

## The effect of dimensions of the solid zone around the column on the punching shear performance of waffle panel

Adib Yeganeh<sup>1</sup>, Behzad Eftekhari<sup>2\*</sup>

1- Master student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Zand Institute of Higher Education, Shiraz, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University of Larestan branch, Larestan, Iran

### ABSTRACT

Waffle panels have attracted the attention of many building designers due to their numerous advantages. The punching shear strength and performance of these panels are some of the key determining factors in their design process. Due to the geometrical difference between the lattice area and the solid area around the column in this type of roof, the dimensions of the solid area can be a crucial factor in the punching shear performance of this slab. In this study, 10 waffle plates of 2300 x 2300 mm were meticulously modeled and analyzed using ABAQUS software. Samples with and without openings were examined in two separate groups to provide a comprehensive analysis. The punching shear performance of the plates was thoroughly examined in both groups and finally, the punching shear strengths determined from the software and the ACI 318-19 code were compared. The results indicate that by increasing the area of the solid zone around the column, the punching shear capacity increases, and the ductility changes. Additionally, the placement of openings on the panels reduces the punching shear capacity and ductility. However, the dimensions of the solid area do not seem to affect the strength of the impacts caused by the openings, providing essential insights for design considerations.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 10 July 2024

**Revise Date:** 27 September 2024

**Accept Date:** 24 October 2024

### Keywords:

Waffle Panel

Punching Shear

Openings

ABAQUS

Concrete Structure

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.461837.3441](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.461837.3441)

\*Corresponding author: Behzad Eftekhari  
Email address: [behzad.eftekhari@iau.ac.ir](mailto:behzad.eftekhari@iau.ac.ir)

## تأثیر ابعاد محدوده توپر پیرامون ستون در عملکرد برش دوطرفه سقف‌های وافل

ادیب یگانه<sup>۱</sup>، بهزاد افتخار<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی ارشد، موسسه آموزش عالی زند شیراز، شیراز، ایران.

۲- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لارستان، لارستان، ایران.

### چکیده

سقف‌های وافل به دلیل وزن کم و امکان استفاده در دهانه‌های بلند، مورد توجه بسیاری از طراحان سازه قرار گرفته است. عملکرد و ظرفیت برش دوطرفه این نوع سقف‌ها یکی از عوامل تعیین‌کننده در روند طراحی آن‌ها محسوب می‌شود. با توجه به اختلاف هندسی محدوده مشبکی و محدوده توپر پیرامون ستون در این نوع سقف، ابعاد محدوده توپر می‌تواند یک عامل مهم در عملکرد برش دوطرفه این نوع سقف باشد. در این تحقیق ۱۰ نمونه سقف وافل به ابعاد ۲۳۰۰ در ۲۳۰۰ میلی‌متر در نرم‌افزار آباکوس<sup>۱</sup> و به وسیله مدل پلاستیسیته آسیب بتن، مدل‌سازی و مورد تحلیل قرار گرفت. سقف‌های دارای بازشو و بدون بازشو در دو گروه مجزا بررسی شدند. در هر دو گروه به ازای مقادیر مختلف مساحت محدوده توپر، عملکرد برش دوطرفه سقف‌ها مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت ظرفیت‌های برش دوطرفه به دست آمده از نرم‌افزار، با مقادیر محاسبه شده از روابط موجود در ACI 318-19 و مبحث نهم مقررات ملی ساختمان مقایسه گردید. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که با افزایش مساحت محدوده توپر، ظرفیت برش دوطرفه افزایش یافته و شکل پذیری نمونه‌ها نیز تغییر می‌کند. همچنین قرارگیری بازشو بر روی سقف‌ها موجب کاهش ظرفیت برش دوطرفه و شکل پذیری سقف‌ها شده اما ابعاد محدوده توپر تغییری در میزان تاثیر بازشو ایجاد نمی‌کند.

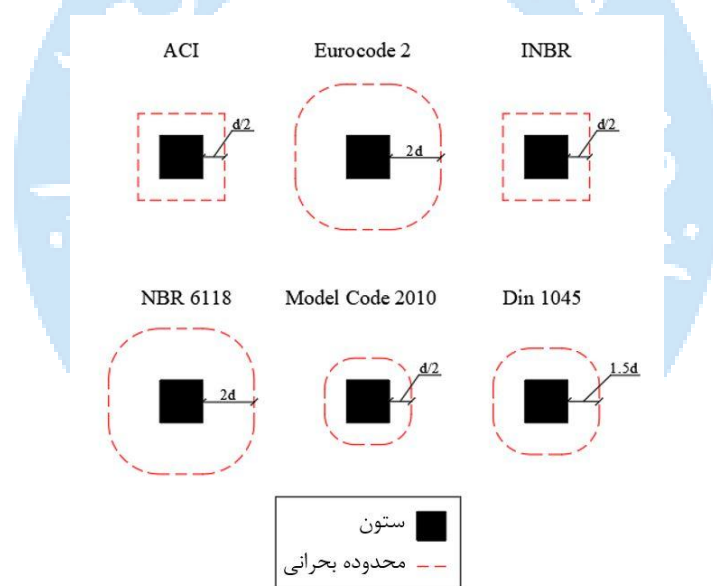
کلمات کلیدی: سقف وافل، برش دوطرفه، بازشوها، آباکوس، سازه بتنی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2024.461837.3441">10.22065/jsce.2024.461837.3441</a>	۱۴۰۴/۰۳/۳۱	۱۴۰۳/۰۸/۰۳	۱۴۰۳/۰۸/۰۳	۱۴۰۳/۰۶/۰۶	۱۴۰۳/۰۴/۲۰
*نویسنده مسئول: بهزاد افتخار			پست الکترونیکی: behzad.eftekh@iaui.ac.ir		

<sup>1</sup> ABAQUS

## ۱- مقدمه

سیستم‌های مختلف سقفی با توجه به نوع سازه و کاربری آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. سیستم‌های سقفی مختلف به دلیل تنوع وزنی، می‌توانند بر عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌ها تأثیر گذاشته و باعث تغییر در ضریب رفتاری آن‌ها شوند [۱]. سقف‌های وافل یکی از سیستم‌های سقفی محبوب است که به دلیل مزایای اقتصادی و سازه‌ای، بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲]. این نوع سقف شامل شبکه‌ای از تیرچه‌ها بوده که در جهت‌های متعامد به طور منظم توزیع شده و یک دال نازک بتنی روی تیرچه‌ها قرار گرفته است [۳]. سقف‌های وافل می‌توانند به دو صورت سیستم دال تخت و یا همراه با تیر بتنی در سقف مورد استفاده قرار بگیرند. یکی از عوامل مهم و تعیین‌کننده در سیستم‌های دال تخت، مسئله برش دوطرفه است. شکست برشی دوطرفه بدون هیچ علامت هشداردهنده‌ای رخ می‌دهد [۴]. علاوه بر این، ترک‌های برشی دوطرفه در تارهای بالایی تار خنثی در دال به وجود می‌آیند که به دلیل وجود پوشش کف قابل رویت نیستند [۵]. همچنین پدیده تخریب پیش‌رونده شود [۶]. با توجه به هندسه مقاطع سقف‌های وافل، به منظور تأمین مقاومت لازم در مقابل پدیده برش دوطرفه، محدوده پیرامونی ستون‌ها به شکل دال‌های توپر در نظر گرفته می‌شود [۷]. در آیین‌نامه‌های معتبر دنیا مانند ACI 318-19، Eurocode 2، NBR 6118 و Model Code 2010 و DIN 1045 و مبحث نهم مقررات ملی مطابق شکل ۱، حداقل ابعاد این محدوده تحت عنوان محیط بحرانی معرفی می‌شود و ظرفیت برش دوطرفه بر اساس این مقدار محاسبه می‌گردد [۸-۱۳]. بنابراین بر اساس آیین‌نامه‌های ذکر شده با افزایش مساحت محدوده توپر، ظرفیت برش دوطرفه سقف‌های وافل تغییری نمی‌کند.



شکل ۱: محیط بحرانی بر اساس آیین‌نامه‌های مختلف.

میلیگان<sup>۲</sup> و همکاران با بررسی تأثیر نسبت ابعاد ستون‌های ۴ ضلعی بر روی مقاومت برش دوطرفه دال‌های بتنی، نتیجه گرفتند که تأثیر ابعاد ستون بر روی مقاومت برش دوطرفه، علاوه بر نسبت اندازه ابعاد، به نسبت بعد ستون به عمق مؤثر دال بستگی داشته و نیز تأثیر ابعاد ستون بر برش دوطرفه دال‌ها با روابط داده شده در ACI 318-19 مطابقت نداشته است [۱۴]. حسن ابراهیم<sup>۳</sup> و همکاران نیز مشاهده کردند که شبکه میلگرد میانی دال می‌تواند تا ۱۷/۷ درصد ظرفیت برش دوطرفه دال را افزایش دهد و مقدار میلگرد خمشی دال

<sup>۲</sup>- Milligan

<sup>۳</sup>- Hassan Ibrahim

تأثیر مستقیم بر روی ظرفیت برش دوطرفه آن دارد [۱۵]. همچنین البیاتی<sup>۴</sup> و همکاران دریافتند که مکانیسم شکست دوطرفه سقف وافل به سقف دال توپر بسیار نزدیک است؛ اما روابط ارائه شده در آیین نامه با نتایج به دست آمده از نمونه های سقف وافل هم خوانی ندارد [۷].

از دیگر عوامل تعیین کننده در عملکرد سقف های وافل و همچنین سایر سقف های دوطرفه، بازشوها هستند؛ زیرا می توانند به طور مستقیم بر روی مقاومت برش دوطرفه تأثیر بگذارند [۱۶]. وجود بازشو می تواند حتی الگوی ترک ایجاد شده بر روی دال را نیز تغییر دهد به طوری که در اکثر موارد اولین ترک در نزدیک ترین گوشه بازشو به ستون آغاز شده و به سمت لبه های دال گسترش می یابد [۱۷].

بررسی عملکرد برش دوطرفه در سقف های مختلف همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. جنیکمسو<sup>۵</sup> و پولاک<sup>۶</sup> طی چند تحقیق پیرامون رفتار برش دوطرفه دال های بتنی ساده، نشان دادند که کاهش ظرفیت برش دوطرفه ناشی از قرارگیری بازشو وابسته به فاصله بازشو از لبه ستون است [۱۸]. همچنین مدل سازی سقف در نرم افزار آباکوس به دلیل منفرد بودن و پیوسته نبودن به سازه، ظرفیت برش دوطرفه را تا حدی، کمتر از واقعیت گزارش می کند [۱۹]. آگویار<sup>۷</sup> و همکاران دریافتند که در صورت استفاده از ستون های مربعی، وجود بازشو تأثیر بسیار زیادتری بر روی ظرفیت برش دوطرفه سقف وافل خواهد گذاشت [۲۰]. آنیل<sup>۸</sup> و همکاران نتیجه گرفتند که در دال های بتنی ساده، با افزایش فاصله بازشو از ستون، تغییر شکل ناشی از وجود بازشو نیز کاهش می یابد [۲۱]. الشافی<sup>۹</sup> و همکاران نیز با مطالعه ۱۰ نمونه دال بتنی مشاهده کردند که با افزایش مساحت بازشو، ظرفیت برش دوطرفه کاهش می یابد؛ همچنین استفاده از بازشو دایروی می تواند باعث بهبود عملکرد برش دوطرفه سقف نسبت به بازشو مربعی شود [۲۲].

با بررسی مقالات مورداستفاده در آیین نامه های ACI 318-19 و همچنین سایر مقالات معتبر پیرامون ظرفیت برش دوطرفه، می توان دریافت که عمده تحقیقات صورت گرفته بر روی مسئله برش دوطرفه و تأثیر بازشو بر روی آن، برای دال های ساده بتنی انجام شده و از چنین نتایجی برای پیش بینی رفتار سقف های وافل استفاده شده است. همین مسائل باعث شده است که عواملی مانند مساحت محدوده توپر پیرامون ستون و تأثیر آن بر روی عملکرد برش دوطرفه و همچنین تأثیر بازشو بر روی این نوع سقف نادیده گرفته شود. در صورتی که به دلیل غیریکنواختی در هندسه این نوع سقف و تفاوت آن با دال های ساده بتنی، نمی توان انتظار عملکرد کاملاً یکسان از این دو نوع سقف داشت.

در این تحقیق ضمن بررسی رفتار برش دوطرفه و ارتباط آن با مساحت محدوده توپر در سقف های وافل بدون آرماتور برشی، به تأثیر بازشو در این نوع سقف ها پرداخته شده است و تغییرات ناشی از وجود بازشو در سقف وافل به ازای مقادیر مختلف مساحت محدوده توپر، مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین مقدار ظرفیت برش دوطرفه برای تمام نمونه ها بر اساس ضوابط موجود در ACI 318-19 محاسبه شده و در نهایت دو مقداری که از محاسبات نرم افزاری و آیین نامه ای بدست آمده با یکدیگر مقایسه شده اند.

## ۲- مدل سازی

### ۲-۱- مدل های مورد بررسی

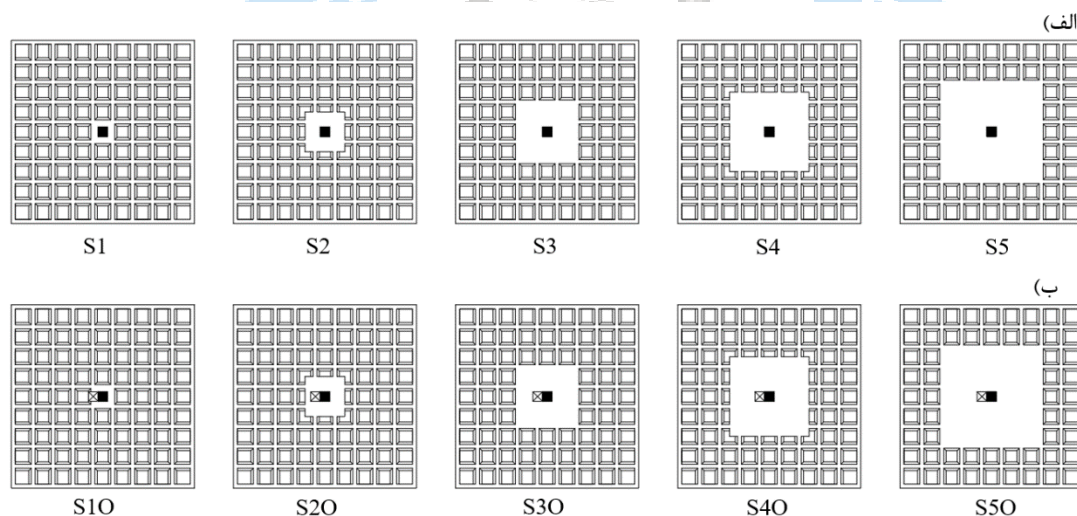
در این پژوهش ۱۰ سقف وافل در نرم افزار آباکوس و به وسیله تحلیل اجزاء محدود مورد بررسی قرار گرفته است. سقف های یاد شده در دو گروه قرار گرفته اند که در گروه اول، پنج سقف بدون بازشو دارای ابعاد متفاوت محدوده توپر قرار گرفته است. در گروه دوم نیز سقف های همسان با گروه اول اما همراه با بازشو وجود دارد که ابعاد بازشو در تمامی مدل ها دارای مقدار یکسان و برابر با ۱۲۰ در ۱۲۰ میلی متر در نظر گرفته شده است. مشخصات دقیق مدل های یاد شده در جدول ۱ ارائه گردیده است. به منظور درک بهتر مشخصات مدل ها، در شکل ۲ نمای تمام مدل ها ارائه شده و جزئیات هندسی مدل S50 در شکل ۳ به عنوان نمونه نمایش داده شده است.

4- Al-Bayati  
5- Genikomsou  
6- Polak  
7- Aguiar  
8- Anil  
9- El-Shafiey

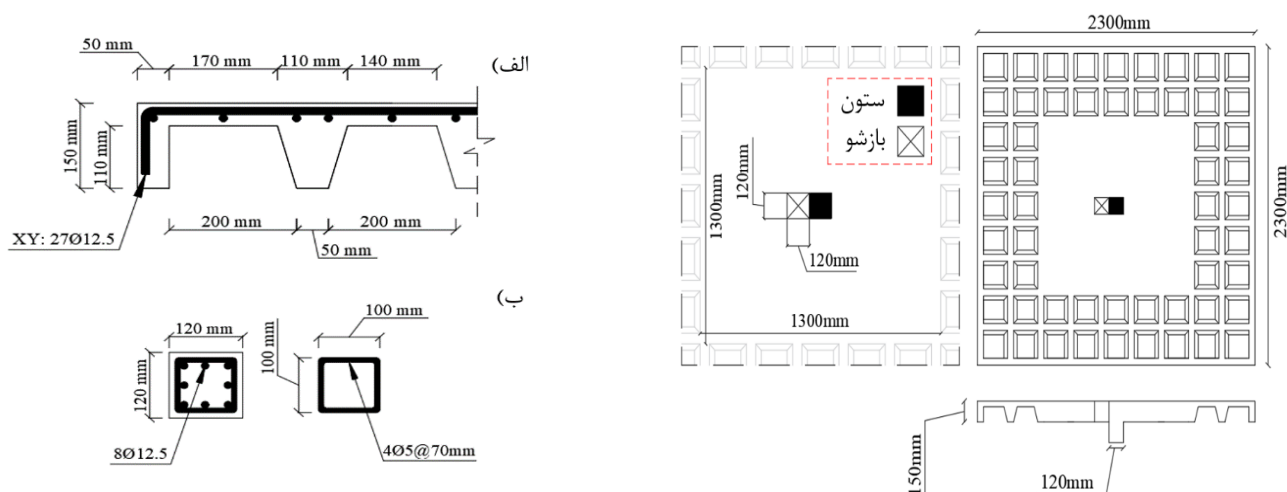
جدول ۱: گروه بندی و ابعاد مدل های نرم افزاری

گروه ۱			گروه ۲		
نام مدل	ابعاد محدوده توپر (میلی متر)	مساحت محدوده توپر (سانتیمتر مربع)	نام مدل	ابعاد محدوده توپر (میلی متر)	مساحت محدوده توپر (سانتیمتر مربع)
S1	300*300	900	S1O	300*300	900
S2	500*500	2500	S2O	500*500	2500
S3	800*800	6400	S3O	800*800	6400
S4	1000*1000	10000	S4O	1000*1000	10000
S5	1300*1300	16900	S5O	1300*1300	16900

ابعاد ستون در تمام نمونه های بالا برابر با ۱۲۰ در ۱۲۰ میلی متر و مقدار عمق موثر (d) برابر با ۱۲۵ میلی متر می باشد. میلگردهای طولی دال و ستون دارای قطر ۱۲/۵ میلی متر و میلگردهای عرضی ستون نیز دارای قطر ۵ میلی متر می باشد. همچنین تنش تسلیم میلگردها و مقاومت فشاری بتن مورد استفاده، به ترتیب برابر با ۵۶۵ و ۲۸ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. مدول الاستیسیته میلگرد برابر با ۲۰۰ گیگاپاسکال و مدول الاستیسیته بتن طبق روابط [۸] برابر با ۲۴۸۷۰ مگاپاسکال منظور گردیده است. سایر جزئیات مقطع سقف نیز در شکل ۴ نمایش داده شده است.

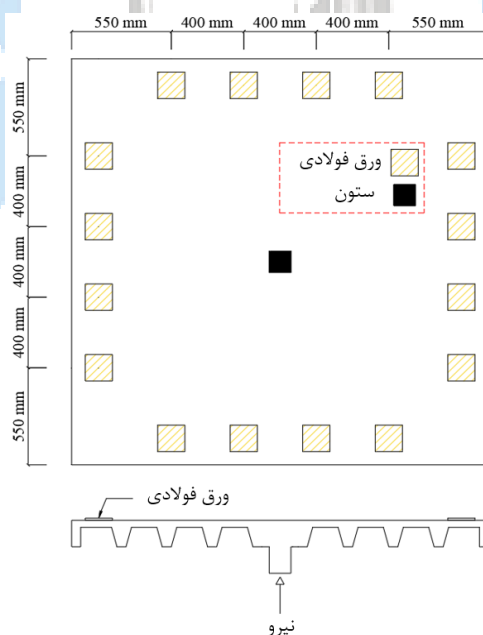


شکل ۲: مدل های مورد بررسی به تفکیک گروه: الف) گروه ۱، ب) گروه ۲



شکل ۳: جزئیات نمونه (S50 الف) نمای کلی، (ب) مقطع A-A، (ج) ابعاد محدوده (شکل ۴: ابعاد و جزئیات میلگرد گذاری مدل‌ها: الف) دال، (ب) ستون توپر

نیروی موردنظر در نمونه‌های یادشده به‌صورت استاتیکی به سطح زیرین ستون اعمال شده و به‌وسیله ستون به سقف منتقل می‌گردد. این نیرو به صورت پیوسته افزایش می‌یابد تا جایی که نمونه دیگر مقاومتی از خود نشان ندهد. برای تأمین تکیه‌گاه از ۱۶ ورق فولادی به ابعاد ۱۵۰ در ۱۵۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۲/۵ میلی‌متر بر روی سطح دال استفاده شده است؛ همچنین نوع تکیه‌گاه‌ها از نوع مفصلی در نظر گرفته شده و نحوه قرارگیری ورق‌های فولادی در شکل ۵ ارائه شده است.

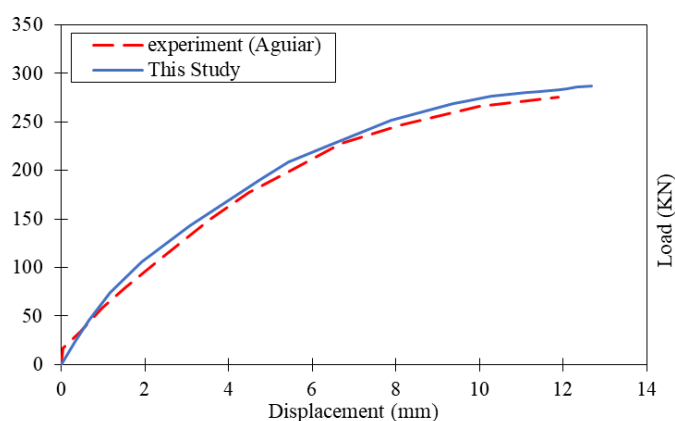


شکل ۵: موقعیت قرارگیری ورق‌های فولادی

## ۲-۲- صحت سنجی

برای مدل سازی سقف وافل در نرم افزار آباکوس، از مشخصات نمونه های موجود در آزمایش آگویار و همکاران استفاده شده است [۲۰]. در این آزمایش ۱۵ دال بتنی وافل (۱ دال بدون بازشو و ۱۴ دال دارای بازشو) به صورت آزمایشگاهی و نرم افزاری مورد بررسی قرار گرفت که برای حصول اطمینان از صحت نتایج در تحقیق پیش رو، یکی از دال های موجود در این پژوهش (L1A1) در نرم افزار مدل سازی شده و نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی ارائه شده در تحقیق آگویار و همکاران مقایسه گردید.

در این آزمایش نیز طبق فرایند گفته شده در بخش ۲-۱، نیرو از پایین و به سمت بالا به زیر ستون اعمال شده و تا لحظه ای که نمونه دیگر مقاومتی از خود نشان ندهد، افزایش نیرو ادامه می کند. حداکثر تنش فشاری بتن ۲۸ مگاپاسکال و تنش تسلیم میلگردها برابر با ۵۶۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. طبق نمودار ارائه شده در شکل ۶، مقدار خطا در مدل نرم افزاری پایین بوده و مدل ساخته شده دقت لازم را برای مدل سازی سایر نمونه ها فراهم می کند. (جابه جایی موجود در نمودار ارائه شده در شکل ۶، مربوط به مرکز سطح دال می باشد).



شکل ۶: نتایج صحت سنجی

## ۲-۳- مدل سازی در نرم افزار

در این تحقیق به منظور تحلیل دقیق مدل ها از نسخه ۲۰۲۲ نرم افزار آباکوس استفاده شده است. این نرم افزار یکی از قدرتمندترین نرم افزارهای المان محدود است که برای شبیه سازی مسائل مهندسی استفاده می شود [۲۲]. برای مدل سازی مواد شبه شکننده (ترد) مانند بتن در هنگام اعمال بارگذاری چرخه ای استاتیکی یا دینامیکی، می بایست علاوه بر پدیده ترک خوردگی، اثر بسته شدن ترک ها را نیز در آن ها اعمال کرد. مدل پلاستیسیته آسیب بتن (CDP<sup>10</sup>) یکی از روش های متداول مدل سازی رفتار بتن است. این مدل توسط لابلینر<sup>۱۱</sup> و همکاران ارائه [۲۳] و به وسیله لی<sup>۱۲</sup> و فنوز<sup>۱۳</sup> اصلاح گردید [۲۴].

به منظور تعریف رفتار غیرخطی بتن، دو نوع شکست شامل ترک خوردگی کششی و خرد شدن فشاری در این مدل در نظر گرفته شده است. مدل CDP بر اساس دو مجموعه اصلی از داده ها شامل خواص مکانیکی بتن و پنج پارامتر پلاستیسیته تعریف شده است [۲۵]. خواص مکانیکی شامل مقاومت فشاری و کششی بتن و منحنی های تنش - کرنش تک محوری در کشش و فشار می باشد. پارامترهای پلاستیسیته عبارتند از نسبت مقاومت فشاری دومحوری به مقاومت فشاری تک محوری  $(\sigma_{bo}/\sigma_c)$ ،  $K_c$ ، زاویه اتساع  $(\Psi)$ ، پارامتر خروج از مرکز (E) و پارامتر ویسکوزیته  $(\mu)$ . بازه پیشنهاد شده برای مقدار زاویه اتساع بین ۳۵ تا ۳۸ درجه می باشد [۲۶] که در این تحقیق این مقدار برابر با ۳۶ درجه در نظر گرفته شده است. همچنین مقدار خروج از مرکزیت که باید بر اساس نسبت بین مقاومت کششی و فشاری

10- Concrete Damage Plasticity

11- Lubliner

12- Lee

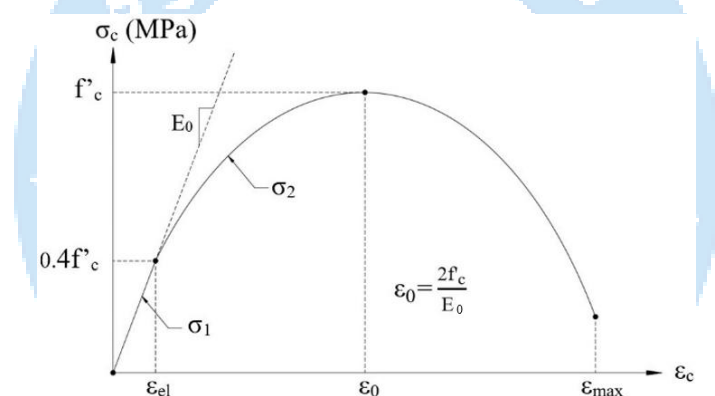
13- Fenvez

تک محوری در بتن محاسبه شود، می تواند از ۰ تا ۱ متغیر باشد که در این تحقیق برابر با ۰/۱۰ تعریف شده است [۲۷]. عامل دیگر برای مدل CDP، نسبت بین حداکثر تنش ها در آزمون فشاری دومحوره و آزمون فشاری تک محوری است که می توان مقدار ۱/۱۶ را برای آن اتخاذ کرد [۱۴]. همچنین برای ضریب  $K_c$  مقدار ۰/۶۷ و پارامتر ویسکوزیته مقدار ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است [۲۰].

در این تحقیق برای شبیه سازی رفتار فشاری بتن در نرم افزار از مدل ارائه شده در [۲۸] استفاده شده است. براساس این مدل، منحنی تنش- کرنش را می توان به ۳ قسمت تقسیم کرد. در محدوده تنش صفر تا  $0.4f_c$  رفتار بتن به صورت خطی الاستیک با مدول الاستیسیته ۲۴۸۷۰ مگاپاسکال است و با وارد شدن تنش به محدوده  $0.4f_c \leq \sigma \leq f_c$  بتن وارد ناحیه غیرخطی می شود. بخش سوم منحنی تنش- کرنش پس از تنش فشاری حداکثر اتفاق می افتد. در این قسمت با رسیدن تنش به مقدار حداکثر، مقاومت فشاری بتن به صورت غیرخطی کاهش می یابد. نمودار تنش- کرنش مفروض در شکل ۷ ارائه شده است؛ همچنین معادلات مربوط به این نمودار در زیر آورده شده است:

$$\text{if } \varepsilon_c \leq 0.4f_c E_0 \quad \sigma_1 = E_0 \varepsilon_c \quad (1)$$

$$\text{if } \varepsilon_c \geq 0.4f_c E_0 \quad \sigma_2 = f_c \left( 2 \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right) - \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right) \quad (2)$$

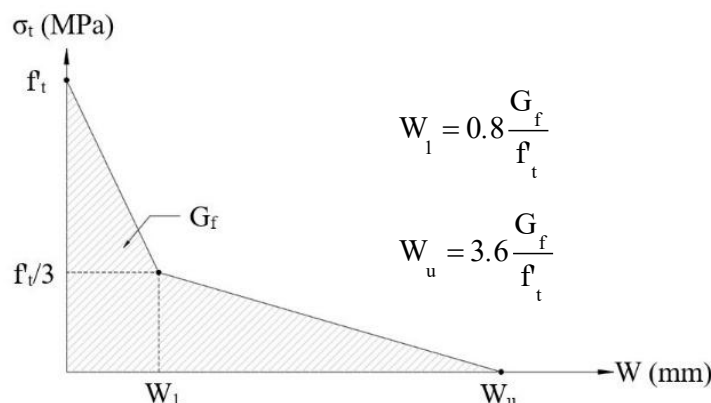


شکل ۷: نمودار رفتار بتن در فشار

برای مدل سازی رفتار کششی بتن، از انرژی شکست بتن استفاده شده است [۲۹]. مطابق شکل ۸، انرژی شکست ( $G_f$ ) مقدار انرژی مورد نیاز برای ایجاد یک سطح واحد از ترک بوده و مقدار آن برابر مساحت سطح زیر نمودار تنش کششی - عرض ترک بتن می باشد [۳۰]. این مقدار به عواملی مانند کیفیت بتن و اندازه سنگدانه بستگی دارد و از روابط زیر بدست می آید:

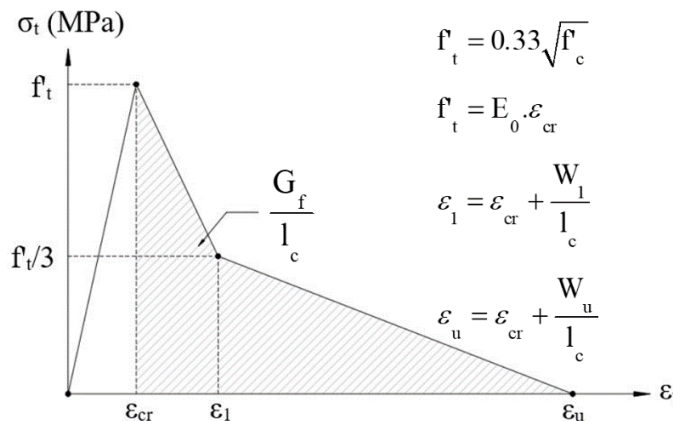
$$G_f = G_{f0} \left( \frac{f_{cm}}{f_{cmo}} \right)^{0.7} \quad (3)$$

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{Mpa} \quad (4)$$



شکل ۸: نمودار تنش - عرض ترک

در روابط ۳ و ۴،  $f_{cmo}$  برابر با ۱۰ مگاپاسکال و برای حداکثر اندازه سنگدانه ۱۹ میلی‌متری،  $G_f$  برابر با  $0.35$  نیوتن بر میلی‌متر می‌باشد که بر اساس جدول موجود در [۱۱] محاسبه شده است. همچنین  $f_{ck}$  مقاومت فشاری مشخصه بتن و  $f_{cm}$  میانگین مقاومت فشاری بتن می‌باشد. نمودار رفتار کششی بتن در شکل ۹ نشان داده شده است که در آن  $l_c$  طول مشخصه المان می‌باشد.



شکل ۹: نمودار رفتار بتن در کشش

برای مدل‌سازی دال‌ها از دو نوع المان اجزا محدود استفاده شده است، یکی المان محدود هشت گرهی شش‌وجهی (C3D8) با ابعاد حداکثر ۲۵ میلی‌متر برای اجزاء بتنی و ورق فولادی، و دومی المان محدود خرابایی دو گره‌ای (T3D2) با حداکثر ابعاد ۱۵ میلی‌متر که برای میلگردها در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که با توجه به وجود یک خط تقارن مشترک در تمامی نمونه‌ها، به منظور کاهش حجم محاسبات نرم‌افزاری و زمان تحلیل، نیمی از نمونه، مدل‌سازی شده و تحلیل بر روی آن صورت گرفته است. این راهکار هیچ خطایی در نتیجه نهایی تحلیل ایجاد نمی‌کند [۲۹].

### ۳- دیدگاه آیین‌نامه

مطابق با روابط ارائه شده در آیین‌نامه‌های طراحی از جمله ACI 318-19، ظرفیت برش دوطرفه به سه عامل اصلی عمق مؤثر دال، مقاومت فشاری بتن و محیط محدوده بحرانی ( $b_0$ ) وابسته است. طبق ضوابط ACI 318-19 و مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، ظرفیت برش دوطرفه سقف برای مقاطع بدون آرماتور برشی، برابر است با کمترین مقدار به دست آمده از سه رابطه زیر [۸ و ۱۳]:

$$v_{c1} = 0.33 \lambda_s \lambda \sqrt{f'_c} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (5)$$

$$v_{c2} = \left( 0.17 + \frac{0.33}{\beta} \right) \lambda_s \lambda \sqrt{f'_c} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (6)$$

$$v_{c3} = \left( 0.17 + \frac{0.083 \alpha_s d}{b_0} \right) \lambda_s \lambda \sqrt{f'_c} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (7)$$

$v_c$ : ظرفیت برش دوطرفه ( $\text{N/mm}^2$ )

$d$ : عمق مؤثر دال (mm)

$b_0$ : محیط محدوده بحرانی

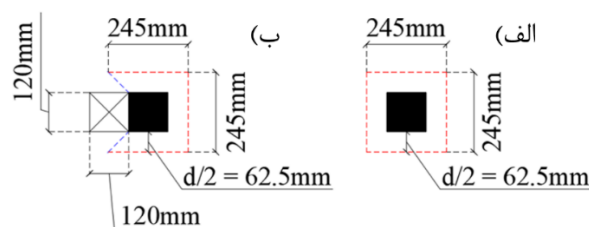
$\lambda$ : ضریب تصحیح جهت انعکاس مشخصات مکانیکی کاهش یافته‌ی بتن سبک نسبت به بتن معمولی، در مقاومت فشاری یکسان.

$\lambda_s$ : ضریب اثر ابعاد.

$\beta$ : نسبت ابعاد بزرگ به کوچک ستون

$\alpha_s$ : ضریب تأثیر موقعیت ستون

برای محاسبه محیط بحرانی  $b_0$ ، یک محیط به موازات لبه ستون و به فاصله  $d/2$  از لبه ستون ترسیم می‌شود. برای منظور کردن تأثیرات بازشوهای قرار گرفته بر روی دال نیز ابتدا دو خط به صورت مستقیم از مرکز ستون و مماس به محدوده بازشو ترسیم می‌شود. سپس بخشی از  $b_0$  که به وسیله خطوط ترسیم شده محصور می‌گردد، در نظر گرفته نمی‌شود. با توجه به ثابت بودن ابعاد بازشو در تمامی مدل‌ها، مقدار ظرفیت برش دوطرفه در نمونه‌های دارای بازشو و بدون بازشو، دارای مقدار ثابتی می‌باشد. محدوده بحرانی برای نمونه‌های دارای بازشو و بدون بازشو در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. همچنین مقدار ظرفیت برش دوطرفه و سایر پارامترهای آیین‌نامه‌ای برای مدل‌های دارای بازشو و بدون بازشو در جدول ۲ ارائه گردیده است.



شکل ۱۰: جزئیات محدوده بحرانی: الف) گروه ۱، ب) گروه ۲

جدول ۲: جزئیات محاسبه ظرفیت برش دوطرفه

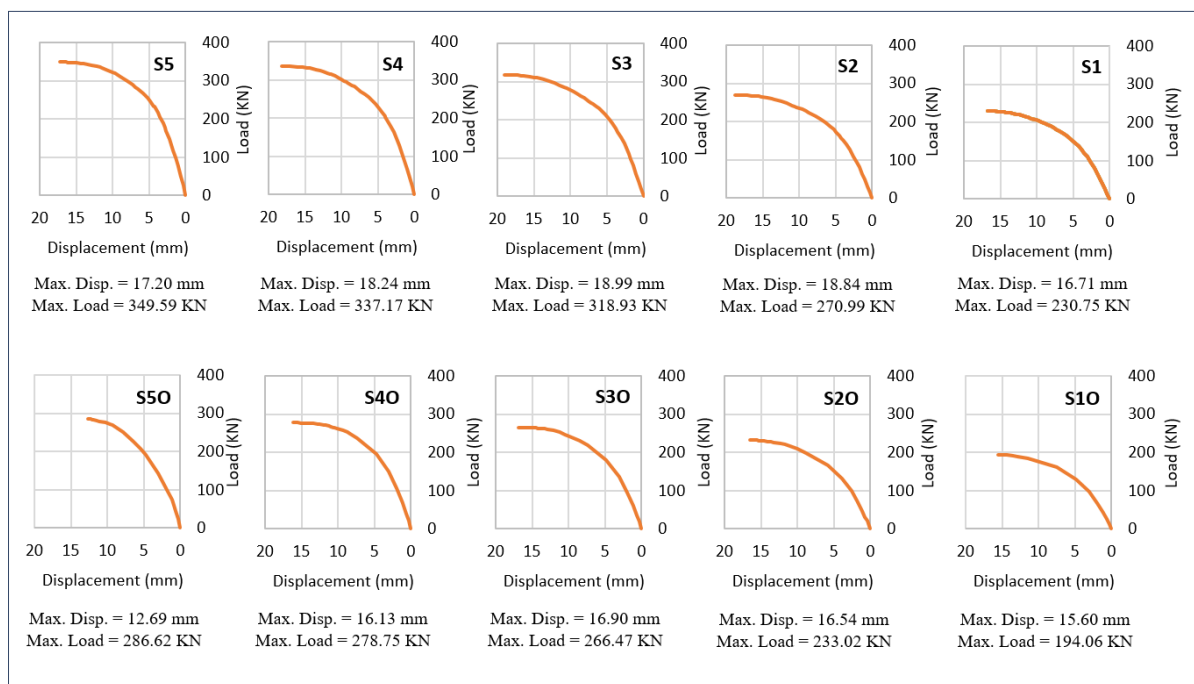
گروه ۱			گروه ۲		
$f_c$	28	Mpa	$f_c$	28	Mpa
$b_0$	980	mm	$b_0$	735	mm
$d$	125	mm	$d$	125	mm
$\lambda$	1	---	$\lambda$	1	---
$\lambda_s$	1	---	$\lambda_s$	1	---
$\beta$	1	---	$\beta$	1	---
$\alpha_s$	40	---	$\alpha_s$	40	---
$v_c$	1.746	N/mm <sup>2</sup>	$v_c$	1.746	N/mm <sup>2</sup>
$V_c$	213.91	KN	$V_c$	160.43	KN

#### ۴- بحث و بررسی نتایج

در این قسمت، نتایج تحلیل ۱۰ مدل ارائه شده در قسمت قبل مورد بررسی قرار گرفته و پس از تجزیه و تحلیل عملکرد برش دوطرفه سقفها، نتایج نرم افزاری با مقادیر به دست آمده از روابط آیین نامه ای مقایسه می گردد. در ادامه نتایج تحلیل های صورت گرفته در محیط نرم افزار، به صورت نمودار در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. همچنین مقدار دقیق نیرو و تغییر شکل دال در لحظه شکست در پایین هر نمودار ارائه گردیده است. پس از آن نیز خلاصه نتایج نرم افزاری و محاسباتی در جدول ۳ آورده شده است. لازم به ذکر است که مقادیر ارائه شده مربوط به نیروی های تکیه گاهی و تغییر شکل مرکز سطح دال می باشد.

برای حصول اطمینان از بروز شکست دوطرفه و عدم بروز شکست خمشی در سقفها، مقدار نیروی مورد نیاز برای شکست خمشی سقف بر اساس نظریه خط تسلیم<sup>۱۴</sup> و رابطه ارائه شده در [۳۱] تحت عنوان  $V_{flex}$  محاسبه گردید. مطابق با نتایج جدول ۳، مقدار نیروی مورد نیاز برای شکست خمشی سقفها با مقدار ظرفیت به دست آمده از نرم افزار اختلاف زیادی دارد؛ به نحوی که کمترین اختلاف میان این دو مقدار نسبت به  $V_{flex}$  برابر با ۴۷ درصد بوده و مربوط به نمونه S5 است. بنابراین می توان از بروز شکست دوطرفه در تمامی مدل های نرم افزاری اطمینان حاصل نمود.

<sup>14</sup>- Yield-Line Theory



شکل ۱۱: نمودار نیرو - جابه‌جایی مدل‌های نرم‌افزاری

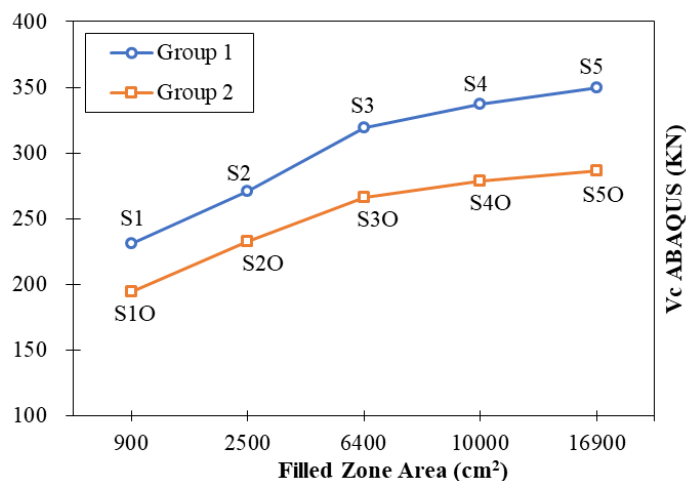
جدول ۳: خلاصه نتایج نرم‌افزاری و آیین‌نامه‌ای

نام نمونه	ACI 318-19	ABAQUS		$\frac{V_c(ABAQUS)}{V_{flex}}$	$\frac{V_c(ACI)}{V_c(ABAQUS)}$
	$V_c$ KN	$V_c$ KN	جابه‌جایی mm		
S1	213.91	230.75	16.71	0.351	0.927
S2	213.91	270.99	18.84	0.412	0.789
S3	213.91	318.93	18.99	0.485	0.671
S4	213.91	337.17	18.24	0.512	0.634
S5	213.91	349.59	17.20	0.531	0.612
S10	160.43	194.06	15.60	0.295	0.827
S20	160.43	233.02	16.54	0.354	0.688
S30	160.43	266.47	16.90	0.405	0.602
S40	160.43	278.75	16.13	0.424	0.576
S50	160.43	286.62	12.69	0.436	0.560
S50	160.43	286.62	12.69	0.436	0.560

## ۱-۴- بررسی ظرفیت برش دوطرفه

نمودار تغییرات ظرفیت برش دوطرفه نسبت به مساحت محدوده توپر برای هر دو گروه در شکل ۱۲ نشان داده شده است. نتایج ارائه شده در این نمودار حاکی از آن است که برخلاف روابط ارائه شده در آیین‌نامه ACI، با افزایش مساحت توپر، مقدار ظرفیت برش دوطرفه نیز افزایش می‌یابد؛ به نحوی که اختلاف بین بیشترین مقدار و کمترین مقدار ظرفیت برش دوطرفه نسبت به کمترین مقدار ظرفیت برش دوطرفه در دو گروه ۱ و ۲ به ترتیب برابر با ۵۱ درصد و ۴۸ درصد می‌باشد؛ همچنین می‌توان گفت روند افزایش ظرفیت برش دوطرفه در این نمودار به صورت خطی بوده و مساحت محدوده توپر با مقدار ظرفیت برش دوطرفه رابطه مستقیم دارد.

از دیگر نکات حائز اهمیت در مورد روند افزایش ظرفیت برش دوطرفه در شکل ۱۲، می توان به تاثیر باز شو در این روند اشاره کرد. با بررسی این نمودار می توان دریافت که اختلاف نسبی ظرفیت برش دوطرفه بین دو گروه ۱ و ۲ با افزایش مساحت محدوده توپر تغییر چندانی پیدا نمی کند. به عبارتی دیگر با افزایش ظرفیت برش دوطرفه، هرچه مساحت محدوده توپر بیشتر شود، مقدار عددی اختلاف ظرفیت برش دوطرفه بین دو گروه افزایش می یابد. در مقابل مطابق با نتایج جدول ۴، اختلاف نسبی ظرفیت برش دوطرفه بین گروه ۱ و ۲ نسبت به گروه ۱ تقریباً ثابت می ماند.



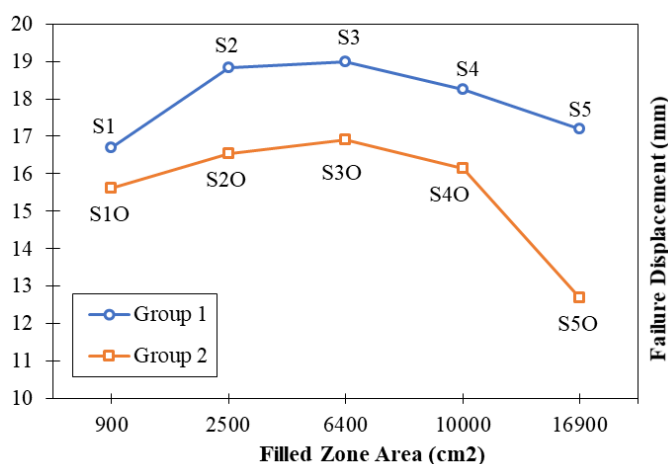
شکل ۱۲: نمودار تغییرات ظرفیت برش دوطرفه نسبت به مساحت محدوده توپر

جدول ۴: تغییرات اختلاف ظرفیت برش دوطرفه

مساحت محدوده توپر	$1 - \frac{V_c(\text{Group 2})}{V_c(\text{Group 1})}$	$V_c(\text{Group 1}) - V_c(\text{Group 2})$
cm2		KN
900	0.16	36.69
2500	0.14	37.97
6400	0.16	52.46
10000	0.17	58.42
16900	0.18	62.97

#### ۲-۴- بررسی تغییر شکل

مساحت ابعاد توپر بر روی تغییر شکل حداکثر سقفها نیز تأثیرگذار می باشد. با بررسی شکل ۱۳ می توان دریافت که تغییر شکل سقفها در زمان تسلیم با مقدار مساحت محدوده توپر یک رابطه غیرخطی دارد؛ به نحوی که در هر دو گروه مقدار تغییر شکل به ازای مساحت ۹۰۰ الی ۶۴۰۰ سانتیمتر مربع به صورت افزایشی بوده و پس از آن کاهش می یابد. مقدار تغییر شکل در گروه اول با افزایش مساحت محدوده توپر ابتدا تا ۱۴ درصد افزایش می یابد (مدل S3) اما پس از آن به مقداری نزدیک به مقدار اولیه بازمی گردد (مدل S5). در گروه دوم اما مقدار تغییر شکل ابتدا ۸ درصد افزایش یافته (مدل S3O) و پس از آن ۲۵ درصد کاهش می یابد (مدل S5O).

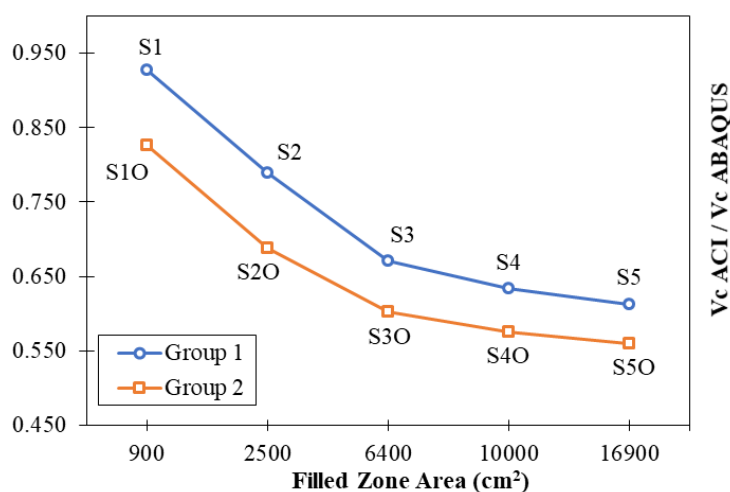


شکل ۱۳: نمودار تغییرات حداکثر جابه‌جایی روی سطح دال نسبت به مساحت محدوده توپر

تأثیر بازشو بر روی تغییر شکل مدل‌ها بسیار محسوس است. با بررسی نمودار شکل ۱۵ می‌توان دریافت که قرارگیری بازشو در تمامی نمونه‌ها موجب کاهش شکل‌پذیری آن‌ها شده است؛ همچنین با افزایش مساحت محدوده توپر در مدل‌ها، تأثیر قرارگیری بازشو بر روی آن‌ها نیز افزایش می‌یابد. در مدل‌های با مساحت توپر ۹۰۰ سانتیمتر مربع، با قرارگیری بازشو، مقدار تغییر شکل تنها ۷ درصد کاهش داشته است. این در حالی است که در نمونه‌های با مساحت توپر ۱۶۹۰۰ سانتیمتر مربع، این مقدار ۲۶ درصد کاهش یافته است.

#### ۳-۴- مقایسه نتایج آیین‌نامه و نرم‌افزار

شکل ۱۴، روند تغییرات تطابق مقدار آیین‌نامه‌ای و نرم‌افزاری ظرفیت برش دوطرفه نسبت به مساحت محدوده توپر را نشان می‌دهد. تشابه روند این تغییرات در بین دو گروه ۱ و ۲ کاملاً مشهود است. با افزایش مساحت محدوده توپر در هر دو گروه، دقت مقدار آیین‌نامه‌ای کاهش یافته است. روند تغییرات گفته‌شده در هر دو گروه به‌صورت غیرخطی بوده و با افزایش مساحت محدوده توپر، از شیب نمودار کاسته می‌شود. به عبارتی هرچه مساحت محدوده توپر بیشتر شود، تغییرات آن تأثیر کمتری بر روی دقت آیین‌نامه‌ای می‌گذارد. دقت مقدار آیین‌نامه‌ای در گروه ۱ از ۹۳ درصد در مدل S1، به مقدار ۶۱ درصد در مدل S5 کاهش می‌یابد. در گروه ۲ نیز این مقدار از ۸۳ درصد در مدل S1O، به مقدار ۵۶ درصد در مدل S5O تغییر پیدا کرده است.



شکل ۱۴: نمودار تغییرات تطابق مقدار آیین‌نامه‌ای و نرم‌افزاری ظرفیت برش دوطرفه نسبت به مساحت محدوده توپر

وجود بازشو در مدل‌ها بر روی دقت مقادیر آیین‌نامه‌ای نیز تأثیرگذار بوده است. با بررسی شکل ۱۴ می‌توان دریافت که ظرفیت برش دوطرفه محاسبه‌شده توسط روابط آیین‌نامه، به‌طور کلی در گروه ۱ دارای دقت بیشتری است. همچنین اختلاف میزان دقت بین دو گروه (۵ الی ۱۰ درصد) به ازای مقادیر مختلف مساحت محدوده توپر تفاوت چندانی نمی‌کند.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ۱۰ مدل نرم‌افزاری به‌وسیله تحلیل اجزاء محدود مورد بررسی قرار گرفت و از وقوع شکست دوطرفه در تمام مدل‌ها اطمینان حاصل شد. همچنین ظرفیت برش دوطرفه برای تمام مدل‌ها بر اساس ضوابط آیین‌نامه ACI 318-19 محاسبه شد و نهایتاً تمام نتایج به‌دست‌آمده در قالب جدول و نمودار ارائه گردید. بر اساس محاسبات و تحلیل‌های صورت گرفته، نتایج زیر حاصل شد:

۱- برخلاف روابط ارائه‌شده در ACI 318-19 و مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، مساحت محدوده توپر تأثیر بسیار زیادی بر روی رفتار برش دوطرفه برش سقف‌های وافل دارد. با افزایش مساحت محدوده توپر در سقف وافل، ظرفیت برش دوطرفه افزایش یافته و مقدار افزایش این ظرفیت نسبت به مساحت محدوده توپر به‌صورت خطی بوده و با آن رابطه مستقیم دارد.

۲- قرارگیری بازشو بر روی سقف‌های وافل می‌تواند موجب کاهش ۱۴ الی ۱۸ درصدی ظرفیت برش دوطرفه شود؛ اما میزان تأثیر بازشو بر روی ظرفیت برش دوطرفه با افزایش و یا کاهش مساحت محدوده توپر تغییر چندانی نمی‌کند.

۳- تغییرات مساحت محدوده توپر بر روی شکل‌پذیری سقف وافل تأثیرگذار است. با افزایش مساحت محدوده توپر، مقدار تغییر شکل در لحظه تسلیم سقف ابتدا به‌صورت غیرخطی افزایش یافته اما پس‌از آن کاهش می‌یابد.

۴- وجود بازشو بر روی سقف‌ها، باعث کاهش ۷ الی ۲۷ درصدی شکل‌پذیری آن‌ها می‌شود. میزان تأثیر بازشو بر روی شکل‌پذیری سقف‌های وافل با مقدار مساحت محدوده توپر رابطه مستقیم دارد و با افزایش مساحت محدوده توپر، تأثیر بازشو بر روی شکل‌پذیری نیز افزایش می‌یابد.

۵- مقادیر ظرفیت برش دوطرفه محاسبه‌شده از روابط ACI 318 و مبحث نهم مقررات ملی، در برخی مواقع می‌تواند بسیار محافظه‌کارانه باشد.

۶- مقدار مساحت محدوده توپر بر روی دقت روابط آیین‌نامه‌ای تأثیرگذار است؛ به‌نحوی که با افزایش مساحت محدوده توپر، از دقت روابط آیین‌نامه کاسته می‌شود. همچنین هرچه نسبت مساحت محدوده توپر به مساحت کل دهانه افزایش یابد، از تأثیر تغییرات مساحت محدوده توپر بر روی دقت آیین‌نامه کاسته می‌شود.

۷- وجود بازشو بر روی سقف، دقت روابط آیین‌نامه‌ای را کاهش می‌دهد؛ اما تغییرات مساحت محدوده توپر، میزان تأثیر بازشو را تغییر نمی‌دهد.

## مراجع

- [1] Annan, C. D., Youssef, M. A., & El Naggar, M. H. (2009). Seismic Vulnerability Assessment of Modular Steel Buildings. *Journal of Earthquake Engineering*, 13(8), 1065-1088. doi:10.1080/13632460902933881
- [2] Kaveh, A. & Behnam, A. F. (2012). Cost optimization of a composite floor system, one-way waffle slab, and concrete slab formwork using a charged system search algorithm. *Scientia Iranica*, 19(3), 410-416. doi:https://doi.org/10.1016/j.scient.2012.04.001
- [3] Maheri, M. R. (2005). Performance of Building Roofs in the 2003 Bam, Iran, Earthquake. *Earthquake Spectra*, 21(1\_suppl), 411-424. doi:10.1193/1.2098859
- [4] Sarvari, S., & Esfahani, M. R. (2020). An experimental study on post-punching behavior of flat slabs. *Structures*, 27, 894-902. doi:https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.06.036
- [5] El-Shafiey, T. F., Atta, A. M., Hassan, A. & Elnasharty, M. (2022). Effect of opening shape, size and location on the punching shear behaviour of RC flat slabs. *Structures*, 44, 1138-1151. doi:https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.08.076

- [6] Panahi, S., & Zahrai, S. M. (2021). Performance of typical plan concrete buildings under progressive collapse. *Structures*, 31, 1163-1172. doi:<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.02.045>
- [7] Al-Bayati, A. F., Lau, T. L., & Clark, L. A. (2022). Edge punching shear of waffle slabs subjected to moment parallel to the slab's free edge. *Magazine of Concrete Research*, 0(0), 1-11. doi:10.1680/jmacr.21.00215
- [8] ACI-Committee. (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary*. USA: American Concrete Institute.
- [9] CEN. (2004.). *Eurocode 2. Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings*. Brussels, Belgium: CEN. EN.
- [10] ABNT Brazilian Association of Technical Standards. (2014). *NBR 6118: Design of concrete structures*. Rio de Janeiro: ABNT.
- [11] CEB. (1993). *CEB-FIB-model Code 1990: Design code*. London: Thomas Telford.
- [12] DIN German Institute for Standardization. (2001). *DIN 1045-1: Plain, reinforced and prestressed concrete structures – Part 1: Design and construction*. Berlin: DIN.
- [13] Bureau of National Building Regulations. (2020). *Iran's National Building Regulations-Part 9: Design and Construction of Reinforced Concrete Buildings: Road, Housing and Urban Development Research Center*. [In Persian]
- [14] Milligan, G. J., Polak, M. A., & Zurell, C. (2020). Finite element analysis of punching shear behaviour of concrete slabs supported on rectangular columns. *Engineering Structures*, 224, 111189. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111189>
- [15] Hassan Ibrahim, H., Omar, A. T., & Hodhod, O. A. (2022). Prediction of punching shear capacity of concrete slabs reinforced with additional middle-thickness rebar mesh. *Structures*, 45, 315-328. doi:<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.09.024>
- [16] Balomenos, G. P., Genikomsou, A. S., & Polak, M. A. (2018). Investigation of the effect of openings of interior reinforced concrete flat slabs. *Structural Concrete*, 19(6), 1672-1681.
- [17] Abdollahi, S. M., Tavana Amlashi, A., & Ranjbar, M. M. (2019). Analytical Study of Punching Shear Capacity in Reinforced Concrete Flat Slabs with Opening Strengthened with Steel Plates and Shear Stud. *Civil and Environmental Researches*, 1(5).doi:10.1680/mac.14.00042 [In Persian]
- [18] Genikomsou, A., & Polak, M. A. (2017). Effect of Openings on Punching Shear Strength of Reinforced Concrete Slabs—Finite Element Investigation. *ACI Structural Journal*, 114(5). doi:10.14359/51689871
- [19] Genikomsou, A., & Polak, M. A. (2017a). 3D finite element investigation of the compressive membrane action effect in reinforced concrete flat slabs. *Engineering Structures*, 136, 233-244. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.01.024>
- [20] Aguiar, A., Oliveira, D., Reis, L., & Nzambi, A. (2021). Punching shear strength of waffle flat slabs with opening adjacent to elongated columns. *Engineering Structures*, 243, 112641. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112641>
- [21] Anil, Ö., Kina, T., & Salmani, V. (2014). Effect of opening size and location on punching shear behaviour of two-way RC slabs. *Magazine of Concrete Research*, 66(18), 955-966. doi:10.1680/mac.14.00042
- [22] Franus, A., Jemioło, S., & Antoni, M. (2020). A slightly compressible hyperelastic material model implementation in ABAQUS. *Engineering Solid Mechanics*, 8, 365-380.
- [23] Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S., & Oñate, E. (1989). A plastic-damage model for concrete. *International Journal of Solids and Structures*, 25(3), 299-326. doi:[https://doi.org/10.1016/0020-7683\(89\)90050-4](https://doi.org/10.1016/0020-7683(89)90050-4)
- [24] Lee, J., & Fenves, G. L. (1998). Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures. *Journal of Engineering Mechanics*, 124(8), 892-900. doi:10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:8(892)
- [25] Wosatko, A., Winnicki, A., Polak, M. A., & Pamin, J. (2019). Role of dilatancy angle in plasticity-based models of concrete. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 19(4), 1268-1283. doi:<https://doi.org/10.1016/j.acme.2019.07.003>
- [26] Malm, R. (2009). Predicting shear type crack initiation and growth in concrete with non-linear finite element method. *Royal Institute of Technology (KTH)*.
- [27] Jankowiak, I., Kakol, W., & Madaj, A. (2005). Identification of a continuous composite beam numerical model, based on experimental tests.
- [28] Eivind Hognestad, N. W. H., & Douglas, M. (1955). Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength Design. *ACI Journal Proceedings*, 52(12). doi:10.14359/11609
- [29] Genikomsou, A., & Polak, M. A. (2015). Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged plasticity model in ABAQUS. *Engineering Structures*, 98, 38-48.
- [30] Tschegg, E. K., & Stanzl, S. E. (1991). Adhesive power measurements of bonds between old and new concrete. *Journal of Materials Science*, 26(19), 5189-5194. doi:10.1007/BF01143212
- [31] Oliveira, D. R. C., Regan, P. E., & Melo, G. S. S. A. (2004). Punching resistance of RC slabs with rectangular columns. *Magazine of Concrete Research*, 56(3), 123-138. doi:10.1680/mac.2004.56.3