع تنش ملات

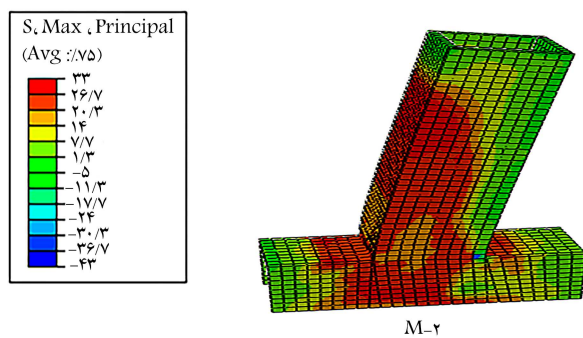
در شکل ۸، توزیع تنش ملات در مدل‌های مختلف در دریافت ۴ مشاهده می‌شود. در شکل ۸ الف، توزیع تنش در ملات در مدل شاهد مشاهده می‌شود، که مطابق انتظار، تمرکز تنش در گوشه‌های مقطع مستطیلی و در پای ستون بوده است. با مقایسه‌ی شکل‌های ۸ الف و ب، مشاهده می‌شود که با تغییر ۲۵ درصدی مقاومت ملات، بیشینه‌ی تنش در ملات، تغییر چشم‌گیری نداشته است. همچنین نحوه‌ی توزیع تنش در مدل‌های گروه A نیز به نسبت مدل شاهد تقریباً ثابت مانده و تغییر چندانی نداشته و تمرکز تنش‌ها در گروه A نیز در پای ستون و در گوشه‌های مقطع مشاهده شده است که با توجه به گوشه‌دار بودن ستون‌های آن قابل پیش‌بینی بوده است.

با توجه به مقایسه‌ی شکل ۸ ج با شکل توزیع تنش مدل شاهد مشاهده می‌شود که توزیع تنش مدل با مقطع مستطیلی (M-R)، تغییر چندانی نسبت به نمونه‌ی شاهد (M-۲) نداشته و مانند مدل شاهد در پای ستون و در گوشه‌ها تمرکز تنش ایجاد شده است. اما در مدل با سطح مقطع دایروی (M-C)، توزیع تنش مناسب‌تر بوده و تمرکز تنش در روی ستون مشاهده نشده و تمرکز تنش در پای ستون و محل اتصال ستون و تیر مشاهده شده است.

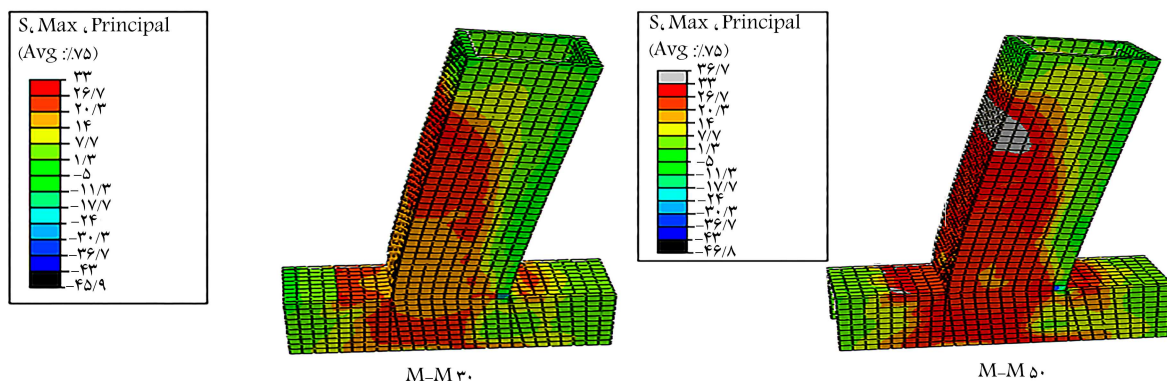
در شکل ۸ د و مقایسه‌ی آن با شکل ۸ الف مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد لایه‌های منسوج، توزیع تنش در پای ستون بهتر از نمونه با تعداد لایه‌های کمتر منسوج است، که می‌تواند به دلیل افزایش مقاومت خود ستون در نمونه‌های با تقویت بیشتر باشد که در نهایت موجب شکست بیشتر در ناحیه‌ی اتصال شده است. اما با این حال به دلیل مشابه بودن شکل مقطع ستون، همچنان نحوه‌ی توزیع تنش مشابه مدل شاهد بوده است. در هر دو مدل تقویت شده‌ی گروه C، تغییر چندانی در بیشینه‌ی تنش کششی مشاهده نمی‌شود که می‌تواند به دلیل وجود منسوج کافی به منظور باربری باشد.

۴.۴. الگوی ترک و مدهای شکست

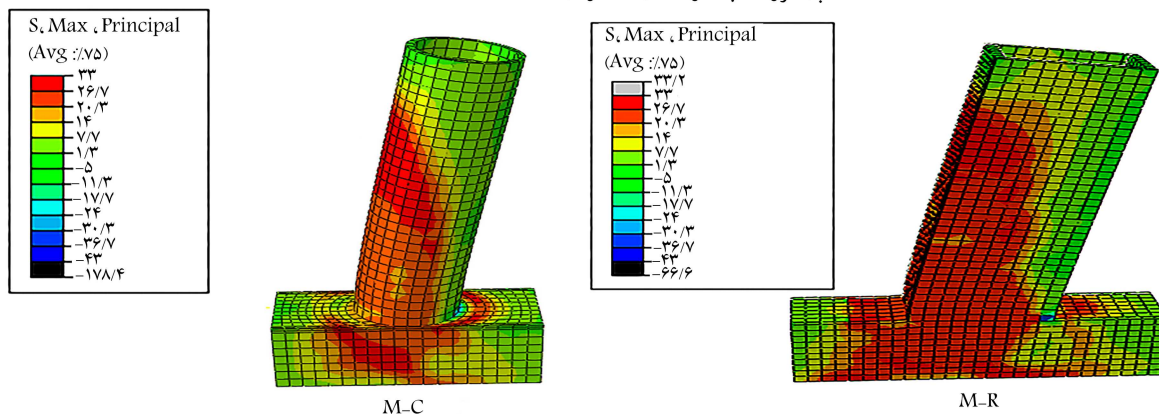
الگوی ترک مدل‌های مختلف در دریافت ۴٪ در شکل ۹ مشاهده می‌شود. در



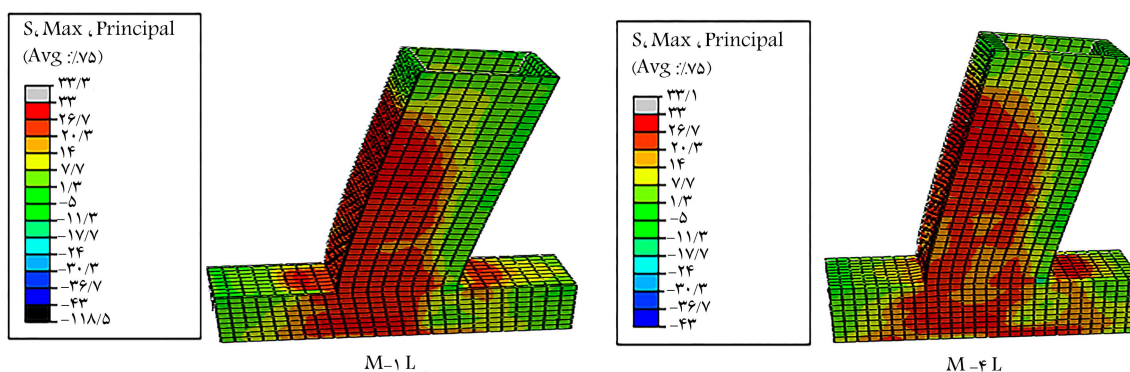
الف) گروه شاهد (گروه W)



ب) گروه A (با مقاومت ملات متفاوت)

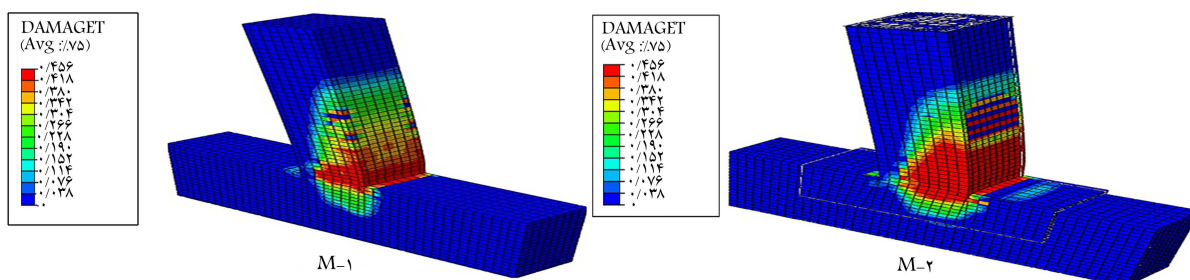


ج) گروه B (با شکل مقطع متفاوت ستون)

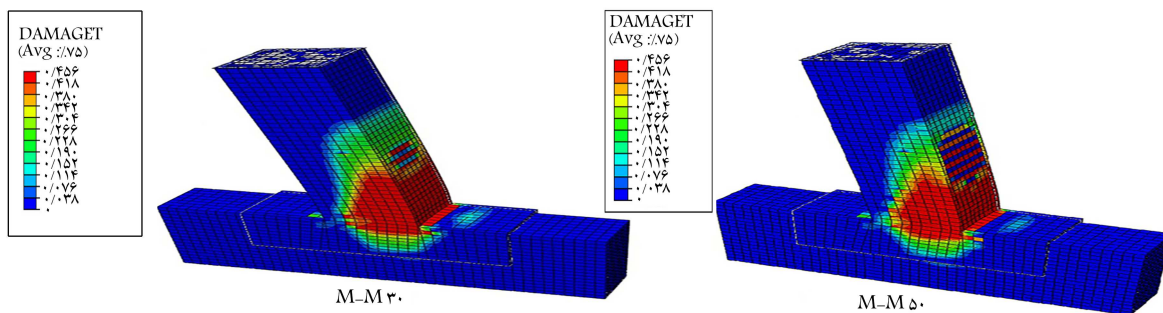


د) گروه C (با تعداد لایه های متفاوت منسوج)

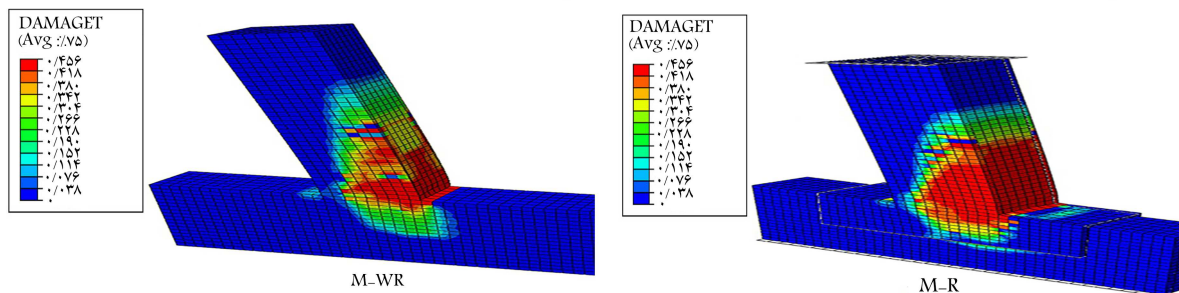
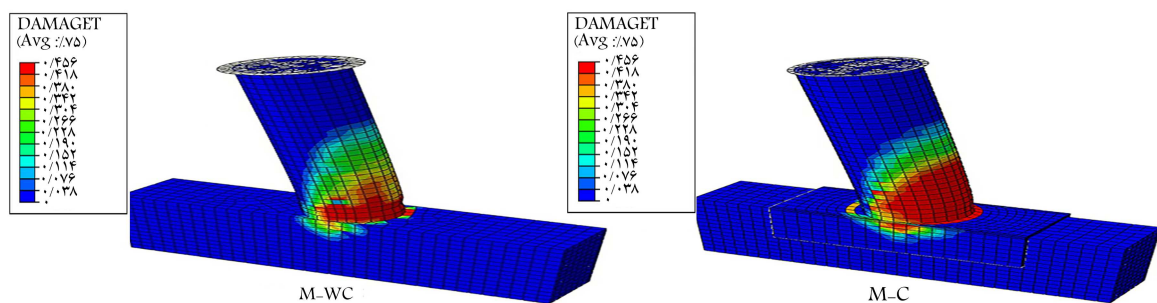
شکل ۸. توزیع تنش ملات در مدل های شبیه سازی شده به وسیله نرم افزار المان محدود آباکوس.



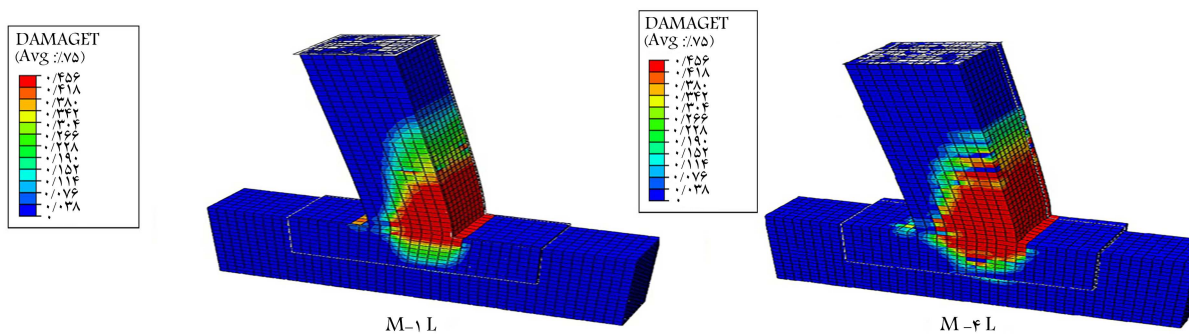
الف) گروه شاهد (گروه W)؛



ب) گروه A (با مقاومت ملات متفاوت)؛



ج) گروه B (با شکل مقطع متفاوت ستون)؛



د) گروه C (با تعداد لایه های متفاوت منسوج)؛

شکل ۹. الگوی ترک بتن در مدل های شبیه سازی شده به وسیله نرم افزار المان محدود آباکوس.

جدول ۵. درصد دریافت و نیروی جانبی اعمال شده در هنگام وقوع شروع تسلیم میلگردهای ستون.

گروه	نام مدل	دریافت (%)	نیروی جانبی اعمال شده (kN)
W	M-۱	۰/۷۷	۶۰/۰۰
	M-۲	۰/۶۱	۸۳/۰۶
A	M-M۳۰	۰/۷۱	۸۳/۰۲
	M-M۵۰	۰/۶۱	۸۵/۱۸
B	M-WC	۰/۷	۵۷/۱۱
	M-C	۰/۶۲	۷۹/۵۵
	M-WR	۰/۷۸	۷۷/۵۱
	M-R	۰/۵۸	۱۰۱/۱۲
C	M-۱L	۰/۶۶	۷۳/۷۱
	M-۴L	۰/۵۵	۱۰۶/۱۳

با مقطع مستطیلی حدود ۲۵، ۳۳٪ بوده است. همچنین نیروی جانبی منجر به شروع اولین ترک در مدل‌های تقویت شده با مقطع دایروی و مربعی و مستطیلی به ترتیب ۴۱، ۴۰ و ۲۴ درصد مدل تقویت نشده بوده است که این امر تأثیر چشم‌گیر استفاده از TRC در بالابردن نیروی جانبی لازم جهت شروع ترک مخصوصاً در ستون‌های دایروی و مربعی را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، خرابی در مدل با تعداد لایه‌های بیشتر منسوج در دریافت ۴٪، شدت بیشتری نسبت به مدل با تعداد لایه‌های کمتر منسوج در این گروه داشته است. شروع ترک‌های کششی در مدل‌های M-۱L و M-۴L به ترتیب در دریافت‌های ۵۲٪ و ۴۶٪ و تحت بار جانبی ۶۷/۴۱ و ۱۰۱/۰۵ رخ داده است. نتایج به‌دست آمده، افزایش ۲۲ و ۸۳ درصدی نیروی جانبی در شروع ترک را نسبت به مدل شاهد تقویت نشده (M-۱) نشان می‌دهد.

۵.۴. تسلیم میلگرد

در جدول ۵، دریافت و نیروی جانبی برای شروع تسلیم میلگردهای ستون ارائه شده است. براساس نتایج به‌دست آمده، تسلیم میلگردها در مدل‌های تقویت شده در دریافت‌های پایین‌تری شروع شده است که می‌تواند به دلیل نیروی جانبی بیشتر وارده بر ستون‌های تقویت شده در همان دریافت باشد. شروع تسلیم میلگرد در تمامی مدل‌ها در میلگردهای ستون و در نزدیکی محل اتصال تیر تکیه‌گاهی و ستون و روی ستون رخ داده است. پایین‌ترین دریافت مربوط به شروع تسلیم میلگردها در مدل تقویت شده با ۴ لایه منسوج (M-۴L) و برابر با ۵۵٪ بوده است. همچنین بالاترین دریافت شروع تسلیم میلگردها مربوط به مدل‌های تقویت نشده‌ی شاهد (M-۱) و مدل تقویت نشده با مقطع مستطیلی (M-WR) و برابر با ۷۸٪ بوده است. بیشترین نیروی جانبی اعمال شده برای شروع تسلیم میلگردهای ستون نیز مربوط به ستون تقویت شده با ۴ لایه منسوج بوده است که این مقدار ۷۷٪ بیشتر از نمونه‌ی شاهد بدون تقویت است. وضعیت تسلیم میلگردهای مدل‌های گروه W در دریافت ۴٪ در شکل ۹الف مشاهده می‌شود.

تسلیم میلگردها در مدل‌های M-۱ و M-۲ به ترتیب در دریافت‌های ۷۷٪ و ۶۱٪ و تحت نیروی جانبی ۶۰/۰۰ و ۸۳/۰۶ کیلونیوتن شروع شده است. بنابراین تقویت مدل‌ها با منسوج موجب پایین آمدن دریافت تسلیم به میزان ۲۱٪ و افزایش ۳۸٪ نیروی جانبی در هنگام تسلیم میلگرد ستون در گروه W شده است. در گروه A، تسلیم میلگردها در مدل‌های M-۳۰ و M-۵۰ به ترتیب در دریافت‌های ۷۱٪ و ۶۱٪ و تحت نیروی جانبی ۸۳/۰۲ و ۸۵/۱۸ کیلونیوتن شروع شده است که نشان‌دهنده‌ی کاهش ۱۵ درصدی دریافت و افزایش حدود ۲ درصدی نیروی جانبی شروع تسلیم در مدل‌های تقویت شده با ملات با مقاومت بیشتر است. بنابراین مقاومت ملات تأثیر چندانی در نیروی جانبی شروع تسلیم میلگردها ندارد.

در گروه C، میلگردهای ستون در مدل‌های M-WC، M-C، M-WR و M-R به ترتیب در دریافت‌های ۷٪، ۶۲٪، ۷۸٪ و ۵۸٪ تحت بار جانبی ۵۷/۱۱، ۷۹/۵۵، ۷۷/۵۱ و ۱۰۱/۱۲ کیلونیوتن شروع به تسلیم کرده‌اند. بنابراین در مدل‌های با مقطع دایروی، مربعی و مستطیلی، تقویت ستون‌ها موجب کاهش ۲۱، ۲۲ و ۲۶ درصد دریافت تسلیم و افزایش ۳۹، ۳۸ و ۳۰ درصدی نیروی جانبی در هنگام شروع تسلیم میلگردها شده است. دریافت شروع تسلیم میلگردها در گروه C با افزایش تعداد لایه‌های منسوج کاهش یافته است. تسلیم میلگرد در مدل‌های M-۱L و M-۴L به ترتیب در دریافت‌های ۶۶٪ و ۵۵٪ و تحت بار جانبی ۷۳/۷۱ و ۱۰۶/۱۳ کیلونیوتن شروع شده است. بنابر نتایج به‌دست آمده، افزودن یک لایه با ۴ لایه منسوج به ترتیب موجب کاهش ۱۵ و ۲۹ درصد دریافت و افزایش ۲۳ و ۷۷ درصد در نیروی جانبی ستون‌ها در شروع تسلیم میلگردها نسبت به مدل M-۱ شده است.

۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، تأثیر شکل سطح مقطع ستون و مقاومت ملات و تعداد لایه‌های منسوج در عملکرد TRC به منظور تقویت ستون بتنی مسلح بررسی شده است. برای این منظور از مدل‌های صحت‌سنجی شده با نمونه‌های آزمایشگاهی استفاده شده است. ۱۰ مدل در ۴ گروه برای انجام بررسی‌های لازم توسط نرم‌افزار المان محدود آباکوس شبیه‌سازی شده‌اند. گروه W به عنوان گروه شاهد (نمونه‌ی تقویت شده و نمونه‌ی تقویت نشده‌ی شاهد)، گروه A (مدل‌های با ملات‌های با مقاومت ۳۰ و ۵۰ مگاپاسکال)، گروه B (مدل‌های با و بدون تقویت با مقطع دایروی و مستطیلی) و گروه C (مدل‌های تقویت شده با ۱ و ۴ لایه منسوج). نتایج مدل‌ها در قالب نمودار نیرو - تغییرمکان، توزیع تنش در بتن و ملات، الگوی ترک و تسلیم میلگردها ارزیابی شده‌اند. مهم‌ترین نتایج حاصل از پژوهش حاضر عبارت‌اند از :

۱. تقویت ستون‌ها به وسیله‌ی TRC در تمامی موارد موجب افزایش ظرفیت باربری جانبی نمونه‌ها شده است که مؤثرترین عامل در افزایش ظرفیت باربری تعداد لایه‌های منسوج بوده است.
۲. مهم‌ترین عامل در توزیع مناسب و منظم تنش در بتن و ملات، شکل مقطع ستون بوده است که الگوی تنش در ستون‌های دایروی منظم‌تر از سایر انواع بوده و تمرکز تنش کمتری در مدل‌های مذکور مشاهده شده است.
۳. براساس نتایج به‌دست آمده، مؤثرترین عامل در بالا بردن مقدار نیروی جانبی در لحظه‌ی شروع ترک، تعداد لایه‌های منسوج بوده است که در مدل تقویت شده

۴. پایین ترین دررفت و همچنین بیشترین نیروی جانبی اعمال شده برای شروع تسلیم میلگردها مربوط به مدل تقویت شده با ۴ لایه ی منسوج بوده و مقاومت ملات، کمترین تأثیر را در تغییر دررفت و نیروی جانبی در هنگام شروع تسلیم میلگردهای ستون داشته است.

با ۴ لایه ی منسوج، نیروی جانبی مذکور حدود ۸۳ نسبت به مدل شاهد بدون تقویت افزایش یافته است. اما مقاومت ملات تأثیر چندانی در آن نداشته است. همچنین در مدل های با ستون دایروی و مربعی نسبت به مدل با شکل مقطع مستطیلی، نیروی جانبی اخیر افزایش بیشتری داشته است.

پانوشتها

1. textile reinforced concrete (TRC)
2. fiber reinforced cementitious matrix (FRCM)
3. textile reinforced mortar (TRM)
4. fiber reinforced polymer (FRP)
5. p-Phenylene Benzobis Oxazole (PBO)
6. Colajanni
7. Trapko
8. energy of destruction
9. Ombres
10. Verre
11. Faleschini
12. Li
13. set-up

منابع (References)

1. Tetta, Z.C. and Bournas, D.A. "TRM vs FRP jacketing in shear strengthening of concrete members subjected to high temperatures", *Composites Part B: Engineering*, **106**, pp. 190-205 (2016).
2. Raoof, S.M. and Bournas, D.A. "Bond between TRM versus FRP composites and concrete at high temperatures", *Composites Part B: Engineering*, **127**, pp. 150-165 (2017).
3. Raoof, S.M. and Bournas, D.A. "TRM versus FRP in flexural strengthening of RC beams: Behavior at high temperatures", *Construction and Building Materials*, **154**, pp. 424-437 (2017).
4. Donnini, J. and Corinaldesi, V. "Mechanical characterization of different FRCM systems for structural reinforcement", *Construction and Building Materials*, **145**, pp. 565-575 (2017).
5. Mazzotti, C., Ferracuti, B. and Bellini, A. "Experimental bond tests on masonry panels strengthened by FRP", *Composites Part B: Engineering*, **80**, pp. 223-237 (2015).
6. Shabdin, M., Zargar, M. and Attari, N.K.A. "Experimental diagonal tension (shear) test of Un-reinforced masonry (URM) walls strengthened with textile reinforced mortar (TRM)", *Construction and Building Materials*, **164**, pp. 704-715 (2018).
7. Shabdin, M., Zargar, M. and Attari, N.K.A. "New formulation for predicting diagonal tension capacity of masonry brick walls strengthened with textile reinforced mortar (TRM)", *Materials and Struction*, **54**(2), pp. 1-18 (2021).
8. Zargar, M., Attari, N.K.A., Alizadeh, S. and et al. "Minimum reinforcement ratio in TRC panels for deflection hardening flexural performance", *Construction and Building Materials*, **137**, pp. 459-469 (2017).
9. Trapko, T. "Effect of eccentric compression loading on the strains of FRCM confined concrete columns", *Construction and Building Materials*, **61**, pp. 97-105 (2014).
10. Ombres, L. and Verre, S. "Structural behavior of fabric reinforced cementitious matrix (FRCM) strengthened concrete columns under eccentric loading", *Composites Part B: Engineering*, **75**, pp. 235-249 (2015).
11. Colajanni, P., De Domenico, F., Recupero, A. and et al. "Concrete columns confined with fiber reinforced cementitious mortars: Experimentation and modelling", *Construction and Building Materials*, **52**, pp. 375-384 (2014).
12. Colajanni, P., Fossetti, M. and Macaluso, G. "Effects of confinement level, cross-section shape and corner radius on the cyclic behavior of CFRM confined concrete columns", *Construction and Building Materials*, **55**, pp. 379-389 (2014).
13. Faleschini, F., Angelo, M., Hofer, L. and et al. "Experimental behavior of reinforced concrete columns confined with carbon-FRCM composites", *Construction and Building Materials*, **243**, pp. 118296 (2020).
14. Faleschini, F., Angelo, M., Hofer, L. and et al. "Confinement of reinforced concrete columns with glass fiber reinforced cementitious matrix jackets", *Eng. Struct.*, **218**, pp. 110847 (2020).
15. Li, Y., Yin, S., Dai, J. and et al. "Numerical investigation on the influences of different factors on the seismic performance of TRC - strengthened RC columns", *J. Build. Eng.*, **30**, pp. 101245 (2020).
16. ABAQUS version 6.14-3 [computer software], (n.d.).
17. Azadvar, N., Zargar, M., Rahimzadeh Rofooei, F. and et al. "Experimental comparison of cyclic behavior of RC column strengthened with TRC and FRP", *Bulletin of Earthquake Engineering*, **19**, pp. 2941-2970 (2021).
18. ACI 374.1, "Acceptance criteria for moment frames based on structural testing and commentary", ACI 374: 1-5 (2005).
19. ASTM C39/ C39M-20, "Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens", ASTM International, West Conshohocken, PA (2020).
20. ASTM C109/C109M-20b, "Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens)", ASTM International, West Conshohocken, PA (2020).