

بررسی عددی تاثیر قطر آرماتور بر رفتار دینامیکی دال های بتنی تحت ضربه سرعت پایین

ساسان کیاست^{۱*}، کورش شاهوردیانی^۲

۱- دکتری سازه، دانشکده عمران و محیط زیست دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران، ایران.

۲- هیات علمی دانشکده عمران و محیط زیست دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

خلاصه

دال های بتنی، از جمله اجزای مهم در سازه های بتنی هستند که ممکن است در شرایط خاص به دلیل سقوط اجسام سنگین، با ضربه های شدید مواجه شوند. تأثیر ضربه بر روی این عناصر به پارامترهایی همچون قطر میلگرد و ضخامت دال بستگی دارد. شناسایی دقیق تاثیر قطر میلگرد بر روی رفتار دینامیکی این اعضا از اهمیت بسزایی برخوردار است. به همین منظور تحقیق حاضر، از نرم افزار آباکوس برای تحلیل های عددی روی تأثیر قطر میلگردها بر روی رفتار دال تحت ضربه استفاده شد. در این تحقیق، ۴ مدل دال در نظر گرفته شد. متغیرهای اصلی مورد مطالعه شامل قطر میلگردها بودند که در چهار حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفتند. قطر میلگردها به ترتیب در چهار رده ۱۴، ۱۰، ۱۶ و ۲۰ میلی متر تعیین شد. در ابتدا، با استفاده از یک نمونه آزمایشگاهی، مدل عددی کالیبره شد و سپس با انجام تحلیل دینامیکی بر روی مدل ها، جابجایی وسط دال در محل برخورد بررسی شد. نتایج نشان دهنده تاثیر قابل توجه قطر میلگرد در رفتار دینامیکی دال بوده و با تغییر آن می توان اطمینان حاصل کرد که رفتار آن بهبود پیدا می کند.

کلمات کلیدی: دال بتنی، ضربه، آرماتور، تحلیل عددی

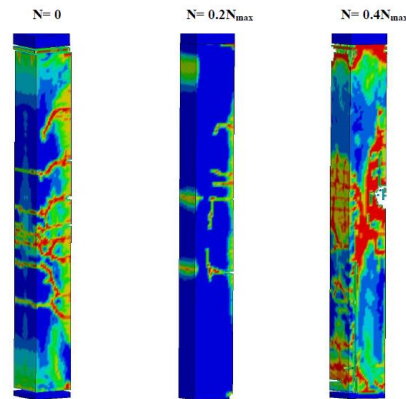
۱. مقدمه

بررسی عملکرد سازه ها در مقابل بارهای ناگهانی و غیرقابل پیش بینی همچون انفجار همواره مورد توجه پژوهشگران قرار دارد. نسبت به نیروهای باد و زمین لرزه، تخمین دقیق بارهای انفجاری وارد شده بر ساختمان ها که بر اثر منفجر شدن اتفاقی یا بمب گذاری رخ می دهد، به دلیل وجود عامل های فراوانی که در انفجار نقش دارند، بسیار مشکل هست و به صورت معمول از ضریب اطمینان بزرگی جهت تحلیل سازه ها در مقابل این نوع از بارها مورداستفاده قرار می گیرد. این امر می تواند باعث طراحی نادرست ساختمان در مقابل بارهای و برآورد نادرست رفتار ساختمان در یک الگوی انفجاری ویژه شود. از سوی دیگر، بارهای انفجاری مدت زمان بسیار کوتاهی دارند بنابراین، به منظور اعمال نمودن انرژی ناشی از انفجار به الگوی عددی سازه بایستی از المان های به بسیار کوچکی استفاده نمود. در نتیجه، الگوی عددی سازه ها در مقابل نیروهای انفجاری نیازمند تعداد المان های فراوانی می باشند که سبب افزایش زمان تحلیل دقیق خواهد شد. نمودارهای فشار ضربه راه حلی مناسب جهت کاستی های پیش روی تحلیل سازه ها در مقابل نیروهای انفجاری خواهد بود [۱].

به جهت تحلیل و طراحی ساختمان های مسلح شده با انواع تقویت کننده ها تحت اثر نیروهای ضربه، هم مطالعات عددی و هم مطالعات آزمایشگاهی لازم است، اخیراً به منظور بهبود روش های تحلیلی ساده شده، مطالعاتی در خصوص شیوه های

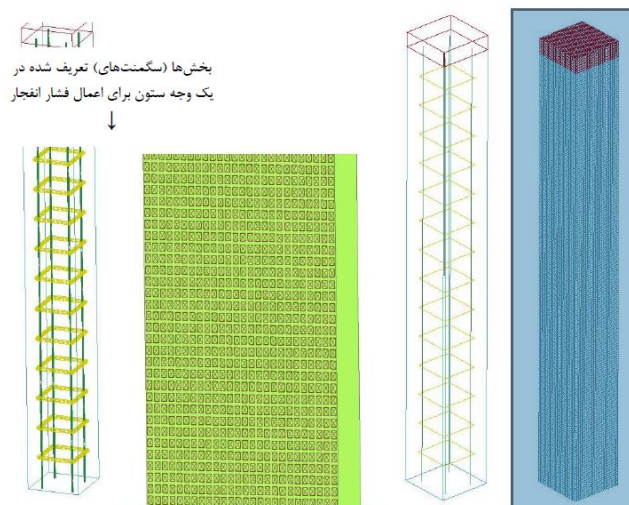
تحلیل دقیق ضربه به کمک مدل های المان محدود و مدل های مصالح صحیح جهت برآورد عملکرد سازه بتنی، درستی نتایج تحلیل را پیگیری می کند. چنانچه تحلیل ها معتبر باشد، به عنوان جایگزینی برای آزمایش های پرهزینه ضربه سازه مورد استفاده قرار می گیرد. به علاوه حتی زمانی که تسهیلات آزمایش ویژه و منابع مرتبط در اختیار باشد، از طریق چنین آزمایشات عملی بعضی شرایط و آمار راحت تر به دست می آید. به همین جهت ایجاد ابزارهای اثربخش تحلیل برای ساختمان های بتنی اصلاح شده و نوساز تحت اثر بارگذاری انفجار برای پیش بینی عملکردهای سازه ای، انتخاب مصالح اصلاح شده بهینه و اطمینان از حالت گسیختگی مطلوب، لازم و ضروری است [۲].

اسمائیلی نیا و ملایی [۳] به بررسی و ارزیابی تخمین پاسخ ستون های بتن آرمه تحت اثر بارگذاری انفجار به شیوه تک درجه آزادی معادل و مقایسه آن با روش المان محدود پرداختند در این تحقیق به توصیف راهکاری ساده جهت در نظر گرفتن پاسخ $P-\delta$ و همین طور اثرات نرخ کرنش (که در بارگذاری های دینامیکی شدید بسیار با اهمیت هست) در تحلیل $SDOF$ ستون های بتن آرمه تحت اثر هم زمان بار جانبی و بار محوری فشاری حاصل از انفجار پرداخته شده است. پاسخ های حاصل از روش $SDOF$ با تحلیل المان محدود با استفاده از نرم افزار $LS-DYNA$ مقایسه می گردد.



شکل ۱- مدل ستون تغییر شکل یافته تحت انفجار

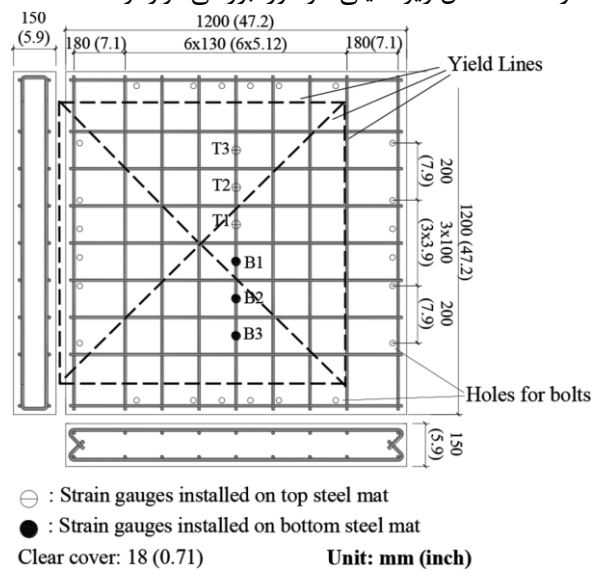
در اینجا، در طول مراحل حل معادلات حرکت سیستم $SDOF$ گشتاورهای ثانویه به شیوه بار جانبی معادل و اثرات نرخ کرنش به شکل ضرایب افزایش دینامیکی به محاسبات وارد شده است. بر اساس نتایج به دست آمده روش معرفی شده مطابقت خوبی با نتایج حاصل از نرم افزار المان محدود دارد. به صورت کلی، نتایج به دست آمده از روش $SDOF$ معرفی شده محافظه کارانه است و برای اهداف طراحی و ارزیابی اولیه ستون های بتن آرمه تحت اثر انفجار روش مناسبی هست.



شکل ۲- مدل اجزای محدود ستون بتن مسلح در $LS-DYNA$

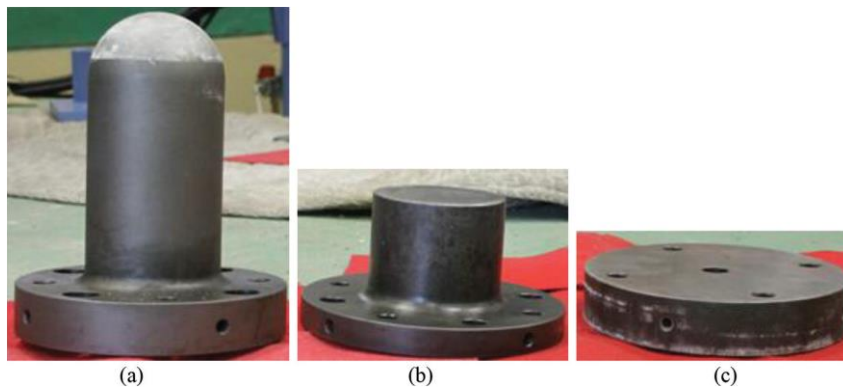
این تحقیق به منظور اجرای اصلاحاتی در حل معادلات سیستم یک درجه آزادی ($SDOF$) برای ستون‌های بتن‌آرمه باهدف در نظر گرفتن اثرات نرخ کرنش و بارمحوریا نرخ بارگذاری (بالا تحت اثر بارگذاری‌های دینامیکی شدید مانند انفجار، تهیه شده است. روش عنوان شده در اینجا ساده بوده و هدف ارزیابی اولیه و طراحی اعضای سازه‌ای تحت اثر انفجار جانبی مدنظر بوده است. هدف اصلی مقایسه‌ی میزان حداکثر تغییر شکل جانبی محاسبه شده در مدل $SDOF$ با استفاده از نتایج تحلیل المان محدود دینامیکی ($LS-DYNA$) هست. بر اساس نتایج به دست آمده، روش‌های ساده‌ی به استفاده شده در این تحقیق به منظور در نظر گرفتن اثرات $P-\delta$ و نرخ کرنش در تحلیل $SDOF$ ستون‌های بتن‌آرمه، یعنی روش (ELL) بار جانبی معادل (و همچنین محاسبه نمودن نرخ کرنش در گام‌های محاسباتی این تحلیل، نسبت به تحلیل به روش $LS-DYNA$ از مطابقت خوبی برخوردار است [۳].

سیو و همکاران [۴] رفتار دال‌های بتن مسلح تحت ضربه با سرعت کم را مورد بررسی قرار دادند. در این مقاله یک دال بتنی با ابعاد ۱۲۰۰ در ۱۲۰۰ در ۱۵۰ (شکل زیر) میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۳ - جزئیات مدل آزمایشگاهی [۴]

تعداد کل مدل‌های انجام شده ۱۵ عدد هست. ضربه اعمالی به کلیه مدل‌ها از نوع سرعت پایین با استفاده از سه نوع چکش ضربه زن (شکل زیر) هست.



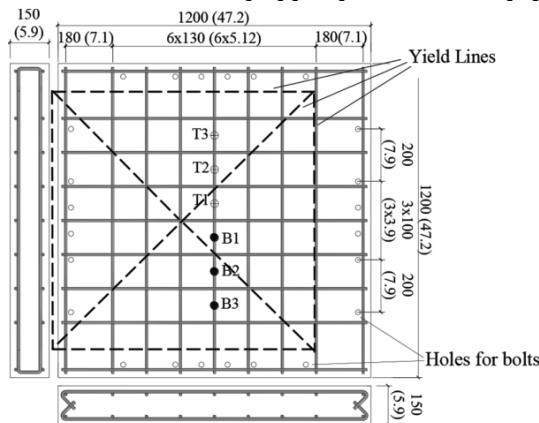
شکل ۴ - چکش‌های اعمال ضربه به دال بتنی

نوع چکش‌های ضربه زن به ترتیب به این صورت است که یکی محل بر خود آن‌ها به صورت استوانه‌ای و دو حالت دیگر

صورت تخت ولی با مساحت مختلف اعمال شد. متغیرهای این مقاله شامل فاصله چکش تا سقف، وزن چکش و نوع چکش ضربه زن معرفی شده است. وزن این چکشها در سه حالت ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ کیلوگرم هست. فاصله چکش تا سطح دال در ۵ حالت ۰.۴۸، ۱.۲، ۱.۳۳، ۲، ۳ متر در نظر گرفته شده است. محل برخورد ضربه در وسط دال هست و تعداد ۶ عدد استرین گیج در هر مدل قرار داده شده که ۳ عدد در بالای دال و ۳ عدد در قسمت زیرین دال کار گذاشته شده.

۲. صحت سنجی مدل عددی

در این مقاله به بررسی تاثیر ضربه بر روی دالهای بتنی پرداخت شده است. به همین منظور برای انجام تحلیل های اجزا محدودی از نرم افزار آباکوس استفاده شد. در این قسمت صحت سنجی مدل آباکوس با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی انجام گرفته است. در شکل زیر مدل صحت سنجی مورد نظر را نشان می دهد. در این مدل آزمایشگاهی یک دال بتنی با ابعاد نشان داده شده در شکل زیر در آزمایشگاه تحت ضربه قرار گرفته است:



- : Strain gauges installed on top steel mat
● : Strain gauges installed on bottom steel mat
Clear cover: 18 (0.71) Unit: mm (inch)

شکل ۵ - جزئیات مدل آزمایشگاهی [۴]

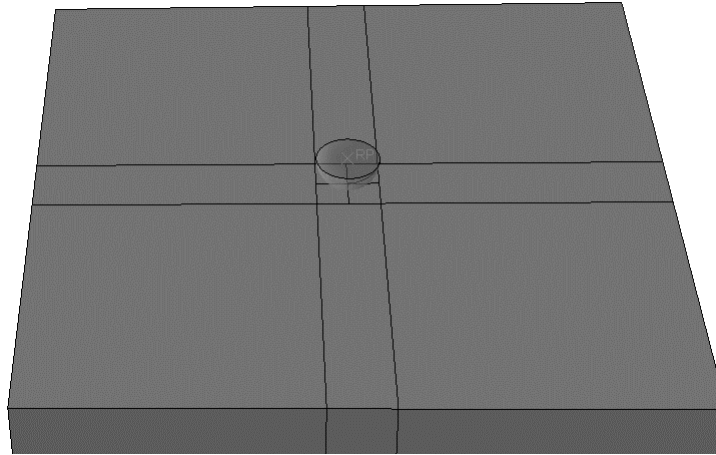
در جدول زیر جزئیات نمونه های مورد بررسی در آزمایشگاه نشان داده شده است. برای صحت سنجی از مدل اول ارائه شده در این جدول استفاده شد که بر روی جدول زیر این نشان داده شده است. به همین ترتیبی گلوله به جرم ۲۰۰ کیلوگرم برای اعمال ضربه در نظر گرفته شده و همچنین سرعت لحظه برخورد نیز ارائه گردیده است.

جدول ۱- جزئیات مدل آزمایشگاهی [۴]

Designation of test	M_i , kg (lb)	h_i , m (ft)	V_i , m/s (ft/s)	E_i , J (ft lbf)	M_0 , kg m/s (lbf s)	d_i , cm (in.)	Nose shape
10H-a	200 (441)	3 (9.84)	7.67 (25.2)	5886 (4341)	1534 (345)	10 (3.94)	Hemispherical
10H-b	300 (661)	2 (6.56)	6.26 (20.5)	5886 (4341)	1878 (423)		
10H-c	300 (661)	1.33 (4.36)	5.11 (16.8)	3914 (2886)	1534 (345)		
10H-d	500 (1102)	1.2 (3.94)	4.85 (15.9)	5886 (4341)	2425 (546)		
10H-e	500 (1102)	0.48 (1.57)	3.07 (10.1)	2354 (1736)	1534 (345)		
10F-a	200 (441)	3 (9.84)	7.67 (25.2)	5886 (4341)	1534 (345)	10 (3.94)	Flat
10F-b	300 (661)	2 (6.56)	6.26 (20.5)	5886 (4341)	1878 (423)		
10F-c	300 (661)	1.33 (4.36)	5.11 (16.8)	3914 (2886)	1534 (345)		
10F-d	500 (1102)	1.2 (3.94)	4.85 (15.9)	5886 (4341)	2425 (546)		
10F-e	500 (1102)	0.48 (1.57)	3.07 (10.1)	2354 (1736)	1534 (345)		
20F-a	200 (441)	3 (9.84)	7.67 (25.2)	5886 (4341)	1534 (345)	20 (7.87)	Flat
20F-b	300 (661)	2 (6.56)	6.26 (20.5)	5886 (4341)	1878 (423)		
20F-c	300 (661)	1.33 (4.36)	5.11 (16.8)	3914 (2886)	1534 (345)		
20F-d	500 (1102)	1.2 (3.94)	4.85 (15.9)	5886 (4341)	2425 (546)		
20F-e	500 (1102)	0.48 (1.57)	3.07 (10.1)	2354 (1736)	1534 (345)		

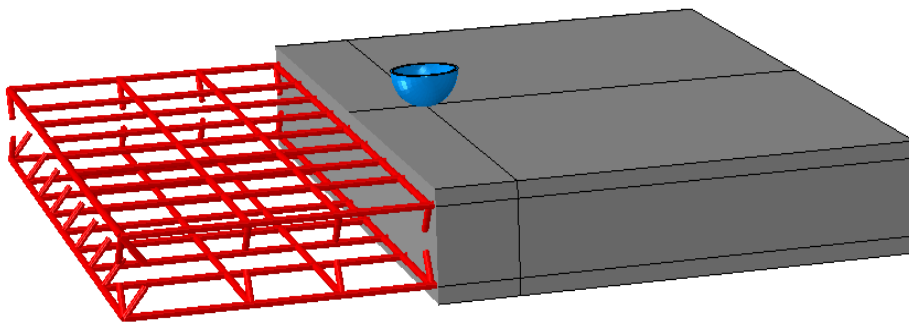


مدل سازی نمونه آزمایشگاهی به صورت شکل زیر در نرم افزار آباکوس معرفی شد. برای مدلسازی سقف بتنی از المان *solid*، برای مدلسازی میلگردهای آن از المان *truss* و همچنین از یک المان صلب به صورت *shell* برای مدلسازی چکش استفاده شد.



شکل ۶ - جزئیات مدل عددی

در شکل زیر آرماتور بندی دال بتنی را نشان می دهد که در دو لایه انجام گرفته است.

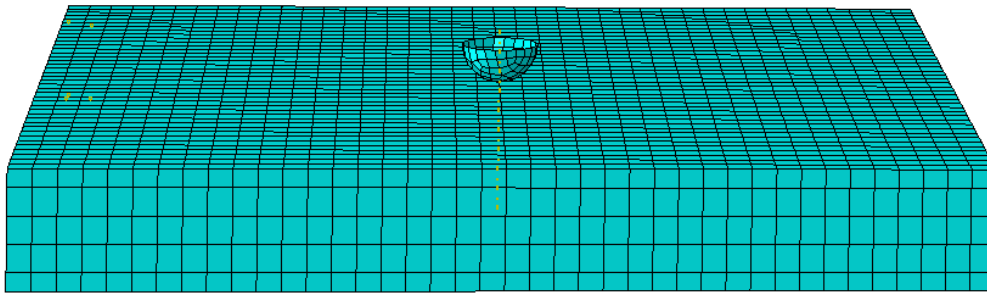


شکل ۷ - مدل عددی آرماتور گذاری

به منظور افزایش دقت تحلیل و همچنین کاهش زمان آن، مدل دال به شکلی خاص مش بندی شده است، که در آن در ناحیه برخورد با چکش، ابعاد مش کوچکتر از بقیه حالتها در نظر گرفته شده است. این اقدام بهبود در نتایج تحلیلی به دست آمده از مدل دال می تواند به ارمغان آورد.

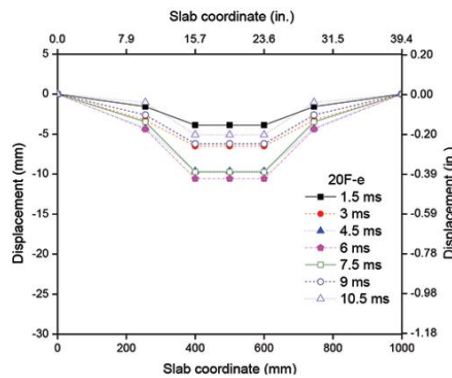
تحلیل مدل دال با استفاده از نرم افزار آباکوس با حلگر *Explicit* انجام شده است. در این تحلیل، تاریخچه جابجایی بخش زیرین دال در محل اعمال ضربه تا زمان $0/007$ ثانیه استخراج شده است، زیرا حداکثر جابجایی دال در این زمان به وقوع پیوسته است.

این روش تحلیلی از حلگر *Explicit* برای انجام تحلیل های دینامیکی موثر است و به دلیل مشخص کردن منطقه حساس تر در ناحیه ضربه، دقت تحلیل بهبود می یابد. همچنین، با مشخص کردن زمان استخراج نتایج جابجایی در لحظه حداکثر جابجایی دال، زمان محاسبات نیز بهبود می یابد.



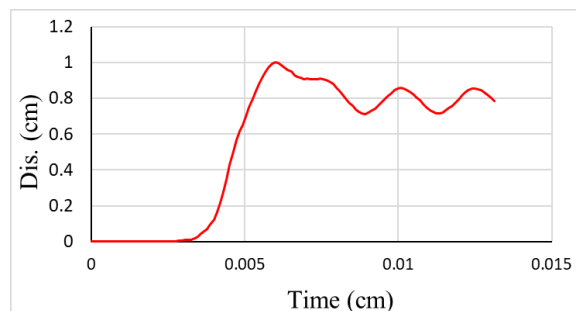
شکل ۸- مدل مش بندی شده

یکی از نتایج آزمایشگاهی مربوط به جابجایی در زمان های بعد از اعمال ضربه، در شکل زیر به نمایش درآمده است. این نتایج حاکی از آن است که حداکثر جابجایی دال برابر با ۱۱ میلی متر بوده و در زمان شش هزارم ثانیه بعد از وارد شدن ضربه چکش به وقوع پیوسته است. به منظور ارزیابی و تأیید صحت جابجایی ناحیه زیرین محل برخورد چکش با دال، تاریخچه جابجایی در نرم افزار آباکوس استخراج شده است.



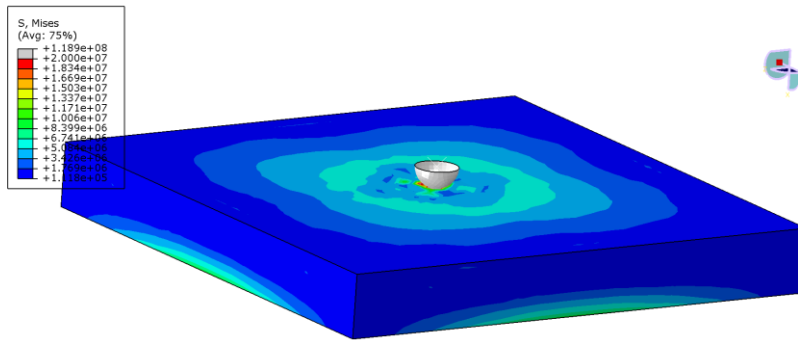
شکل ۹- جابجایی دال بعد از ضربه در زمان های مختلف

شکل زیر تاریخچه جابجایی بخش زیرین دال پس از اعمال ضربه را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود جابجایی حداکثر دال برابر یک سانتی متر به دست آمده و در زمان تقریباً شش هزارم ثانیه اتفاق افتاده است که با دقت قابل قبولی به نتایج مدل آزمایشگاهی نزدیک است.



شکل ۱۰- تاریخچه جابجایی دال تحت ضربه خروجی مدل عددی

شکل زیر کانتور تنش دال بتنی در لحظه جابجایی حداکثر را نشان می دهد.



شکل ۱۱- کانتور تنش مدل عددی

۳. معرفی مدل اصلی

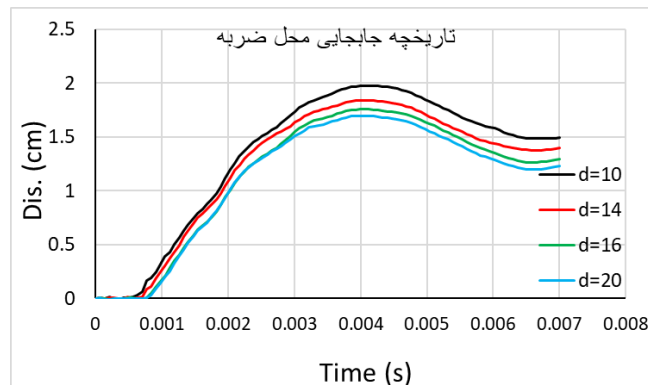
متغیرهای مدل های اصلی در این تحقیق شامل قطر میلگرد های به کار رفته شده در آن ها می باشد. ابعاد مدل مدال به کار رفته شده در حالت جدید به صورت مربع با ضلع یک متر در نظر گرفته شد. پوشش بتن از طرفین دال برابر ۲/۵ سانتیمتر و همچنین فواصل بین میلگرد ها نیز به صورت شکل زیر معرفی می شود.

$$5\phi d @ 23.75cm$$

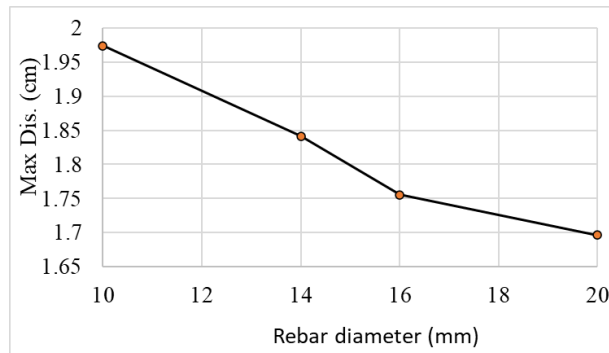


شکل ۱۲- معرفی مدل اصلی

پس از تحلیل مدل های اصلی نتایج تاریخچه جابجایی بخش زیرین دال در همه مدل ها استخراج گردید که در شکل زیر نمایش داده شده است.

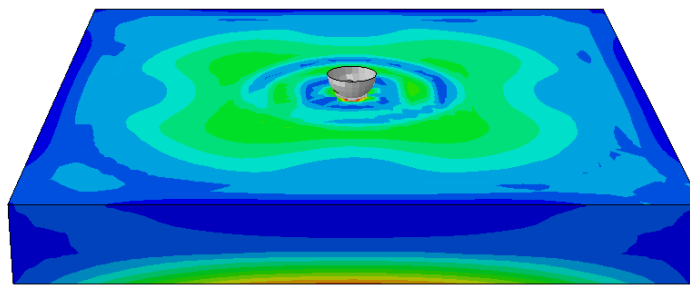


شکل ۱۳- تاثیر قطر خاموت بر تاریخچه جابجایی ضربه

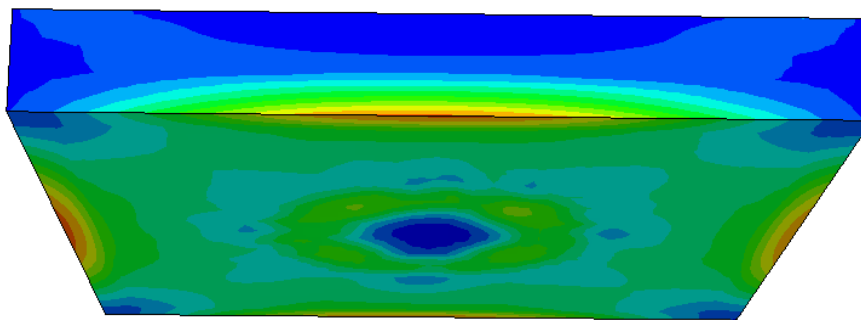


شکل ۱۴- تاثیر قطر خاموت بر حداکثر جابجایی

پس از انجام تحلیل کلیه مدل ها، کانتور تنش چند نمونه از آن ها در شکل های زیر نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود برای هر دو سمت محل برخورد چکش و سمت دیگر آن نتایج ارائه شده است. طبق این شکل ها می توان نحوه انتشار تنش در مدل و همچنین حداکثر آن را مشاهده کرد.



شکل ۱۵- کانتور تنش مدل



شکل ۱۶- کانتور تنش مدل

۴. نتیجه گیری

در این تحقیق، تأثیر ضربه بر روی دال های بتنی مورد بررسی قرار گرفته است. پارامتر اساسی که بر رفتار دال ها تحت ضربه ها تأثیر دارند، قطر آرماتور می باشند. به منظور محاسبه میزان تأثیر این پارامتر، تحلیل های عددی با استفاده از نرم افزار آباکوس بر روی دال های بتنی تحت ضربه انجام گرفته است. ابتدا، به منظور اعتبارسنجی نتایج مدل عددی، از یک مدل آزمایشگاهی برای صحت سنجی استفاده شد و حداکثر جابجایی دال مدل عددی با مقدار مشابه در مدل آزمایشگاهی مقایسه شد. نتایج نشان داد که نتایج مدل عددی با مدل آزمایشگاهی به صورت قابل قبولی نزدیک است. سپس، مدل های اصلی برای



بررسی تأثیر قطر آرماتور معرفی شد. این مدل‌ها شامل ۴ عدد دال بتنی با ابعاد یک متر در یک متر در نظر گرفته شد. ضخامت دال‌ها در برابر ۱۰ سانتی‌متر و همچنین قطر میلگردها در چهار حالت ۱۰، ۱۴، ۱۶ و ۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. سپس تحلیل‌های دینامیکی بر روی این دال‌ها انجام گرفت. در این تحلیل‌ها، مشخصات آنها و همچنین شدت ضربه با مقدار مشابه در مدل آزمایشگاهی در نظر گرفته شد. پس از استخراج و مقایسه نتایج مشاهده شد که افزایش قطر میلگردها از ۱۰ به ۱۴ میلیمتر موجب کاهش ۷٪ جابجایی حداکثر دال شد. همچنین با تغییر قطر خاموت از ۱۰ به ۲۰ میلیمتر ۱۶٪ جابجایی حداکثر دال کاهش پیدا کرد.

1. H. Jahangir, M.R. Moarefzadeh, Damage Evaluation of RC Columns strengthened with Novel Fiber Composites under Blast Loads using Pressure – Impulse Diagrams, Journal of Structural and Construction Engineering 6(Special Issue 4) (2019) 181-204. 10.22065/jsce.2018.116964.1445.
2. Y. Tai, T. Chu, H. Hu, J. Wu, Dynamic response of a reinforced concrete slab subjected to air blast load, Theoretical and applied fracture mechanics 56(3) (2011) 140-147.
3. M. Esmail Nia Omran, S. Mollaei, Estimation of RC columns' response under the effect of lateral blast loading by SDOF method and comparison with FEM, Journal of Structural and Construction Engineering 4(3) (2017) 81-90. 10.22065/jsce.2017.75048.1063.
4. Y. Xiao, B. Li, K. Fujikake, Behavior of reinforced concrete slabs under low-velocity impact, ACI Structural Journal 114(3) (2017) 643.