

بهینه‌یابی اندازه حفره‌های دال بتن مسلح مجوف از طریق شبیه‌سازی عددی با کمینه کردن دو مشخصه خیز و میزان بتن مصرفی زیر بارگذاری انفجاری

علی ابراهیم‌زاده^۱، صفا پیمان^{*۲}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۲- استادیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

(دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۰۳، پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۱)

چکیده

با توجه به کاربرد گسترده دال‌های بتن مسلح در سازه‌ها، مقاله حاضر به بررسی اثر موج انفجار روی دال بتنی مجوف پرداخته است. از آنجایی که انجام آزمایش‌های تجربی انفجاری، پرهزینه و زمان‌بر بوده و همچنین استخراج همه پارامترها در این روش غیرممکن است؛ بنابراین این پژوهش به روش عددی با نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس انجام گرفته است. در این پژوهش یک دال بتنی مجوف با قطر حفره‌های متفاوت در برابر پنج مقدار متفاوت جرم خرج تی‌ان‌تی مورد بررسی قرار گرفته است. اعتبارسنجی مدل نیز با استفاده از نتایج آزمایش‌های تجربی موجود در مقالات معتبر انجام شده است. پارامترهای مورد بررسی میزان خیز و میزان آسیب دال بتنی مجوف و پارامترهای متغیر قطر حفره‌های کروی درون دال و جرم خرج است. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که با افزایش جرم خرج خیزی که توسط نمونه‌ها تجربه شده است افزایش می‌یابد. از نظر عملکرد سازه‌ای تأثیر اندازه حفره‌ها بر خیز دال تقریباً مستقل از جرم خرج است، اما در ارزیابی‌های دقیق آن را هم باید به‌عنوان یک پارامتر متغیر در نظر گرفت. با توجه به اینکه بهترین جاذب انرژی انفجار هوا است، در همه نمونه‌ها وجود حفره موجب کاهش خیز دال در برابر موج انفجار شده و در نمونه‌ای که نسبت قطر حفره‌ها به ضخامت دال برابر $0/3$ است شاهد کمترین خیز در وسط دال خواهیم بود. همچنین نتایج نشان داد که آسیب در دال بتنی معمولی نسبت به دال بتنی مجوف جدی‌تر است.

کلیدواژه‌ها: دال بتن مسلح مجوف کروی، خیز دال، آسیب بتن، بارگذاری انفجاری، روش اجزاء محدود، بتن غیر مؤثر، نرم‌افزار آباکوس

Optimization of Pore Size of Hollow Reinforced Concrete Slabs by Numerical Simulation through Minimizing the Two Characteristics of Deflection and the Amount of Used Concrete Under Blast Loading

A. Ebrahimzade¹, S. Peyman^{*2}

Assistant Professor Imam Hossein University, Tehran, Iran

(Received: 21/10/2020; Accepted: 31/12/2021)

Abstract

Considering the widespread use of reinforced concrete slabs in many structures, the present study intends to investigate the impact of blast loads on hollow-core slabs. The paper discusses the numerical analysis carried out using the finite element software Abaqus, since experimental research would be costly, time-consuming and limited. The investigation focuses on a hollow-core slab with dissimilar hole diameters dealing with five different amounts of TNT charge mass. The results indicate that with charge mass having increased, the deflection experienced by the samples goes up as well. In terms of structural performance, the effect of pore size on slab deflection is nearly independent of the charge mass, nonetheless it should also be assessed as a variable parameter when making a precise evaluation. Considering the fact that air explosion is the most efficient energy absorbing, practically in all samples, the presence of holes would make reduced the slab deflection in buildings undergoing blast loading. Moreover, the study concludes that by comparison with a hollow-core slab, the damage on conventional slab could be more severe.

Keywords: Spherical Hollow Reinforced Concrete Slab, Slab Deflection, Concrete Damage, Explosive Loading, Finite Element Method, Inefficient Concrete, Abaqus Software

*Corresponding Author E-mail: speyman@ihu.ac.ir

۱. مقدمه

کاهش تعداد ستون‌ها، امکان ستون‌گذاری نامنظم، امکان ایجاد بازشوهای بزرگ و نامنظم در دال به دلیل عدم وجود تیر، عایق صدا و حرارت و بازیافت زباله‌های پلاستیکی در فرایند تولید قالب‌های کرووی از دیگر مزایای این نوع دال به شمار می‌آید [۴].

با توجه به اینکه هوا بهترین جاذب انرژی است، به نظر می‌رسد، عملکرد دال‌های بتنی مجوف در برابر انفجار بهتر از عملکرد دال‌های بتنی معمولی باشد. در سال‌های اخیر رفتار دال‌های بتنی معمولی در برابر بارهای انفجاری توسط پژوهشگران زیادی بررسی شده است. لائو [۵] برای تحلیل مدل شکست دال بتن مسلح یک طرفه خمشی در برابر موج انفجار، دو سیستم تک درجه آزادی متصل به هم را بکار برد. نتایج نشان داد که مد شکست از نوع شکست مستقیم است. جانز [۶] برای شبیه‌سازی پاسخ دینامیکی دال بتن مسلح تحت بار انفجار یک برنامه المان محدود نوشت و بارگذاری و جابه‌جایی دال را در طول انفجار ارائه نمود.

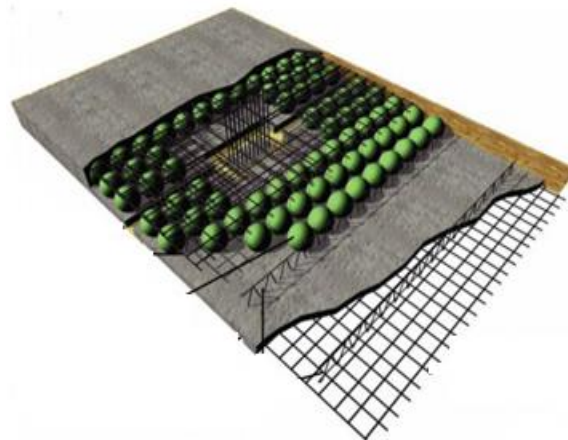
ویو [۷] جهت دست‌یابی به الگوهای خرد شدن بتن در برابر بار انفجار یک سری مطالعات آزمایشگاهی انجام داد. سیلوا [۸] جهت اندازه‌گیری سطح آسیب دال بتن در مقابل بار انفجار یک روش آزمایشگاهی به صورت گام‌به‌گام ارائه نمود. اسپنکر [۹] پاسخ دینامیکی دال بتنی معمولی و تقویت‌شده را در برابر بار انفجار به دو شیوه آزمایشگاهی و عددی بررسی نمود. ژئو [۱۰] با مدل‌سازی دال بتن در محیط نرم‌افزار، آن را تحت بار انفجار مورد بررسی قرار داد. ونگ [۱۱، ۱۲] نیز مدهای آسیب دال بتن مسلح را تحت انفجار به صورت آزمایشگاهی و عددی تعیین نمود.

یکی از بهترین روش‌های کاهش بار مرده دال بتنی، حذف بتن غیر باربر وسط دال، از طریق ایجاد حفره‌های کرووی، بیضوی، مکعبی و یا منشوری است [۱۳].

اثر انفجار بر دال‌های بتنی مجوف کمتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. بیشتر کارهای انجام‌شده در این زمینه درباره اثر بارهای استاتیکی و دینامیکی بر دال‌های مجوف است. مازون [۱۴] مدهای آسیب و تغییر شکل دال مجوف بتن مسلح و بتن مسلح پیش‌تنیده را در مقابل بار انفجار به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی کرد. او یک ونیم کیلوگرم خرج C4 را در مقابل چهار مدل از دال بتن، در فواصل مختلف قرار داد. نتایج او نشان داد که ظهور ترک در بتن مسلح پیش‌تنیده با تأخیر بیشتری نسبت به بتن مسلح رخ می‌دهد. علاوه بر این، پیش‌تنیدگی با افزایش سختی و مقاومت دال بتن مجوف، خیز بیشینه و دوره تناوب سازه را کاهش می‌دهد. مازون [۱۵] در مطالعه دیگری پاسخ دینامیکی دال بتن مجوف را تحت بار انفجاری به صورت آزمایشگاهی و عددی به منظور تعیین بیشینه جابه‌جایی و الگوی پخش ترک در بتن، مورد بررسی قرار داد. اثر نرخ کرنش برای بتن و فولاد در این بررسی در نظر

دال بتن‌آرمه به یک عضو سازه‌ای اطلاق می‌شود که ضخامت آن در مقایسه با دو بعد دیگر آن کوچک بوده و برای انتقال بار در بام، کف ساختمان و پی، به کار می‌رود [۱]. به‌طور معمول دال تنها به منظور تحمل بارهای قائم طراحی می‌شود مگر اینکه جزئی از سیستم باربر جانبی سازه باشد. با افزایش طول دهانه دال توجه به تغییر شکل و ارتعاش آن از اهمیت زیادی برخوردار می‌شود. افزایش طول دهانه‌ها از نظر معماری جذابیت بسیاری ایجاد می‌کند ولی از نظر سازه‌ای افزایش ابعاد دهانه دال منجر به افزایش ضخامت دال و در نتیجه افزایش بار مرده می‌گردد که به نوبه خود سبب افزایش ابعاد ستون‌ها و ضخامت شالوده شده که این امر منجر به افزایش مصرف بتن و فولاد در سازه می‌شود. به منظور رفع این مشکل که ناشی از افزایش وزن دال است، سیستم دال مجوف، ابداع و مورد استفاده قرار گرفت [۲].

یکی از مؤثرترین روش‌های مورد استفاده برای کاهش وزن دال‌های بتن‌آرمه، مجوف‌سازی است. دال مجوف نوع مناسبی از دال است که با حذف بتن غیر مؤثر باعث کاهش بار مرده و در نتیجه باعث کاهش تغییر مکان و افزایش طول دهانه‌ها می‌شود. ظرفیت باربری دال بتنی مجوف، در یک ضخامت یکسان، با کاهش مقدار بتن مصرفی به اندازه ۶۵٪ دال معمولی، می‌تواند تا دو برابر دال معمولی افزایش یابد [۳]. شکل (۱) نمونه‌ای از یک دال بتنی مجوف را نشان می‌دهد. مجوف‌سازی در این نوع دال‌ها به وسیله قرار دادن قالب‌های کرووی در میان مقطع دال بتنی و به صورت ماندگار انجام‌شده که سبب کاهش مقدار بتن مصرفی در پروژه می‌گردد. از آنجایی که این قالب‌ها درون دال مدفون بوده و در حدفواصل ستون‌ها تیرهای میانی وجود ندارند، سطح زیرین دال به صورت مسطح است. با استفاده از این نوع دال می‌توان دهانه‌های بلند را بدون استفاده از فناوری ویژه‌ای مانند پیش‌تنیدگی اجرا نمود.



شکل ۱. ساختار درونی دال بتن‌آرمه مجوف کرووی [۴]

بارگذاری استاتیکی، تأثیر اندازه حفره را بر مقاومت و سختی دال در سی نمونه متفاوت، مورد بررسی قرار داد. او با حداقل کردن بیشینه تنش خمشی (معیار مقاومت) و همچنین حداقل کردن بیشینه جابه‌جایی (معیار سختی)، به‌عنوان معیارهای طراحی دال، به این نتیجه رسید که دال مجوفی که دارای حفره‌های با قطر ۰/۶ ضخامت دال است، دارای کمترین میزان تنش خمشی و کمترین میزان جابه‌جایی تحت بار استاتیکی می‌باشد؛ که این امر نشان‌دهنده عملکرد بهتر این نمونه نسبت به سایر نمونه‌ها است. فریدون امیدی نسب [۲۰] کاربرد ضد انفجاری بتن توانمند الیافی در جهت حفاظت از اجزای سازه به‌صورت خاص دال بتنی را به‌صورت عددی مورد بررسی قرار داد. نتایج او نشان داد که مقاوم‌سازی در ناحیه کششی تا میزان ۷ برابر جذب انرژی را نسبت به سایر روش‌های مطرح‌شده جهت مقاوم‌سازی، افزایش می‌دهد. استفاده از بتن توانمند الیافی تأثیر بسزایی در افزایش میزان ظرفیت باربری، شکل‌پذیری دال یک‌طرفه دارد. به‌عبارت دیگر، استفاده از بتن توانمند الیافی به‌عنوان یک روش در مقاوم‌سازی اجرای سازه‌ای از جمله دال‌ها، در بهبود رفتار سازه‌های دال‌های یک‌طرفه بخصوص در زمینه پدافند غیرعامل مؤثر خواهد بود. استفاده از ورقه‌های بتن توانمند الیافی به‌صورت هم‌زمان در تمامی نواحی دال موجب افزایش چشم‌گیر سختی آن و کاهش خیز نمونه در برابر بار انفجار شد.

سید نوید میرهاشمی [۲۱] برای به‌دست آوردن تغییر مکان دال‌ها، رفتار یک دال بتن مسلح یک‌طرفه در چهار حالت تقویت نشده و تقویت شده با استفاده از صفحات پلیمری از نوع GFRP در سامانه باربر ثقلی ساختمان از رو و زیر دال تحت بار انفجار تماسی به‌صورت یک سازه یک طبقه با یک دهانه در برابر فشار مستقیم ماده منفجره را مورد بررسی قرار داد. نتایج تحقیقات او نشان داد که استفاده از ورق‌های تقویت CFRP و GFRP در کاهش مقدار جابه‌جایی دال بر اثر نیروی حاصل از انفجار، جلوگیری از قله‌کنی و فروریزش آوار در دال‌ها مؤثر بوده و موجب کاهش ۶۲ درصدی تغییر مکان دال خواهد شد. همچنین با افزایش ضخامت دال و قطر میلگردهای GFRP و تعداد لایه‌های CFRP و درصد پوشش آن بر دال، خیزی که توسط نمونه‌ها تجربه شده است، به شدت کاهش یافته است.

بررسی پژوهش‌های انجام‌شده، نشان می‌دهد، رفتار دال‌های بتنی مجوف تحت اثر بار انفجاری توسط پژوهشگران روشن نشده است. در این تحقیق تلاش می‌شود، اثر اندازه حفره‌ها بر عملکرد دال‌های بتنی مجوف گروهی در برابر انفجارهای با بیشینه فشار متفاوت بررسی گردد.

گرفته شد. او بیان نمود که انرژی هورگلس و حذف المان پارامترهایی هستند که تأثیر مهمی در پیش‌بینی پاسخ دینامیکی دال بتنی مجوف تحت بارگذاری انفجاری دارند.

ناگاشری [۱۳] با مطالعه آزمایشگاهی که بر روی دال بتنی مجوف انجام داد؛ این دال را از نظر اقتصادی و سختی با دال معمولی مورد مقایسه قرار داد. او برای دستیابی به سیستم مناسب‌تری برای یک دال بتنی، آن را با دو نمونه دال مجوف گروهی با همین ابعاد، با حفره‌های با دو قطر متفاوت تحت بار استاتیکی مورد آزمایش قرار داد. نتایج او حاکی از این بود که سختی دال مجوف با قطر حفره‌های ۶۰ میلی‌متر از دال معمولی و نیز دال مجوف با قطر حفره‌های ۷۰ میلی‌متر بیشتر است. همچنین دال مجوف با قطر حفره‌های ۶۰ میلی‌متر از نظر اقتصادی و میزان بتن مصرفی به میزان ۱۴٪ نسبت به دال معمولی مقرون به‌صرفه‌تر است.

نانانگ گاناوان واریاتنو [۱۶] بررسی‌هایی روی رفتار خمشی دال بتنی مجوف پیش‌ساخته تحت بارگذاری دینامیکی انجام داد. او سه مدل دال بتن مسلح، با قطر میلگردهای متفاوت را مورد بررسی قرار داد. مدل اول دال بتنی مجوف او دارای حفره‌های منشوری با مقطع دایروی، با ۲۴٪ کاهش وزن و مدل دوم دال بتنی مجوف او دارای هسته فومی با ۲۵٪ کاهش وزن نسبت به دال بتن معمولی بود. او در نتایجش بیان نمود که مدل دوم مقاومت خمشی بیشتری نسبت به مدل اول دارد؛ گرچه دال بتنی معمولی دارای بیشترین مقاومت خمشی است. همچنین ترک ایجادشده در دال بتنی معمولی از نوع ترک خمشی، اما در مدل‌های اول و دوم از نوع ترک برشی است.

ادل [۱۷] با بررسی عددی روی دال بتن مسلح مجوف، اثر شکل هندسی حفره و همچنین اثر تعداد و قطر حفره‌ها را بر میزان حداکثر جابه‌جایی و حداکثر نیروی قابل تحمل دال، تحت بار استاتیکی متمرکز مورد بررسی قرار داد. نتایج حاکی از این بود؛ که حفره‌های منشوری با مقاطع مربعی و دایروی، موجب کاهش ترک و مقاومت نهایی دال بتن مسلح می‌شود. دال مجوف دارای حفره‌های با مقطع دایروی، دارای ترک بیشتر و مقاومت نهایی بزرگ‌تر و خیز بیشتر نسبت به دال مجوف دارای حفره‌های با مقاطع مربعی بود. افزایش قطر دایره‌ها، منجر به کاهش مقاومت نهایی و افزایش خیز نهایی می‌شود. همچنین افزایش ابعاد مربع‌ها موجب کاهش مقاومت نهایی و خیز دال می‌شود. او در انتها دال بتن مجوف با حفره‌های منشوری با مقطع دایره‌ای را به‌عنوان هندسه مناسب‌تر نسبت به حالت مربعی، معرفی نمود.

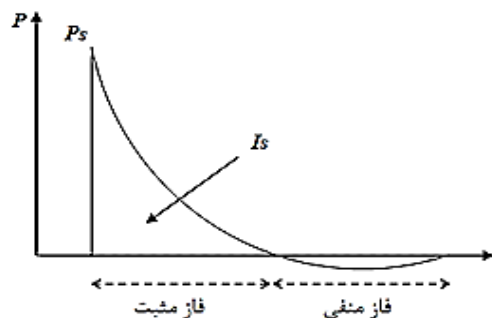
هادی عین‌آبادی [۱۸، ۱۹] به‌منظور ارزیابی رفتار دال مجوف با حفره‌های گروهی و دست‌یابی به ابعاد بهینه حفره‌ها تحت

۲. فشار موج انفجار

انفجار واکنشی است که در آن نرخ سوختن مواد با سرعتی به مراتب بیشتر از سرعت صوت انجام می‌شود؛ که در نتیجه دما و فشار بسیار بالایی ایجاد و موج انفجار بلافاصله تولید و با سرعت بسیار زیادی منتشر می‌شود. هر بارگذاری ناشی از موج انفجار توسط سه پارامتر شکل موج، حداکثر فشار و زمان دوام تعیین می‌شود. مهم‌ترین پارامتر موج انفجار، فشار است. به فشار ناشی از موج انفجار در هر نقطه از محیط اطراف انفجار که مقدار آن با وزن ماده منفجره رابطه مستقیم و با فاصله از مرکز انفجار رابطه معکوس دارد، فشار انفجار می‌گویند. محاسبه اندازه این فشار و تغییرات آن در طی زمان از اهمیت کاربردی زیادی برخوردار است. شکل (۲) پروفیل فشار، برای موج انفجار را نشان می‌دهد؛ که به دو قسمت فاز مثبت و فاز منفی تقسیم شده است. در بخش فاز مثبت، بیشینه فشار به صورت آنی تقریباً در زمان صفر شکل گرفته و طی زمان کوتاهی به مقدار فشار محیط کاهش پیدا می‌کند. بعد از آن موج وارد فاز منفی خود می‌شود؛ که دارای زمان طولانی‌تر اما دامنه‌ای کمتر از فشار فاز مثبت است. نمودار فشار-زمان شکل (۲) طبق معادله نمایی (۱) رسم شده است [۲۲].

$$P(t) = p_s \left(1 - \frac{t}{T_a}\right) e^{-\frac{bt}{T_a}} \quad (1)$$

$P(t)$ فشار در زمان t ، P_s بیشینه اضافه فشار و b یک ثابت تجربی است.



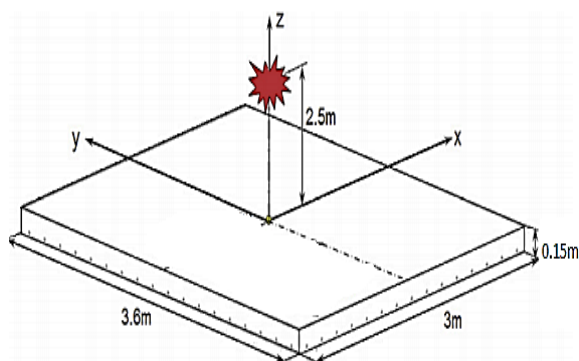
شکل ۲. نمودار فشار-زمان موج انفجار [۲۲]

۳. روش تحقیق

انجام شبیه‌سازی عددی و مدل‌سازی فرایند، یکی از روش‌های اصلی مطالعه پدیده‌ها بوده و در تحلیل مسائل، راهکار مناسبی برای امکان‌سنجی و پیش‌بینی شرایط به شمار می‌آید. هزینه بالا و دشواری انجام آزمایش‌های تجربی نیز در علاقه‌مندی به شبیه‌سازی عددی بی‌تأثیر نیست. در این مقاله مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس انجام شده است. در واقع می‌توان گفت این تحقیق ادامه پژوهش‌های تای [۲۴] است.

تای پس از مدل‌سازی دال بتن مسلح و صحت‌سنجی آن با نتایج تجربی، عوامل تأثیرگذار بر خرابی بتن در برابر انفجار را مورد بررسی قرار داد. نتایج او در بسیاری از مقالات به‌عنوان مرجعی موثق جهت مدل‌سازی عددی استفاده شده است.

تای جهت دریافت پاسخ دینامیکی دال بتن مسلح در مقابل بارگذاری انفجاری، مقادیر مختلف یک خرج تی‌ان‌تی را در فاصله ۲/۵ متری از آن قرار داد (شکل ۳)، و مقادیر جابه‌جایی و تنش را برای نقاط مختلف این دال ارائه نمود. در تحقیق حاضر ابتدا ۲۳۸ حفره کروی درون دال بتنی تای تعبیه شده است سپس پاسخ دینامیکی این دال بتنی مجوف در برابر بار انفجار مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۳. هندسه دال بتن مسلح تای [۲۴]

در اینجا در مرحله اول پارامترهای مدل‌سازی دال بتنی تای و مسلح کردن آن با آرماتور در دو بخش جداگانه هندسه و مواد توضیح داده شده است. در مرحله دوم بارگذاری، نوع تحلیل و شرایط تکیه‌گاهی و در مرحله آخر نیز اعتبارسنجی مدل‌سازی و آزمون همگرایی مش ارائه گردیده است.

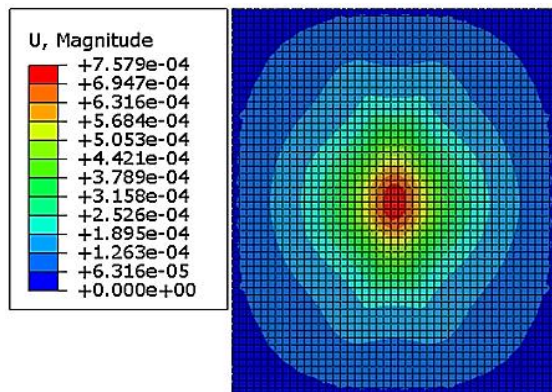
۳-۱. هندسه مدل

دال بتنی مدل‌سازی شده، دارای ابعاد ۳×۳/۶ و ارتفاع ۰/۱۵ متر است. این دال دارای دو شبکه آرماتور متشکل از تعداد ۱۵ آرماتور طولی و ۱۸ آرماتور عرضی که به فاصله ۱۰ سانتی‌متر از یکدیگر و ۲/۵ سانتی‌متر از سطح دو طرف دال بتن قرار گرفته‌اند، می‌باشد. سطح مقطع آرماتور انتخاب شده ۴۷ میلی‌متر مربع است. جهت مجوف کردن دال بتنی ۲۳۸ حفره کروی درون آن تعبیه می‌شود؛ که در حد فاصل دو شبکه آرماتور درون مقطع دال بتن قرار می‌گیرند. جهت المان‌بندی بتن از المان هشت‌گره‌ای C3D8R2 با اندازه المان‌های هفت سانتی‌متر استفاده شده است. این المان‌ها قابلیت این را دارند که تنش و کرنش را با دقت خیلی بالایی برآورد کنند.

منفجره به‌دست آمده‌اند. این روش، برای شبیه‌سازی موج انفجار، نیازمند ورودی‌های جرم معادل تی‌ان‌تی، نوع موج انفجار، مکان ماده منفجره در فضا و مشخصات سطح برای انتخاب نوع فشار اعمالی است. در این پژوهش مقادیرهای یک، سه، پنج، ده و پانزده کیلوگرم تی‌ان‌تی در فاصله ۲/۵ متری دال بتنی مجوف، استفاده شده است. آنالیز اجزاء محدود به روش دینامیکی صریح انجام شده است. این روش نسبت به روش ضمنی برای بارگذاری‌های شدید در زمان کوتاه (مانند ضربه و انفجار) بهتر است و جواب‌های مناسب‌تری ارائه می‌دهد. شرایط تکیه‌گاهی نیز در چهار طرف دال بتنی به‌صورت گیردار تعریف شده است.

۳-۴. اعتبارسنجی مدل

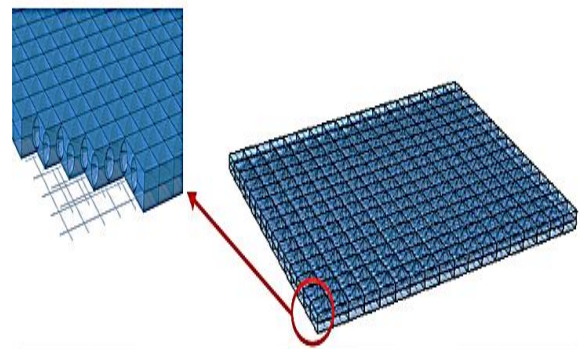
برای نمایش صحت مدل‌سازی‌های عددی انجام‌شده، از نتایج مقاله معتبر آقای تایی [۲۴] استفاده شده است. هندسه مدل، خواص مواد، نوع تحلیل و شرایط تکیه‌گاهی مدل‌سازی تایی منطبق بر مدل‌سازی‌های این تحقیق بوده و در قسمت قبل ارائه شد. در جدول (۳) نتایج تایی و نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی‌های عددی این پژوهش با هم مقایسه شده است. همان‌گونه که مشخص است، نتایج حل عددی تطابق بسیار خوبی با نتایج تایی دارد.



شکل ۵. توزیع جابه‌جایی ماندگار برای دال بتنی تایی

جدول ۳. مقایسه نتایج تایی [۲۴] با نتایج مدل‌سازی مقاله حاضر

درصد اختلاف مدل‌سازی تحقیق حاضر با نتایج تایی	بیشینه جابه‌جایی مدل‌سازی تحقیق حاضر (mm)	بیشینه جابه‌جایی تایی (mm)	فاصله مقیاس شده (m/kg ^{1/3})	جرم خرج (kg)	نمونه
٪۴	۲/۴	۲/۵	۲/۵	۱	A
٪۲	۶/۳	۶/۲	۱/۷۳	۳	B
٪۵	۹/۹	۹/۴	۱/۴۶	۵	C
٪۴	۱۸/۹	۱۸/۱	۱/۱۶	۱۰	D
٪۳	۴۱	۴۲/۱	۱/۰۱	۲۰	E



شکل ۴. مدل‌سازی اجزاء محدود دال بتنی مجوف

۳-۲. خواص مواد

برای آنالیز بتن تحت فشار، از مدل ساختاری بتن با پلاستیسیته آسیب‌دیده استفاده شده است. مدل بتن با پلاستیسیته آسیب‌دیده بر پایه فرضیات آسیب‌دیدگی همسان است و برای حالت‌هایی که بتن تحت بارگذاری‌های دلخواه و از جمله بار انفجاری قرار دارد، طراحی شده است. خواص الاستیک بتن مورد مطالعه در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات بتن

پارامتر	چگالی (Kg/m ³)	مقاومت فشاری (MPa)	نسبت پواسون	مدول الاستیسیته (GPa)
مقدار	۲۴۰۰	۱۷/۲	۰/۱۵	۲۵

برای مدل‌سازی آرماتورهای طولی و عرضی از المان خریایی T3D2 که یک المان سه‌بعدی دو گرهی با تغییر شکل‌های خطی می‌باشد، استفاده شده است. این المان‌ها در بتن محصور شده و رفتاری هماهنگ با آن خواهند داشت [۲۵]. در جدول (۲) مشخصات الاستیک فولاد مورد استفاده برای آرماتور آورده شده است.

جدول ۲. رفتار الاستیک فولاد در آرماتورهای طولی و عرضی

پارامتر	تنش تسلیم (MPa)	نسبت پواسون	مدول الاستیسیته (GPa)
مقدار	۴۰۰	۰/۳	۲۱۰

۳-۳. بارگذاری، نوع تحلیل و شرایط تکیه‌گاهی

از روش‌های مرسوم در حل مسائل موج شوک، اعمال مستقیم فشار موج انفجار به سازه و یا روش کانوپ^۱ است. در روش کانوپ فشار اعمالی با توجه به معادلات تجربی محاسبه می‌شود. این معادلات با استفاده از جمع‌آوری نتایج هزاران آزمایش انفجار ماده

^۱ ConWep

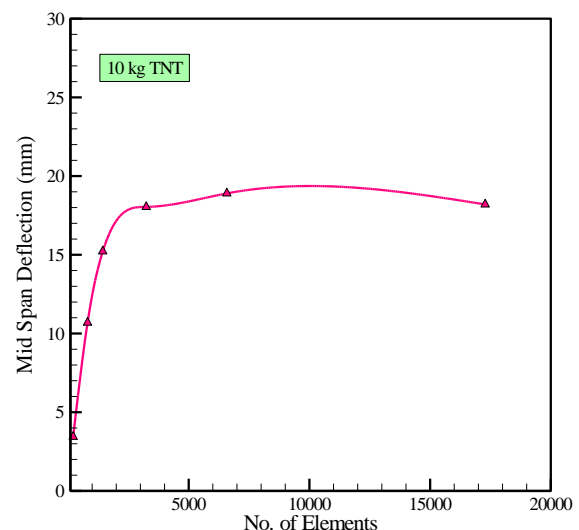
۳-۵. آزمون همگرایی مش

نتایج یک مدل‌سازی اجزای محدود زمانی همگرا می‌شوند که مش بندی به‌گونه‌ای باشد که المان‌های سازه به‌اندازه کافی کوچک باشند. این نیز زمانی قابل دست‌یابی است که تعداد المان‌ها به حدی برسد که دیگر افزایش تعداد المان، تأثیر چندانی بر نتایج نداشته باشد. در این بخش دال بتنی تای، تحت بارگذاری انفجاری خرج ۱۰ کیلوگرمی تی‌ان‌تی قرار گرفت و با اندازه المان‌های مختلف آنالیز شد. شرایط و مشخصات شش نمونه آنالیز شده در جدول (۴) ارائه گردیده است.

جدول ۴. آزمون همگرایی مش

نمونه	جرم خرج (kg)	فاصله مقیاس شده (m/kg ^{1/3})	تعداد المان	اندازه المان (cm)	بیشینه جابه‌جایی (mm)
A	۱۰	۱/۱۶	۱۷۲۸۰	۵	۱۸/۲
B	۱۰	۱/۱۶	۶۵۸۰	۷	۱۸/۵
C	۱۰	۱/۱۶	۳۲۴۰	۱۰	۱۸/۰۴
D	۱۰	۱/۱۶	۱۴۴۰	۱۵	۱۵/۲۲
E	۱۰	۱/۱۶	۸۱۰	۲۰	۱۰/۶۹
F	۱۰	۱/۱۶	۲۱۵	۴۰	۳/۴۴

جهت مقایسه بهتر، نتایج در شکل (۵) ارائه گردیده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود المان‌های کوچک‌تر از ده سانتی‌متر می‌توانند نتایج مناسبی را ارائه دهند. در این مدل‌سازی المان با اندازه هفت سانتی‌متر برای مش بندی دال بتنی انتخاب شد.



شکل ۶. نمودار همگرایی مش

۴. نتایج و بحث

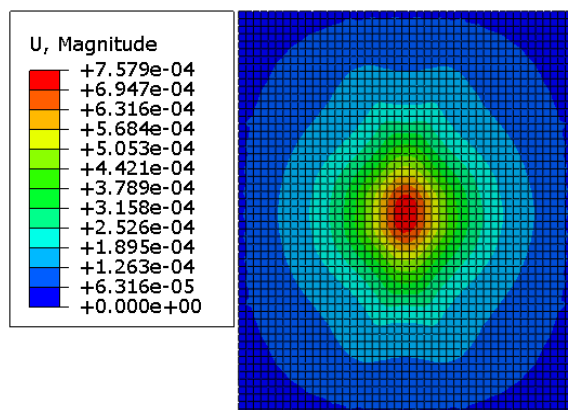
هرکدام از دال‌ها تحت پنج بارگذاری متفاوت مورد بررسی قرار می‌گیرد. در واقع جهت تعیین مقادیر بهینه سی مدل ارزیابی می‌شود. مشخصات دال‌های بتن‌آرمه مجوف در جدول (۵) ارائه شده است.

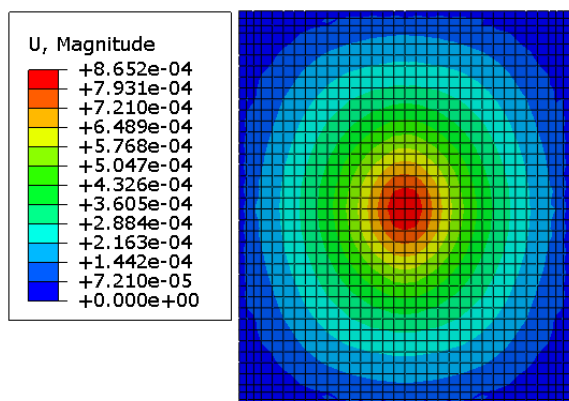
جدول ۵. مشخصات حفره‌های دال بتنی مجوف

نام دال	A	B	C	D	E	F
قطر حفره (cm)	۰	۴	۶	۸	۱۰	۱۲
نسبت قطر حفره به ضخامت دال (D/H)	۰	۰/۲۷	۰/۴	۰/۵۴	۰/۶۷	۰/۸

۴-۱. جابه‌جایی بیشینه و جابه‌جایی ماندگار

یکی از معیارهای بررسی رفتار سازه‌ها، پارامتر جابه‌جایی است. پس از رسیدن موج انفجار به دال بتن‌آرمه مجوف، منحنی جابه‌جایی آن در طی یک فراز و نشیب قابل ملاحظه‌ای، ابتدا به یک مقدار بیشینه می‌رسد؛ پس از آن به دلیل مستهلک شدن انرژی، دامنه نوسان به‌صورت تناوبی با گذر زمان کاهش یافته تا اینکه در نهایت منحنی در مقدار جابه‌جایی ماندگار یکنواخت می‌شود. در این مقاله دو پارامتر جابه‌جایی بیشینه و جابه‌جایی ماندگار که در واقع ملاک ارزیابی پژوهشگران و همچنین ملاک طراحی مهندسان می‌باشند، مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل‌های (۱۱-۶) توزیع جابه‌جایی ماندگار را برای D/H های مختلف نشان می‌دهند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود جابه‌جایی ماندگار برای دال بتنی مجوف با $D/H = 0/67$ کمترین مقدار و برای دال بتنی مجوف با $D/H = 0/27$ و $D/H = 0/8$ بیشترین مقدار را خواهد داشت. همچنین مشخص است که دال بتنی معمولی به‌صورت موضعی تغییر شکل می‌دهد، در صورتی که دال‌های بتنی مجوف دارای توزیع جابه‌جایی یکنواخت‌تری هستند.

شکل ۷. توزیع جابه‌جایی ماندگار برای دال بتنی معمولی با $D/H = 0$

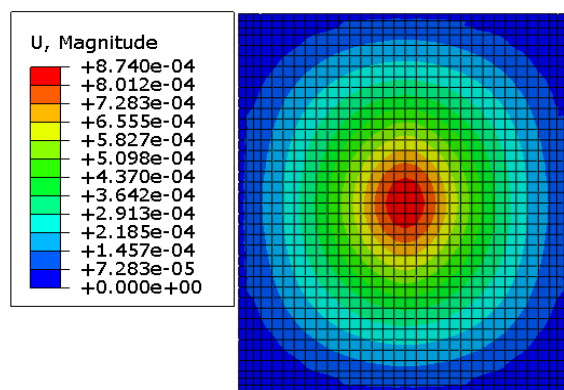


شکل ۱۲. توزیع جابه‌جایی ماندگار برای دال بتنی مجوف با $D/H=0.8$

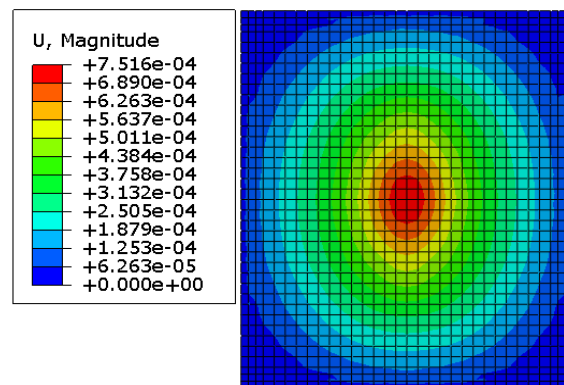
در این قسمت با در نظر گرفتن بیشینه جابه‌جایی به‌عنوان ملاک ارزیابی، سعی می‌شود که مناسب‌ترین نسبت D/H (نسبت قطر حفره به ضخامت دال)، جهت دستیابی به کمترین مقدار جابه‌جایی بیشینه تحت فشارهای مختلف موج انفجار، تعیین شود. نتایج مدل‌سازی‌های انجام‌شده جهت تعیین نسبت مناسب D/H در جدول (۶) ارائه شده است.

برای دستیابی به هدف موردنظر دو شرط متفاوت لحاظ شده است. شرط اول کمینه کردن میزان بیشینه جابه‌جایی و شرط دوم کمینه کردن توأمان میزان بتن مصرفی و میزان بیشینه جابه‌جایی است که علاوه بر در نظر گرفتن عملکرد سازه‌ای دال بتن‌آرمه مجوف، از نظر اقتصادی نیز مسئله را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. بر مبنای مقدارهای به‌دست‌آمده از جدول (۶) در شکل‌های (۱۶-۱۲) منحنی‌های درصد کاهش بیشینه مقدار جابه‌جایی و درصد کاهش جرم بتن مصرفی دال بتنی مجوف نسبت به دال بتنی معمولی برای D/H های مختلف ترسیم شده است. مقدار بیشینه نسبی منحنی درصد کاهش بیشینه مقدار جابه‌جایی، مقدار D/H بهینه را بر اساس شرط یک و محل تقاطع دو منحنی، مقدار D/H بهینه را بر اساس شرط دوم ارائه می‌دهند. بررسی نمودارهای ارائه‌شده در شکل‌های (۱۶-۱۲) نشان می‌دهد که میزان بیشینه جابه‌جایی دال مجوف در همه حالات نسبت به دال معمولی کمتر است. همچنین مشخص است که کمترین میزان جابه‌جایی (بیشترین میزان درصد کاهش جابه‌جایی نسبت به دال معمولی) تحت هر مقدار فشار انفجاری مربوط به دال‌های مجوفی می‌باشد که نسبت قطر حفره‌ها به ضخامت آن‌ها (D/H) برابر 0.3 است.

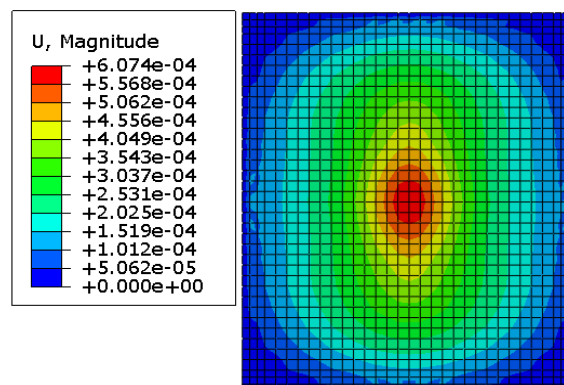
نمودارهای مزبور نشان می‌دهند که بیشینه مقدار نسبت کاهش جابه‌جایی دال مجوف به دال معمولی برای خرج‌های ۱، ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ کیلوگرمی به ترتیب 0.26% ، 0.16% ، 0.14% و 0.11% می‌باشد و با افزایش جرم ماده منفجره اثر وجود حفره بر درصد کاهش جابه‌جایی دال مجوف نسبت به دال معمولی کمتر می‌گردد.



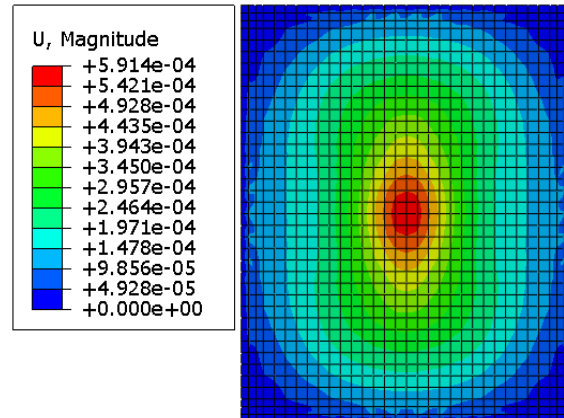
شکل ۸. توزیع جابه‌جایی ماندگار برای دال بتنی مجوف با $D/H=0.27$



شکل ۹. توزیع جابه‌جایی ماندگار برای دال بتنی مجوف با $D/H=0.4$



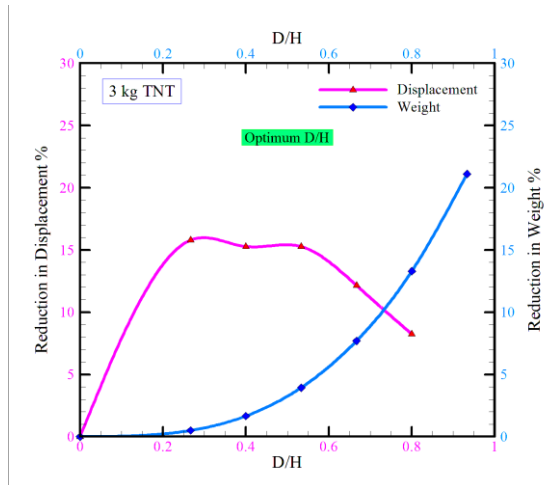
شکل ۱۰. توزیع جابه‌جایی ماندگار برای دال بتنی مجوف با $D/H=0.54$



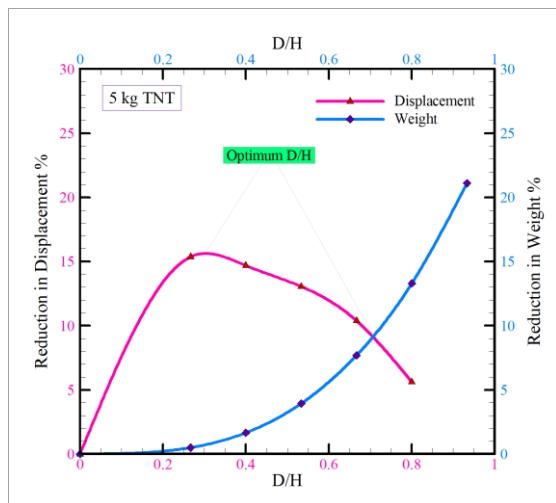
شکل ۱۱. توزیع جابه‌جایی ماندگار برای دال بتنی مجوف با $D/H=0.67$

جدول ۶. نتایج جابه‌جایی سی نمونه دال مجوف مدل‌سازی شده

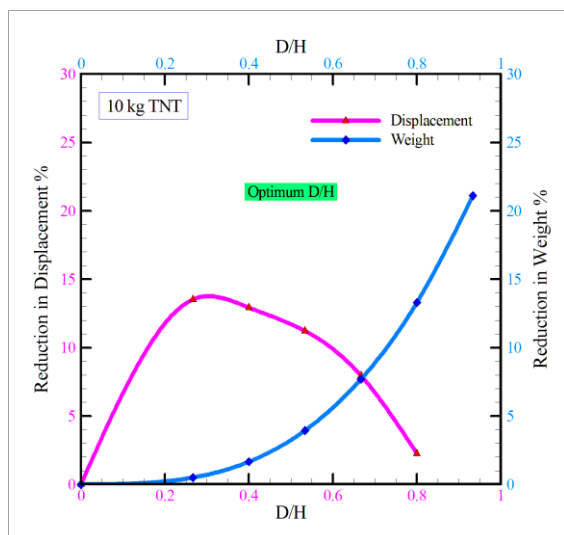
جابه‌جایی ماندارگار (mm)	بیشینه جابه‌جایی (mm)	جرم نمونه (ton)	D/H	نمونه	فاصله مقیاس شده (m/kg ^{1/3})	جرم خرج (kg)
۰/۷۵	۲/۶۳	۳/۸۹	۰	A	۲/۵	۱
۰/۸۷	۱/۹۸	۳/۸۷	۰/۲۷	B		
۰/۷۴	۱/۹۹	۳/۸۲	۰/۴	C		
۰/۶	۲/۰۱	۳/۷۳	۰/۵۴	D		
۰/۵۸	۲/۰۶	۳/۵۹	۰/۶۷	E		
۰/۸۶	۲/۱۴	۳/۳۷	۰/۸	F		
۳/۰۶	۶/۴۳	۳/۸۹	۰	A	۱/۷۳	۳
۳/۲۳	۵/۴۱	۳/۸۷	۰/۲۷	B		
۳/۰۵	۵/۴۵	۳/۸۲	۰/۴	C		
۳/۰۵	۵/۴۵	۳/۷۳	۰/۵۴	D		
۲/۸۲	۵/۶۵	۳/۵۹	۰/۶۷	E		
۳/۲۷	۵/۹	۳/۳۷	۰/۸	F		
۵/۴۶	۱۰/۱	۳/۸۹	۰	A	۱/۴۶	۵
۵/۵۹	۸/۵۴	۳/۸۷	۰/۲۷	B		
۵/۳۷	۸/۶۰	۳/۸۲	۰/۴	C		
۵/۱۰	۸/۷۷	۳/۷۳	۰/۵۴	D		
۵/۱۳	۹/۰۴	۳/۵۹	۰/۶۷	E		
۵/۷۴	۹/۵۲	۳/۳۷	۰/۸	F		
۱۲/۷	۱۹/۴	۳/۸۹	۰	A	۱/۱۶	۱۰
۱۲/۶	۱۶/۸	۳/۸۷	۰/۲۷	B		
۱۲/۲	۱۶/۹	۳/۸۲	۰/۴	C		
۱۱/۸	۱۷/۲	۳/۷۳	۰/۵۴	D		
۱۱/۹	۱۷/۸	۳/۵۹	۰/۶۷	E		
۱۳	۱۸/۹	۳/۳۷	۰/۸	F		
۵/۵	۱۰	۳/۸۹	۰	A	۱/۰۱	۱۵
۵/۶	۸/۵	۳/۸۷	۰/۲۷	B		
۵/۴	۸/۶	۳/۸۲	۰/۴	C		
۵/۱	۸/۸	۳/۷۳	۰/۵۴	D		
۵/۱	۹	۳/۵۹	۰/۶۷	E		
۵/۷	۹/۵	۳/۳۷	۰/۸	F		



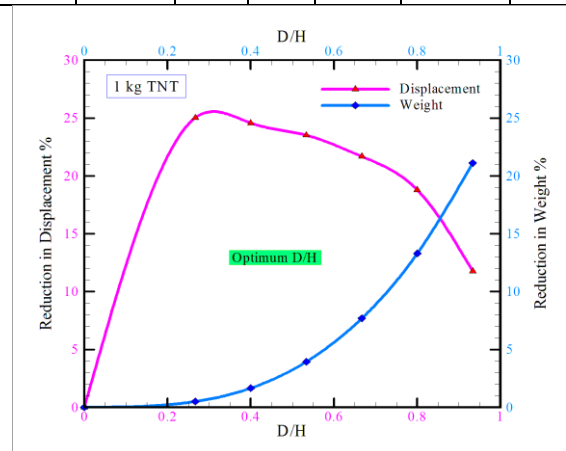
شکل ۱۴. مقادیر بهینه نسبت D/H بر اساس شروط یک و دو، برای خرج ۳ کیلوگرم



شکل ۱۵. مقادیر بهینه نسبت D/H بر اساس شروط یک و دو، برای خرج ۵ کیلوگرم

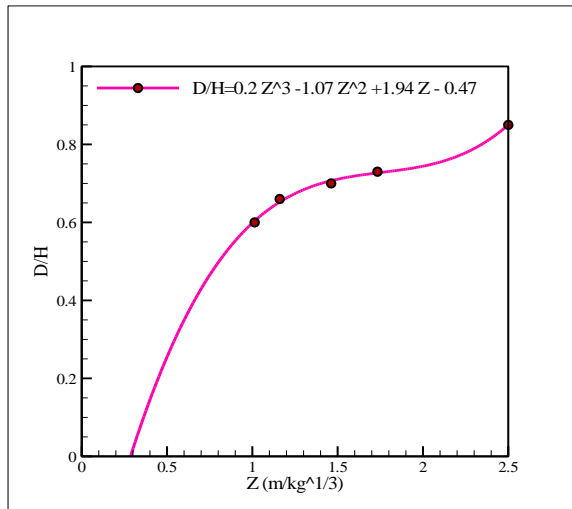


شکل ۱۶. مقادیر بهینه نسبت D/H بر اساس شروط یک و دو، برای خرج ۱۰ کیلوگرم



شکل ۱۳. مقادیر بهینه نسبت D/H بر اساس شروط یک و دو، برای خرج ۱ کیلوگرم

طوری که Z فاصله مقیاس شده، D قطر حفره‌ها و H ضخامت دال است.



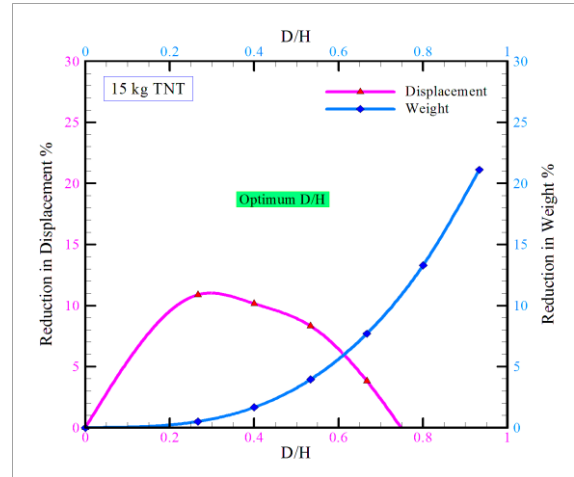
شکل ۱۸. مقادیر بهینه نسبت D/H بر اساس شرط دو، بر حسب z

۲-۴. بررسی آسیب

نشانه آسیب جهت بیان ظرفیت بتن برای تحمل بارگذاری مانند فشار موج انفجار تعریف می‌شود. مقالات زیادی بتن را با استفاده از شاخص خسارت و نشانه آسیب مورد ارزیابی قرار داده‌اند [۲۶-۲۹]. نشانه آسیب را می‌توان به‌عنوان نسبت مساحت تخریب‌شده به مساحت آسیب ندیده دال تعریف نمود، که همواره عددی بین صفر و یک خواهد بود.

$$DI = 1 - \frac{P_R}{p_o} \quad (۳)$$

که P_o ظرفیت باربری اولیه و P_R ظرفیت باربری باقی‌مانده در دال بتن است. سطوح مختلف آسیب می‌تواند به این صورت تعریف شود که المان‌های با $DI=0 \sim 0.2$ دارای سطح آسیب کم‌اند. المان‌های با $DI=0.2 \sim 0.5$ دارای سطح آسیب زیاد هستند؛ و در نهایت المان‌هایی با $DI=0.5 \sim 0.8$ دارای سطح آسیب زیاد هستند؛ و در نهایت المان‌هایی با $DI=0.8 \sim 1$ ظرفیت باربری خود را از دست داده و به‌عبارتی فرو می‌ریزند [۲۵]. در شکل‌های (۱۸-۲۲) توزیع آسیب در دال‌های بتنی مجوف که تحت فشار ناشی از انفجار یک کیلوگرم تی‌ان‌تی در فاصله ۲/۵ متری آن قرار گرفته‌اند، برای D/H های مختلف رسم شده است. ملاحظه می‌شود که بیشترین میزان آسیب در مرکز و لبه‌های دال‌ها رخ می‌دهد. همچنین در دال بتنی معمولی المان‌های بیشتری در محدوده $DI=0.8 \sim 1$ قرار می‌گیرند به‌عبارتی دیگر آسیب در دال بتنی معمولی نسبت به دال بتنی مجوف جدی‌تر است. از سوی دیگر مشاهده می‌شود توزیع آسیب در دال‌های بتنی مجوف، یکنواخت‌تر است.



شکل ۱۷. مقادیر بهینه نسبت D/H بر اساس شرط یک و دو، برای خرج ۱۵ کیلوگرم

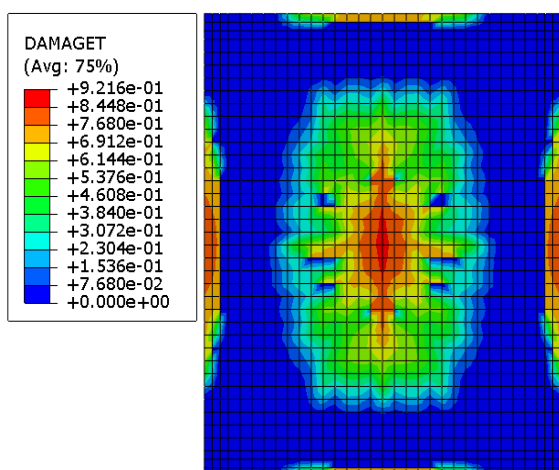
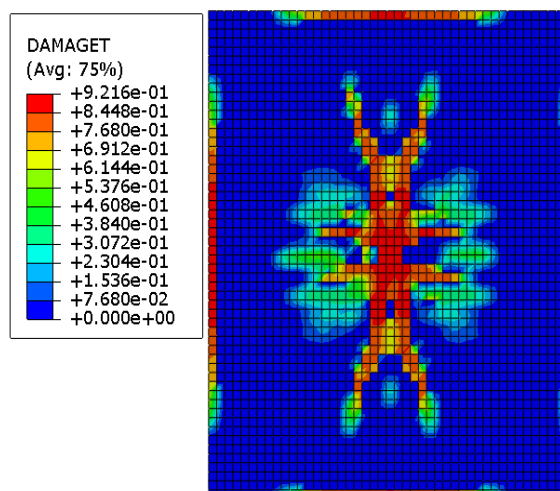
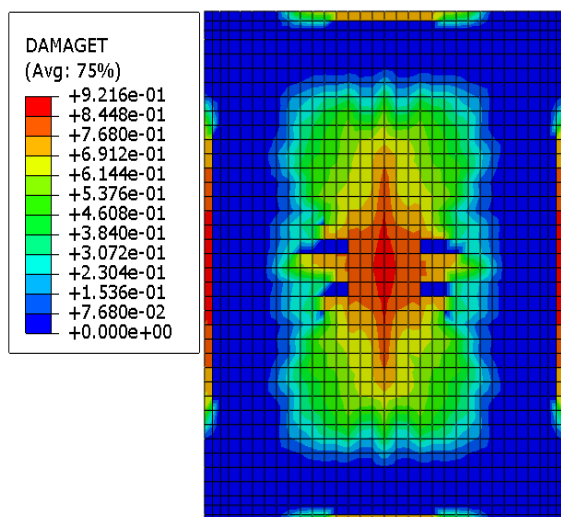
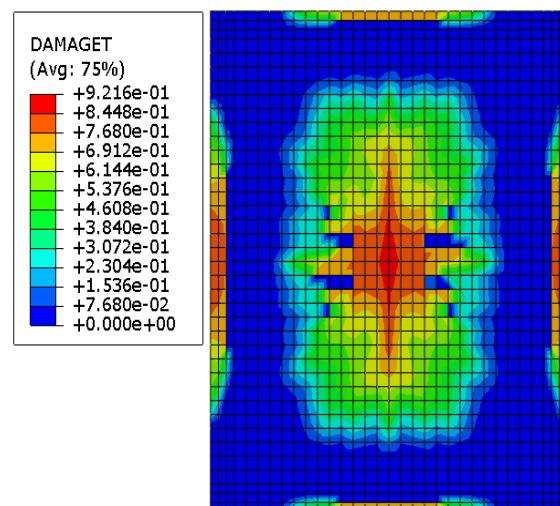
در جدول (۷)، D/H هایی که سبب کمینه کردن میزان بیشینه جابه‌جایی و کمینه کردن توأمان میزان بتن مصرفی و میزان بیشینه جابه‌جایی در دال‌های بتنی مجوف می‌شوند یا همان مقادیر بهینه D/H بر اساس شرط یک و دو آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود؛ با تقریب نسبتاً خوبی می‌توان برای شرط یک مقدار بهینه $D/H=0.3$ در نظر گرفت. برای شرط دوم، D/H مقدار ثابتی ندارد و وابسته به فاصله مقیاس شده z است و با کاهش z ، با توجه به کاهش فشار و ایمپالس و لزوم داشتن مقاومت کافی دال، کاهش می‌یابد. در شکل (۱۷) منحنی D/H بهینه بر اساس شرط دوم، نسبت به فواصل مقیاس شده مختلف ترسیم شده است.

جدول ۷. مقادیر D/H برآورد شده برای جرم خرج‌های متفاوت

جرم خرج (kg)	فاصله مقیاس شده (m/kg ^{1/3})	مقدار بهینه (D/H) با شرط یک	مقدار بهینه (D/H) با شرط دو
۱	۲/۵	۰/۳۲	۰/۸۵
۳	۱/۷	۰/۳۱	۰/۷۴
۵	۱/۴	۰/۳۰	۰/۷
۱۰	۱/۱	۰/۲۹	۰/۶۶
۱۵	۱	۰/۲۷	۰/۶

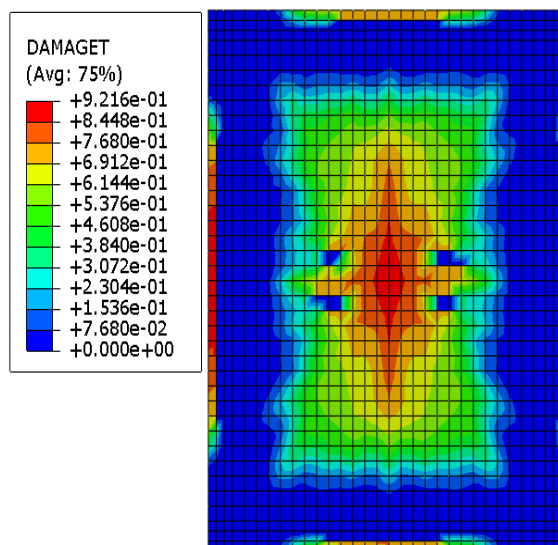
همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش فاصله مقیاس شده به دلیل کاهش فشار و ایمپالس نسبت D/H افزایش پیدا می‌کند. جهت تعیین D/H مناسب بر اساس شرط دوم، می‌توان یک منحنی درجه سه به داده‌ها برازش داد. معادله (۲) بهترین معادله چندجمله‌ای است که می‌تواند در فاصله مقیاس شده موردنظر، با خطای استاندارد ۰/۰۱ این رابطه را بیان کند.

$$\frac{D}{H} = 0.2z^3 - 1.07z^2 + 1.94z - 0.047 \quad (۲)$$

شکل ۲۰. توزیع آسیب کششی در پشت دال بتن مجوف با $D/H=0.27$ شکل ۱۹. توزیع آسیب کششی در پشت دال بتن معمولی با $D/H=0$ شکل ۲۲. توزیع آسیب کششی در پشت دال بتن مجوف با $D/H=0.67$ شکل ۲۱. توزیع آسیب کششی در پشت دال بتن مجوف با $D/H=0.54$

۵. نتیجه‌گیری

یکی از پرکاربردترین سازه‌ها برای مقابله با موج انفجار دال بتنی است. از آنجایی که بهترین جاذب انرژی موج انفجار هواست؛ لذا انتظار می‌رود دال بتن‌آرمه مجوف با توجه به حذف بتن غیر باربر آن، عملکرد بهتری نسبت به دال بتن‌آرمه در مقابل انفجار داشته باشد. در این مقاله با استفاده از آنالیز اجزاء محدود روشی جهت تعیین قطر مناسب حفره‌های درون دال بتنی با در نظر گرفتن دو معیار کمینه کردن میزان بیشینه جابه‌جایی و کمینه کردن توأمان میزان بتن مصرفی و بیشینه جابه‌جایی ارائه شد؛ که معیار دوم علاوه بر در نظر گرفتن عملکرد سازه‌ای، از نظر اقتصادی نیز مسئله را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. نتایج نشان داد که در همه نمونه‌ها وجود حفره درون مقطع بتن موجب کاهش جابه‌جایی بیشینه دال می‌شود. قطر مناسب حفره‌های کروی درون مقطع دال بر اساس کمینه کردن بیشینه جابه‌جایی 0.3 ضخامت دال

شکل ۲۳. توزیع آسیب کششی در پشت دال بتن مجوف با $D/H=0.8$

- [14] Maazoun, A.; Vantomme, J.; Matthys, S. "Damage Assessment of Hollow Core Reinforced and Prestressed Concrete Slabs Subjected to Blast Loading"; *Procedia Eng.* 2017, 199, 2476-2481.
- [15] Mazoun, A. "Numerical Prediction of the Dynamic Response of Prestressed Concrete Hollow Core Slabs under Blast Loading" in 11th Euro. LS-Dyna Conf. 2017.
- [16] Wariyatno, N.G.; Haryanto, Y.; Sudiby, G.H. "Flexural Behavior of Precast Hollow Core Slab Using PVC Pipe and Styrofoam with Different Reinforcement"; *Procedia Eng.* 2017, 171, 909-916.
- [17] Abed, A.A.A. "Numerical Analysis of Reinforced Concrete Hollow-Core Slabs"; *ARPN J. Eng. & Appl. Sci.* 2016, 11, 9284.
- [18] Einabadi, H.; Kalatjari, V. "Determine the Optimal Dimensions of Plastic Balls in the Cobiax Roofs Based on Hardness Criteria"; *I. Con. Civil Arch. & Urban Dev.* 1394 (In Persian).
- [19] Einabadi, H.; Kalatjari, V. "Determine the Optimal Dimensions of Plastic Balls in the Cobiax Roofs Based on Resistance Criteria"; *Int. Con. Civil Arch. & Urban Dev.* 1394 (In Persian).
- [20] OmidNasab, F.; Afrooznia, M. "Numerical Study on Strengthening of Weak One-Way Slabs with HSC Laminates Subjected to Blast Load"; *J. Struct. Construct. Eng.* 2021, 8, 218-233 (In Persian).
- [21] Mirhashemi, S. N. "Investigating the Deflection of Concrete Slabs Reinforced with CFRP and GFRP Plates and Bars"; *Scientific Journal of Passive Defense* 2020, 11, 55-65.
- [22] Ngo, T. "Blast Loading and Blast Effects on Structures—an Overview"; *Ent. J. Struct. Eng.* 2007, 7, 76-91.
- [23] Leong, E. "Re-Examination of Peak Stress and Scaled Distance Due to Ground Shock"; *Int. J. Impact Eng.* 2007, 34, 1487-1499.
- [24] Tai, Y. "Dynamic Response of a Reinforced Concrete Slab Subjected to Air Blast Load"; *Theor. Appl. Fract. Mech.* 2011, 56, 140-147.
- [25] Simulia, D. "ABAQUS 6.11 Analysis User's Manual. Abaqus 6.11 Documentation"; 2011, 22.
- [26] Karami, F.; Izadpanah, M. "Incremental Inelastic Dynamic Damage Analysis of MRRCFs Infilled with Masonry Panels"; *J. Build. Eng.* 2021, 44, 103282.
- [27] Habibi, A. R.; Samadi, M.; Izadpanah, M. "Practical Relations to Quantify the Amount of Damage of SWRCFs using Pushover Analysis"; *Adv. Concrete Construct.* 2020, 10, 271-278.
- [28] Carrillo, J.; Oyarzo-Vera, C.; Blandon, C. "Damage Assessment of Squat, Thin and Lightly-Reinforced Concrete Walls by the Park and Ang Damage Index"; *J. Build. Eng.* 2019, 26, 100921.
- [29] Izadpanah, M.; Habibi, A. R. "New Spread Plasticity Model for Reinforced Concrete Structural Elements Accounting for Both Gravity and Lateral Load Effects"; *J. Struct. Eng.* 2018, 144, 04018028.

برآورد شد. بر اساس شرط دوم قطر مناسب برای حفره‌ها مقدار ثابتی نداشته و وابسته به فاصله مقیاس شده (Z) است و با کاهش آن، با توجه به کم شدن فشار و ایمپالس و لزوم داشتن مقاومت کافی دال، قطر حفره‌ها کاهش می‌یابد. بر این اساس در محدوده فواصل مورد بررسی قطر حفره‌ها مقداری بین ۰/۶ تا ۰/۸ ضخامت دال، برآورد شد. همچنین نتایج نشان داد که جابه‌جایی‌های ماندگار و پارامتر آسیب، در دال بتنی معمولی به صورت موضعی بوده و در دال بتنی مجوف دارای توزیع یکنواخت‌تری هستند که این نشان از عملکرد بهتر دال بتنی مجوف نسبت به دال بتنی معمولی، در برابر فشار ناشی از بار انفجار است.

۶. مراجع‌ها

- [1] Mostofinejad, D. "Concrete Reinforced Concrete Structures"; *Arkan Danesh.* 1394 (In Persian).
- [2] Chung, J. H.; Park, J. H.; Choi, H. K.; Lee, S. C.; Choi, C. S. "An Analytical Study on the Impact of Hollow Shapes in Bi-Axial Hollow Slabs"; *Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures* 2010, 1729-1736.
- [3] Breuning, K. I. "System and Method for Biaxial Semi-Prefabricated Lightweight Concrete Slab"; *US Patent* 20150292203, 2015.
- [4] Joseph, A. V. "Structural Behaviour of Bubble Deck Slab"; *M-Tech Seminar Rep.* 2016.
- [5] Low, H. Y.; Hao, H. "Reliability Analysis of Direct Shear and Flexural Failure Modes of RC Slabs under Explosive Loading"; *Eng. Struct.* 2002, 24, 189-198.
- [6] Jones, J. "Finite Difference Analysis of Simply Supported RC Slabs for Blast Loadings"; *Eng. Struct.* 2009, 31, 2825-2832.
- [7] Wu, C.; Nurwidayati, R.; Oehlers, D. J. "Fragmentation from Spallation of RC Slabs Due to Airblast Loads"; *Int. J. Impact Eng.* 2009, 36, 1371-1376.
- [8] Silva, P.F.; Lu, B. "Blast Resistance Capacity of Reinforced Concrete Slabs"; *J. Struct. Eng.* 2009, 135, 708-716.
- [9] Schenker, A. "Full-Scale Field Tests of Concrete Slabs Subjected to Blast Loads"; *Int. J. Impact Eng.* 2008, 35, 184-198.
- [10] Xu, K.; Lu, Y. "Numerical Simulation Study of Spallation in Reinforced Concrete Plates Subjected to Blast Loading"; *Comput. & Struct.* 2006, 84, 431-438.
- [11] Wang, W. "Experimental Study on Scaling the Explosion Resistance of a One-Way Square Reinforced Concrete Slab under a Close-in Blast Loading"; *Int. J. Impact Eng.* 2012, 49, 158-164.
- [12] Wang, W. "Experimental Study and Numerical Simulation of the Damage Mode of a Square Reinforced Concrete Slab under Close-in Explosion"; *Eng. Failure Anal.* 2013, 27, 41-51.
- [13] Nagashree, B.; Hokrane, S.; Saha, S. "Comparative Studies of Conventional Slab and Bubble Deck Slab Based on Stiffness and Economy"; *Int. J. Sci. Res. & Dev.* 2017, 5, 1396-1398.