

بررسی عددی رفتار سازه ای دالهای مجوف بتنی تحت بارگذاری چرخه ای گسترده و متمرکز

محمد کامران حبیب خانی^۱، اعطا حجت کاشانی^۲

چکیده

جرم یک سازه یکی از مهمترین عوامل تعیین کننده رفتار آن در برابر بارگذاری زلزله است. هرچه جرم سازه کمتر باشد، شتاب وارده به سازه در اثر زلزله نیروی افقی کمتری ایجاد خواهد نمود و سازه دچار آسیب کمتری در اثر زلزله خواهد شد. یکی از راههای کاهش جرم سازه ها، استفاده از سیستم دال مجوف بتنی برای طبقات سازه است. دالهای مجوف از ترکیب میلگرد، بتن و قالبهای پلی پروپیلن ساخته می شود و کاربرد آن در پی و سقف سازه ها می باشد. دال مجوف روش نوینی در استفاده از دال بتنی است که شامل شبکه حباب های پیش ساخته در کارخانه به همراه میلگردهای نگهدارنده سازه ای می باشد. مزیت این روش، حذف کردن بتنی است که کاربرد سازه ای ندارد و در میانه سقف قرار می گیرد و بنابراین، بار مرده ساختمان به مقدار قابل توجهی کاهش می یابد. استفاده از توپ های پلاستیکی تو خالی در میان دال موجب کاهش بیش از ۳۰ درصد از وزن کل دال خواهد شد. در این تحقیق، برای تعیین رفتار لرزه ای دالهای مجوف از شبیه سازی اجزای محدود استفاده شده است. برای شبیه سازی رفتار بتن از مدل پلاستیسیته آسیب دیده استفاده شد. در ابتدا، با استفاده از نتایج یک تحقیق آزمایشگاهی، صحت سنجی پیش بینی های مدلسازی انجام شده و تطابق مناسبی بین نتایج اندازه گیری شده در آزمایش و نتایج پیش بینی شده توسط مدل های اجزای محدود مشاهده گردید. در ادامه تاثیر شرایط تکیه گاهی و نوع بارگذاری بر رفتار این نوع از دالها تحت بارگذاری چرخه گسترده و متمرکز مورد بررسی قرار گرفت. برای مقایسه رفتار با دالهای معمولی، نمونه های مشابه از دال توپر نیز شبیه سازی و به صورت استاتیکی غیرخطی تحلیل گردید. نتایج حاصله نشان داد که دالهای مجوف می توانند به طور مناسب انتظارات سازه ای از دال را تحت بارگذاری رفت و برگشتی تامین نمایند. همچنین مشاهده شد که شرایط تکیه گاهی محیط دال تاثیر قابل توجهی بر رفتار آن دارد.

کلمات کلیدی: دال مجوف بتنی، شبیه سازی اجزای محدود، تحلیل استاتیکی غیرخطی، بارگذاری چرخه ای، رفتار لرزه ای

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد عمران-سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب
۲ استادیار گروه عمران-سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

۱- مقدمه

کاهش وزن سازه می تواند رفتار آن در برابر بار زلزله را به طور قابل توجهی ارتقا دهد. سیستمهای نوین سازه ای با هدف کاهش وزن سازه به سرعت در حال توسعه و پیشرفت می باشند. استفاده از فضاهای توخالی در دال بتنی یکی از این روشهاست که به طور موثری از وزن سازه می کاهد. مطالعات در زمینه سبک سازی و حذف بتن ناکارآمد از سال ۱۹۸۵ در دانشگاه های آلمان و مجموعه شرکت های گروه فناوری های کوبیاکس^۳ در سال ۱۹۹۷ پایه ریزی شده است.

سقف مجوف حبابی اولین بار به وسیله یک مهندس عمران به نام یورگن^۴ در کشور دانمارک ثبت گردیده است. پس از اجرای موفقیت آمیز یک پروژه در دهه ۹۰ در آلمان و اخذ تاییدیه های بین المللی، تکنولوژی دال حبابی^۵ الگوی سایر سیستم های مشابه قرار گرفت. این سیستم دارای میلگردهای سازه ای به عنوان نگهدارنده توپ های پلاستیکی پرکننده می باشد و آرماتورگذاری شبکه پایین و بالا در سقف حذف گردیده است. اندازه توپ ها و ضخامت سقف به طول دهانه و شرایط پروژه بستگی دارد (شکل ۱).

طبق تحقیقات انجام شده توسط محققین پیشین، دال مجوف حبابی با ۳۰ درصد وزن کمتر، ۹۰ درصد مقاومت دال معمولی را دارا است. تلفیق توپ های پلاستیکی قابل بازیافت با بتن، قابلیت افزایش فاصله بین ستون ها را موجب می گردد و پیامدهای بسیار مفیدی در ساخت ساختمان های مسکونی، ساختمان های تجاری، ساختمان های اداری و پارکینگ ها دارد. این نوع از دال، روش نوینی برای استفاده از دال بتنی است که شامل شبکه حباب های پیش ساخته در کارخانه به همراه میلگردهای نگهدارنده می باشد و همچنین با حذف کردن بتنی که کاربرد ساختاری ندارد و در میانه سقف قرار می گیرد، بار مرده ساختمان را کاهش می دهد [۱].

از نقطه نظر زیست محیطی، با صرفه جویی ۵۰ درصدی مصالح، این سیستم دال موجب فواید بسیار زیادی برای محیط زیست می شود. این سازه با کاهش مصرف مصالح نسبت به دال توپر، از قبیل سیمان، شن و ماسه، آب و میلگرد (هر یک کیلوگرم پلاستیک جایگزین ۱۰۰ کیلوگرم بتن می شود) همراه است که این موضوع خود باعث کاهش مصرف انرژی (در تولید، حمل و نقل و اجرا) و کاهش انتشار گازهای آلوده حاصل از تولید و حمل و نقل، به خصوص گاز دی اکسید کربن در حدود ۵۰٪ می شود. اجرای این نوع دال قابل بازیافت بوده و در هنگام تخریب می توان اجزا را تفکیک نموده و از تولید ضایعات جلوگیری کرد [۱].

³ Cobiax

⁴ Breuning Jorgen

⁵ Bubble Deck

از لحاظ اقتصادی کاهش هزینه و صرفه جویی در مصرف مصالح در اجرای دال، ستون و پی به میزان ۵۰٪ و کاهش هزینه های حمل و نقل را در پی دارد. مدول دال مجوف حباب دار با میلگرد نگهدارنده باعث جلوگیری از نصب شبکه های آرماتور در محل کارگاه، کاهش زمان (در حدود ۲۰ تا ۴۰٪) و ساده تر شدن مراحل نصب و اجرا می شود. در نهایت از نظر اقتصادی در حدود ۱۵٪ در هزینه ساخت کل اسکلت سازه صرفه جویی می شود و افزایش عمر مفید سازه را در پی دارد [۱].

برخلاف سقف های تو خالی یک طرفه، گوی های سقف مجوف حبابی به صورت گسسته می باشند. بنابراین وجود گوی ها، تاثیر کمی بر کاهش سختی دال می گذارد. نتایج آزمایشگاهی که در دانمارک، آلمان و هلند انجام شده است، نشان می دهد که وجود گوی ها سختی خمشی دال را به میزان ۷ تا ۱۳ درصد دال توپر هم ضخامت با آن کاهش می دهد. در تحلیل سازه، این کاهش سختی به صورت ضریب کاهش سختی بیان می گردد. از لحاظ تئوری، این ضریب نسبت ممان سطح دوم سه بعدی دال مجوف حبابی به دال توپر است که محاسبه ی آن بر اساس مقطع ترک نخورده انجام می شود. لازم به ذکر است که علیرغم کاهش سختی دال مجوف حبابی در قیاس با دال توپر هم ضخامت با آن، با توجه به کاهش ۳۵ درصدی وزن دال، منجر به کاهش خیز سقف می گردد. در اطراف ستونها و مکانهایی که برش حاکم باشد، گویها حذف می شوند (شکل ۲).



شکل ۱: اجرای دال بتنی مجوف حباب دار با گویهای کروی پلاستیکی



شکل ۲: استفاده از دال توپر در کنار ستونها و دال بتنی مجوف حباب دار با گویهای بیضوی پلاستیکی بعد از این ناحیه

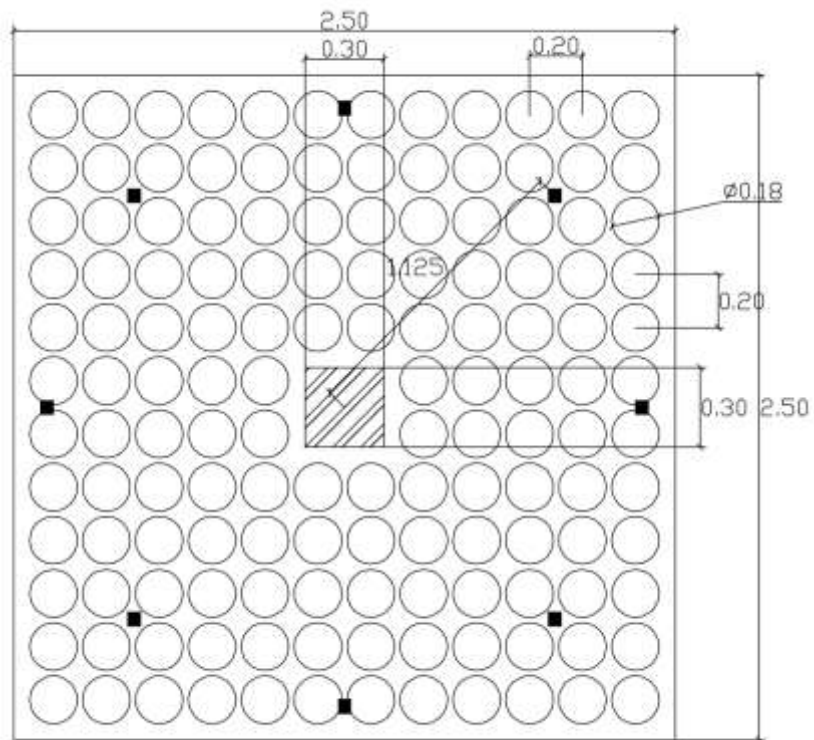
به صورت کلی مقاومت برشی المان های بتنی توپر بدون آرماتور برشی از سه ساز و کار زیر تشکیل می شود :

- ۱- مقاومت برشی مقطع ترک نخورده ناحیه بلوک فشاری
- ۲- مقاومت برشی ناشی از اثر قفل و بست دانه ها در طول ترک
- ۳- مقاومت برشی ناشی از آرماتورهای کششی

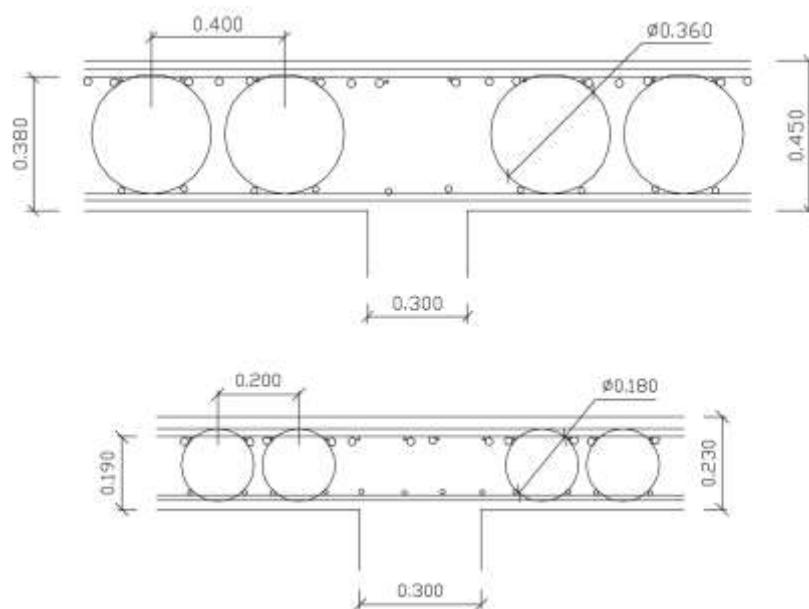
در مورد سقف مجوف حبابی، ظرفیت برشی ناشی از قفل و بست دانه ها به دلیل وجود گوی های تو خالی کاهش می یابد. بنابراین کاهش مقاومت برشی در این دال ها باید در نظر گرفته شود. در این حالت مقاومت برشی ناحیه بلوک فشاری و آرماتورهای کششی ثابت می ماند. سهم منطقی هر یک از ساز و کار های مورد اشاره در تعیین ظرفیت برشی مشخص نیست و در مطالعات پژوهشی، نسبت های مختلفی ارائه شده است. در یک فرض محافظه کارانه برای محاسبه ی نسبت ظرفیت برشی دال مجوف حبابی به دال توپر، تمامی ظرفیت برشی بر اثر قفل و بست دانه ها اختصاص داده می شود.

۲- تحقیقات انجام شده در خصوص سیستم دال مجوف

اشنلنباخ و همکاران در سال ۲۰۰۲ [۲] رفتار پانچ دالهای یکطرفه مجوف را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق در ابتدا آزمایش بر روی نمونه دال مجوف انجام شد و سپس از روش اجزای محدود برای شبیه سازی و بررسی بیشتر رفتار این نوع از دالها استفاده شد. مشخصات هندسی نمونه آزمایشگاهی در شکل ۳ و ۴ قابل مشاهده است.



شکل ۳: مشخصات هندسی نمونه آزمایشگاهی مورد بررسی توسط اشنلنباخ و پفر [۲]



شکل ۴: سطح مقطع نمونه های آزمایشگاهی

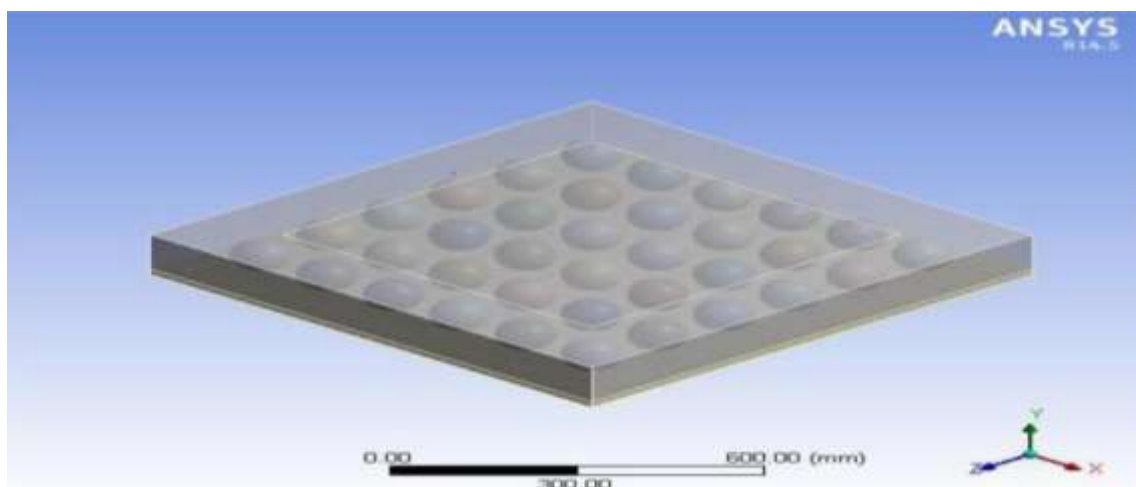
دو نوع نمونه با ضخامت های ۳۸ و ۱۹ سانتی متری مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۵ نحوه تشکیل ترک در دال مجوف قابل مشاهده است.



شکل ۵: ترک خوردگی در نمونه آزمایشگاهی مورد بررسی توسط اشکنباخ و پففر [۲]

در سال ۲۰۱۵ شتکار و ناگش [۳] دالهای مجوف با گویهای بیضوی را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق، نمونه ها تحت بارگذاری پانچ در وسط دال قرار گرفتند. مشاهده شد که با میزان یکسان بتن استفاده شده، ظرفیت خمشی و سختی دال مجوف نسبت به دال توپر حدود ۷۰ درصد افزایش یافته است.

سورندار و رانجیتام در سال ۲۰۱۶ [۴] رفتار دالهای مجوف حبابی را به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار دادند. برای انجام این تحقیق از نرم افزار اجزای محدود ANSYS استفاده گردید. مدل اجزای محدود ساخته شده در شکل ۶ قابل مشاهده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد رفتار دال مجوف حبابدار از رفتار دال بتنی توپر مشابه مطلوبتر بوده است.



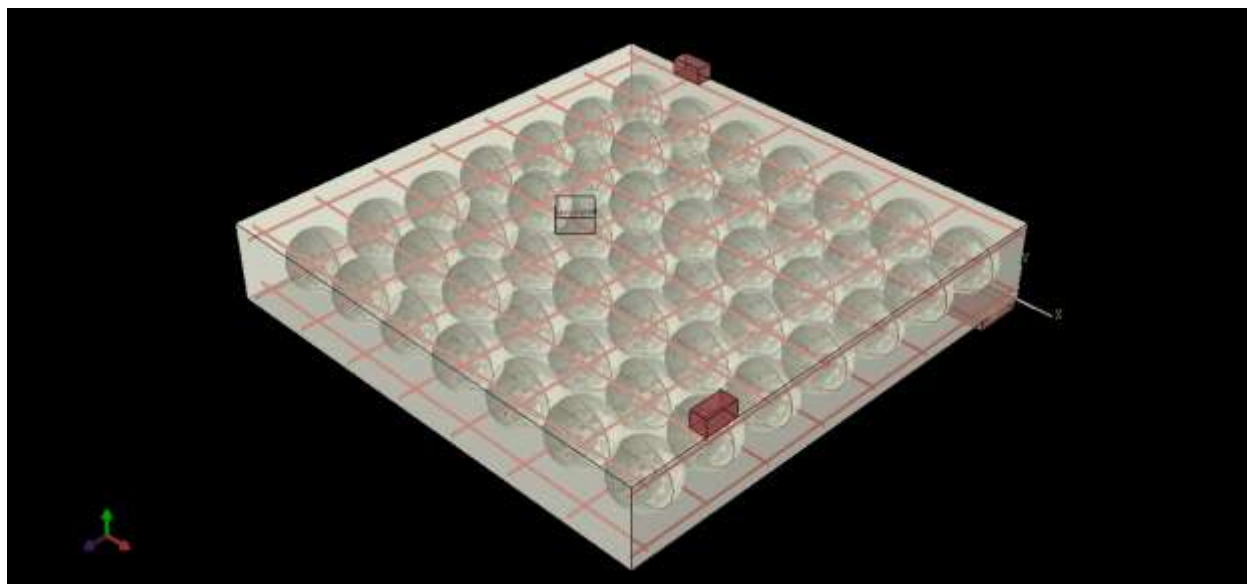
شکل ۶: مدل اجزای محدود دال مجوف حبابدار [۴]

۳- شبیه سازی اجزای محدود دال مجوف

همامطور که قبلاً گفته شد برای انجام تحقیق از روش اجزای محدود استفاده خواهد شد. نرم افزار اجزای محدود اباکوس^۶ برای ساخت و تحلیل مدل ها استفاده می شود. برای اطمینان از دقت و صحت پیش بینی مدل های ساخته شده توسط نرم افزار ذکر شده، از نتایج یک تحقیق آزمایشگاهی استفاده خواهد شد. مدل های مشابه نمونه آزمایش شده با ابعاد هندسی و مشخصات مصالح کاملاً یکسان ساخته شده و تحت بارگذاری مشابه آزمایش مدل تحلیل می گردد و نتایج آزمایش با پیش بینی های حاصل از تحلیل مدل ها مقایسه می شود و در صورت انطباق، می توان به نتایج حاصل از مدل سازی اجزای محدود اعتماد نمود.

۳-۱- صحت سنجی مدل

آزمایشی که در این تحقیق برای انجام صحت سنجی مورد استفاده قرار گرفته آزمایش انجام شده توسط Schnellenbach-Held در سال ۲۰۰۲ است [2]. مدل اجزای محدود دقیقاً با مشخصات ذکر شده در آزمایش ساخته شده است. به دلیل وجود تقارن و برای کاهش حجم تحلیل، $\frac{1}{4}$ از نمونه آزمایشگاهی مدلسازی شده است. برای شبیه سازی رفتار بتن از مدل پلاستیسیته آسیب دیده^۷ استفاده شده است. به دلیل هندسه پیچیده دال به دلیل وجود گویهای کروی در داخل آن، بتن با استفاده از المانهای سه بعدی چهار گرهی و آرماتورها با استفاده از المانهای میله ای شبیه سازی شده اند. آرماتورها در داخل بتن مدفون شده اند. مدل هندسی نمونه آزمایشگاهی در نرم افزار ساخته شده است. در شکل ۷ این مدل قابل مشاهده است. مقاومت بتن ۴۰ مگاپاسکال است. قطر گویها ۱۸ سانتی متر است و فاصله مرکز به مرکز آنها ۲۰ سانتی متر می باشد.

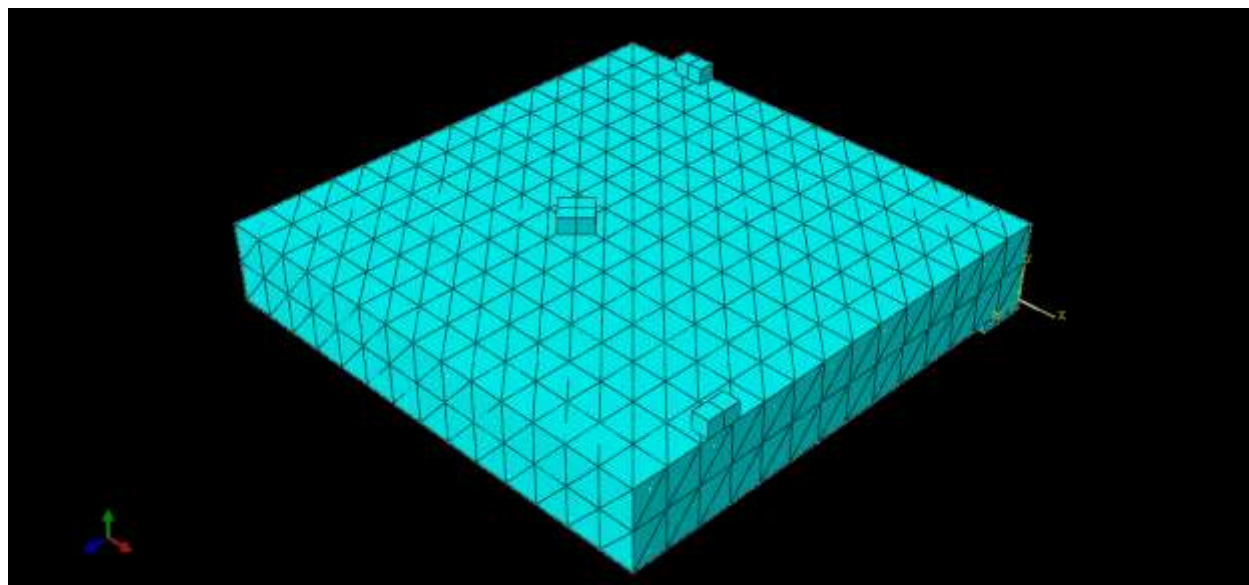


شکل ۷: مدل اجزای محدود دال بتنی مجوف

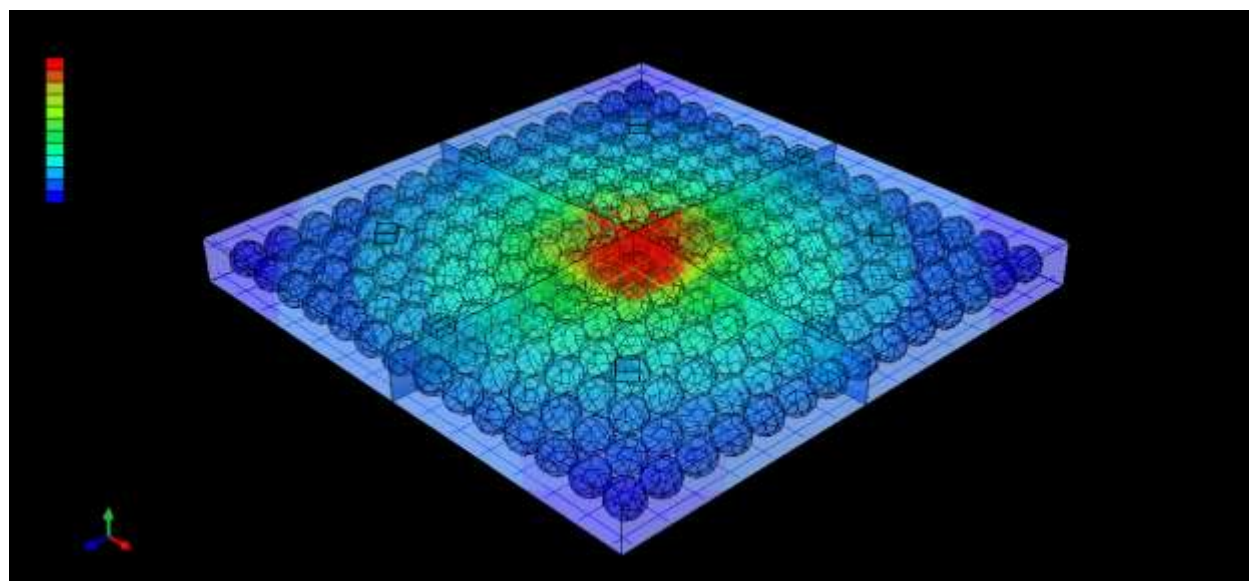
^۶ Abaqus

^۷ Concrete damaged plasticity

مش بندی مدل در شکل ۸ قابل مشاهده است. تحلیل استاتیکی غیرخطی انجام با بارگذاری مشابه آزمایش انجام شده است. نمونه نتایج مدل در شکل ۹ نشان داده شده است.

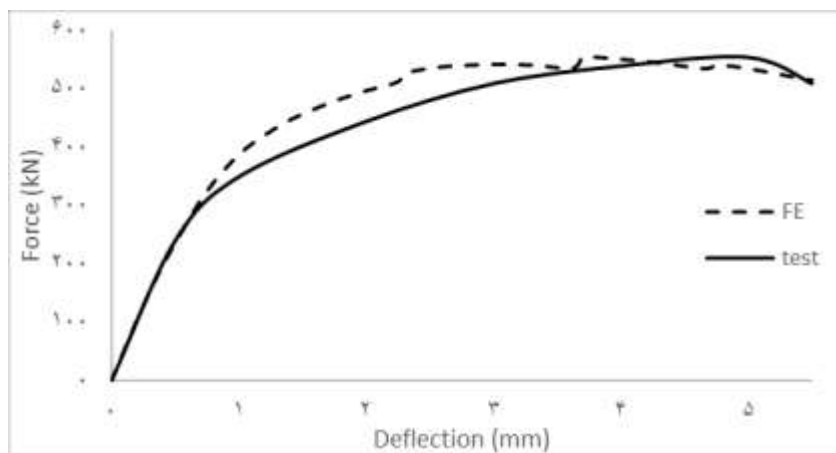


شکل ۸: مش بندی مدل اجزای محدود دال بتنی مجوف



شکل ۹: کانتور تغییرمکان عمودی در مدل اجزای محدود دال بتنی مجوف

در شکل ۱۰ نمودار نیرو-تغییرمکان حاصل از آزمایش با نمودار نیرو-تغییرمکان بدست آمده از روش اجزای محدود با هم مقایسه شده است.



شکل ۱۰: مقایسه نمودار نیرو-خیز مربوط به آزمایش و مدل سازی عددی

همانطور که ملاحظه می شود، دو نمودار در قسمت خطی اولیه انطباق کامل دارند. در بخش غیرخطی منحنی دو نمودار تا حدودی از هم فاصله می گیرند که بیشترین میزان این فاصله حدود ۸٪ است. دلیل این تفاوت را می توان به ساده سازی های استفاده شده در مدل اجزای محدود مانند منحنی های رفتاری مواد، تکیه گاهها، اندرکنش ها و بارگذاری و نیز خطاهای دستگاهی و انسانی در آزمایشگاه مربوط دانست. در قسمت انتهایی منحنی ها بر هم منطبق هستند. با توجه به انطباق مناسب منحنی ها و تفاوت کمتر از ۱۰٪ بین آنها مدل های اجزای محدود دال دارای دقت مناسبی در پیش بینی رفتار واقعی دال هستند و می توان به نتایج حاصل از شبیه سازی اعتماد نمود.

۳-۲- بررسی تاثیر نوع تکیه گاه و بارگذاری

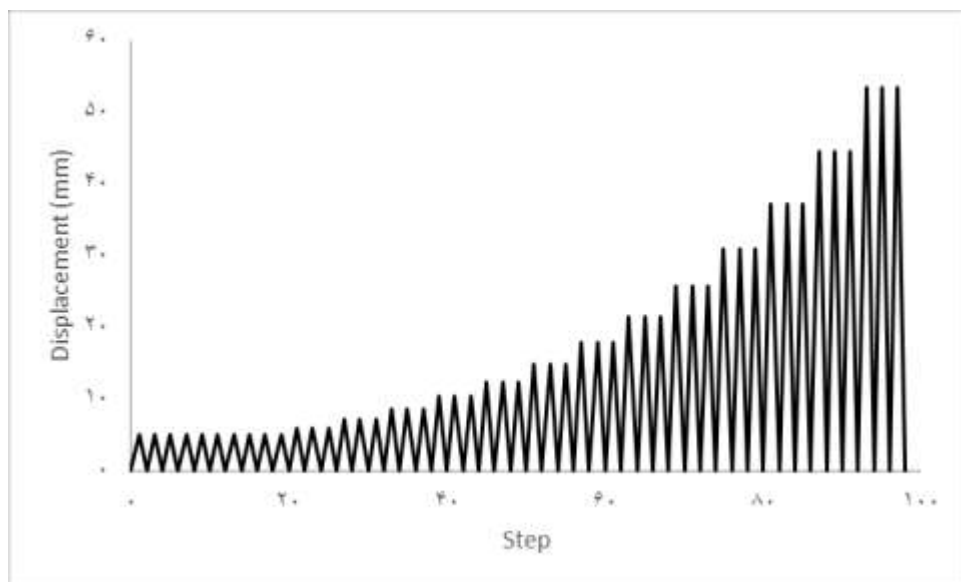
پس از اطمینان از دقت مدل سازی، به بررسی تاثیر پارامترهای موردنظر بر رفتار دال های توخالی پرداخته می شود. این پارامترها عبارتند از:

- نوع بارگذاری
- مجوف یا توپر بودن

دال درنظر گرفته شده دارای ابعاد ۴ متر در ۴ متر بوده است و ضخامت آن ۲۵ سانتی متر می باشد. مقاومت فشاری بتن برابر ۳۰ مگاپاسکال و تنش تسلیم و نهایی آرماتورها به ترتیب ۲۴۰ و ۳۶۰ مگاپاسکال درنظر گرفته شده است. گوی گذاری در فاصله ۶۰ سانتی متری از بر دال آغاز شده است. دال بر روی ۴ ستون با ابعاد ۴۰ در ۴۰ سانتی متر تکیه دارد. این ستونها به عنوان تکیه گاه دال عمل خواهد نمود. در محل تیرها از آرماتورهای با قطر ۱۶ میلیمتر و خاموتهای با قطر ۱۰ میلیمتر در فاصله ۱۰ سانتی متری استفاده شده و در سایر قسمت های دال آرماتور با قطر ۱۲ میلیمتر به فاصله ۲۰ سانتی متر استفاده شده است.

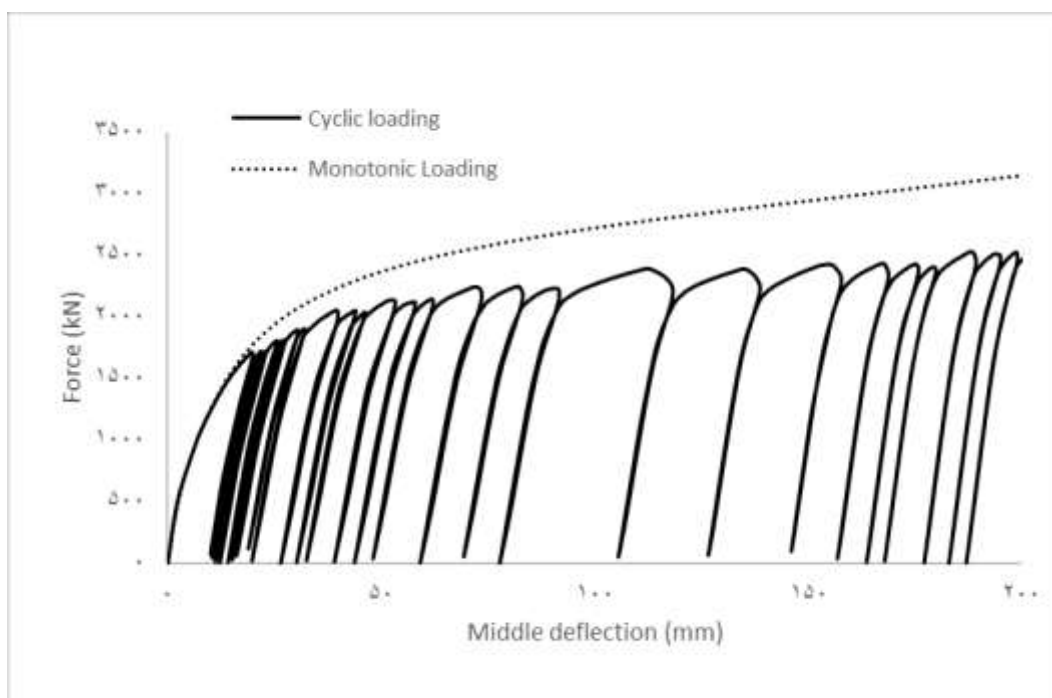
۳-۲-۱- تاثیر بارگذاری بر رفتار دال مجوف

برای انجام بارگذاری چرخه ای از آیین نامه FEMA461 [۵] استفاده شده است. در ابتدا نقطه تسلیم با انجام تحلیل بارافزون پیدا شده و در ادامه بارگذاری سیکلی به صورت شکل ۱۱ به نمونه اعمال می شود. با توجه به اینکه بارگذاری تنها به صورت فشاری به دال وارد می شود، بارگذاری سیکلی به صورت اعمال بار فشاری و باربرداری انجام خواهد شد.

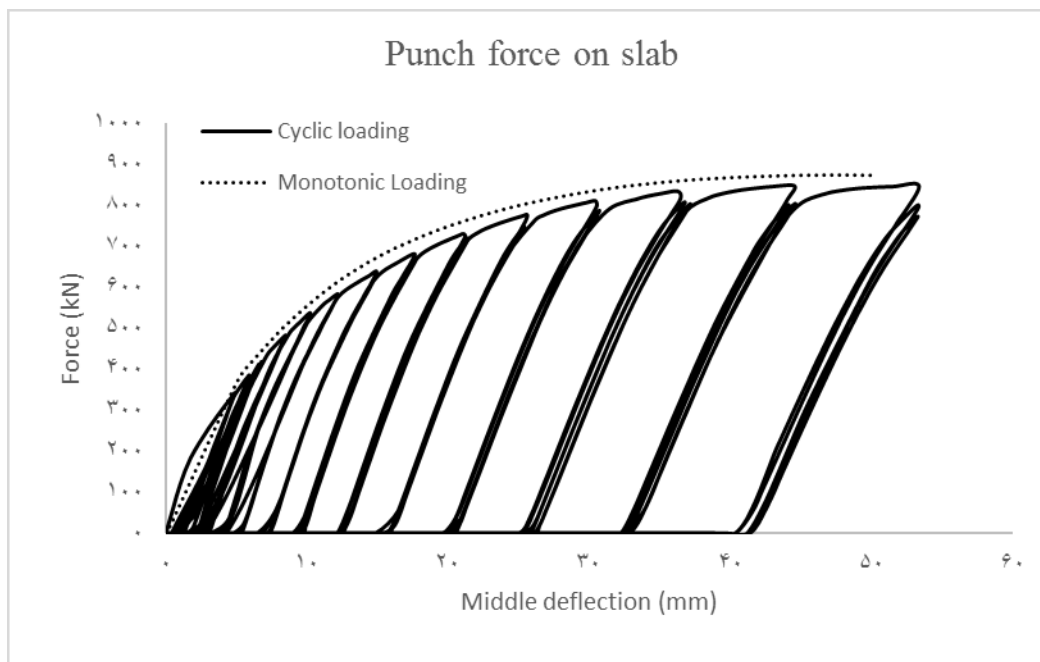


شکل ۱۱: بارگذاری و باربرداری فشاری گسترده وارده به مدل دال مجوف

در شکل ۱۲ رفتار دال مجوف تحت بارگذاری بارافزون و نیز بارگذاری و باربرداری گسترده (چرخه ای) قابل مشاهده است. در شکل ۱۳ رفتار این دال تحت بارگذاری متمرکز (پانچ) که در مربعی به ابعاد ۲۰ در ۲۰ سانتیمتر به وسط دال وارد شده است ارزیابی گردیده است.

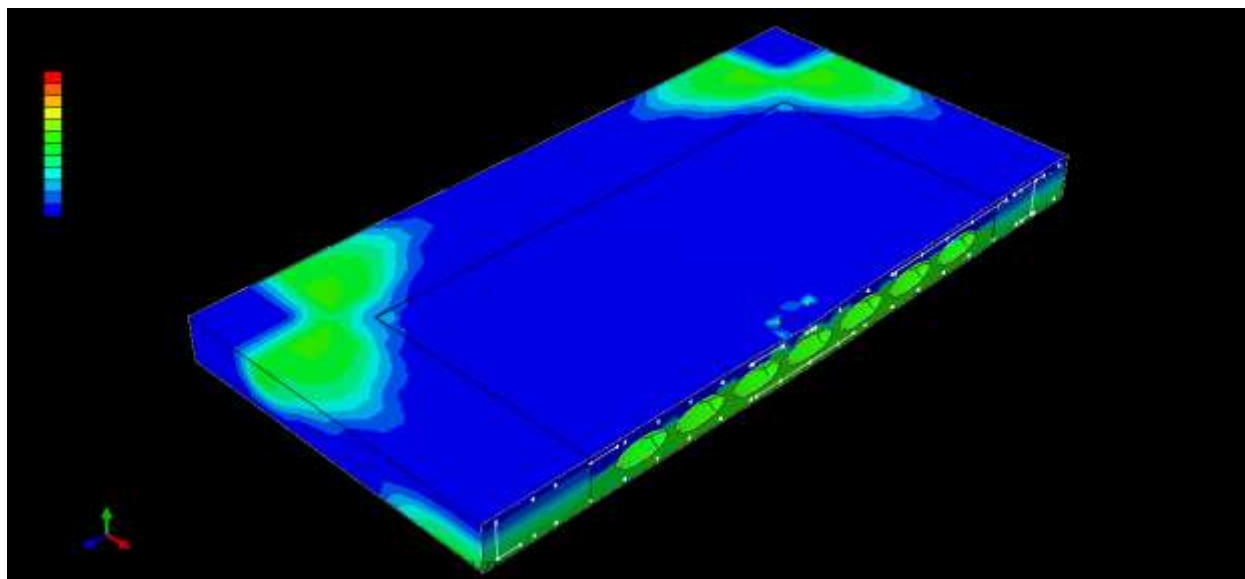


شکل ۱۲: نمودار نیرو-خیز در بارگذاری و باربرداری فشاری گسترده وارده به مدل دال مجوف

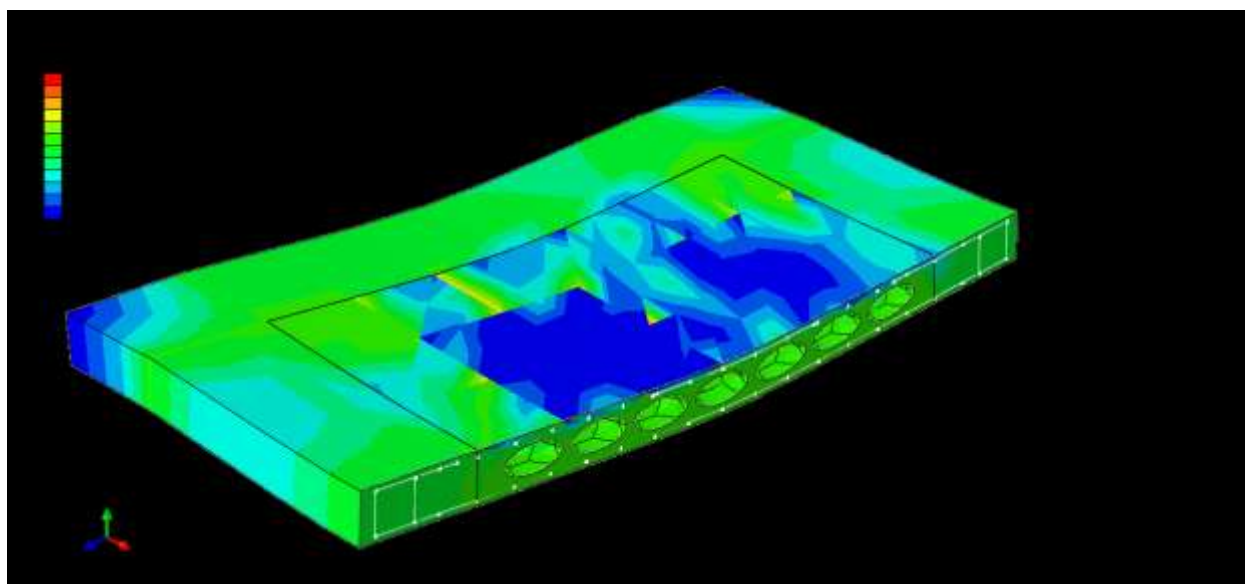


شکل ۱۳: نمودار نیرو-خیز در بارگذاری و باربرداری فشاری متمرکز (پانچ) وارده به مدل دال مجوف

در شکل ۱۴ و ۱۵ کانتور آسیب کششی در بتن تحت بارگذاری برش پانچ و بارگذاری فشاری گسترده قابل مشاهده است.



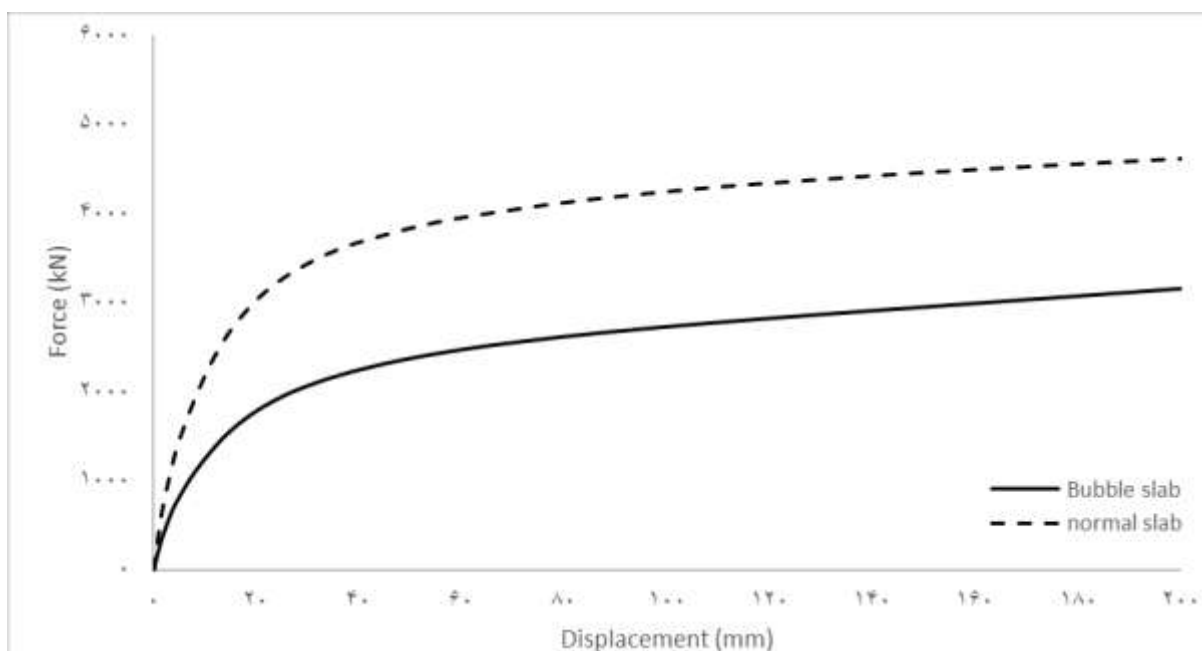
شکل ۱۴: کانتور آسیب کششی در دال تحت بارگذاری و باربرداری برش پانچ در وسط دال (برای دیده شدن داخل دال نیمی از آن نمایش داده شده است)



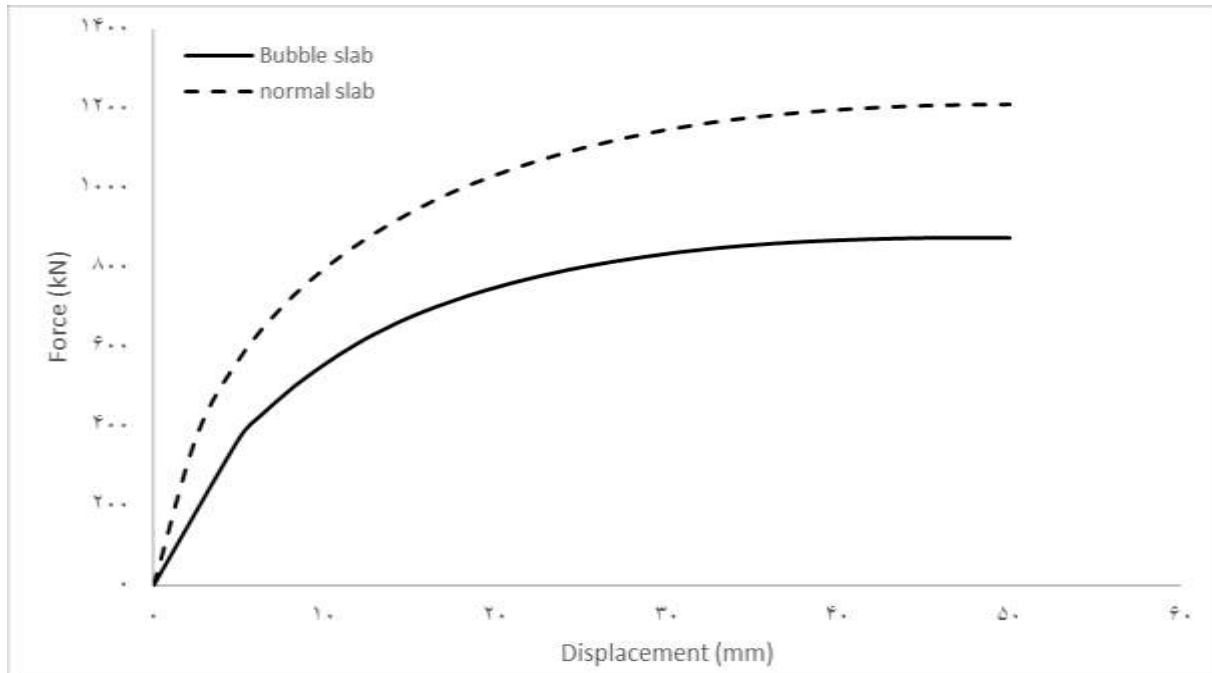
شکل ۱۵: کانتور آسیب کششی در دال تحت بارگذاری و باربرداری فشاری گسترده در وسط دال (برای دیده شدن داخل دال نیمی از آن نمایش داده شده است)

همانطور که مشاهده می شود در حالت بار فشاری چرخه ای گسترده، آسیب کششی در بتن دال در سطح بسیار وسیعتری نسبت به حالت برش پانچ چرخه ای گسترده شده و تقریباً تمامی سطح دال را در بر گرفته است.

در گام بعد رفتار دال مجوف و دال توپر تحت بار گسترده فشاری و بار برش پانچ در وسط دال با هم مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می شود، به دلیل توخالی شدن دال، مقاومت و سختی آن دچار کاهش شده است. میزان کاهش مقاومت در برابر بار فشاری گسترده برابر ۳۲٪ و تحت برش پانچ برابر ۲۷٪ بوده است. میزان سختی دال در حالت برش پانچ در وسط دال به دلیل مجوف شدن دال ۵۰٪ کاهش یافته است. میزان کاهش سختی در بار گسترده فشاری برابر ۲۱٪ بوده است.



شکل ۱۶: پوش منحنی نیرو- تغییرمکان در بارگذاری گسترده فشاری برای مدل دال مجوف و دال توپر با ضخامت یکسان



شکل ۱۷: پوش منحنی نیرو- تغییرمکان در بارگذاری برش پانچ برای مدل دال مجوف و دال توپر با ضخامت یکسان

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق رفتار دالهای مجوف حبابدار با استفاده از روش شبیه سازی اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفته است. برای انجام مقایسه، دال توپر با ضخامت یکسان نیز شبیه سازی و تحلیل شده است. نتایج حاصل از تحقیق را می توان به صورت زیر خلاصه نمود.

- با انجام صحت سنجی مشخص گردید که روش اجزای محدود توانایی پیش بینی دقیق رفتار دال بتنی مجوف را داشته و می توان به نتایج حاصل از مدلسازی اعتماد نمود.
- در حالت بارگذاری و باربرداری فشاری گسترده، آسیب کششی در بتن دال در سطح بسیار وسیعتری نسبت به حالت برش پانچ چرخه ای گسترده شده و تقریباً تمامی سطح دال را در بر گرفته است.
- به دلیل توخالی شدن دال مجوف در مقایسه با دال توپر با ضخامت یکسان، مقاومت و سختی آن هم در برابر بار گسترده فشاری و هم در برابر بارگذاری برش پانچ دچار کاهش شده است.
- در مقایسه دال مجوف و دال توپر تحت بارگذاری و باربرداری چرخه ای، میزان کاهش مقاومت در برابر بار فشاری گسترده برابر ۳۲٪ و تحت برش پانچ برابر ۲۷٪ بوده است.
- میزان سختی دال در حالت برش پانچ در وسط دال به دلیل مجوف شدن دال ۵۰٪ کاهش یافته است. میزان کاهش سختی در بار گسترده فشاری برابر ۲۱٪ بوده است.

- با در نظر گرفتن کاهش وزن و کاهش بتن مصرفی در دال مجوف نسبت به دال توپر، دال مجوف توانسته به خوبی بارگذاری وارده به صورت چرخه ای را تحمل نموده و بدون بروز خرابی در آن پایداری خود را حفظ نماید.

۵- منابع

[۱]. مقایسه شیوه های اجرایی دال مجوف در پروژه های ساختمانی با استفاده از روش تصمیم گیری چند معیاره (AHP)، شرکت بناسازان فرنام، [/https://www.bubbledeck-ir.com](https://www.bubbledeck-ir.com)

[2]. Martina Schnellenbach-Held, Karsten Pfeffer, Punching behavior of biaxial hollow slabs, Cement & Concrete Composites 24 (2002) 551–556.

[3]. Arati Shetkar, Nagesh Hancha, An experimental study on bubble deck slab system with elliptical balls, Proceeding of NCRIET-2015 & Indian J.Sci.Res. 12(1):021-027, 2015.

[4]. M.Surendar, M.Ranjitham, Numerical and Experimental Study on Bubble Deck Slab, IJESC Journal, Volume 6 Issue No. 5, 2016.

[5]. FEMA 461, Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components, 2012

[6]. Amer M. Ibrahim, Nazar K. Ali, Wissam D. Salman, “Flexural capacities of reinforced concrete two-way bubble deck slabs of plastic spherical voids”, Diyala Journal of Engineering Sciences, ISSN 1999-8716, Vol. 06, No. 02, June 2013.

[7]. Paul Harding, “Bubble Deck –Advanced Structure engineering”, new construction technology, Cornerstone 30, 2004.

[8]. Churakov A.G., “Biaxial hollow slab with innovative types of voids”, Construction of Unique Buildings and Structures, ISSN 2304-6295.No.6 (21). 2014.