

Determination of the optimal pattern for RC slab strengthening against punching shear using FRP fan

Davood Niktalab¹, Farhang Farahbod^{2*}, Alireza Manafpour³, Mozhdeh Zargaran⁴

1- Ph.D Candidate in Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Urmia University international pardis, Urmia, Iran.

2- Assistant Professor, Structural Engineering department, Ministry of Road, Housing & Urban development, Tehran, Iran.

3-Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Urmia University, Urmia, Iran.

4- Assistant Professor, Structural Engineering department, Ministry of Road, Housing & Urban development, Tehran, Iran.

ABSTRACT

Reinforced concrete (RC) flat slabs are utilized, because of their advantages such as covering large spans without beams, ease of execution increased construction speed, and decreased overall building height. However, this system is at risk of punching shear failure. In recent years, various methods have been proposed to strengthen RC flat slabs, but the latest of ones are penetrating and passing fiber reinforced polymers (FRPs) fan through the slab thickness. This method has been successfully evaluated in previous studies, and this research is tried to assess the most suitable pattern of FRP fan installation for punching shear. To reach this goal, two specimens of flat slabs from the available experimental studies, including one control and one strengthened specimen under pushover loading are similarly modeled and analyzed in ABAQUS Software to prove the accuracy of the analytical results. Then after considering two types of strengthening scheme with different patterns and changing the number of holes passing through the thickness of the slab, 18 samples are modeled in this Software. These nonlinear analyses are performed to determine the best pattern in terms of bearing capacity, ultimate displacement, ductility, energy absorption, stiffness and to find the best distance of FRP fibers from the column face. The results showed that the L1 which FRPs were placed in two parallel rows around the four sides of the column, noticed best among the other models. Among the radial patterns, the R5 which has six rows of FRPs arranged radially around the center of the slab has shown the best performance. Whatever the method of FRP fan strengthening is the load-bearing capacity, absorbed energy, and stiffness increased 137%, 535% and 21.6% compared to control slab, respectively. The results of the analysis can be used to determine the appropriate pattern of slab strengthening considering the economic aspect.

ARTICLE INFO

Receive Date: 16 September 2019

Revise Date: 17 December 2019

Accept Date: 19 January 2020

Keywords:

Strengthening

Flat slab

Optimal pattern

FRP fan

Punching shear

Analytical modeling

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.201717.1949>

*Corresponding author: Farhang Farahbod

Email address: f.farahbod@bhrc.ac.ir

ارائه و تعیین الگوی بهینه برای مقاومسازی مستقیم برش منگنه‌ای دال تخت بتن مسلح با استفاده از FRP بادبزی

داود نیک طلب^۱، فرهنگ فرحبد^{۲*}، علیرضا مناف پور^۳، مژده زرگران^۴

۱- دانشجوی دکتری عمران-سازه، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲- استادیار، بخش سازه، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی وزارت راه و شهرسازی، تهران، ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۴- استادیار، بخش سازه، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی وزارت راه و شهرسازی، تهران، ایران

چکیده

دال‌های تخت بتن مسلح به دلیل مزایایی نظیر پوشش دهانه‌های بزرگ بدون نیاز به وجود تیر، سهولت اجرا، افزایش سرعت ساخت، کاهش ارتفاع کلی ساختمان، در بسیاری از نقاط جهان مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این حال این سیستم در معرض خطر شکست ترد برش منگنه‌ای^۱ می‌باشد. در سال‌های اخیر روش‌های مختلفی جهت مقاومسازی دال تخت پیشنهاد شده است که از جدیدترین آن‌ها می‌توان به سوراخ نمودن و عبور الیاف مسلح پلیمری (FRP) از ضخامت دال، اشاره کرد. این روش با موفقیت در مطالعات پیشین بررسی شده و در این تحقیق در نظر است مناسب‌ترین الگوی قرارگیری این الیاف برای مقاومسازی دال تخت مورد ارزیابی قرارگیرد. برای این منظور دو نمونه‌ی دال آزمایشگاهی، شامل یک نمونه شاهد و یک نمونه تقویت شده در نرم افزار ABAQUS مدل سازی و تحلیل شدند تا صحت نتایج تحلیلی به اثبات برسند. سپس با در نظر گرفتن دو نوع الگوی مختلف مقاومسازی با FRP، بادبزی خطی و شعاعی و تغییر تعداد سوراخ‌های عبوری از ضخامت، تعداد ۱۸ نمونه در این نرم افزار مدل سازی شدند تا بهترین الگو از نقطه نظر ظرفیت باربری، شکل پذیری، انرژی جذب شده، سختی، تعیین و در نهایت بهترین فاصله استقرار این الیاف از بر ستون نیز مشخص شود. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد، الگوی LI که در آن الیاف به صورت خطی در دو ردیف موازی در چهار وجه ستون قرار می‌گرفتند در میان الگوهای خطی، و نیز الگوی R5 که در آن شش ردیف الیاف حول نقطه مرکزی ستون بصورت شعاعی چیده شده بودند در میان الگوهای شعاعی، بهترین عملکرد را داشتند. در هر حال روش مقاومسازی بادبزی موجب افزایش ظرفیت باربری به میزان حداکثر ۱۳۷٪، انرژی جذب شده ۵۳۵٪ و سختی الاستیک معادل ۲۱/۶٪ نسبت به دال مقاومسازی نشده، گردید. از نتایج حاصل از تحلیل می‌توان در تعیین الگوی مناسب مقاومسازی دال‌های تخت با لحاظ نمودن جنبه اقتصادی طرح، استفاده کرد.

کلمات کلیدی: مقاومسازی، دال تخت، الگوی بهینه، FRP بادبزی، مدل محاسباتی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.201717.1949	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2020.201717.1949	۱۴۰۰/۰۶/۳۱	۱۳۹۸/۱۰/۲۹	۱۳۹۸/۱۰/۲۹	۱۳۹۸/۰۹/۲۶	۱۳۹۸/۰۶/۲۵
			فرهنگ فرحبد		*نویسنده مسئول:	
			f.farahbod@bhrc.ac.ir		پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

دال تخت بتن مسلح یک عضو سازه‌ای بدون تیر است که بار جانبی و قائم را تحمل کرده و مستقیماً، آن را به ستون‌ها منتقل می‌کند. از مزایای دال تخت می‌توان به پوشش دهانه‌های بزرگ بدون نیاز به تیر، سهولت اجرا، افزایش سرعت ساخت و ساز، افزایش ارتفاع خالص طبقه و کاهش ارتفاع کلی ساختمان اشاره کرد که سبب می‌شود استفاده از آن‌ها در صنعت ساخت و ساز در بسیاری از کشورها، شتاب بگیرد [۱]. با این حال، این نوع سقف‌ها در معرض خطر شکست ترد برش منگنه‌ای هستند؛ آسیب‌های زلزله‌های چند دهه اخیر مؤید این مطلب می‌باشد.

برش منگنه‌ای دارای ساختار شکننده بوده که با نشانه‌های هشدار محدود رخ می‌دهد و در نبود تقویت مناسب، می‌تواند یک خرابی پیش‌رونده در تمام سازه را بوجود آورد [۲]. برای کنترل خرابی‌های ناشی از این نوع شکست، تقویت‌های مختلفی ارائه شده است. موهل^۲، مارتینز^۳-کروزادو^۴ و قیصرانی^۵، مطالعات تجربی را روی دال‌های تخت مقاوم شده با کتیبه‌های فلزی و بتنی به منظور افزایش ظرفیت برش منگنه‌ای تحت بارگذاری جانبی انجام دادند [۳ و ۴]. ترمیم این اتصالات نیز توسط فرهی^۶، آدین^۷ و یانکوفسکی^۸ با استفاده از صفحات فولادی پیچ شده و جاگذاری بتن و آرماتور تخریب شده با مصالح جدید صورت گرفت [۵]. عباد^۹ و مرزوک^{۱۰} برای افزایش ظرفیت برش منگنه‌ای دال‌های دوطرفه از پیچ‌ها و صفحات فولادی استفاده کردند. دال‌های تخت آزمایش شده، تحت بارگذاری متمرکز یکنواخت و لنگره‌ای نامتعادل یکنواخت و چرخه‌ای قرار گرفت. استفاده از صفحات و پیچ‌های فولادی باعث افزایش بار و ظرفیت تغییرشکل اتصال دال ستون شد [۶]. برای تقویت اتصالات دال ستون مدت‌ها از تقویت فلزی استفاده می‌شد و کماکان نیز تحقیقاتی بر روی تقویت فلزی دال‌ها صورت می‌گیرد. تقویت فلزی با افزایش محصورشدگی و نیز افزایش سطح تحمل کننده برش، سبب افزایش ظرفیت برش منگنه‌ای می‌شود. این نوع تقویت دارای معایبی نظیر خوردگی، وزن زیاد، سختی اجرا و عدم انعطاف پذیری مناسب می‌باشد. با این حال، استفاده از مزایای ذاتی پلیمر مسلح شده با الیاف (FRP) سبب شده است تا کاربرد آن‌ها روز به روز گسترش یابد. تقویت دال تخت بتن مسلح به روش نصب FRP در قسمت تحتانی دال توسط محققین بسیاری مورد بررسی قرار گرفته است. از آن جمله می‌توان به تحقیق بینسی^{۱۱} و بایراک^{۱۲} در سال ۲۰۰۳ اشاره کرد. آنها روشی جدید برای افزایش ظرفیت برش منگنه‌ای دال‌ها با استفاده از الیاف FRP ارائه کردند. آن‌ها در وجه کششی دال حفراتی ایجاد کرده و الیاف FRP را به صورت آرماتورهای برشی در آن قرار دادند. ۳ نمونه مقاوم‌سازی شده با الیاف و دو نمونه مقاوم‌سازی نشده مورد آزمایش قرار گرفته و رفتار آن‌ها بررسی شد. در این آزمایش‌ها دور شدن صفحه مستعد ترک برش منگنه‌ای از ستون و همچنین افزایش بار قابل تحمل توسط دال تا ۵۱ درصد مشاهده شد [۷]. بهبود لرزه‌ای اتصالات دال ستون در مطالعه‌ای آزمایشگاهی در سال ۲۰۰۴ توسط استارک^{۱۳} و همکاران صورت گرفت. استفاده از نوارهای CFRP در جهت شعاعی در اطراف ستون روشی اجرایی برای بهسازی لرزه‌ای اتصال بود. بهسازی منتج به افزایش ظرفیت تغییرشکل و حذف شکست‌های منگنه‌ای، بدون تحت تاثیر قرار دادن سختی اتصال شد [۸]. در تحقیق صورت گرفته بوسیله سسیساکیس^{۱۴} و شیخ^{۱۵} در سال ۲۰۰۷، FRP در سوراخ‌هایی که بر صفحه دال عمود هستند قرار داده شدند. شکل و چینش سوراخ‌ها تعیین کننده کارایی مسلح کننده‌ها در بهبود عملکرد دال مقاوم‌سازی شده می‌باشند. دال‌های مقاوم‌سازی شده با CFRP در مقاومت برشی، شکل‌پذیری و استهلاک انرژی افزایش از خود نشان دادند [۹]. در سال ۲۰۱۱، پولاک^{۱۶} و لاولر^{۱۷} اتصالات دال به ستون را با استفاده از پلیمر مسلح شده با الیاف قائم مقاوم‌سازی کردند. مشاهده شد

2 Moehle
3 Martinez
4 Cruzado
5 Qaisrani
6 Farhey
7 Adin
8 Yankelevsky
9 Ebead
10 Marzouk
11 Binici
12 Bayrak
13 Stark
14 Sissakis
15 Sheikh
16 Polak

که اتصال FRP به دال به اندازه کافی قوی بوده که می‌تواند تنش‌های ایجاد شده در مقطع دال را تحمل کند. افزایش قابل توجه در ظرفیت باربری و تغییر مکان نهایی دال‌های تقویت شده مشاهده شد [۱۰]. در سال ۲۰۱۴، وورل^{۱۸} با ساخت ۴ نمونه دایروی بتنی با قطر ۲۷۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۲۰۰ میلی‌متر، عملکرد استفاده از پیچ‌های تعبیه شده در ضخامت دال را در صورت وجود و عدم وجود رزین اپوکسی مورد بررسی قرار داد. نتایج آزمایشات نشان داد نمونه‌های تقویت شده تا حدود ۵۰٪ نسبت به نمونه شاهد ظرفیت برش منگنه‌ای دال را توانستند افزایش دهند [۱۱]. در سال ۲۰۱۵ میثمی^{۱۹} و همکاران ۴ نمونه دال تخت بتن مسلح را با بهره‌گیری از پلیمرهای مسلح شده با الیاف به صورت قائم و عمود بر ضخامت دال مقاوم‌سازی کردند. از نتایج تحقیق مشخص شد که در نمونه با ۲۴ عدد FRP ظرفیت برشی در مقایسه با نمونه شاهد، ۹۱٪ درصد افزایش داشته و افزایش تعداد بادبزن‌های FRP نه تنها باعث بهبود ظرفیت برشی شد، بلکه مد خرابی را از برش منگنه‌ای به خمشی تغییر داد [۱۲]. در سال ۲۰۱۹ الکشیف^{۲۰} و همکاران به بررسی رفتار برش منگنه‌ای دال تخت مقاوم‌سازی شده با CFRP های عمود بر ضخامت دال پرداختند. نتایج نشان داد که نحوه مقاوم‌سازی پیشنهادی موجب بهبود شکل‌پذیری و افزایش ظرفیت برش منگنه‌ای دال می‌شود [۱۳]. با بررسی مقالات در زمینه مقاوم‌سازی دال تخت بتن مسلح با استفاده از نوارهای FRP مشاهده شد این روش، عملکردی مناسب در بهبود رفتار دال بتن مسلح داشته و می‌تواند در کاربردهای عملی استفاده شود. با این حال، در این روش نیاز است دال سوراخ‌کاری شود که مستلزم روندی طاقت فرساست. بنابراین، بهینه کردن تعداد حفرات و تعداد لایه‌های نوار FRP مورد نیاز و همچنین تعیین الگوی بهینه قرارگیری حفرات در دال، امری ضروری است. در این تحقیق سعی بر آنست که با استفاده از روش اجزا محدود و بهره‌گیری از نرم افزار ABAQUS رفتار دال بتن مسلح مقاوم‌سازی شده با FRP های بادبزنی تخمین زده شود و پس از آن پارامترهای موثر بر بهبود رفتار دال‌های مقاوم‌سازی شده تعیین گردد.

۲- روند مدل‌سازی اجزای محدود در نرم‌افزار ABAQUS

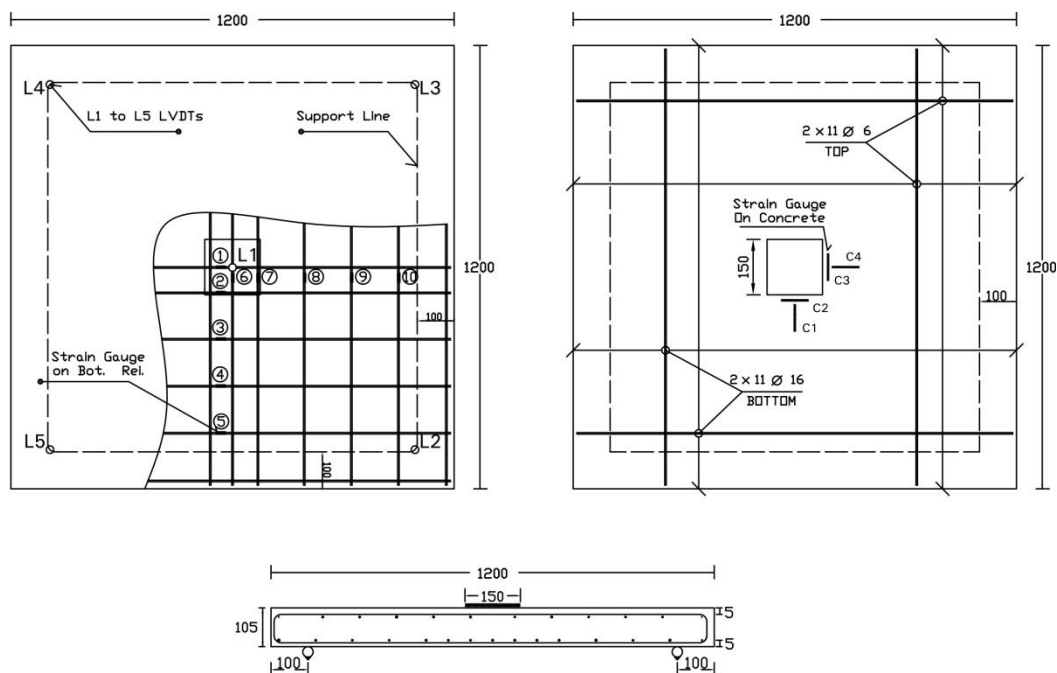
از دو نمونه دال بتن مسلح که به صورت آزمایشگاهی بررسی شده بودند، به منظور ارزیابی صحت پاسخ‌های نرم افزار، استفاده شد. دال‌های مورد بررسی از تحقیق آزمایشگاهی صورت گرفته توسط میثمی و همکاران در سال ۲۰۱۵ انتخاب شدند. ابعاد دال‌ها ۱/۲ در ۱/۲ متر به ضخامت ۰/۱۰۵ متر بود که با استفاده از دو سفره میلگرد در دو جهت مسلح شده بودند. تنش تسلیم و مدول یانگ میلگردها به ترتیب ۴۲۰ مگاپاسکال و ۲۰۰ گیگاپاسکال بودند. دال‌ها روی چهار تکیه‌گاه ساده خطی به طول ۱/۲ متر در لبه‌های دال قرار گرفتند. میلگردگذاری در سفره پایین با استفاده از ۱۱ میلگرد با قطر ۱۶ میلی‌متر و در سفره فوقانی با استفاده از ۱۱ میلگرد قطر ۶ میلی‌متر صورت گرفت. بارگذاری با استفاده از جکی هیدرولیکی به صورت موضعی در سطحی به ابعاد ۱۵۰ در ۱۵۰ میلی‌متر اعمال شد. جزئیات نمونه‌های مورد بررسی در مرجع [۱۲] در شکل ۱ و جدول ۱ آورده شده است.

در ABAQUS برای مدل‌سازی بتن، تکیه‌گاه صلب و صفحه فشاری از المان ۸ گره‌ای C3D8R با شش درجه آزادی در هر گره و برای مدل‌سازی آرماتورها از المان دو گره‌ای میله‌ای T3D2 با سه درجه آزادی در هر گره بهره برده شد. پس از بررسی مدل‌ها از نظر حساسیت مش، اندازه مش بهینه برای اعضا تعیین شد. به علاوه، رفتار بتن با بهره‌گیری از مدل CDP^{۲۱} با در نظر گرفتن پارامترهای خرابی فشاری و کششی در همان زیرمجموعه، مدل‌سازی شد [۱۴]. اعضای تقویت‌کننده به صورت میله‌های Solid و با استفاده از المان ۸ گره‌ای C3D8R با شش درجه آزادی در هر گره، در ضخامت دال قرار گرفتند.

جدول ۱: جزئیات نمونه‌های مورد بررسی در تحقیق میثمی و همکاران [۱۲]

نام نمونه	مقاومت فشاری بتن (MPa)	میلگردهای لایه تحتانی	میلگردهای لایه فوقانی	نوع مقاوم‌سازی	بار نهایی (kN)	تغییر مکان نهایی (mm)
CS40-3	۴۲/۴	۱۱φ۱۶	۱۱φ۶	—	۲۴۱/۷	۷/۳
FF3-24	۴۴/۸	۱۱φ۱۶	۱۱φ۶	24 FRP Fan	۴۶۲/۳	۱۸/۲

17 Lawler
18 Wörle
19 Meisami
20 El-Kashif
21 Concrete Damage Plasticity



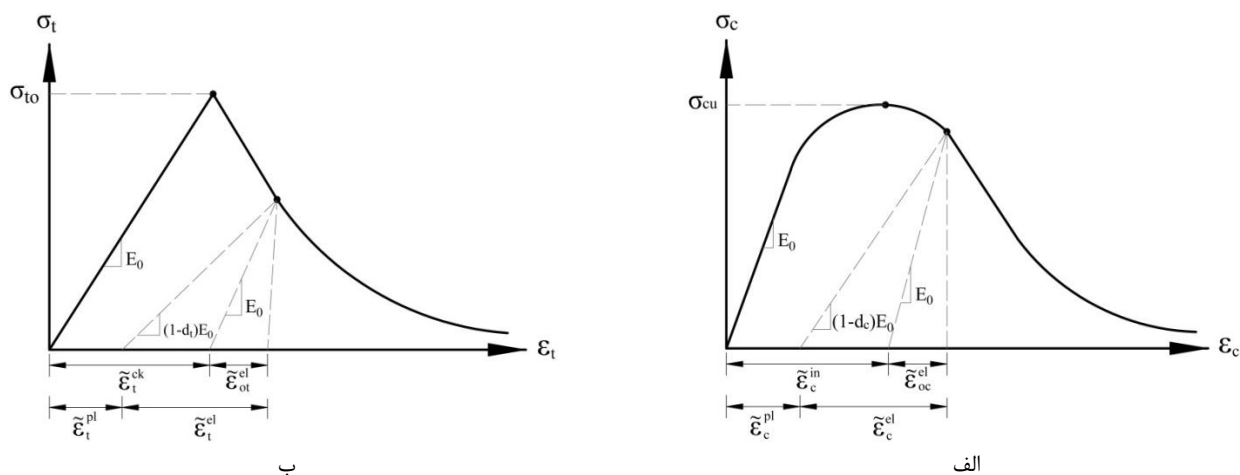
شکل ۱: تصویری شماتیک از دال مورد بررسی توسط میثمی و همکاران [۱۲]

طرح اختلاط مورد استفاده به منظور دستیابی به مقاومت ۴۰ مگاپاسکال در جدول ۲ آورده شده است.

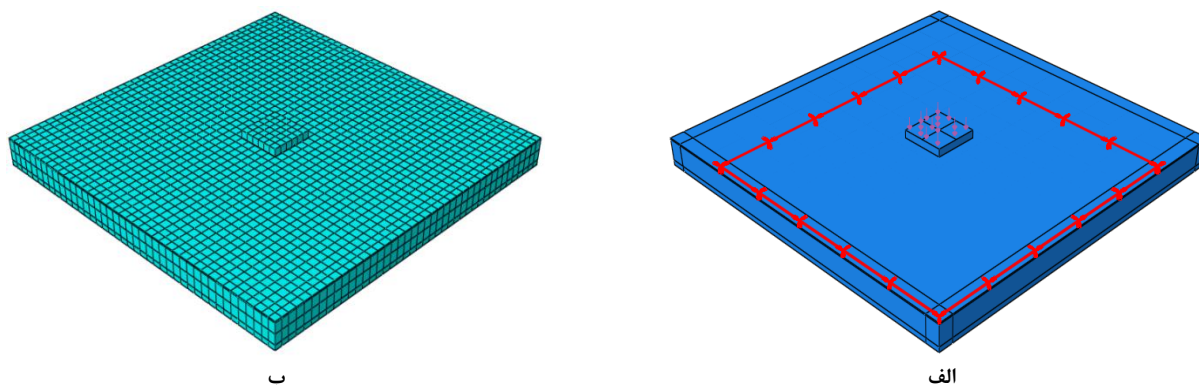
جدول ۲: طرح اختلاط بتن استفاده شده در تحقیق میثمی و همکاران [۱۲]

مقاومت فشاری (MPa)	نسبت آب به سیمان	حداکثر اندازه سنگدانه (mm)	آب (kg/m ³)	سیمان (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	شن (kg/m ³)
۴۰	۰/۶	۲۰	۱۷۵	۲۹۲	۷۷۵	۹۶۲

در شکل ۲ منحنی رفتاری فشاری و کششی بتن نشان داده شده و همچنین در شکل ۳ تصویری از مدل ساخته شده در نرم افزار آورده شده است. بارگذاری به صورت فشار بر صفحه صلب مرکزی در نظر گرفته شد و تکیه‌گاه‌های دال نیز به صورت میله‌های صلب مدل‌سازی شده و دال بر روی آنها، با در نظر گرفتن قید تماسی، قرار گرفت.



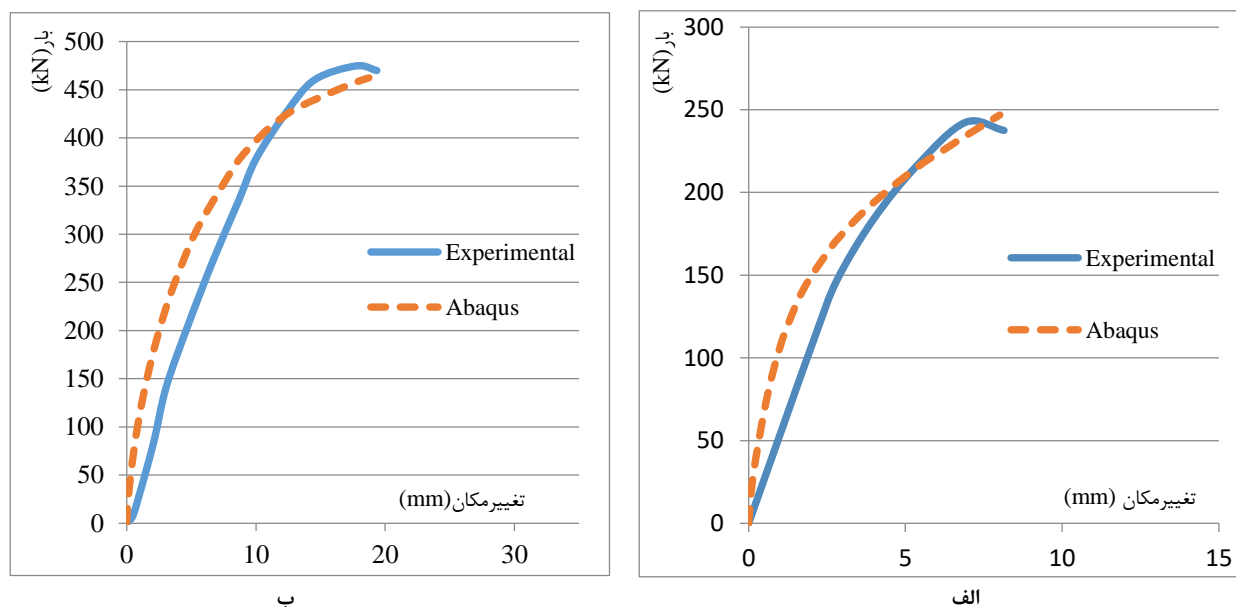
شکل ۲: الف) منحنی رفتاری فشاری بتن و ب) منحنی رفتاری کششی بتن [۱۴]



شکل ۳: الف) نحوه اعمال بار و قیدهای تکیه‌گاهی و ب) مدل مش‌بندی شده دال شاهد

۲-۱ راستی آزمایشی

در شکل ۴ تصویری از نمودار بار تغییرمکان نمونه‌های آزمایشگاهی و نمونه‌های عددی مشاهده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود، تطابق مناسبی بین نمونه‌های عددی و آزمایشگاهی وجود دارد. رفتار سخت‌تر نمونه عددی نسبت به نمونه آزمایشگاهی مخصوصاً در ابتدای بارگذاری را می‌توان به عدم لحاظ لغزش میلگردها به دلیل استفاده از قید Embedded Region و همچنین ماهیت تحلیل‌های اجزای محدود به دلیل تقسیم بندی عضو به چندین عضو کوچکتر (مش) نسبت داد. با این حال با توجه به مقایسه‌ای بودن نتایج تحلیل‌ها و ارائه نمودارهای پاسخ دال‌های مقاوم‌سازی شده بر اساس پارامترهای بی‌بعد، می‌توان از اختلاف حاضر چشم‌پوشی نمود. از طرفی در صحت‌سنجی هر دو نمونه سعی شد تمامی پارامترهای لازم به منظور تعریف رفتار بتن ثابت باشد.



شکل ۴: نمودار بار تغییرمکان مرکز دال برای نمونه‌های آزمایشگاهی و عددی، الف) نمونه شاهد بدون FRP، و ب) نمونه مقاوم‌سازی شده با FRP [۱۲]

۳- تشریح نمونه‌های تحلیلی جدید

در این بخش در ابتدا به معرفی نمونه‌های تحلیلی جدید با در نظر گرفتن چندین الگوی مختلف برای تقویت برش منگنه‌ای مستقیم دال پرداخته می‌شود. تمام نمونه‌های مذکور در نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS مدل‌سازی و تحت بارثقلی استاتیکی، تحلیل

غیرخطی خواهند شد. بدین ترتیب با بررسی پارامترهایی نظیر بار نهایی، تغییر مکان نهایی، انرژی جذب شده، شکل پذیری، سختی الاستیک معادل و مقایسه نتایج آن‌ها با یکدیگر سعی خواهد شد الگوی بهینه مقاومتی تعیین شود. سپس، با بررسی فواصل قرارگیری پلیمر مسلح شده با الیاف FRP در الگوی مقاومتی بهینه، تاثیر فواصل این عناصر از بر ستون بر روی رفتار برش منگنه‌ای دال‌های بتن مسلح تقویت شده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و با توجه به اینکه رفتار نمونه دارای خرابی ترد بوده بنابراین تغییر مکان بار حداکثر به عنوان تغییر مکان نهایی به کار برده شده است.

۳-۱ الگوی بهینه مقاومتی

چینش عناصر تقویت کننده در ضخامت دال یکی از کلیدی ترین پارامترها در مقاومتی دال‌های بتن مسلح با استفاده از FRP بادبزی هستند. به منظور بررسی این پارامتر، ۱۸ الگوی مختلف قرارگیری عناصر تقویت کننده‌ها در دو دسته خطی و شعاعی، مورد ارزیابی قرار گرفتند. مقاومتی خطی به معنی قرارگیری FRP ها موازی اضلاع دال و مقاومتی شعاعی به معنی قرارگیری این عناصر حول مرکز دال مطابق شکل نمایش داده شده در جدول ۳ می‌باشد.

در تمامی الگوها سعی شد تا پارامترهای درگیر در مسئله به غیر از شکل الگوها، ثابت باشد، به همین خاطر فواصل FRP ها و تعداد آن‌ها در هر ردیف یکسان فرض شده است. در نام گذاری دال‌ها، حرف اول نشان دهنده دسته بندی مقاومتی (L به معنی خطی و R به معنی شعاعی)، و عدد اول نشان دهنده شماره دال می‌باشد.

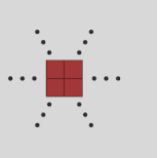
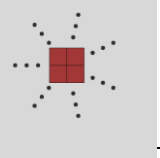
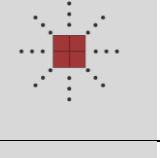
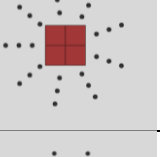
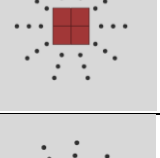
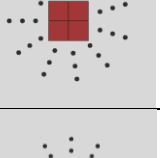
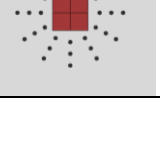
جدول ۳: نتایج تحلیل دال‌های مقاومتی شده

نام نمونه	شیوه مقاومتی با استفاده از FRP بادبزی	نوع الگوی تقویت	مساحت در FRP هر سوراخ (mm ²)	حجم به FRP کار رفته (mm ³)	بار نهایی (kN)	تغییر مکان متناظر با بار حداکثر (mm)	انرژی جذب شده (kN-mm)	شکل پذیری ($\mu = \frac{\Delta_y}{\Delta_y}$)	سختی الاستیک معادل بر اساس نمودار دو خطی ایده آل (kN/mm)
Control	---	---	---	---	۲۴۶/۸	۸/۰۱	۱۴۲۳	۳/۲	۶۵/۱
L1		خطی	۲۰۱	۴۸۲۵	۲/۰۳	۲۳/۳۱	۹۱۰۳	۳/۷	۶۵/۹
L2		خطی	۲۰۱	۲۴۱۲	۱/۸۴	۲۴/۱۸	۸۵۶۰	۳/۴۵	۶۴/۹
L3		خطی	۲۰۱	۷۲۳۸	۱/۹۵	۱۴/۲۷	۳/۵۳	۰/۹۸	۷۵

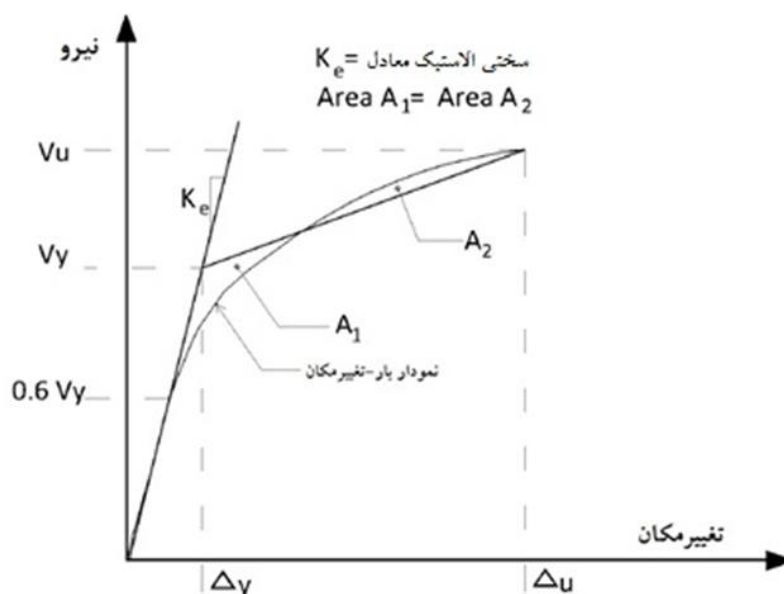
جدول ۳: نتایج تحلیل دال‌های مقاوم‌سازی شده (ادامه)

نام نمونه	شیوه مقاوم‌سازی با استفاده از FRP بادبزی	نوع الگوی تقویت	مساحت هر سوراخ در FRP (mm ²)	حجم کار رفته به FRP (mm ³)	بار نهایی (kN)	تغییر مکان متناظر با بار حداکثر (mm)	انرژی جذب شده (kN-mm)	شکل پذیری ($\mu = \frac{\Delta_x}{\Delta_y}$)	سختی الاستیک معادل بر اساس نمودار دو خطی ایده‌آل (kN/mm)
					نسبت بار نهایی نمونه مورد نظر به نمونه شاهد	بار حداکثر (mm)	نسبت انرژی جذب شده نمونه مورد نظر به نمونه شاهد	نسبت شکل پذیری نمونه مورد نظر به نمونه شاهد	نسبت سختی نمونه مورد نظر به نمونه شاهد
L4		خطی	۲۰۱	۷۲۳۸	۵۰۲/۲	۱۹/۸	۷۵۸۴	۳/۰۹	۶۶/۵
L5		خطی	۲۰۱	۹۶۵۰	۴۹۹/۶	۱۷/۳۱	۶۴۴۹	۲/۲۲	۶۷/۳
L6		خطی	۲۰۱	۱۴۴۷۶	۵۸۱/۲	۱۵/۴۸	۶۲۸۴	۲/۴۱	۷۳/۵
L7		خطی	۲۰۱	۲۱۷۱۴	۵۸۶/۴	۱۴/۰۷	۵۶۸۸	۲/۳۸	۷۹/۳
R1		شعاعی	۲۰۱	۴۸۲۵	۴۶۲/۲	۱۸/۷۴	۶۴۸۴	۲/۸۸	۶۹/۹
R2		شعاعی	۲۰۱	۷۲۳۸	۵۵۰/۹	۲۶/۳۴	۱۱۳۷۳	۳/۸۷	۶۶/۸
R3		شعاعی	۲۰۱	۲۴۱۲	۴۲۶/۶	۱۶/۷۷	۵۳۳۵	۳	۶۹/۸
R4		شعاعی	۲۰۱	۳۰۱۶	۴۴۱	۱۶/۹۴	۵۶۳۲	۲/۹۷	۶۵/۳
								۰/۹۳	—

جدول ۳: نتایج تحلیل دال‌های مقاوم‌سازی شده (ادامه)

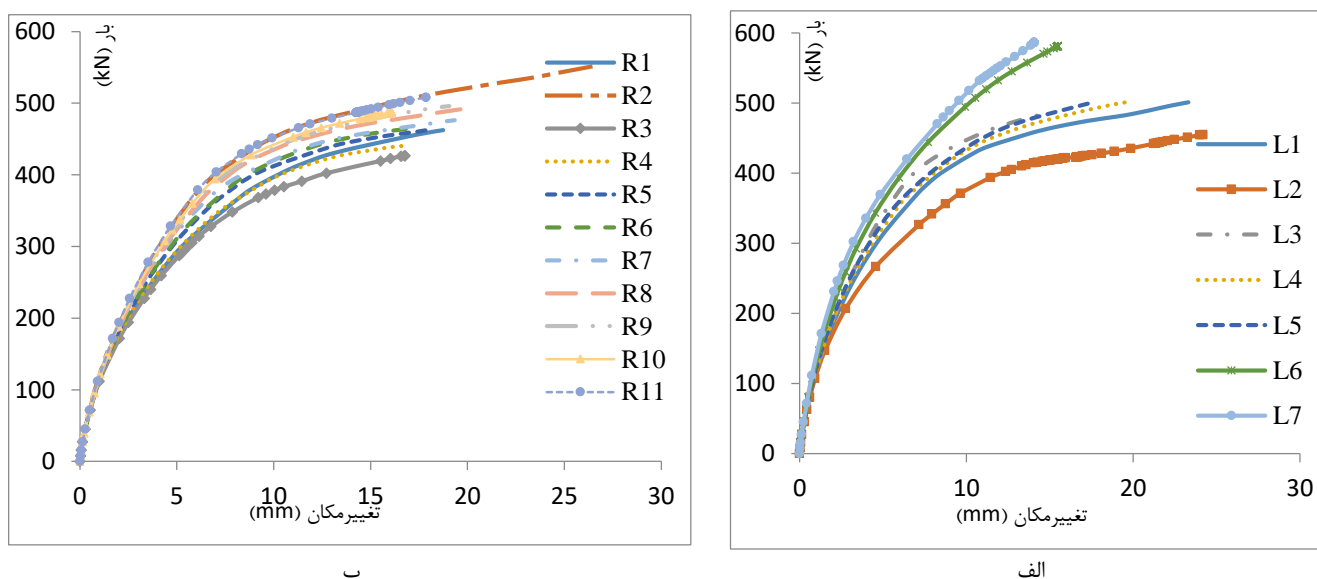
نام نمونه	شیوه مقاوم‌سازی با استفاده از FRP بادبزی	نوع الگوی تقویت	مساحت در FRP در هر سوراخ (mm ²)	حجم FRP به کار رفته (mm ³)	بار نهایی (kN)	تغییر مکان متناظر با بار حداکثر (mm)	انرژی جذب شده (kN-mm)	شکل پذیری ($\mu = \frac{\Delta y}{\Delta y}$)	سختی الاستیک معادل بر اساس نمودار دو خطی ایده‌آل (kN/mm)
					نسبت بار نهایی نمونه مورد نظر به نمونه شاهد	بار حداکثر (mm)	نسبت انرژی جذب شده نمونه مورد نظر به نمونه شاهد	نسبت شکل پذیری نمونه مورد نظر به نمونه شاهد	نسبت سختی نمونه مورد نظر به نمونه شاهد
R5		شعاعی	۲۰۱	۳۶۱۹	۱/۸۷	۱۸/۰۸	۴/۴۵	۱/۰۶	۱/۰۸
R6		شعاعی	۲۰۱	۴۲۲۲	۱/۸۸	۱۷/۰۵	۴/۱۸	۰/۹۴	۱/۰۵
R7		شعاعی	۲۰۱	۴۸۲۵	۱/۹۳	۱۹/۳۳	۴/۹۸	۱/۰۶	۱/۰۸
R8		شعاعی	۲۰۱	۵۴۲۸	۱/۹۹	۱۹/۶۴	۵/۲۱	۱/۰۷	۱/۱۱
R9		شعاعی	۲۰۱	۶۰۳۲	۲/۰۱	۱۹/۰۶	۵/۰۷	۱/۰۴	۱/۱۱
R10		شعاعی	۲۰۱	۶۶۳۵	۱/۹۷	۱۶/۰۸	۴/۰۸	۰/۸۹	۱/۱۱
R11		شعاعی	۲۰۱	۷۲۳۸	۲/۰۶	۱۷/۸۶	۴/۸	۰/۹۸	۱/۱۴

در تعیین شکل‌پذیری و سختی از نمودار دو خطی ایده‌آل بهره گرفته شده است. همان‌طور که از شکل ۵ مشاهده می‌شود، این نمودار طوری ترسیم می‌شود که سطح زیر نمودار بار-تغییرمکان واقعی برابر با سطح زیر نمودار دو خطی ایده‌آل باشد؛ از طرفی نمودار دو خطی باید نمودار بار تغییرمکان واقعی را در $0.6V_y$ قطع کرده و در انتها نیز بر نمودار بار تغییرمکان منطبق باشد. با در نظر گرفتن این شروط، نمودار دو خطی برای هر یک از مدل‌ها ترسیم شده و سختی، از رابطه $K = \frac{V_y}{\Delta_y}$ و شکل‌پذیری از رابطه $\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$ محاسبه شد [۱۵]. لازم به ذکر است Δ_u تغییر مکان حد نهایی و Δ_y تغییر مکان حد تسلیم بوده و انرژی جذب‌شده نیز به عنوان سطح زیر نمودار بار تغییرمکان در نظر گرفته شده است.



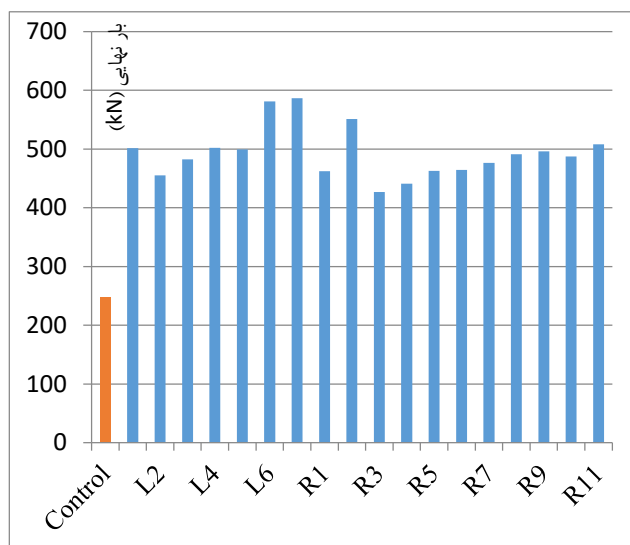
شکل ۵: نحوه ترسیم نمودار دو خطی ایده‌آل [۱۵]

در جدول ۳ نتایج تحلیل دال‌های مورد بررسی و شیوه مقاوم‌سازی آن‌ها و در شکل ۶ نمودارهای بار تغییرمکان آن‌ها آورده شده است.

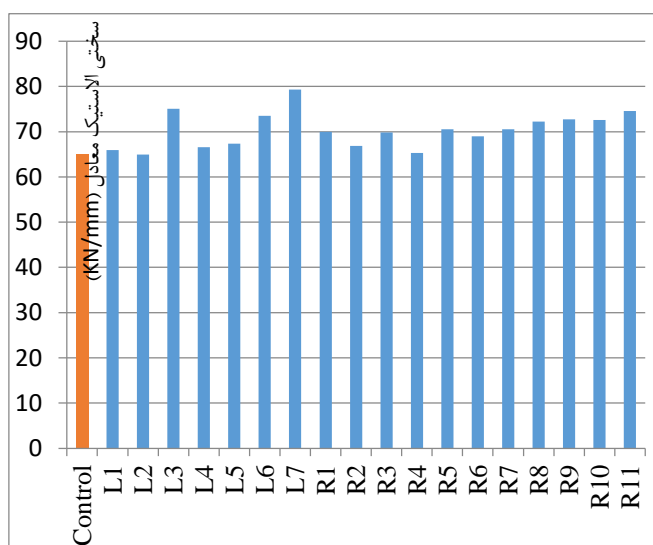


شکل ۶: نمودار بار - تغییرمکان دال‌های مقاوم‌سازی شده به شیوه (الف) خطی، و (ب) شعاعی

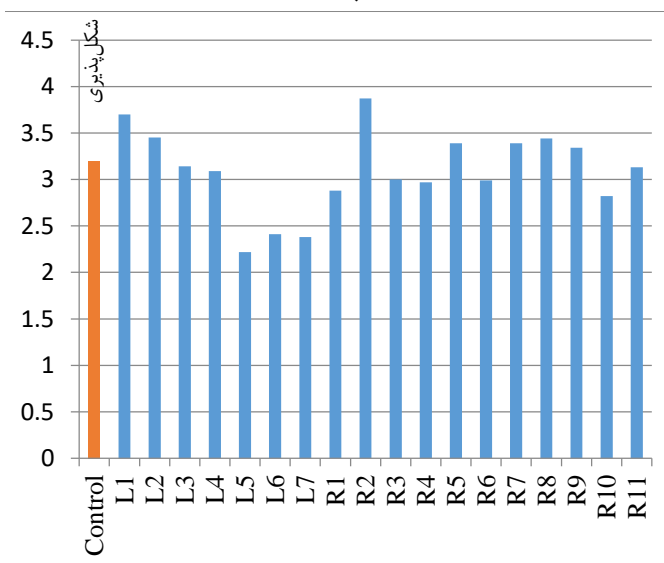
شکل ۷، مقایسه میان ظرفیت باربری حداکثر، میزان انرژی جذب شده، ضریب شکل پذیری و سختی در نمونه‌های مختلف را در الگوهای مختلف تقویت خطی و شعاعی نمایش می‌دهد.



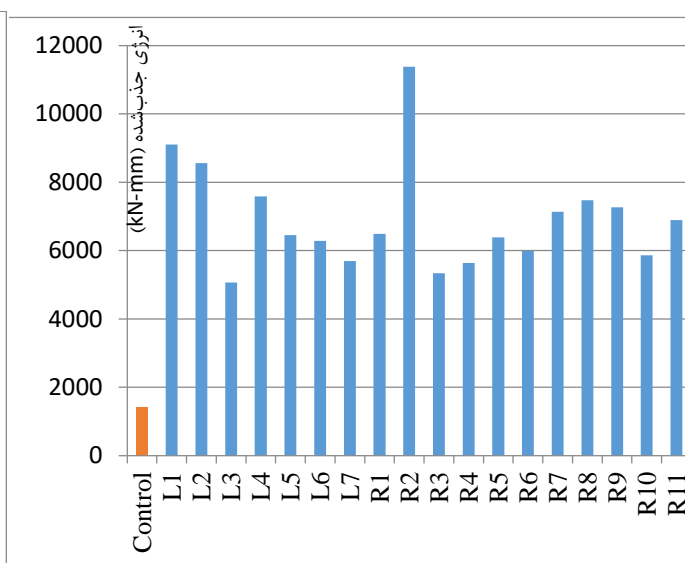
ب.



الف



د.



ج

شکل ۷: تغییرات (الف) سختی الاستیک معادل، (ب) ظرفیت باربری، (ج) انرژی جذب شده، (د) شکل پذیری دال‌های مقاوم‌سازی شده نسبت به شاهد

همان‌طور که از شکل ۷ مشاهده می‌شود، تقویت دال با استفاده از FRP بادبزی موجب می‌شود ظرفیت باربری، انرژی جذب شده و سختی الاستیک معادل در تمامی موارد نسبت به نمونه شاهد افزایش یابد. در برخی نمونه‌ها، مقاوم‌سازی موجب کاهش شکل پذیری شده است که دلیل این امر را می‌توان به افزایش تغییرمکان ترک خوردگی (δ_{cr}) در نمودار دو خطی ایده‌آل نسبت داد که سبب می‌شود شکل پذیری کمتری از نمونه شاهد داشته باشد. با توجه به شکل ۷، کارایی این شیوه مقاوم‌سازی به خوبی مشهود است.

به طور میانگین، الگوهای مختلف مقاوم‌سازی خطی برای برش منگنه‌ای دال در این تحقیق موجب افزایش ۱۰۸، ۳۸۵ و ۸ درصدی بارنهایی، انرژی جذب شده و سختی نسبت به دال شاهد شده و شکل پذیری ۹ درصد کاهش یافته است. نتیجه‌ای مشابه در تحقیق

صورت گرفته توسط بیسینی و بایراک، مشاهده شد [۷]. میانگین افزایش برای دو نوع الگوی بررسی شده به ترتیب ۳۵ و ۸۵/۸ درصد بود. این مقادیر همچنین برای الگوی شعاعی به ترتیب ۹۴، ۳۸۰ و ۸ درصد در این تحقیق نتیجه شد و شکل پذیری در الگوهای مختلف مقاوم سازی نسبت به دال شاهد بدون تغییر ماند. می توان گفت الگوی مقاوم سازی خطی در افزایش ظرفیت باربری و انرژی جذب شده نسبت به الگوی شعاعی عملکرد بهتری را نشان داد. با مقایسه سختی به دست آمده از دو الگوی مورد بررسی، نمونه ها عملکردی تقریباً یکسان از خود نشان دادند.

به منظور تعیین الگوی بهینه قرارگیری عناصر مقاوم سازی در روش مقاوم سازی بادبزی، از نسبتی بی بعد به نام شاخص افزایش، استفاده شد. شاخص افزایش، مطابق رابطه ۱، به صورت میزان افزایش پارامتر مورد نظر (P_i) نسبت به کمترین میزان در الگوهای مختلف (P_{min})، تقسیم بر تغییرات مساحت الیاف استفاده شده در الگوی مورد نظر؛ یعنی $A_i - A_{min}$ ، برای مثال، در بحث ظرفیت باربری دال های مقاوم سازی شده با الگوهای خطی، کمترین میزان ظرفیت باربری متعلق به نمونه L2 می باشد و در این شرایط شاخص افزایش برای نمونه L1 برابر ۰/۱۰۱۸ می شود.

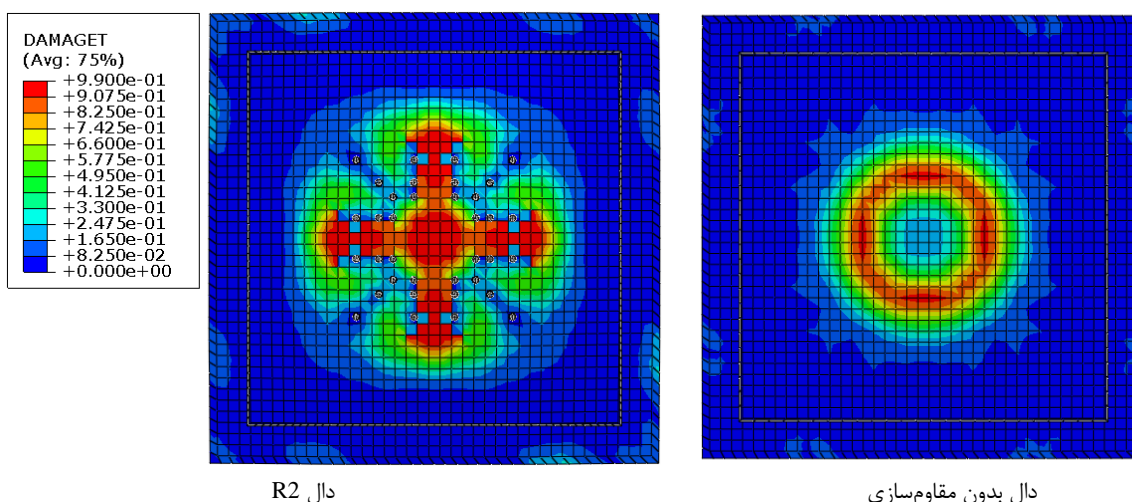
$$L1 = \left| \frac{\frac{(P_i - P_{min})}{P_{min}}}{\frac{(A_i - A_{min})}{A_{min}}} \right| \quad (1)$$

از این پارامتر می توان برای مقایسه میزان افزایش ظرفیت باربری، انرژی جذب شده، شکل پذیری و سختی الاستیک معادل در الگوهای مختلف قرارگیری الیاف در ضخامت دال، به نسبت میزان الیاف خاصی که استفاده شده است، بهره جست. واضح است که هر چقدر میزان این شاخص بیشتر باشد، بیانگر این مطلب است که الگوی مورد نظر در بهبود پارامتر انتخابی بهتر عمل می کند. همچنین چون میزان الیاف مصرفی نیز در این پارامتر گنجانده شده، به نوعی مباحث اقتصادی نیز در نظر گرفته شده است. در جدول ۴ شاخص های افزایش دال های با الگوی مقاوم سازی خطی آورده شده است. به منظور ارزیابی الگوی بهینه با در نظر گرفتن هر ۴ شاخص افزایش، از میانگین شاخص ها پس از نرمال سازی در بازه [۰ و ۱] بهره گرفته می شود. نرمال سازی به منظور همپایه سازی تمامی مقادیر می باشد تا هر یک از پارامترها سهم یکسانی در محاسبه میانگین داشته باشند.

جدول ۴: شاخص های افزایش پارامترهای مختلف برای دال های مقاوم سازی شده با الگوی خطی

نام نمونه	شاخص افزایش بار نهایی	شاخص افزایش انرژی جذب شده	شاخص افزایش شکل پذیری	شاخص افزایش سختی الاستیک معادل	میانگین شاخص ها پس از نرمال سازی
L1	۰/۱۰۱۸	۲/۳۹۳۴	۱/۳۳۳۳	۰/۰۱۴۹	۰/۷۰۹۵
L2	۰	۱/۰۳۵۷	۰/۷۲۸۴	۰	۰/۴۲۱۷
L3	۰/۰۳۰۲	۰	۱/۶۵۷۶	۰/۰۷۷۷	۰/۶۶۶۷
L4	۰/۰۵۱۸	۰	۱/۵۶۷۵	۰/۰۱۲۶	۰/۴۱۶۴
L5	۰/۰۳۲۶	۰/۸۲۰۵	۰	۰/۰۱۲۳	۰/۱۱۹۵
L6	۰/۰۵۵۴	۰/۲۴۰۹	۰/۱۷۱۱	۰/۰۲۲۶	۰/۱۷۸۷
L7	۰/۰۳۶	۰/۰۶۱۵	۰/۰۵۷۶	۰/۰۲۷۶	۰/۰۷۸۸

همان طور که از جدول ۴ مشاهده می شود، الگوی L1 در پارامترهای ظرفیت باربری و انرژی جذب شده، الگوی L3 در پارامترهای شکل پذیری و سختی بهترین عملکرد را از خود نشان دادند. با جمع بندی تمامی موارد و با در نظر گرفتن میانگین شاخص های افزایش، می توان گفت الگوی L1 بهترین عملکرد را در بین الگوهای بررسی شده از نظر پارامترهای ظرفیت باربری، انرژی جذب شده، شکل پذیری و سختی الاستیک معادل دارد. این دو الگو در شکل ۸ نشان داده شده اند. همان طور که مشاهده می شود تاثیر الیاف در محدود سازی ترک های اطراف ستون می باشد.



دال R2

دال بدون مقاوم سازی

شکل ۸: پارامترهای خرابی در دال کنترلی و دال R2

محاسباتی مشابه برای الگوهای شعاعی نیز صورت گرفته که نتایج آن در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵: شاخص‌های افزایش پارامترهای مختلف برای دال‌های مقاوم سازی شده با الگوی شعاعی

نام نمونه	شاخص افزایش بار نهایی	شاخص افزایش انرژی جذب شده	شاخص افزایش شکل پذیری	شاخص افزایش سختی	میانگین شاخص‌ها پس از نرمال سازی
R1	۰/۰۸۳۳	۰/۲۱۵۵	۰/۰۷۸	۰/۱۱۹۷	۰/۱۵۱۶
R2	۰/۱۴۵۶	۰/۵۶۵۸	۴/۰۹۵	۰/۰۱۷۲	۰/۶۸۲۲
R3	۰	۰	۰/۱	۰/۳۴۸۸	۰/۴۳۳۵
R4	۰/۱۳۴۶	۰/۲۲۳۲	۰/۰۹۷۵	۰	۰/۳۱۲۷
R5	۰/۱۶۹۶	۰/۳۹۲۴	۰/۴۴۴۶	۰/۴۰۲۱	۰/۶۸۷۸
R6	۰/۱۱۷۴	۰/۱۶۳۷	۰/۱۶۵۷	۰/۱۴۱۴	۰/۲۴۱۸
R7	۰/۱۱۶۴	۰/۳۳۷۵	۰/۷۴۱۱	۰/۱۳۴	۰/۳۵۵۴
R8	۰/۱۲۱۴	۰/۳۲۰۱	۱/۲۰۹۲	۰/۱۳۲۴	۰/۳۸۸۹
R9	۰/۱۰۸۲	۰/۲۴۱۱	۲/۰۲۸۳	۰/۱۱۳۴	۰/۳۵۱۷
R10	۰/۰۸۰۹	۰/۰۵۵۷	۰	۰/۰۹۳۳	۰/۰۶۵۹
R11	۰/۰۹۵۶	۰/۱۴۵۳	۱/۲۰۹۲	۰/۱۰۱۴	۰/۲۱۰۴

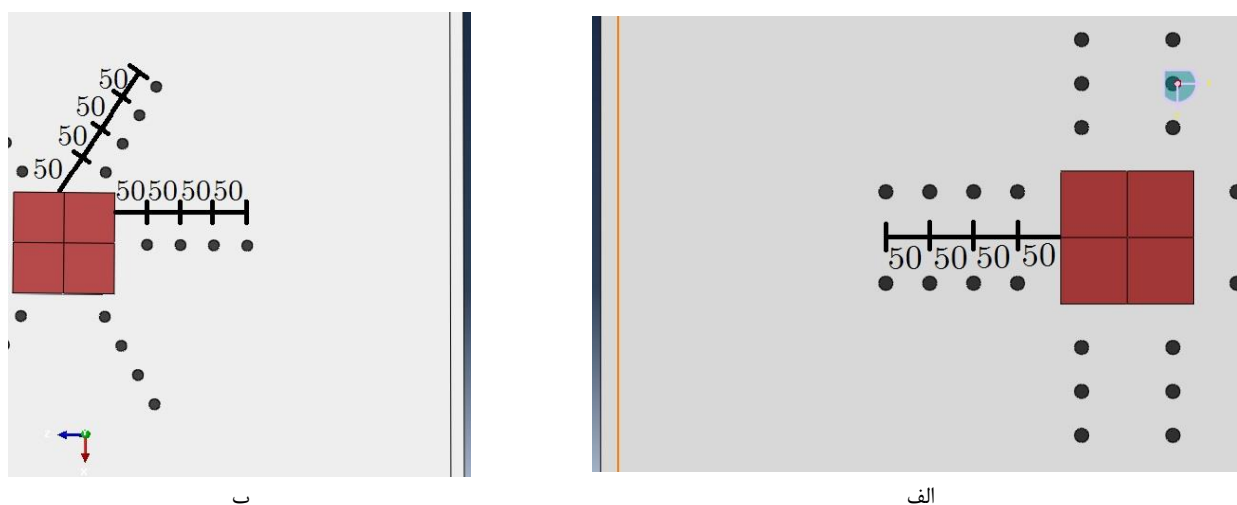
با رجوع به جدول ۵ مشاهده می‌شود بهترین الگوی قرار گیری الیاف تقویت کننده از نقطه نظر ظرفیت باربری و سختی به ترتیب به میزان ۸۷ و ۸/۳ درصد، الگوی R5 بوده و بهترین الگو از نظر انرژی جذب شده و شکل پذیری به ترتیب به میزان ۷/۹ برابر و ۲۱ درصد، الگوی R2 می‌باشد. الگوی R5 به دلیل عملکرد دوختی الیاف مقاوم سازی در اطراف ستون، با کمترین میزان FRP مصرفی، بهترین عملکرد را در بهبود ظرفیت باربری دال مقاوم سازی شده در میان سایر الگوها، از خود نشان داد.

در شکل ۸ پارامترهای خرابی دال R2 با نمونه کنترلی مقایسه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود مقاوم سازی سبب شده ترک خوردگی و شکست منگنه‌ای به محیطی دورتر از مرکز دال منتقل می‌شود و مساحتی بیشتر گسترش یابد و همین امر سبب افزایش ظرفیت باربری و تغییر مکان دال مقاوم شده نسبت به نمونه بدون مقاوم سازی می‌شود. نتایجی مشابه نیز توسط بیسینی و بایراک [۱۶] و سیاکیس و شیخ [۹] در این مورد به دست آمد. آنها مشاهده کردند که استفاده از نوارهای CFRP بعنوان رکابی‌های بسته باعث افزایش مقاومت نمونه‌ها گردید. هنگامی که نوارهای CFRP در ضخامت دال به هم چسبانده می‌شود، ناحیه مسلح شده تقریباً لایه بدون آسیب باقی می‌ماند و ترک برشی در آن رخ نمی‌دهد. این باعث می‌شود شکست بعلت برش منگنه‌ای به خارج از ناحیه موثر CFRP منتقل شود.

در نتیجه می‌توان گفت الگوی L1 و R5 بهترین عملکرد را در میان الگوهای معرفی شده دارند. در بخش بعدی به منظور تعیین سایر پارامترهای موثر بر رفتار دال بتن مسلح مقاوم‌سازی شده به شیوه بادبزی، تحلیل‌هایی صورت خواهد گرفت. همچنین با مراجعه به جداول ۴ و ۵ مشاهده می‌شود که پس از نمونه L1 و R5، نمونه‌های L3 و R2 به ترتیب در الگوی تقویت خطی و شعاعی با میزان میانگین شاخص ۰/۶۶۶۷ و ۰/۶۸۲۲ بهترین عملکرد در مقاوم‌سازی برش منگنه‌ای دال‌ها، ایفا نموده‌اند.

۳-۲ ارزیابی مساحت موثر مقاوم‌سازی

فاصله عناصر مقاوم‌سازی از بر ستون در این بخش مورد بررسی قرار می‌گیرد. فاصله اولین عضو تقویت‌کننده از بر ستون و همچنین فاصله مرکز به مرکز الیاف، ثابت و برابر $2d/3$ یعنی ۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد (شکل ۹).



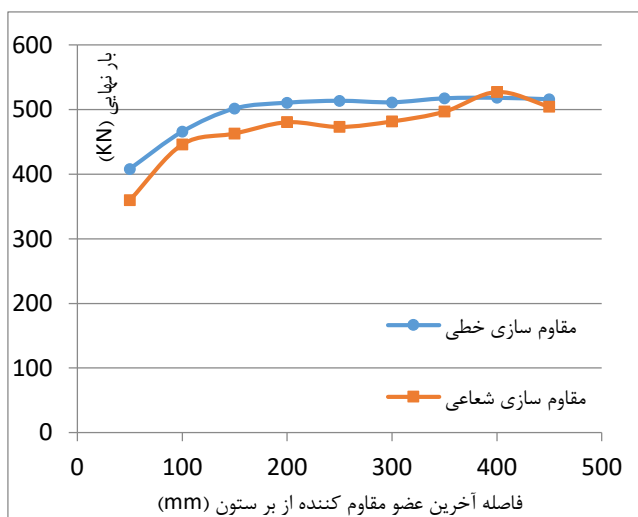
شکل ۹: فواصل بین عناصر تقویت‌کننده در دال‌های مورد بررسی

این فاصله به نحوی تعیین شد که در صورت ترک خوردن دال و ایجاد برش منگنه‌ای، حداقل یک عضو قائم از عناصر مقاوم‌کننده در قسمت ترک خورده وجود داشته باشند. حداقل تعداد ردیف سوراخ‌ها برابر ۱ و حداکثر تعداد آن‌ها برابر ۹ (طولی از دال که امکان ایجاد سوراخ فراهم می‌شد) بود. سایر اعضا نیز با همین فاصله مدل‌سازی و تحلیل شدند. نحوه مقاوم‌سازی در جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج تحلیل در جدول ۶ و شکل ۱۰ نشان داده شده است.

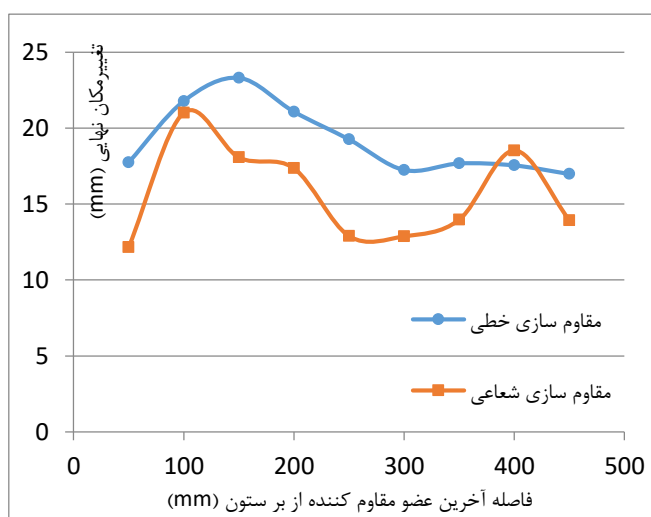
جدول ۶: تغییرات پارامترهای مورد بررسی با تعداد اعضای مقاوم کننده

نام نمونه	تغییر مکان متناظر با بار حداکثر (mm)	بار نهایی (kN)	انرژی جذب شده (kN-mm)	شکل پذیری	سختی (kN/mm)	مساحت FRP به کار رفته (mm ²)
L1-1	۱۷/۷۴	۴۰۷/۹	۵۳۵۹	۲/۹۵	۵۵/۶	۱۶۰۸
L1-2	۲۱/۷۸	۴۶۵/۵	۷۸۹۱	۳/۵۱	۶۳/۱	۳۲۱۷
L1-3	۲۳/۳۱	۵۰۱/۴	۹۱۰۳	۳/۷	۶۵/۹	۴۸۲۵
L1-4	۲۱/۰۸	۵۱۰/۴	۸۳۸۸	۳/۴۸	۷۱/۴	۶۴۳۴
L1-5	۱۹/۲۶	۵۱۳/۴	۷۶۵۱	۳/۲۱	۷۳/۵	۸۰۴۲
L1-6	۱۷/۲۴	۵۱۱	۶۷۱۹	۳/۰۵	۷۷/۱	۹۶۵۰
L1-7	۱۷/۶۸	۵۱۷/۲	۶۹۶۹	۳/۱۳	۷۷/۲	۱۱۲۵۹
L1-8	۱۷/۵۴	۵۱۸	۶۹۱۰	۳/۱	۷۷/۲	۱۲۸۶۷
L1-9	۱۶/۹۸	۵۱۵/۶	۶۶۳۹	۳/۰۳	۷۷/۹	۱۴۴۷۶
R5-1	۱۲/۱۶	۳۵۹/۷	۳۰۴۸	۲/۰۲	۵۸/۳	۱۲۰۶
R5-2	۲۱/۰۱	۴۴۵/۸	۷۲۰۸	۳/۳۸	۵۹/۹	۲۴۱۲
R5-3	۱۸/۰۸	۴۶۲/۸	۶۳۸۱	۳/۳۹	۷۰/۵	۳۶۱۹
R5-4	۱۷/۳۵	۴۸۰/۳	۶۳۲۵	۳/۰۹	۷۲	۴۸۲۵
R5-5	۱۲/۹	۴۷۳	۴۳۷۶	۲/۳۴	۷۴	۶۰۳۱
R5-6	۱۲/۸۸	۴۸۱/۶	۴۴۳۸	۲/۳۴	۷۵/۱	۷۲۳۸
R5-7	۱۳/۹۸	۴۹۶/۷	۵۰۲۰	۲/۴۵	۷۴/۳	۸۴۴۴
R5-8	۱۸/۵۳	۵۲۷/۱	۷۳۸۸	۳/۱۴	۷۴/۲	۹۶۵۰
R5-9	۱۳/۹۴	۵۰۴/۵	۵۰۶۶	۲/۴۴	۷۵/۲	۱۰۸۵۷

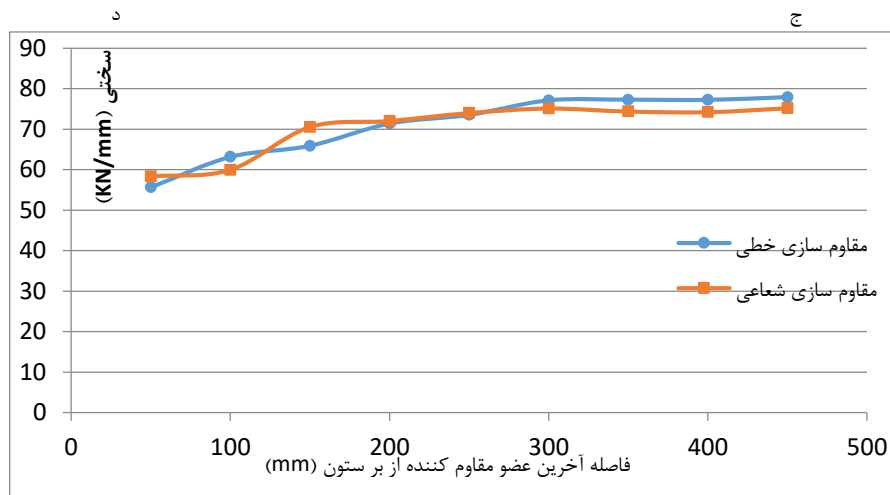
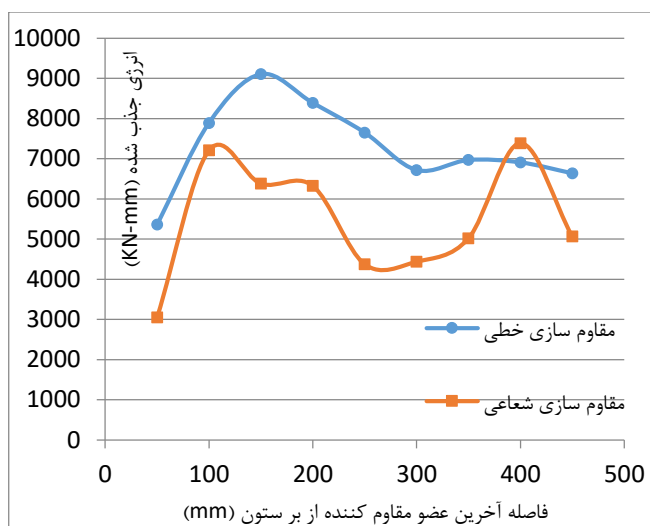
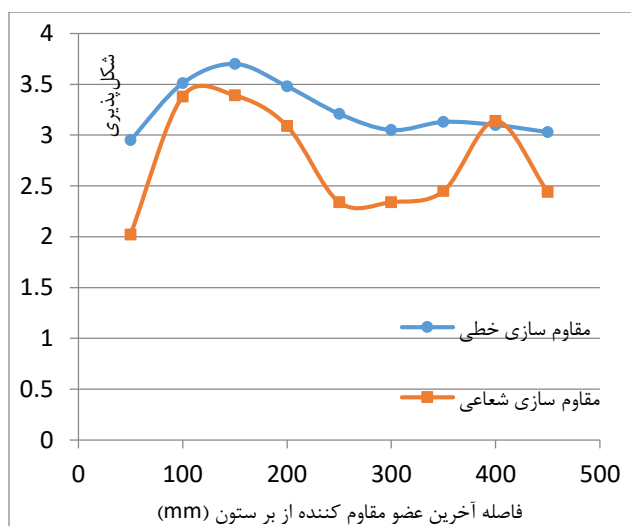
منظور از مساحت تقویت شده، آن قسمت از دال بتنی می‌باشد که توسط FRP تقویت شده‌اند. در شکل ۱۰ تغییرات پارامترهای مختلف بررسی شده به ازای تغییر در تعداد الیاف مسلح پلیمری و فواصل آن‌ها، آورده شده است. همان‌طور که از شکل ۱۰ مشخص است، با افزایش تعداد و فاصله عناصر تقویت کننده از بر ستون، تغییر مکان نهایی دال کاهش می‌یابد. این کاهش برای مقاوم سازی شعاعی به ازای فاصله و تعداد یکسان FRP، بیشتر است. دلیل این امر را می‌توان به سخت تر شدن دال با افزودن الیاف نسبت داد که موجب می‌شود رفتار دال به سمت تردتر شدن گام برداشته و در تغییر مکان کمتری به حد نهایی ظرفیت باربری خود برسد.



ب



الف



شکل ۱۰: تغییرات الف) تغییر مکان نهایی، ب) بار نهایی، ج) انرژی جذب شده، د) شکل پذیری ه) سختی در برابر فاصله آخرین عضو تقویتی از بر ستون

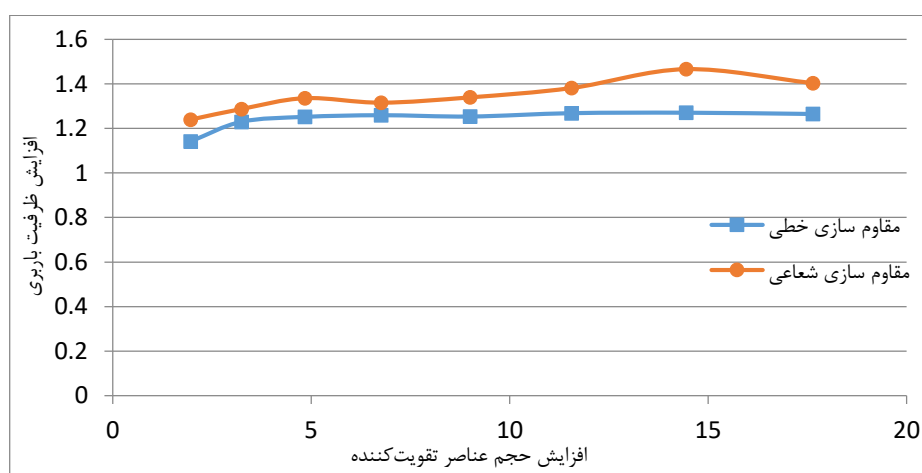
به علاوه، افزایش تعداد و فاصله FRP ها موجب می شود ظرفیت باربری نهایی دال افزایش یابد. این افزایش به طور میانگین نسبت به نمونه با کمترین میزان FRP، ۲۴ درصد برای الگوی خطی، و ۳۴ درصد برای الگوی شعاعی می باشد. این افزایش در الگوی خطی بیشتر بوده و با افزایش تعداد اعضای مقاوم کننده، نوع مقاوم سازی (شعاعی و خطی) تقریباً اثری یکسان دارد. با این حال، برای تعداد اندک اعضای مقاوم کننده، الگوی خطی عملکردی بهتر نسبت به الگوی شعاعی دارد. با این وجود می توان گفت مقاوم سازی دال در فاصله 3d از بر ستون موجب بیشترین افزایش در ظرفیت باربری، به میزان ۲۳ درصد، خواهد شد. همان طور که مشاهده می شود، افزایش تعداد FRP ها برای فاصله بیشتر از 3d از بر ستون موجب افزایش ۲/۵ درصدی ظرفیت باربری به طور میانگین شده است. می توان گفت افزایش عناصر مقاوم سازی پس از این فاصله، موجب افزایش چندانی در ظرفیت باربری دال نمی شوند.

تغییرات انرژی جذب شده در دال های مقاوم سازی شده به روش خطی و شعاعی نشان از افزایش و سپس کاهش به ازای افزایش تعداد اعضای تقویت کننده دارد. دلیل این امر را می توان به سخت تر شدن دال و در نتیجه کاهش تغییر مکان نهایی و به تبع، کاهش سطح محصور به نمودار بار - تغییر مکان دانست. دو نقطه بیشینه در نمودار تغییرات انرژی جذب شده در شکل ۱۰-ج مشاهده می شود که برای الگوی مقاوم سازی خطی و شعاعی به ترتیب در فواصل 3d و 2d از بر ستون رخ می دهد. پس از این فواصل انرژی جذب شده در دال کاهش می یابد و نشان از تاثیر منفی افزایش عناصر تقویت کننده در جذب انرژی دارد.

شکل پذیری نیز رفتاری مشابه با انرژی جذب شده داشته و در فواصل 3d و 2d از بر ستون به ترتیب برای الگوی مقاوم سازی خطی و شعاعی بیشترین مقدار را دارا می باشد.

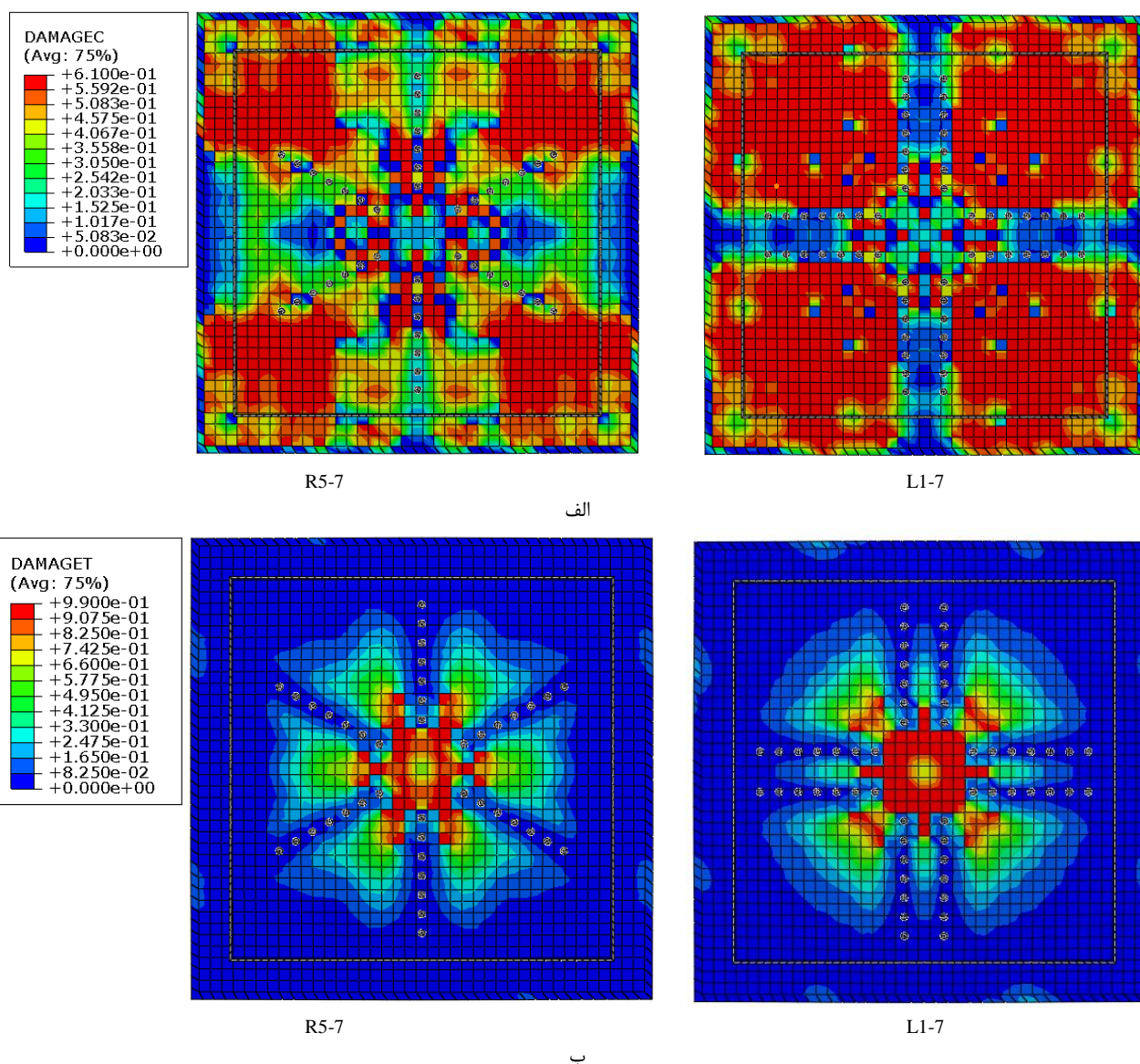
با افزایش عناصر مقاوم کننده، سختی دال در هر دو الگوی مقاوم سازی خطی و شعاعی افزایش می یابد. رفتار هر دو الگو در افزایش خطی یکسان بوده و می توان گفت به ازای فواصل بیشتر از 6d از بر ستون، تقریباً مقاوم سازی در افزایش سختی بی تاثیر است.

بررسی دو الگوی مختلف مقاوم سازی در شکل ۱۱ آورده شده است که در آن، از نسبت افزایش پارامترها نسبت به نمونه با کمترین میزان FRP، در برابر نسبت افزایش حجم عناصر تقویت کننده استفاده شده است.



شکل ۱۱: تغییرات افزایش ظرفیت باربری در برابر افزایش حجم عناصر تقویت کننده

همان طور که از شکل ۱۱ مشاهده می شود، ظرفیت باربری با افزایش تعداد سوراخ ها که حاوی مقدار یکسانی الیاف در سوراخ بودند، افزایش می یابد، اما این افزایش برای الگوی شعاعی با نرخ بیشتری رخ می دهد. پوشش دادن سطح وسیع تری از دال توسط این الگو نسبت به الگوی خطی را می توان یکی از دلایل این افزایش نام برد. در شکل ۱۲ خردشدگی فشاری و ترک کششی دو دال R5-7 و L1-7 آورده شده است. همان طور که مشاهده می شود خردشدگی فشاری زیادی در دال L1-7 در قیاس با دال R5-7 به وجود آمده است. در حالی که در دال با مقاوم سازی شعاعی، اعضای تقویت کننده قائم موجب کنترل ترک ها شده اند. همچنین مشاهده می شود که ترک های کششی بیشتری در زیر صفحه فشاری (مرکز دال) در نمونه با مقاوم سازی خطی در مقایسه با نمونه مقاوم سازی شعاعی رخ داده است که سبب کاهش سختی و افت مقاومت بیشتر در دال می شود. مقاوم سازی شعاعی سبب شده است این ترک ها در محدوده بیشتری گسترش یابند و همین امر موجب افزایش ظرفیت باربری دال خواهد شد.



شکل ۱۲: ترک‌های فشاری و کششی در دو دال R5-7 و L1-7

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، تاثیر الگوهای مختلف مقاوم‌سازی دال در برابر برش منگنه‌ای با استفاده از FRP بادبزی در ضخامت دال مورد بررسی قرار گرفت. الگوها با بررسی ۵ پارامتر مختلف، ارزیابی شده و الگوی بهینه با در نظر گرفتن میزان کامپوزیت FRP مصرفی انتخاب شد. برای الگوی بهینه، فواصل مناسب مقاوم‌سازی نیز تعیین گردید. در ادامه اهم نتایج این تحقیق آورده شده است:

۱- مقاوم‌سازی به شیوه بادبزی در تمامی حالات و الگوهای مختلف، موجب افزایش ظرفیت باربری به طور متوسط به میزان ۱۰۸ درصد، انرژی جذب‌شده به میزان ۳۸۵ درصد و سختی به میزان ۸ درصد شده است. دلیل این بهبود رفتار را می‌توان در محصور شدن بتن ناحیه اطراف ستون توسط بادبزی‌های FRP نسبت داد که موجب می‌شود خرابی‌های ناشی از برش منگنه‌ای به تعویق افتاده و در مساحتی بیشتر و دورتر از بر ستون به وقوع بپیوندد.

۲- با در نظر گرفتن تمامی پارامترهای مورد بررسی و با لحاظ میانگین شاخص‌های افزایش، می‌توان گفت الگوی L1 (قرارگیری عناصر تقویت‌کننده به صورت خطی به موازات اضلاع دال در دو ردیف) بهترین عملکرد را در بین الگوهای خطی بررسی شده از نظر پارامترهای ظرفیت باربری، انرژی جذب‌شده، شکل‌پذیری و سختی دارد.

۳- الگوی R5 (قرارگیری ۶ ردیف الیاف به صورت شعاعی حول مرکز دال) به دلیل عملکرد دوختی الیاف مقاوم‌سازی در اطراف ستون، با کمترین میزان FRP مصرفی، بهترین عملکرد را در بهبود ظرفیت باربری دال مقاوم‌سازی شده در میان سایر الگوها، از خود نشان داد.

۴- با افزایش تعداد و فاصله عناصر تقویت‌کننده از بر ستون، تغییر مکان نهایی دال کاهش می‌یابد. این کاهش برای مقاوم‌سازی شعاعی به ازای فاصله و تعداد یکسان FRP، بیشتر است. سخت‌تر شدن دال با افزودن الیاف را می‌توان دلیل این کاهش دانست که سبب می‌شود رفتار دال به سمت تردتر شدن گام برداشته و در تغییر مکان کمتری به حد نهایی ظرفیت باربری خود برسد.

۵- افزایش تعداد FRPها موجب می‌شود ظرفیت باربری نهایی دال افزایش یابد. این افزایش در تعداد کمتر عناصر تقویت‌کننده در الگوی خطی بیشتر بوده و با افزایش تعداد اعضای مقاوم‌کننده، نوع مقاوم‌سازی (شعاعی و خطی) تقریباً اثری یکسان دارد. بیشترین افزایش ظرفیت باربری در فاصله ۳d از بر ستون به دست آمد. میانگین افزایش ظرفیت باربری دال‌های مقاوم‌شده در فاصله بیشتر از 3d از بر ستون، ۲/۵ درصد می‌باشد که چندان قابل توجه نیست. می‌توان گفت مقاوم‌سازی دال در فاصله بیشتر از 3d از بر ستون، به دلیل خارج شدن الیاف از ناحیه موثر برش منگنه‌ای، عملاً تأثیر کمی بر افزایش ظرفیت باربری نهایی دال داشته و باید سعی شود در فاصله ای کمتر از 3d از بر ستون عمل مقاوم‌سازی صورت گیرد.

۶- تغییرات انرژی جذب‌شده و شکل‌پذیری در دال‌های مقاوم‌سازی شده به روش خطی و شعاعی نشان از افزایش و سپس کاهش به ازای افزایش تعداد اعضای تقویت‌کننده دارد. دو نقطه بیشینه در نمودار تغییرات انرژی جذب‌شده و شکل‌پذیری مشاهده می‌شود که برای الگوی مقاوم‌سازی خطی و شعاعی به ترتیب در فواصل 3d و 2d از بر ستون رخ می‌دهد. پس از این فواصل انرژی جذب‌شده و شکل‌پذیری در دال کاهش می‌یابد و نشان از تأثیر منفی افزایش عناصر تقویت‌کننده در جذب انرژی و شکل‌پذیری دال دارد.

۷- با افزایش عناصر مقاوم‌کننده، سختی دال در هر دو الگوی مقاوم‌سازی خطی و شعاعی افزایش می‌یابد. این افزایش نسبت به دال با کمترین میزان FRP، برای الگوی خطی به طور متوسط به میزان ۳۱ درصد و برای الگوی شعاعی ۲۳ درصد بود. رفتار هر دو الگو در افزایش سختی تقریباً یکسان بوده و می‌توان گفت به ازای فواصل بیشتر از 6d از بر ستون، تقریباً مقاوم‌سازی در افزایش سختی بی تأثیر است.

۸- الگوی مقاوم‌سازی شعاعی عملکرد بهتری در گسترش خردشدگی‌های فشاری و ترک‌های کششی در سطح دال نسبت به الگوی خطی دارد؛ زیرا سطوح پوشش داده شده توسط این الگو نسبت به الگوی خطی بیشتر بوده و می‌تواند ناحیه محصور شده اطراف ستون را افزایش دهد که خود عاملی در دورتر شدن منطقه مستعد برش منگنه‌ای از اطراف ستون و در نتیجه افزایش ظرفیت باربری، انرژی جذب شده سختی دال تخت بتن مسلح می‌باشد.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از بیان نظرات ارزشمند داوران محترم نشریه مهندسی سازه و ساخت برای پربار گشتن این اثر، کمال سپاسگزاری را دارند.

مراجع

- [1] Darwin, D., Dolan, C. W., and Nilson, A. H. (2016). Design of concrete structures. McGraw-Hill Education, 15th edition.
- [2] Hueste, M. B. D., Browning, J., Lepage, A., and Wallace, J. W. (2007). Seismic design criteria for slab-column connections. *ACI Structural Journal*, 104(4), 448-458.
- [3] Moehle, J. P., Kreger, M. E., and Leon, R. (1988). Background to recommendations for design of reinforced concrete slab-column connections. *Structural Journal*, 85(6), 636-644.

- [4] Martinez-Cruzado, J. A., Qaisrani, A. N., and Moehle, J. P. (1994). Post-tensioned flat plate slab-column connections subjected to earthquake loading. In 5th US National Conference on Earthquake Engineering, Chicago, I11, 139-148.
- [5] Farhey, D. N., Yankelevsky, D. Z., and Adin, M. A. (1997). Resistance mechanism model for reinforced concrete flat slab-column frame connections. *Structural Journal*, 94(6), 653-662.
- [6] Ebead, U., and Marzouk, H. (2004). Fiber-reinforced polymer strengthening of two-way slabs. *Structural Journal*, 101(5), 650-659.
- [7] Binici, B., and Bayrak, O. (2003). Punching shear strengthening of reinforced concrete flat plates using carbon fiber reinforced polymers. *Journal of structural engineering*, ASCE 129(9), 1173- 1182.
- [8] Stark, A., Binici, B., and Bayrak, O. (2005). Seismic upgrade of reinforced concrete slab-column connections using carbon fiber-reinforced polymers. *ACI Structural Journal*, 102(2), 324-333.
- [9] Sissakis, K., and Sheikh, S. A. (2007). Strengthening concrete slabs for punching shear with carbon fiber-reinforced polymer laminates. *ACI Structural Journal*, 104(1), 49-59.
- [10] Polak, M. A., and Lawler, N. (2011). Application of FRP for Punching Shear Retrofit of Concrete Slab-Column Connections. In *Advances in FRP Composites in Civil Engineering*, Springer, Berlin, Heidelberg, 854-857.
- [11] Wörle, P. (2014). Enhanced shear punching capacity by the use of post installed concrete screws. *Engineering Structures*, 60, 41-51.
- [12] Meisami, M. H., Mostofinejad, D., and Nakamura, H. (2015). Strengthening of flat slabs with FRP fan for punching shear. *Composite Structures*, 119, 305-314.
- [13] El-Kashif, K. F., Ahmed, E. A., and Salem, H. M. (2019). Experimental investigation of strengthening slab-column connections with CFRP fan. *Ain Shams Engineering Journal*, 639-650.
- [14] Hibbitt, H., Karlsson, B., and Sorensen, P. (2012). *ABAQUS theory manual*, version 6.12. Pawtucket, Rhode Island, USA.
- [15] ASCE-41-17. (2017). *ASCE Standard, ASCE/SEI, 41-17: Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
- [16] Binici, B., and Bayrak, O. (2005). Use of fiber-reinforced polymers in slab-column connection upgrades. *ACI Structural Journal*, 102(1), 93-102.