

## ارزیابی عملکرد ورق‌های پلیمر فیبر کربنی CFRP در مقاوم‌سازی اتصال دال-ستون بتنی مسلح RC

زانا کهنه پوشی

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد مهاباد، دانشگاه آزاد اسلامی، مهاباد، ایران.

هادی عزیزان \*

گروه مهندسی عمران، واحد مهاباد، دانشگاه آزاد اسلامی، مهاباد، ایران.

امید حداد

گروه مهندسی عمران، واحد مهاباد، دانشگاه آزاد اسلامی، مهاباد، ایران.

جمیل قادری

گروه مهندسی عمران، واحد مهاباد، دانشگاه آزاد اسلامی، مهاباد، ایران.

### چکیده

در دال‌های بتنی تخت به دلیل عدم وجود تیرهای نگهدارنده، تنش‌های برشی سه بعدی در اطراف ناحیه اتصال دال-ستون ایجاد می‌گردد که منجر به ترک برشی شعاعی و در نهایت شکست پانچ در ناحیه اتصال ستون به دال می‌شود. در این مقاله به هدف ارزیابی مقاوم‌سازی اتصال ستون به دال بتنی تخت مسلح با بهره‌گیری از ورق‌های CFRP تحت شرایط بارگذاری برش پانچ و بارگذاری لرزه‌ای مطالعات پارامتریکی به روش عددی انجام شده‌است. بر این اساس با در نظر گرفتن ۵ متغیر: شرایط بارگذاری، تعداد لایه‌های فیبر در ورق، زاویه قرارگیری الیاف، ضخامت ورق و ابعاد ورق‌های CFRP، مطالعات در بستر نرم‌افزار المان محدود آباکوس و در قالب ۳۳ مدل مجزا انجام شده‌است. صحت‌سنجی مدل عددی بر اساس مدل‌سازی نمونه آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که میانگین خطای مدل‌سازی عددی ۰,۲٪ نسبت به نمونه آزمایشگاهی بوده که نشان دهنده دقت قابل قبول مدل عددی می‌باشد. نتایج نشان داد که دو پارامتر ضخامت و ابعاد ورق به‌عنوان اصلترین پارامتر در مقاوم‌سازی اتصال دال-ستون RC بوده، به گونه‌ای که با در نظر گرفتن مقادیر بهینه هر یک از دو پارامتر میزان آسیب در دال بتنی حدوداً تا ۹۸٪ کاهش می‌یابد. نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند به عنوان یک مدل جامع برای طراحی و به کارگیری ورق‌های CFRP در مقاوم‌سازی اتصال ستون-دال بتنی تخت مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: دال بتنی، دال-ستون RC، مقاوم‌سازی، پلیمر فیبر کربنی، CFRP، برش پانچ، بارگذاری لرزه‌ای.

\* نویسنده مسئول: Hadi.azizian@iau.ac.ir

## ۱- مقدمه

در چند دهه گذشته مطالعات عددی و آزمایشگاهی بر عملکرد اتصال دال به ستون و مقاوم سازی اتصال با بهره گیری از متریال CFRP انجام شده است [۳-۱۰ و ۱۶]. به تازگی، تقویت سازه های بتن مسلح (RC) با ورق های CFRP، به ویژه برای دال های RC در شرایط وجود بازشو/ نبود بازشو تحت بارهای خمشی، مورد ارزیابی قرار گرفته است.

آنیل و همکاران در مطالعات آزمایشگاهی [۷]، سیزده نمونه آزمایشگاهی برای ارزیابی رفتار خمشی دال های RC یک طرفه تقویت شده با CFRP را مورد مطالعه قرار داد. نتایج نشان داد که تقویت با نوارهای CFRP به طور قابل توجهی ظرفیت تحمل بار و مقاومت تسلیم دال را افزایش می دهد. افزایش ظرفیت باربری و سختی تسلیم برای نمونه های تقویت شده به ترتیب ۱،۳۲ و ۱،۱۴ برابر نمونه های تقویت نشده بوده است.

سلمان و همکاران در سال ۲۰۱۵ مطالعاتی آزمایشگاهی بر هفت دال RC یک طرفه که با ورق های CFRP با ابعاد مختلف تقویت شده و تحت بارهای خمشی قرار گرفته را مورد ارزیابی قرار داد [۸]. نتایج نشان داد که دال های تقویت شده افزایش قابل توجهی در ظرفیت باربری نهایی داشته است (از ۵٪ تا ۴۶٪). آل کانون و علی در سال ۲۰۱۶ پژوهشی در قالب مطالعات آزمایشگاهی برای ارزیابی کارایی تکنیک های مختلف تقویت CFRP دال های RC یک طرفه انجام دادند [۹]. نتایج نشان داد که ورق CFRP موثرترین رویکرد تقویت دال در برابر شکست خمشی است که در آن ظرفیت تحمل بار و سختی دال تقویت شده به طور قابل توجهی افزایش یافته است، همچنین نتایج نشان داد که در مقایسه با دال های معمولی، بهبود ظرفیت باربری ۶۷ درصد بوده در حالی که کاهش جابه جایی ۲۱ درصد بوده است.

مون و همکاران در سال ۲۰۱۷ در مطالعات آزمایشگاهی به ارزیابی عملکرد ورق های CFRP در مقاوم سازی اتصالات دال به ستون پرداختند، نتایج نشان داد که تقویت دال بتنی مسلح با ورق های CFRP ظرفیت باربری نهایی و سختی دال RC را به ترتیب ۷۰ و ۶۰ درصد افزایش می دهد [۱۰].

مشیری و همکاران در سال ۲۰۲۰ یک تکنیک جدید برای تقویت دال های یک طرفه RC توسط ورق های CFRP بر روی شیارها برای به تاخیر انداختن جداسازی اولیه کامپوزیت های CFRP ارائه داد [۱۱]. نتایج بیانگر بهبود قابل توجه عملکرد خمشی برای

دال های بتنی تحت مسلح از متداول ترین سیستم های سازه ای برای ایجاد کف و سقف طبقات بوده است. این اعضای سازه ای به دلیل حذف تیرهای نگهدارنده برای ساخت سازه های سریع و اقتصادی به شدت مورد توجه طراحان و مجریان سازه می باشد. اتصالات دال و ستون به علت تمرکز بالای تنش های برشی و لنگرهای خمشی بحرانی ترین بخش دال محسوب می گردد. مقاومت نهایی صفحات تحت عمدتاً توسط بار شکست برش سوراخ کننده تعیین می گردد که به وضوح کمتر از بار شکست خمشی است [۱ و ۲]. برش پانچ یا برش دو طرفه بیانگر سطح شکست هر می شکل یا مخروطی شکل بوده است. لنگرهای حداکثر در صفحات دال با بارگذاری یکنواخت در اطراف ستون رخ داده که سبب ایجاد ترک دایروی در اطراف آن می گردد. با افزایش بارگذاری ترک ها به شکل یک خط مستقیم پروانه ای گسترش یافته و تقریباً در همان زمان ترک های برشی یا مایل روی سطح شکست ایجاد می شود. این نوع شکست در دال های بتنی بسیار خطرناک بوده است و باید از آن جلوگیری شود، همچنین این نوع شکست می تواند منجر به واژگونی ناگهانی، ترد و پیش رونده در سقف سازه های بتنی شود [۳]. یکی از اصلی ترین راهکارهای مدنظر به جهت مقاوم سازی اعضای مختلف سازه، استفاده از متریال کامپوزیت جهت مقاوم سازی و بهبود رفتار سازه در برابر بارگذاری های مختلف بوده است. در بین این روش ها و در طی دو دهه اخیر، مقاوم سازی با FRP یا کامپوزیت های پلیمری مسلح شده با الیاف در بین جامعه مهندسی عمران بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. کامپوزیت های پلیمری مسلح شده با الیاف (FRP) از فیبرهای پیوسته از جنس الیاف کربن (CFRP)، الیاف شیشه (GFRP) و یا الیاف آرامید (AFRP) که در داخل ماتریسی از جنس اپوکسی، وینیلستر یا پلی استر به یکدیگر متصل شده، تشکیل شده است [۴]. استفاده از کامپوزیت FRP به عنوان اصلیتترین راهکار جهت مقاصد بهسازی، مقاوم سازی و بهبود رفتار لرزه ای سازه مطرح بوده است. با توجه به قدمت اندک به کارگیری کامپوزیت (FRP) در صنعت ساختمان و همچنین نیاز به استفاده بهینه و کارآمدتر از این متریال جهت بهبود رفتار و پاسخ های سازه ای، ضرورت انجام مطالعات گسترده در این راستا مشخص بوده است.

گرفتند. نتایج نشان داد که CFRP ظرفیت بارگذاری نهایی دال‌های تقویت‌شده را حدود (۸ تا ۱۲ درصد) بهبود می‌بخشد، همچنین ظرفیت اتلاف انرژی برای همه نمونه‌های تقویت‌شده افزایش چشم‌گیری یافته‌است. نتایج نشان داد که مقاوم‌سازی اتصال دال-ستون بتنی با ورق‌های CFRP موجب کاهش جابه‌جایی (۴٪-۲۰٪) اتصال تحت بارگذاری لرزه‌ای شده‌است.

خلیل و همکاران در مطالعات آزمایشگاهی خود به ارزیابی رفتار اتصال دال-ستون بتنی مقاوم‌سازی شده با FRP پرداخت. نتایج نشان داد که ظرفیت برش پانچ دال‌های تقویت‌شده با FRP تا ۴۸ درصد افزایش یافته‌است [۱۹].

هودا و همکاران در سال ۲۰۲۲ در پژوهشی آزمایشگاهی به ارزیابی تاثیر موقعیت قرارگیری و فاصله کارگذاری بین ورق‌های CFRP در راستای مقاوم‌سازی دال بتنی پرداخت. نتایج بیانگر معیارهایی برای موقعیت کارگذاری ورق‌های CFRP در راستای دستیابی به حداکثر ظرفیت مقاوم‌سازی دال بتنی بود [۲۰].

مرکیمک و همکاران در سال ۲۰۲۲ به ارزیابی آزمایشگاهی روش‌های مختلف مقاوم‌سازی در راستای افزایش مقاومت پانچ دال‌های مسطح بتنی پرداخت، نتایج نشان داد که بهره‌گیری از پلیمرهای الیاف فیبری FRP بهترین عملکرد را از نقطه نظر مقاوم‌سازی دال بتنی و افزایش مقاومت برش پانچ نسبت به روش‌های مقاوم‌سازی دیگر داشته‌است [۲۱].

دات و هیو در سال ۲۰۲۳ به ارزیابی آزمایشگاهی تاثیر ورق‌های CFRP بر رفتار برشی پانچ اتصالات دال-ستون پرداخت، نتایج نشان داد که استفاده از ورق‌های CFRP به طور قابل توجهی عملکرد اتصالات دال-ستون را بهبود می‌بخشد. دال تقویت‌شده نسبت به نمونه شاهد ۱۶٫۳ درصد افزایش ظرفیت پانچ را نشان داد. علاوه بر این، روشی محاسباتی برای تعیین مقاومت برشی پانچ نمونه‌های آزمایش با در نظر گرفتن تعامل بین ظرفیت‌های برشی و خمشی در یک دال مسطح دو طرفه انجام شد [۲۲].

قایب و همکاران در سال ۲۰۲۳ در مطالعات خود به بررسی آزمایشگاهی تاثیر استفاده از روش مقاوم‌سازی CFRP در دال‌های RC دو طرفه پرداخت، نتایج آزمایشات نشان داد که نمونه‌های تقویت‌شده با CFRP از نظر تأخیر در ظهور ترک در دال، بهبود مقاومت در برابر انتشار ترک برشی و افزایش ظرفیت بار-جابه‌جایی عملکرد بهتری از خود نشان دادند. همچنین حالت

دال‌های تقویت‌شده با تکنیک جدید بوده، به گونه‌ای که مقاومت خمشی دال تا ۳۴ درصد افزایش یافته‌است. در پژوهشی دیگر امان و همکاران در مطالعات خود ۱۰ نمونه دال RC دو طرفه با بازشدگی و سیستم تقویت شده با ورق‌های CFRP را مورد ارزیابی قرار داد. در این پژوهش هدف اصلی رفتار خمشی دال در شرایط به کارگیری ورق‌های CFRP بود، نتایج نشان داد که دال دارای دهانه‌های تقویت شده با سه لایه CFRP دارای ظرفیت تحمل بار شدید به همراه کمترین میزان جابه‌جایی بوده‌است [۱۲].

عزیزیان و همکاران در سال ۲۰۲۱ در مطالعاتی بر ارزیابی مقاومت برشی پانچ و مکانیزم شکست دال تحت بار متمرکز اعمال شده در مرکز دال پرداختند، نتایج حاصل از این پژوهش منجر به ارائه معادله نظری دقیق برای تخمین ظرفیت برشی پانچ گردید [۱۳].

در راستای ارزیابی عملکرد اتصالات دال به ستون مقاوم‌سازی شده با ورق‌های CFRP تحت بارهای چرخه‌ای (بارگذاری لرزه‌ای) مطالعاتی بر پارامترهای شکل‌پذیری و مقاومت خمشی دال‌های تقویت‌شده انجام شده‌است [۱۶-۱۴].

لیو و همکاران در سال ۲۰۲۱ در آزمایشاتی به ارزیابی تاثیر نوع بتن در عملکرد لرزه‌ای اتصالات دال به ستون بتنی پرداختند. در این مطالعات دو اتصال داخلی ستون-دال در مقیاس کامل، با دونوع مترال: ۱. بتن پیش ساخته و ۲. بتن درجا، تحت بارگذاری دوره‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت [۱۷]. نتایج نشان داد که اتصال پیش ساخته تقریباً ۶۰٪ جابه‌جایی بیشتری نسبت به اتصال با مترال بتن درجا داشته‌است. کابی و همکاران در مطالعاتی آزمایشگاهی به ارزیابی یک تکنیک جدید مقاوم‌سازی لرزه‌ای با استفاده از سیستم مفصل فولادی برای اتصالات سه بعدی تیر-ستون-دال بتن مسلح تحت بارگذاری چرخه‌ای پرداختند [۱۸]. در این پژوهش علاوه بر یک نمونه کنترلی بدون مقاوم‌سازی، سه نمونه دیگر با استفاده از CFRP، تسمه فولادی و صفحات جانبی پیچ‌دار (BSP) در طرفین تیر تقویت شدند. نتایج نشان داد که برای استفاده کامل از ظرفیت مواد، مفصل فولادی ممکن است با موفقیت با BSP و CFRP در تقویت اتصالات تیر-ستون-دال RC ادغام شود.

آل مندوح و همکاران در سال ۲۰۲۲ در مطالعاتی به بررسی تجربی و عددی رفتار لرزه‌ای اتصالات دال-ستون HSSCC با بازشو تقویت شده با CFRP پرداخت [۵]. در این پژوهش شش نمونه در مقیاس کامل تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد بررسی قرار

روش انجام پژوهش در فلوجارت شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱ - روش انجام پژوهش

## ۲-۱- مشخصات مدل آزمایشگاهی مینا

در این پژوهش مدل‌سازی‌های گسترده‌ای تعریف و در بستر نرم‌افزار المان محدود آباکوس پیاده‌سازی شده است. به جهت کالیبراسیون مدل‌های عددی و اعتبارسنجی عملکرد مدل‌ها نیاز است تا مدل‌های عددی بر اساس مدل آزمایشگاهی ایجاد و مراحل صحت‌سنجی-اعتبارسنجی عملکرد مدل‌های عددی نسبت به مدل آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گیرد. بر این اساس مدل عددی دال-ستون بتنی مسلح بر اساس مدل آزمایشگاهی تعریف و پیاده‌سازی شده است [۲۶].

در این مدل آزمایشگاهی دال بتنی تخت مسلحی به ابعاد  $1000 \times 1000 \text{ mm}$  و با ضخامت  $100 \text{ mm}$  و ستون بتنی با ابعاد  $100 \times 100 \text{ mm}$  و به ارتفاع  $300 \text{ mm}$  پیاده‌سازی گردیده است، در شکل ۱ شماتیک مدل به همراه ستاپ آزمایشگاهی نمایش داده شده است. در مدل آزمایشگاهی برای مسلح سازی بتن از آرماتورهای  $8 \text{ mm}$ ،  $12$  برای ستون و آرماتورهای فشاری و کششی  $8$  میلیمتر برای دال استفاده شده است. در شکل ۲ و ۳ مشخصات ستاپ مدل آزمایشگاهی و سیستم آرماتورگذاری دال نمایش داده شده است.

شکست نمونه‌های تقویت شده با CFRP بهبود یافته و ظرفیت برش پانچ افزایش یافته است [۲۳].

تورر و همکاران در پژوهشی به ارزیابی آزمایشگاهی و عددی تاثیر بازشوها پیرامون اتصال دال به ستون و مقاوم‌سازی اتصال با ورق‌های CFRP پرداخت، نتایج نشان داد که نوارهای CFRP ظرفیت باربری و برش پانچ اتصالات دال به ستون بتنی در شرایط وجود بازشو را به طور متوسط ۵۰ درصد افزایش می‌دهد [۲۴]. فرید و خان در سال ۲۰۲۳ در مطالعاتی به ارزیابی آزمایشگاهی تیرهای بتنی و دال‌های بتنی مقاوم‌سازی شده با CFRP پرداخت، نتایج بیانگر افزایش قابل توجه ظرفیت باربری تیرهای مقاوم‌سازی شده با روکش CFRP و همچنین افزایش ظرفیت برش پانچ دال‌های بتنی مقاوم‌سازی شده با ورق‌های CFRP بود [۲۵].

با ارزیابی مطالعات صورت گرفته بر عملکرد اتصال دال-ستون RC مشخص می‌گردد که بهره‌گیری از متریال CFRP به عنوان یک راه‌کار تایید شده در راستای ارتقای رفتار این اتصالات بوده و باعث افزایش ظرفیت باربری و سختی دال بتنی در مواجهه با برش پانچ بوده است. همچنین مشخص می‌گردد که بررسی متغیرهای موثر و طراحی کارآمد سیستم‌های مقاوم‌سازی در این اتصالات به عنوان یکی از چالش‌های پیش‌روی طراحان بوده است.

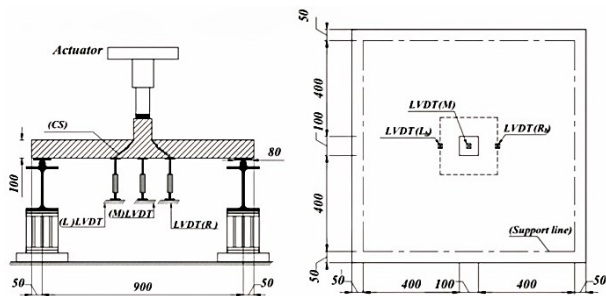
در این پژوهش به هدف ارزیابی عملکرد اتصالات دال-ستون بتنی مسلح RC که با بهره‌گیری از ورق‌های CFRP مقاوم‌سازی شده‌اند، مطالعات پارامتریک جامعی به صورت عددی تعریف و در بستر نرم‌افزار المان محدود آباکوس پیاده‌سازی شده است. پس از صحت‌سنجی و اعتبارسنجی مدل عددی بر اساس مدل آزمایشگاهی مینا، عملکرد اتصال دال-ستون مقاوم‌سازی شده تحت دو شرایط بارگذاری برش پانچ و چرخه‌ای (بارگذاری لرزه‌ای) مورد بررسی قرار گرفته و حساسیت‌سنجی (مطالعات پارامتریک) نسبت به تأثیر پارامترهای موثر ورق CFRP بر ظرفیت برش پانچ و رفتار لرزه‌ای اتصال دال-ستون انجام شده است.

## ۲- مواد و روش انجام تحقیق

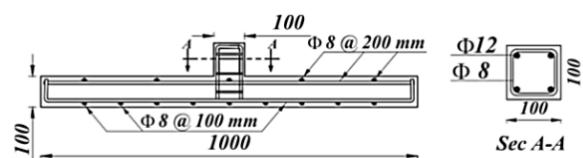
در راستای دستیابی به اهداف تحقیق با ارزیابی پارامترهای موثر ورق CFRP در بهبود ظرفیت پانچ و مقاوم‌سازی لرزه‌ای اتصال دال-ستون بتنی، سناریوهای مدل‌سازی عددی تدوین شده است.

تعریف مشخصات و خصوصیات متریال پارت‌های (میلگردهای فولادی- بتن- ورق‌های CFRP) بوده‌است.

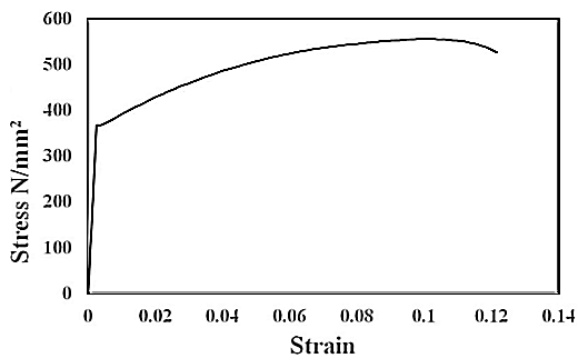
با توجه به داده‌های ارائه شده از مدل آزمایشگاهی، خصوصیات فولاد در نرم‌افزار آباکوس معرفی شده است، بر این اساس مدول الاستیسیته:  $E = 200.000 \text{ N/mm}^2$ ، ضریب پواسون:  $\nu = 0.3$  به عنوان خصوصیات الاستیسیته متریال فولاد در نظر گرفته شده‌است. به جهت تعریف رفتار پلاستیک متریال فولاد با بهره‌گیری از منحنی تنش- کرنش متریال مدنظر این ویژگی تعریف می‌گردد (شکل ۴). خصوصیات و رفتار بتن بر اساس ویژگی اصلی رفتار الاستیک و رفتار پلاستیک (که عمدتاً تمرکز بر آسیب‌های کششی و فشاری بتن داشته است) تعریف شده است، بر این اساس خصوصیات رفتار الاستیک بتن شامل: مدول الاستیک:  $E = 21.200 \text{ N/mm}^2$  و ضریب پواسون:  $\nu = 0.2$  بوده‌است.



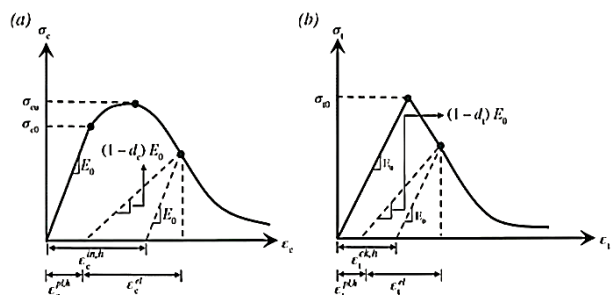
شکل ۲- ستاپ آزمایشگاهی و ابعاد مدل دال-ستون [26]



شکل ۳- مشخصات هندسی و چیدمان سیستم آرماتور در دال و ستون مدل آزمایشگاهی [26]



شکل ۴- منحنی تنش- کرنش فولاد مدنظر در مدل‌سازی عددی [26]



شکل ۵- منحنی رفتار بتن (تنش-کرنش) تحت شرایط (a)

فشاری، (b) کششی [26]

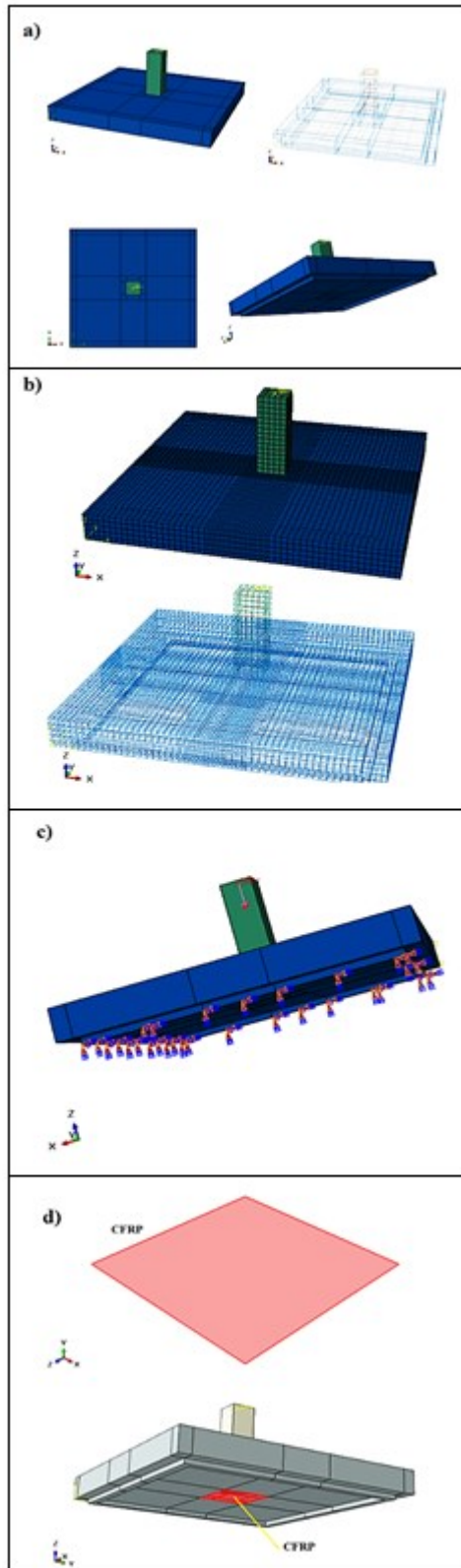
به جهت تعریف خصوصیات و رفتار پلاستیک بتن تحت شرایط بارگذاری از مدل‌های عددی مختلفی استفاده می‌گردد، عمدتاً برای تعریف رفتار پلاستیک بتن با انجام آزمایش‌های مختلف نمونه بتن تحت فشار و تحت کشش نمودارهای رفتار (کششی، فشاری)

شکل ۳- مشخصات هندسی و چیدمان سیستم آرماتور در دال و ستون مدل آزمایشگاهی [26]

در مدل آزمایشگاهی متریال بتن شامل سیمان پرتلند معمولی، ماسه سیلیسی طبیعی (به عنوان سنگدانه ریز)، سنگ آهک خرد شده حداکثر ۱۰ میلی متر (به عنوان سنگدانه درشت) و آب برای عمل‌آوری نمونه‌های دال-ستون استفاده شده‌است. نسبت مخلوط (سیمان: سنگدانه ریز: سنگدانه درشت) بر حسب وزن ۱،۲:۳،۱۸ با نسبت آب به سیمان ۰،۴۳ بوده‌است. میانگین مقاومت فشاری بتن و مقاومت کششی (بر اساس دوازده نمونه استوانه‌ای ۱۵۰ میلی متر × ۳۰۰ میلی متر) به ترتیب حدود  $32 \text{ N/mm}^2$  و  $2.7 \text{ N/mm}^2$  بوده‌است. متریال میلگردهای بکارگیری شده در دال و ستون از نوع فولادی با مدول الاستیسیته  $200 \text{ N/mm}^2$  و مقاومت تسلیم  $365 \text{ N/mm}^2$  و مقاومت نهایی  $545 \text{ N/mm}^2$  بوده‌اند، علاوه بر این دارای سطح مقطع اسمی معادل با  $199 \text{ mm}^2$  می‌باشند.

## ۲-۲- مشخصات مدل‌های عددی

به جهت پیاده‌سازی و انجام مطالعات پژوهش، مدل عددی بر اساس خصوصیات، ابعاد و جزئیات مدل آزمایشگاهی، ایجاد شده‌است. در مدل عددی ایجاد شده یکی از مهمترین مراحل مدل‌سازی،



شکل ۶ - مشخصات مدل عددی، (a) شماتیک مدل عددی دال - ستون، (b) مش بندی مدل المان محدود، (c) شرایط مرزی و بار گذاری، (d) ورق های CFRP در مدل عددی

بتن استخراج میگردد. بر این اساس نمودارهای رفتار تحت فشار و کشش بتن ارائه و پارامترهای اصلی برای تعرف رفتار پلاستیک (آسیب پلاستیک) در بتن به نرم افزار وارد میگردد. (نمودارهای رفتار تحت فشار و کشش بتن به صورت پارامتریک در شکل ۵ نمایش داده شده است).

با توجه به توضیحات ارائه شده برای معرفی رفتار پلاستیک بتن نیاز به تعریف پنج دسته از داده های متریک بتن شامل: ۱- پارامترهای آسیب پلاستیک بتن - Concrete Damaged Plasticity، ۲- رفتار فشاری بتن - Compressive Behavior، ۳- آسیب فشاری بتن - Concrete Compression Damage، ۴- رفتار کششی بتن - Tensile Behavior، ۵- آسیب کششی بتن - Concrete Tension Damage در نرم افزار آباکوس بوده ایم. در جدول ۱ مشخصات و مقادیر پارامترهای آسیب پلاستیک بتن در مدل عددی به عنوان نمونه نمایش داده شده است.

جدول ۱- پارامترهای آسیب پلاستیک بتن در مدل عددی

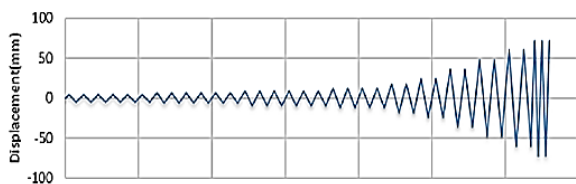
Dilation Angle	Eccentricity	fb0/fc0	K	Viscosity Parameter
38	0.1	1.16	0.67	0.0009

به جهت مدل سازی عددی ورق های پلیمر فایبر کربنی CFRP در مدل های عددی نیاز است تا مشخصات و ویژگی های این متریک به درستی در مدل تعریف و پیاده سازی گردد. در مدل عددی، ورق های CFRP از نوع پارت Shell در مدل تعریف شده است. برای تعریف خصوصیات الاستیک ورق های CFRP با بهره گیری از تایپ Lamina و همچنین برای تعریف خصوصیات آسیب در متریک ورق های CFRP از مدل Hashine Damage در فرایند مدل سازی عددی استفاده شده است. علاوه بر موارد مذکور در مدل سازی عددی خصوصیات گسترش آسیب در ورق های CFRP به عنوان یکی دیگر از پارامترهای اصلی در تعریف خصوصیات رفتار ورق های CFRP بوده است. در نهایت برای تعریف لایه های مختلف و خصوصیات ورق های CFRP همچون ضخامت، زاویه قرار گیری الیاف در هر لایه و... از خصوصیات متریک کامپوزیت در مدل سازی عددی بر بستر نرم افزار آباکوس استفاده شده است.

عددی به همراه جزییات هر سناریو ارائه شده‌است.

جدول ۲- متغیرهای مطالعات عددی پژوهش

شرایط بارگذاری	ضخامت ورق‌های CFRP	ابعاد ورق‌های CFRP	تعداد لایه‌ها و زاویه قرارگیری الیاف در ورق CFRP
$S$ : بارگذاری پانچ	نوع اول $T1$ : ضخامت $1\text{ mm}$	نوع اول $A1$ : $200 * 200\text{ mm}$	نوع اول $L1$ : یک لایه و زاویه قرارگیری الیاف صفر درجه
$D$ : بارگذاری لرزه‌ای	نوع دوم $T2$ : ضخامت $2\text{ mm}$	نوع دوم $A2$ : $100 * 100\text{ mm}$	نوع دوم $L2$ : یک لایه و زاویه قرارگیری الیاف نود درجه
	نوع سوم $T3$ : ضخامت $3\text{ mm}$	نوع سوم $A3$ : $400 * 400\text{ mm}$	نوع سوم $L3$ : ۴ لایه و زاویه قرارگیری الیاف به ترتیب $0, 45, 90, 0$
			نوع چهارم $L4$ : ۴ لایه و زاویه قرارگیری الیاف به ترتیب $45, 90, 0, 45$
			نوع پنجم $L5$ : ۴ لایه و زاویه قرارگیری الیاف به ترتیب $90, 0, 45, 90$



شکل ۷- پروتکل بارگذاری لرزه‌ای SAC [27]

### ۳- نتایج و بحث

در این بخش نتایج حاصل از انجام مطالعات به همراه بحث و بررسی پیرامون خروجی‌های مدل‌سازی عددی ارائه شده‌است. براین اساس ابتدا نتایج حاصل از صحت‌سنجی مدل عددی براساس مدل آزمایشگاهی ارائه و در بخش دوم نتایج حاصل از مطالعات پارامتریک بر عملکرد اتصال دال-ستون مقاوم‌سازی شده با ورق‌های CFRP مورد بحث قرار گرفته‌است.

با توجه به شرایط مطالعات عددی که بهره‌گیری از روش حل عددی المان محدود در نرم‌افزار آباکوس می‌باشد، نیاز است تا ابعاد المان‌ها جهت پیاده‌سازی مش بندی تعریف گردد، در این مدل‌سازی طول مشخص هر المان  $20\text{ mm}$  در نظر گرفته شده است، همچنین برای پارت‌های جامد همچون دال و ستون از المان ۸ گره Hex با مشخصه C3D8R و برای المان‌های میلگرد از المان T3D2 استفاده شده‌است. در مدل ایجاد شده شرایط مرزی و بارگذاری بر اساس مقید سازی کف دال و اعمال نیرو بر روی ستون به صورت قائم بوده‌است. در شکل ۶ نمایی از مدل عددی ایجاد شده، مش بندی، بارگذاری، شرایط مرزی و اتصال ورق CFRP نمایش داده شده‌است.

### ۳-۲- سناریوهای مدل‌سازی عددی

در این پژوهش مطالعات پارامتریک جهت ارزیابی تأثیر ورق‌های CFRP بر اساس چهار متغیر اصلی: ۱- شرایط بارگذاری، ۲- ضخامت ورق‌های CFRP، ۳- ابعاد ورق‌های CFRP، ۴- تعداد لایه‌ها و زاویه قرارگیری الیاف در لایه‌های ورق CFRP تعریف شده‌است. براین اساس سناریوهای مدل‌سازی عددی با در نظر گرفتن متغیرهای پژوهش تعریف و مطالعات پارامتریک در راستای ارزیابی تأثیر ورق‌های CFRP در مقاوم‌سازی اتصال دال-ستون در بستر نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده‌است. در جدول ۲ متغیرهای اصلی به همراه پارامترها و شرایط مدل‌سازی برای هر یک از متغیرها ارائه شده‌است. با توجه به سناریوهای مدل‌سازی عددی مشخص گردید که اتصال دال به ستون تحت دو شرایط بارگذاری استاتیکی و بارگذاری چرخه‌ای (لرزه‌ای) انجام شده‌است. در این پژوهش به جهت اعمال بارگذاری لرزه‌ای از پروتکل بارگذاری ارائه شده ATC-SAC که در حقیقت جایگزین زلزله‌های واقعی بوده، به کارگیری شده‌است. این پروتکل مربوط به زلزله‌های دور از گسل بوده که نیرو از طریق جابه‌جایی در انتهای ستون اعمال می‌شود، همچنین این تاریخچه بارگذاری شامل تغییر شکل‌های سیکلی گام به گام افزایش یافته‌است. پروتکل بارگذاری دوره‌ای SAC در شکل ۷ نمایش داده شده‌است. با توجه به متغیرهای اصلی مدل‌سازی عددی جمعاً ۳۳ مدل عددی (M1 تا M33) برای ارزیابی تأثیر پارامترهای ورق‌های CFRP در مقاوم‌سازی اتصال دال-ستون تعریف و در بستر نرم‌افزار آباکوس پیاده‌سازی شده‌است. در جدول ۳ سناریوهای مدل‌سازی

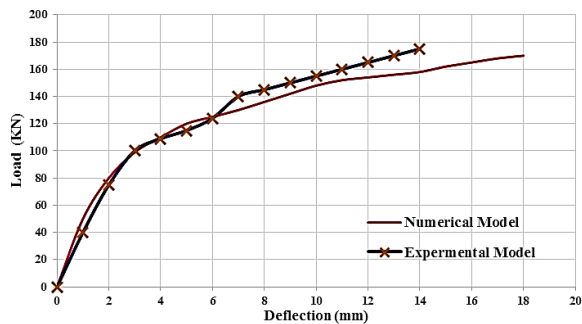
۱-۳- صحت‌سنجی مدل عددی

تست آزمایشگاهی ارائه گردیده و مقایسه‌ای بین نتایج مدل به جهت ارزیابی عملکرد مدل عددی و اعتبارسنجی- عددی و مدل آزمایشگاهی به جهت اعتبارسنجی مدل انجام صحت‌سنجی مدل‌سازی، در این بخش نتایج حاصل از مدل‌سازی شده‌است.

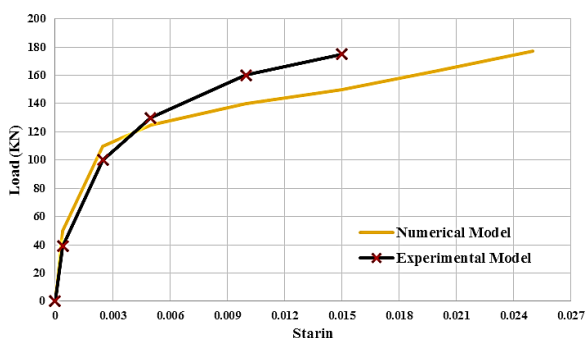
جدول ۳- سناریوهای مدل‌سازی عددی (مطالعات پارامتریک)

ردیف	نام مدل	ضخامت ورق CFRP			ابعاد ورق CFRP			تعداد و زاویه لایه‌های فیبر در ورق CFRP					شرایط بارگذاری	
		T1	T2	T3	A1	A2	A3	L1	L2	L3	L4	L5		S
1	ST1A1L1	*			*			*						
2	ST1A1L2	*			*			*						
3	ST1A1L3	*			*			*						
4	ST1A1L4	*			*			*				*		
5	ST1A1L5	*			*			*				*		
6	ST2A1L3	*			*			*				*		
7	ST2A1L4	*			*			*				*		
8	ST2A1L5	*			*			*				*		
9	ST3A1L3	*			*			*				*		
10	ST3A1L4	*			*			*				*		
11	ST3A1L5	*			*			*				*		
12	ST1A2L3	*			*			*				*		
13	ST1A2L4	*			*			*				*		
14	ST1A2L5	*			*			*				*		
15	ST2A2L3	*			*			*				*		
16	ST2A2L4	*			*			*				*		
17	ST2A2L5	*			*			*				*		
18	ST3A2L3	*			*			*				*		
19	ST3A2L4	*			*			*				*		
20	ST3A2L5	*			*			*				*		
21	ST1A3L3	*			*			*				*		
22	ST1A3L4	*			*			*				*		
23	ST1A3L5	*			*			*				*		
24	ST2A3L3	*			*			*				*		
25	ST2A3L4	*			*			*				*		
26	ST2A3L5	*			*			*				*		
27	ST3A3L3	*			*			*				*		
28	ST3A3L4	*			*			*				*		
29	ST3A3L5	*			*			*				*		
30	DT2A3L3	*			*			*				*		
31	DT2A3L4	*			*			*				*		
32	DT2A3L5	*			*			*				*		
	D33													*





شکل ۹- صحت‌سنجی مدل عددی (میزان انحنای دال (جابه جایی) بر اساس پیشرفت بارگذاری)



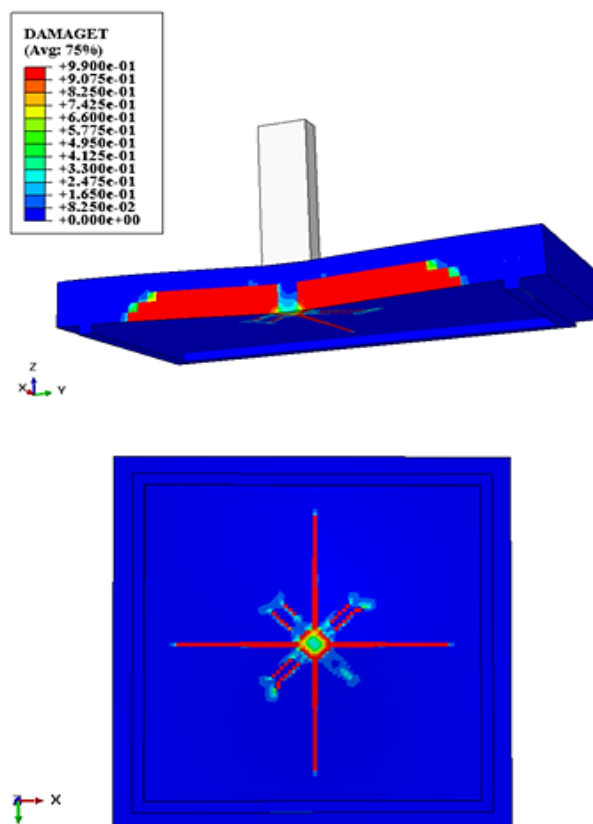
شکل ۱۰- صحت‌سنجی مدل عددی (میزان کرنش در میلگرد دال بر اساس پیشرفت بارگذاری)

از مقایسه نتایج حاصل از مدل عددی با نتایج تست آزمایشگاهی مشخص می‌گردد که مدل عددی دقت قابل قبولی برای مدل‌سازی انجام شده دارا بوده‌است. علاوه بر این مقایسه‌ای بین پارامترهای ایجاد آسیب (رخداد ترک) در مدل عددی با نتایج تست آزمایشگاهی انجام شده است (جدول ۴). پارامترهای اصلی که مورد بررسی قرار گرفته است عبارت است از: ۱- نیروی بحرانی شروع ترک در مدل (آسیب در دال):  $P_{cr}$  (KN) - ۲- جابه جایی (طول رخداد ترک):  $\Delta_{cr}$  (mm) - ۳- نیروی نهایی ترک در مدل (آسیب در دال):  $P_U$  (KN) - ۴- جابه جایی نهایی بر اساس نیروی نهایی رخداد ترک:  $\Delta_U$  (mm).

جدول ۴- نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی اتصال دال-ستون

$\Delta_U$ (mm)	$P_U$ (KN)	$\Delta_{cr}$ (mm)	$P_{cr}$ (KN)	پارامتر / مدل
12.48	177	0.74	44	مدل آزمایشگاهی
11.9	171	0.68	42	مدل عددی پژوهش
4.65 %	3.38 %	8.1 %	4.5 %	میزان خطا
5.2 %				میانگین خطا

مدل آزمایشگاهی (همودا، ۲۰۱۹) بر اساس کلیه جزئیات و ستاپ آزمایشگاهی، در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی و نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی شامل: ۱- میزان جابه‌جایی در دال و ستون تحت شرایط بارگذاری، ۲- توزیع تنش در دال، ۳- ارزیابی آسیب‌پذیری دال مورد بررسی قرار گرفته‌است. در شکل ۸ ارزیابی بر میزان آسیب‌پذیری دال بتنی تحت شرایط مدل‌سازی نمونه آزمایشگاهی ارائه و نتایج حاصل برای بررسی عملکرد مدل عددی مورد نقد و بررسی قرار گرفته‌است. به جهت ارزیابی عملکرد مدل عددی مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از تست آزمایشگاهی با نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. بر این اساس دو پارامتر میزان انحنا در مدل بر اساس بارگذاری انجام شده و همچنین میزان کرنش‌های ایجاد شده در میلگردهای دال بر اساس میزان بارگذاری مورد مقایسه قرار گرفته‌است. در نمودارهای شکل ۹ میزان انحنا مدل-بارگذاری و در نمودارهای شکل ۱۰ میزان کرنش در میلگردهای فشاری دال بر اساس بارگذاری در تست آزمایشگاهی-مدل عددی نمایش داده شده‌است.



شکل ۸- نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی تست آزمایشگاهی - ارزیابی آسیب‌پذیری دال بتنی مسلح

### ۲-۳- مطالعات پارامتریک

ستون را کاهش داده و رفتار آنها را تحت شرایط بارگذاری مختلف بهبود بخشید (برش پانچ و کاهش ترک‌های شعاعی)، علاوه بر این مشخص گردید که مقاوم سازی دال بتنی مسلح با ورق‌های CFRP که دارای تک لایه با زوایای صفر و نود درجه بوده اند، هر کدام در راستای زاویه الیاف در لایه عملکرد مناسبی در برابر شرایط بارگذاری و کاهش آسیب بر دال رفتار نموده اند، بنابراین در مطالعات پارامتریک صورت گرفته ورق‌های CFRP دارای ۴ لایه و با ترکیبی از زوایای (۰، ۴۵، ۹۰) برای الیاف‌های لایه‌های مختلف ورق‌های CFRP در نظر گرفته شده است. بنابراین در این پژوهش با انجام مدل‌سازی‌های گسترده، مطالعات پارامتریک جامعی بر اساس متغیرهای اصلی و تاثیرگذار ورق‌های CFRP صورت گرفته است. در ادامه نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی ارائه شده است، به جهت تعداد بالای مدل‌های عددی (حجم بالای نتایج حاصل از مدل‌سازی) و در راستای ارزیابی عملکرد ورق‌های CFRP، پارامتر میزان خسارت در مدل‌های مختلف به عنوان معیار اصلی ارائه نتایج مدنظر بوده است.

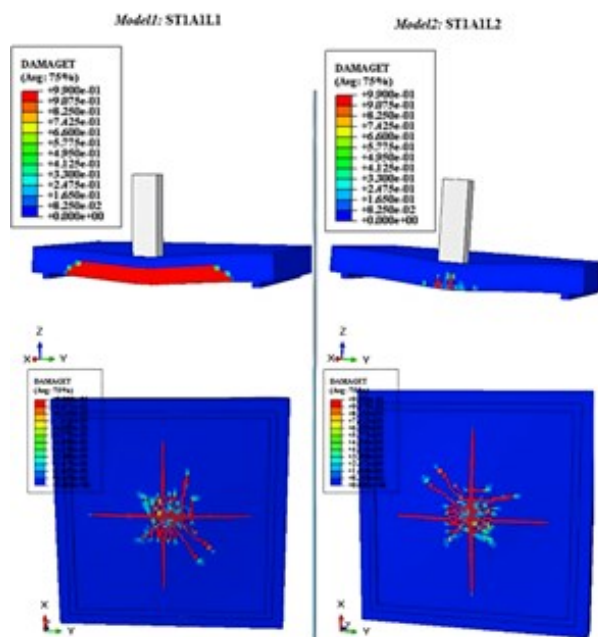
مطالعات پارامتریک در راستای ارزیابی تاثیر متغیرهای مدل‌سازی (۱- شرایط بارگذاری، ۲- ضخامت ورق‌های CFRP، ۳- ابعاد ورق‌های CFRP، ۴- تعداد لایه‌ها و زاویه قرارگیری الیاف در لایه‌های ورق CFRP) در مقاوم‌سازی اتصال دال-ستون RC با بهره‌گیری از ورق‌های CFRP انجام شده است. بر این اساس و با در نظر گرفتن متغیرهای مدل‌سازی عددی سناریوهای انجام مدل‌سازی عددی تعریف شده که در ادامه به صورت موردی نتایج ارائه و مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

### ۳-۲-۱- ارزیابی تاثیر تعداد لایه‌های الیاف در CFRP

در مدل‌های اول و دوم (بر اساس جدول ۳) به هدف ارزیابی تاثیر ورق‌های CFRP مدل عددی اتصال دال به ستون با ورق یک لایه تحت شرایط بارگذاری برش پانچ مدل‌سازی شده است، در این دو مدل زاویه قرارگیری الیاف در زوایای صفر و نود درجه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از مدل‌سازی که بیانگر میزان آسیب در دال بتنی بوده در شکل ۱۱ ارائه شده است.

### ۳-۲-۲- ارزیابی زاویه قرارگیری لایه‌های الیاف در CFRP

به جهت ارزیابی تاثیر زاویه قرارگیری الیاف در ورق‌های CFRP سه مدل با شرایط یکسان (ضخامت ۱ میلی‌متر و ابعاد ۲۰۰\*۲۰۰ میلی‌متر) و با تفاوت در زاویه قرارگیری (زاویه قرارگیری الیاف L3, L4, L5 بر اساس جدول ۴) مدل‌سازی شده است. به جهت ارزیابی عملکرد ورق‌های CFRP در ۳ مدل دو پارامتر تغییرات انرژی کرنشی و همچنین میزان آسیب وارده بر دال بر اساس بارگذاری مورد بررسی قرار گرفته است. در نمودارهای شکل ۱۲ میزان تغییرات انرژی کرنشی و همچنین تغییرات آسیب وارده بر دال بتنی بر اساس افزایش بارگذاری و مقایسه بین مقادیر بیشینه آسیب در هر یک از سه مدل نمایش داده شده است، در هر نمودار گراف قرمز رنگ بیانگر تغییرات انرژی کرنشی و گراف آبی رنگ معرف تغییرات رخداد آسیب بر اساس بارگذاری بوده است. با توجه به نتایج حاصل به وضوح مشخص می‌گردد که مدل M3 و M5 دارای عملکرد بسیار قابل قبول تری نسبت به مدل M4 بوده است. در سه مدل M3 تا M5 تنها متغیر زاویه قرارگیری الیاف در ورق‌های CFRP بوده است که با توجه به نتایج حاصله



شکل ۱۱- ارزیابی آسیب پذیری دال در المان‌های تحت کشش مقاوم‌سازی شده با ورق CFRP تک لایه

با توجه به نتایج حاصله و مقایسه نتایج با مدل آزمایشگاهی (مدل بدون مقاوم‌سازی) مشخص می‌گردد که بهره‌گیری از ورق‌های CFRP می‌تواند میزان آسیب‌های وارده بر اعضای سازه‌ای دال-

گرفتن مقادیر ضخامت و ابعاد یکسان ورق CFRP و متفاوت در زاویه قرار گیری الیاف انجام شده است. در این پژوهش تاثیر پارامتر زاویه قرار گیری الیاف در لایه‌های ورق‌های CFRP تحت ۳ شرایط مختلف (۱-۴) L3 لایه و زاویه قرار گیری الیاف به ترتیب ۰، ۴۵، ۹۰، ۰-۲ L4 لایه و زاویه قرار گیری الیاف به ترتیب ۰، ۴۵، ۹۰، ۰-۳ L5 لایه و زاویه قرار گیری الیاف به ترتیب ۰، ۴۵، ۹۰ مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به توضیحات ارائه شده و نتایج حاصل از مدل‌های عددی مشخص گردید که بهترین رفتار مقاوم سازی دال‌های بتنی با ورق‌های CFRP در شرایط L3 ایجاد شده است، به بیان دیگر در شرایط به کار گیری ورق‌های CFRP با ۴ لایه که زاویه قرار گیری الیاف در ورق تحت شرایط L3: 0,45,90,0 پیاده سازی گردد، کمترین میزان آسیب در دال بتنی ایجاد میگردد، بنابراین بهترین شرایط برای به کار گیری پارامتر L (زاویه قرار گیری الیاف) در وضعیت L3 اعمال میگردد.

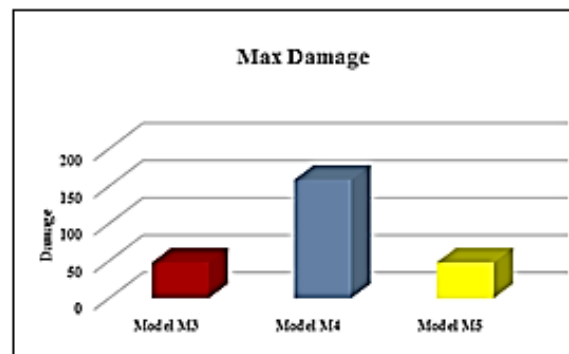
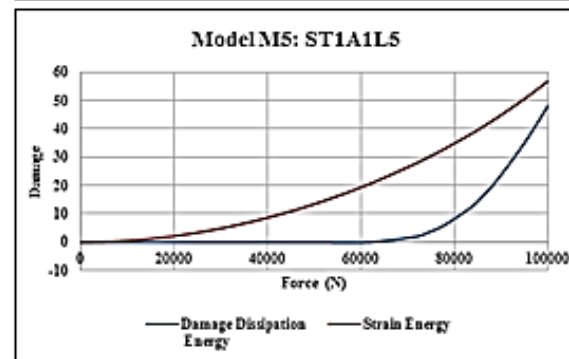
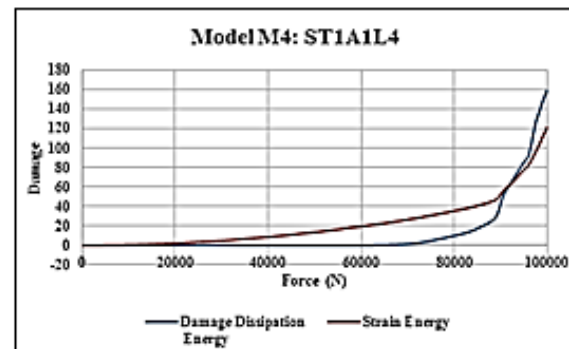
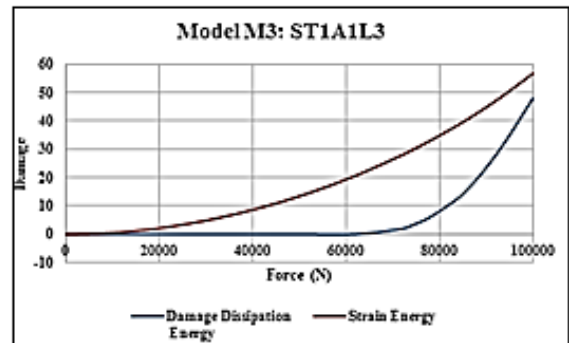
### ۳-۲-۳- ارزیابی ضخامت ورق‌های CFRP

در این پژوهش به جهت ارزیابی تاثیر ضخامت لایه‌های ورق CFRP در مقاوم سازی اتصال دال-ستون، ۳ شرایط شامل: ۱- T1: ضخامت لایه‌های ورق CFRP معادل با ۱ mm، T2: 2- ضخامت لایه‌های ورق CFRP معادل با ۲ mm، T3: 3- ضخامت لایه‌های ورق CFRP معادل با ۳ mm مورد ارزیابی قرار گرفته است. بر اساس نتایج حاصل از ارزیابی زاویه قرار گیری الیاف مشخص گردید که بهترین شرایط برای زاویه کارگذاری الیاف ورق‌های CFRP شرایط L3 بوده است، بنابراین برای ارزیابی تاثیر پارامتر ضخامت (T) کلیه مدل‌هایی که دارای زاویه کارگذاری یکسان (L3)، ابعاد یکسان (A) و ضخامت متفاوت بوده اند با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته اند. مدل‌هایی که برای ارزیابی تاثیر پارامتر ضخامت لایه با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته اند، عبارتند از:

۱- دسته اول: M3, M6, M9 (در این سه مدل کلیه متغیرهای مدل سازی ثابت (L3, A1) و تنها متغیر ضخامت لایه‌های ورق CFRP بوده است)،

۲- دسته دوم: M12, M15, M18 (در این سه مدل کلیه متغیرهای مدل سازی ثابت (L3, A2) و تنها متغیر ضخامت

مشخص میگردد که وضعیت قرار گیری الیاف در ورق‌های CFRP در شرایط L3: 0,45,90,0 دارای عملکرد بهتری نسبت به دو وضعیت L4, L5 بوده است.



شکل ۱۲- ارزیابی نتایج حاصل از حساسیت سنجی زاویه قرار گیری الیاف در ورق‌های CFRP

علاوه بر این به جهت ارزیابی تاثیر ضخامت ورق CFRP (پارامتر T) و همچنین ابعاد ورق (پارامتر A) مدل سازی‌هایی با در نظر

لایه‌های ورق CFRP بوده است) ۳-دسته سوم: M21, M24, M27 (در این سه مدل کلیه متغیرهای مدل‌سازی ثابت (L3, A3) و تنها متغیر ضخامت لایه‌های ورق CFRP بوده است). در جدول ۵ نتایج حاصل از انجام مقایسات بین پارامتر آسیب در مدل‌های فوق ارائه شده است. در جدول ۵ نتایج حاصل از حساسیت سنجی عملکرد ورق‌های CFRP در مقاوم سازی اتصال ستون به دال بتنی تخت بر اساس ضخامت لایه‌های ورق (T) ارائه شده است، بر اساس نتایج حاصله

مشخص می‌گردد که بیشترین میزان کاهش آسیب در دال در مدل‌هایی با ورق CFRP با ضخامت  $T2 = 2 \text{ mm}$  رخ داده است به گونه‌ای که در گروه مقایسه‌ای اول بکارگیری ورق CFRP با ضخامت T2 موجب کاهش ۹۶,۹۳٪ آسیب، در گروه مقایسه‌ای دوم موجب کاهش ۴۲,۲٪ و در گروه مقایسه‌ای سوم میزان آسیب در مدل ۹۸,۹۱٪ کاهش یافته است، بنابراین بهینه‌ترین شرایط به کارگیری ورق‌های CFRP برای مقاوم سازی اتصال دال به ستون و کاهش خسارات ناشی از برش پانچ، بهره‌گیری از ضخامت ۲ mm برای لایه‌های ورق CFRP بوده است.

جدول ۵- حساسیت سنجی عملکرد ورق‌های CFRP نسبت به پارامتر ضخامت (T)

مدل ضخامت ورق CFRP	M3: ST1A1L3 (T1)	M6: ST2A1L3 (T2)	M9: ST3A1L3 (T3)
میزان آسیب دال بتنی	47.9946	32.5343	697.522
درصد کاهش آسیب نسبت به مدل اصلی %	95.48	96.93	34.28
مدل ضخامت ورق CFRP	M12: ST1A2L3 (T1)	M15: ST2A2L3 (T2)	M18: ST3A2L3 (T3)
میزان آسیب دال بتنی	661.659	613.477	652.918
درصد کاهش آسیب نسبت به مدل اصلی %	37.66	42.20	38.48
مدل ضخامت ورق CFRP	M21: ST1A3L3 (T1)	M24: ST2A3L3 (T2)	M27: ST3A3L3 (T3)
میزان آسیب دال بتنی	40.0195	11.5234	12.9486
درصد کاهش آسیب نسبت به مدل اصلی %	96.23	98.91	98.78

### ۳-۲-۴- ارزیابی ابعاد ورق CFRP

در این پژوهش به جهت ارزیابی تأثیر ابعاد لایه‌های ورق CFRP در مقاوم سازی اتصال دال-ستون، ۳ شرایط برای انجام مطالعات تعریف شده است: ۱- A1: ابعاد ورق CFRP معادل با  $200 * 200 \text{ mm}$ ، ۲- A2: ابعاد ورق CFRP معادل با  $100 * 100 \text{ mm}$ ، ۳- A3: ابعاد ورق CFRP معادل با  $400 * 400 \text{ mm}$ . بر اساس نتایج حاصل مشخص گردید که بهترین شرایط برای زاویه کارگذاری الیاف ورق‌های CFRP شرایط L3 بوده است، بنابراین برای ارزیابی تأثیر پارامتر ابعاد (A) کلیه مدل‌هایی که دارای زاویه کارگذاری یکسان (L3)، ضخامت یکسان (T) و ابعاد متفاوت بوده اند با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته اند.

مدهایی که برای ارزیابی تأثیر پارامتر ضخامت لایه با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته اند، عبارتند از: ۱- دسته اول: M3, M12, M21 (در این سه مدل کلیه متغیرهای مدل‌سازی ثابت (L3, T1) و تنها متغیر ابعاد ورق CFRP بوده است)، ۲- دسته دوم: M6, M15, M24 (در این سه مدل کلیه متغیرهای مدل‌سازی ثابت (L3, T2) و تنها متغیر ابعاد ورق CFRP بوده است)، ۳- دسته سوم: M9, M18, M27 (در این سه مدل کلیه متغیرهای مدل‌سازی ثابت (L3, T3) و تنها متغیر ابعاد ورق CFRP بوده است).

مقایسه‌ای اول بکارگیری ورق CFRP با ابعاد A3 موجب کاهش ۹۶,۲۳٪ آسیب، در گروه مقایسه‌ای دوم موجب کاهش ۹۸,۹۱٪ و در گروه مقایسه‌ای سوم میزان آسیب در مدل ۹۸,۷۸٪ کاهش یافته است، بنابراین بهینه ترین شرایط بکارگیری ورق‌های CFRP برای مقاوم سازی اتصال دال به ستون و کاهش خسارات ناشی از برش پانچ، بهره گیری از ابعاد A3 برای لایه‌های ورق CFRP بوده است.

در جدول ۶ نتایج حاصل از انجام مقایسات بین پارامتر آسیب در مدل‌های فوق ارائه شده است. در جدول ۶ نتایج حاصل از حساسیت سنجی عملکرد ورق‌های CFRP در مقاوم سازی اتصال ستون به دال بتنی تخت بر اساس ابعاد ورق (A) ارائه شده است، بر اساس نتایج حاصله مشخص می‌گردد که بیشترین میزان کاهش آسیب در دال در مدل‌هایی با ورق CFRP با ابعاد A3  $400 \times 400$  mm رخ داده است به گونه‌ای که در گروه

جدول ۶- حساسیت سنجی عملکرد ورق‌های CFRP نسبت به پارامتر ابعاد ورق (A)

مدل ابعاد A	M3: ST1A1L3 (A1)	M12: ST1A2L3 (A2)	M21: ST1A3L3 (A3)
میزان آسیب دال بتنی	47.9946	661.659	40.0195
درصد کاهش آسیب نسبت به مدل اصلی٪	95.48	37.66	96.23
مدل ابعاد A	M6: ST2A1L3 (A1)	M15: ST2A2L3 (A2)	M24: ST2A3L3 (A3)
میزان آسیب دال بتنی	32.5343	613.477	11.5234
درصد کاهش آسیب نسبت به مدل اصلی٪	96.93	42.20	98.91
مدل ابعاد A	M9: ST3A1L3 (A1)	M18: ST3A2L3 (A2)	M27: ST3A3L3 (A3)
میزان آسیب دال بتنی	697.522	652.918	12.9486
درصد کاهش آسیب نسبت به مدل اصلی٪	34.28	38.48	98.78

بخش نتایج حاصل از مدل‌های M30 تا M33 پژوهش که تحت بارگذاری لرزه‌ای مدل‌سازی شده اند، ارائه می‌گردد، مدل‌های DT2A3L3, DT2A3L4, DT2A3L5 دارای شرایط مدل‌سازی یکسان بوده اند، در این مدل‌ها ضخامت ورق‌های CFRP از نوع T2 و معادل با ۲mm بوده است، همچنین ابعاد ورق‌ها از نوع A3 و معادل با ۴۰۰\*۴۰۰mm می‌باشد. تنها پارامتر متغیر در این سه مدل زاویه قرارگیری الیاف در ورق‌های CFRP بوده است. مدل M33 مدل آزمایشگاهی اتصال دال-ستون می‌باشد که تحت شرایط بارگذاری لرزه‌ای مدل‌سازی شده است، در ادامه میزان آسیب در هر یک از مدل‌های مذکور تحت شرایط بارگذاری و مقایسه عملکرد مدل‌ها نسبت به یکدیگر ارائه شده است. به جهت ارزیابی عملکرد ورق‌های CFRP تحت شرایط بارگذاری

### ۳-۳- ارزیابی عملکرد ورق‌های CFRP تحت بارگذاری لرزه‌ای

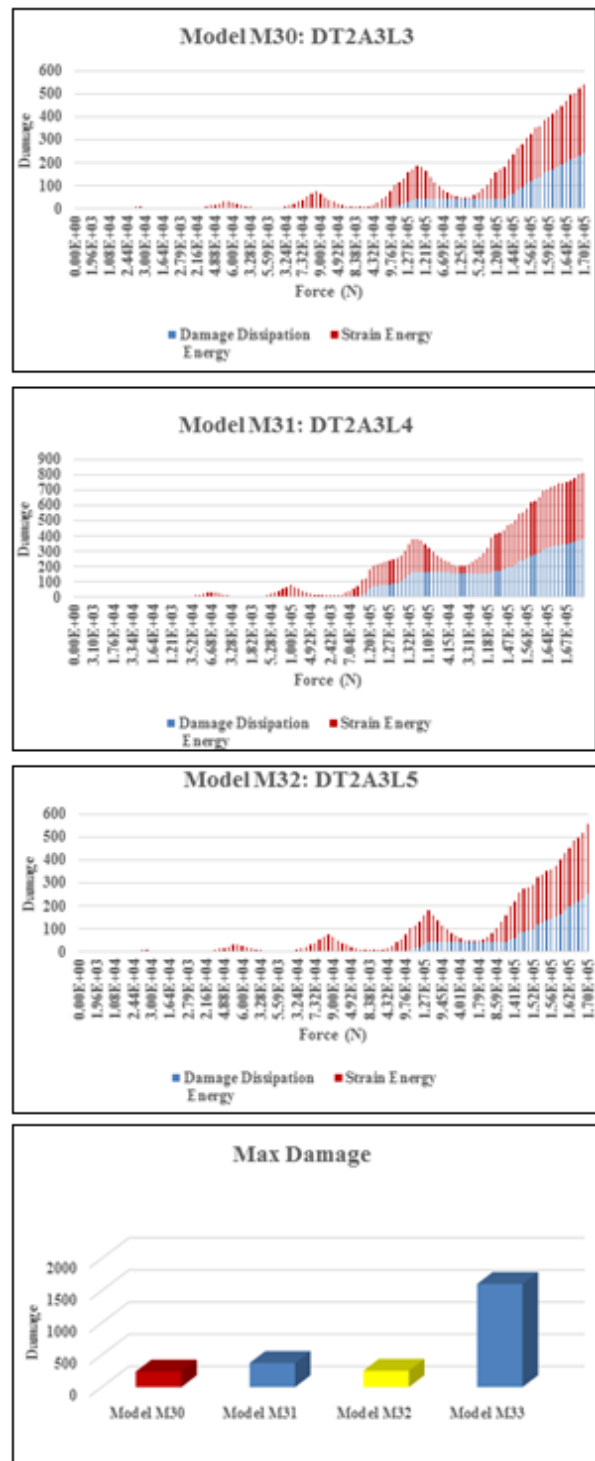
در این بخش نتایج حاصل از عملکرد ورق‌های CFRP در مقاوم سازی اتصال دال-ستون بتنی تخت تحت بارگذاری لرزه‌ای ارائه شده است، بر اساس نتایج حاصل از مدل‌سازی تحت بارگذاری برش پانچ مشخص گردید که ورق‌های CFRP با ضخامت T2 دارای عملکرد بهتری نسبت به دو ضخامت T1 و T3 می‌باشد، همچنین ابعاد ورق‌های CFRP در شرایط A3 رفتار مقاوم سازی بهتری ارائه داده است. بر این اساس ۳ مدل عددی اتصال دال-ستون با ورق‌های CFRP با ضخامت T2 و ابعاد A3 و در ۳ شرایط مختلف زاویه قرارگیری الیاف در لایه‌های ورق CFRP (L3, L4, L5) تحت بارگذاری لرزه‌ای مدل‌سازی شده است. در این

با توجه به نتایج حاصل از مدل‌سازی مشخص می‌گردد که در هر سه مدل مقاوم سازی شده میزان آسیب وارده بر دال بتنی نسبت به مدل اصلی (مدل اتصال دال-ستون بدون اتصال ورق‌های CFRP) تحت شرایط بارگذاری لرزه‌ای به طور چشم‌گیری کاهش یافته‌است. با بررسی مدل‌های مقاوم سازی شده تحت شرایط بارگذاری دینامیکی (شکل ۱۳) مشخص می‌گردد که مدل M31 دارای مقادیر آسیب و انرژی کرنشی بیشتری نسبت به دو مدل M30 و M32 بوده‌است. با توجه به نتایج حاصل مدل M30 دارای بهترین عملکرد در راستای مقاوم سازی اتصال دال به ستون تحت شرایط بارگذاری لرزه‌ای بوده‌است. با ارزیابی مقادیر بیشینه آسیب در هر چهار مدل عددی به وضوح مشخص می‌گردد که مدل M30 دارای عملکرد بسیار قابل قبول تری نسبت به دو مدل دیگر بوده‌است. در این سه مدل (M30, M31, M32) تنها متغیر زاویه قرارگیری الیاف در ورق‌های CFRP بوده است که با توجه به نتایج حاصله مشخص می‌گردد که وضعیت قرارگیری الیاف در ورق‌های CFRP در شرایط L3: 0,45,90,0 دارای عملکرد بهتری نسبت به دو وضعیت L4, L5 برای مقاوم سازی دال بتنی تحت شرایط بارگذاری لرزه‌ای بوده‌است.

#### ۴- نتایج

در این پژوهش به جهت ارزیابی مقاوم سازی اتصالات دال-ستون RC با ورق‌های CFRP مطالعات پارامتریک جامعی به روش عددی انجام شده‌است. متغیرهای اصلی پژوهش شامل: ۱- شرایط بارگذاری (بارگذاری برش پانچ، بارگذاری لرزه‌ای)، ۲- تعداد لایه‌های ورق CFRP، ۳- ضخامت ورق CFRP، ۴- زاویه قرارگیری الیاف در ورق، ۵- ابعاد ورق‌های CFRP بوده که بر این اساس ۳۳ سناریو مدل‌سازی به جهت ارزیابی و حساسیت‌سنجی تأثیر هر یک از متغیرهای تحقیق تعریف و در بستر نرم‌افزار المان محدود آباکوس پیاده‌سازی شده‌است. به جهت اعتبارسنجی مدل عددی، یک مدل آزمایشگاهی به عنوان مدل مبنا مطالعات مدنظر قرار گرفته و نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با نتایج تست آزمایشگاهی مورد صحت‌سنجی-اعتبارسنجی قرار گرفته‌است. نتایج نشان داد که میزان میانگین خطای مدل عددی نسبت به مدل آزمایشگاهی ۵,۲٪ بوده است که بیانگر دقت قابل قبول مدل عددی در ارزیابی رفتار اتصال ستون-دال بتنی مسلح بوده‌است.

لرزه‌ای، دو پارامتر تغییرات انرژی کرنشی و همچنین میزان آسیب وارده بر دال بر اساس بارگذاری مورد بررسی قرار گرفته است، در نمودارهای شکل ۱۳ میزان تغییرات انرژی کرنشی و همچنین تغییرات آسیب وارده بر دال بتنی بر اساس بارگذاری دینامیکی نمایش داده شده‌است.



شکل ۱۳- ارزیابی عملکرد ورق‌های CFRP تحت بارگذاری لرزه‌ای

گرفته است، همچنین مطالعات پارامتریک دقیق بر متغیرهای موثر در عملکرد اتصال مقاوم سازی شده، انجام شده است، نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند به عنوان یک مدل جامع برای طراحی و به کارگیری ورق‌های CFRP در مقاوم سازی اتصال ستون-دال بتنی تحت مورد استفاده قرار گیرد.

#### ۵- مراجع

- [1] Al-Maliki, H. N., Al-Balhawi, A., & Ali, A. M. (2021). Punching Shear Resistance of Reinforced Concrete Flat Slabs Strengthened by CFRP and GFRP: A Review of Literature. *Engineering and Technology Journal*, 39(8), 1281-1290.
- [2] Abdulrahman, B. Q., & Aziz, O. Q. (2021). Strengthening RC flat slab-column connections with FRP composites: A review and comparative study. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 33(7), 471-481.
- [3] Al-Rousan, R. Z., Alhassan, M. A., & Al-omary, R. J. (2021). Response of interior beam-column connections integrated with various schemes of CFRP composites. *Case Studies in Construction Materials*, 14, e00488.
- [4] Camata, G., Spacone, E., & Zarnic, R. (2007). Experimental and nonlinear finite element studies of RC beams strengthened with FRP plates. *Composites Part B: Engineering*, 38(2), 277-288.
- [5] EL-Mandouh, M. A., Hu, J. W., & Abd El-Maula, A. S. (2022). Seismic behavior of RC slab-column connection with openings strengthened with CFRP. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01517.
- [6] Akhundzada, H., Donchev, T., & Petkova, D. (2019). Strengthening of slab-column connection against punching shear failure with CFRP laminates. *Composite Structures*, 208, 656-664.
- [7] Anil, Ö., Kaya, N., & Arslan, O. (2013). Strengthening of one way RC slab with opening using CFRP strips. *Construction and Building Materials*, 48, 883-893.
- [8] Salman, W. D., Murtada, A. I., & Qusay, W. A. (2015). Strengthening of reinforced concrete one-way slabs using CFRP in flexural. *J Eng Sci Res Technol*, 4(8), 2277-9655.
- [9] M.A. Al-Kannoon, H.W. Ali, Strengthening of reinforced concrete solid slabs with CFRP products, *Int. J. Sci. Eng. Res.* 7 (9) (2016) 1237-1243.
- [10] Moon, J., Reda Taha, M. M., & Kim, J. J. (2017). Flexural strengthening of RC slabs using a hybrid FRP-UHPC system including shear connector. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017.

بر اساس نتایج حاصل از پژوهش و حساسیت سنجی مقاوم سازی دال بتنی نسبت به متغیرهای تحقیق، مشخص گردید که پارامتر زاویه قرارگیری الیاف در لایه‌های ورق CFRP به عنوان یکی از اصلیت‌ترین متغیرهای موثر در رفتار اتصال قلمداد می‌گردد، همچنین نتایج نشان داد که شرایط L3 که بیانگر ۴ لایه با زوایای ۰، ۴۵، ۹۰ الیاف بوده بهترین عملکرد را در مقاوم سازی اتصال ستون-دال بتنی تحت هر دو شرایط بارگذاری استاتیکی و لرزه‌ای داشته است.

با ارزیابی نتایج حاصل از پژوهش مشخص گردید که ضخامت لایه‌های ورق CFRP تاثیر قابل توجهی بر مقاوم سازی اتصال داشته است، بر اساس نتایج مشخص گردید که ضخامت T2 که معادل با ۲mm می‌باشد بهترین عملکرد را در مقاوم سازی و کاهش آسیب وارده بر دال داشته است، به گونه‌ای که در گروه مقایسه‌ای اول بکارگیری ورق CFRP با ضخامت T2 موجب کاهش ۹۶،۹۳٪ آسیب، در گروه مقایسه‌ای دوم موجب کاهش ۴۲،۲٪ و در گروه مقایسه‌ای سوم میزان آسیب در مدل ۹۸،۹۱٪ کاهش یافته است، بنابراین بهینه ترین شرایط بکارگیری ورق‌های CFRP برای مقاوم سازی اتصال دال به ستون و کاهش خسارات ناشی از برش پانچ، بهره گیری از ضخامت ۲ mm برای لایه‌های ورق CFRP بوده است.

نتایج حاصل از حساسیت سنجی عملکرد ورق‌های CFRP در مقاوم سازی اتصال ستون به دال بتنی تحت بر اساس ابعاد ورق (A) ارائه شده است، بر اساس نتایج حاصله مشخص می‌گردد که بیشترین میزان کاهش آسیب در دال در مدل‌هایی با ورق CFRP با ابعاد  $A3 = 400 * 400 \text{ mm}$  رخ داده است به گونه‌ای که در گروه مقایسه‌ای اول بکارگیری ورق CFRP با ابعاد A3 موجب کاهش ۹۶،۲۳٪ آسیب، در گروه مقایسه‌ای دوم موجب کاهش ۹۸،۹۱٪ و در گروه مقایسه‌ای سوم میزان آسیب در مدل ۹۸،۷۸٪ کاهش یافته است، بنابراین بهینه ترین شرایط بکارگیری ورق‌های CFRP برای مقاوم سازی اتصال دال به ستون و کاهش خسارات ناشی از برش پانچ، بهره گیری از ابعاد A3 برای لایه‌های ورق CFRP بوده است.

در این پژوهش مطالعات جامعی به جهت ارزیابی مقاوم سازی اتصال ستون-دال بتنی مسلح تحت انجام شده است و رفتار اتصال تحت شرایط بارگذاری برش پانچ و لرزه‌ای مورد بررسی قرار

- 1516). Elsevier.
- [22] Dat, P. X., & Hieu, N. T. (2023). Experimental study on the effectiveness of strengthening reinforced concrete slab-column connections using CFRP sheets. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (JSTCE)-HUCE*, 17(3), 46-54.
- [23] Ghayeb, H. H., Atea, R. S., Al-Kannoon, M. A. A., Lee, F. W., Wong, L. S., & Mo, K. H. (2023). Performance of reinforced concrete flat slab strengthened with CFRP for punching shear. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01801.
- [24] Türer, A., Mercimek, Ö., Anıl, Ö., & Erbaş, Y. (2023, March). Experimental and numerical investigation of punching behavior of two-way RC slab with different opening locations and sizes strengthened with CFRP strip. In *Structures (Vol. 49, pp. 918-942)*. Elsevier.
- [25] Fareed, S., & Khan, A. U. R. (2023). Behavior of reinforced recycled aggregate concrete beams and slabs strengthened in flexure and punching with CFRP composites. *The Journal of The Textile Institute*, 1-9.
- [26] Hamoda, A., & Hossain, K. M. A. (2019). Numerical assessment of slab-column connection additionally reinforced with steel and CFRP bars. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44, 8181-8204.
- [27] Golestani, M., Alam, M. S., & Calvi, G. M. (2023). A performance-based seismic loading protocol: The generated sequential ground motion. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 52(7), 2196-2221.
- [11] Moshiri, N., Czaderski, C., Mostofinejad, D., Hosseini, A., Sanginabadi, K., Breveglieri, M., & Motavalli, M. (2020). Flexural strengthening of RC slabs with nonprestressed and prestressed CFRP strips using EBROG method. *Composites Part B: Engineering*, 201, 108359.
- [12] Aman, S. S., S. Mohammed, B., Wahab, M. A., & Anwar, A. (2020). Performance of reinforced concrete slab with opening strengthened using CFRP. *Fibers*, 8(4), 25.
- [13] Azizian, H., Lotfollahi-Yaghin, M. A., & Behraves, A. (2021). Punching Shear Strength of Voided Slabs on the Elastic Bases. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 45, 2437-2449.
- [14] Kotynia, R., Walendziak, R., Stoecklin, I., & Meier, U. (2011). RC slabs strengthened with prestressed and gradually anchored CFRP strips under monotonic and cyclic loading. *Journal of Composites for Construction*, 15(2), 168-180.
- [15] Daud, R. A., Cunningham, L. S., & Wang, Y. C. (2015). Static and fatigue behaviour of the bond interface between concrete and externally bonded CFRP in single shear. *Engineering Structures*, 97, 54-67.
- [16] Daud, R. A. (2015). Behaviour of reinforced concrete slabs strengthened externally with two-way FRP sheets subjected to cyclic loads. The University of Manchester (United Kingdom).
- [17] Liu, H., Wang, Z., Du, X., & Shen, G. Q. (2021). The seismic behaviour of precast concrete interior joints with different connection methods in assembled monolithic subway station. *Engineering Structures*, 232, 111799.
- [18] Cai, Z. W., Liu, X., Li, L. Z., Lu, Z. D., & Chen, Y. (2021). Seismic performance of RC beam-column-slab joints strengthened with steel haunch system. *Journal of Building Engineering*, 44, 103250.
- [19] Khaleel, G. I., Kareem, A. H. A., Debaiky, A. S., & Abd Elmaogod, E. G. (2022). Punching strengthening of reinforced concrete slab-Column connection using different techniques. *International Journal of Advanced Engineering, Management and Science*, 8, 2.
- [20] Houda, A., Benbouras, M. A., Zedira, H., Redjel, B., & Lefilef, L. (2022). the influence of spacing between cfrp strips on the strengthened concrete slabs'behavior. *Urbanism. Architecture. Constructions/Urbanism. Arhitectura. Constructii*, 13.(1)
- [21] Mercimek, Ö., Ghoroubi, R., Erbaş, Y., & Anıl, Ö. (2022, December). Comparison of strengthening methods to improve punching behavior of two-way RC flat slabs. In *Structures (Vol. 46, pp. 1495-*



## Performance Evaluation of CFRP Sheets in Reinforcing RC Slab-Column Connection

Zana Kohneposhi

Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Mahabad branch, Islamic Azad University, Mahabad, Iran.

Hadi Azizian \*

Department of Civil Engineering, Mahabad branch, Islamic Azad University, Mahabad, Iran.

Omid Hadad

Department of Civil Engineering, Mahabad branch, Islamic Azad University, Mahabad, Iran.

Jamil Ghadedri

Department of Civil Engineering, Mahabad branch, Islamic Azad University, Mahabad, Iran.

### Abstract

In concrete slabs, due to the absence of support beams, three-dimensional shear stresses are created around the slab-column connection area, leading to radial shear cracks and punching shear in the column-slab connection area. In this article, for evaluating the strengthening of the slab-column connection using CFRP sheets under the conditions of punching shear and seismic loading, the numerical method has carried parametric studies out. Therefore, considering 5 variables: loading conditions, number of fiber layers in the sheet, angle of fiber placement, sheet thickness, and dimensions of CFRP sheets, parametric studies have been carried out in the form of 33 separate models by Abaqus finite element software. Validation of the numerical model was evaluated based on the modeling of the laboratory sample. The results showed that the average error of numerical modeling was 5.2% compared to the laboratory sample, indicating the numerical model's acceptable accuracy. Also, the results showed that the two parameters of sheet thickness and dimensions are the main parameters in strengthening the RC slab-column connection, so considering the optimal values of about 98% reduces the damage to the concrete slab. The results of this research can be used as a comprehensive model for the design and application of CFRP sheets in strengthening the concrete column-slab connection.

**Keywords:** Concrete slab, RC slab-column, carbon fiber polymer, CFRP, punching shear, seismic loading.

---

\* Corresponding Author: Hadi.azizian@iau.ac.ir

