

## The effect of compressive membrane force and surrounding slabs on the behavior of flat slab structures in progressive collapse

Esmail Mousapoor<sup>1</sup>, Vahed Ghiasi<sup>2\*</sup>, Rahmat Madandoust<sup>3</sup>

1- Ph.D Student of Structural Engineering, Department of Civil and Architectural Engineering, Malayer University, Malayer, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Civil and Architectural Engineering, Malayer University, Malayer, Iran.

3 -Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

### ABSTRACT

*This paper presents the dynamic analysis of flat slab buildings using macro modeling method to evaluate their progressive collapse resistance. In these analyzes, the post-punching behavior of slab-column connections is considered. The presence of lateral restraints, by development compressive membrane force in the slab, increases the stiffness and flexural strength of the slab and ultimately increases the punching shear strength. In continuous slabs, the lateral restraint is provided by the slab itself. In experimental testing, part of the flat slab structure is typically extracted in the tests due to cost reduction and limited test space, and an additional load is applied to the slab edges to simulate the influence of the surrounding slabs. The effect of compressive membrane action and surrounding slabs on the response of flat slab structures was investigated using a validated macro-model. The findings of the study indicate that the slab 's compressive membrane force enhances the ultimate load bearing capacity in the column removal scenario. This increase in bearing capacity of the structure is, of course, not proportional to the increase in punching resistance in slab-column connections. The results also indicate that ignoring the lateral restraint effect of the surrounding slabs underestimates the capacity of the substructure for load redistribution. It is suggested that rotational restraints be placed on the slab edges in order to simulate the effect of surrounding slabs on the behavior of the substructure.*

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 23 July 2020

**Revise Date:** 11 August 2020

**Accept Date:** 23 September 2020

### Keywords:

*Compressive membrane action  
Post-punching resistance Flat slab  
Punching shear  
Progressive collapse*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.240430.2197>

\*Corresponding author: Vahed Ghiasi  
Email address: v.ghiasi@malayeru.ac.ir

## اثر نیروی غشایی فشاری و دال‌های اطراف بر رفتار سازه دال تخت

### در خرابی پیش رونده

اسماعیل موسی پور<sup>۱</sup>، واحد قیاسی<sup>۲</sup>، رحمت مدن دوست<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری سازه، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

۲- استادیار، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

۳- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

### چکیده

در این مقاله با استفاده از روش مدل‌سازی ماکرو، آنالیز دینامیکی ساختمان‌های دال تخت به منظور ارزیابی مقاومت خرابی پیش رونده آن‌ها ارائه شده است. در این آنالیزها رفتار پس پانچ اتصالات دال-ستون مدنظر قرار گرفته است. وجود قید جانبی، به دلیل ایجاد نیروی غشایی فشاری در دال، باعث افزایش سختی و مقاومت خمشی دال و در نهایت افزایش مقاومت برش پانچ می‌شود. در دال‌های پیوسته، قید جانبی توسط خود دال تأمین می‌شود. همچنین در تحقیقات آزمایشگاهی به دلایل کاهش هزینه و محدودیت فضای آزمایش، معمولاً بخشی از سازه دال تخت، جدا شده و برای شبیه سازی اثر دال‌های اطراف در لبه‌های پیش آمدگی‌ها یک بار افزایش یافته اعمال می‌شود. با استفاده از مدل ماکرووی اعتبارسنجی شده، اثر عمل غشایی فشاری و دال‌های اطراف بر پاسخ سازه دال تخت بررسی شده است. نتایج تحلیل‌ها نشان داد که نیروی غشایی فشاری دال ظرفیت باربری نهایی سازه را در سناریوی حذف ناگهانی ستون افزایش می‌دهد. البته این افزایش ظرفیت باربری سازه متناسب با افزایش مقاومت پانچ در اتصالات دال-ستون نیست. همچنین نتایج نشان داد که نادیده گرفتن اثر قید جانبی ناشی از دال‌های اطراف، ظرفیت بازتوزیع بار سازه دال تخت جدا شده را کمتر از واقعیت تخمین می‌زند. پیشنهاد می‌شود به منظور شبیه سازی اثر دال‌های اطراف بر رفتار سازه دال تخت جدا شده، قیدهای دورانی در لبه‌های پیش آمدگی‌های دال قرار گیرد.

کلمات کلیدی: نیروی غشایی فشاری، مقاومت پس پانچ، دال تخت، برش پانچ، خرابی پیش رونده

سابقه مقاله:		شناسه دیجیتال:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	doi:
۱۳۹۹/۰۵/۰۲	۱۳۹۹/۰۵/۲۱	۱۳۹۹/۰۷/۰۲	۱۳۹۹/۰۷/۰۲	۱۴۰۰/۰۸/۳۰	10.22065/jsce.2020.240430.2197
*نویسنده مسئول:		واحد قیاسی			
پست الکترونیکی:		v.ghiasi@malayeru.ac.ir			

## ۱- مقدمه

گسترش شکست موضعی اولیه یکی از اعضای اصلی سازه (عمدتاً ستون‌ها) به علت حوادث که می‌تواند منجر به خرابی کلی یا نامتناسب سازه شود، خرابی پیش‌رونده<sup>۱</sup> تعریف می‌شود [۱]. برای ارزیابی پتانسیل خرابی پیش‌رونده سازه‌ها، روش‌های طراحی مستقیم و غیرمستقیم توسط آیین‌نامه‌های مختلف پیشنهاد شده است [۲، ۳]. یکی از انواع سیستم‌های سازه‌ای که برای ساخت ساختمان‌های مسکونی، اداری و پارکینگ‌های طبقاتی مورداستفاده قرار می‌گیرد، دال تخت بتن مسلح است. احتمال خرابی پیش‌رونده در یک سازه دال تخت به علت شکست برش پانچ در یک اتصال دال-ستون وجود دارد [۴].

Ruiz و همکاران در سال ۲۰۱۳، در یک مطالعه آزمایشگاهی، به بررسی نقش میلگردهای پیوستگی و الگوهای مختلف آن در مقاومت برش پانچ و پس پانچ دال تخت پرداختند [۵]. نتایج نشان داد که میلگردهای خمشی دال (میلگردهای بالا) یک مقاومت حداقلی پایدار برای مقاومت پس پانچ را تأمین می‌کنند و میلگردهای پیوستگی با عملکرد شاخه‌ای و غشایی باعث افزایش مقاومت پس پانچ می‌شوند و مقاومت آنها در تغییرشکل‌های زیاد فعال می‌شود. Habibi و همکاران در سال ۲۰۱۲ با انجام آزمایش هفت نمونه اتصال دال-ستون مجزای داخلی، دریافتند که اتصالات دال-ستون با ستون‌های مستطیلی و میلگردهای پیوستگی نامساوی در دو جهت، مقاومت پس پانچ مشابهی را در مقایسه با ستون‌های مربعی اما با میلگردهای پیوستگی مساوی در دو جهت نشان می‌دهند [۶]. همچنین آنها ادعا کردند که گسترش میلگردهای پیوستگی به بیش از دو برابر طول مهری از وجه ستون، باعث افزایش قابل توجه مقاومت پس پانچ نمی‌شود اما نمونه‌ها می‌توانند تغییرشکل‌های پس پانچ بزرگتری را تحمل کنند. Russell و همکاران در سال ۲۰۱۵، هفت سازه دال تخت با مقیاس یک سوم را تحت بارگذاری دینامیکی آزمایش کردند [۷]. نتایج آزمایش نشان داد که دال‌های تخت می‌توانند بارهای تحمیل شده به سازه به علت حذف ستون را به طور مؤثری به ستون‌های اطراف بازتوزیع کنند. Keyvani و همکاران در سال ۲۰۱۴، یک مدل المان محدود را برای شبیه‌سازی رفتار پانچ و پس پانچ دال‌های تخت ارائه دادند [۸]. وجود قید جانبی، به دلیل ایجاد نیروی غشایی فشاری در دال، باعث افزایش مقاومت برش پانچ می‌شود. در دال‌های تخت پیوسته، قید جانبی توسط خود دال تأمین می‌شود. همچنین آن‌ها اثر این پدیده را که عمل غشایی فشاری<sup>۲</sup> (CMA) نام دارد، بر ظرفیت مقاومت خرابی پیش‌رونده سازه دال تخت بررسی کردند. در سال ۲۰۱۸، نتایج حاصل از مطالعه آزمایشگاهی حذف دینامیکی ستون میانی یک سیستم دال تخت با ۹ ستون توسط Peng و همکاران ارائه شد [۹]. سازه دال تخت موردبررسی دارای میلگردهای پایینی ناپیوسته در اتصالات دال-ستون بود. نتایج نشان داد که چهار اتصال دال-ستون مجاور ستون میانی حذف شده دچار شکست پانچ شده‌اند اما به دلیل وجود ظرفیت پس پانچ در اتصالات دال-ستون، تخریب کامل رخ نداد. Qian و Li در سال ۲۰۱۵ [۱۰] و Ma و همکاران در سال ۲۰۱۹ [۱۱]، با انجام آزمایش‌های مختلف به بررسی سازوکار مقاوم باربری سازه‌های دال تخت در حالت‌های حذف ستون داخلی و گوشه پرداختند. Liu و همکاران در سال ۲۰۱۵، یک مدل المان محدود ماکرو را برای شبیه‌سازی رفتار پانچ اتصال دال-ستون پیشنهاد دادند [۱۲]. این مدل رفتار پس پانچ دال‌های تخت را نادیده می‌گیرد. موسی پور و همکاران در سال ۲۰۲۰، مدل Liu و همکاران را برای در نظر گرفتن مقاومت پس پانچ اتصال دال-ستون توسعه دادند [۱۳، ۱۴].

Peng و همکاران در سال ۲۰۱۷، با مطالعه عددی و آزمایشگاهی، اثر قید درون صفحه‌ای بر مقاومت پانچ و پس پانچ دال تخت را بررسی کردند [۱۵]. نمونه‌های مورد بررسی فاقد میلگردهای پیوستگی بود. نتایج نشان داد که تحت قید ایجاد شده در آزمایش، عمل غشایی فشاری می‌تواند مقاومت پانچ را به اندازه ۹/۵٪ افزایش دهد. Weng و همکاران در سال ۲۰۲۰، با استفاده از مدل المان محدود، اثر شرایط مرزی، مقدار میلگردهای پیوستگی و ضخامت دال بر ظرفیت بازتوزیع بارها در سازه‌های دال تخت را بررسی کردند [۱۶]. براساس مطالعات انجام شده، پیشنهاد شد که برای شبیه‌سازی اثر دال‌های اطراف، قیدهای افقی در لبه‌های دال قرار گیرد. Einpaul و همکاران در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶، با ارائه یک مدل عددی، به بررسی اثر بازتوزیع لنگر و عمل غشایی فشاری بر مقاومت پانچ دال‌های تخت پیوسته پرداختند [۱۷، ۱۸]. این مدل می‌تواند در ترکیب با ضابطه شکست نظریه ترک برش بحرانی که توسط Muttoni [۱۹] ارائه شد، برای پیش‌بینی ظرفیت پانچ دال‌های پیوسته مورداستفاده قرار گیرد. سلیمانی و اصفهانی در سال ۲۰۱۹، با استفاده از رفتار غشایی دال‌ها، اثر مقاومت

<sup>1</sup> Progressive collapse

<sup>2</sup> Compressive Membrane Action (CMA)

بتن و ضخامت دال بر جلوگیری از خرابی پیشرونده دال‌های بتن مسلح پس از حذف ناگهانی یک ستون میانی را بررسی کردند [۲۰]. مطالعات آن‌ها نشان داد که اثر غشایی دال که اغلب در طراحی در نظر گرفته نمی‌شود، می‌تواند تا حد زیادی از خرابی پیشرونده دال و سازه جلوگیری کند.

در طول سال‌های گذشته، محققین مختلف برای مدلسازی دال تخت روش‌های مدل شبکه‌ای، المان پوسته چندلایه و المان محدود سه بعدی را پیشنهاد داده‌اند [۱۲-۱۴، ۲۱-۲۵]. در روش مدل شبکه‌ای، دال با تیرهای موازی هم مدلسازی می‌شود و رفتار غیرخطی در محل اتصالات با روش مفصل متمرکز مدلسازی می‌شود. در روش المان پوسته چندلایه، دال به چندین لایه با ضخامت و مشخصات متفاوت برای هر لایه و با فرض عدم لغزش لایه‌ها نسبت به یکدیگر، تقسیم می‌شود. این المان رفتار خمشی دال را به درستی پیش بینی می‌کند اما نمی‌تواند رفتار برشی خارج از صفحه دال را به درستی برآورد کند. به منظور ارزیابی رفتار دال در محل اتصال به ستون، استفاده از المان‌های پیوند با طولی برابر نصف عمق مؤثر دال و یا با طول صفر توسط محققین پیشنهاد شده است [۱۲-۱۴، ۲۶].

بیشتر مطالعات آزمایشگاهی در رابطه با مقاومت خرابی پیش رونده دال‌های تخت به سازه‌های دال تخت یک طبقه با چهار چشمه دال و ۹ ستون معطوف شده است. در این آزمایش‌ها برای شبیه سازی اثر دال‌های اطراف بر پاسخ سازه، پیش آمدگی با طول یک چهارم دهانه در اطراف نمونه‌ها در نظر گرفته شده و بار افزایش یافته به این پیش آمدگی‌ها اعمال شده است. بنابراین مطالعات بیشتری برای ارزیابی اثر شرایط مرزی بر پاسخ سازه دال تخت ضرورت دارد. در این مقاله، اثر CMA و شرایط مرزی بر پاسخ سازه دال تخت ۳ طبقه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در نوشتار حاضر، برای شبیه سازی سازه دال تخت، از مدل المان محدود موسی پور و همکاران [۱۳، ۱۴] که مقاومت پس پانچ اتصال دال-ستون را در نظر می‌گیرد، استفاده می‌شود. در ابتدا مدل ماکروی مذکور با نتایج آزمایشگاهی اعتبارسنجی می‌شود. سپس اثر CMA بر مقاومت خرابی پیش رونده یک سازه دال تخت ۳ طبقه در حالت‌های مختلف حذف ستون بررسی می‌شود. در انتها به بررسی اثر شرایط مرزی در پیش آمدگی‌های واقع در پیرامون سازه دال تخت ۳ طبقه به منظور شبیه سازی اثر دال‌های دورتر پرداخته می‌شود.

## ۲- اثر باز توزیع لنگر و CMA بر مقاومت برش پانچ

مقاومت برش پانچ دال‌های تخت در آیین نامه‌های رایج [۲۷، ۲۸] اغلب بر پایه روابط تجربی و نتایج آزمایشگاهی روی نمونه‌های دال جدا شده متقارن محوری<sup>۳</sup> پایه‌ریزی شده‌اند. در این نمونه‌های آزمایش، ناحیه لنگر منفی اطراف ستون، تکیه گاه و نقطه بارگذاری، مجزا از بقیه دال پیوسته مدلسازی می‌شود (شکل ۱-الف). بنابراین دو اثر باز توزیع میان لنگرهای مثبت و منفی دال و CMA در این آزمایش‌ها نادیده گرفته شده است که می‌تواند مقاومت برش پانچ واقعی (مقاومت برش پانچ در یک دال پیوسته) را کمتر تخمین بزند.

در دال‌های پیوسته، مطابق شکل ۱-ب، باز توزیع لنگر بین لنگرهای مثبت<sup>۴</sup> وسط دهانه و لنگرهای منفی<sup>۵</sup> اطراف ستون می‌تواند اتفاق بیفتد. این پدیده می‌تواند موقعیت نقطه عطف<sup>۶</sup> (تغییر علامت لنگر خمشی) و فاصله  $r_s$  از مرکز ستون را متناسب با مقدار بارگذاری تغییر دهد. در نمونه‌های آزمایشگاهی دال جدا شده متقارن محوری، فاصله  $r_s$  برابر  $0.22L$  در نظر گرفته می‌شود. کاهش  $r_s$  باعث افزایش سختی و مقاومت خمشی دال و در نهایت افزایش مقاومت برش پانچ می‌شود [۱۷، ۱۸].

پس از ترک خوردگی خمشی دال روی تکیه گاه در نمونه‌های آزمایشگاهی دال جدا شده متقارن محوری، نمونه‌ها به اطراف گسترش<sup>۷</sup> می‌یابند (شکل ۱-ج). در دال‌های پیوسته، این گسترش جانبی دال توسط دال‌های اطراف ترک نخورده محدود می‌شود. این محدودیت جانبی باعث می‌شود دال در ناحیه لنگر منفی تحت فشار محوری قرار گیرد (شکل ۱-د). این پدیده اثر CMA نامیده می‌شود.

3 Axisymmetric isolated slab specimens

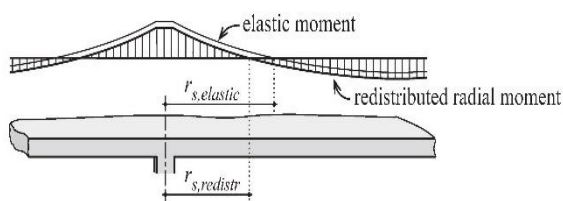
4 Sagging moments

5 Hogging moments

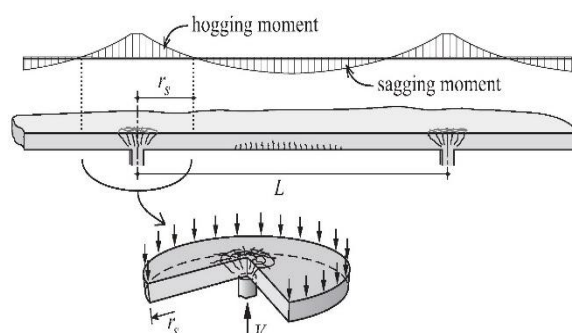
6 Contraflexure

7 Dilatation or expansion

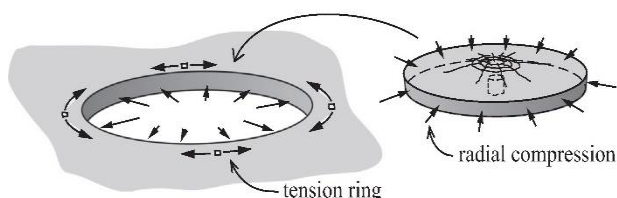
این اثر به طور کامل در پیرامون ستون‌های داخلی ظاهر می‌شود مگر آنکه بازشدگی در دال در نزدیکی اتصال به ستون وجود داشته باشد. اثر CMA در ستون‌های لبه به صورت جزئی و در ستون‌های گوشه اصلاً ظاهر نمی‌شود [۱۸].



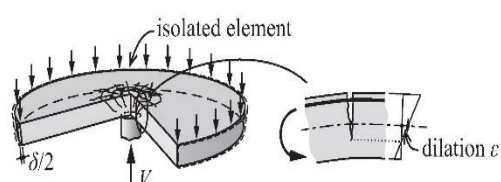
ب) باز توزیع لنگرهای شعاعی در دال پیوسته



الف) دال جداشده از سازه اصلی در نمونه‌های آزمایش



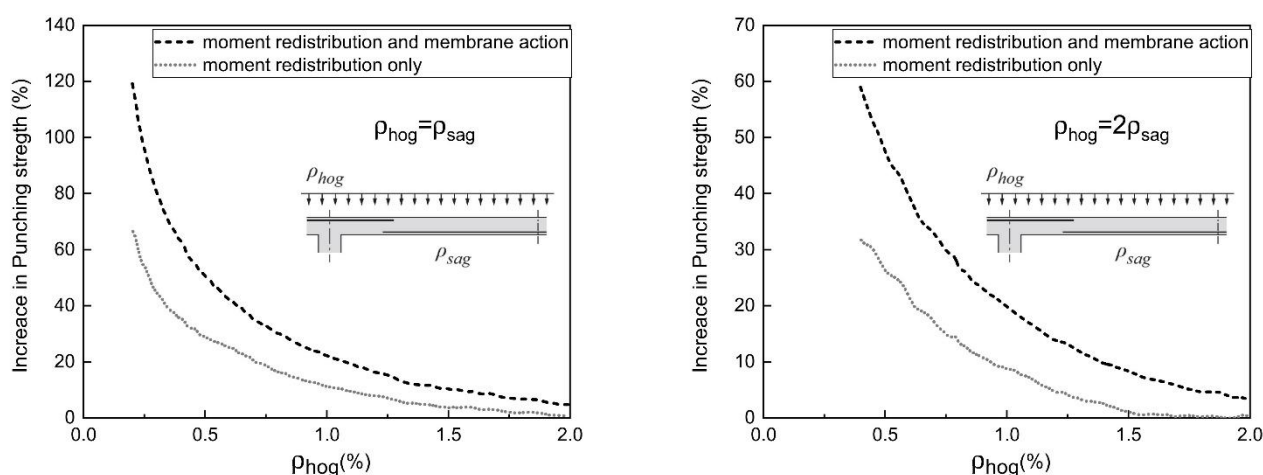
د) اثر گسترش جانبی ناحیه لنگر منفی روی بقیه دال



ج) گسترش مقطع دال در خمش

شکل ۱: مقایسه دال پیوسته و دال جداشده [۱۷]

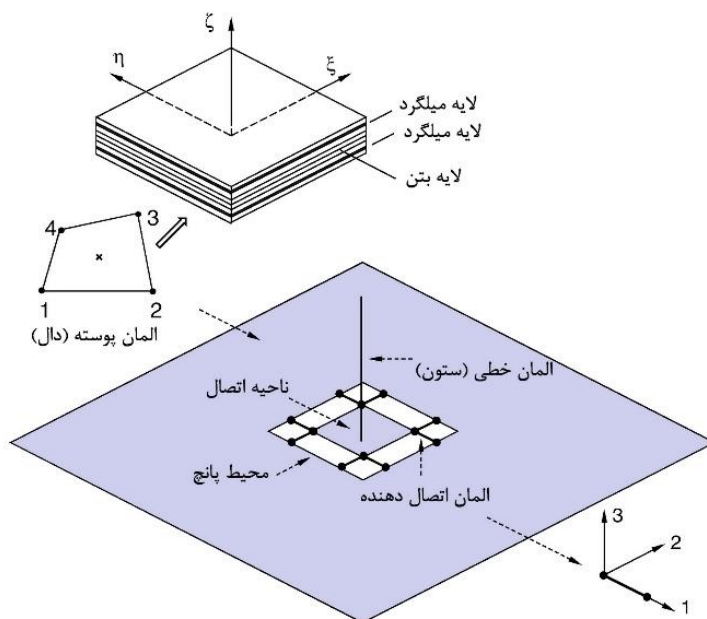
شکل ۲، اثر نسبت میلگردهای منفی ( $\rho_{hog}$ ) را روی افزایش مقاومت برش پانچ دال‌های پیوسته نسبت به دال‌های جداشده نشان می‌دهد. این منحنی‌ها برای دال‌های بدون میلگرد برشی براساس تحلیل‌های پارامتری Einpaul و همکاران [۱۷، ۱۸] رسم شده‌اند. در حالت اول، مقدار میلگردهای مثبت وسط دهانه برابر میلگردهای منفی اطراف ستون است و در حالت دوم، مقدار میلگردهای مثبت نصف میلگردهای منفی (متناظر با طراحی الاستیک معمول) در نظر گرفته شده است. در نمونه‌های آزمایشگاهی دال جداشده، مشخص شده است که نسبت میلگردهای منفی بر مقاومت پانچ و سختی خمشی نمونه‌ها اثر مهمی دارد. این اثر در برخی از آیین نامه‌ها دیده شده [۲۸] و در برخی از آیین نامه‌ها نیز از آن غفلت شده است [۲۷].



شکل ۲: اثر نسبت میلگرد منفی بر افزایش مقاومت برش پانچ دال‌های پیوسته

### ۳- روش مدل‌سازی

در مطالعه حاضر برای مدل‌سازی سازه از نرم افزار OpenSees [۲۹] استفاده شده است. برای مدل‌سازی دال‌ها، المان پوسته چهارضلعی ShellNLDKGQ با رفتار غیرخطی به کار رفته است. برای مدل‌سازی برش پانچ در محل اتصال دال-ستون، مطابق شکل ۳ از مدل المان محدود ماکرو که توسط موسی پور و همکاران [۱۳، ۱۴] ارائه شده است، استفاده می‌شود.



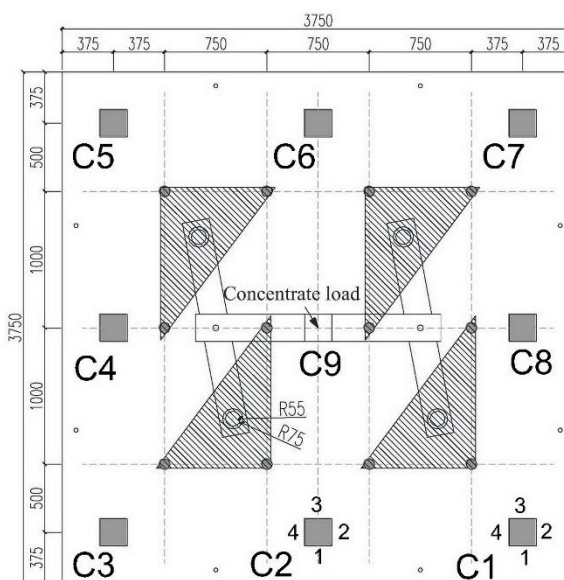
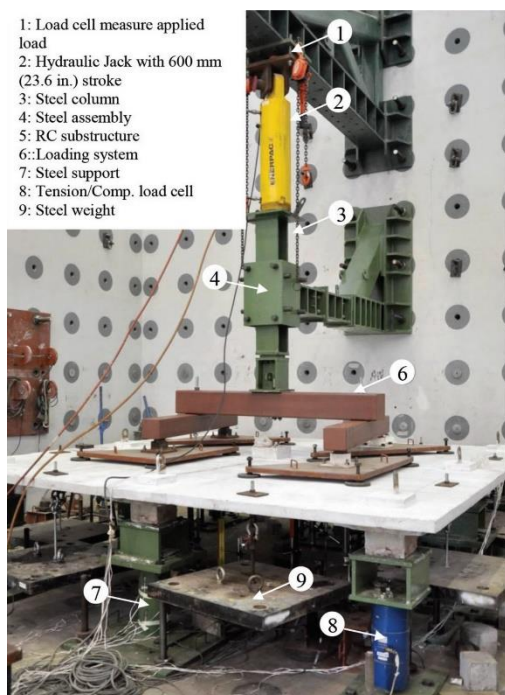
شکل ۳: شماتیک مدل ماکرو برای دال تخت

در این مدل چشمه اتصال دال-ستون که نشان دهنده ابعاد ستون است با المان پوسته صلب مدل‌سازی می‌شود. مقطع بحرانی برش پانچ در اطراف ناحیه اتصال به فاصله نصف عمق مؤثر دال از وجه ستون در نظر گرفته می‌شود. برای مدل‌سازی دال خارج از ناحیه پانچ از المان پوسته چندلایه، شامل لایه‌های بتن و میلگرد با رفتار غیرخطی استفاده می‌شود. ناحیه اتصال بین مقطع بحرانی پانچ و وجه ستون با دو المان تیر برای هر وجه ستون مدل‌سازی می‌شود. رفتارهای خمشی، برشی، پیچشی و محوری برای المان تیر اتصال دهنده با شش

درجه آزادی تعریف می‌شود. در مدل ارائه شده با شکست برشی در هر المان اتصال دهنده، نیروی برشی در آن المان به یک نیروی باقیمانده ثابت تنزل می‌یابد (نیروی باقیمانده در المان اتصال دهنده نشان دهنده مقاومت پس پانچ به علت میلگردهای خمشی است). همچنین بلافاصله پس از شکست برشی المان‌های اتصال دهنده، المان‌های پس پانچ (که در کنار المان‌های اتصال دهنده قرار دارند و موازی با آن کار می‌کنند) شروع به انتقال بار از دال به ستون خواهند کرد. المان‌های پس پانچ معرف مقاومت پس پانچ میلگردهای پیوستگی در اتصال دال-ستون هستند. بنابراین وجود ظرفیت پس پانچ در اتصالات دال-ستون، بازتوزیع نیروها در سازه را تغییر خواهد داد. برای یافتن جزئیات بیشتر در رابطه با مدل مذکور به مقاله موسی پور و همکاران [۱۳، ۱۴] مراجعه شود.

#### ۴- اعتبارسنجی مدل‌سازی

برای اعتبارسنجی مدل‌سازی، سازه دال تخت Qian و Li [۳۰] با ۹ ستون و با مقیاس ۰/۲۵ انتخاب شده است (شکل ۴). ضخامت دال ۵۵ میلی‌متر، پوشش بتن ۷ میلی‌متر و نسبت میلگردهای خمشی (میلگردهای بالای دال در نزدیکی ستون)،  $\rho_{hog} = 0.25\%$  است. نسبت میلگردهای پایین دال  $\rho_{sag} = \rho_{hog}$  است. سه میلگرد با قطر ۶ میلی‌متر به عنوان میلگرد پیوستگی (در لایه پایینی دال) در محل اتصال دال-ستون قرار داده شده است. دال بر روی ستون‌هایی مربعی ۲۰۰ میلی‌متری و با فاصله ۱/۵ متر از یکدیگر در هر جهت، قرار گرفته است. طول طره در چهار طرف نمونه آزمایش ۰/۳۷۵ متر (برابر ۰/۲۵ طول دهانه) است. ستون میانی با ۴ میلگرد به قطر ۱۳ میلی‌متر و ستون‌های اطراف با ۸ میلگرد به قطر ۱۳ میلی‌متر مسلح شده‌اند. مقاومت فشاری بتن ۲۵/۲ مگاپاسکال و میلگردهایی با قطر ۶ میلی‌متر، مقاومت‌های تسلیم و نهایی به ترتیب ۵۰۰ و ۶۱۷ مگاپاسکال و کرنش شکست  $\epsilon_{ll} = 0.21$  در نمونه آزمایش به کار رفته است. مطابق شکل ۴، نمونه روی هشت پایه فلزی قرار گرفته است. برای شبیه‌سازی بارگذاری گسترده یکنواخت، بار در دوازده نقطه به دال اعمال شده است. وزنه‌های فولادی در نواحی پیرامونی دال به منظور شبیه‌سازی اثر دال‌های دورتر قرار داده شده‌اند.



شکل ۴: نمونه آزمایش با بارگذاری دوازده نقطه‌ای [۳۰]

در مدل‌سازی برپایه آیین نامه EC2 [۲۸]، مقاومت برش پانچ ستون‌ها حدوداً ۴۵/۵ کیلونیوتن محاسبه می‌شود. از شکل ۲-الف ضریب افزایش مقاومت پانچ ۱/۹۰ به دست می‌آید. بنابراین مقاومت پانچ اتصال دال-ستون ۸۶/۵ کیلونیوتن و چرخش دال متناظر با شکست پانچ براساس ضابطه شکست Muttoni [۱۹]، ۰/۴۳۶ رادیان به دست می‌آید. دال‌ها با استفاده از المان پوسته چندلایه، ستون‌ها

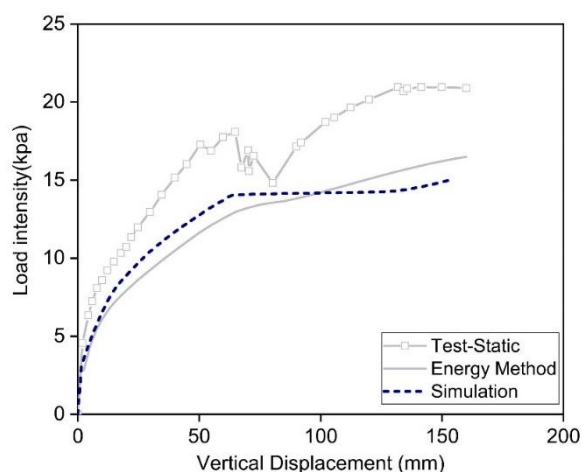


با المان الاستیک و اتصالات دال-ستون با در نظر گرفتن مقاومت پس پانچ با روش بیان شده در بخش ۳، در نرم افزار OpenSees مدل سازی شدند. شکل ۵-الف، نتایج آنالیز دینامیکی نمونه را به ازای شدت بارهای گسترده یکنواخت نشان می دهد. بیشینه جابجایی قائم گره بالای ستون میانی از ۲/۶۸ میلی متر تا ۱۵۴/۵ میلی متر به ازای شدت بار گسترده ۳/۶۵ کیلو پاسکال تا ۱۵/۰۵ کیلو پاسکال افزایش می یابد.

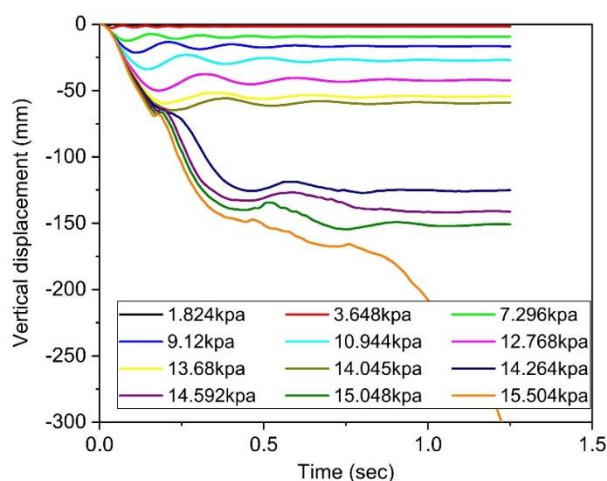
شکل ۵-ب، پاسخ دینامیکی کامل نمونه مدل سازی را با پاسخ شبه استاتیکی آزمایش مقایسه می کند. هر نقطه روی منحنی ظرفیت دینامیکی متناظر با بیشینه جابجایی قائم گروه بالای ستون میانی حذف شده به ازای شدت بارهای گسترده مختلف است. برای پیش بینی ظرفیت بار دینامیکی آزمایش، روش مبتنی بر انرژی<sup>۸</sup> که اولین بار توسط Izzuddin و همکاران [۳۱] پیشنهاد شد، مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش منحنی بار دینامیکی از منحنی بار-تغییر مکان شبه استاتیکی براساس رابطه (۱) به دست می آید.

$$w_u u_{max} = \int_0^{u_{max}} w(u) du \quad (1)$$

که  $u_{max}$  بیشینه جابجایی قائم دینامیکی،  $w_u$  و  $w$  به ترتیب شدت بار واقعی و شدت بار استاتیکی غیرخطی متناظر با جابجایی قائم  $u_{max}$  است. با توجه به شکل ۵-ب، انطباق خوبی بین نتایج شبیه سازی و منحنی ظرفیت دینامیکی منتج از روش انرژی وجود دارد. بیشینه ظرفیت بار دینامیکی شبیه سازی ۱۵/۰۵ کیلو پاسکال است که حدود ۰.۹٪ کمتر از بیشینه ظرفیت بار دینامیکی روش انرژی (برابر ۱۶/۵ کیلو پاسکال) است.



(ب)



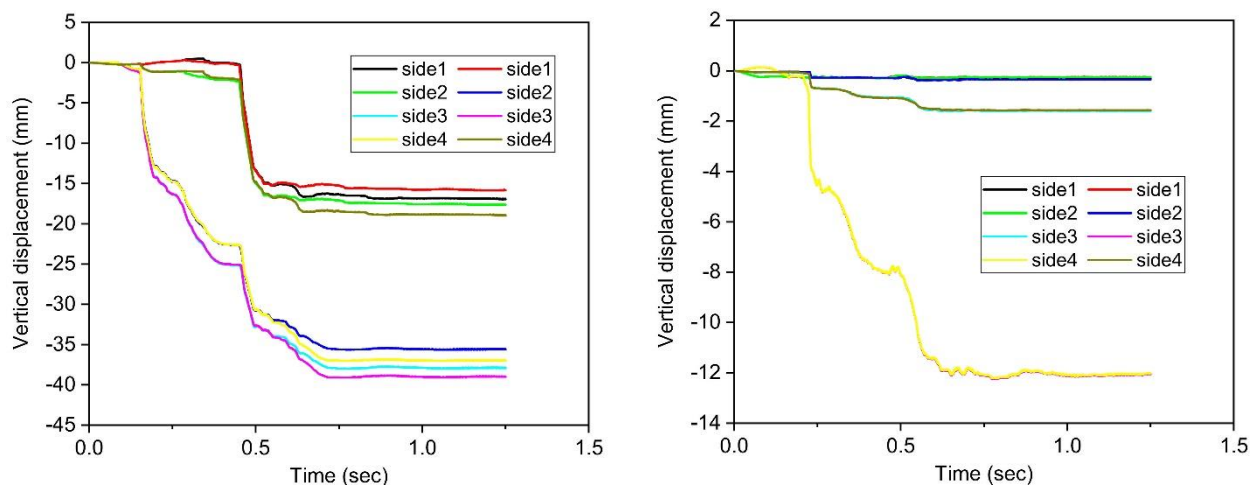
(الف)

شکل ۵: الف) تاریخچه زمانی جابجایی قائم ستون C۹ به ازای شدت بارهای گسترده یکنواخت، ب) منحنی بار دینامیکی در مقابل جابجایی قائم برای حذف ستون C۹

برای ارزیابی شکست پانچ در اتصالات دال-ستون، جابجایی قائم نسبی دو گره انتهایی هر المان اتصال دهنده بررسی می شود. با توجه به شکل ۳، هر وجه ستون با دو المان اتصال دهنده به دال متصل شده است. طول المان اتصال دهنده برابر نصف عمق مؤثر دال یعنی ۲۲/۵ میلی متر است. بنابراین جابجایی قائم نسبی متناظر با شکست پانچ در اتصالات برابر ۰/۹۸۱ میلی متر به دست می آید. شکل ۶، تاریخچه زمانی جابجایی قائم نسبی المان های اتصال دهنده در ستون های C۱ و C۲ را در شدت بار نهایی ۱۵/۰۵ کیلو پاسکال نشان می دهد. وجوه ستون در شکل ۴ نشان داده شده اند. به دلیل تقارن هندسی و بارگذاری نمونه، نتایج ستون های گوشه (ستون های C۱، C۳، C۵، C۷) و ستون های کناری (ستون های C۲، C۴، C۶، C۸) مشابه هم هستند. مشاهده می شود که در ستون کناری C۲ شکست پانچ کامل و در ستون گوشه C۱ شکست پانچ ناقص رخ داده است که در توافق با مشاهدات آزمایشگاهی است. در نتیجه، می توان از مدل پیشنهادی موسی پور و همکاران [۱۳، ۱۴] برای مطالعات پارامتری استفاده کرد.

<sup>۸</sup> Energy-based method

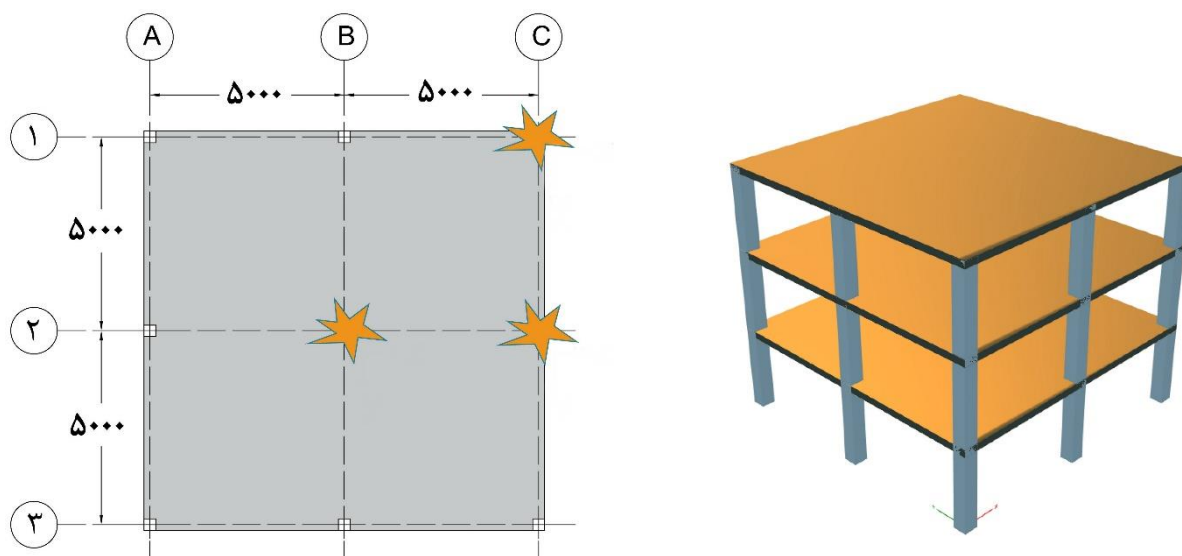




شکل ۶: تاریخچه زمانی جابجایی قائم نسبی المان‌های اتصال دهنده در ستون‌های C1 (شکل راست) و C2 (شکل چپ)

## ۵- بررسی اثر CMA بر پاسخ سازه دال تخت

به منظور بررسی اثر CMA در خرابی پیش رونده، مطابق شکل ۷، یک ساختمان سه طبقه دال تخت در نظر گرفته می‌شود. طول دهانه‌ها در هر دو راستا ۵ متر، ارتفاع طبقات ساختمان ۳ متر و ضخامت دال در همه طبقات ۲۵۰ میلی متر است. علاوه بر وزن مرده دال، بار مرده به مقدار  $DL = 3 \text{ kpa}$  و بار زنده  $LL = 2 \text{ kpa}$  به کف‌ها اعمال شده است. مقاومت فشاری بتن  $25 \text{ Mpa}$  و مقاومت تسلیم، مقاومت نهایی و کرنش نهایی گسیختگی میلگردهای طولی به کار رفته در سازه به ترتیب  $400 \text{ Mpa}$ ،  $600 \text{ Mpa}$  و  $0.15$  است. فرض شده که ساختمان در خاک نوع ۲ قرار دارد و شتاب مبنای طرح  $0.25 \text{ g}$  است. سازه براساس استاندارد ۲۸۰۰ آیین نامه ساختمانی ایران [۳۲] بارگذاری لرزه‌ای و براساس آیین نامه ACI-318-14 [۲۷] طراحی شده است. ضخامت دال به گونه‌ای انتخاب شده است که بتواند ضابطه برش پانچ در محل اتصال دال به ستون تحت ترکیبات بار نهایی شامل نیروهای زلزله را ارضا کند. لذا میلگردهای برشی در دال به کار نرفته است. میلگردهای بالا و پایین دال در نوار ستونی به ترتیب  $\Phi_{14}@130\text{mm}(0.564\%)$  و  $\Phi_{10}@100\text{mm}(0.374\%)$  است و میلگردهای بالا و پایین دال در نوار میانی به ترتیب  $\Phi_{10}@200\text{mm}(0.187\%)$  و  $\Phi_{10}@150\text{mm}(0.25\%)$  است. اعداد داخل پرانتز نسبت میلگردها را نشان می‌دهد. پوشش خالص بتن روی میلگردهای ستون و دال به ترتیب  $45\text{mm}$  و  $20\text{mm}$  است. ابعاد همه ستون‌ها  $500 \times 500\text{mm}$  است.



شکل ۷: نمای سه بعدی و پلان ساختمان دال تخت نمونه (ابعاد به میلی متر است)

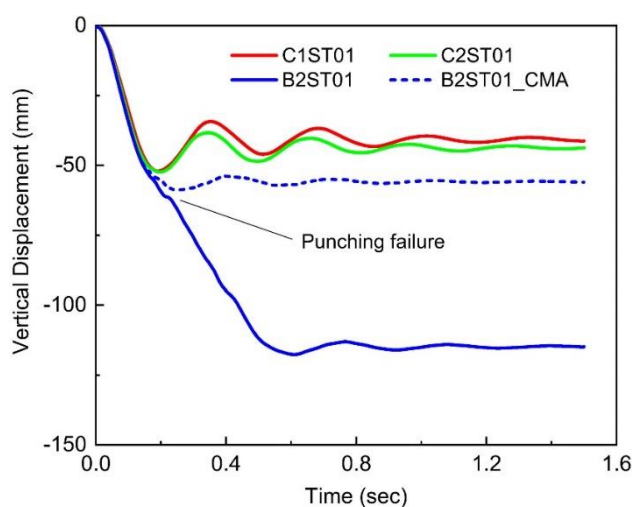
دال‌ها با استفاده از المان پوسته چندلایه، ستون‌ها با المان فیبر و اتصالات دال-ستون با در نظر گرفتن مقاومت پس پانچ با روش بیان شده در بخش ۳، در نرم افزار OpenSees مدل‌سازی شدند. سه حالت حذف ستون (ستون‌های B2، C2 و C1) در طبقه اول بررسی شده است. عکس‌العمل‌های ستون‌های حذف شده از تحلیل استاتیکی سازه دست نخورده با بارهای ثقلی تحت اثر ترکیب بار  $1.2DL + 0.5LL = 11.8 \text{ kN/m}^2$  به دست می‌آیند. بارهای ثقلی وارد بر سازه ثابت نگه داشته می‌شوند. ستون از مدل حذف شده و نیروهای عکس‌العمل معادل آنها به صورت استاتیکی به گره اتصال دال-ستون اعمال می‌شود. سپس طی یک آنالیز دینامیکی، نیروهای عکس‌العمل ستون در یک مدت زمان بسیار کوتاه به صفر کاهش می‌یابد.

از تحلیل مقدار ویژه، زمان تناوب ارتعاش قائم ساختمان در سناریوهای مختلف حذف ستون C1، C2 و B2 به ترتیب ۰/۱۳۱، ۰/۱۲۹ و ۰/۱۲۷ ثانیه است. مدت زمان حذف ستون ۵ میلی ثانیه در نظر گرفته شد که براساس الزام آیین نامه GSA [۳] کمتر از ۰/۱ پیروی طبیعی ارتعاش قائم ناشی از حذف ستون است. اثر نرخ کرنش مصالح لحاظ نشده است و میرایی متناسب با جرم با نسبت استهلاک ۰/۵ در مود اول ارتعاش قائم ساختمان با حذف ستون، برای آنالیز دینامیکی استفاده شده است.

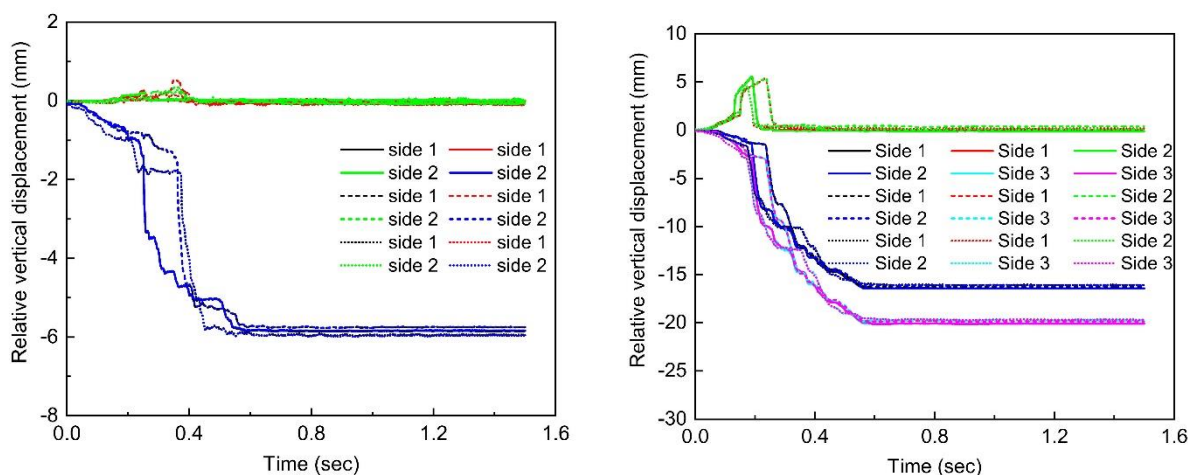
شکل ۸، جابجایی قائم گره بالای ستون حذف شده در مقابل زمان را برای سناریوهای مختلف حذف ستون نشان می‌دهد. زمان صفر نشان دهنده شروع حذف ستون است جابجایی به سمت پایین با علامت منفی نشان داده شده است. در حالت حذف ستون‌های C1 و C2، شکست پانچ در اتصالات دال-ستون مجاور اتفاق نمی‌افتد. اما در حالت حذف ستون B2 در ستون‌های کناری شکست پانچ کامل و در ستون‌های گوشه شکست پانچ ناقص رخ می‌دهد که به دلیل مقاومت پس پانچ اتصالات، سازه فرو نمی‌ریزد و در یک جابجایی قائم حدود ۱۱۵ میلی متر به تعادل می‌رسد. شکست پانچ در اتصالات مجاور باعث تغییر آشکار در منحنی پاسخ سازه می‌شود که در شکل ۸ نشان داده شده است.

برای ارزیابی شکست پانچ در اتصالات دال-ستون، جابجایی قائم نسبی دو گره انتهایی هر المان اتصال دهنده بررسی می‌شود. با توجه به شکل ۳، هر وجه ستون با دو المان اتصال دهنده به دال متصل شده است. براساس ضابطه شکست پانچ Muttoni [۱۹]، زاویه دوران شکست پانچ برابر ۰/۱۳۲ رادیان به دست می‌آید. طول المان اتصال دهنده برابر نصف عمق مؤثر دال یعنی ۱۰۵ میلی متر است. بنابراین جابجایی قائم نسبی متناظر با شکست پانچ در اتصالات برابر ۱/۳۸۶ میلی متر به دست می‌آید. شکل ۹، تاریخچه زمانی جابجایی قائم نسبی المان‌های اتصال دهنده در ستون‌های C1 و C2 در همه طبقات، در حالت حذف ستون B2 در طبقه اول را نشان می‌دهد. در شکل، خطوط پر، خط چین و نقطه چین به ترتیب نتایج طبقات اول تا سوم را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در ستون C2، شکست

پانچ کامل و در ستون C1، شکست پانچ ناقص در همه طبقات رخ داده است. اما به دلیل ظرفیت پس پانچ اتصالات، سازه دچار فروپاشی کلی نشده است.



شکل ۸: تاریخچه زمانی جابجایی قائم در موقعیت حذف ستون (C1ST01 به معنی حذف ستون C1 در طبقه اول است)

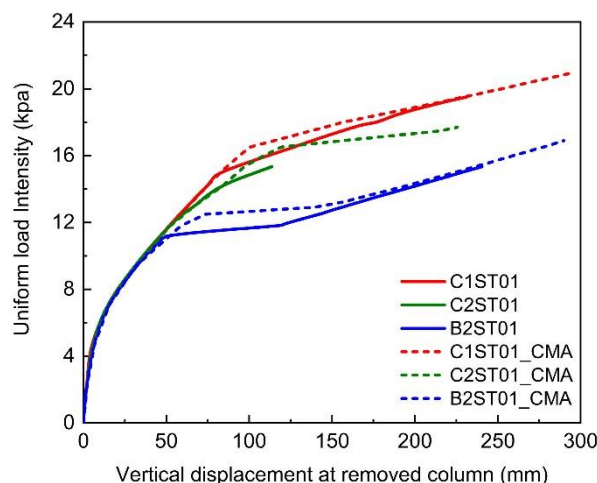


شکل ۹: تاریخچه زمانی جابجایی قائم نسبی المان‌های اتصال دهنده در ستون‌های C1 (شکل چپ) و C2 (شکل راست)

اثر CMA در ستون‌های داخلی به طور کامل و در ستون‌های کناری به طور ناقص ظاهر می‌شود اما در ستون‌های گوشه این اثر به وجود نمی‌آید [۱۸]. با توجه به شکل ۲، به منظور در نظر گرفتن اثر CMA، افزایش مقاومت پانچ در اتصالات داخلی و کناری ساختمان به ترتیب ۴۰ و ۲۰ درصد در نظر گرفته شد. در شکل ۸، پاسخ سازه در حالت حذف ستون B2 با در نظر گرفتن اثر CMA نیز نشان شده است. مشاهده می‌شود که اثر CMA بر پاسخ سازه بسیار اثر گذار است به طوری که مانع از شکست پانچ در اتصالات مجاور شده و جابجایی قائم را به حدود ۵۶ میلی‌متر (تقریباً نصف حالت قبل) کاهش داده است.

آنالیز دینامیکی برای سه حالت حذف ستون در طبقه اول، تحت شدت بارهای یکنواخت مختلف روی دال انجام شده است. شکل ۱۰، منحنی بار-جابجایی حاصل از آنالیز دینامیکی افزایشی را برای دو حالت با و بدون اثر CMA تحت سناریوهای مختلف حذف ستون نشان می‌دهد. هر نقطه روی این منحنی‌ها نشان دهنده بیشینه جابجایی قائم گره بالای ستون حذف شده به ازای یک شدت بار یکنواخت اعمال شده روی دال است. بیشینه ظرفیت تحمل بار در سناریوهای حذف ستون‌های C1، C2 و B2 بدون اثر CMA به ترتیب ۱۹/۵، ۱۵/۳۴ و ۱۵/۳۴ کیلوپاسکال است. بیشینه ظرفیت تحمل بار در سناریوهای حذف ستون‌های C1، C2 و B2 با اثر CMA به ترتیب ۲۱،

۱۶/۹۰ و ۱۷/۷۰ کیلو پاسکال است که به ترتیب ۷/۷٪، ۱۵/۴٪ و ۱۰/۲٪ افزایش در ظرفیت باربری نهایی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که افزایش ظرفیت تحمل بار سازه متناسب با افزایش مقاومت پانچ در اتصالات دال-ستون نیست. این می‌تواند هم به دلیل اثر لنگرهای نامتعادل در اتصالات و هم به دلیل اثر بزرگنمایی دینامیکی بار باشد.



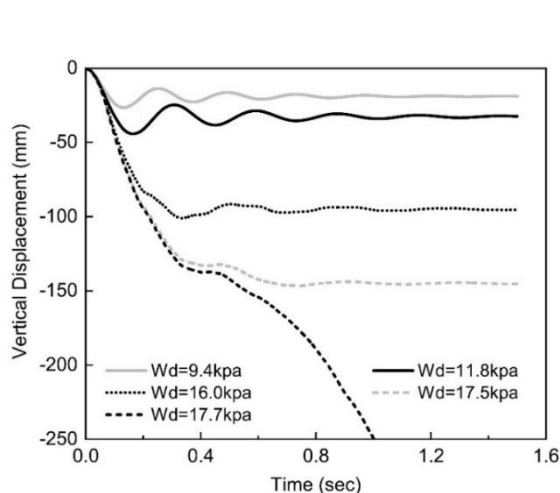
شکل ۱۰: اثر CMA بر منحنی بار دینامیکی برای حالت‌های مختلف حذف ستون

## ۶- اثر شرایط مرزی (دال‌های اطراف)

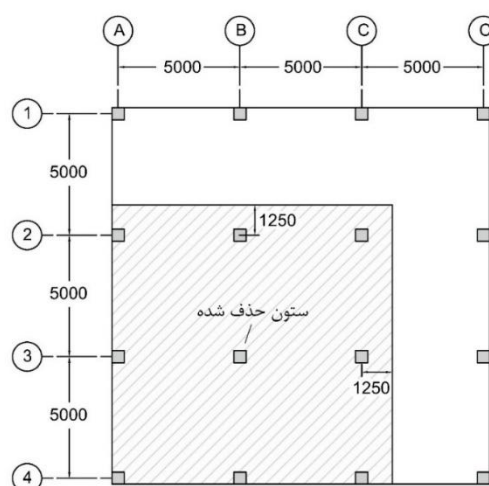
با توجه به شکل ۱۱-الف، دال‌های اطراف در یک سازه حقیقی می‌توانند قیدهای خمشی، افقی یا قائم ایجاد کنند. در تحقیقات آزمایشگاهی به دلایل کاهش هزینه و محدودیت فضای آزمایش، بخش هاشورخورده دال تخت از سازه اصلی جدا شده و برای شبیه‌سازی اثر دال‌های اطراف در لبه‌های دال طره (با طولی برابر با  $1/4$  فاصله ستون‌ها) یک بار افزایش یافته اعمال می‌شود [۹، ۳۰، ۳۳]. مطالعات گذشته نشان می‌دهد که این شرایط مرزی ساده شده می‌تواند محدودیت‌های ایجاد شده توسط دال‌های اطراف را دست پایین تخمین بزند [۱۶]. بنابراین مطالعات بیشتری به منظور درک صحیح از محدودیت‌های ایجاد شده توسط دال‌های اطراف در یک سازه حقیقی و مقایسه آن با شرایط مرزی ساده شده در یک سازه جدا شده ضرورت دارد.

برای بررسی اثر شرایط مرزی بر پاسخ سازه دال تحت، یک سازه دال تخت سه طبقه با پلان نشان داده شده در شکل ۱۱-الف، در نظر گرفته می‌شود. بارگذاری، ویژگی‌های مصالح، ضخامت دال، ابعاد ستون، میلگردهای دال و روش مدلسازی مشابه ساختمان دال تخت مورد بررسی در بخش قبل است. حذف ستون B3 در طبقه اول در سازه حقیقی و سازه جدا شده (بخش هاشورخورده در شکل ۱۱-الف) با ایجاد محدودیت‌های مختلف در لبه‌های آن بررسی می‌شود. بخش هاشور خورده سازه در شکل ۱۱-الف، از سازه حقیقی جدا شده و اثر دال‌های اطراف بر سازه جدا شده با اعمال شرایط مرزی مختلف در لبه‌های دال جدا شده بررسی می‌شود. هشت حالت شرایط مرزی در لبه‌های دال بررسی می‌شود که شامل بدون اعمال محدودیت (P)، اعمال بار افزایش یافته به اندازه ۲ برابر بر پیش آمدگی‌ها (IL)، اعمال قید قائم (V)، اعمال قید افقی (H)، اعمال قیدهای افقی و قائم (HV)، اعمال قید دورانی (M) و اعمال قید صلب (FF) می‌باشد.

با توجه به شکل ۲، اثر CMA به صورت افزایش مقاومت پانچ در اتصالات داخلی و کناری ساختمان به ترتیب برابر ۴۰ و ۲۰ درصد در نظر گرفته شد. شکل ۱۱-ب، تاریخچه زمانی جابجایی قائم گره بالای ستون حذف شده را به ازای شدت بارهای گسترده یکنواخت نشان می‌دهد. زمان صفر نشان دهنده شروع حذف ستون است جابجایی به سمت پایین با علامت منفی نشان داده شده است. در شدت بار ۱۱/۸ کیلو پاسکال، شکست پانچ در اتصالات دال-ستون مجاور رخ نمی‌دهد. بیشینه ظرفیت تحمل بار سازه در حالت حذف ستون B3 برابر ۱۷/۵ کیلو پاسکال به دست می‌آید. مقایسه شکل‌های ۸ و ۱۱-ب آشکار می‌سازد که سازه اطراف (ستون‌ها و دال‌های پیرامونی) موجب افزایش ظرفیت تحمل بار سازه و کاهش تغییرشکل‌ها می‌شود.



(ب)



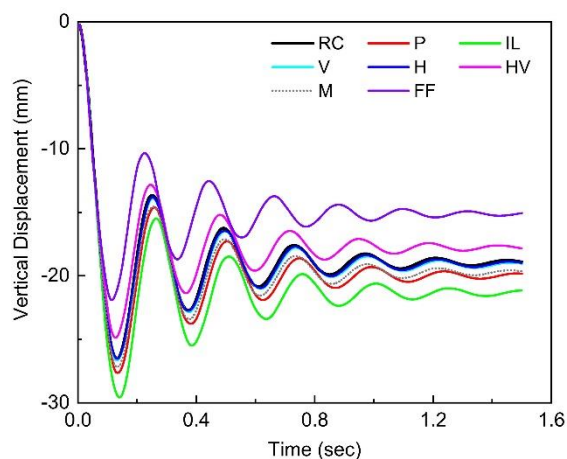
(الف)

شکل ۱۱: الف) پلان ساختمان ۳ طبقه دال تخت نمونه (ابعاد به میلی متر است)، ب) تاریخچه زمانی جابجایی قائم ستون B۳ در سازه حقیقی به ازای شدت بارهای گسترده یکنواخت

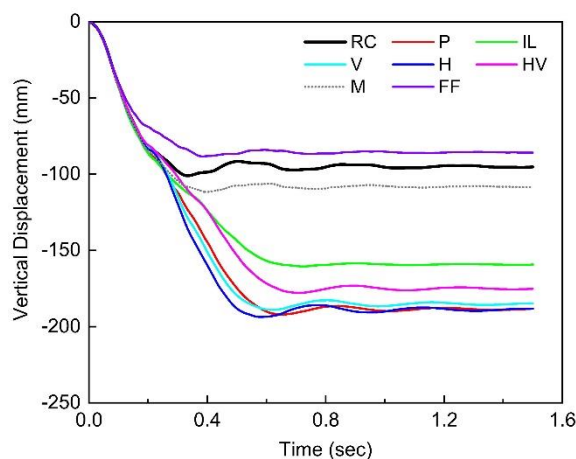
شکل ۱۲ تاریخچه زمانی جابجایی قائم گره بالای ستون B۳ با شرایط مرزی مختلف در سازه جدا شده را با سازه حقیقی مقایسه می کند. نتایج سازه حقیقی با RC نشان داده شده است. نتایج برای سه شدت بار گسترده یکنواخت ۹/۴، ۱۶ و ۱۷/۵ کیلو پاسکال رسم شده است. در شدت بار ۹/۴ کیلو پاسکال، شکست پانچ در اتصالات مجاور اتفاق نیفتاده است اما در شدت بارهای ۱۶ و ۱۷/۵ کیلو پاسکال شکست پانچ در اتصالات مجاور ستون حذف شده رخ داده و مقاومت پس پانچ در اتصالات مانع از فروریزش ساختمان شده است.

با توجه به شکل ۱۲، در شدت بار ۹/۴ کیلو پاسکال و بدون شکست پانچ در اتصالات مجاور، اعمال شرایط مرزی H، V و M منجر به نتایج دقیق تری می شود. در شدت بارهای گسترده ۱۶ و ۱۷/۵ کیلو پاسکال (با شکست پانچ در اتصالات مجاور)، اعمال شرایط مرزی M بهترین انطباق را با نتایج سازه حقیقی (RC) دارد. نتایج نشان می دهد که در همه شدت بارها، افزایش دو برابری بار در پیش آمدگی ها (حالت II) مشابه آنچه که در تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده، اثر محدودیت های دال های اطراف را کمتر از واقعیت در نظر می گیرد. اعمال قید صلب (حالت FF) نیز تغییر مکان های قائم کمتری را نسبت به شرایط واقعی (RC) تخمین می زند.

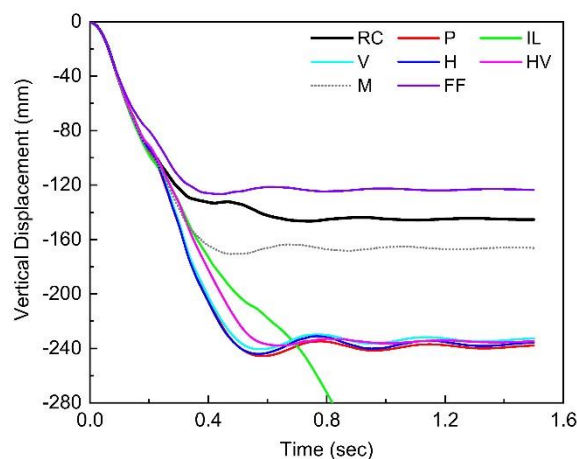
در جدول ۱، بیشینه جابجایی قائم و جابجایی قائم ماندگار برای ساختمان دال تخت نمونه با شرایط مرزی مختلف و سازه حقیقی نمایش داده شده است. نتایج نشان می دهد که در شدت بارهای کم که شکست برش پانچ در اتصالات دال-ستون مجاور اتفاق نمی افتد، اثر شرایط مرزی بر پاسخ سازه ناچیز است. در شدت بار گسترده ۹/۴ کیلو پاسکال، بهترین انطباق نتایج در حالت شرایط مرزی H اتفاق می افتد که سازگار با نتایج مرجع [۱۶] است. به ازای شدت بار گسترده ۱۶ کیلو پاسکال، مقایسه مدل های H، V و HV با مدل حقیقی سازه (RC) نشان می دهد که این شروط مرزی به ترتیب ۹۷/۲۱٪، ۹۳/۸۴٪ و ۸۳/۹۰٪ جابجایی های قائم بزرگتری دارند. مدل M نسبت به سازه حقیقی در شدت بارهای ۱۶ و ۱۷/۵ کیلو پاسکال، به ترتیب ۱۳/۶٪ و ۱۴/۲۲٪ جابجایی قائم بزرگتری را نشان می دهد و مدل FF نیز به ترتیب ۱۰٪ و ۱۵٪ جابجایی قائم کمتری دارد. اعمال شرایط مرزی FF منجر به استحکام بیشتر سازه و نتایج نامطمئنی می شود. بنابراین می توان نتیجه گرفت که برای دست یابی به پاسخ سازه حقیقی، لازم است تنها قیدهای دورانی (M) در لبه های دال اعمال شود.



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۱۲: مقایسه جابجایی قائم ستون B3 در سازه حقیقی و سازه جداسده با شرایط مرزی مختلف؛ (الف) شدت بار ۹/۴ کیلوپاسکال، (ب) شدت بار ۱۶/۰ کیلوپاسکال و (پ) شدت بار ۱۷/۵ کیلوپاسکال

جدول ۱: مقایسه جابجایی قائم حداکثر و ماندگار ساختمان دال تخت با شرایط مرزی مختلف

موضوع	شدت بار (کیلوپاسکال)	RC	P	IL	V	H	HV	M	FF
جابجایی حداکثر (میلی متر)	۹/۴	۲۶/۵۴	۲۷/۶۴	۲۹/۵۶	۲۶/۶۶	۲۶/۵۳	۲۴/۸۷	۲۷/۱۶	۲۱/۹۱
	۱۶/۰	۱۰۱/۰	۱۹۲/۰۸	۱۶۰/۵	۱۸۸/۹۸	۱۹۳/۶۷	۱۷۷/۷۸	۱۱۱/۶۷	۸۸/۲۹
	۱۷/۵	۱۴۶/۵۴	۲۴۵/۵۵	-	۲۴۰/۵۲	۲۴۴/۱۱	۲۳۷/۸۳	۱۷۰/۶۴	۱۲۶/۵۹
جابجایی ماندگار (میلی متر)	۹/۴	۱۸/۸۴	۱۹/۸۲	۲۱/۳۱	۱۸/۹۷	۱۸/۸۹	۱۷/۶۹	۱۹/۵۷	۱۵/۳۳
	۱۶/۰	۹۵/۴۶	۱۸۸/۶۱	۱۵۹/۴۴	۱۸۵/۰۴	۱۸۸/۲۶	۱۷۵/۵۵	۱۰۸/۴۴	۸۵/۸۴
	۱۷/۵	۱۴۵/۲۷	۲۳۸/۲۰	-	۲۳۳/۳۱	۲۳۶/۳۰	۲۳۶/۰۶	۱۶۵/۹۴	۱۲۳/۳۷

## ۷- نتیجه گیری

با مطالعات انجام شده در این مقاله، نتایج زیر به دست آمد:



مدل‌های عددی برپایه روش مدلسازی ارائه شده در این مقاله، قادر به شبیه سازی رفتار سازه‌های سیستم‌های دال تخت با در نظر گرفتن ظرفیت پس پانچ اتصالات دال-ستون هستند.

نتایج تحلیل حذف ناگهانی ستون میانی یک ساختمان دال تخت ۳ طبقه نشان می‌دهد که اثر CMA بر پاسخ سازه دال تخت تأثیرگذار بوده، به طوری که مانع از شکست پانچ در اتصالات دال-ستون مجاور شده و جابجایی قائم را تقریباً ۵۰٪ کاهش داده است.

تحلیل‌های عددی نشان می‌دهد که CMA باعث افزایش ظرفیت باربری نهایی سازه در حالت‌های مختلف حذف ناگهانی ستون می‌شود. البته این افزایش متناسب با افزایش مقاومت پانچ در اتصالات دال-ستون نیست که می‌تواند هم به دلیل اثر لنگرهای نامتعادل در اتصالات و هم به دلیل اثر بزرگنمایی دینامیکی بار باشد.

تحلیل‌های عددی انجام شده بر روی سازه دال تخت ۳ طبقه با شرایط مرزی مختلف در پیش آمدگی‌ها نشان می‌دهد که اعمال شرایط مرزی FF (قید صلب) منجر به جابجایی‌های قائم کمتر و نتایج نامطمئن می‌شود. افزایش دو برابری بار در پیش آمدگی‌ها (حالت IL) نیز مشابه آنچه که در تحقیقات آزمایشگاهی انجام می‌شود، اثر محدودیت‌های دال‌های اطراف را کمتر از واقعیت در نظر می‌گیرد. مقایسه مدل‌های H (قید افقی)، V (قید قائم) و HV (قیدهای افقی و قائم) با مدل حقیقی سازه (RC) در شدت بار گسترده ۱۶ کیلوپاسکال، نشان می‌دهد که این شروط مرزی به ترتیب ۹۷/۲۱٪، ۹۳/۸۴٪ و ۸۳/۹۰٪ جابجایی‌های قائم بزرگتری دارند. مدل M (قید دورانی) نسبت به سازه حقیقی در شدت بارهای ۱۶ و ۱۷/۵ کیلوپاسکال، به ترتیب ۱۳/۶٪ و ۱۴/۲۲٪ جابجایی قائم بزرگتری را نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که برای دست یابی به پاسخ سازه حقیقی، لازم است تنها قیدهای دورانی (M) در لبه‌های دال اعمال شود.

## مراجع

- [1] ASCE-7.(2010). *Minimum design loads for buildings and other structures*. American Society of Civil Engineers, SEI/ASCE-7.
- [2] DOD.(2009). *Design of buildings to resist progressive collapse UFC-4-023-03*. Washington, DC: Department of Defense.
- [3] GSA.(2013). *Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects*. Washington,DC: General Services Administration.
- [4] Y. Mirzaei.(2010).Post-punching behavior of reinforced concrete slabs, PhD thesis 4613, École Polytechnique Fédérale de Lausanne(EPFL), Lausanne, Switzerland.
- [5] M. F. Ruiz, Y. Mirzaei, and A. Muttoni. (2013).Post-punching behavior of flat slabs, *ACI Structural Journal*, vol. 110, no. ARTICLE, pp. 801-812.
- [6] F. Habibi, E. Redl, M. Egberts, W. D. Cook, and D. Mitchell. (2012).Assessment of CSA A23. 3 structural integrity requirements for two-way slabs, *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 39, no. 4, pp. 351-361.
- [7] J. Russell, J. Owen, and I. Hajirasouliha. (2015).Experimental investigation on the dynamic response of RC flat slabs after a sudden column loss, *Engineering Structures*, vol. 99, pp. 28-41.
- [8] L. Keyvani, M. Sasani, and Y. Mirzaei. (2014).Compressive membrane action in progressive collapse resistance of RC flat plates, *Engineering structures*, vol. 59, pp. 554-564.
- [9] Z. Peng, S. L. Orton, J. Liu, and Y. Tian. (2018).Experimental study of dynamic progressive collapse in flat-plate buildings subjected to an interior column removal, *Journal of Structural Engineering*, vol. 144, no. 8, p. 04018094.
- [10] K. Qian and B. Li. (2015).Dynamic disproportionate collapse in flat-slab structures, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 29, no. 5, p. B4014005.
- [11] F. Ma, B. P. Gilbert, H. Guan, H. Xue, X. Lu, and Y. Li. (2019).Experimental study on the progressive collapse behaviour of RC flat plate substructures subjected to corner column removal scenarios, *Engineering Structures*, vol. 180, pp. 728-741.
- [12] J. Liu, Y. Tian, S. L. Orton, and A. M. Said. (2015).Resistance of flat-plate buildings against progressive collapse. I: Modeling of slab-column connections, *Journal of Structural Engineering*, vol. 141, no. 12, p. 04015053.
- [13] V. Ghiasi, E. Mousapoor, and R. Madandoust. (2020).Macro modeling of post-punching behavior of flat slabs in progressive collapse, (in eng), *Modares Civil Engineering journal*, Original Research vol. 19, no. 6, pp. 0-0. [Online]. Available: <http://journals.modares.ac.ir/article-16-35667-fa.html>



- [14] E. Mousapoor, V. Ghiasi, and R. Madandoust.(2020) "Macro modeling of slab-column connections in progressive collapse with post-punching effect," in *Structures*, 2020, vol. 27: Elsevier, Published, pp. 837-852.
- [15] Z. Peng, S. L. Orton, J. Liu, and Y. Tian. (2017). Effects of in-plane restraint on progression of collapse in flat-plate structures, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 31, no. 3, p. 04016112.
- [16] Y.-H. Weng, K. Qian, F. Fu, and Q. Fang. (2020). Numerical investigation on load redistribution capacity of flat slab substructures to resist progressive collapse, *Journal of Building Engineering*, vol. 29, p. 101109.
- [17] J. Einpaul, M. F. Ruiz, and A. Muttoni. (2015). Influence of moment redistribution and compressive membrane action on punching strength of flat slabs, *Engineering Structures*, vol. 86, pp. 43-57.
- [18] J. Einpaul, C. E. Ospina, M. Fernández Ruiz, and A. Muttoni.(2016). Punching shear capacity of continuous slabs.in "ACI Structural Journal.
- [19] A. Muttoni. (2008). Punching shear strength of reinforced concrete slabs without transverse reinforcement, *ACI structural Journal*, vol. 4, no. ARTICLE, pp. 440-450.
- [20] A. Soleymani and m. R. Esfahani. (2019). Effect of concrete strength and thickness of flat slab on preventing of progressive collapse caused by elimination of an internal column, *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*, vol. 6, no. 1, pp. 24-40, doi: 10.22065/jsce.2017.98444.1335.
- [21] M. S. Sheu and N. M. Hawkins. (1980). Grid model for predicting the monotonic and hysteretic behavior of slab-column connections transferring moments, *Special Publication*, vol. 63, pp. 79-112.
- [22] D. Coronelli. (2010). Grid Model for Flat-Slab Structures, *ACI Structural journal*, vol. 107, no. 6.
- [23] Y. Tian, J. Chen, A. Said, and J. Zhao. (2012). Nonlinear modeling of flat-plate structures using grid beam elements, *Computers & Concrete*, vol. 10, no. 5, pp. 489-505.
- [24] Y. Mirzaeia and M. Sasani. (2013). Progressive collapse resistance of flat slabs: modeling post-punching behavior, *Computers and Concrete*, vol. 12, no. 3, pp. 351-375.
- [25] N. W. Ulaeto.(2018). Progressive collapse analysis of reinforced concrete flat slab structures considering post-punching and dynamic response, University of Surrey (United Kingdom).
- [26] A. Setiawan, R. L. Vollum, L. Macorini, and B. Izzuddin. (2019). Efficient 3-D modelling of punching shear failure at slab-column connections by means of nonlinear joint elements, *Engineering Structures*, vol. 197, p. 109372.
- [27] A. C. Institute.(2014). *ACI 318-14 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (Metric)*. American Concrete Institute.
- [28] EC2.(2004). *Eurocode 2: Design of concrete structures: Part 1-1: General rules and rules for buildings*. British Standards Institution.
- [29] S. Mazzoni, F. McKenna, M. H. Scott, and G. L. Fenves. (2006). OpenSees command language manual, *Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center*, vol. 264.
- [30] K. Qian and B. Li. (2016). Resilience of flat slab structures in different phases of progressive collapse, *ACI Structural Journal*, vol. 113(3), pp. 537-548.
- [31] B. Izzuddin, A. Vlassis, A. Elghazouli, and D. Nethercot. (2008). Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss—Part I: Simplified assessment framework, *Engineering structures*, vol. 30, no. 5, pp. 1308-1318.
- [32] BHRC.(2014). *Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings, standard no. 2800-14*. Tehran: Building and Housing Research Center.
- [33] Z. Peng, S. L. Orton, J. Liu, and Y. Tian. (2017). Experimental study of dynamic progressive collapse in flat-plate buildings subjected to exterior column removal, *Journal of Structural Engineering*, vol. 143, no. 9, p. 04017125.