

## Investigation of the effect of CFRP bars on punching shear capacity in Reinforced Concrete (RC) flat slabs

Hoda Kouhnejhad<sup>1</sup>, Rahmat Madandoust<sup>2</sup>, Seyede Mahdiah Miralami<sup>3\*</sup>

1- Master student of Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Rahman Institute of Higher Education, Ramsar, Iran

2- Professor, Structural Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

3- Assistant Professor, Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Rahman Institute of Higher Education, Ramsar, Iran

### ABSTRACT

The present study deals with the punching shear capacity of reinforced concrete (RC) flat slabs reinforced with Fiber Reinforced Polymer (FRP) bars. A total of 49 reinforced concrete (RC) column-slab connections were simulated using ABAQUS finite element software. The numbers of six interior column-slab connections, five edge column-slab connections, and three corner column-slab connections were selected from the previous test results and were simulated to evaluate the software's ability. The simulation results were so satisfactory in terms of failure mode, initial and propagation of cracks that the tested to simulated punching shear capacity of interior and edge column-slab connections were about 0.86 to 0.92, 0.85 to 0.95, and 0.91 to 0.95 respectively. The punching shear capacity was predicted by ACI 440.1R-15, CSA S806-12, JSCE-97, and BSI 8110-97. The punching shear design equation based on ACI 440.1R-15 underestimated the punching shear capacity with 2.91 to 4.75 (Interior column-slab connections) and 2.01 to 2.99 (Edge column-slab connections), respectively. The numbers of 23 specimens were simulated to investigate the punching shear capacity of reinforced concrete (RC) flat slabs with carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) reinforcing bars. The results showed that the replacement of CFRP bars instead of GFRP bars has played a significant role in increasing the punching shear capacity of reinforced concrete (RC) column-slab connections. To investigate the effect of increasing slab thickness, the numbers of six specimens were simulated. With increasing the thickness of the flat slab, the punching shear capacity will increase from 27.05% to 49.50%. It should be noted that with the increase of column dimensions in the form of simulation of six specimens, the punching shear capacity of the specimens has increased about 11.84% to 17.89%.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 06 February 2022

**Revise Date:** 05 May 2022

**Accept Date:** 18 May 2022

### Keywords:

Edge column- RC flat slab;  
Interior column-RC flat slab;  
Corner column-RC flat slab  
Punching shear capacity;  
FRP bar;  
Simulation;  
Slab center displacement.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.327393.2719>

\*Corresponding author: Seyede Mahdiah Miralami

Email address: Miralami@rahman.ac.ir

## بررسی تاثیر میلگردهای CFRP بر ظرفیت برش سوراخ کننده در دال های بتن مسلح تخت

هدی کوهنژاد<sup>۱</sup>، رحمت مدن دوست<sup>۲</sup>، سیده مهدیه میراعلمی<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد مهندسی عمران-سازه، موسسه آموزش عالی رحمان، رامسر، ایران

۲-استاد و عضو هیئت علمی گروه مهندسی عمران، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۳-استادیار و عضو هیئت علمی گروه مهندسی عمران و معماری، موسسه آموزش عالی رحمان، رامسر، ایران

### چکیده

هدف از پژوهش حاضر بررسی رفتار اتصالات ستون-دال بتن مسلح تخت تحت برش سوراخ کننده می باشد. تعداد ۴۹ نمونه ای اتصال ستون-دال بتن مسلح تخت با استفاده از نرم افزار اجزای محدود ABAQUS شبیه سازی شدند. تعداد ۶ نمونه اتصال ستون میانی، ۵ نمونه اتصال ستون لبه و ۳ نمونه اتصال ستون گوشه به دال بتن مسلح تخت از میان پژوهش های آزمایشگاهی پیشین انتخاب شدند و جهت بررسی توانایی نرم افزار مذکور شبیه سازی شدند. نتایج شبیه سازی از نظر انطباق حالت گسیختگی، نحوه ی شروع و گسترش ترک ها با نمونه های آزمایشگاهی بسیار رضایت بخش بود به طوری که نسبت ظرفیت برش سوراخ کننده ی نتایج آزمایشگاهی به شبیه سازی با نرم افزار ABAQUS برای اتصال با ستون میانی، ستون لبه و ستون گوشه به ترتیب در حدود ۰/۸۶ تا ۰/۹۲، ۰/۸۵ تا ۰/۹۵ و ۰/۹۱ تا ۰/۹۵ بوده است. نسبت ظرفیت برش سوراخ کننده براساس آیین نامه های *ACI 440.1R-15*، *JSCE-97*، *CSA S806-12* و *BSI 8110-97* نیز ارائه شد. آیین نامه ی *ACI 440.1R-15* بیشترین مقدار نسبت ظرفیت برش سوراخ کننده را داشت. این نسبت برای اتصالات با ستون میانی و ستون لبه به ترتیب در حدود ۲/۹۱ تا ۴/۷۵ و ۲/۰۱ تا ۲/۹۹ بوده است. تعداد ۲۳ نمونه به منظور بررسی رفتار اتصال تسلیح شده با میلگردهای CFRP به جای میلگردهای فولادی یا GFRP نیز شبیه سازی شدند. نتایج نشان داد که استفاده از میلگردهای CFRP به جای میلگردهای GFRP نقش به سزایی در افزایش ظرفیت برش سوراخ کننده ی نمونه های اتصال ستون-دال بتن مسلح تخت داشته است و علت آن ضریب ارتجاعی و مقاومت کششی بالاتر میلگردهای CFRP نسبت به میلگردهای GFRP می باشد. تعداد ۶ نمونه نیز به منظور بررسی اثر افزایش ضخامت دال بتن مسلح تخت شبیه سازی شدند و نتایج نشان داد که با افزایش ضخامت دال تخت، ظرفیت برش سوراخ کننده افزایش ۲۷/۰۵ درصدی تا ۴۹/۵۰ درصدی خواهد داشت. لازم به ذکر است که با افزایش ابعاد ستون در قالب شبیه سازی تعداد ۶ اتصال، ظرفیت برش سوراخ کننده ی نمونه ها در حدود ۱۱/۸۴ درصد تا ۱۷/۸۹ درصد افزایش داشته است.

کلمات کلیدی: ستون لبه-دال بتن مسلح تخت، ستون میانی-دال بتن مسلح تخت، ستون گوشه-دال بتن مسلح تخت، ظرفیت برش سوراخ کننده، میلگرد FRP، شبیه سازی، تغییر مکان وسط دهانه دال.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2022.327393.2719">https://doi.org/10.22065/jsce.2022.327393.2719</a>	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.327393.2719	۱۴۰۱/۱۲/۲۹	۱۴۰۱/۰۲/۲۸	۱۴۰۱/۰۲/۲۸	۱۴۰۱/۰۲/۱۵	۱۴۰۰/۱۱/۱۷
سیده مهدیه میراعلمی Miralami@rahman.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

سیستم دال‌های تخت<sup>۱</sup> فاقد تیر می‌باشند. در نتیجه بارهای وارده به‌صورت مستقیم از دال به ستون‌های اطراف منتقل می‌شوند. همچنین اجرای این نوع دال‌ها به‌دلیل سادگی قالب‌بندی و آرماتورگذاری، بسیار ساده‌تر از دال‌های دارای تیر می‌باشد. در نتیجه دال‌های تخت در بسیاری موارد از دال‌های متکی بر تیر از نظر اقتصادی به‌صرفه‌تر هستند. وقوع دو نوع گسیختگی برشی در این سازه‌ها محتمل است. نوع اول برش ساده یا برش یک طرفه است که در سیستم دال‌های تخت، ترک‌های مورب را به وجود می‌آورد. مقطع بحرانی در برش یک طرفه به فاصله‌ی عمق موثر دال از بر ستون یا سرستون می‌باشد. نوع دیگر گسیختگی برشی، برش دو طرفه یا برش سوراخ‌کننده است. این نوع برش، ترک خوردگی مورب در اطراف ستون را ایجاد می‌کند و در تعیین ظرفیت برش سوراخ‌کننده‌ی دال‌های تخت از اهمیت خاصی برخوردار است. مقطع بحرانی در این حالت به فاصله‌ی نصف عمق موثر دال از بر ستون در نظر گرفته می‌شود.

استفاده از میلگردهای پلیمری مسلح الیافی<sup>۲</sup> (FRP) با مزایایی مانند نسبت بالای مقاومت به وزن، دوام قابل توجه، مقاومت بالا در برابر خوردگی و مقاومت کششی بسیار زیاد به‌جای میلگردهای فولادی با رویکرد افزایش ظرفیت برش سوراخ‌کننده در سیستم دال تخت توصیه می‌شود. ال‌گندی و ال‌سالاکاوی [۴-۱] در قالب مجموعه پژوهش‌های آزمایشگاهی، رفتار اتصالات ستون لبه-دال تخت بتنی تسلیح-شده با میلگردهای فولادی و میلگردهای پلیمری مسلح الیافی بر پایه شیشه<sup>۳</sup> تحت نیروی وزن و بار جانبی چرخه‌ای را بررسی کردند. نتایج نشان‌دهنده‌ی افزایش ۴۴ تا ۴۷ درصدی ظرفیت باربری جانبی اتصالات بوده است. همچنین این پژوهشگران دریافتند که استفاده از میلگردهای GFRP در مقایسه با میلگردهای فولادی در قالب تسلیح‌کننده‌ی خمشی، ظرفیت تغییر شکل اتصالات را قبل از وقوع برش سوراخ‌کننده به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد. در پژوهش انجام شده توسط ال‌گندی و ال‌سالاکاوی [۵] یک مدل عددی جهت تخمین ظرفیت برش سوراخ‌کننده‌ی اتصالات ستون-دال بتن مسلح تخت ارائه شد. اتصالات در دو گروه ستون میانی و ستون لبه به دال بتن مسلح تخت دسته‌بندی شدند. نتایج پژوهش نشان داد که مدل عددی پیشنهاد شده توانایی قابل‌ملاحظه‌ای در برآورد ظرفیت برش سوراخ‌کننده‌ی نمونه‌ها دارد به‌طوری‌که نسبت مقاومت برش سوراخ‌کننده‌ی آزمایشگاهی به عددی در اتصالات با ستون میانی برابر  $1/0.1 \pm 0/14$  و در اتصالات با ستون لبه برابر با  $1/0.1 \pm 0/0.9$  بوده است. حسن و همکاران [۶] رفتار برش سوراخ‌کننده‌ی اتصالات ستون-دال تخت بتنی تسلیح شده با میلگردهای فولادی و میلگردهای GFRP را بررسی کردند. تعداد ۱۷ نمونه اتصال با ستون میانی در این پژوهش ساخته شده و آزمایش شد. نتایج پژوهش نشان داد که استفاده از میلگردهای GFRP در ناحیه‌ی فشاری دال بتن مسلح تخت موجب افزایش سختی پس از وقوع ترک نمونه‌ها شده و ظرفیت برش سوراخ‌کننده را افزایش می‌دهد. دلود و همکاران [۷] در قالب یک پژوهش آزمایشگاهی رفتار برش سوراخ‌کننده‌ی نمونه‌های اتصال ستون-دال تخت بتنی تسلیح‌شده با میلگرد GFRP را مطالعه کردند. در این پژوهش تعداد ۱۰ نمونه اتصال ستون میانی-دال بتن مسلح تخت ساخته شد و نمونه‌ها تحت بارگذاری یکنواخت<sup>۴</sup> افزایشی قرار گرفتند. نتایج پژوهش نشان داد که استفاده از میلگردهای GFRP موجب کاهش ظرفیت برش سوراخ‌کننده دال بتن مسلح تخت می‌شود. نتایج حل تحلیلی نیز جهت تخمین ظرفیت برش سوراخ‌کننده ارائه شد و نشان داد که آیین‌نامه‌ی ACI 440-IR-03 [۸] نتایج محافظه‌کارانه‌ای را در تخمین ظرفیت برش سوراخ‌کننده ارائه می‌کند. احمد و همکاران [۹] در پژوهشی رفتار یک نمونه دال بتن مسلح تخت مربوط به پارکینگ گاراژی واقع در کبک کانادا با عمر ۴۰ سال را بررسی کردند. دال تخت بتنی این سازه با مساحت ۳۱۶۰ متر مربع با استفاده از میلگردهای GFRP به‌عنوان جایگزین میلگردهای فولادی مجدداً طراحی شده و ساخته شد. نتایج بررسی هزینه‌های ساخت نشان داد که استفاده از میلگردهای GFRP علی‌رغم افزایش هزینه‌ی اولیه نسبت به میلگردهای فولادی، هزینه‌ی کلی پروژه را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد. لازم به ذکر است که کرنش‌های نهایی اندازه‌گیری شده در دال تخت بتنی تسلیح شده با میلگردهای GFRP نیز از ۲۰ درصد کرنش نهایی میلگرد مذکور فراتر نرفت. در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی از برشگیرهای دنداندار دو سر GFRP<sup>۵</sup> در تسلیح برشی اتصالات ستون میانی-دال بتن مسلح تخت بهره‌جویی شد. نتایج پژوهش نشان داد که استفاده از برشگیرهای دنداندار GFRP موجب افزایش ظرفیت باربری، افزایش ظرفیت

<sup>1</sup> Flat Slab<sup>2</sup> Fiber Reinforced Polymer Bar<sup>3</sup> Glass Fiber Reinforced Polymer<sup>4</sup> Monotonic<sup>5</sup> GFRP double-headed shear studs

تغییر شکل و سختی پس از ترک نمونه‌ها خواهد شد [۱۰]. گودا و السالکاو [۱۱] تعداد ۵ نمونه اتصال ستون میانی-دال تخت بتنی تسلیح شده با میلگردهای فولادی و GFRP را ساخته و تحت اثر هم‌زمان نیروی متمرکز وارد شده بر وجه بالای ستون و لنگر نامتعادل قرار دادند. اثر نوع و نسبت تسلیح‌کننده فولادی یا GFRP و مقاومت فشاری بتن نیز در این پژوهش بررسی شد. نتایج نشان دهنده افزایش ظرفیت برش سوراخ‌کننده و کاهش تغییر شکل نمونه‌های تسلیح شده با میلگردهای GFRP نسبت به میلگردهای فولادی بوده است. همچنین افزایش مقاومت فشاری بتن نیز به‌طور قابل ملاحظه‌ای ظرفیت برش سوراخ‌کننده را افزایش داد. سلاما و همکاران [۱۲] مدل جدیدی به نام مدل نواری اصلاح شده را جهت پیش‌بینی مقاومت برش سوراخ‌کننده اتصالات ستون-دال تخت بتنی ارائه کردند. اثر مشخصات مکانیکی مصالح، هندسه‌ی اتصال و عمق موثر دال در مدل مذکور در نظر گرفته شد. مدل پیشنهاد شده انطباق قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی داشت. دراکتوس و همکاران [۱۳] اثر بار چرخه‌ای بر رفتار لرزه‌ای تعداد ۱۳ اتصال ستون میانی-دال بتن مسلح تخت فاقد تسلیح‌کننده‌ی برشی را بررسی کردند. اثر نیروی وزن و نسبت تسلیح‌کننده‌ی خمشی نیز مطالعه شد. نتایج نشان‌دهنده‌ی کاهش مقاومت خمشی، سختی و ظرفیت تغییر شکل در نمونه‌های با نیروی وزن و نسبت تسلیح‌کننده‌ی کم تحت اثر بار چرخه‌ای بوده است. میلیگان و همکاران [۱۴] در قالب یک تحلیل اجزای محدود با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS [۱۵] رفتار اتصالات ستون مستطیلی-دال بتن مسلح تخت را مطالعه کردند. نتایج پژوهش نشان داد که ظرفیت برش سوراخ‌کننده‌ی اتصال نه تنها به نسبت ابعاد مقطع ستون ( $\beta$ ) بستگی دارد، بلکه نسبت بعد کوچک‌تر مقطع ستون به عمق موثر دال ( $\kappa$ ) نیز اثر قابل ملاحظه‌ای بر پاسخ اتصال دارد به‌طوری‌که افزایش  $\kappa$  موجب کاهش ظرفیت برشی اتصال کاهش می‌گردد.

عمده‌ی پژوهش‌ها در خصوص مطالعه‌ی رفتار اتصالات ستون-دال بتن مسلح تخت به‌صورت آزمایشگاهی بوده و با توجه به دو عامل هزینه و زمان در ساخت و آزمایش اتصالات، پارامترهای موثر بر رفتار این سازه‌ها به‌صورت محدود مورد بررسی قرار گرفته‌اند. شبیه‌سازی به روش اجزای محدود می‌تواند یک روش مقرون‌به‌صرفه از نظر اقتصادی و زمان برای بررسی پارامترهای موثر بر رفتار این سازه‌ها باشد. همچنین پژوهش‌های پیشینیان بیشتر در زمینه‌ی رفتار اتصالات ستون میانی-دال بتن مسلح تخت تحت بار متمرکز بوده و مطالعات در خصوص اتصالات ستون لبه و ستون گوشه به دال تخت بتنی که انتقال لنگر به محل اتصال آن اجتناب‌ناپذیر است، بسیار محدود می‌باشد. لذا در پژوهش حاضر تعداد ۱۴ نمونه‌ی آزمایشگاهی شامل شش اتصال با ستون میانی، پنج اتصال با ستون لبه و سه اتصال با ستون گوشه به دال بتن مسلح تخت از میان پژوهش‌های پیشینیان انتخاب شدند و جهت بررسی توانایی نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS [۱۵] در برآورد ظرفیت برش سوراخ‌کننده، حالت گسیختگی و نحوه‌ی شروع و گسترش ترک‌ها از نظر انطباق با نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی شبیه‌سازی شدند. همچنین با توجه به محدودیت‌های آزمایش اتصالات ستون-دال بتن مسلح تخت از نظر بررسی پارامترهای موثر بر رفتار سازه‌ی مذکور، بررسی اثر نوع تسلیح‌کننده (میلگرد فولادی، میلگرد GFRP و CFRP)، نسبت تسلیح‌کننده‌ی دال، افزایش ضخامت دال و ابعاد ستون در قالب شبیه‌سازی سه‌بعدی با استفاده از روش اجزای محدود بررسی شدند. لازم به ذکر است که نتایج آیین‌نامه‌های ACI 440.1R-15 [۱۶]، CSA S806-12 [۱۷]، JSCE-97 [۱۸] و BSI 8110-97 [۱۹] در برآورد ظرفیت برش سوراخ‌کننده با نتایج نمونه‌ی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده نیز مقایسه شدند.

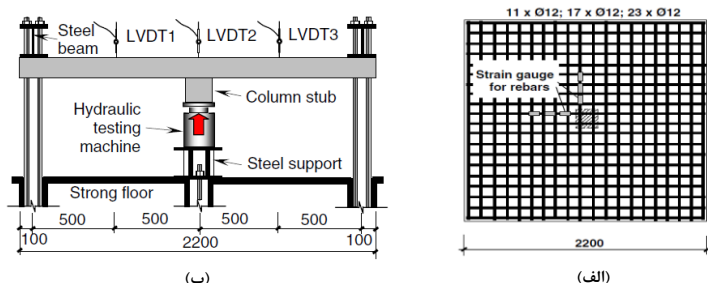
## ۲- جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی پژوهش‌های پیشینیان

جهت بررسی توانایی نرم‌افزار ABAQUS [۱۵] در تخمین ظرفیت برش سوراخ‌کننده‌ی اتصالات با ستون میانی، ستون لبه و ستون گوشه به دال بتن مسلح تخت به‌ترتیب از نتایج پژوهش‌های آزمایشگاهی نوین-مین و راوناک [۲۰]، سلاما و همکاران [۲۱] و گولدین و اوربن [۲۲] بهره‌جویی شد.

### ۲-۱- جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی نوین-مین و راوناک

پژوهش آزمایشگاهی نوین-مین و راوناک [۲۰] شامل مجموعه آزمایش‌های اتصال ستون میانی-دال تخت بتنی تسلیح شده با میلگردهای فولادی و GFRP می‌باشد. این پژوهشگران تعداد ۶ نمونه اتصال با ستون میانی به ابعاد سطح مقطع ۲۰۰ در ۲۰۰ میلی‌متر به دال تخت بتنی به ابعاد ۲۲۰۰ در ۲۲۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۵۰ میلی‌متر را با میلگردهای فولادی و GFRP تسلیح کردند. شکل ۱ (الف)

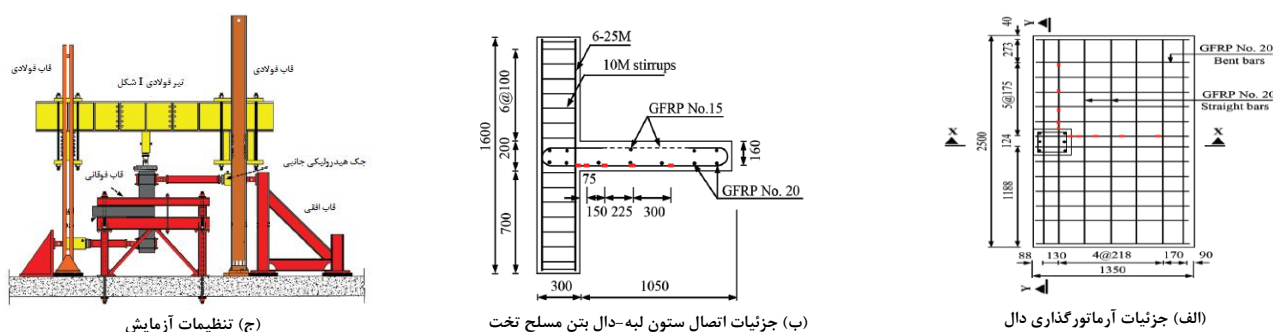
نمونه‌های ساخته شده را نشان می‌دهد. از سه نسبت تسلیح‌کننده‌ی خمشی  $0.04$ ،  $0.06$  و  $0.08$  درصد در ساخت نمونه‌ها بهره‌جویی شد. شکل ۱ (ب) نیز نحوه‌ی بارگذاری نمونه‌ها را نشان می‌دهد. نمونه‌های ساخته شده تحت بار متمرکز وارد شده بر وجه بالایی ستون از طریق یک جک هیدرولیکی به ظرفیت  $1000$  کیلونیوتن قرار گرفتند. تکیه‌گاه‌های ۴ طرف دال نیز بصورت مفصلی در نظر گرفته شدند.



شکل ۱: (الف) جزئیات آرماتورگذاری، (ب) جزئیات بارگذاری (اعداد داخل شکل‌ها بر حسب میلی‌متر می‌باشند). [۲۰]

## ۲-۲- جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی سلاما و همکاران

پژوهش سلاما و همکاران [۲۱] شامل مجموعه آزمایش‌های اتصال ستون لبه-دال تخت بتنی تسلیح شده با میلگردهای فولادی و GFRP می‌باشد. مطابق شکل ۲ (الف-ج)، ستون بتنی با ابعاد سطح مقطع  $300$  در  $300$  میلی‌متر و ارتفاع  $1600$  میلی‌متر و دال تخت بتنی به ابعاد  $1350$  در  $2500$  میلی‌متر و ضخامت  $200$  میلی‌متر ساخته شد. میلگردهای GFRP وجه پایین دال (قطر  $20$  میلی‌متر) به دو صورت دارای خم در دو انتها و مستقیم و میلگردهای GFRP وجه بالای دال (قطر  $15$  میلی‌متر) به صورت مستقیم به کار رفتند. از میلگردهای فولادی به قطر  $25$  میلی‌متر به عنوان آرماتور طولی ستون و از میلگردهای فولادی به قطر  $10$  میلی‌متر به عنوان آرماتور عرضی ستون بهره‌جویی شد. مطابق شکل ۲ (ج)، نمونه‌های ساخته شده تحت اثر هم‌زمان نیروی قائم و لنگر نامتعادل قرار گرفتند. بار قائم از طریق یک جک هیدرولیکی به ظرفیت  $1500$  کیلونیوتن به وجه بالایی ستون وارد شد. جک مورد نظر در مرکز یک تیر I شکل فولادی نصب شده است. تعداد دو جک هیدرولیکی به صورت افقی با ظرفیت  $1000$  کیلونیوتن جهت اعمال لنگر نامتعادل به نمونه‌ها متصل شدند. به منظور ایجاد آزادی جانبی ستون، از غلتک‌های فولادی بین جک اعمال بار قائم و وجه بالایی ستون بهره‌جویی شد. سه وجه بالایی و پایینی دال نیز به وسیله‌ی سه عدد تیر به صورت مفصلی مهار شدند. لازم به ذکر است که نسبت لنگر نامتعادل به نیروی برشی در این پژوهش برابر  $0.3$  متر و  $0.6$  متر در نظر گرفته شد.



شکل ۲: جزئیات نمونه‌های اتصال ستون لبه-دال بتنی مسلح تخت (اعداد داخل شکل‌ها بر حسب میلی‌متر می‌باشند). [۲۱]

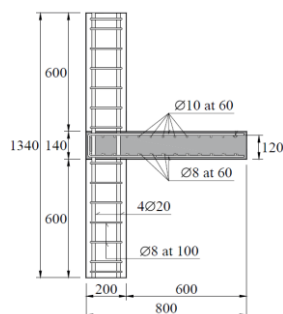
## ۲-۳- جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی گولدین و اوربن

در یک پژوهش آزمایشگاهی، گولدین و اوربن [۲۲] تعداد ۳ نمونه اتصال ستون گوشه-دال بتنی مسلح تخت را ساخته و بارگذاری کردند. اثر افزایش سربار ستون ( $500$ ،  $1000$  و  $1500$  کیلونیوتن) به عنوان متغیر پژوهش در نظر گرفته شد. مطابق شکل ۳ (الف) و ۳ (ب)، اتصال مورد نظر از ستون مربعی بتنی با ابعاد سطح مقطع  $200$  در  $200$  میلی‌متر و ارتفاع  $1340$  میلی‌متر و دال تخت بتنی مربعی به ابعاد  $800$  در  $800$  میلی‌متر و ضخامت  $140$  میلی‌متر ساخته شد. از میلگردهای فولادی به قطر  $10$  میلی‌متر در وجوه بالا و پایین دال جهت تسلیح خمشی بهره‌جویی شد. همچنین میلگردهای فولادی به قطر  $20$  میلی‌متر به عنوان آرماتور طولی ستون و میلگردهای فولادی به قطر

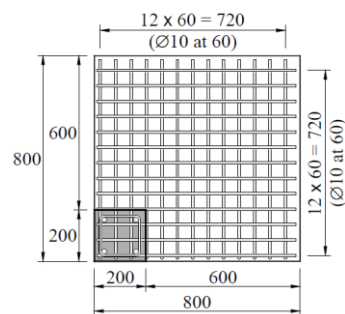
۸ میلی متر به عنوان آرماتور عرضی ستون به کار رفتند. مطابق شکل ۳(و)، بارگذاری با اعمال بار محوری بر وجه بالایی ستون آغاز شد. بارگذاری دال نیز از طریق یک جک هیدرولیکی به ظرفیت ۲۰۰ کیلونیوتن انجام شد. در این پژوهش خروج از مرکزیت بار وارد شده به دال نسبت به به پهنای ستون برابر مقدار ثابت ۱/۲۵ در نظر گرفته شد.



(ج) تنظیمات آزمایش



(ب) جزئیات آرماتورگذاری اتصال



(الف) جزئیات آرماتورگذاری دال تخت

شکل ۳: جزئیات نمونه‌های اتصال ستون گوشه-دال بتن مسلح تخت (اعداد داخل شکل بر حسب میلی متر می‌باشند). [۲۲]

### ۳- جزئیات شبیه‌سازی نمونه‌ها به روش اجزای محدود

جدول ۱ جزئیات نمونه‌های پژوهش‌های آزمایشگاهی پیشین را نشان می‌دهد. ردیف‌های ۱ تا ۶ نمونه‌های اتصال با ستون میانی، ردیف‌های ۷ تا ۱۱ نمونه‌های اتصال با ستون لبه و ردیف‌های ۱۲ تا ۱۴ نمونه‌های اتصال با ستون گوشه را نشان می‌دهد. علامت-های H و N در نمونه‌های اتصال با ستون لبه به ترتیب نشان‌دهنده بتن با مقاومت معمولی و بتن پرمقاومت و علامت‌های L، M و H در اتصالات با ستون گوشه نشان‌دهنده سه مقدار سربار کمینه<sup>۶</sup> (۵۰۰ کیلونیوتن)، متوسط<sup>۷</sup> (۱۰۰۰ کیلونیوتن) و بیشینه<sup>۸</sup> (۱۵۰۰ کیلونیوتن) می‌باشد.

جدول ۱: جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی پیشین جهت شبیه‌سازی [۲۰-۲۲]

ردیف	نام نمونه	جزئیات
۱	GSL-PUNC-0.4	اتصال تسلیح‌شده با ۱۱ عدد میلگرد GFRP به قطر ۱۲ میلی‌متر در دو جهت عمود برهم با نسبت میلگرد ۰/۴ درصد
۲	SSL-PUNC-0.4	اتصال تسلیح‌شده با ۱۱ عدد میلگرد فولادی به قطر ۱۲ میلی‌متر در دو جهت عمود برهم با نسبت میلگرد ۰/۴ درصد
۳	GSL-PUNC-0.6	اتصال تسلیح‌شده با ۱۷ عدد میلگرد GFRP به قطر ۱۲ میلی‌متر در دو جهت عمود برهم با نسبت میلگرد ۰/۶ درصد
۴	SSL-PUNC-0.6	اتصال تسلیح‌شده با ۱۷ عدد میلگرد فولادی به قطر ۱۲ میلی‌متر در دو جهت عمود برهم با نسبت میلگرد ۰/۶ درصد
۵	GSL-PUNC-0.8	اتصال تسلیح‌شده با ۲۳ عدد میلگرد GFRP به قطر ۱۲ میلی‌متر در دو جهت عمود برهم با نسبت میلگرد ۰/۸ درصد
۶	GSL-PUNC-0.8	اتصال تسلیح‌شده با ۲۳ عدد میلگرد فولادی به قطر ۱۲ میلی‌متر در دو جهت عمود برهم با نسبت میلگرد ۰/۸ درصد
۷	S-N-0.3	اتصال تسلیح‌شده با میلگرد فولادی با بتن معمولی و نسبت لنگر به برش ۰/۳ متر
۸	G-N-0.3	اتصال تسلیح‌شده با میلگرد GFRP با بتن معمولی و نسبت لنگر به برش ۰/۳ متر
۹	G-H-0.3	اتصال تسلیح‌شده با میلگرد GFRP با بتن پرمقاومت و نسبت لنگر به برش ۰/۳ متر
۱۰	G-N-0.6	اتصال تسلیح‌شده با میلگرد GFRP با بتن معمولی و نسبت لنگر به برش ۰/۶ متر
۱۱	G-H-0.6	اتصال تسلیح‌شده با میلگرد GFRP با بتن پرمقاومت و نسبت لنگر به برش ۰/۶ متر
۱۲	MN/1.25/L	اتصال ستون گوشه-دال بتن مسلح تخت با سربار ستون ۵۰۰ کیلونیوتن
۱۳	MN/1.25/M	اتصال ستون گوشه-دال بتن مسلح تخت با سربار ستون ۱۰۰۰ کیلونیوتن
۱۴	MN/1.25/H	اتصال ستون گوشه-دال بتن مسلح تخت با سربار ستون ۱۵۰۰ کیلونیوتن

جهت شبیه‌سازی هندسه‌ی اتصالات ستون-دال از المان‌های سه بعدی ۸ گره‌ای مکعبی با فرمول‌بندی کاهش یافته C3D8R استفاده شد. همچنین جهت شبیه‌سازی آرماتورهای فولادی و GFRP از المان‌های خرپایی<sup>۹</sup> سه بعدی با دو درجه آزادی T3D2 بهره‌جویی شد. جدول ۲ مشخصات مصالح بتنی اتصالات با ستون میانی و ستون لبه به دال تخت را نشان می‌دهد. مشخصات مصالح بتنی در نمونه-

<sup>6</sup> Low  
<sup>7</sup> Medium  
<sup>8</sup> High  
<sup>9</sup> Truss

های پژوهش نوین-مین و راوناک [۲۰] یکسان بود، لذا یک نمونه جهت بررسی انتخاب گردید. مقاومت فشاری بتن ستون بالایی، پایینی و دال تخت در پژوهش گولدین و اوربن [۲۲] به ترتیب برابر با ۵۵ مگاپاسکال، ۲۸/۹ مگاپاسکال و ۴۵/۵ مگاپاسکال می باشد. ضریب ارتجاعی بتن ستون و دال به ترتیب ۳۴/۷ گیگاپاسکال و ۲۳/۶ گیگاپاسکال در نظر گرفته شده است. جهت شبیه سازی ناحیه ی غیر خطی مصالح بتنی از تئوری مندر [۲۳] بهره جویی شد. همچنین از معیار بتن آسیب دیده ی خمیری<sup>۱۰</sup> جهت شبیه سازی رفتار ناحیه ی غیر خطی مصالح بتنی در نرم افزار ABAQUS [۱۵] بهره جویی شد. جهت بررسی آسیب های ناحیه ی کششی و فشاری در المان اتصال ستون به دال بتنی از پارامترهای آسیب ناحیه ی فشاری بتن<sup>۱۱</sup> ( $d_c$ ) و آسیب ناحیه ی کششی بتن<sup>۱۲</sup> ( $d_t$ ) بهره جویی شد. جدول ۳ مشخصات مصالح میلگردهای فولادی و GFRP مورد استفاده در پژوهش حاضر را نشان می دهد. رفتار میلگردهای GFRP تا نقطه ی گسیختگی بصورت خطی وارد نرم افزار شد.

جدول ۲: مشخصات مصالح بتنی [۲۱،۲۰]

ردیف	نام نمونه	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	مقاومت کششی (مگاپاسکال)	ضریب ارتجاعی (گیگاپاسکال)
۱	GSL-PUNC-0.4	۴۳/۷۸	۳/۹۲	۳۱/۰۹
۲	S-N-0.3	۳۲/۶۷	۳/۱۱	۲۶/۸۶
۳	G-N-0.3	۳۰/۹۲	۳/۱۱	۲۶/۱۴
۴	G-H-0.3	۷۱/۵۰	۵/۴۵	۳۹/۴۴
۵	G-N-0.6	۳۲/۳۳	۲/۹۷	۲۶/۷۴
۶	G-H-0.6	۷۱/۶۷	۵/۴۵	۳۹/۷۹

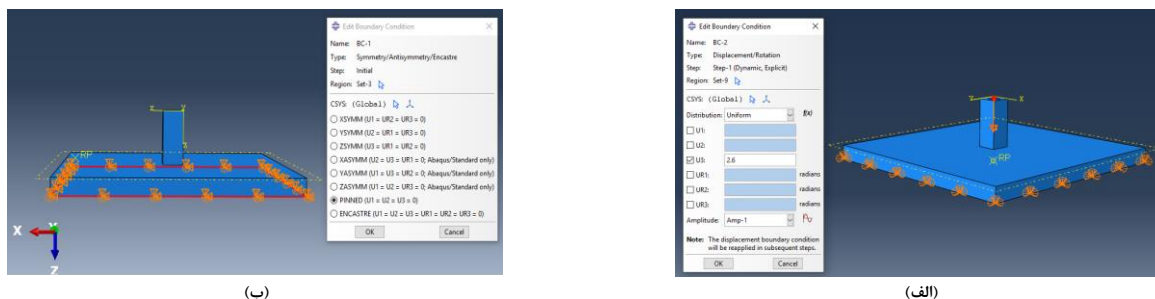
جدول ۳: مشخصات میلگردهای فولادی و GFRP [۲۱،۲۰]

نام میلگرد	قطر (میلی متر)	مقاومت کششی (مگاپاسکال)	مقاومت تسلیم (مگاپاسکال)	مقاومت نهایی (مگاپاسکال)	ضریب ارتجاعی (گیگاپاسکال)
GFRP 12	۱۲	۵۸۲	-	-	۴۸
GFRP 15 مستقیم	۱۵	۱۳۲۳	-	-	۶۴/۸
GFRP 20 مستقیم	۲۰	۱۳۳۴	-	-	۶۴/۹
GFRP 20 خم دار	۲۰	۱۲۱۰	-	-	۵۳
Steel 10	۱۰	-	۵۰۶	۷۷۲	۲۰۸
Steel 12	۱۲	-	۵۲۰	۶۵۵	۲۰۰
Steel 15	۱۵	-	۵۵۶	۷۳۱	۱۹۸
Steel 20 مستقیم	۲۰	-	۳۷۶	۵۶۸	۲۰۰
Steel 20 خم دار	۲۰	-	۳۷۶	۵۶۸	۲۰۰
Steel 25	۲۵	-	۳۷۶	۵۵۶	۲۰۴

جهت بارگذاری نمونه های اتصال ستون میانی-دال بتن مسلح تخت، مقدار خیز نهایی نمونه ها با توجه به نتایج آزمایش به وجه بالایی ستون وارد شد. شکل ۴ جزئیات بارگذاری و اختصاص شرایط تکیه گاهی مفصلی اتصالات ستون میانی-دال تخت بتنی را نشان می دهد. از قید اندرکنشی مدفون شده<sup>۱۳</sup> نیز جهت ایجاد پیوستگی میان آرماتورهای فولادی یا GFRP با اتصال ستون-دال بتنی بهره جویی گردید.

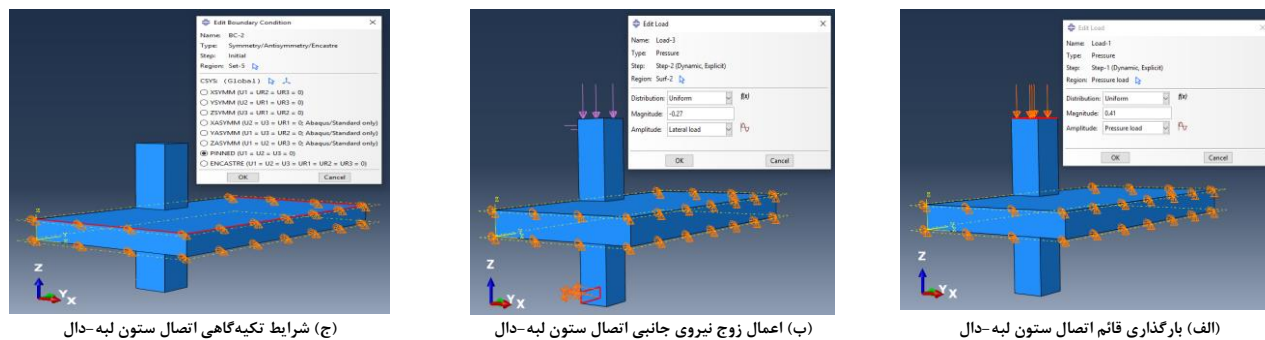
<sup>10</sup> Concrete Damaged Plasticity (CDP)<sup>11</sup> Concrete Compression Damage<sup>12</sup> Concrete Tension Damage<sup>13</sup> Embedded region





شکل ۴: (الف) جزئیات بارگذاری، (ب) اختصاص شرایط تکیه‌گاهی نمونه‌های اتصال ستون میانی-دال بتن مسلح تخت

شکل ۵ نیز نحوه بارگذاری نمونه‌های اتصال ستون لبه-دال بتن مسلح تخت در نرم‌افزار ABAQUS [۱۵] را نشان می‌دهد. مطابق شکل مذکور، ابتدا یک نیروی فشاری به سطح بالای ستون وارد شد. سپس لنگر نامتعادل در قالب زوج نیرو به دو وجه کناری ستون وارد شد. لازم به ذکر است که با توجه به شرایط تکیه‌گاهی نمونه‌های آزمایشگاهی، شرایط تکیه‌گاهی نمونه‌ی شبیه‌سازی نیز از نوع مفصلی انتخاب شد. نحوه بارگذاری نمونه‌های اتصال ستون گوشه-دال بتن مسلح تخت در نرم‌افزار ABAQUS [۱۵] در شکل ۶ آورده شده است. شکل مذکور، سربار ستون و نیروی وارد بر وجه فوقانی دال را نشان می‌دهد. لازم به توضیح است که شرایط تکیه‌گاهی وجه پایینی ستون نیز گیردار در نظر گرفته شد.

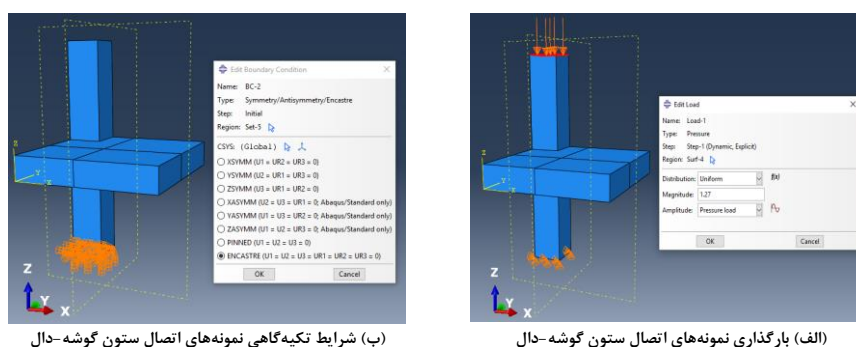


(ج) شرایط تکیه‌گاهی اتصال ستون لبه-دال

(ب) اعمال زوج نیروی جانبی اتصال ستون لبه-دال

(الف) بارگذاری قائم اتصال ستون لبه-دال

شکل ۵: جزئیات بارگذاری و اختصاص شرایط تکیه‌گاهی نمونه‌های اتصال ستون لبه-دال بتن مسلح تخت



(ب) شرایط تکیه‌گاهی نمونه‌های اتصال ستون گوشه-دال

(الف) بارگذاری نمونه‌های اتصال ستون گوشه-دال

شکل ۶: جزئیات بارگذاری و اختصاص شرایط تکیه‌گاهی گیردار نمونه‌های اتصال ستون گوشه-دال بتن مسلح تخت

#### ۴- نتایج شبیه‌سازی نمونه‌ها

##### ۴-۱- نتایج شبیه‌سازی نمونه‌های اتصال ستون میانی-دال بتن مسلح تخت

جدول ۴ معادلات ارائه شده برای محاسبه‌ی ظرفیت برش سوراخ‌کننده‌ی دال تخت بتنی تسلیح شده با میلگردهای FRP را نشان می‌دهد. در روابط (۱) تا (۴)،  $V_c$  ظرفیت برش سوراخ‌کننده‌ی دال،  $f_c^{\prime}$  مقاومت فشاری بتن بر حسب مگاپاسکال،  $\rho_f$  نسبت آرماتورهای FRP،  $E_f$  ضریب ارتجاعی میلگردهای FRP و  $E_c$  ضریب ارتجاعی بتن بر حسب گیگاپاسکال می‌باشد.  $b_{0.75d}$  نیز محیط قسمت بحرانی



برای ارزیابی برش سوراخ‌کننده و  $d$  نیز عمق موثر دال می‌باشد.  $n_f$  نیز نسبت ضریب ارتجاعی میلگرد FRP به ضریب ارتجاعی بتن می‌باشد. در روابط (۵) تا (۷)  $\beta_c$  نسبت بعد بزرگتر ستون به بعد کوچکتر آن،  $\phi_c$  ضریب کاهش مقاومت بتن،  $\lambda$  ضریب وزن بتن (برای بتن معمولی برابر با یک) و  $\alpha_s$  ضریبی است که برای ستون‌های میانی برابر ۴۰، برای ستون‌های کناری برابر با ۳۰ و برای ستون‌های گوشه برابر با ۲۰ می‌باشد. در روابط (۸) تا (۱۲)  $\beta_d$  ضریب در نظر گرفتن عمق موثر،  $\beta_p$  عامل نشان‌دهنده اختلاف میان ضریب ارتجاعی میلگردهای FRP و فولادی،  $E_s$  ضریب ارتجاعی میلگردهای فولادی،  $u_0$  محیط بحرانی،  $\gamma_b$  ضریب ایمنی جزئی که برابر با ۱/۳ یا ۱/۵ برای بتن‌های با مقاومت کمتر از ۵۰ مگاپاسکال و برابر با یک برای بتن‌های با مقاومت بیشتر از ۵۰ مگاپاسکال می‌باشد.  $f_{pca}$  نیز مقاومت فشاری طراحی بتن بر حسب مگاپاسکال می‌باشد. در روابط (۱۳) تا (۱۴)  $\gamma_m$  ضریب ایمنی جزئی برابر با ۱/۲۵،  $\rho_s$  نسبت آرماتورهای فولادی،  $\rho_x$  و  $\rho_y$  نسبت تسلیح‌کننده‌های خمشی در راستای پهنای موثر دال در دو جهت متعامد به طوری که پهنای موثر برابر است با پهنای ستون به اضافه‌ی  $1.5d$  از وجه ستون،  $f_{cu}$  مقاومت بتن مشخصه مکعبی ( $f_{cu} \approx 1.25f_c$ ) و نباید کمتر از ۲۵ مگاپاسکال و بیشتر از ۴۰ مگاپاسکال باشد. نمودارهای ارائه شده در شکل ۷ مقایسه‌ی پاسخ نیرو-تغییرمکان وسط دهانه‌ی دال را برای نمونه‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده‌ی اتصال ستون میانی-دال بتن مسلح تخت نشان می‌دهد. جدول ۵ نیز ظرفیت برش سوراخ‌کننده را براساس نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی، شبیه‌سازی شده و آیین‌نامه‌های [۱۶] ACI 440.1R-15، [۱۷] CSA S806-12، [۱۸] JSCE-97 و [۱۹] BSI 8110-97 نشان می‌دهد. در جدول مذکور  $V_{exp}$  ظرفیت برش سوراخ‌کننده‌ی نمونه‌ی آزمایشگاهی،  $V_{ABA}$  ظرفیت برش سوراخ‌کننده‌ی نمونه‌های شبیه‌سازی شده با نرم‌افزار ABAQUS [۱۵]،  $V_{ACI}$  ظرفیت برش سوراخ‌کننده‌ی نمونه‌ها براساس آیین‌نامه‌ی [۱۶] ACI 440.1R-15،  $V_{CSA}$  ظرفیت برش سوراخ‌کننده‌ی نمونه‌ها براساس آیین‌نامه‌ی [۱۷] CSA S806-12،  $V_{JSCE}$  ظرفیت برش سوراخ‌کننده‌ی نمونه‌ها براساس آیین‌نامه‌ی JSCE-97 [۱۸] و  $V_{BSI}$  ظرفیت برش سوراخ‌کننده‌ی نمونه‌ها براساس آیین‌نامه‌ی [۱۹] BSI 8110-97 می‌باشد. جدول ۶ نیز نسبت ظرفیت برش سوراخ‌کننده‌ی آزمایشگاهی به نرم‌افزار ABAQUS [۱۵] و آیین‌نامه‌های [۱۶] ACI 440.1R-15، [۱۷] CSA S806-12، [۱۸] JSCE-97 و [۱۹] BSI 8110-97 را نشان می‌دهد.

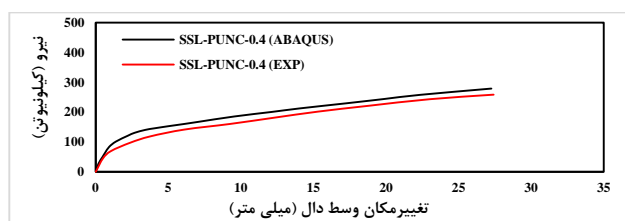
براساس نمودارهای شکل ۷، انطباق قابل‌قبولی میان نتایج آزمایش و شبیه‌سازی از نظر مقادیر نیروی بیشینه و تغییرشکل نهایی وجود دارد (میانگین خطای ۱۳/۲۷ درصد). حالت گسیختگی برش سوراخ‌کننده برای اتصالات شبیه‌سازی شده مشاهده شد که منطبق با حالت گسیختگی نتایج آزمایشگاهی است. البته سختی اولیه‌ی پاسخ نیرو-تغییرمکان وسط دهانه‌ی دال در اتصالات شبیه‌سازی شده بیشتر از آزمایش می‌باشد که می‌توان دلایلی از جمله فرض پیوستگی کامل بین آرماتورهای فولادی یا GFRP و بتن با در نظر گرفتن اندرکنش مدفون و عدم در نظر گرفتن لغزش آرماتورها در بتن و وجود ریز ترک‌ها در نمونه‌ی آزمایشگاهی قبل از بارگذاری را برای آن در نظر گرفت. این در حالی است که اثر ریز ترک‌ها قبل از بارگذاری در نمونه‌های شبیه‌سازی شده در نظر گرفته نشده است. نتایج مشابهی در این زمینه در پژوهش‌های پیشین نیز مشاهده شده است [۲۴، ۲۵]. شکل ۸ نیز نمایی از نحوه‌ی گسیختگی نمونه‌ی آزمایش شده و شبیه‌سازی شده‌ی GSL-PUNC-0.8 را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مذکور مشاهده می‌شود، نمونه‌ی مورد نظر در اثر برش سوراخ‌کننده گسیخته شده است و توزیع ترک‌ها در نمونه‌ی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده نیز بصورت گسترش ترک‌های مماسی<sup>۱۴</sup> می‌باشد. لازم به ذکر است که تسلیح‌کننده‌های خمشی دال در نمونه‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی GSL-PUNC-0.8 به ترتیب در نیروی ۶۳/۷۱ کیلونیوتن و ۷۳/۲۷ کیلونیوتن تسلیم شدند (۱۵ درصد اختلاف). مطابق جدول ۶، نسبت ظرفیت برش سوراخ‌کننده‌ی نتایج آزمایشگاهی به نتایج شبیه‌سازی با نرم‌افزار ABAQUS [۱۵] بسیار رضایت‌بخش بوده و در حدود ۰/۸۶ تا ۰/۹۲ می‌باشد. این در حالی است که نسبت مذکور برای آیین‌نامه‌ی [۱۶] ACI 440.1R-15 بسیار زیاد بوده (۲/۹۱ تا ۴/۷۵) و نشان‌دهنده‌ی کم برآورد کردن ظرفیت برش سوراخ‌کننده با استفاده از آیین‌نامه‌ی مذکور می‌باشد. در واقع نادیده گرفتن سختی محوری میلگردهای FRP در محاسبه‌ی عمق تار خنثی از دلایل اختلاف می‌باشد. نسبت مذکور براساس آیین‌نامه‌ی [۱۷] CSA S806-12 در حدود ۱/۵۰ تا ۲/۶۱، براساس آیین‌نامه‌ی [۱۸] JSCE-97 در حدود ۲/۰۵ تا ۳/۵۶ و با توجه به آیین‌نامه‌ی [۱۹] BSI 8110-97 نیز در حدود ۰/۴۱ تا ۰/۷۱ می‌باشد. لازم به ذکر است که اساس روابط ارائه شده در آیین‌نامه‌ی [۱۹] BSI 8110-97 برای اتصال ستون-دال تخت بتنی تسلیح شده با میلگرد فولادی می‌باشد که از سختی محوری میلگردهای FRP صرف‌نظر می‌کند. لذا موجب بیش از حد برآورد کردن مقادیر ظرفیت برش سوراخ‌کننده توسط آیین‌نامه‌ی مذکور

<sup>14</sup> Tangential Cracks

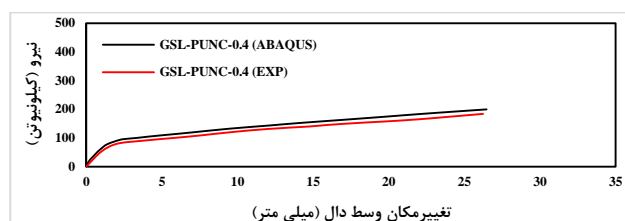
شده است.

جدول ۴: معادلات ارائه شده برای محاسبه ظرفیت برش سوراخ‌کننده‌ی دال تخت بتنی تسلیح شده با میلگردهای FRP

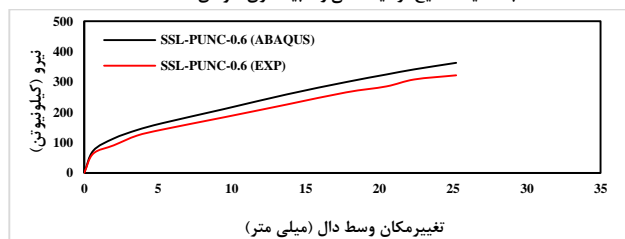
معادله	آیین‌نامه
$V_c = \frac{4}{5} k \sqrt{f_c} b_{o,0.5d} d$	(۱) [۱۶] ACI 440.1R-15
$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f$	(۲)
$n_f = \frac{E_f}{E_r}$	(۳)
$E_c = 4700 \sqrt{f_c}$	(۴)
$V_c = 0.028 \lambda \phi_c \left(1 + \frac{2}{\beta_c}\right) (E_f \rho_f f_c)^{\frac{1}{3}} b_{o,0.5d} d$	(۵) [۱۷] CSA S806-12
$V_c = 0.147 \lambda \phi_c \left(0.19 + \frac{\alpha_s d}{b_{o,0.5d}}\right) (E_f \rho_f f_c)^{\frac{1}{2}} b_{o,0.5d} d$	(۶)
$V_c = 0.056 \lambda \phi_c (E_f \rho_f f_c)^{\frac{1}{3}} b_{o,0.5d} d$	(۷)
$V_c = \beta_a \beta_p \beta_r \beta_{pcd} \frac{1}{\gamma_b} b_{o,0.5d} d$	(۸) [۱۸] JSCE-97
$\beta_a = (1000/d)^{0.25} \leq 1.50$	(۹)
$\beta_p = (100 \rho_f E_f / E_s)^{\frac{1}{3}} \leq 1.50$	(۱۰)
$\beta_r = 1 + \frac{1}{1+0.25 \frac{h_u}{d}}$	(۱۱)
$f_{pcd} = 0.2 \sqrt{f_c} \leq 1.2$	(۱۲)
$V_c = \frac{0.79}{\gamma_m} \left(\frac{400}{d}\right)^{\frac{1}{4}} (100 \rho_s)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{f_{cu}}{25}\right)^{\frac{1}{3}} b_{o,1.5d} d$	(۱۳) [۱۹] BSI 8110-97
$\rho_s = \rho_x + \rho_y$	(۱۴)



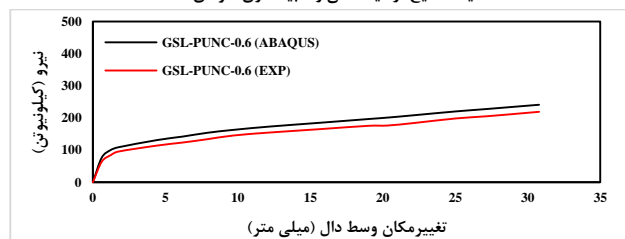
(ب) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی نمونه‌ی SSL-PUNC-0.4



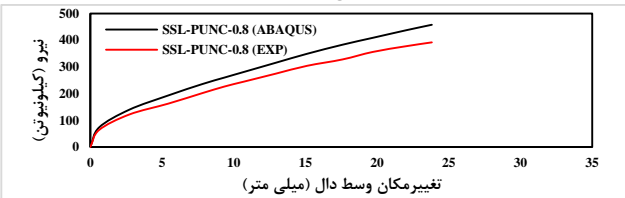
(الف) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی نمونه‌ی GSL-PUNC-0.4



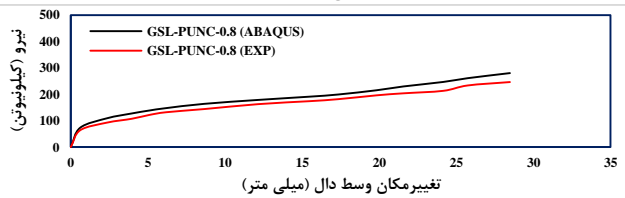
(د) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی نمونه‌ی SSL-PUNC-0.6



(ج) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی نمونه‌ی GSL-PUNC-0.6



(و) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی نمونه‌ی SSL-PUNC-0.8



(ه) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی نمونه‌ی GSL-PUNC-0.8

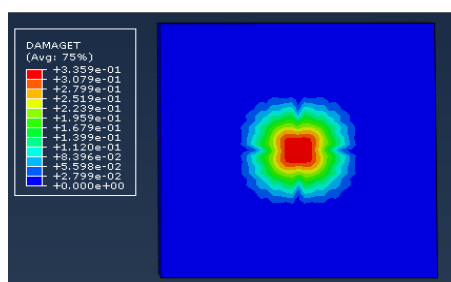
شکل ۷: مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی نمونه‌های اتصال ستون میانی-دال بتن مسلح تخت

جدول ۵: ظرفیت برش سوراخ‌کننده‌ی نمونه‌های اتصال ستون میانی-دال بتن مسلح تخت (کیلو نیوتن)

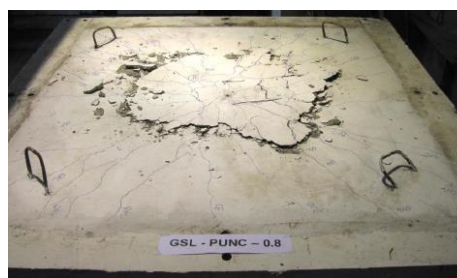
SSL-PUNC-0.8	GSL-PUNC-0.8	SSL-PUNC-0.6	GSL-PUNC-0.6	SSL-PUNC-0.4	GSL-PUNC-0.4	
۳۹۵	۲۴۴	۳۱۵	۲۱۲	۲۵۶	۱۸۰	$V_{exp}$
۴۵۷/۷۵	۲۸۰/۵۸	۳۶۳/۴۴	۲۴۰/۹۱	۲۷۹/۰۳	۱۹۹/۳۰	$V_{ABA}$
۸۳/۲۵	۸۳/۲۵	۷۲/۸۶	۷۲/۸۶	۶۰/۲۴	۶۰/۲۴	$V_{ACI}$
۱۵۱/۴۰	۱۵۱/۴۰	۱۳۷/۵۵	۱۳۷/۵۵	۱۲۰/۱۷	۱۲۰/۱۷	$V_{CSA}$
۱۱۰/۸۱	۱۱۰/۸۱	۱۰۰/۶۸	۱۰۰/۶۸	۸۷/۹۵	۸۷/۹۵	$V_{JSCE}$
۵۵۹/۵۵	۵۵۹/۵۵	۵۰۸/۳۸	۵۰۸/۳۸	۴۴۴/۱۱	۴۴۴/۱۱	$V_{BSI}$

جدول ۶: نسبت ظرفیت برش سوراخ‌کننده

SSL-PUNC-0.8	GSL-PUNC-0.8	SSL-PUNC-0.6	GSL-PUNC-0.6	SSL-PUNC-0.4	GSL-PUNC-0.4	
۰/۸۶	۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۸۹	۰/۹۲	۰/۹۰	$V_{exp}/V_{ABA}$
۴/۷۵	۲/۹۳	۴/۳۲	۲/۹۱	۴/۲۵	۲/۹۹	$V_{exp}/V_{ACI}$
۲/۶۱	۱/۶۱	۲/۲۹	۱/۵۴	۲/۱۳	۱/۵۰	$V_{exp}/V_{CSA}$
۳/۵۶	۲/۳۰	۳/۱۳	۲/۱۱	۲/۹۱	۲/۰۵	$V_{exp}/V_{JSCE}$
۰/۷۱	۰/۴۴	۰/۶۲	۰/۴۲	۰/۵۸	۰/۴۱	$V_{exp}/V_{BSI}$



شکل ۷: نحوه گسیختگی نمونه‌ی GSL-PUN-0.8 در شبیه‌سازی



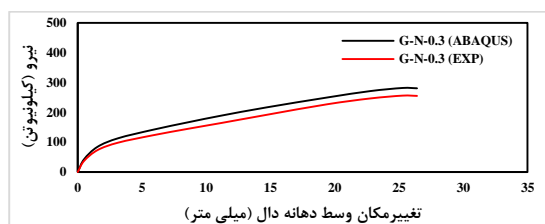
شکل ۷: نحوه گسیختگی نمونه‌ی GSL-PUN-0.8 پس از اتمام بارگذاری [۲۰]

شکل ۸: مقایسه‌ی نحوه‌ی گسیختگی نمونه‌ی GSL-PUN-0.8 در آزمایش و شبیه‌سازی

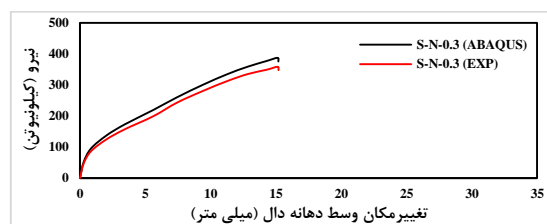
#### ۴-۲- نتایج شبیه‌سازی نمونه‌های اتصال ستون لبه-دال بتن مسلح تخت

نمودارهای ارائه شده در شکل ۹ به مقایسه‌ی پاسخ نیرو-تغییر مکان وسط دهانه‌ی دال نمونه‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده-ی اتصال ستون لبه-دال بتن مسلح تخت می‌پردازد. جدول ۷ مقایسه‌ی نتایج ظرفیت برش سوراخ‌کننده را بر اساس نمونه‌های آزمایشگاهی، شبیه‌سازی شده و آیین‌نامه‌های [۱۶] ACI 440.1R-15، [۱۷] CSA S806-12، [۱۸] JSCE-97 و [۱۹] BSI 8110-97 نشان می‌دهد. همچنین جدول ۸ نیز نتایج نسبت ظرفیت برش سوراخ‌کننده آزمایشگاهی به نرم‌افزار ABAQUS [۱۵] و آیین‌نامه‌های ACI 440.1R-15 [۱۶]، [۱۷] CSA S806-12، [۱۸] JSCE-97 و [۱۹] BSI 8110-97 را برای نمونه‌های اتصال ستون لبه-دال تخت نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۹، انطباق قابل‌قبولی از نظر ظرفیت نیروی نهایی و تغییر شکل وسط دهانه‌ی دال میان نتایج اتصالات آزمایشگاهی سلاما و همکاران [۲۱] و اتصالات شبیه‌سازی شده مشاهده می‌شود به طوری که میانگین خطای پاسخ نیرو-تغییر مکان وسط دهانه‌ی دال برای اتصالات آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده ۱۰/۸۹ درصد محاسبه شده است. با توجه به شکل مذکور، سختی اولیه‌ی پاسخ نیرو-تغییر مکان وسط دهانه‌ی دال در اتصالات شبیه‌سازی شده نیز بیشتر از نتایج آزمایش می‌باشد که می‌توان دلایلی از جمله عدم لغزش آرماتورها در بتن با در نظر گرفتن قید اندرکنش مدفون و وجود ریز ترک‌ها در نمونه‌ی آزمایشگاهی قبل از بارگذاری را برای آن متصور شد. همچنین وقوع گسیختگی ترد از نوع برش سوراخ‌کننده با توجه به افت شدید ظرفیت باربری در نمونه‌های شبیه‌سازی شده مشاهده می‌شود که مشابه نمونه‌های آزمایشگاهی می‌باشد. افزایش لنگر متعادل در نمونه‌های شبیه‌سازی مشابه نمونه‌های آزمایشگاهی موجب کاهش قابل-توجه ظرفیت برش سوراخ‌کننده شده است. نسبت ظرفیت برش سوراخ‌کننده نیز در حدود ۰/۸۵ تا ۰/۹۵ می‌باشد. مشابه نتایج نمونه‌های

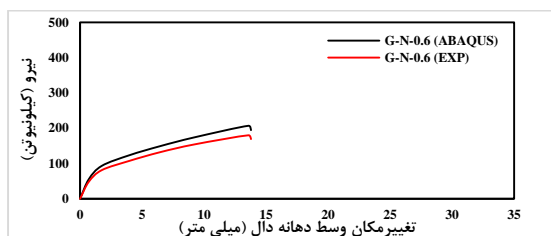
اتصال ستون میانی-دال بتن مسلح تخت، نسبت ظرفیت برش سوراخ‌کننده براساس آیین‌نامه‌ی ACI 440.1R-15 [۱۶] بسیار زیاد است (۲/۰۱ تا ۲/۹۹) و نشان‌دهنده‌ی کم برآورد کردن ظرفیت برش سوراخ‌کننده با استفاده از آیین‌نامه‌ی مذکور می‌باشد. این در حالی است که نسبت ظرفیت برش سوراخ‌کننده براساس آیین‌نامه‌های CSA S806-12 [۱۷] و JSCE-97 [۱۸] به ترتیب برابر ۱/۲۱ تا ۱/۳۷ و ۱/۱۴ تا ۱/۴۲ بوده و نشان می‌دهد که آیین‌نامه‌های مذکور با دقت قابل‌قبولی ظرفیت برش سوراخ‌کننده را تخمین زده‌اند. دلیل آن استفاده از نسبت  $\rho_s \frac{E_f}{E_s}$  به جای  $\rho_s$  در محاسبه‌ی سختی محوری میلگردهای FRP می‌باشد. از سوی دیگر نسبت مذکور براساس آیین‌نامه‌ی BSI 8110-97 [۱۹] در محدوده‌ی ۰/۵۳ تا ۰/۷۷ بوده و نشان می‌دهد که آیین‌نامه‌ی مذکور مقدار ظرفیت برش سوراخ‌کننده را بیش از حد تخمین زده است.



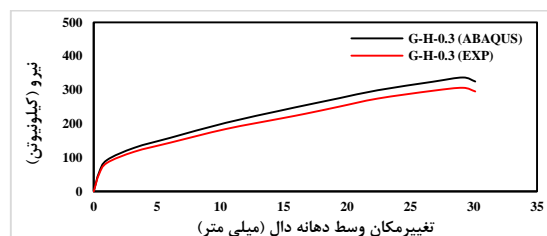
(ب) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی نمونه‌ی G-N-0.3



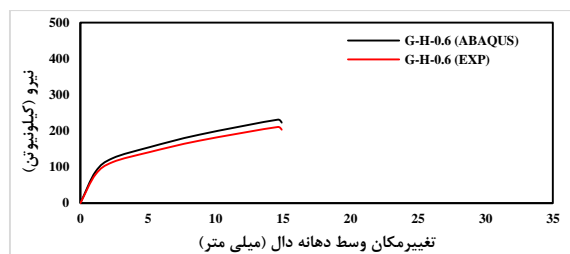
(الف) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی نمونه‌ی S-N-0.3



(د) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی نمونه‌ی G-N-0.6



(ج) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی نمونه‌ی G-H-0.3



(ه) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی نمونه‌ی G-H-0.6

شکل ۹: مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی نمونه‌های اتصال ستون لبه-دال بتن مسلح تخت

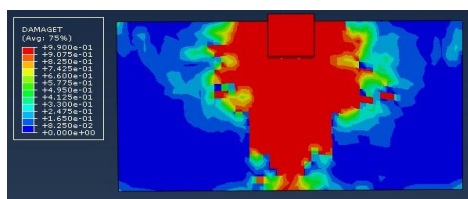
جدول ۷: ظرفیت برش سوراخ‌کننده‌ی نمونه‌های اتصال ستون لبه-دال بتن مسلح تخت (کیلو نیوتن)

G-H-0.6	G-N-0.6	G-H-0.3	G-N-0.3	S-N-0.3	
۲۱۳	۱۷۸	۳۰۶	۲۶۰	۳۵۹	$V_{exp}$
۲۳۳/۸۱	۲۰۷/۷۱	۳۳۹/۵۷	۲۸۳/۹۳	۳۸۷/۱۱	$V_{ABA}$
۱۰۰	۸۰	۱۵۲	۱۲۱	-	$V_{ACI}$
۱۶۲	۱۴۰	۲۴۷	۲۱۰	-	$V_{CSA}$
۱۵۰	۱۵۰	۲۲۸	۲۲۸	-	$V_{JSCE}$
۳۳۶	۳۳۶	۳۳۶	۳۳۶	-	$V_{BSI}$

جدول ۸: نسبت ظرفیت برش سوراخ کننده

G-H-0.6	G-N-0.6	G-H-0.3	G-N-0.3	S-N-0.3	
۰/۹۵	۰/۸۷	۰/۹۰	۰/۹۲	۰/۹۳	$V_{exp}/V_{ABA}$
۲/۱۳	۲/۲۱	۲/۰۱	۲/۱۵	۲/۹۹	$V_{exp}/V_{ACI}$
۱/۲۱	۱/۳۷	۱/۲۴	۱/۲۴	-	$V_{exp}/V_{CSA}$
۱/۴۲	۱/۱۹	۱/۳۴	۱/۱۴	-	$V_{exp}/V_{JSCE}$
۰/۶۳	۰/۵۳	۰/۹۱	۰/۷۷	-	$V_{exp}/V_{BSI}$

شکل ۱۰ نمایی از نحوه‌ی گسیختگی اتصال آزمایش شده و شبیه‌سازی شده‌ی G-H-0.6 را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مذکور انطباق قابل قبولی میان نحوه‌ی شکل‌گیری و گسترش ترک‌ها در نمونه‌ی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده‌ی مذکور وجود دارد. به طوری که اولین ترک‌های خمشی شعاعی ابتدا در وجه تحت کشش دال، در محل اتصال ستون-دال بتن مسلح تخت شبیه‌سازی شده در نیروی ۸۱/۴۲ کیلونیوتن اتفاق افتاد و به سمت تکیه‌گاه‌ها پیشروی کرد. این در حالی است که اولین ترک‌های خمشی شعاعی در نمونه‌ی آزمایشگاهی در نیروی ۷۳/۵۰ کیلونیوتن اتفاق افتاد. با افزایش بارگذاری در نمونه‌ی شبیه‌سازی، تعداد ترک‌ها و پهنای آن‌ها به خصوص در مجاورت ستون گسترش یافتند. لازم به ذکر است که ترک‌های مماسی اطراف ستون نیز با عبور از ترک‌های خمشی شعاعی با افزایش نیروی وارد شده به اتصال شکل گرفتند. مشابه با نمونه‌ی آزمایشگاهی، حالت گسیختگی نمونه‌ی شبیه‌سازی شده نیز وقوع برش سوراخ-کننده است.



(ب) گسترش ترک‌های وجه پایین دال در نمونه‌ی شبیه‌سازی شده G-H-0.6



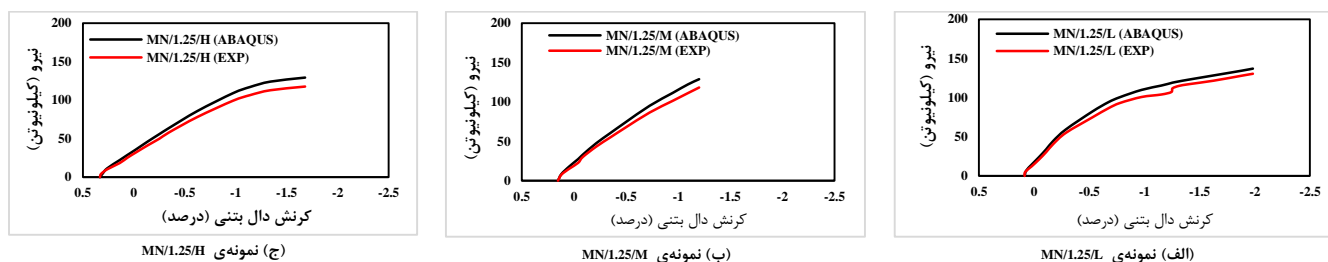
(الف) گسترش ترک‌های وجه پایین دال در نمونه‌ی آزمایشگاهی G-H-0.6 [۲۱]

شکل ۱۰: مقایسه‌ی نحوه‌ی گسیختگی نمونه‌ی G-H-0.6 در آزمایش و شبیه‌سازی

## ۵-۲- نتایج شبیه‌سازی نمونه‌های اتصال ستون گوشه-دال بتن مسلح تخت

شکل ۱۱ پاسخ نیرو-کرنش دال در اتصالات ستون گوشه-دال بتن مسلح تخت را نشان می‌دهد. جدول ۹ نیز نشان دهنده‌ی مقادیر ظرفیت برش سوراخ‌کننده براساس نتایج آزمایش و شبیه‌سازی و نسبت ظرفیت برش سوراخ‌کننده در نمونه‌های آزمایش شده به نرم‌افزار ABAQUS [۱۵] می‌باشد. با توجه به نتایج شکل ۱۱ و جدول ۹، اتصالات شبیه‌سازی شده به روش اجزای محدود از توانایی قابل قبولی در پیش‌بینی مقدار ظرفیت برش سوراخ‌کننده، سختی اولیه و حالت گسیختگی نمونه‌ها از نظر انطباق با نتایج آزمایشگاهی گولدین و اوربن [۲۲] برخوردارند. البته نرم‌افزار ABAQUS [۱۵] مقدار ظرفیت برش سوراخ‌کننده را مقداری بیشتر از نمونه‌های آزمایشگاهی تخمین زده است. به طوری که درصد اختلاف نتایج شبیه‌سازی نسبت به نتایج آزمایش در برآورد ظرفیت برش سوراخ‌کننده برای نمونه‌های MN/1.25/L، MN/1.25/M و MN/1.25/H به ترتیب برابر با ۵/۳۴ درصد، ۹/۲۴ درصد و ۹/۵۱ درصد می‌باشد که با توجه به شرایط ایده‌آل شبیه‌سازی از نظر رفتار مصالح، شرایط تکیه‌گاهی و شرایط بارگذاری نمونه‌ها توجیه‌پذیر است. همچنین استفاده از قید اندرکنشی مدفون برای آرماتورها در بتن نیز اثر لغزش آرماتورها را نادیده گرفته و می‌تواند از دلایل اختلاف نتایج باشد. نتایج مشابهی در این زمینه در پژوهش عبدالرحمان و همکاران [۲۶] نیز مشاهده شده است. براساس نتایج آزمایشگاهی گولدین و اوربن [۲۲]، اولین ترک‌ها در اتصالات MN/1.25/L، MN/1.25/M و MN/1.25/H به ترتیب در مقدار نیروهای ۲۰/۸۴ کیلونیوتن، ۱۵/۱۵ کیلونیوتن و ۱۰/۱۱ کیلونیوتن به وقوع پیوستند این در حالی است که وقوع اولین ترک‌ها در اتصالات شبیه‌سازی شده‌ی MN/1.25/L، MN/1.25/M و MN/1.25/H به ترتیب در نیروهای ۲۷/۹۳ کیلونیوتن، ۱۸/۰۴ کیلونیوتن و ۱۱/۳۲ کیلونیوتن می‌باشد. شکل ۱۲ نیز نحوه‌ی گسترش ترک‌ها در اتصال شبیه‌سازی شده‌ی MN/1.25/H را نشان می‌دهد. حالت گسیختگی نمونه‌ی آزمایشگاهی [۲۲] و شبیه‌سازی وقوع برش سوراخ‌کننده بوده است. اولین

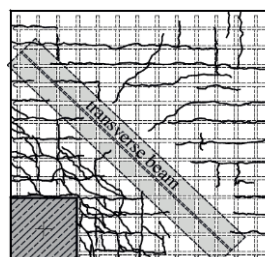
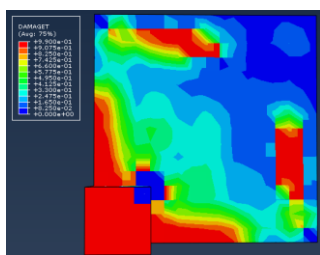
ترک‌ها در نمونه‌ی آزمایشگاهی MN/1.25/H از پژوهش گولدین و اوربن [۲۲] و نمونه‌ی شبیه‌سازی شده در محل اتصال ستون-دال و وجه فوقانی دال شکل گرفت و سپس به سمت وجه آزاد دال تخت گسترش یافت. با افزایش مقدار بار وارده، ترک‌های بیشتری در وجه پایینی دال به وقوع پیوستند و گسترش یافتند. با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی گولدین و اوربن [۲۲] در محل اتصال ستون-دال تخت بتنی شدت وقوع و گسترش ترک‌ها بدلیل مقدار بار محوری نسبتاً زیاد ستون (۱۵۰۰ کیلونیوتن) بسیار بیشتر است که این مساله در نمونه‌ی شبیه‌سازی شده نیز مشاهده می‌شود.



شکل ۱۱: مقایسه‌ی پاسخ نیرو-کرنش دال تخت بتنی اتصالات با ستون گوشه در آزمایش و شبیه‌سازی

جدول ۹: ظرفیت برش سوراخ‌کننده‌ی نمونه‌های اتصال ستون گوشه-دال بتن مسلح تخت (کیلونیوتن)

MN/1.25/H	MN/1.25/M	MN/1.25/L	
۱۱۸	۱۲۰	۱۳۰	$V_{exp}$
۱۲۹/۲۲	۱۳۱/۰۹	۱۳۶/۹۴	$V_{ABA}$
۰/۹۱	۰/۹۲	۰/۹۵	$V_{exp}/V_{ABA}$



شکل ۱۲: مقایسه‌ی نحوه‌ی گسترش ترک‌ها در نمونه‌ی آزمایشگاهی MN/1.25/H [۲۲] (ب) نحوه‌ی گسترش ترک‌ها در نمونه‌ی شبیه‌سازی شده MN/1.25/H (الف)

شکل ۱۲: مقایسه‌ی نحوه‌ی گسترش ترک‌های نمونه‌ی MN/1.25/H در آزمایش و شبیه‌سازی

## ۵- بررسی پارامترهای موثر در شبیه‌سازی

### ۵-۱- کاربرد میلگردهای CFRP به جای میلگردهای فولادی یا GFRP

تعداد ۲۳ اتصال ستون-دال تخت بتنی تسلیح شده با میلگردهای CFRP به قطرهای ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۵، ۱۶ و ۲۰ میلی‌متر (تعداد ۱۲ اتصال با ستون میانی، تعداد ۷ اتصال با ستون لبه و تعداد ۴ اتصال با ستون گوشه) شبیه‌سازی شدند. جدول ۱۰ مشخصات مصالح میلگردهای CFRP را نشان می‌دهد. جدول ۱۱ نیز جزئیات نمونه‌های شبیه‌سازی شده با میلگردهای CFRP را نشان می‌دهد. هدف از شبیه‌سازی نمونه‌های ردیف‌های ۴ تا ۶ اتصالات با ستون میانی (CSL-PUNC-0.4، CSL-PUNC-0.6، CSL-PUNC-0.8)، ردیف‌های ۱۳ تا ۱۶ اتصال با ستون لبه (C-N-0.3-15-20، C-N-0.6-15-20، C-H-0.3-15-20 و C-H-0.6-15-20) و ردیف ۲۱ جدول مذکور مقایسه-ی پارامتر ظرفیت برش سوراخ‌کننده‌ی آن با اتصالات تسلیح‌شده با میلگردهای فولادی و GFRP نظیرشان می‌باشد. شکل ۱۳ پاسخ نیرو-تغییر مکان وسط دهانه‌ی دال و نیرو-کرنش دال را نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی نمونه‌ها در قالب ظرفیت برش سوراخ‌کننده در جدول-های ۱۱ و ۱۲ ارائه شده است.

با توجه به نتایج ارائه شده مشاهده شد که افزایش قطر و تعداد میلگردهای CFRP اثر به‌سزایی بر افزایش ظرفیت برش سوراخ-کننده‌ی اتصالات دارد. در شبیه‌سازی نمونه‌های CSL-PUNC-0.26، CSL-PUNC-0.41 و CSL-PUNC-0.55 با ثابت نگه‌داشتن پارامتر قطر میلگرد CFRP برابر ۱۰ میلی‌متر، تعداد تسلیح‌کننده‌ها از ۱۱ به ۱۷ و ۲۳ افزایش یافتند و ظرفیت برش پانچ از ۲۰۷/۶۱ به ۲۸۶/۵۰ کیلونیوتن (۳۸ درصد) افزایش یافت. این روند در شبیه‌سازی اتصالات CSL-PUNC-0.51، CSL-PUNC-0.79 و CSL-PUNC-1.07 با ثابت نگه‌داشتن پارامتر قطر میلگرد CFRP برابر ۱۴ میلی‌متر و افزایش تعداد تسلیح‌کننده‌ها از ۱۱ تا به ۱۷ و ۲۳ نیز انجام شد و ظرفیت برش سوراخ‌کننده از ۲۸۴/۰۱ به ۳۴۰/۴۸ کیلونیوتن (۱۹/۸۸ درصد) افزایش یافت. لازم به ذکر است که شبیه‌سازی نمونه‌های CSL-PUNC-0.67، CSL-PUNC-1.04 و CSL-PUNC-1.40 نیز با ثابت نگه‌داشتن پارامتر قطر میلگرد CFRP برابر ۱۶ میلی‌متر و افزایش تعداد تسلیح‌کننده‌ها از ۱۱ به ۱۷ و ۲۳ انجام شد و ظرفیت برش سوراخ‌کننده از ۳۰۴/۷۷ به ۳۵۷/۰۹ کیلونیوتن (۱۷/۱۷ درصد) افزایش یافت. همچنین افزایش نسبت تسلیح‌کننده‌ها با کاهش فاصله‌ی آن‌ها در نمونه‌های ردیف‌های ۱ تا ۴، ۶ تا ۷، ۹ و ۱۰ تا ۱۲ نیز سختی اولیه-ی نمودار را به‌طور قابل‌توجهی افزایش داده است. با افزایش نسبت تسلیح‌کننده در نمونه‌های C-N-0.3-10-14 نسبت به نمونه‌ی C-N-0.3-14-16، ظرفیت برش سوراخ‌کننده از ۲۶۶/۹۱ کیلونیوتن به ۳۰۹/۲۲ کیلونیوتن (۱۵/۸۵ درصد) افزایش یافت. برای اتصالات ستون گوشه-دال بتن مسلح تخت نیز با افزایش قطر میلگرد CFRP از ۱۰ به ۱۶ میلی‌متر ظرفیت برش سوراخ‌کننده از ۷۷/۵۳ کیلونیوتن به ۱۰۲/۰۹ کیلونیوتن (۳۱/۶۸ درصد) افزایش یافت.

جدول ۱۲ به مقایسه‌ی ظرفیت برش سوراخ‌کننده‌ی اتصالات CSL-PUNC-0.4، CSL-PUNC-0.6 و CSL-PUNC-0.8 با ستون میانی، اتصالات C-N-0.3-15-20، C-N-0.6-15-20، C-H-0.3-15-20 و C-H-0.6-15-20 با ستون لبه و اتصال MN/1.25/H-CFRP12 با ستون گوشه با اتصالات تسلیح‌شده با میلگرد فولادی و GFRP نظیرشان می‌پردازد. با توجه به نتایج جدول مذکور، در ازای یک نسبت تسلیح‌کننده‌ی یکسان در اتصالات با ستون میانی، استفاده از میلگردهای CFRP به جای میلگردهای GFRP موجب افزایش قابل‌توجه ظرفیت برش سوراخ‌کننده می‌گردد که با توجه به ضریب ارتجاعی بالاتر میلگرد CFRP به قطر ۱۲ میلی‌متر (۱۴۰ گیگاپاسکال در پژوهش حاضر) نسبت به میلگرد GFRP به قطر ۱۲ میلی‌متر (۴۸ گیگاپاسکال در پژوهش حاضر) توجیه‌پذیر است. کاهش ظرفیت برش سوراخ‌کننده‌ی نمونه‌های با میلگرد CFRP نسبت به میلگرد فولادی با توجه به ضریب ارتجاعی پایین‌تر و رفتار شکننده‌ی میلگردهای CFRP به قطر ۱۲ میلی‌متر نسبت به میلگردهای فولادی به قطر ۱۲ میلی‌متر (۲۰۰ گیگاپاسکال در پژوهش حاضر) در جدول مذکور مشاهده می‌شود. نتایج مشابهی در این زمینه در پژوهش‌های پیشین نیز مشاهده شده است [۵ و ۲۸]. ظرفیت برش سوراخ‌کننده‌ی نمونه‌ی C-N-0.3-15-20 نسبت به نمونه‌ی نظیر آن با میلگرد GFRP (G-N-0.3) و نمونه‌ی نظیر آن با میلگرد فولادی (S-N-0.3) به ترتیب افزایش ۱۴/۶۴ درصد و کاهش ۱۵/۹۱ درصدی داشته است که با توجه به ضریب ارتجاعی و مقاومت کششی میلگردهای CFRP نسبت به میلگردهای فولادی و GFRP نیز توجیه‌پذیر است. بیشترین مقدار افزایش ظرفیت برش سوراخ‌کننده در نمونه‌ی C-H-0.6-15-20 مشاهده شد که نسبت به نمونه‌ی با میلگرد GFRP نظیر آن افزایش ۳۲/۵۲ درصدی داشته است. لازم به ذکر است که پارامتر ظرفیت برش سوراخ‌کننده برای اتصال MN/1.25/H-CFRP12 نسبت به نمونه‌ی نظیر آن با میلگرد فولادی نیز کاهش ۲۴/۴۴ درصدی داشته است.

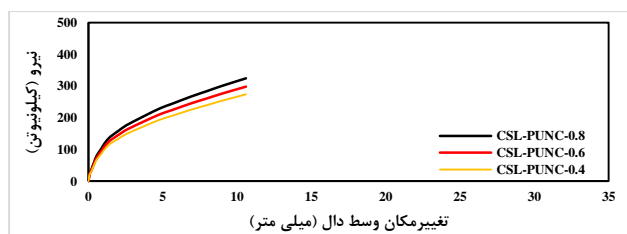
جدول ۱۰: مشخصات مصالح میلگرد CFRP [۲۷]

قطر میلگرد CFRP	مقاومت کششی (مگاپاسکال)	ضریب ارتجاعی (گیگاپاسکال)
۱۰	۱۵۹۶	۱۲۰
۱۲	۱۸۹۹	۱۴۰
۱۴	۱۹۵۰	۱۴۴
۱۵	۱۹۶۷	۱۴۱
۱۶	۲۰۶۸	۱۲۶/۷
۲۰	۲۲۰۰	۱۲۴

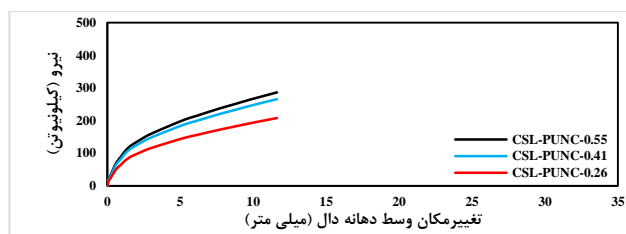


جدول ۱۱: جزئیات نمونه‌های شبیه‌سازی شده با میلگردهای CFRP

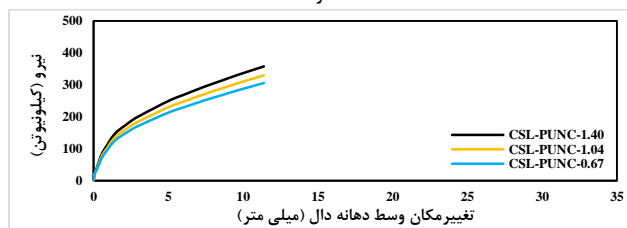
ردیف	نام نمونه	جزئیات	ظرفیت برش سوراخ‌کننده (کیلو نیوتن)
۱	CSL-PUNC-0.26	اتصال تسلیح‌شده با ۱۱ عدد میلگرد CFRP به قطر ۱۰ میلی‌متر	۲۰۷/۶۱
۲	CSL-PUNC-0.41	اتصال تسلیح‌شده با ۱۷ عدد میلگرد CFRP به قطر ۱۰ میلی‌متر	۲۶۵/۷۴
۳	CSL-PUNC-0.55	اتصال تسلیح‌شده با ۲۳ عدد میلگرد CFRP به قطر ۱۰ میلی‌متر	۲۸۶/۵۰
۴	CSL-PUNC-0.4	اتصال تسلیح‌شده با ۱۱ عدد میلگرد CFRP به قطر ۱۲ میلی‌متر	۲۷۴/۰۴
۵	CSL-PUNC-0.6	اتصال تسلیح‌شده با ۱۷ عدد میلگرد CFRP به قطر ۱۲ میلی‌متر	۲۹۸/۱۳
۶	CSL-PUNC-0.8	اتصال تسلیح‌شده با ۲۳ عدد میلگرد CFRP به قطر ۱۲ میلی‌متر	۳۲۴/۷۰
۷	CSL-PUNC-0.51	اتصال تسلیح‌شده با ۱۱ عدد میلگرد CFRP به قطر ۱۴ میلی‌متر	۲۸۴/۰۱
۸	CSL-PUNC-0.79	اتصال تسلیح‌شده با ۱۷ عدد میلگرد CFRP به قطر ۱۴ میلی‌متر	۳۱۹/۷۲
۹	CSL-PUNC-1.07	اتصال تسلیح‌شده با ۲۳ عدد میلگرد CFRP به قطر ۱۴ میلی‌متر	۳۴۰/۴۸
۱۰	CSL-PUNC-0.67	اتصال تسلیح‌شده با ۱۱ عدد میلگرد CFRP به قطر ۱۶ میلی‌متر	۳۰۴/۷۷
۱۱	CSL-PUNC-1.04	اتصال تسلیح‌شده با ۱۷ عدد میلگرد CFRP به قطر ۱۶ میلی‌متر	۳۲۹/۶۸
۱۲	CSL-PUNC-1.40	اتصال تسلیح‌شده با ۲۳ عدد میلگرد CFRP به قطر ۱۶ میلی‌متر	۳۵۷/۰۹
۱۳	C-N-0.3-15-20	اتصال تسلیح‌شده با میلگرد CFRP به قطرهای ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر	۳۲۵/۵۰
۱۴	C-N-0.6-15-20	اتصال تسلیح‌شده با میلگرد CFRP به قطرهای ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر	۲۳۴/۷۳
۱۵	C-H-0.3-15-20	اتصال تسلیح‌شده با میلگرد CFRP به قطرهای ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر	۳۷۰/۲۲
۱۶	C-H-0.6-15-20	اتصال تسلیح‌شده با میلگرد CFRP به قطرهای ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر	۳۰۹/۸۴
۱۷	C-N-0.3-10-14	اتصال تسلیح‌شده با میلگرد CFRP به قطرهای ۱۰ و ۱۴ میلی‌متر	۲۶۶/۹۱
۱۸	C-N-0.3-10-16	اتصال تسلیح‌شده با میلگرد CFRP به قطرهای ۱۰ و ۱۶ میلی‌متر	۲۹۲/۹۵
۱۹	C-N-0.3-14-16	اتصال تسلیح‌شده با میلگرد CFRP به قطرهای ۱۴ و ۱۶ میلی‌متر	۳۰۹/۲۲
۲۰	MN/1.25/H-CFRP10	اتصال تسلیح‌شده با ۱۲ عدد میلگرد CFRP به قطر ۱۰ میلی‌متر	۷۷/۵۳
۲۱	MN/1.25/H-CFRP12	اتصال تسلیح‌شده با ۱۲ عدد میلگرد CFRP به قطر ۱۲ میلی‌متر	۸۹/۱۶
۲۲	MN/1.25/H-CFRP14	اتصال تسلیح‌شده با ۱۲ عدد میلگرد CFRP به قطر ۱۴ میلی‌متر	۹۴/۳۳
۲۳	MN/1.25/H-CFRP16	اتصال تسلیح‌شده با ۱۲ عدد میلگرد CFRP به قطر ۱۶ میلی‌متر	۱۰۲/۰۹



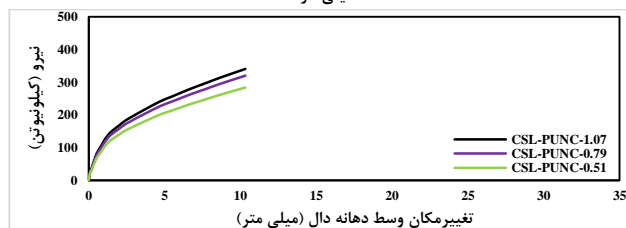
(ب) پاسخ نیرو-تغییر مکان ستون میانی-دال تخت بتنی تسلیح‌شده با میلگرد CFRP به قطر ۱۲ میلی‌متر



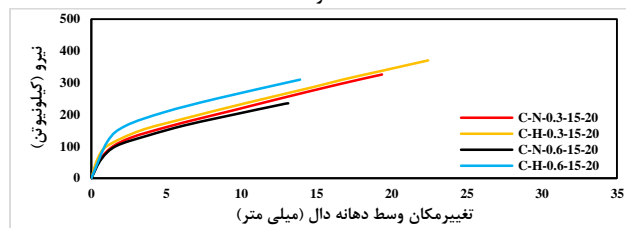
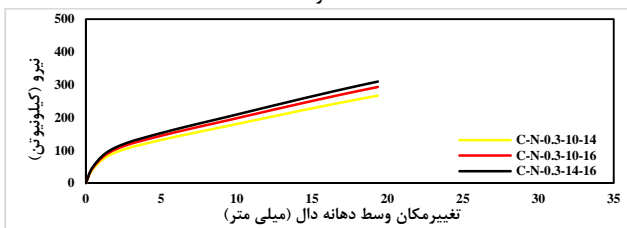
(الف) پاسخ نیرو-تغییر مکان ستون میانی-دال تخت بتنی تسلیح‌شده با میلگرد CFRP به قطر ۱۰ میلی‌متر



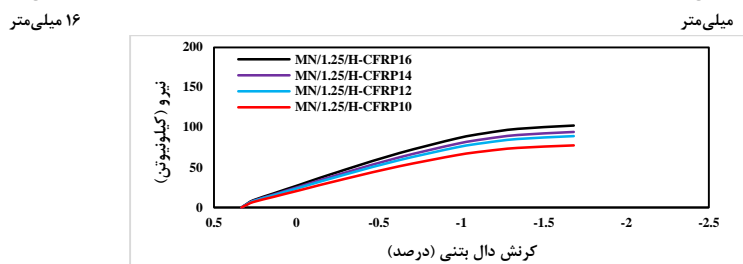
(د) پاسخ نیرو-تغییر مکان ستون میانی-دال تخت بتنی تسلیح‌شده با میلگرد CFRP به قطر ۱۶ میلی‌متر



(ج) پاسخ نیرو-تغییر مکان ستون میانی-دال تخت بتنی تسلیح‌شده با میلگرد CFRP به قطر ۱۴ میلی‌متر



(ه) پاسخ نیرو-تغییر مکان ستون لبه-دال تخت بتنی تسلیح شده با میلگرد CFRP با قطرهای ۱۵ و ۲۰ (و) پاسخ نیرو-تغییر مکان ستون لبه-دال تخت بتنی تسلیح شده با میلگرد CFRP با قطرهای ۱۰، ۱۲، ۱۴ و ۱۶ میلی‌متر



(ز) پاسخ نیرو-کرنش اتصالات ستون گوشه-دال بتنی تسلیح شده با میلگرد CFRP با قطرهای ۱۰، ۱۲، ۱۴ و ۱۶ میلی‌متر

شکل ۱۳: نتایج شبیه‌سازی اتصالات ستون-دال بتن مسلح تخت با میلگردهای CFRP

#### جدول ۱۲: مقایسه‌ی ظرفیت برش سوراخ‌کننده‌ی نمونه‌های شبیه‌سازی شده با میلگرد فولادی و GFRP نظیر آن

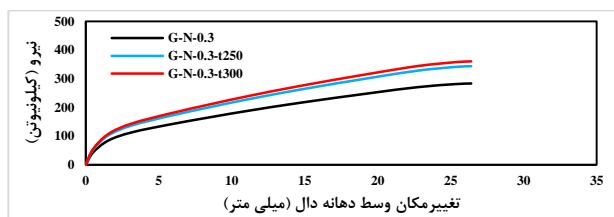
نام نمونه	ظرفیت برش سوراخ‌کننده (کیلو نیوتن)	درصد افزایش/کاهش نسبت به نمونه‌ی با میلگرد فولادی	درصد افزایش/کاهش نسبت به نمونه‌ی با GFRP
CSL-PUNC-0.4	۲۷۴/۰۴	+۳۷/۵۰	-
CSL-PUNC-0.6	۲۹۸/۱۳	+۲۳/۷۵	-
CSL-PUNC-0.8	۳۲۴/۷۰	+۱۵/۷۲	-
C-N-0.3-15-20	۳۲۵/۵۰	+۱۴/۶۴	-
C-N-0.6-15-20	۲۳۴/۷۳	+۱۳/۰۰	-
C-H-0.3-15-20	۳۷۰/۲۲	+۹/۰۳	-
C-H-0.6-15-20	۳۰۹/۸۴	+۳۲/۵۲	-
MN/1.25/H-CFRP12	۸۹/۱۶	-	-۲۴/۴۴

#### ۵-۲- بررسی اثر افزایش ضخامت دال بتن مسلح تخت

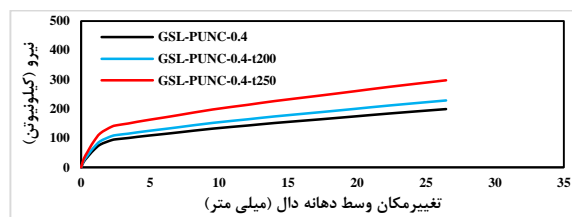
در این بخش از پژوهش تعداد ۶ اتصال (دو نمونه از هر اتصال ستون میانی، ستون لبه و ستون گوشه به دال تخت بتنی) جهت بررسی اثر افزایش ضخامت دال تخت بر ظرفیت برش سوراخ‌کننده شبیه‌سازی شدند. جدول ۱۳ جزئیات نمونه‌های شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. نمودار ۱۴ (الف) و ۱۴ (ب) به ترتیب نتایج نیرو-تغییر مکان وسط دهانه‌ی دال برای اتصالات با ستون میانی و ستون لبه و نمودار ۱۴ (ج) پاسخ نیرو-کرنش دال اتصال برای با ستون گوشه را نشان می‌دهد. در این بخش اندازه‌ی مش بیشینه در شبیه‌سازی ثابت و تعداد المان‌ها با افزایش ضخامت دال افزایش یافتند. با توجه به نتایج جدول ۱۳، افزایش ضخامت دال موجب افزایش عمق نفوذ هرم ناقص تنش شده و ظرفیت برش سوراخ‌کننده را افزایش می‌دهد به طوری که با افزایش پارامتر مذکور از ۱۵۰ میلی‌متر به ۲۵۰ میلی‌متر در اتصالات با ستون میانی، ظرفیت برش سوراخ‌کننده از ۱۹۹/۳۰ کیلو نیوتن به ۲۹۷/۹۶ کیلو نیوتن (۴۹/۵۰ درصد) افزایش یافت. افزایش ضخامت دال از ۲۰۰ میلی‌متر به ۳۰۰ میلی‌متر در اتصالات با ستون لبه، ظرفیت برش سوراخ‌کننده را از ۲۸۳/۹۳ کیلو نیوتن به ۳۶۰/۷۳ کیلو نیوتن (۲۷/۰۵ درصد) افزایش داد. این در حالی است که پارامتر مذکور در اتصالات با ستون گوشه از ۱۱۸ کیلو نیوتن (ضخامت دال ۱۴۰ میلی-متر) به ۱۵۳/۷۷ کیلو نیوتن (۳۰/۳۱ درصد) افزایش یافت. نتایج مشابهی در این زمینه در پژوهش دلود و همکاران [۷] مشاهده شد. این پژوهشگران نیز معتقدند که افزایش ضخامت دال به طور مستقیم بر ظرفیت برش سوراخ‌کننده اثرگذار است. به طوریکه با افزایش پارامتر مذکور مساحت سطحی که با برش سوراخ‌کننده مقابله می‌کند، افزایش می‌یابد که در نتیجه موجب افزایش ظرفیت برش سوراخ‌کننده می‌گردد. البته بسیاری از پژوهش‌های انجام شده در این زمینه به این نکته اشاره دارند که افزایش ضخامت دال تا ۴۰۰ میلی‌متر به طور قابل-توجهی ظرفیت تغییر شکل اتصال را کاهش داده و موجب افزایش قابل توجه سختی اولیه و ظرفیت باربری جانبی اتصال می‌گردد [۳۰، ۲۹].

جدول ۱۳: بررسی اثر افزایش ضخامت دال بتن مسلح تخت

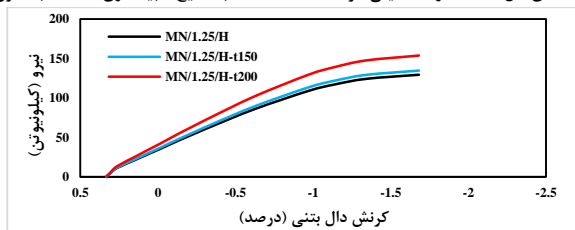
ردیف	نام نمونه	ضخامت دال بتنی (میلی‌متر)	عمق موثر (میلی‌متر)	ظرفیت برش سوراخ‌کننده (کیلو نیوتن)
۱	GSL-PUNC0.4-t200	۲۰۰	۱۶۰	۲۲۹/۲۰
۲	GSL-PUNC0.4-t250	۲۵۰	۲۱۰	۲۹۷/۹۶
۳	G-N-0.3-t 250	۲۵۰	۲۱۰	۳۴۳/۵۶
۴	G-N-0.3-t 300	۳۰۰	۲۶۰	۳۶۰/۷۳
۵	MN/1.25/H-t150	۱۵۰	۱۸۰	۱۳۴/۴۰
۶	MN/1.25/H-t200	۲۰۰	۲۳۰	۱۵۳/۷۷



(ب) نتایج شبیه‌سازی اتصالات با ستون لبه با ضخامت‌های دال ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ میلی‌متر



(الف) نتایج شبیه‌سازی اتصالات با ستون میانی با ضخامت‌های دال ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ میلی‌متر



(ج) نتایج شبیه‌سازی اتصالات با ستون گوشه با ضخامت‌های دال ۱۵۰، ۱۴۰، ۲۰۰ میلی‌متر

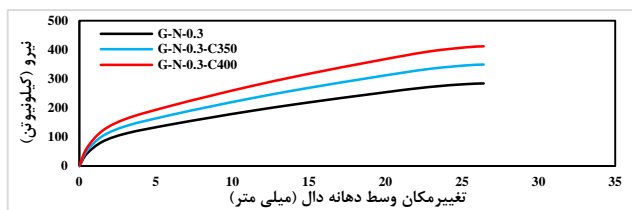
شکل ۱۴: نتایج شبیه‌سازی اتصالات با ضخامت‌های مختلف دال

### ۵-۳- بررسی اثر افزایش ابعاد ستون

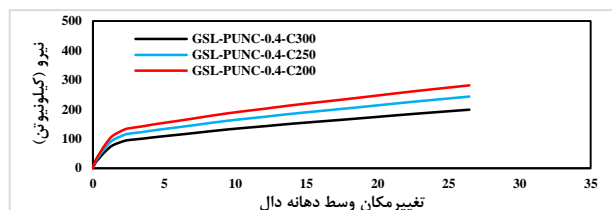
جهت بررسی اثر افزایش ابعاد ستون، تعداد دو نمونه اتصال ستون میانی-دال بتن مسلح تخت، دو نمونه اتصال ستون لبه-دال بتن مسلح تخت و دو نمونه اتصال ستون گوشه-دال بتن مسلح تخت شبیه‌سازی شدند. جدول ۱۴ جزئیات نمونه‌های شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. نمونه‌های GSL-PUNC-C250 و GSL-PUNC-C300 به ترتیب نشان‌دهنده اتصالات ستون میانی-دال تخت بتنی تسلیح شده با میلگردهای GFRP با ستون مربعی به بعد ۲۵۰ و ۳۰۰ میلی‌متر، نمونه‌های G-N-0.3-C350 و G-N-0.3-C400 اتصالات ستون لبه-دال بتن مسلح تخت با ستون مربعی به بعد ۳۵۰ و ۴۰۰ میلی‌متر و نمونه‌های MN/1.25/L-C250 و MN/1.25/L-C300 اتصالات ستون گوشه-دال بتن مسلح تخت با ستون مربعی به ابعاد ۲۵۰ و ۳۰۰ میلی‌متر را نشان می‌دهد. شکل ۱۵ (الف) و (ب) به ترتیب نتایج نیرو-تغییر مکان وسط دهانه‌ی دال اتصالات با ستون میانی و ستون لبه و شکل ۱۵ (ج) پاسخ نیرو-کرنش دال اتصالات با ستون گوشه را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج حاصل شده، افزایش ابعاد ستون اثر قابل توجهی بر افزایش ظرفیت برش سوراخ‌کننده نمونه‌ها داشته است. به طوری که ظرفیت برش سوراخ‌کننده در نمونه‌ی GSL-PUNC-C300 نسبت به نمونه‌ی GSL-PUNC-C250 افزایش ۱۵/۵۷ درصدی و ظرفیت برش سوراخ‌کننده در نمونه‌ی G-N-0.3-C400 نسبت به نمونه‌ی G-N-0.3-C350 افزایش ۱۷/۸۹ درصدی داشته است. لازم به ذکر است که ظرفیت برش سوراخ‌کننده در نمونه‌ی MN/1.25/L-C300 نسبت به نمونه‌ی MN/1.25/L-C250 افزایش ۱۱/۸۴ درصدی داشته است. در واقع افزایش ابعاد ستون موجب افزایش سطح گسیختگی شده و تنش برشی سوراخ‌کننده را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. این نتایج با نتایج پژوهش دلود و همکاران [۷] نیز همخوانی دارد.

جدول ۱۴: بررسی اثر افزایش ابعاد ستون

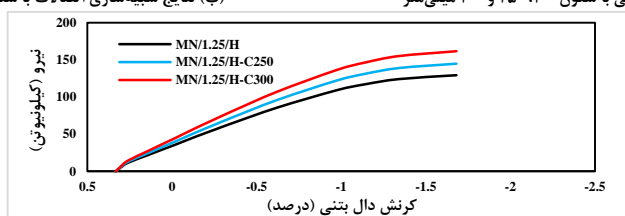
ردیف	نام نمونه	ابعاد ستون مربعی (میلی متر)	ظرفیت برش سوراخ کننده (کیلو نیوتن)
۱	GSL-PUNC-C250	۲۵۰	۲۴۳/۱۵
۲	GSL-PUNC-C300	۳۰۰	۲۸۱/۰۲
۳	G-N-0.3-C350	۳۵۰	۳۴۹/۲۳
۴	G-N-0.3-C400	۴۰۰	۴۱۱/۷۰
۵	MN/1.25/H-C250	۲۵۰	۱۴۴/۴۳
۶	MN/1.25/H-C300	۳۰۰	۱۶۱/۵۳



(ب) نتایج شبیه سازی اتصالات با ستون لبه با ستون ۳۰۰، ۳۵۰ و ۴۰۰ میلی متر



(الف) نتایج شبیه سازی اتصالات با ستون میانی با ستون ۲۵۰ و ۳۰۰ میلی متر



(ج) نتایج شبیه سازی اتصالات با ستون گوشه با ستون های ۲۵۰، ۳۰۰ و ۳۵۰ میلی متر

شکل ۱۵: نتایج بررسی اتصالات با ابعاد مختلف ستون

## ۶- نتیجه گیری

پژوهش حاضر بر مبنای تحلیل سه بعدی به روش اجزای محدود با استفاده از نرم افزار ABAQUS جهت تخمین مقادیر ظرفیت برش سوراخ کننده اتصالات ستون میانی، ستون لبه و ستون گوشه به دال بتن مسلح تخت انجام شد. به منظور بررسی توانایی نرم افزار مذکور در پیش بینی رفتار برش سوراخ کننده و نحوه شکل گیری و گسترش ترک در اتصالات، تعداد ۱۴ نمونه اتصال ستون-دال بتن مسلح تخت (۶ اتصال با ستون میانی، ۵ اتصال با ستون لبه و ۳ اتصال با ستون گوشه) از میان پژوهش های آزمایشگاهی پیشین انتخاب شده و شبیه سازی شدند. استفاده از میلگردهای CFRP به جای میلگردهای فولادی یا GFRP در قالب ۲۶ اتصال ستون-دال بتن مسلح تخت، افزایش ضخامت دال در قالب ۶ اتصال و افزایش ابعاد ستون در قالب ۶ اتصال از پارامترهای مورد بررسی در پژوهش بودند. در مجموع براساس مطالعه انجام شده نتایج پژوهش را می توان به صورت زیر خلاصه نمود:

۱- استفاده از روش اجزای محدود در قالب نرم افزار ABAQUS جهت شبیه سازی رفتار اتصالات با ستون میانی، ستون لبه و ستون گوشه به دال بتن مسلح تخت بسیار موثر واقع شده است. به طوری که پاسخ نیرو-تغییر مکان، حالت گسیختگی و نحوه شروع و گسترش ترکها از انطباق قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی پژوهش های پیشین برخوردار است. نسبت نتایج ظرفیت برش سوراخ کننده در نمونه های آزمایشگاهی به نمونه های شبیه سازی با نرم افزار ABAQUS در اتصال با ستون میانی در حدود ۰/۸۶ تا ۰/۹۲، ستون لبه ۰/۸۷ تا ۰/۹۵ و ستون گوشه ۰/۹۱ تا ۰/۹۵ بوده است. لذا نرم افزار مذکور توانایی قابل ملاحظه ای در شبیه سازی رفتار اتصالات داشته است.

۲- آیین نامه ی ACI 440.1R-15 ظرفیت برش سوراخ کننده اتصالات را بسیار کمتر از نتایج آزمایش برآورد کرده است. نتایج نسبت ظرفیت برش سوراخ کننده برای اتصال ستون میانی در حدود ۲/۹۱ تا ۴/۷۵ و برای اتصالات ستون لبه در حدود ۲/۰۱ تا ۲/۹۹ می باشد. این در حالی است که آیین نامه های CSA S806-12 و JSCE-97 از دقت مناسب تری در تخمین ظرفیت برش سوراخ کننده برخوردارند. نسبت مذکور براساس آیین نامه ی CSA S806-12 برای اتصالات ستون میانی در حدود ۱/۵۰ تا ۲/۶۱ و برای

- اتصالات ستون لبه در حدود ۱/۲۱ تا ۱/۳۷ می‌باشد. همچنین براساس آیین‌نامه‌ی JSCE-97، نسبت مذکور برای اتصالات ستون میانی در حدود ۲/۰۵ تا ۳/۵۶ و برای اتصالات با ستون لبه در حدود ۱/۱۴ تا ۱/۴۲ محاسبه شده است. از سوی دیگر نسبت مذکور براساس آیین‌نامه‌ی BSI 8110-97 در محدوده‌ی ۰/۴۱ تا ۰/۷۱ برای اتصالات با ستون میانی و ۰/۵۳ تا ۰/۷۷ برای اتصالات با ستون لبه بوده و نشان می‌دهد که آیین‌نامه‌ی مذکور مقدار ظرفیت برش سوراخ‌کننده را بیش از حد تخمین زده است.
- ۳- نتایج مطالعه‌ی حاضر نشان داد که استفاده از میلگردهای CFRP به جای میلگردهای GFRP نقش بسزایی در افزایش ظرفیت برش سوراخ‌کننده‌ی اتصالات با ستون میانی، ستون لبه و ستون گوشه به دال بتن مسلح تخت داشته است و دلیل آن ضریب ارتجاعی بالاتر و مقاومت کششی بیشتر میلگردهای CFRP نسبت به میلگرد GFRP می‌باشد. همچنین با توجه به اینکه ضریب ارتجاعی میلگردهای CFRP از ضریب ارتجاعی میلگردهای فولادی کمتر است، لذا درصد تغییرات ظرفیت برش سوراخ‌کننده نمونه‌های تسلیم‌شده با میلگرد CFRP نسبت به میلگرد فولادی روندی نزولی داشته است.
- ۴- با افزایش ضخامت دال در اتصالات ستون-دال بتن مسلح تخت، عمق نفوذ هرم ناقص تنش بیشتر شده و ظرفیت برش سوراخ‌کننده نیز افزایش می‌یابد به طوری که با افزایش ضخامت دال تخت از ۱۵۰ میلی‌متر به ۲۵۰ میلی‌متر در اتصالات با ستون میانی، ظرفیت برش سوراخ‌کننده ۴۹/۵۰ درصد افزایش یافت. افزایش ضخامت دال از ۲۰۰ میلی‌متر به ۳۰۰ میلی‌متر در اتصالات با ستون لبه موجب افزایش ۲۷/۰۵ درصدی ظرفیت برش سوراخ‌کننده گردید. همچنین افزایش ضخامت دال از ضخامت دال ۱۴۰ میلی‌متر به ۲۰۰ میلی‌متر موجب افزایش ۳۰/۳۱ درصدی ظرفیت برش سوراخ‌کننده شد.
- ۵- با افزایش ابعاد ستون، ظرفیت برش سوراخ‌کننده‌ی اتصالات ستون-دال بتن مسلح تخت افزایش قابل توجهی داشته است. به عبارتی افزایش ابعاد ستون سطح گسیختگی برش سوراخ‌کننده را افزایش داده و تنش برشی سوراخ‌کننده را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. درصد افزایش ظرفیت برش سوراخ‌کننده در حدود ۱۱/۸۴ درصد در اتصالات با ستون گوشه-دال تخت بتنی تا ۱۷/۸۹ درصد در اتصالات با ستون لبه-دال بتن مسلح تخت متغیر بوده است.

## مراجع

- [1] El-Gendy, M. G., El-Salakawy, E. (2018a). Punching shear behavior of GFRP-RC slab-column edge connections. *Special Publication*, 322, 1-5.
- [2] El-Gendy, M. G., El-Salakawy, E. F. (2018b). Lateral displacement deformability of GFRP-RC slab-column edge connections. *Special Publication*, 327, 1-52.
- [3] El-Gendy, M., El-Salakawy, E. (2019). Effect of flexural reinforcement type and ratio on the punching behavior of RC slab-column edge connections subjected to reversed-cyclic lateral loads. *Engineering Structures*, 200, 1-11.
- [4] El-Gendy, M. G., El-Salakawy, E. F. (2020). GFRP shear reinforcement for slab-column edge connections subjected to reversed cyclic lateral load. *Journal of Composites for Construction*, 24(2), 1-14.
- [5] El-Gendy, M. G., and El-Salakawy, E. F. (2020). Assessment of punching shear design models for FRP-RC slab-column connections. *Journal of Composites for Construction*, 24(5), 1-15.
- [6] Hassan, M., Ahmed, E. A., and Benmokrane, B. (2013). Punching shear strength of glass fiber-reinforced polymer reinforced concrete flat slabs. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 40(10), 951-960.
- [7] Dulude, C., Hassan, M., Ahmed, E. A., and Benmokrane, B. (2013). Punching shear behavior of flat slabs reinforced with glass fiber-reinforced polymer bars. *ACI Structural Journal*, 110(5), 723-734.
- [8] American Concrete Institute. Committee 440. (2003). Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars: ACI 440.1 R-03. American Concrete Institute.
- [9] Ahmed, E. A., Benmokrane, B., and Sansfaçon, M. (2017). Case study: Design, construction, and performance of the La Chancelière parking garage's concrete flat slabs reinforced with GFRP bars. *Journal of Composites for Construction*, 21(1), 1-15.
- [10] Gouda, A., El-Salakawy, E. (2016). Punching shear strength of GFRP-RC interior slab-column connections subjected to moment transfer. *Journal of Composites for Construction*, 20(1), 1-12.
- [11] Gouda, A., El-Salakawy, E. (2016). Punching shear strength of GFRP-RC interior slab-column connections subjected to moment transfer. *Journal of Composites for Construction*, 20(1), 1-11.
- [12] Salama, A. E., Hassan, M., Benmokrane, B., and Ferrier, E. (2020). Modified strip model for punching-shear strength of FRP-reinforced concrete edge-column slab connections. *Engineering Structures*, 216, 1-13.
- [13] Drakatos, I. S., Muttoni, A., Beyer, K. (2016). Internal slab-column connections under monotonic and cyclic imposed rotations. *Engineering Structures*, 123, 501-516.

- [14] Milligan, G. J., Polak, M. A., Zurell, C. (2020). Finite element analysis of punching shear behaviour of concrete slabs supported on rectangular columns. *Engineering Structures*, 224, 1-13.
- [15] ABAQUS, G. (2020). Dassault Systemes Simulia Corporation, Providence, RI, USA.
- [16] American Concrete Institute, ACI Committee 440. (2015). Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars, 440R.1R, Farmington Hills, MI.
- [17] Canadian Standards Association, CAN/CSA S806-12 (2017). Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers, Rexdale, ON, Canada.
- [18] Japan Society of Civil Engineers, JSCE (1997). Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials. *Concrete Engineering*, A. Machida, ed., Tokyo, Japan.
- [19] British Standards Institution, BSI (1997). Structural Use of Concrete, BS 8110: Part 1—Code of Practice for Design and Construction. London, UK.
- [20] Nguyen-Minh, L., and Rovňák, M. (2013). Punching shear resistance of interior GFRP reinforced slab-column connections. *Journal of Composites for Construction*, 17(1), 2-13.
- [21] Salama, A. E., Hassan, M., and Benmokrane, B. (2021). Punching-Shear Behavior of Glass Fiber-Reinforced Polymer-Reinforced Concrete Edge Column-Slab Connections: Experimental and Analytical Investigations. *ACI Structural Journal*, 118(3), 147-160.
- [22] Goldyn, M., Urban, T. (2020). Effect of load level of corner columns on punching shear resistance of flat slabs. *Budownictwo i Architektura*, 19(3).
- [23] Mander, J. B., Priestley, M. J., and Park, R. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of structural engineering*, 114(8), 1804-1826.
- [24] Genikomsou, A. S., Polak, M. A. (2015). Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged plasticity model in ABAQUS. *Engineering structures*, 98, 38-48.
- [25] Bompa, D. V., Elghazouli, A. Y. (2020). Nonlinear numerical simulation of punching shear behavior of reinforced concrete flat slabs with shear-heads. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 14(2), 331-356.
- [26] Abdulrahman, B. Q., Wu, Z., Cunningham, L. S. (2017). Experimental and numerical investigation into strengthening flat slabs at corner columns with externally bonded CFRP. *Construction and Building Materials*, 139, 132-147.
- [27] Afifi, M. Z., Mohamed, H. M., Benmokrane, B. (2014). Strength and axial behavior of circular concrete columns reinforced with CFRP bars and spirals. *Journal of Composites for Construction*, 18(2), 1-10.
- [28] El-Ghandour, A. W., Pilakoutas, K., Waldron, P. (2003). Punching shear behavior of fiber reinforced polymers reinforced concrete flat slabs: experimental study. *Journal of Composites for Construction*, 7(3), 258-265.
- [29] El-Gendy, M. G., El-Salakawy, E. F. (2021). Finite-element analysis of FRP-reinforced concrete slab-column edge connections subjected to reversed-cyclic lateral loads. *Journal of Composites for Construction*, 25(1), 1-18.
- [30] Drakatos, I. S., Muttoni, A., Beyer, K. (2018). Mechanical model for drift-induced punching of slab-column connections without transverse reinforcement. *ACI Structural Journal*, 115, 463-474.