

## بررسی تأثیر دال بتنی در عملکرد قاب خمشی فولادی در برابر خرابی پیش رونده

مصیب کریمی<sup>۱</sup>، حامد صفاری<sup>۲\*</sup>، عباس سیوندی پور<sup>۳</sup>، جواد مشهدی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان ۲- استاد، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۳- استادیار، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان ۴- دانشجوی دکتری، دانشگاه شهید باهنر کرمان

(دریافت: ۹۵/۱۱/۰۳، پذیرش: ۹۶/۰۴/۱۸)

### چکیده

خرابی پیش‌رونده پدیده‌ای است که در آن، گسترش یک خسارت جزئی یا شکست موضعی منجر به خرابی بخش قابل توجهی و یا کل سازه می‌شود. برای جلوگیری از وقوع خرابی پیش‌رونده در سازه‌ها، تمهیداتی توسط آیین‌نامه‌ها اندیشیده شده است که در آن سازه پس از حذف ناگهانی عضو باربر ثقلی، می‌بایست توانایی تحمل بارهای اعمالی و انتقال آن‌ها در یک مسیر جایگزین به دیگر اعضای مجاور را داشته باشد. در این مطالعه تأثیر دال بتنی در عملکرد قاب خمشی فولادی در برابر خرابی پیش‌رونده بررسی شده است. بخشی از سقف به همراه اعضای سازه‌ای و اتصالات مدل‌سازی شده است و پارامترهای مؤثر دال بتنی در افزایش ظرفیت قاب خمشی فولادی و مسیر گسترش ترک در دال، ناشی از حذف ستون گوشه، کناری و میانی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد قاب خمشی با دال کامپوزیت ظرفیت بالاتری نسبت به قاب خمشی بدون دال کامپوزیت در تحمل بارهای ناشی از حذف ستون دارا است. همچنین میزان این افزایش مقاومت بستگی به موقعیت قرارگیری ستون در پلان دارد.

**کلیدواژه‌ها:** خرابی پیش‌رونده، دال کامپوزیت، قاب خمشی فولادی، آنالیز اجزاء محدود

## Assessment of Concrete Slab Effect in Performance of Steel Moment Resisting Frame in Progressive Collapse

M. Karimi, H. Saffari\*, A. Sivandi-Pour, J. Mashhadi

Shahid Bahonar University of Kerman

(Received: 22/01/2017; Accepted: 09/07/2017)

### Abstract

Progressive collapse is the collapse of all or a large part of a structure caused by damage or failure of a relatively small part of it. These efforts tended to focus on improving redundancy and alternate load paths, to ensure that loss of any single component would not lead to a general collapse. To avoid of progressive collapse in structures, some criteria have been considered by regulations that after elimination of a member, structure should have ability to bear applied loads and transfer them to other members using substitution paths. In this study, the effect reinforced concrete slab in performance of steel moment resisting frame in progressive collapse was investigated. In this research a part of roof with structural members and connections were modeled and effective parameters of slab to increase structure capacity and crack propagation path due to corner, lateral and middle column elimination, were evaluated. In modelling, the effects of rebar, concrete strength and slab thickness on strength in different cases of column elimination were investigated. Results showed that moment resisting frame with composite slab have more capacity to bear loads due to column elimination in comparison with frame without composite slab. Also, the rate of increasing strength depends on the location of column in the plan.

**Keywords:** Progressive Collapse, Composite Slab, Steel Moment Resisting Frame, Finite Element Analysis

\*Corresponding Author E-mail: Hsaffari@uk.ac.ir

## ۱. مقدمه

در اثر حذف ستون است، پیشنهاد شده است. تای و همکاران [۹] یک روش آنالیز خرابی پیش‌رونده منطقی و سریع ارائه دادند. با بررسی کمانش ستون، اتصال نیمه صلب و عمل غشایی دال، مطالعه موردی یک ساختمان ۸ طبقه با دال بتنی در نرم‌افزار LS-DYNA توسط کوانسینواسکی [۱۰] انجام شد، در این مدل اثرات محلی مانند خمش غیر الاستیک صفحات انتهایی اتصال یا کمانش موضعی بال فشاری ارائه شده است. آستانه اصل و همکاران [۱۱] پژوهشی تجربی بر روی دال مرکب کف در یک سامانه قاب خمشی فولادی ارائه دادند و استفاده از کابل پیش‌تنیده فولادی را یک راه بهبود مقاومت در برابر خرابی پیش‌رونده دانسته‌اند. یوو و همکاران [۱۲] نیز در یک پژوهش عددی سهم اتصالات مختلف دال‌های کف را در تیرهای دو دهانه مورد بررسی قرار دادند و پیشنهاد طراحی با استفاده از کابل‌های فولادی پیش‌تنیده را برای عملکرد زنجیروار به عنوان یک استراتژی جهت تقویت ساختاری سامانه عنوان نمودند. ازودین و همکاران [۱۳] پیشنهاد ساده‌ای را در زمینه تجزیه و تحلیل خرابی پیش‌رونده در یک سازه فولادی کامپوزیت یک طبقه ارائه دادند. دات و جینگ‌های [۱۴] عملکرد تیر و دال بتن مسلح را با فرض یک ستون داخلی به روش شبه استاتیکی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که عملکرد غشایی دال و تیرهای دو دهانه متصل به آن از لحاظ افزایش ظرفیت حمل بار در زمانی که جابه‌جایی عمودی بزرگی ایجاد شود مقدار قابل توجهی خواهد شد. ال اشکر و ال طویل [۱۵] با پیشنهاد روش طراحی مقاوم با بهره‌گیری از مدل‌سازی عددی از روش تغییر شکل دال به مطالعه این پدیده پرداختند. این مطالعات و تحلیل‌ها به طور عمده بر سناریوی حذف ستون داخلی متمرکز شده‌اند. با توجه به مطالب اشاره شده در این بررسی رفتارسنجی و چگونگی افزایش ظرفیت دال کامپوزیت ناشی از حذف ستون در موقعیت‌های ستون گوشه، کناری و میانی مورد مطالعه قرار گرفته است و پارامترهای مؤثر دال در افزایش ظرفیت سازه و مسیر گسترش ترک در دال، ناشی از حذف ستون مورد ارزیابی قرار گرفته است. در مدل‌سازی تحلیلی، اثرات میلگرد، مقاومت بتن و ضخامت دال در افزایش مقاومت برای حالت‌های مختلف حذف ستون بررسی شده است.

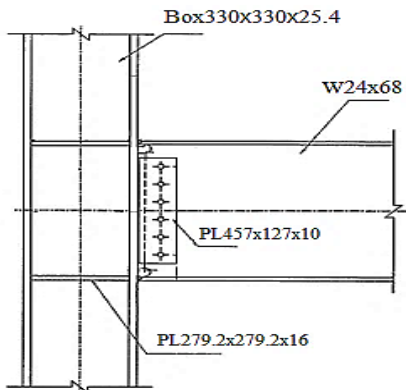
## ۲. روش تحقیق

## ۲-۱. مشخصات هندسی نمونه مورد بررسی

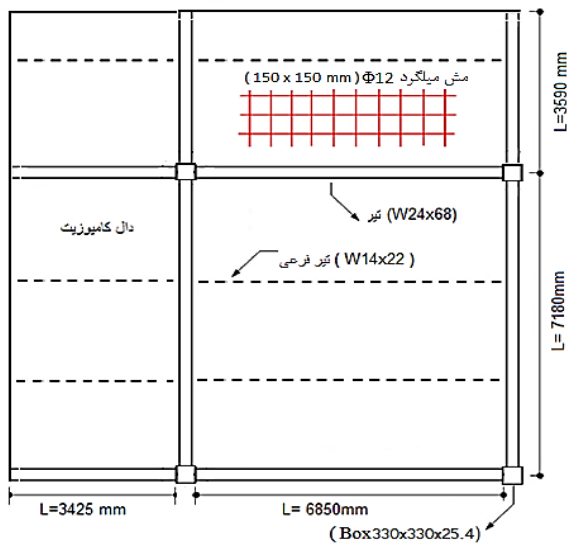
در این مقاله ارزیابی پتانسیل گسیختگی پیش‌رونده با در نظر گرفتن الگوی روش مسیر بار جایگزین صورت پذیرفته است. ایده کلی این روش بدین صورت است که سازه طوری طراحی شود که در صورت حذف و یا آسیب‌دیدگی مسیرهای عادی انتقال بار،

خرابی پیش‌رونده<sup>۱</sup> معمولاً به گسترش یک آسیب موضعی اولیه در درون سازه اطلاق می‌شود که گسترش آن باعث تخریب کلی سازه می‌شود. [۱] ASCE/SEI7-10 تعریف دقیقی از خرابی پیش‌رونده به صورت "گسترش یک گسیختگی موضعی اولیه از یک المان به المان دیگر که در نهایت منجر به فروپاشی کل سازه یا بخش بزرگی از آن می‌شود"، ارائه داده است. عواملی که می‌تواند موجب خرابی پیش‌رونده شود، شامل خطاهایی طراحی یا ساخت، روش‌های نامناسب احداث بنا، آتش‌سوزی، انفجار، تصادف وسایل نقلیه و غیره است. آیین‌نامه‌های متعددی برای بررسی خرابی پیش‌رونده وجود دارد [۲ و ۳] که هر کدام از آن‌ها روش‌هایی را برای حل این موضوع ارائه داده‌اند. از جمله این راه‌حل‌ها می‌توان به افزایش نامعینی، انتقال بار از مسیر فرعی، افزایش مقاومت موضعی و افزایش پیوستگی سازه اشاره کرد. در میان روش‌های مقابله با خرابی پیش‌رونده، آیین‌نامه‌ها تأکید بیشتری بر روش مسیر بار جایگزین دارند. فلسفه‌ی این روش مبتنی بر آن است که با حذف یک المان بحرانی، سازه قادر به پل زدن و باز توزیع نیروهای سطح بارگیر عضو حذف شده به سایر المان‌ها باشد [۴]. در واقع این روش با قبول خرابی تعدادی از المان‌ها، استقرار اعضای دیگر سازه را تأمین می‌کند. فنگ و همکاران [۵] مطالعه روی سازه سه‌بعدی ۲۰ طبقه فولادی با اتصالات مفصلی و سقف کامپوزیت با نرم‌افزار ABAQUS بدون در نظر گرفتن اثرات اتصالات انجام دادند. یانگ و همکاران [۶] یک مدل جز از قاب کامپوزیت با نرم‌افزار ABAQUS تحت سناریوی حذف ستون میانی ارائه دادند. اتصال در نظر گرفته شده در مطالعه فوق از نوع اتصال نبشی در جان و اتصال با ورق انتهایی بود. مطالعات ایشان نشان داد که عرشه فولادی تأثیری در عملکرد زنجیره‌ای در تغییر شکل‌های بزرگ ندارد و نسبت دهانه به عمق تیر تأثیر زیادی در رفتار قاب تحت سناریوی حذف ستون دارد. جیو و همکاران [۷] به منظور بررسی رفتار اتصال نیمه صلب تحت سناریوی حذف ستون یک قاب کامپوزیت با اتصال تیر به ستون از نوع اتصال با ورق انتهایی را با نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی نموده و نشان دادند با افزایش قطر یا کرنش گسیختگی پیچ‌های اتصال مقاومت در برابر خرابی پیش‌رونده، اتصال نیمه صلب می‌تواند بهبود یابد. کیم و همکاران [۸] یک مدل تحلیلی از اثر دال بر مقاومت در برابر خرابی پیش‌رونده در قاب خمشی فولادی با نرم‌افزار ABAQUS ارائه دادند، در مطالعه ایشان از لغزش بین فولاد و بتن صرف نظر شده است و اثر اتصال در مدل منظور نشده است در این مطالعه روش ساده‌ای که قادر به محاسبه انرژی جذب شده توسط دال

<sup>۱</sup> Progressive Collapse



شکل ۲. جزئیات اتصال مستقیم تقویت نشده [۱۶]

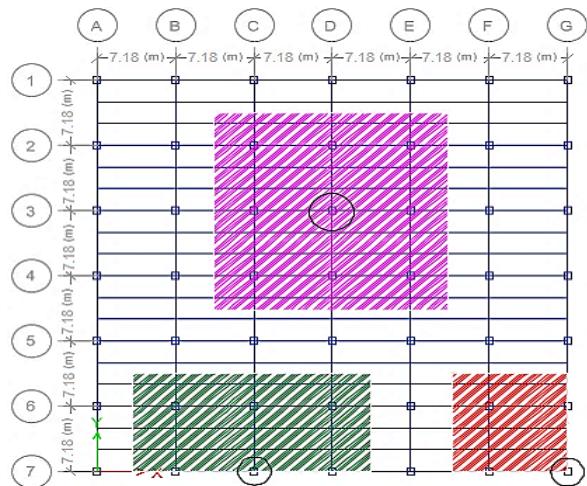


شکل ۳. ابعاد و جزئیات مدل اجزا محدود قسمت انتخابی

## ۲-۲. مدل‌سازی اجزاء محدود

برای تیرها، ستون‌ها و دال بتنی از المان پوسته ۴ گرهی (S4R) با انتگرال‌گیری کاهش یافته، استفاده شده است. میلگردها با استفاده از المان Rebar Layers مدل‌سازی شده‌اند. حرکت نسبی اجزای جوش شده نسبت به یکدیگر (شامل ورق پیوستگی به بال و جان ستون، ورق برشی به بال ستون و جان تیر و بال تیر به ستون) در سه راستا مقید شده است. به جای جوش از قید Tie موجود در نرم‌افزار استفاده شده است. همچنین میان سطحی از دال که در تماس با بال تیر قرار دارد اندرکنش تماسی در دو راستای مماسی و عمودی تعریف شده است، به طوری که در راستای عمودی، اندرکنش به صورت Hard contact تعریف شده است (اجزای تماس در یکدیگر نفوذ نمی‌کنند). از اصطکاک بین این اجزاء صرف نظر شده است، بنابراین در راستای مماسی، حرکت بال تیر و دال بتنی توسط برشگیرها به یکدیگر مقید گردیده است. به جای گل‌میخ (برشگیر) از فنر غیر خطی استفاده شده است.

مسیرهای جایگزین دیگری برای انتقال بار به زمین وجود داشته باشد. بدین ترتیب سازه برای حذف ستون‌ها و یا دیوارهای خاص طراحی می‌شود. بر همین اساس مدل‌سازی اجزاء محدود و انجام تحلیل بر روی یک طبقه دال کامپوزیت که ستون زیر خود را در موقعیت ستون کناری، گوشه و میانی از دست داده است، انجام می‌شود. در شکل (۱) موقعیت‌های ستون حذف شده و قسمت‌هایی از دال و سازه پیرامون که مدل‌سازی گردیده مشخص شده است. به این ترتیب دهانه‌هایی از دال که تحت تأثیر مستقیم ستون حذف شده قرار دارند و نیمی از دهانه مجاور توسط نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی شده است. کلیه مقاطع تیرها، ابعاد آن‌ها و مشخصات مصالح با توجه به نمونه آزمایشگاهی [۱۶] انتخاب شد.



شکل ۱. پلان مورد مطالعه و قسمت انتخاب شده جهت مدل‌سازی

تیرها در محورهای A تا G و محورهای ۱ تا ۷ از نوع W24x68 و تیرهای کامپوزیت فرعی از نوع W14x22 می‌باشند، با توجه به مدل‌سازی قاب سه‌بعدی از مقطع Box330x330x25.4 برای ستون‌ها استفاده شده است. در مدل‌سازی نصف ارتفاع ستون (۱۸۰۰ میلی‌متر) در بالا و پایین طبقه مورد نظر مدل شده است. نوع اتصال تیر به ستون از نوع اتصال گیردار مستقیم تقویت نشده است که در شکل (۲) نشان داده شده است.

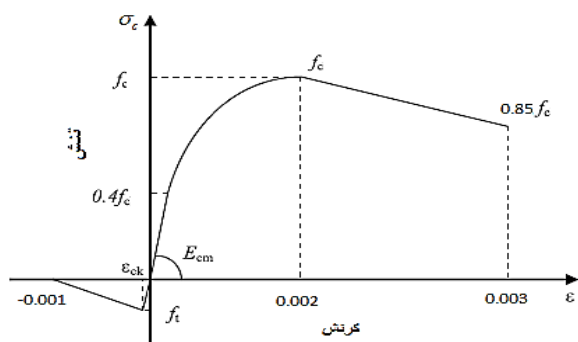
با توجه به قسمت‌های انتخابی در موقعیت‌های مختلف حذف ستون که جهت مدل‌سازی در پلان نشان داده شد، در موقعیت‌های حذف ستون کناری و ستون میانی می‌توان از تقارن بهره گرفت. در موقعیت حذف ستون کناری نیمی از محدوده مشخص شده در پلان شکل (۱)، و در مرز مشترک تقارن تنها نیمی از تیر و ستون مدل‌سازی شده است. شکل (۳) ابعاد و جزئیات مدل اجزاء محدود را نشان می‌دهد.

۳-۲. مشخصات مصالح

**مصالح فولادی:** در جدول (۱) مشخصات مصالح فولادی نشان داده شده است. برای تیرها و ستون‌های فولادی یک رابطه تنش- کرنش دو خطی و برای میلگرد یک رابطه تنش- کرنش سه خطی مطابق شکل (۴) استفاده شده است.

جدول ۱. مشخصات مصالح فولادی اعضاء [۱۶]

عنوان	تنش تسلیم (مگاپاسکال)		تنش نهایی (مگاپاسکال)	
	بال	۳۱۳	بال	۴۶۵
تیر	جان	۳۳۸	جان	۴۷۷
ستون	۳۱۷		۴۶۶	
ورق پیوستگی	۳۵۶		۵۰۶	
ورق برشی	۳۲۱		۴۸۷	
میلگرد	۴۲۰		۶۰۰	



شکل ۵. نمودار تنش-کرنش بتن در کشش و فشار [۱۷]

$$\sigma_c = \left( \frac{kn - n^2}{1 + (k - 2)n} \right) f_c \quad (۱)$$

در رابطه (۱)، n از رابطه  $n = \frac{\epsilon_c}{0.0022}$  و k از رابطه

$$k = 1.1 E_{cm} \times \frac{0.0022}{f_c}$$

$$E_{cm} = 9.5(f_c + 8)^{1/3} \quad (۲)$$

در رابطه (۲)،  $f_c$  بر حسب مگاپاسکال و  $E_{cm}$  بر حسب گیگاپاسکال است.

برای بتن در حالت کششی، تا هنگام ترک تنش به صورت خطی افزایش پیدا می‌کند. سپس تنش، از مقدار تنش کششی بتن، به صورت خطی تا مقدار صفر کاهش پیدا می‌کند. تنش کششی ترک خوردگی بتن از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

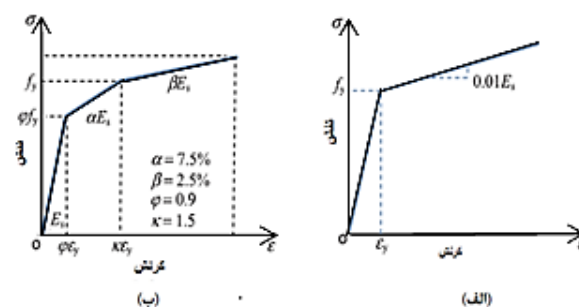
$$f_t = 0.7 \sqrt{f_c} \quad (۳)$$

**آسیب کششی بتن:** متغیر آسیب کششی  $d_t$ ، به صورت تابعی از کرنش ترک خوردگی قابل تعریف هست که مقادیر بین صفر برای قسمت‌های کاملاً سالم تا ۱ برای قسمت‌های کاملاً خراب را دربر می‌گیرد [۱۹].

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t E_c^{-1}}{\epsilon_t^{pl} \left( \frac{1}{b_t} - 1 \right) + \sigma_t E_c^{-1}} \quad (۴)$$

که در آن،  $\sigma_t$  تنش کششی بتن و  $E_c$  مدول الاستیسیته بتن  $E_c^{pl}$  برابر کرنش پلاستیک بتن و  $b_t$  پارامتری بین صفر و یک که از سعی و خطا و با توجه به تطابق با نمونه آزمایشگاهی و طبق توصیه مرجع [۱۹]، ۰/۱ انتخاب شده است.

**آسیب فشاری بتن:** متغیر آسیب فشاری  $d_c$ ، به صورت تابعی از کرنش غیر الاستیک قابل تعریف است، این پارامتر نیز همانند



شکل ۴. نمودار تنش- کرنش مصالح مورد استفاده: (الف) فولاد و (ب) میلگرد [۱۶]

**مصالح بتنی:** مقاومت فشاری بتن برابر ۴۲ مگاپاسکال لحاظ شده است. جهت مدل‌سازی غیر خطی بتن مدل رفتاری خرابی پلاستیک بتن<sup>۱</sup> به کار گرفته شده است. برای تعریف رفتار غیر خطی بتن، از منحنی تنش کرنش تک محوری بتن که در شکل (۵) نشان داده شده، استفاده شده است. هر دو تنش کششی و فشاری در این شکل نشان داده شده است. برای بتن در حالت فشاری، منحنی دارای سه قسمت است. بخش اول حالت الاستیک که به صورت خطی تا تنش ۰/۴۴f\_c ادامه پیدا می‌کند. بخش دوم، بخش غیر خطی نمودار که به صورت سهمی از ۰/۴f\_c شروع و به f\_c (مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای استاندارد) ختم می‌شود. این بخش از منحنی با استفاده از رابطه (۱) به دست می‌آید. بخش سوم منحنی به صورت خطی از f\_c تا ۰/۸۵f\_c کاهش می‌یابد. مدول الاستیسیته بتن از رابطه (۲) به دست می‌آید [۱۷ و ۱۸].

<sup>۲</sup> Tensile Damage

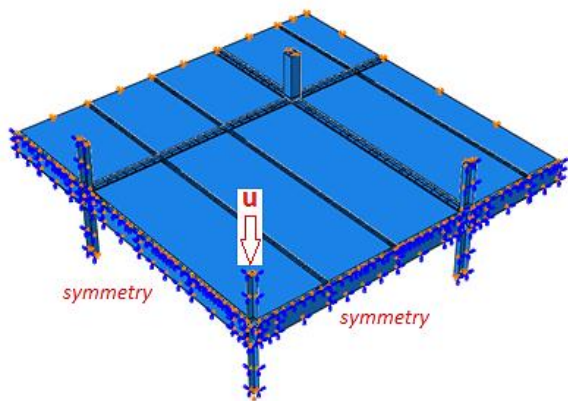
<sup>۳</sup> Compressive Damage

<sup>۱</sup> Concrete Damage Plasticity

که در آن،  $A_{sa}$  سطح مقطع گل‌میخ،  $E_c$  مدول الاستیسیته بتن و  $f_c$  مقاومت فشاری مشخصه نمونه استوانه بتن است.

#### ۲-۵. بارگذاری و اعمال شرایط مرزی

بار اعمال شده به سازه به صورت جابه‌جایی کنترل است به این صورت که در محل حذف ستون مورد نظر جابه‌جایی تعریف می‌شود و این جابه‌جایی مرحله به مرحله به صورت فزاینده به محل مورد نظر اعمال می‌شود تا به جابه‌جایی هدف (جابه‌جایی نظیر دوران ۵٪ رادبان) برسد. با بهره‌گیری از خاصیت تقارن و اعمال شرایط مرزی قرینه در نرم‌افزار، مدل برای موقعیت حذف ستون میانی به یک‌چهارم و موقعیت حذف ستون کناری به نصف تقلیل پیدا می‌کند. در شکل (۷) اعمال شرایط مرزی قرینه برای موقعیت حذف ستون میانی نشان داده شده است. با توجه به مدل‌سازی نیمی از ارتفاع ستون در طبقه، در بالا و پایین ستون‌ها شرایط تکیه‌گاهی مفصلی اعمال شده است. دو مرز کناری دال به منظور شبیه‌سازی اثرات و محدودیت محوری ایجاد شده توسط دال و عناصر مجاور دارای مهار جانبی است.



شکل ۷. اعمال شرایط مرزی قرینه برای موقعیت حذف ستون میانی

#### ۲-۶. مش‌بندی مدل اجزاء محدود

مش‌بندی، اساس روش المان محدود است که عمده هزینه، زمان و حجم کار را به خود اختصاص می‌دهد. به عبارتی قسمت عمده‌ای از درصد سختی کار و زمان صرف شده در یک تحلیل مربوط به این مرحله است. مش‌بندی به نوعی تضمین‌کننده دقت جواب است به این معنی که اگر مش‌بندی به صورت اصولی و با رعایت نکات ضروری انجام شده باشد، دقت کار تضمین شده خواهد بود. برای تعیین مش‌بندی بهینه در مدل‌سازی این مطالعه از روش بررسی همگرایی جواب‌ها استفاده گردیده است. برای این منظور در ابتدا، مدل‌ها را با المان‌های بزرگ‌تر تحلیل کرده و یکی از کمیت‌های خروجی (در اینجا مقدار بیشینه نیرو در نمودار نیرو-جابه‌جایی) برداشت شده است. سپس المان‌ها را ریزتر کرده و مسئله مجدد تحلیل شده است. فرایند ریزتر کردن المان‌ها تا

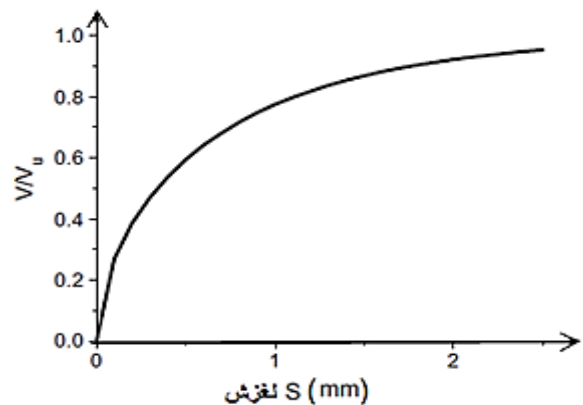
متغیر آسیب کششی مقادیر بین صفر تا یک را به خود اختصاص می‌دهد [۱۹].

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c E_c^{-1}}{\varepsilon_c^{pl} \left( \frac{1}{b_c} - 1 \right) + \sigma_c E_c^{-1}} \quad (5)$$

که در آن،  $\sigma_c$  به ترتیب تنش کششی و فشاری بتن،  $E_c$  مدول الاستیسیته بتن  $\varepsilon_c^{pl}$  برابر کرنش پلاستیک بتن و  $b_c$  پارامتری بین مقادیر صفر و یک که از سعی و خطا و با توجه به تطابق با نمونه آزمایشگاهی و طبق توصیه مرجع [۱۹]، ۰/۷ انتخاب شده است.

#### ۲-۴. اندرکنش و لغزش بین فولاد و بتن

در سقف کامپوزیت گل‌میخ‌ها وظیفه تحمل تنش برشی و انتقال آن بین دال بتنی و تیر فولادی را بر عهده دارند. در واقع گل‌میخ (برشگیر) مهم‌ترین قطعه در یک سازه کامپوزیت به شمار می‌رود. در مدل‌سازی جهت در نظر گرفتن لغزش بین فولاد و بتن و شبیه‌سازی اثر گل‌میخ از فنر غیر خطی که نقطه‌ای روی بال تیر در محل گل‌میخ را در نقطه متناظر آن روی دال بتنی که به صورت نقطه به نقطه به هم متصل می‌کند، استفاده شده است. جهت تعریف رفتار غیر خطی فنری که در محل گل‌میخ‌ها اتصال بین فولاد و بتن را ایجاد کرده است، از رابطه نیرو-لغزش گل‌میخ که توسط الاگارد [۲۰] ارائه گردیده، استفاده شده که در شکل (۶) نشان داده شده است.



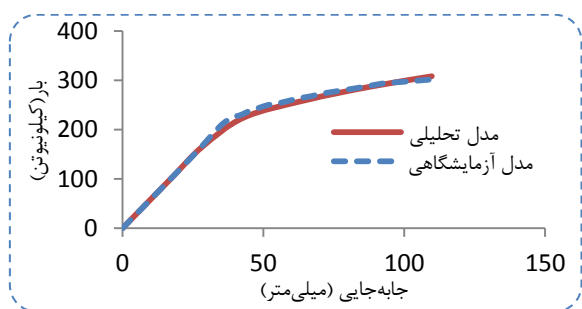
شکل ۶. نمودار نیرو-لغزش برای گل‌میخ [۲۰]

رابطه نیرو-لغزش بر اساس رابطه (۶) تعریف می‌شود.

$$V = (1 - e^{-s})^{0.558} V_u \quad (6)$$

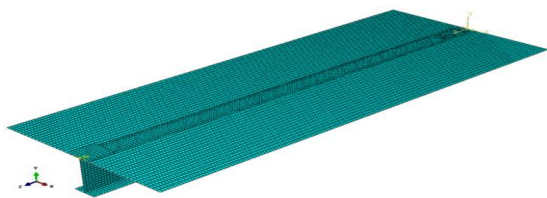
در رابطه فوق،  $s$  برابر لغزش بین فولاد و بتن، و پارامتر  $V_u$  برابر مقاومت برشی اسمی گل‌میخ است که از رابطه (۷) تعیین می‌شود [۲۰].

$$V_u = 0.5 A_{sa} \sqrt{f_c E_c} \quad (7)$$



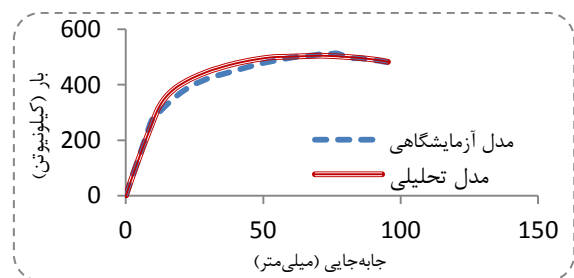
شکل ۸. مقایسه نمودار بار-جاب‌جایی نمونه تحلیلی و آزمایشگاهی

در این آزمایش تیر کامپوزیت با تکیه‌گاه ساده تحت بارگذاری متمرکز عمودی قرار گرفته است. در شکل (۹) تصویری از مدل تیر کامپوزیت نشان داده شده است.



شکل ۹. مدل اجزاء محدود، تیر کامپوزیت آزمایش شده توسط چاپمن

مدل اجزاء محدود تیر کامپوزیت نمونه آزمایشگاهی با تمام جزئیات مدل‌سازی شده و تحت آنالیز پوش آور قرار گرفته است. از المان پوسته ۴ گرهی (S4R) با انتگرال‌گیری کاهش یافته برای مدل‌سازی دال بتنی و تیر فولادی استفاده شده است. در مدل‌سازی جهت در نظر گرفتن لغزش بین فولاد و بتن و شبیه‌سازی اثر گل‌میخ از فنر غیر خطی که نقطه‌ای روی بال تیر در محل گل‌میخ را در نقطه متناظر آن روی دال بتنی که به صورت نقطه به نقطه به هم متصل می‌کند، استفاده شده است. جهت تعریف رفتار غیر خطی فنری که در محل گل‌میخ‌ها اتصال بین فولاد و بتن را ایجاد کرده است، از رابطه نیرو-لغزش گل‌میخ که توسط الاگارد [۲۰] ارائه گردیده، استفاده شده است. تحلیل استاتیکی غیر خطی بر روی مدل ساخته شده انجام گرفته و نتایج حاصل از آزمایش و مدل اجزاء محدود با هم مقایسه شدند. در شکل (۱۰) نمودار بار-جاب‌جایی نمونه آزمایشگاهی و مدل اجزاء محدود نشان داده شده است.



شکل ۱۰. مقایسه نتایج بین مدل تحلیلی و آزمایشگاهی تیر کامپوزیت معمولی

جایی ادامه داده شده که اختلاف میان نتایج بسیار کم شود. با توجه به آنالیز حساسیت مش انجام گرفته برای دال اندازه مش ۱۰۰ میلی‌متر و برای تیر در ناحیه نزدیک به اتصال و نیز نواحی اتصال اندازه مش ۱۵ میلی‌متر انتخاب شده است و با دور شدن از نواحی اتصال اندازه مش بزرگ‌تر می‌شود. برای نمونه در جدول (۲) مقادیر بیشینه نیرو در نمودار نیرو-جاب‌جایی به ازای ابعاد مش متفاوت برای قاب با دال تحت حذف ستون گوشه نشان داده شده است.

جدول ۲. مقادیر بیشینه نیرو به ازای ابعاد مش متفاوت

اندازه مش دال (mm)	۳۰۰	۲۰۰	۱۰۰	۵۰
اندازه مش تیر و نواحی اتصال (mm)	۳۰	۲۰	۱۵	۱۰
مقدار بیشینه نیرو در نمودار نیرو-جاب‌جایی (KN)	۷۷۸	۷۴۳	۷۱۸	۷۱۱

## ۲-۷. صحت سنجی مدل اجزاء محدود

قبل از مدل‌سازی اجزاء محدود و برای بررسی رفتار مدل باید از صحت و دقت نتایج پیش‌بینی شده توسط این روش اطمینان حاصل نمود. برای این کار نتایج اندازه‌گیری شده در یک آزمایش معتبر باید با مقادیر حاصل از مدل اجزاء محدود متناظر مقایسه شده و از انطباق نتایج اطمینان حاصل شود. جهت صحت سنجی اتصال تیر به ستون از نمونه اتصال SAC<sup>۳</sup> گزارش شده در نمونه SAC/BD-00/01 [۱۶] استفاده شده است. در نمونه آزمایشگاهی، تیر از نوع W24×68 با طول ۳۴۲۹ میلی‌متر و ستون از نوع W14×120 با ارتفاع ۳۶۵۸ میلی‌متر و اتصال آن‌ها از نوع اتصال مستقیم تقویت نشده است. انتهای تیر تحت بارگذاری قرار گرفته است. مدل اجزاء محدود نمونه با در نظر گرفتن تمامی جزئیات به وسیله نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS ساخته شده است. مشخصات مصالح فولاد مصرفی در مدل‌سازی مطابق با مشخصات مصالح نمونه آزمایشگاهی در نظر گرفته شده است. شرایط تکیه‌گاهی به گونه‌ای اختصاص داده شده تا بهترین تطابق را با شرایط آزمایشگاهی داشته باشد. در ساخت این مدل از المان‌های پوسته ۴ گرهی (S4R) استفاده شده است. تحلیل استاتیکی غیر خطی بر روی مدل ساخته شده انجام گرفته و نتایج حاصل از آزمایش و مدل اجزاء محدود با هم مقایسه شدند. در شکل (۸) نمودار بار-جاب‌جایی نمونه آزمایشگاهی و مدل اجزاء محدود آمده است.

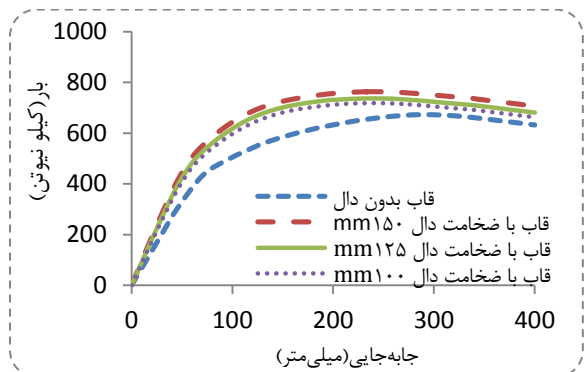
در ادامه جهت صحت‌سنجی رفتار بتن و فولاد، تیر مرکب معمولی بدون عرشه فولادی از نمونه آزمایش شده توسط چاپمن و همکاران [۲۱] استفاده شده است.

### ۳. نتایج و بحث

#### ۳-۱. بررسی تأثیر پارامترهای مختلف در عملکرد قاب پس از حذف ستون

در این بخش تأثیر پارامترهایی نظیر ضخامت دال، مقاومت فشاری بتن و میزان میلگردهای دال بر عملکرد سازه پس از حذف ستون‌های گوشه، کناری و میانی پرداخته شده است. برای بررسی تأثیر ضخامت دال سه ضخامت مختلف ۱۰۰ میلی‌متر ۱۲۵ و ۱۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده که در هر سه مورد مقاومت فشاری بتن ۴۲ مگاپاسکال و شبکه میلگرد با قطر ۱۲ میلی‌متر و فاصله ۱۵۰ میلی‌متر است. جهت بررسی تأثیر مقاومت فشاری دو مقاومت فشاری ۴۲ مگاپاسکال و ۷۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده که در هر دو مورد، ضخامت دال ۱۵۰ میلی‌متر و شبکه میلگرد با قطر ۱۲ میلی‌متر با فاصله ۱۵۰ میلی‌متر است. جهت بررسی تأثیر میلگردها در ابتدا شبکه میلگرد به قطر ۱۲ میلی‌متر با فاصله ۱۵۰ میلی‌متر به صورت یک لایه و سپس این شبکه در دو لایه در نظر گرفته شده است. در این دو حالت اخیر ضخامت دال ۱۵۰ میلی‌متر و مقاومت بتن ۴۲ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. شکل (۱۱) نمودار بار - جابه‌جایی حاصل از حذف ستون گوشه در سازه با ضخامت‌های مختلف دال در دوران ۵٪ رادپان نشان داده شده است. جدول (۳) مقدار بار نهایی قاب به ازای ضخامت‌های مختلف دال و درصد افزایش باربری سازه نسبت به قاب بدون دال را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل (۱۱)، ناچیز بودن اثر دال در افزایش مقاومت نمونه در حالت حذف ستون گوشه به این دلیل است که در این حالت دال عموماً تحت کشش است و فقط اندکی میلگردهای دال در این بخش همکاری می‌کنند.



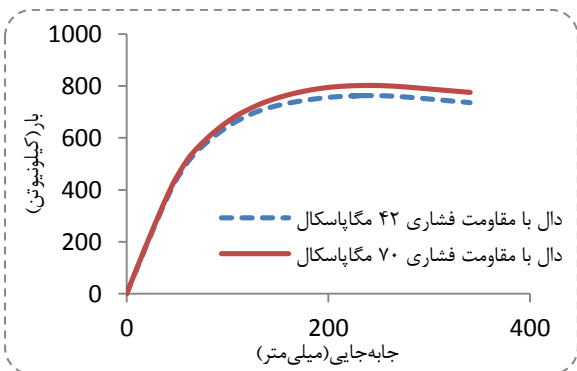
شکل ۱۱. نمودار بار - جابه‌جایی حاصل از حذف ستون گوشه با ضخامت‌های مختلف دال

در شکل (۱۲) نمودار بار - جابه‌جایی مدل، حاصل از حذف ستون گوشه با مقاومت فشاری بتن، ۴۲ و ۷۰ مگاپاسکال نشان داده شده است و در جدول (۴) درصد افزایش بار، مدل با مقاومت

فشاری بتن ۷۰ مگاپاسکال نسبت به مدل با مقاومت فشاری ۴۲ مگاپاسکال نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود با افزایش مقاومت فشاری بتن در حالت حذف ستون گوشه مقدار بار نهایی قاب به مقدار کمی افزایش پیدا کرده است.

جدول ۳. مقایسه قاب بدون دال و قاب با دال در ضخامت‌های مختلف ناشی از حذف ستون گوشه

نام مدل	بار نهایی (KN)	درصد افزایش بار نهایی نسبت به مدل قاب بدون دال
قاب بدون دال	۶۷۳	
قاب با ضخامت دال ۱۰۰ mm	۷۱۸	۶/۶۸٪
قاب با ضخامت دال ۱۲۵ mm	۷۳۷	۹/۵٪
قاب با ضخامت دال ۱۵۰ mm	۷۶۳	۱۳/۳۷٪



شکل ۱۲. نمودار بار - جابه‌جایی قاب با مقاومت فشاری مختلف تحت حذف ستون گوشه

جدول ۴. مقایسه قاب با مقاومت فشاری مختلف تحت حذف ستون گوشه

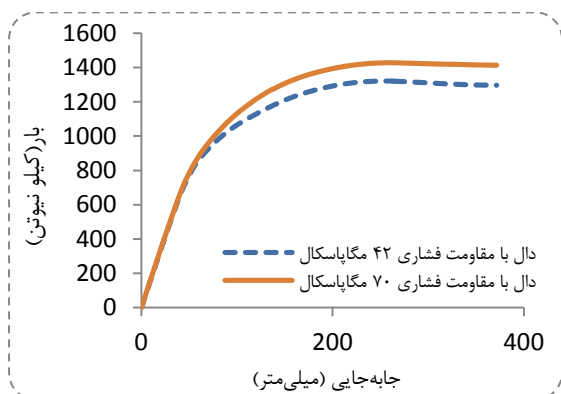
نام مدل	بار نهایی (KN)	درصد افزایش بار نهایی
قاب با مقاومت بتن ۴۲ مگاپاسکال	۷۶۳	
قاب با مقاومت بتن ۷۰ مگاپاسکال	۸۰۲	۵٪

در شکل (۱۳) نمودار بار - جابه‌جایی مدل، حاصل از حذف ستون گوشه با یک و دو شبکه میلگرد نشان داده شده است و در جدول (۵) میزان افزایش بار، مدل با دو شبکه میلگرد نسبت به مدل با یک شبکه میلگرد نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود با افزایش مقدار میلگرد در حالت حذف ستون گوشه مقدار بار نهایی قاب به مقدار کمی افزایش پیدا کرده است.

**جدول ۶.** مقایسه قاب بدون دال و قاب با دال در ضخامت‌های مختلف ناشی از حذف ستون کناری

نام مدل	بار نهایی (KN)	درصد افزایش بار نهایی
قاب بدون دال	۱۰۱۸	
قاب با ضخامت دال ۱۰۰ mm	۱۲۱۳	۱۹٪
قاب با ضخامت دال ۱۲۵ mm	۱۲۶۰	۲۴٪
قاب با ضخامت دال ۱۵۰ mm	۱۳۲۱	۳۰٪

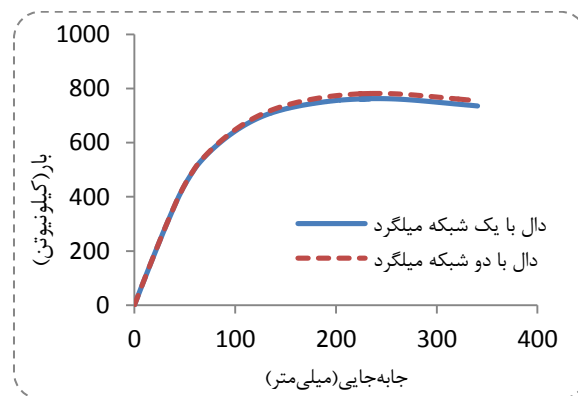
در شکل (۱۵) نمودار بار- جابه‌جایی مدل، حاصل از حذف ستون کناری با مقاومت فشاری بتن، ۴۲ و ۷۰ مگاپاسکال نشان داده شده است و در جدول (۷) میزان افزایش بار، مدل با مقاومت فشاری بتن ۷۰ مگاپاسکال نسبت به مدل با مقاومت فشاری ۴۲ مگاپاسکال نشان داده شده است. در شکل (۱۶) نمودار بار- جابه‌جایی مدل، حاصل از حذف ستون کناری با یک و دو شبکه میلگرد نشان داده شده است و در جدول (۸) میزان افزایش بار، مدل با دو شبکه میلگرد نسبت به مدل با یک شبکه میلگرد نشان داده شده است. در شکل (۱۷) نمودار بار- جابه‌جایی حاصل از حذف ستون میانی در سازه با ضخامت‌های مختلف دال در دوران ۵٪ رادیان نشان داده شده است. جدول (۹) مقدار بار نهایی قاب به ازای ضخامت‌های مختلف دال و درصد افزایش باربری سازه نسبت به قاب بدون دال را نشان می‌دهد.



**شکل ۱۵.** نمودار بار- جابه‌جایی قاب با مقاومت فشاری مختلف تحت حذف ستون کناری

**جدول ۷.** مقایسه قاب با مقاومت فشاری مختلف تحت حذف ستون کناری

نام مدل	بار نهایی (KN)	درصد افزایش بار نهایی
قاب با مقاومت بتن ۴۲ مگاپاسکال	۱۳۲۱	
قاب با مقاومت بتن ۷۰ مگاپاسکال	۱۴۲۸	۸٪



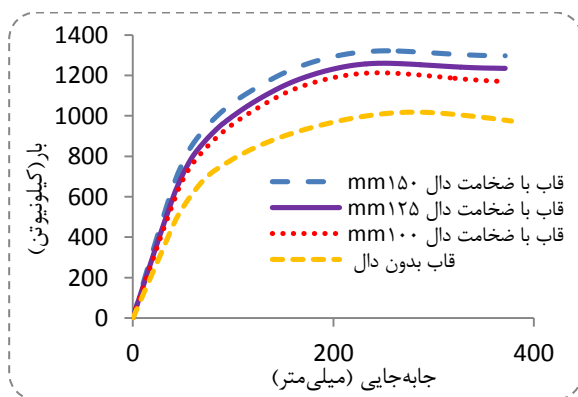
**شکل ۱۳.** نمودار بار- جابه‌جایی قاب با یک و دو شبکه میلگرد تحت حذف ستون گوشه

**جدول ۵.** مقایسه قاب با یک و دو شبکه میلگرد تحت حذف ستون گوشه

نام مدل	بار نهایی (KN)	درصد افزایش بار نهایی
قاب با یک شبکه میلگرد	۷۶۳	
قاب با دو شبکه میلگرد	۷۸۲	۲/۵٪

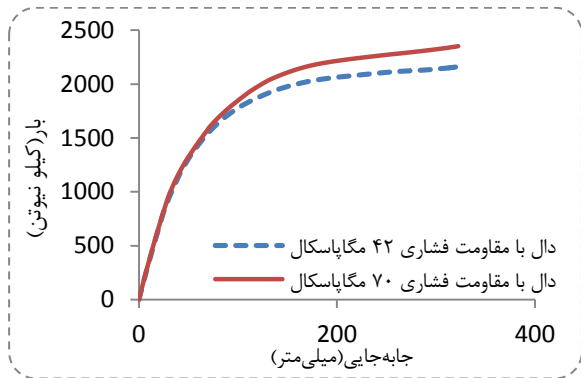
در حالت حذف ستون گوشه، دال و تیر به صورت توأم به مانند یک تیر طره تحت خمش منفی عمل می‌کنند که بالای دال تحت کشش قرار می‌گیرد. با توجه به این موضوع تعداد شبکه میلگرد از یک شبکه در پایین مقطع به دو شبکه در بالاو پایین مقطع تغییر کرده است.

در شکل (۱۴) نمودار بار- جابه‌جایی حاصل از حذف ستون کناری در سازه با ضخامت‌های مختلف دال در دوران ۵٪ رادیان نشان داده شده است. با توجه به شکل (۱۴)، افزایش ضخامت دال در مقاومت سامانه پس از حذف ستون کناری تأثیر قابل ملاحظه دارد. جدول (۶) مقدار بار نهایی قاب به ازای ضخامت‌های مختلف دال و درصد افزایش باربری سازه نسبت به قاب بدون دال با مقاومت بتن ۴۲Mpa را نشان می‌دهد.



**شکل ۱۴.** نمودار بار- جابه‌جایی حاصل از حذف ستون کناری با ضخامت‌های مختلف دال





شکل ۱۸. نمودار بار-جاب‌جایی قاب با مقاومت فشاری مختلف تحت حذف ستون میانی

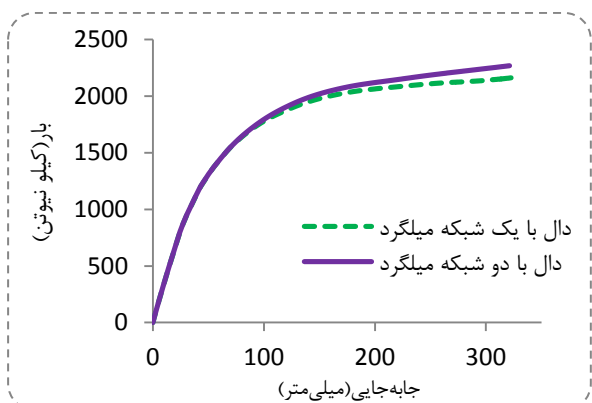
جدول ۱۰. مقایسه قاب با مقاومت فشاری مختلف تحت حذف ستون میانی

نام مدل	بار نهایی (KN)	درصد افزایش بار نهایی
قاب با مقاومت بتن ۴۲ مگاپاسکال	۲۲۱۱	
قاب با مقاومت بتن ۷۰ مگاپاسکال	۲۳۵۲	۶/۴٪

در شکل (۱۹) نمودار بار-جاب‌جایی مدل، حاصل از حذف ستون میانی با یک و دو شبکه میلگرد نشان داده شده است. در جدول (۱۱) مقدار افزایش بار، مدل با دو شبکه میلگرد نسبت به مدل با یک شبکه میلگرد نشان داده شده است.

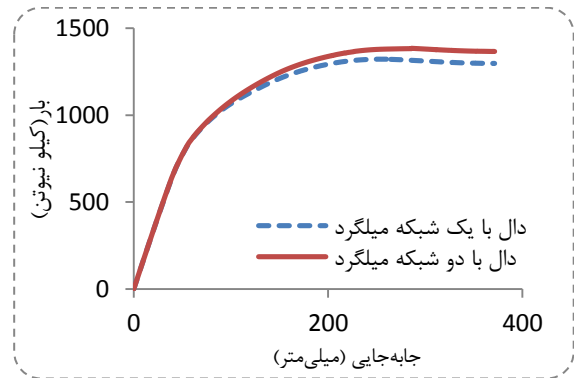
جدول ۱۱. مقایسه قاب با یک و دو شبکه میلگرد تحت حذف ستون میانی

نام مدل	بار نهایی (KN)	درصد افزایش بار نهایی
قاب با یک شبکه میلگرد	۲۱۴۴	
قاب با دو شبکه میلگرد	۲۲۶۸	۶٪



شکل ۱۹. نمودار بار-جاب‌جایی قاب با یک و دو شبکه میلگرد تحت حذف ستون میانی

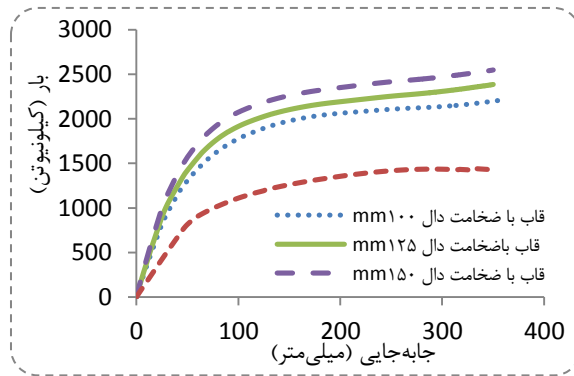
در شکل (۲۰) درصد افزایش بار نهایی قاب با ضخامت‌های مختلف دال در حالت‌های مختلف حذف ستون نمایش داده شده است.



شکل ۱۶. نمودار بار-جاب‌جایی قاب با یک و دو شبکه میلگرد تحت حذف ستون کناری

جدول ۸. مقایسه قاب با یک و دو شبکه میلگرد تحت حذف ستون کناری

نام مدل	بار نهایی (KN)	درصد افزایش بار نهایی
قاب با یک شبکه میلگرد	۱۳۲۱	
قاب با دو شبکه میلگرد	۱۳۸۴	۵٪



شکل ۱۷. نمودار بار-جاب‌جایی حاصل از حذف ستون میانی با ضخامت‌های مختلف دال

جدول ۹. مقایسه قاب بدون دال و قاب با دال در ضخامت‌های مختلف ناشی از حذف ستون میانی

نام مدل	بار نهایی (KN)	درصد افزایش بار نهایی
قاب بدون دال	۱۴۴۳	
قاب با ضخامت دال ۱۰۰ mm	۲۲۱۰	۵۳٪
قاب با ضخامت دال ۱۲۵ mm	۲۳۸۷	۶۵٪
قاب با ضخامت دال ۱۵۰ mm	۲۵۴۹	۷۷٪

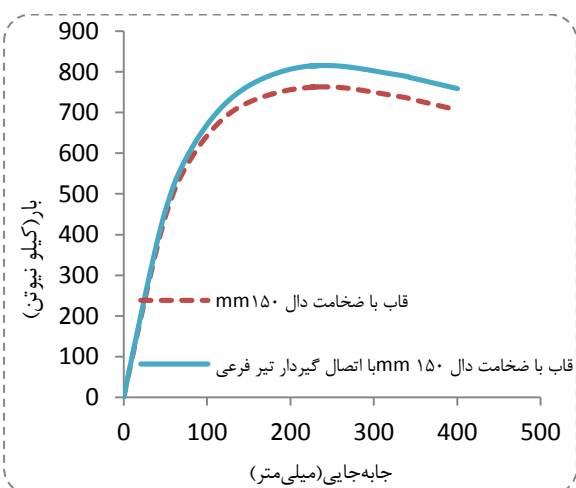
در شکل (۱۸) نمودار بار-جاب‌جایی مدل، حاصل از حذف ستون میانی با مقاومت فشاری بتن، ۴۲ و ۷۰ مگاپاسکال نشان داده شده است و در جدول (۱۰) درصد افزایش بار، مدل با مقاومت فشاری بتن ۷۰ مگاپاسکال نسبت به مدل با مقاومت فشاری ۴۲ مگاپاسکال نشان داده شده است.

میلی‌متر با اتصال گیردار تیر فرعی نشان داده شده است. در جدول (۱۲)، درصد افزایش بار نهایی دال با اتصال گیردار تیر فرعی نسبت به دال کامپوزیت معمولی نشان داده شده است.

با توجه به نتایج به‌دست آمده، با گیردار کردن تیرهای فرعی و کاهش فاصله آن‌ها با افزایش ۷٪ بار نهایی همراه خواهد بود. این در حالی است که با افزایش میلگرد و افزایش مقاومت بتن به ترتیب ۲/۵٪ و ۵٪ افزایش بار نهایی خواهد داشت.

جدول ۱۲. مقایسه قاب با اتصال ساده و گیردار تیر فرعی

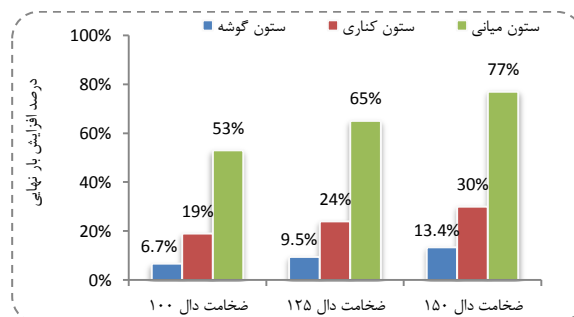
نام مدل	بار نهایی (kN)	درصد افزایش بار نهایی نسبت به قاب با اتصال مفصلی تیر فرعی
قاب با ضخامت دال ۱۵۰ mm با اتصال مفصلی تیر فرعی	۷۶۳	
قاب با ضخامت دال ۱۵۰ mm با اتصال گیردار تیر فرعی	۸۱۶	۷٪



شکل ۲۰. نمودار بار-جاب‌جایی قاب با اتصال ساده و گیردار تیر فرعی تحت حذف ستون گوشه

### ۳-۳. بررسی ترک خوردگی در دال در حالت‌های مختلف حذف ستون

برای بررسی ترک خوردگی و مشاهده مسیر گسترش ترک در دال پارامترهای مختلفی شامل خرابی کششی بتن و خرابی فشاری بتن مورد استفاده قرار گرفته است. این پارامترها، مقادیر بین صفر (برای قسمت‌های کاملاً سالم) تا ۱ (برای قسمت‌های کاملاً خراب) را دربر می‌گیرند. در شکل (۲۲) پارامتر DAMAGET برای بررسی خرابی بتن در کشش و مشاهده مسیر گسترش ترک در حالت کششی، در دوران ۵٪ رادیان در حالت حذف ستون گوشه نشان داده شده است.



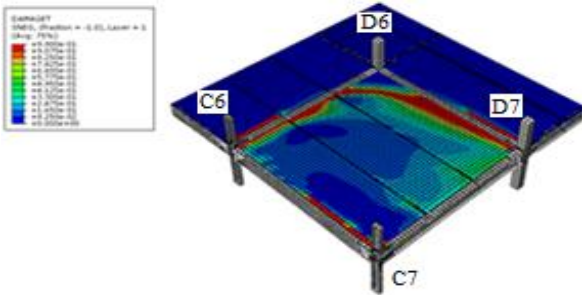
شکل ۲۱. مقایسه درصد افزایش بار نهایی قاب با ضخامت‌های مختلف دال در حالت‌های مختلف حذف ستون

با توجه به شکل (۲۰) کمترین افزایش مقاومت نهایی ناشی از اثر دال، مربوط به حالت حذف ستون گوشه است، که در هر سه ضخامت انتخابی کمتر از ۱۵ درصد افزایش مقاومت نسبت به قاب بدون دال داشته، با توجه به نتایج با افزایش ضخامت دال از ۱۰۰ میلی‌متر به ۱۵۰ میلی‌متر در حالت حذف ستون گوشه تقریباً ۷ درصد به مقاومت نهایی افزوده شده است. در حالت حذف ستون کناری نیز با افزایش ضخامت دال از ۱۰۰ به ۱۵۰ میلی‌متر، ۱۱ درصد مقاومت نهایی نسبت به قاب بدون دال افزایش پیدا کرده است که نسبت به ستون گوشه با تغییر ضخامت، عملکرد بهتری در برابر حذف ستون از خود نشان می‌دهد. بیشترین افزایش مقاومت نیز مربوط به حالت حذف ستون میانی است که در هر سه ضخامت انتخابی بیش از ۵۰ درصد افزایش مقاومت نسبت به قاب بدون دال دارد، با افزایش ضخامت از ۱۰۰ به ۱۵۰ میلی‌متر ۲۴ درصد مقاومت نهایی نسبت به قاب بدون دال افزایش پیدا کرده است و بیشترین سهم از اثر دال را به خود اختصاص داده است. با توجه به مقایسه انجام گرفته در ضخامت‌های مختلف دال، افزایش ضخامت دال چندان تأثیری در بهبود عملکرد و افزایش مقاومت در حالت حذف ستون گوشه نداشته است.

### ۳-۲. بررسی تأثیر تیرهای فرعی در افزایش مقاومت ناشی از حذف ستون گوشه

در حالت معمول با توجه به اتصال ساده (مفصلی) تیرهای فرعی عملاً این تیرها تأثیری در عملکرد زنجیره‌ای و مقاومت در برابر حذف ستون نداشته، بنابراین برای اینکه این تیرها بتوانند در مقاومت در برابر خرابی ناشی از حذف ستون نقش ایفا کنند، اتصال تیرهای فرعی از نوع گیردار انتخاب شد. بنابراین با انتخاب اتصال گیردار برای تیرهای فرعی و کاهش فاصله بین تیرهای فرعی از ۲۲۰۰ میلی‌متر به ۱۱۰۰ میلی‌متر به بررسی افزایش مقاومت در حالت حذف ستون گوشه پرداخته شده است. در شکل (۲۱) مقایسه بین نمودار بار-جاب‌جایی قاب با ضخامت دال ۱۵۰ میلی‌متر با نمودار بار-جاب‌جایی قاب با ضخامت ۱۵۰

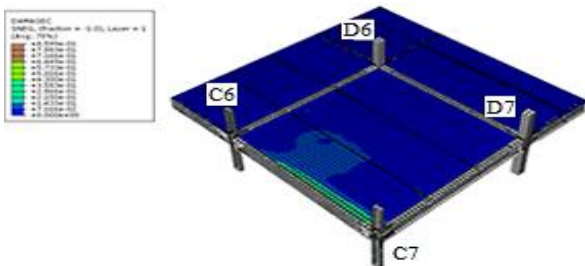
کششی دال کامپوزیت تأثیر قابل توجهی روی مقاومت در برابر خرابی و عملکرد زنجیره‌ای نسبت به مقاومت فشاری دال دارد. زیرا مقاومت کششی بالای دال کامپوزیت، فرایند ترک خوردگی در سطح بالای دال را به تأخیر می‌اندازد و از خرابی بتن در تغییر شکل‌های کوچک جلوگیری می‌کند. در شکل (۲۴) پارامتر DAMAGET برای بررسی خرابی بتن در کشش و مشاهده مسیر گسترش ترک در حالت کششی، در دوران ۵٪ رادپان در حالت حذف ستون کناری نشان داده شده است.



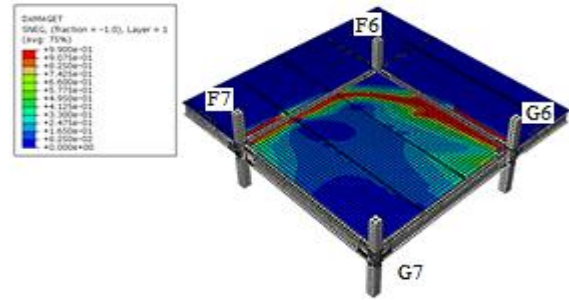
شکل ۲۴. نمایش نواحی آسیب و ترک کششی در بتن در حالت حذف ستون کناری

شروع ترک خوردگی در ابتدا اطراف ستون‌هایی (C6 و D7) که تحت تأثیر مستقیم ستون حذف شده قرار دارند و در قسمت بالای دال اتفاق می‌افتد و رفته‌رفته با افزایش جابه‌جایی، ترک خوردگی در امتداد خطوط (C6-D6 و D7-D6) ادامه می‌یابد به دنبال آن در دوران ۳٪ رادپان (جابه‌جایی ۲۳۰ میلی‌متر) ترک خوردگی در اطراف ستون حذف شده (C7) در قسمت پایین دال شروع و در امتداد خط (C7-C6) ادامه می‌یابد. همان‌طور که در شکل (۲۴) نشان داده شده است پارامتر آسیب کششی در امتداد خطوط (D7-D6, D7-D6, C6-D6 و C7-C6) (نواحی تکیه‌گاه) از ۰/۹ نیز فراتر رفته، قسمت‌های قرمز رنگ، که این موضوع نشان از خرابی کامل بتن در این نواحی است.

در شکل (۲۵) پارامتر DAMAGEC برای بررسی خرابی بتن در فشار و مشاهده مسیر گسترش ترک در حالت فشاری، در دوران ۵٪ رادپان در حالت حذف ستون کناری نشان داده شده است.



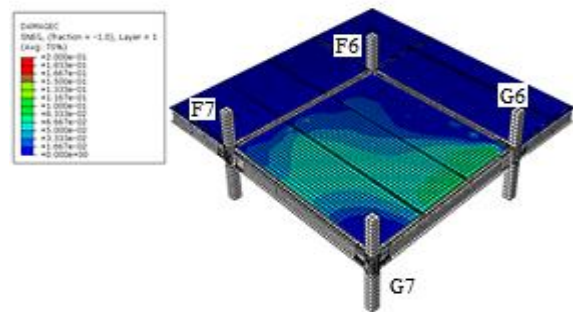
شکل ۲۵. نمایش نواحی آسیب و خردشدگی فشاری در بتن در حالت حذف ستون کناری



شکل ۲۲. نمایش نواحی آسیب و ترک کششی در بتن در حالت حذف ستون گوشه

در ابتدا شروع ترک خوردگی دال کامپوزیت در ناحیه اطراف ستون‌هایی (ستون G6 و F7) که تحت اثر مستقیم ستون حذف شده قرار دارند، در دوران ۱٪ رادپان، اتفاق می‌افتد و رفته‌رفته با افزایش جابه‌جایی، ترک خوردگی در امتداد خطوط F6-G6 و F6-F7 ادامه می‌یابد. در دوران ۳٪ رادپان کل نواحی تکیه‌گاهی (F6-F7 و F6-G6) ترک می‌خورد. در امتداد خطوط F6-G6 و F6-F7 قسمت بالای دال در کشش و قسمت پایین دال در فشار است. در بخش‌هایی از ناحیه F7G6F6 قسمت بالای دال در کشش است. همان‌طور که در شکل (۲۲) نشان داده شده است، پارامتر آسیب کششی در امتداد خطوط F6-G6 و F6-F7 (نواحی تکیه‌گاه) از ۰/۹ نیز فراتر رفته که این موضوع نشان از خرابی کامل بتن در این نواحی است.

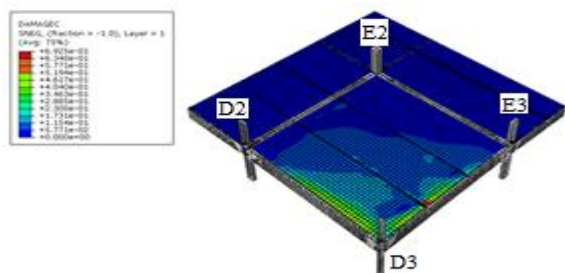
در شکل (۲۳) پارامتر DAMAGEC برای بررسی خرابی بتن در فشار و مشاهده مسیر گسترش ترک در حالت فشاری، در دوران ۵٪ رادپان در حالت حذف ستون گوشه نشان داده شده است.



شکل ۲۳. نمایش نواحی آسیب و خردشدگی فشاری در بتن در حالت حذف ستون گوشه

با توجه به نمایش آسیب فشاری در هیچ قسمتی از دال، پارامتر آسیب فشاری، حتی از ۰/۱۵ نیز فراتر نرفته و این موضوع نشان از سالم بودن و خرد نشدن بتن در فشار است. با مقایسه بین ترک خوردگی بتن در کشش و فشار مشخص می‌شود که تنش فشاری در دال از مقاومت فشاری بتن تجاوز نمی‌کند. ولی آسیب و ترک کششی در قسمت‌هایی از دال رخ می‌دهد که بیانگر تجاوز تنش کششی از تنش ترک خوردگی بتن است. بنابراین مقاومت

است.



شکل ۲۷. نمایش نواحی آسیب و خردشدگی فشاری در بتن در حالت حذف ستون میانی

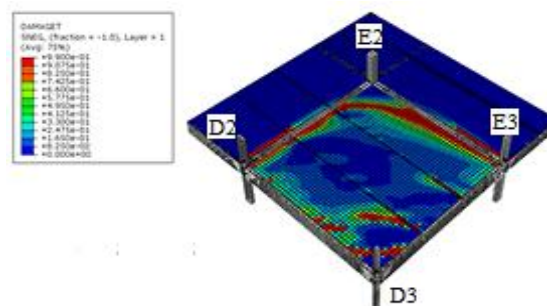
با توجه به نمایش آسیب فشاری در شکل (۲۷)، خردشدگی فشاری در ابتدا از اطراف ستون حذف شده (D3) در قسمت بالای دال در دوران ۱٪ رادیان شروع می‌شود و سپس در امتداد تیر (D3-D2) و (D3-E3) ادامه پیدا می‌کند. با توجه به شکل، پارامتر آسیب فشاری از مقدار ۰/۵ تجاوز نکرده و وسعت خردشدگی نیز زیاد نیست. بنابراین در حالت حذف ستون میانی نیز به مانند حالت‌های دیگر حذف ستون، قبل از اینکه بتن به مقاومت فشاری خود برسد به علت کشش به وجود آمده در آن گسیخته می‌شود.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS بخشی از سقف به همراه اعضای سازه‌ای و اتصالات آن‌ها جهت بررسی تأثیر دال کامپوزیت در افزایش مقاومت سازه در برابر حالت‌های مختلف حذف ستون شبیه‌سازی شده است. تأثیر پارامترهای مختلف مانند درصد میلگرد، مقاومت بتن و ضخامت دال بر عملکرد سازه آسیب‌دیده ناشی از حذف ستون گوشه، کناری و میانی مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به موارد بررسی شده این نتایج حاصل شده است، که به طور کلی عملکرد دال باعث افزایش مقاومت سازه آسیب‌دیده می‌شود. تأثیر دال به افزایش مقاومت سازه‌ای که ستون میانی آن حذف شده در مقایسه با افزایش مقاومت سازه‌ای که ستون کناری یا گوشه آن حذف شده به مراتب بیشتر است، به طوری که دال بتنی در حالت حذف ستون میانی حدود ۵۳ درصد، ستون کناری ۱۹ درصد و ستون گوشه ۷ درصد مقاومت سازه را افزایش داده است، و پتانسیل خرابی در حالت حذف ستون گوشه نسبت به دو حالت دیگر بیشتر است. افزایش ضخامت دال و مقاومت بتن می‌تواند توان سازه‌ای که ستون‌های کناری یا میانی خود را از دست داده‌اند افزایش دهد ولی به علت ضعف بتن در تحمل کشش، تأثیر قابل ملاحظه‌ای در توان سازه‌ای که ستون گوشه خود را از دست داده است نداشت. در حالت حذف ستون گوشه با گیردار کردن تیرهای فرعی و کاهش فاصله آن‌ها با افزایش ۷٪ بار نهایی همراه خواهد بود. این در حالی است که با دو برابر کردن

با توجه به نمایش آسیب فشاری در شکل (۲۵)، خردشدگی فشاری در ابتدا از اطراف ستون حذف شده (C7) در قسمت بالای دال در دوران ۱٪ رادیان شروع می‌شود و سپس در امتداد تیر (C7-C6) ادامه پیدا می‌کند. با توجه به شکل، پارامتر آسیب فشاری از مقدار ۰/۶ تجاوز نکرده و وسعت خردشدگی نیز زیاد نیست. بنابراین بتن در حالت فشاری سالم می‌ماند و دچار گسیختگی و کاهش سختی نمی‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده مقاومت کششی دال در حالت حذف ستون کناری نسبت به مقاومت فشاری دال بحرانی‌تر است. بنابراین مقاومت کششی دال کامپوزیت تأثیر قابل توجهی روی مقاومت در برابر خرابی و عملکرد زنجیره‌ای نسبت به مقاومت فشاری دال دارد. زیرا قبل از اینکه بتن به مقاومت فشاری خود برسد، به جهت کشش به وجود آمده در دال ناشی از حذف ستون بتن دچار ترک خوردگی و کاهش سختی می‌شود و در نهایت نیز گسیخته می‌شود.

در شکل (۲۶) پارامتر DAMAGET برای بررسی خرابی بتن در کشش و مشاهده مسیر گسترش ترک در حالت کششی، در دوران ۵٪ رادیان در حالت حذف ستون میانی نشان داده شده است. شروع ترک خوردگی در ابتدا اطراف ستون‌هایی (D2 و E3) که تحت تأثیر مستقیم ستون حذف شده قرار دارند و در قسمت بالای دال اتفاق می‌افتد و رفته‌رفته با افزایش جابه‌جایی، ترک خوردگی در امتداد خطوط (D2-E2 و E3-E2) ادامه می‌یابد به دنبال آن در دوران ۳٪ رادیان ترک خوردگی در اطراف ستون حذف شده (D3) در قسمت پایین دال شروع می‌شود. همان‌طور که در شکل (۲۶) نشان داده شده است، پارامتر آسیب کششی در نواحی نزدیک به تکیه‌گاه از ۰/۹ نیز فراتر رفته، قسمت‌های قرمز رنگ، که این موضوع نشان از خرابی کامل بتن در این نواحی است.



شکل ۲۶. نمایش نواحی آسیب و ترک کششی در بتن در حالت حذف ستون میانی

در شکل (۲۷) پارامتر DAMAGEC برای بررسی خرابی بتن در فشار و مشاهده مسیر گسترش ترک در حالت فشاری، در دوران ۵٪ رادیان در حالت حذف ستون میانی نشان داده شده

- [10] Kwasniewski, L. "Nonlinear Dynamic Simulations of Progressive Collapse for a Multistory Building"; *Eng. Struct.* 2010, 32, 1223-1235.
- [11] Astaneh-Asl, A.; Madsen, E. A.; Noble, C.; Jung, R.; McCallen, D. B.; Hoehler, M. S.; Li, W.; Hwa, R. "Use of Catenary Cables to Prevent Progressive Collapse of Buildings"; Report No.: UCB/CEE-STEEL-2001/02, 2001.
- [12] Yu, M.; Zha, X.; Ye, J. "The Influence of Joints and Composite Floor Slabs on Effective Tying of Steel Structures in Preventing Progressive Collapse"; *J. Constr. Steel. Res.* 2010, 66, 442-451.
- [13] Izzuddin, B.; Vlassis, A.; Elghazouli, A.; Nethercot, D. "Progressive Collapse of Multi-Storey Buildings Due to Sudden Column Loss - Part I: Simplified Assessment Framework"; *Eng. Struct.* 2008, 30, 1308-1318.
- [14] Dat, P. X.; Hai, T. K. "Membrane Actions of RC Slabs in Mitigating Progressive Collapse of Building Structures"; *Eng. Struct.* 2013, 55, 107-115.
- [15] Alashker, Y.; El-Tawil, S.; Sadek, F. "Progressive Collapse Resistance of Steel-Concrete Composite Floors"; *Eng. Struct.* 2010, 32, 1187-1196.
- [16] Lee, K-H; Stojadinovic, B.; Goel, S. C.; Margarian, A. G.; Choi, J.; Wongkaew A.; Reyher, B. P.; Lee, D-Y. "Parametric Tests on Unreinforced Connections"; Contractors' Report to the SAC, 2000.
- [17] No E, 2 "Design of Concrete Structures, Part 1: General Rules and Rules for Buildings"; Commission of European Communities ENV, 1992, 1-1.
- [18] Nguyen, H. T.; Kim, S. E. "Finite Element Modeling of Push-Out Tests for large Stud Shear Connectors"; *J. Constr. Steel. Res.* 2009, 65, 1909-1920.
- [19] Birtel, V.; Mark, P. "Parameterised Finite Element Modelling of RC Beam Shear Failure"; ABAQUS Users' Conf. 2006, 95-108.
- [20] Ollgaard, J. G.; Slutter, R. G.; Fisher, J. W. "Shear Strength of Stud Connectors in Lightweight and Normal Weight Concrete"; *AISC Eng. J.* 1971, 8, 55-64.
- [21] Chapman, J.; Balakrishnan, S. "Experiments on Composite Beams"; *Structural Engineer* 1964, 42, 369-383.

میلگردها، ۲/۵٪ افزایش بار نهایی باعث شده است. به دلیل بالا بودن میدان کششی دال در دو طرف دال در مقایسه با حالت حذف ستون کناری و همچنین فشاری بودن دال در مقایسه با حالت حذف ستون گوشه، بیشترین افزایش مقاومت مربوط به حذف ستون میانی است.

## ۵. مراجع

- [1] ASCE "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures"; American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 1998.
- [2] GSA, U. "Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects"; Washington DC, 2000.
- [3] DOD, U. "Unified Facilities Criteria: Design of Buildings to Resist Progressive Collapse"; UFC 4-023-03. United States Department of Defense, 2009.
- [4] Rahmani, I.; Azhdary Moghaddam, M.; Moayyedian, M. "Effect of Catenary Action on Reducing the Vulnerability of Steel Bending - Frame Structures Versus Progressive Collapse"; *Passive Defence Science and Technology* 2014, 4, 157-166.
- [5] Fu, F. "Progressive Collapse Analysis of High-Rise Building with 3-D Finite Element Modeling Method"; *J. Constr. Steel. Res.* 2009, 65, 1269-1278.
- [6] Yang, B.; Tan, K. H.; Xiong, G. "Behaviour of Composite Beam-Column Joints under a Middle-Column-Removal Scenario: Component-Based Modelling"; *J. Constr. Steel. Res.* 2015, 104, 137-154.
- [7] Guo, L.; Gao, S.; Fu, F. "Structural Performance of Semi-rigid Composite Frame Under Column Loss"; *Eng. Struct.* 2015, 95, 112-126.
- [8] Kim, S.; Lee, C-H; Lee, K. "Effects of Floor Slab on Progressive Collapse Resistance of Steel Moment Frames"; *J. Constr. Steel. Res.* 2015, 110, 182-190.
- [9] Tay, C.; Koh, C.; Liew, J. "Efficient Progressive Collapse Analysis for Robustness Evaluation of Buildings Experiencing Column Removal"; *J. Constr. Steel. Res.* 2016, 122, 395-408.

