

## بررسی و ارزیابی تأثیر دال بر روی مقاومت خرابی پیش‌رونده سازه‌های قابی بتن آرمه

زهرا محمدی<sup>1</sup>، حمیدرضا اشرفی<sup>2</sup>

1. دانشجوی کارشناسی ارشد گرایش سازه دانشگاه رازی کرمانشاه (ارائه دهنده شفاهی)
2. استادیار دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه رازی کرمانشاه (نویسنده مسئول)

1.Email: za\_mohammadi\_ce@yahoo.com

### چکیده

خرابی پیش‌رونده یک پدیده فاجعه بار در سازه‌ها است. بر اثر گسیختگی ناگهانی المان سازه‌ای، تحت اثر حوادث طبیعی یا عوامل انسانی و انتشار خرابی در المان‌های مجاور و عدم رسیدن ساختمان به شرایط تعادل استاتیکی، خرابی پیش‌رونده رخ خواهد داد. ساختمان‌های جدید نیازمند تحلیل و ارزیابی، جهت اتلاف آنی یک تکیه‌گاه عمودی اصلی مانند ستون هستند. در مطالعات گذشته، تمرکز تحقیقات بر تیر-ستون‌ها و یا تیرهای سراسری می‌باشد و تأثیر دال‌ها بر خرابی پیش‌رونده نادیده گرفته شده است. در این مقاله بر اساس نتایج تجربی و محاسباتی، مکانیزم مقاومت خرابی پیش‌رونده قاب‌های بتن آرمه (با و بدون در نظر گرفتن تأثیر دال) در مراحل مختلف مورد بحث قرار گرفته است. همچنین اثر پارامترهای مختلف سازه‌ای شامل ابعاد مقطع (ارتفاع تیر، ضخامت دال، پهنا دال) و میزان آرماتورها، بر روی مقاومت خرابی پیش‌رونده از طریق تحلیل کرنش مصالح و منحنی بار-تغییر مکان بررسی شده است. در نهایت این یافته‌ها با آزمایش‌های نمونه‌های تیر-ستون بدون دال مقایسه شده، که بر اساس این یافته‌ها، عدم در نظر گرفتن دال موجب خطای بسیاری در رفتار واقعی سازه شده است.

**کلمات کلیدی:** خرابی پیش‌رونده، قاب بتن آرمه، دال بتن آرمه.

# **Review and Evaluation of the Effect of Slab on Progressive Collapse Resistance of Reinforced Concrete Frame structures**

**(Code 30A)**

**Z. Mohammadi<sup>1</sup>, H. Ashrafi<sup>2</sup>**

1. Master student of structure engineering at Razi University of Kermanshah
2. Assistant Professor Faculty of Engineering Razi University of Kermanshah

## **Abstract**

Progressive collapse is a disastrous phenomenon in structures. The sudden failure of structural elements due to natural disasters or human factors and damage expansion in adjacent elements and static unbalanced of the buildings, pose progressive collapse. New buildings need analysis and evaluation for immediate waste of a major vertical support, like columns and so on. In past studies, researches' focus was on the beam-column or continuous beam, thus the effect of slabs on progressive collapse was neglected. In this paper, based on experimental and computational results, mechanism of progressive collapse resistance of reinforced concrete frames (with or without considering the effect of slab) has been discussed in different phases. Also, the effect of different structural parameters has been studied, consisting section dimensions (beam height, slab thickness, slab width) and amount of reinforcements, on resistance of progressive by strain analysis of materials and load-displacement curves. Finally, these findings have been compared with test results of samples without slab beam-columns. Based on these findings, ignoring the effect of slab has caused much error in actual behavior of structures.

**Keywords:** Progressive collapse, Reinforced concrete frame, Reinforced concrete slab.

## 1. مقدمه

یکی از مکانیزم‌هایی که در دهه‌های اخیر توجه به آن افزایش پیدا کرده است معضل فروریزش پیش‌رونده، نامیده می‌شود. به طور کلی خرابی پیش‌رونده در یک ساختمان، خرابی موضعی اولیه می‌باشد که توزیع بار جدیدی در سازه ایجاد می‌شود و موجب شکست دیگر المان‌های سازه‌ای یکی پس از دیگری می‌شود تا اینکه حالت جدیدی از تعامل به وجود آید، که طی آن قسمتی و یا تمام سازه خراب می‌شود [1]. خرابی پیش‌رونده فقط تلفات جانی و مالی ندارد، بلکه می‌تواند پیامدهای اجتماعی روانی و اقتصادی نیز به دنبال داشته باشد. به این ترتیب، چگونه به حداقل رساندن خطر خرابی پیش‌رونده در سراسر دنیا مورد توجه مهندسان عمران می‌باشد. چند روش طراحی برای بهبود مقاومت سازه‌ها در برابر خرابی پیش‌رونده با طراحی‌های مختلف پیشنهاد شده است کدهای [3-1] و دستورالعمل‌های خاص GSA و DOD، راهنمایی برای تمهیدات در برابر خرابی پیش‌رونده در سازه‌های فولادی و بتنی می‌باشد و در آن‌ها فلوچارتی برای تشخیص اینکه سازه‌های مورد بررسی نیازمند توجه دقیق‌تر در برابر خرابی پیش‌رونده می‌باشد، یا خیر [4,5].

عملکرد مقاومت خرابی پیش‌رونده قاب بتن مسلح در سه مورد از جنبه‌های مهم مورد بررسی قرار گرفته است. ایزودین و همکاران<sup>1</sup>، سه روش اصلی در مطالعات خود شامل تعیین پاسخ استاتیکی غیرخطی، ارزیابی دینامیکی بر اساس رویکرد جدید ساده شده حفاظت انرژی و ارزیابی شکل‌پذیری در قالب حداکثر تغییر شکل دینامیکی، انجام داده‌اند [6]. خو و الینگ وود<sup>2</sup>، در مطالعات خود اظهار داشته‌اند که، اگرچه آنالیز دینامیکی غیرخطی دقیق‌ترین نتایج را به ما می‌دهد ولی نیازمند مهارت‌های قابل توجهی است، و از آنالیز دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی استفاده کرده‌اند که روشی مناسب برای انجام طراحی مقاوم ساختمان در برابر خرابی پیش‌رونده است [7]. تسایی و لین<sup>3</sup>، عملکرد تردی را برای افزایش مقاومت قاب بتن آرمه در مکان‌هایی که احتمال خطر خرابی پیش‌رونده، تحت اثرات دینامیکی افزایشی، در قاب بتن آرمه وجود دارد را مورد آزمایش قرار داده‌اند [8]. برانسی و همکارانش<sup>3</sup>، با روش‌های تئوری به ارزیابی مقاومت ساختمان بتن آرمه فدرال مورا، پرداخته‌اند به طوری که مطالعات قبلی را درباره حذف ستون گوشه، نقض کرده‌اند [9]. علاوه بر این تعدادی از محققان از ابزارهای تجربی بهره گرفته‌اند، مانند مطالعات تجربی توسط کیان و همکارانش<sup>4</sup>، آنها نشان داده‌اند که مکانیزم‌های مختلف مقاومت در برابر خرابی پیش‌رونده، در تغییر شکل‌های مختلف متفاوت است و یکسری از آنالیزهای انجام شده باعث افزایش کیفیت بهتر در مطالعات آنها شده است [10].

## 2. دلایل ایجاد پدیده خرابی پیش‌رونده

بر اساس تخریب صورت گرفته توسط Leyendeker and Burnett در سال 1970 بین 15 تا 20 درصد از خرابی سازه‌ها از نوع خرابی پیش‌رونده می‌باشد. 5 علت اصلی رخ دادن خرابی پیش‌رونده به شرح ذیل می‌باشد:

- 1) ضربات ناشی از تصادف، مانند: ضربات غیرعادی اتومبیل به یک پل یا یک ساختمان.
- 2) ساخت و سازهای معیوب، مانند: کوچک بودن مقاطع نسبت به آنچه که در نقشه‌های سازه آمده است و از آنجا که در ایران کیفیت ساخت و سازها بسیار پایین است می‌توان این مورد را یکی از اصلی‌ترین عوامل رخ دادن خرابی پیش‌رونده نام برد.
- 3) شکست پی، شکست قسمت کوچکی از پی ساختمان می‌تواند منجر به از دست دادن نگه‌دارنده‌های اصلی سازه شود و این آسیب می‌تواند به قسمت‌های دیگر سازه گسترش یابد.
- 4) تغییرات شدید در فشار هوا، این تغییرات شدید در پی انفجار گاز، انفجار بمب و غیره ایجاد می‌شود.
- 5) آتش‌سوزی، مانند تخریب برج‌های تجارت جهانی.

<sup>1</sup> Xu and Ellingwood

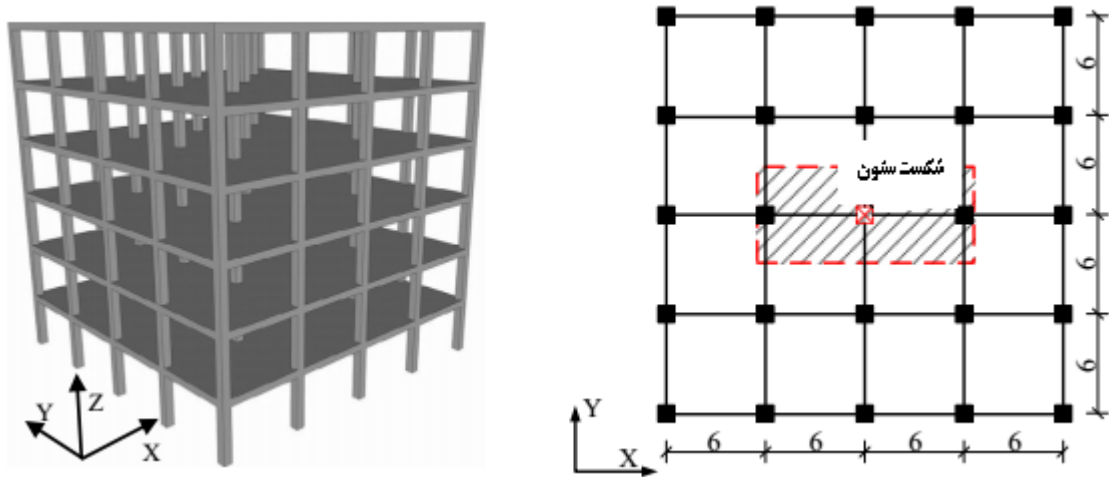
<sup>2</sup> Tsai and Lin

<sup>3</sup> Brunesi et al

<sup>4</sup> Qian et al

### 3. مدلسازی

نمونه اولیه، یک ساختمان 6 طبقه، ارتفاع طبقه همکف 4.2 متر و ارتفاع بقیه طبقات 3.6 متر می‌باشد، بار مرده و بار زنده اعمال شده به ترتیب  $5 \text{ KN/m}^2$ ،  $2 \text{ KN/m}^2$  است، اندازه دهانه‌ها در هر دو جهت 6 متر، در نظر گرفته شده است. برای انجام طراحی اولیه از نرم افزار SAP2000 استفاده شده است. زیر سازه تیر-دال به صورت یکطرفه می‌باشد. در این مقاله تأثیر پارامترهای مختلف طراحی بر روی خرابی پیش‌رونده بررسی می‌شود. در واقع اثر اندازه‌ها معمولاً بر روی خرابی و مقاومت فراموش می‌شود که در اینجا به آن پرداخته خواهد شد. نمای پلان و نمای سه بعدی ساختمان و همچنین موقعیت ستون حذف شده، در شکل 1 آمده است. و 5 نمونه زیرسازه تیر - دال و دو نمونه تیر پیوسته بدون دال (با سقف تیرچه بلوک) در نظر گرفته شده است که جزئیات این نمونه‌های آزمایشگاهی در جدول 1 آمده است ( $w_s$  پهنای دال،  $h_b$  ارتفاع تیر،  $w_b$  پهنای تیر) [11].



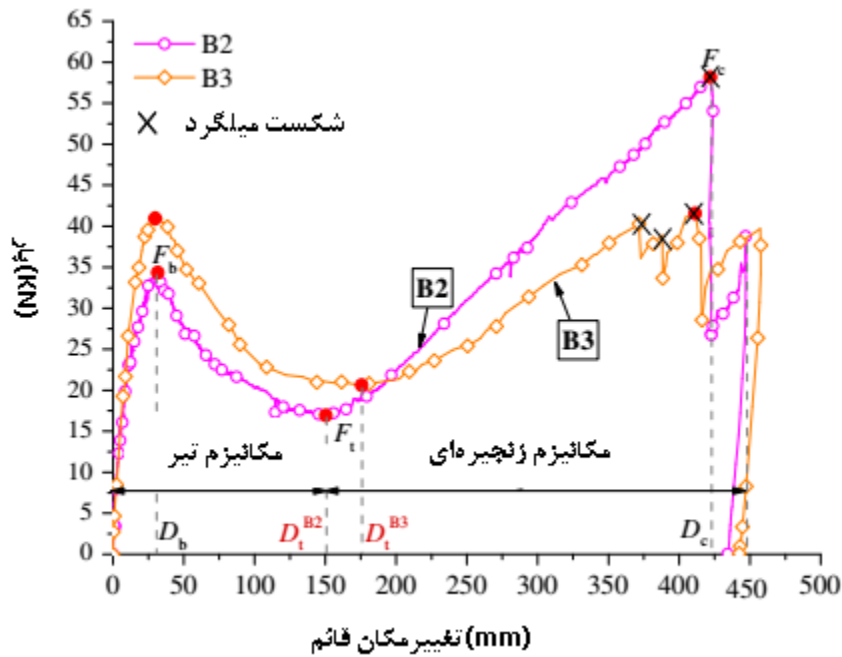
شکل 1. نمای پلان، نمای سه بعدی و موقعیت ستون حذف شده، ساختمان بتنی [11]

جدول 1. مشخصات نمونه‌های تحت آزمایش [11]

نمونه ها	ارتفاع تیر	پهنای تیر	ضخامت دال	پهنای دال	بالای تیر		پایین دال		بالای دال
					دو انتهای تیر	وسط دهانه	پایین تیر	عرضی/طولوی	عرضی/طولوی
B2	170	85	-	-	2φ8 + 1φ6	2φ8	2φ8	-	-
B3	200	85	-	-	2φ8 + 1φ6	2φ8	2φ8	-	-
S2	170	85	50	685	2φ8 + 1φ6	2φ8	2φ8	φ 6@190	φ 6@190
S3	200	85	50	2000	2φ8 + 1φ6	2φ8	2φ8	φ 6@190	φ 6@190
S4	170	85	50	2000	3φ10	2φ10	2φ10	φ 6@190	φ 6@190
S5	170	85	75	2000	2φ8 + 1φ6	2φ8	2φ8	φ 6@160	φ 6@160
S6	170	85	50	2000	2φ8 + 1φ6	2φ8	2φ8	φ 6@190	φ 6@190

#### 4. آنالیز

تغییر شکل نمونه‌ها، تحت حذف ستون به وسیله تغییر مکان‌های قائم نشان داده می‌شود. منحنی بار- تغییر مکان نمونه‌های تیر بدون دال  $B_2$  و  $B_3$ ، در شکل 2 آمده است. نتایج نمونه‌ها به طور کامل در جدول 2 آمده است. آنها تحت دو مکانیزم تیر و مکانیزم زنجیره‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند [11].

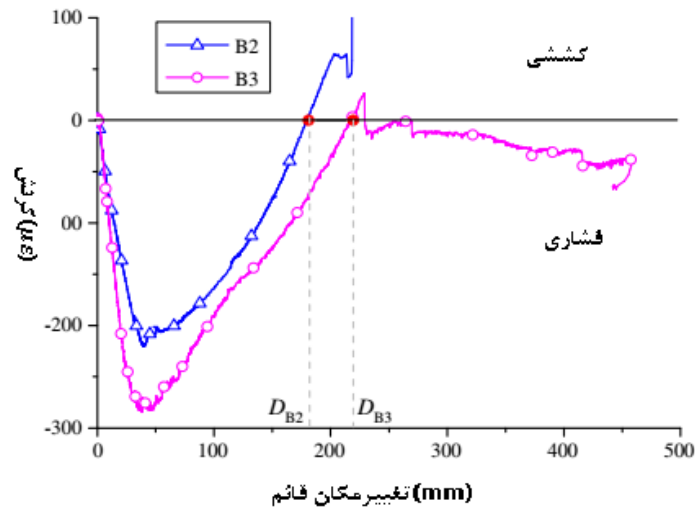


شکل 2. نمودار بار- تغییر مکان قائم در تیرهای بدون دال [11]

جدول 2. مقاومت خرابی پیش‌رونده نمونه‌های آزمایش [11]

	B2	B3	S2	S3	S4	S5	S6
$F_b$ (kN)	34	41	48	75	47	57	47
$F_t$ (kN)	17	21	35	57	42	47	44
$F_c$ (kN)	58	42	93	181	164	187	142
$F_c/F_b$	1.71	1.02	1.94	2.41	3.49	3.28	3.02

مطابق با شکل 3 کرنش فشاری، تحت مکانیزم تیر در  $B_3$  بزرگتر از  $B_2$  می‌باشد و این نشان دهنده نیروی محوری بزرگتر در  $B_3$  است و مکانیزم انتقال کرنش از فشاری به کششی در  $B_3$  بیشتر از  $B_2$  می‌باشد. توجه داشته باشید که در کرنش کششی، یک پرش اتفاق افتاده است و یا اینکه با کاهش کرنش و رسیدن به مقدار صفر دوباره وارد ناحیه فشاری شده است و این ممکن است، به علت ترک‌هایی که در بتن ایجاد شده است، اتفاق افتاده باشد [11].

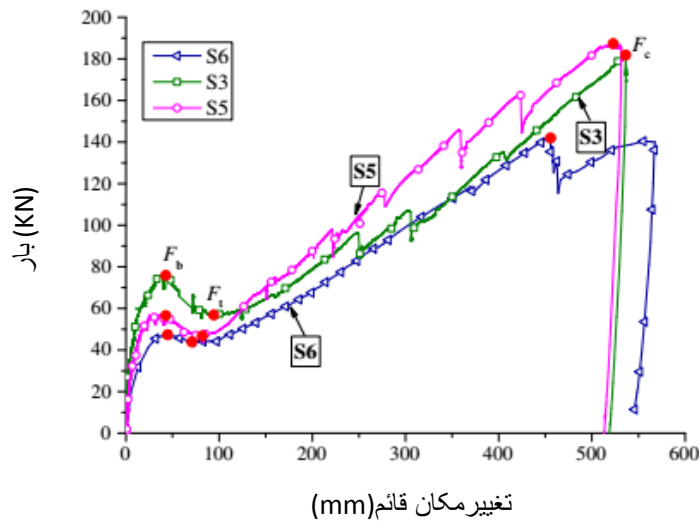


شکل 3. نمودار کرنش-تغییر مکان قائم نمونه های بدون دال [11]

تحت مکانیزم تیر، نقطه اوج در  $D_B$  و  $F_B$ ، تحت مکانیزم زنجیره‌ای، نقطه اوج در  $D_C$  و  $F_C$  قرار دارد. و در نقطه  $D_T$  و  $F_T$  انتقال مکانیزم خواهیم داشت. در نقطه  $D_T$  تیر کاملاً شکسته می‌شود و از آن به بعد با ایجاد ترک‌هایی در تیر، خرابی پیش‌رونده شروع می‌شود. نقاط شکست آرماتورها با علامت ضربدر در شکل 2 آمده است.

### 5. تأثیر ارتفاع تیر

ارتفاع تیر  $S_3$ ، 30 میلی‌متر بزرگتر از تیر  $S_6$  است. در حالی که آرماتورها در تیر و در دال بدون تغییر می‌باشند. در مکانیزم تیر، با افزایش ارتفاع، ظرفیت خمشی تیر افزایش می‌یابد و مقدار  $F_B$  در  $S_3$  60 درصد بزرگتر از  $S_6$  است. تحت مکانیزم زنجیره‌ای، دو منحنی، بسیار به یکدیگر نزدیک هستند و علت آن، تحمل نیروی کششی توسط آرماتورهای مقطع در مکانیزم زنجیره‌ای می‌باشد که هر دو مقطع دارای ناحیه آرماتورگذاری یکسان هستند [11].



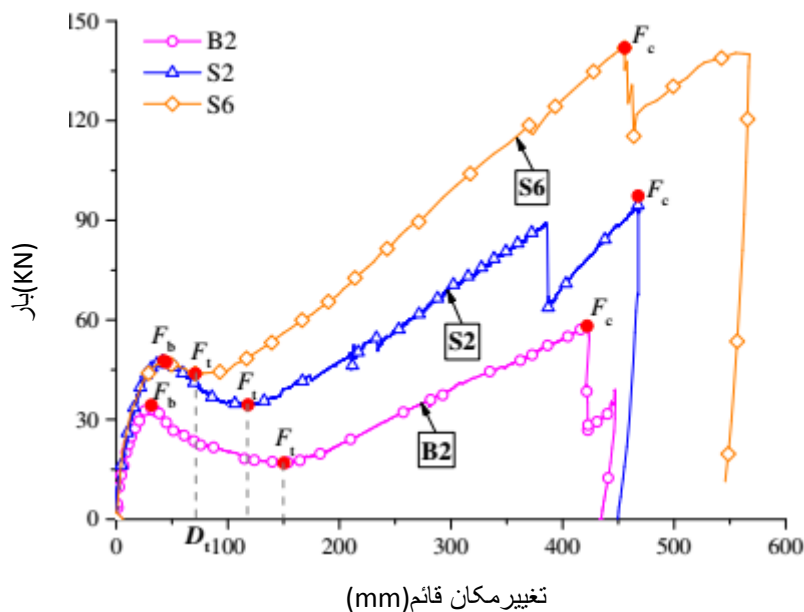
شکل 4. نمودار بار-تغییر مکان قائم نمونه‌های دارای دال [11]

## 6. تأثیر ضخامت دال

ضخامت دال  $S_5$ ، 25 میلی‌متر بزرگتر از  $S_6$  است. آرماتورهای موجود در  $S_5$  مقداری بیشتر از حداقل نسبت آرماتور در آیین‌نامه می‌باشد. و افزایش ضخامت دال همزمان با افزایش میزان آرماتور است که این روش منطبق بر شیوه صحیح مهندسی می‌باشد. مقدار  $F_b$  در  $S_5$  بیشتر از  $S_6$  است و این مربوط به مقاومت خمشی بزرگتر در دو انتهای عضو می‌باشد که ناشی از مقدار بیشتر آرماتور کششی در دال‌ها است. همچنین وجود آرماتورهای کششی بیشتر، به مکانیزم زنجیره‌ای عضو کمک می‌کند به طوری که مقدار مقاومت  $F_c$  در  $S_5$  بیشتر از  $S_6$  است. [11]

## 7. تأثیر دال بر روی مقاومت سازه

برای نشان دادن اثر دال‌ها بر روی عملکرد مقاومت خرابی پیش‌رونده زیر سازه تیر- دال، منحنی بار- تغییر مکان  $S_6$ ،  $S_2$  و  $B_2$  در شکل 5 با یکدیگر مقایسه شده‌اند. پهنای دال  $S_6$  و  $S_2$  به ترتیب برابر 2000 میلی‌متر و 685 میلی‌متر، در حالی که  $B_2$  بدون دال تعریف شده است.  $F_b$  تحت مکانیزم تیر اساساً متأثر از ظرفیت‌های خمشی ناحیه لنگر منفی (دو انتهای عضو) و ظرفیت خمشی ناحیه لنگر مثبت (وسط عضو) است. مشاهده می‌شود که ظرفیت خمشی نمونه‌های با دال  $S_6$  و  $S_2$  بیشتر از  $B_2$  است و این امر به علت وجود مقاومت خمشی دال است. با این حال دیده می‌شود که ظرفیت خمشی  $F_b$  در  $S_6$  و  $S_2$  مشابه یکدیگر است زیرا پهنای دال تأثیر کمی بر میزان مقاومت خمشی می‌گذارد. [11].

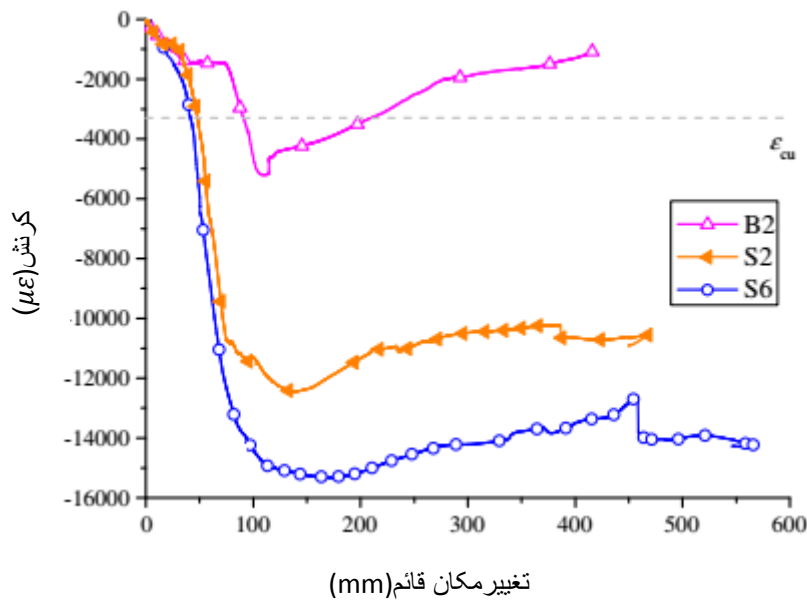


شکل 5. نمودار بار- تغییر مکان نمونه‌های  $S_6$  و  $S_2$ ،  $B_2$  [11]

مقاومت مکانیزم زنجیره‌ای به وسیله آرماتورهای موجود در دال‌ها و تیرها سنجیده می‌شود. مقاومت  $F_c$  تحت مکانیزم زنجیره‌ای به صورت  $B_2 < S_2 < S_6$  می‌باشد، زیرا میزان تقویت عضو  $B_2$ ، از بقیه کمتر و میزان تقویت عضو  $S_6$  از بقیه بیشتر است.

تغییر شکل متناظر با نقطه انتقال بین دو مکانیزم،  $D_t$ ، به صورت  $S_6 < S_2 < B_2$  می‌باشد. زیرا پهنای بیشتر دال با افزایش آرماتورهای کششی در دال همراه است که موجب تقویت دال می‌شود و دو انتهای عضو، پرآرماتور می‌شود، و ناحیه پرآرماتور (از لحاظ کششی) زودتر دچار آسیب دیدگی می‌شوند.

تغییرات کرنش در میلگردهای پایینی در انتهای اعضای  $S_6$  و  $S_2$  و  $B_2$  در شکل 6 اندازه‌گیری شده است و میزان تغییر مکان در اعضا که تحت فشار، تسلیم شده اند به ترتیب برابر با 31 میلی‌متر، 39 میلی‌متر، 79 میلی‌متر می‌باشد و این مقادیر، پایان مکانیزم تیر، را نشان می‌دهد.



شکل 6. وضعیت کرنش در نمونه‌های  $B_2$ ،  $S_2$  و  $S_6$  [11]

## 8. نتیجه‌گیری

نتیجه‌گیری بدست آمده از آزمایش‌ها و محاسبات نمونه‌های تیر- دال و بدون دال به شرح زیر می‌باشد:

- (1) مقاومت خرابی پیش‌رونده تحت مکانیزم تیر، اساساً بر ارتفاع تیر، ضخامت دال، و آرماتورهای لرزه‌ای در تیرها مؤثر است.
- (2) تأثیر پهنای دال از عرض مؤثر بال کمتر است.
- (3) افزایش ضخامت دال همزمان با افزایش مقدار آرماتور دال (مطابق با نسبت حداقل آرماتور مورد نیاز برای دال‌ها)، به نوبه خود مقاومت خرابی پیش‌رونده را افزایش می‌دهد.
- (4) دال بتن مسلح مقاومت سازه را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد.
- (5) نمونه‌ها هم تحت مکانیزم تیر و هم تحت مکانیزم زنجیره‌ای قرار گرفته‌اند. تأثیر دال بر روی مکانیزم شکست یک زیرسازه تیر- دال به این صورت می‌باشد که وجود دال منجر به افزایش سرعت خسارت در منطقه پرآرماتور انتهای تیر که تحت فشار می‌باشد، شده است.
- (6) مطابق محاسبات انجام شده ضریب افزایش مقاومت ( $f_c/f_b$ ) نمونه زیر سازه تیر- دال، بزرگتر از نمونه بدون دال است.



## 9. مراجع

- [1]. American Society of Civil Engineers (ASCE). Minimum design loads for buildings and other structures (ASCE7-10). Reston (VA): 2010OoOoooo.
- [2]. European Committee for Standardization. EN 1991-1-7: Euro code 1: actions on structures. Part 1-7: General actions – accidental actions. Brussels (Belgium)KL,2006
- [3]. British Standard Institute. BS8110: Structural use of concrete, part 1: Code of practice for design and construction. United Kingdom, 1997.
- [4]. Department of Defense (DOD). Unified facilities criteria (UFC): design of structure to resist progressive collapse, Washington (DC),2010.
- [5]. General Service Administration (GSA). Alternate Path analysis & design guidelines for progressive collapse resistance. Washington (DC),2013.
- [6]. Izzuddin BA, Vlassis GA, Elghazouli AY, Nethercot DA. Progressive Collapse of multi – story buildings due to sudden column loss – part I: Simplified assessment framework. Eng Struct 2008, 30(5): 1308-18.
- [7]. Xu G, Ellingwood BR. An energy – based partial pushdown analysis procedure for assessment of disproportionate collapse potential. J Constr Steel Res 2011,33(10):2931- 42.
- [8]. Tsai MH, Lin BH. Investigation of progressive collapse resistance and inelastic response for an earthquake- resistant RC building subjected to column failure. Eng Struct 2008, 30(12): 3619-28.
- [9]. Brunesi E, Nascimbene R, Parisi F, Augenti N. progressive collapse Fragility of reinforced concrete framed structures through incremental dynamic analysis. Eng Struct 2015, 104: 65-79.
- [10]. Qian K, Li B, Ma JX. Load-carrying mechanism to resist progressive collapse of RC buildings. J Struct Eng ASCE 2015, 141(2): 04014107.
- [11]. Peiqi Ren, Yi Li. Experimental investigation of progressive collapse resistance of one-way reinforced concrete beam-slab substructures under a middle-column- removal scenario. Eng struct 2016, 28: 1-13.