

بررسی اثر لایه ماسه بر عملکرد دینامیکی یک دال بتنی مسلح دوطرفه تحت اثر انفجار نزدیک

سارا بهمن اورامانی^۱، حمید تویچی نژاد^۲.

۱- کارشناس ارشد سازه دانشگاه رازی کرمانشاه

۲- استادیار مهندسی عمران دانشگاه رازی کرمانشاه

Email: sarabahmani@ymail.com

چکیده

هدف اصلی تحقیق حاضر، افزایش مقاومت دال های بتن مسلح در برابر انفجار با استفاده از لایه پوشش ماسه ای می باشد. استفاده از لایه پوشش دهنده ماسه ای با توجه به ارزانی مصالح و سادگی اجرا به عنوان یک روش مناسب شناخته شده می باشد. در این تحقیق به منظور صحت سنجی مدلسازی اجزا محدود از نتایج آزمایشگاهی موجود در ادبیات استفاده شده است. جهت بررسی دقیق تاثیر ضخامت لایه محافظ ماسه بر رفتار دال بتن مسلح، دال با ضخامت های متفاوت لایه ماسه با استفاده از تحلیل دینامیکی درگیر نرم افزار اجزا محدود Autodyn مورد مطالعه قرار گرفته است. پارامترهای مورد بررسی شامل کاهش ترک های شعاعی، پوسته شدگی و جوه فوقانی و تحتانی دال و همچنین کاهش حداکثر میزان تغییر مکان مرکز دال است. نتایج این تحقیق منجر به تعیین ضخامت بهینه لایه ماسه برای تامین عملکرد مورد نظر دال پهنکام انفجار می باشد.

کلمات کلیدی: بارگذاری انفجاری، تحلیل درگیر، دال بتن مسلح، ماسه، سطح خسارت.

۱. مقدمه

پاسخ سازه ها تحت بارگذاری دینامیکی یکی از موضوعات مورد علاقه ی رو به رشد در دهه های اخیر است. کوتاه بودن مدت زمان بارهای شدید مانند بار ضربه یا انفجار معمولاً سبب پاسخ موضعی سازه می شود. خسارات مشاهده شده پس از انفجار در اجزای سازه ای معمولاً از نوع شکست ترد است [۱]. در صورت عدم مقاومت کافی اجزای سازه ای، آسیب یک جز می تواند سبب فروپاشی کل سازه شود [۲]، که در حال حاضر این موضوع یک نگرانی مهم برای مهندسين و محققان سازه ها محسوب می شود. برای انجام تجزیه و تحلیل و طراحی محافظ منطقی از سازه ها در برابر انفجارهای تصادفی یا ناشی از حمله دشمن، درک دامنه بارگذاری انفجار و نحوه توزیع آن بر روی سازه مهم است. تاکنون، بیشتر اطلاعات مربوط به بارهای انفجاری که نیمه تجربی هستند و بیشتر پارامترهای بارگذاری انفجار (شامل حد فشار انفجار و ضربه) در برابر حد فاصله مقیاس انفجار ($Z = R / W^{1/3}$) به عنوان راهنما در UFC 3-340-02 [۳] اترسیم شده اند. دامنه و توزیع بارهای انفجار هوایی تابعی از نوع، وزن و شکل، فاصله و محل ماده منفجره نسبت به سازه، و

اندرکنش جبهه شوک با زمین و سازه ی هدف است. هنگامی که ماده منفجره در نزدیکی یا در تماس با سازه قرار دارد، بارگذاری روی سازه ناشی از این سناریوهای انفجار خیلی شدید و پیچیده هستند [۴]. در صورت وقوع انفجار تماسی، معمولاً اجزا سازه ای دچار خرابی موضعی (مانند خرابی خردشدگی و پوسته شدگی) بیشتری می شوند و این خرابی ها ناشی از انتشار موج تنش بیشتر از تغییر شکل خمشی و برشی سراسری است.

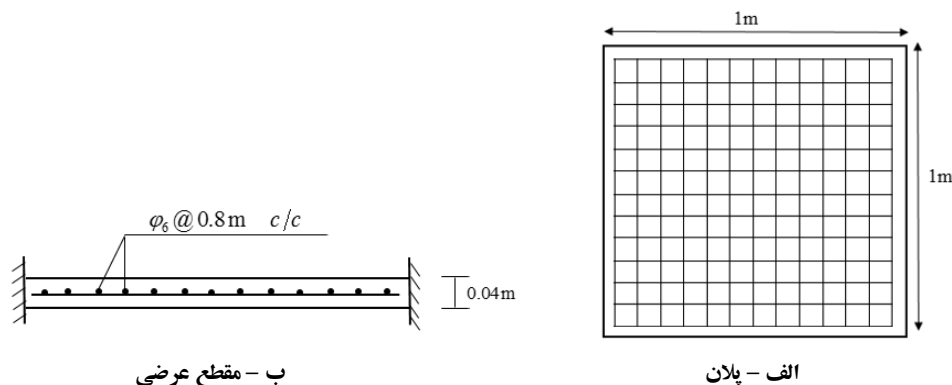
به محض انفجار، موج تنش فشاری عبوری از سطح بتن شدت بالایی دارد که از مقدار مقاومت فشاری دینامیکی بتن فراتر رفته و سبب خردشدگی بتن می شود. هنگام انفجار، انتشار موج تنش فشاری به داخل سازه سبب ضربه به سطح آزاد بتن شده، که این اتفاق سبب انعکاس موج و تبدیل آن به موج تنش کششی می شود. در یک عمق مشخص از بتن اگر تنش حاصله از مقاومت دینامیکی کششی بتن بیشتر شود، پوسته شدگی بتن آغاز می شود. به طور کلی، پوسته شدگی بتن ناشی از عدم کفایت مقاومت ظاهری ضربه آن در طی انتشار موج است، و وابسته به مقاومت مواد، تخلخل، فاصله آرماتورها و دیگر عوامل است در حالی که نسبت به سختی کلی سازه و شرایط مرزی غیر حساس است. راه حل های تحلیلی برای بررسی شکست های سازه ای ناشی از موج تنش، پیچیده است. تحلیل های موجود [۵-۷] بر مبنای ساده سازی است که در آن ها از تأثیر پراکندگی موج صرف نظر می شوند. McVay [۸] یک رویکرد تجربی برای تعیین اینکه در کجا موج تنش باعث ترک کششی بتن می شود پیشنهاد کرد. Wang و همکاران [۹] آزمایش انفجاری نزدیک را روی دال های بتنی مسلح انجام دادند و آسیب های پوسته شدگی در شدت های مختلف را مشاهده کردند. Shi و همکاران [۱۰] تأثیر شکل ماده منفجره بر روی آسیب پوسته شدگی دال بتنی را درحالی که جرم ماده منفجره TNT بدون تغییر باشد بررسی کردند و مشاهده کردند که افزایش نسبت ارتفاع / قطر ماده منفجره TNT استوانه ای شکل موجب افزایش قابل توجه پوسته شدگی دال بتن مسلح (RC) می شود. علاوه بر آسیب های سازه ای و پوسته شدگی بتن، قطعات متلاشی شده تولید شده در طی خرابی بتن نیز از اهمیت زیادی برخوردار می باشند، زیرا زیاد بودن سرعت پرتاب این قطعات سبب تلفات شدید و خسارت های مالی می شوند. مقاله فنی [۱۱] روش های جزئی ای را برای جمع آوری، تجزیه و تحلیل خرده قطعات ایجاد شده در اثر انفجار را ارائه می دهد. Wu و همکاران [۱۲] یک تحلیل غربالگری برای بررسی توزیع اندازه قطعات خرد شده ناشی از قرارگیری نمونه های بتنی تحت انفجار نزدیک را انجام دادند. Hao و Zhou [۱۳] برای تجزیه و تحلیل آسیب و تکه تکه شدن دال بتنی تحت انفجار تماسی، مدل مزوزا (mesoscale) را ایجاد کردند. در این مدل روند آسیب دینامیکی دال بتنی تحت خرج انفجاری تماسی، شبیه سازی شده و توزیع اندازه قطعه ها تخمین زده می شود. تا به حال، انواع رویکردهای عددی شامل شبیه سازی عددی انفجار و مهمتر از آن، قطعات خرد شده تولیدی ناشی از انفجار بیان شد. هنگام استفاده از روش معمول اجزا محدود برای این هدف، زمانی که حد خرابی به حد شکست داده شده به نرم افزار فرارسد المان های لاگرانژی اغلب حذف یا تخریب می شوند تا از بروز تخریب کلی اجتناب شود. در مطالعات اخیر از روش های دقیق تر از جمله روش المان محدود مرزی [۱۴] و روش المان گسسته [۱۵] برای شبیه سازی تغییر شکل دینامیکی مواد تردی مانند بتن استفاده شده است.

ماسه یک ماده متخلخل می باشد و بیشتر مطالعاتی که بر روی شن و ماسه در بحث اثر آن بر بارگذاری انفجار انجام شده است در مورد میدان های مین و تأثیر شن و ماسه بر بارگذاری انفجار بوده است. شرایط عمق مین در شن و یا ماسه، میزان رطوبت آن و سایر خصوصیات خود ماده ای که مین در آن مدفون بوده است مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعات متعددی در زمینه تأثیر آب موجود در خاک بر روی پدیده انفجار مین توسط Fiserova [16]، Grujicic و همکاران [۱۷] انجام شده است. تمام این مطالعات نشان می دهد که آب موجود در خاک و یا ماسه تأثیر بسزایی در بارگذاری انفجار دارد و ترکیب ماسه به نسبت در مقایسه با آب تأثیر کمتری در بارگذاری انفجار دارد. درجه اشباع آب تأثیر چشمگیری در نرخ های بالای تغییر شکل دارد، به عبارت دیگر در هنگام انفجار به علت اینکه ذرات ماسه تمایل به تراکم داشته و در اثر اشباع بودن با آب جایی برای رفتن ندارند مقدار زیادی از انرژی جذب می شود. در ماسه اشباع جایی برای تراکم ذرات وجود ندارد. بنابراین انرژی کمتری در هنگام تراکم از دست می رود. مدل ماسه در نرم افزار AUTODYN توسط Laine و همکاران [۱۸] انجام گرفت. معادله حالت استفاده شده برای ماسه compaction بوده و براساس ده نقطه قطعه ای خطی و رابطه بین فشار و دانسیته بیان می شود. این مدل برای ماسه ای با درصد رطوبت ۶/۷٪ بیان شده است که در کتابخانه نرم افزار AUTODYN موجود می باشد. از آن جایی که این مدل امکان تغییرات در رطوبت را ندارد، مدل دوم برای ماسه رس دار اشباع برای مقایسه با نتایج آزمایشگاهی توسط Grujicic بیان شد. مدل دیگر ماسه مرطوب توسط Grujicic [۱۹] جهت اهداف مقایسه ای بیان شد.

در مطالعه حاضر، رفتار دینامیکی یک دال بتن مسلح دوطرفه مقاوم سازی شده تحت اثر بارهای انفجاری با استفاده از نرم افزار المان محدود Autodyn [۲۰] به روش تحلیل دینامیکی درگیر مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی این تحقیق محاسبه ضخامت بهینه ماسه برای مقاوم سازی دال بتن مسلح دو طرفه مورد مطالعه می باشد.

۲. شبیه سازی عددی

دال بتن مسلح استفاده شده دارای ابعاد $1 \times 1 \times 0.04$ m بوده که در شکل ۱، نشان داده شده است. صحت سنجی مدل سازی در تحقیق پیشین [۲۱] انجام شده است که نتایج قابل قبولی را در پی داشته است. در مرکز دال یک شبکه آرماتور متصاعد با قطر 0.006 m قرار گرفته و پوشش بتنی دال 0.020 m می باشد. فواصل مرکز به مرکز میلگردهای شبکه در هردو صفحه اصلی و فرعی خمش 0.8 m بوده که در اینصورت نسبت آرماتورها $1/43$ است. مقاومت فشاری نمونه استوانه ای بتن برابر $39/5$ MPa و مقاومت کششی بتن $3/25$ MPa و همچنین مدول الاستیسیته بتن برابر $E_C = 28/3$ GPa اندازه گیری شده است. آرماتورهای استفاده شده دارای تنش تسلیم 300 MPa و مدول الاستیسیته فولاد $E_{St} = 200$ GPa بوده اند.



شکل ۱- هندسه ونحوه آرماتور گذاری دال بتنی مورد آزمایش .

در این تحقیق جهت مدل سازی عددی از خرج انفجاری معادل خرج یک نارنجک دستی (۱۷۰ گرم TNT) استفاده می شود [۲۲]. ماده انفجاری TNT توسط ریسمان در بالای دال و درست در مرکز آن قرار داده شده است. فاصله سطح زیرین ماده منفجره تا بالای سطح دال بتنی 0.3 m در نظر گرفته شده است. دال از چهار طرف به وسیله تکیه گاه ها گیردار شده است. برای اندازه گیری تغییر شکل های ماندگار دال از سنجشگر اندازه گیری جابه جایی استفاده بعمل آمده است.

۱.۲. مصالح

۱.۱.۲. بتن

در مدل سازی رفتار بتن در برابر بارگذاری انفجار، استفاده از مدل مناسبی که قادر به شبیه سازی رفتار ماده بتن در نرخ کرنش های بالا باشد حائز اهمیت است. در این تحقیق از معادله حالت p alpha و مدل RHT برای مدل خسارت دینامیکی بتن استفاده شده که مدل های مذکور در نرم افزار AUTODYN تعریف شده اند. مدل RHT عموماً برای مواد ترد به کار برده شده و مکانیزم هایی همچون سخت شدگی فشاری، سخت شدگی کرنشی، نرخ کرنش و خسارت تجمعی (نرم شدگی کرنشی) را لحاظ می نماید. این مدل حتی شامل معادله حالت p alpha برای تراکم حجمی می باشد. مدل مواد از سه سطح مقاومت به نام های سطح محدود الاستیک، سطح شکست و سطح مقاومت باقیمانده برای مواد خرد شده استفاده می کند. برای مدل سازی بتن از حلگر Lagrange استفاده می شود. این حلگر معمولاً برای مدل سازی جامدات استفاده می شود که در طی شبیه سازی گره ها همراه با ماده حرکت می کنند. همچنین معادله حالت p alpha، معادله مقاومت RHT و معادله شکست RHT برای مصالح بتن استفاده شدند. ابعاد المان های بتن نیز $0.125 \times 0.125 \times 0.0125$ m می باشد.

به دلیل شبیه سازی یک چهارم دال، محورهای تقارن این دال در دو جهت X و Z تعریف می شوند. لازم به ذکر است دال بتنی مورد مطالعه در این مقاله به صورت ۴ طرف گیردار مدل می شود. در مدل اجزا محدود برنامه Autodyn بر روی دال بتنی ده سنجشگر در فواصل مختلف برای به دست آوردن تغییر شکل ها و سایر اطلاعات مورد نیاز قرار داده شده است.

۲.۱.۲. فولاد

فولاد آرماتورها توسط مدل جانسون-کوک [۲۳] مدل سازی شده است که برای مدل نمودن رفتار مقاوم مواد تحت کرنش های بزرگ، نرخ های کرنش بالا و درجه حرارت بالا مناسب می باشد. ثابت های مواد در نظر گرفته شده در این تحقیق براساس اطلاعات مربوط به فولاد ۴۳۴۰ موجود در کتابخانه نرم افزار Autodyn است.

برای مدل سازی فولاد از حلگر Beam استفاده می شود. این حلگر عملکردی مشابه عملکرد تیر را برای میلگردها در نظر می گیرد. میلگردها در دو شبکه و در قسمت میانی ضخامت دال قرار داده می شوند. معادله حالت Linear و معادله مقاومت Johnson Cook برای فولاد استفاده شدند. فولاد در طول خود به المان های 0.1 m تقسیم شده است. در مدل اجزا محدود، آرماتورهای تقویتی در بتن محصور می شوند.

۳.۱.۲. هوا و ماده منفجره

هوا با استفاده از تعریف معادله حالت (EQS) گاز ایده آل که یکی از ساده ترین فرم های معادله حالت می باشد مدل شده است [۲۴]. ماده منفجره ANFO با استفاده از معادله حالت (JWL) مدل شده است که فشار تولید شده از یک انفجار را در اثر انرژی شیمیایی بیان می کند.

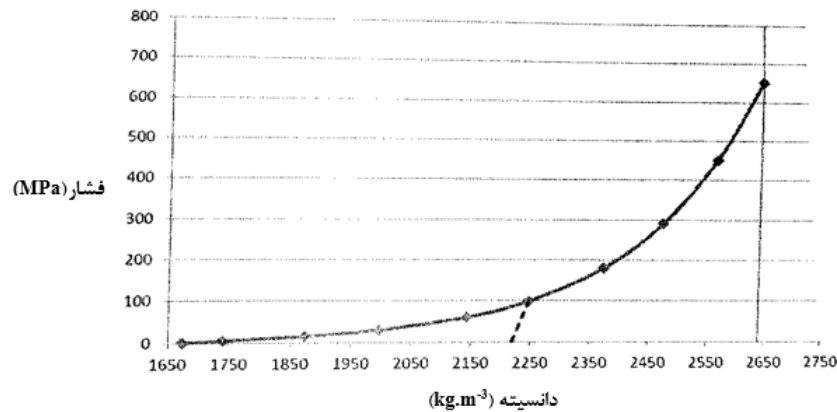
برای مدل سازی هوا از حلگر Euler-G استفاده می شود. برای مدل سازی ماده منفجره TNT از یک محیط مکعبی با اندازه های مشخص که از پر کردن المان های هوا توسط ماده منفجره ایجاد شده است استفاده می شود. در نتیجه حلگر ماده منفجره همان حلگر Euler-G است. چاشنی در مرکز ماده منفجره تعریف می شود. با تعریف مختصات نقطه انفجار و واگذاری انتخاب گام های زمانی به برنامه، تحلیل ها قابل انجام هستند. معادلات استفاده شده و ابعاد المان هوا و ماده منفجره در جدول ۱، ذکر شده است.

جدول ۱- معادلات و ابعاد المان هوا و ماده منفجره در مدل سازی.

مصلح	معادله حالت	معادله مقاومت	معادله شکست	ابعاد المان (m)
هوا	Ideal Gas	-	-	$0.07383 \times 0.07383 \times 0.125$
ماده منفجره	JWL	-	-	$0.07383 \times 0.07383 \times 0.125$

۴.۱.۲. ماسه

ماسه یک ماده متخلخل می باشد و نیاز به معادله حالتی برای در نظر گرفتن تخلخل آن دارد. معادله حالت استفاده شده برای ماسه معادله حالت compaction می باشد که منحنی فشار - دانسیته متناظر با آن، از برازش داده های آزمایشگاهی [۲۴] متناظر با ۱۰ نقطه فشار - دانسیته مختلف مطابق شکل ۲، به دست می آید.



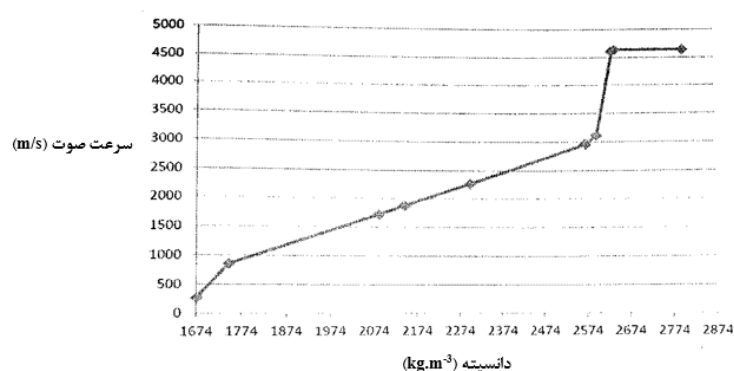
شکل ۲- نمودار پیش فرض برای معادله حالت compaction ماسه در نرم افزار AUTODYN [۲۴]

اولین نقطه نمودار شکل ۴، نشان دهنده ماسه نرم و آخرین نقطه نشان دهنده ماسه کاملاً متراکم با حداکثر مقدار دانسیته ممکن به لحاظ تئوریک (TMD) می باشد. بارگذاری و باربرداری الاستیک منحنی تراکم از دانسیته وابسته به سرعت صوت حجمی $c(\rho)$ به دست می آید:

$$K = c^2 \cdot (\rho) \cdot \rho_0 \quad (۱)$$

که در آن K مدول بالک، c سرعت صوت و ρ دانسیته ماسه می باشد.

رابطه بین دانسیته و سرعت صوت نیز به صورت منحنی خطی قطعه ای در نرم افزار AUTODYN مطابق شکل ۳، ارائه شده است.



شکل ۳- اطلاعات وارده تابع دانسیته-سرعت صوت حجمی $c(\rho)$ ماسه [۲۰].

در این تحقیق مدل مقاومت استفاده شده برای شبیه سازی رفتار ماسه از مدل مقاومت granular استفاده شده است [۲۵]. این مدل، رفتار خطی مواد تحت اثر کرنش منحرف شونده را بیان می کند. در این مدل فرض می شود که مدول برشی مواد بصورت غیرخطی از حالت نرم تا حالت کاملاً متراکم تغییر می کند. همچنین فرض می گردد که تنش تسلیم Y تابعی از فشار P و دانسیته ρ می باشد.

$$Y = F_1(\rho) + F_2(\rho) \quad (2)$$

رفتار غیرخطی مدول برشی مصالح نیز توسط منحنی به صورت قطعه ای خطی که مدول برشی با دانسیته تغییر می کند ارائه می شود [۲۴]. معیار گسیختگی در مدل مورد استفاده محدودیت فشار کششی می باشد. این کمترین فشاری است که ماده می تواند گسترش پیوسته را تحمل کند. اگر فشار ماده به کمتر از این حد برسد ماده دچار گسیختگی می شود.

$$\rho > \rho_{\min}^{\text{tensile}} = \text{constant} \quad (3)$$

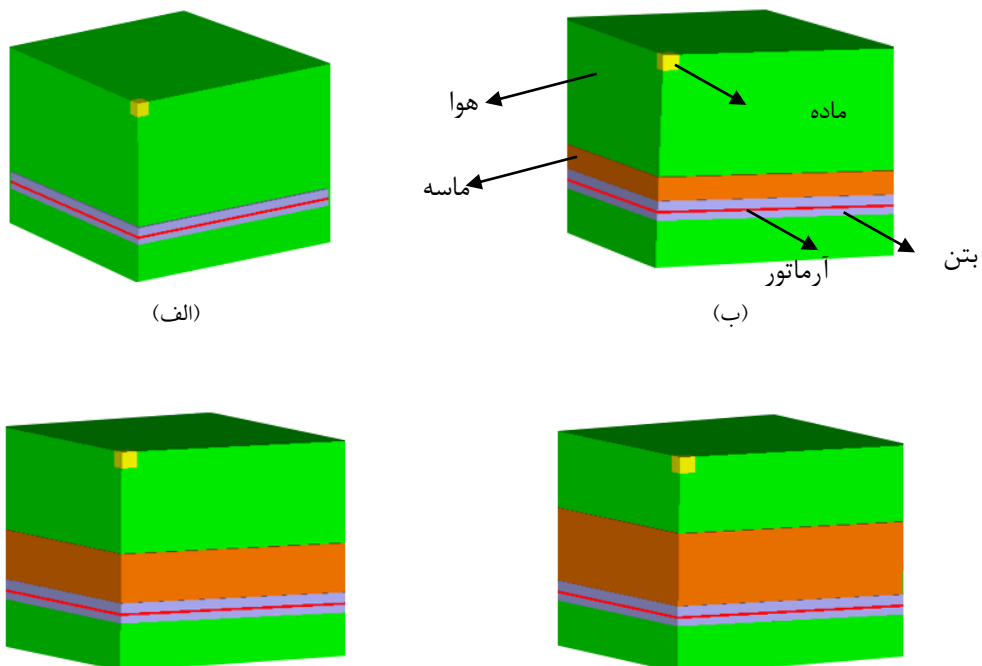
مشخصات ماسه موجود در کتابخانه نرم افزار AUTODYN برای ماسه ای با میزان رطوبت ۶/۵۷٪ می باشد که توسط Laine و همکاران [۲۲] ارائه شده است. مشخصات ماسه مورد استفاده در این مطالعه از نتایج آزمایش صورت گرفته [۲۴] استخراج می گردد.

۴.۱.۲. تعریف اندرکنش مصالح

با تعریف اندرکنش کامل میان محیط سیال - اوایل انفجار و محیط سازه - لاگرانژ دال و ماسه تحلیل اجزا محدود انجام می شود. مدل اجزا محدود شامل ماده منفجره، هوای اطراف دال، ماسه و خود دال بتنی می باشد.

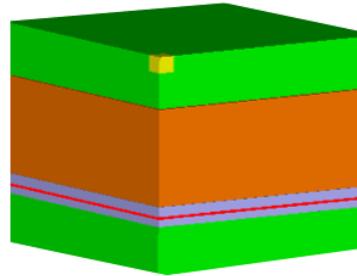
۲.۲. حالات مختلف مدلسازی

دال بتن مسلح پوشش داده شده در حالت های (الف) بدون لایه محافظ ماسه، (ب) با ۵۰ mm لایه محافظ ماسه، (ج) با ۱۰۰ mm لایه محافظ ماسه، (د) با ۱۵۰ mm لایه محافظ ماسه، (ه) با ۲۰۰ mm لایه محافظ ماسه مطابق شکل ۴، مدل سازی شده است. تکیه های دال مطابق شکل ۴-الف گیر دار می باشد که در شکل های ب و ج و د این تکیه گاه ها به جهت وضوح دیده شدن آرماتورهای دال در شکل نمایش داده نشده است. برای این منظور ضخامت لایه ماسه از ۵۰ mm شروع شده و در هر نوبت به اندازه ۵۰ mm تا جایی افزایش داده می شود که دیگر این افزایش سبب افزایش خسارت نسبت به مرحله ی قبل گردد. در این تحقیق حداکثر ضخامت در نظر گرفته شده برای لایه ماسه ۲۰۰ mm می باشد.



(ج)

(د)



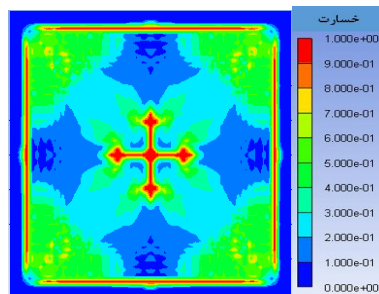
(ه)

شکل ۴- دال بتن مسلح در حالات (الف) بدون لایه محافظ ماسه، (ب) با ۵۰ mm لایه محافظ ماسه، (ج) با ۱۰۰ mm لایه محافظ ماسه، (د) با ۱۵۰ mm لایه محافظ ماسه، (ه) با ۲۰۰ mm لایه محافظ ماسه.

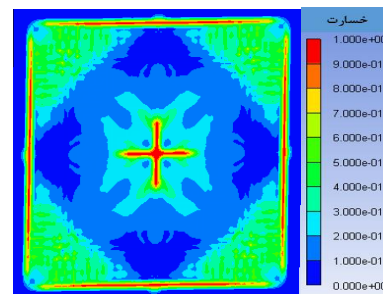
۳. نتایج شبیه سازی عددی

۳.۱. خسارت

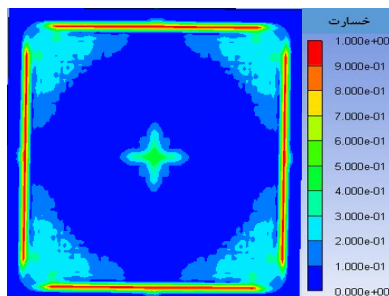
در شکل ۵، میزان خسارت وجه فوقانی دال در حالت های مختلف قابل مشاهده است.



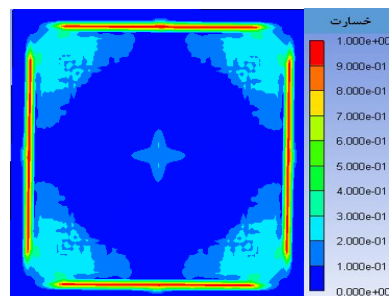
(الف)



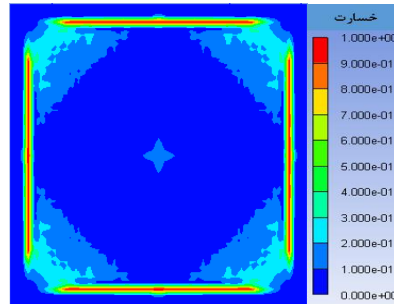
(ب)



(ج)



(د)

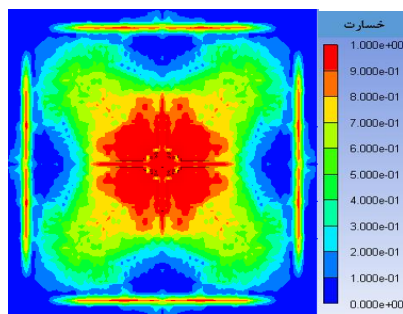


(ه)

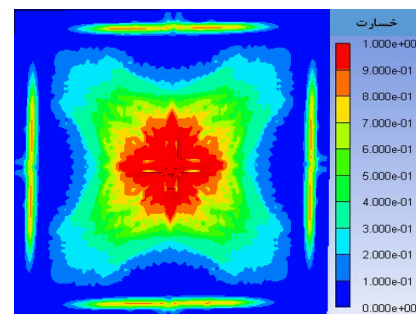
شکل ۵- خسارات وجه فوقانی دال بتن مسلح در حالات (الف) بدون لایه محافظ ماسه، (ب) با ۵۰ mm لایه محافظ ماسه، (ج) با ۱۰۰ mm لایه محافظ ماسه، (د) با ۱۵۰ mm لایه محافظ ماسه، (ه) با ۲۰۰ mm لایه محافظ ماسه.

مطابق شکل ۵، در حالت (الف) خسارت وجه فوقانی دال شامل ترک هایی در مرکز دال، ترک های شعاعی و هم چنین ترک های تکیه گاهی می باشد. در حالت (ب) خسارت کمتری نسبت به حالت الف ایجاد شده است. در حالت های (ج)، (د) و (ه) میزان خسارت مرکزی و وجوه تکیه گاهی دال نسبت به مرحله ی قبل خود کاهش می یابد.

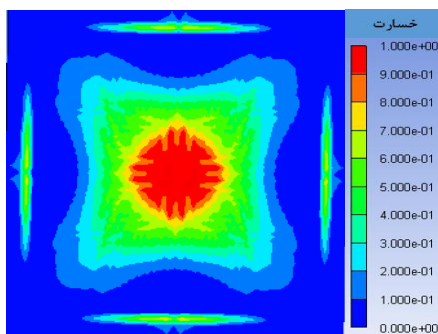
در شکل ۶، میزان خسارت وجه تحتانی دال در حالت های مختلف قابل مشاهده است.



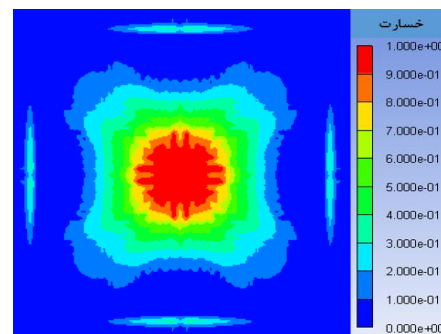
(الف)



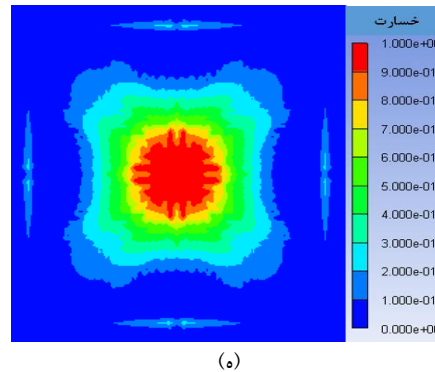
(ب)



(ج)



(د)



شکل ۶- خسارات وجه تحتانی دال بتن مسلح در حالات (الف) بدون لایه محافظ ماسه، (ب) با ۵۰ mm لایه محافظ ماسه، (ج) با ۱۰۰ mm لایه محافظ ماسه، (د) با ۱۵۰ mm لایه محافظ ماسه، (ه) با ۲۰۰ mm لایه محافظ ماسه.

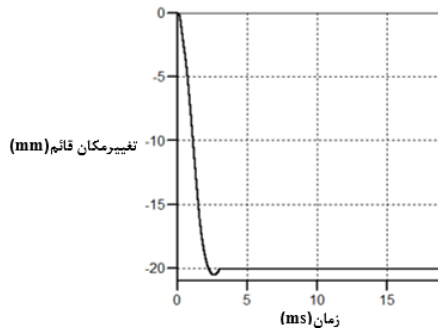
مطابق شکل ۶، در حالت (الف) خسارت پوسته شدگی با قطر ۳۵ mm ایجاد شده به نحوی که تنش حاصله تاثیر زیادی بر خسارت تکیه گاه های گیر دار داشته است و دال دچار یک خردشدگی جزئی در مرکز می شود. در حالت (ب) خسارت پوسته شدگی با قطر ۲۵ mm ایجاد شده به نحوی که تنش حاصله تاثیر کمتری بر خسارت تکیه گاه ها داشته است. در حالت (ج) خسارت پوسته شدگی با قطر ۱۷ mm ایجاد شده به نحوی که خسارت تکیه گاه ه ها نسبت به حالت (ج) کمتر است. در حالت (د) خسارت پوسته شدگی با قطر ۱۶ mm ایجاد شده به نحوی که تنش حاصله تاثیر کمی بر خسارت تکیه گاه ها داشته است. در حالت (ه) خسارت پوسته شدگی با قطر ۱۵ mm ایجاد شده به نحوی که تنش حاصله تاثیر جزئی بر خسارت تکیه گاه ها داشته است. قطر خسارت وجه تحتانی دال در حالت های مختلف و درصد کاهش قطر خرابی نسبت به دال مبنا در جدول ۲، به طور خلاصه بیان شده است.

جدول ۲- قطر خرابی وجه تحتانی دال ها و درصد کاهش شعاع خرابی نسبت به دال مبنا.

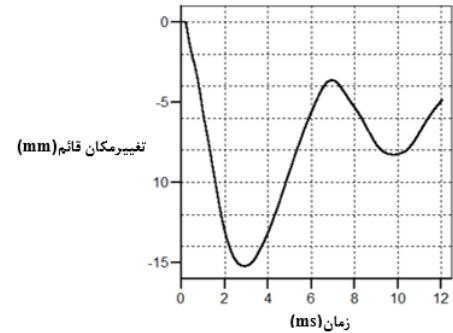
حالت	نوع دال	قطر پوسته شدگی وجه تحتانی دال (mm)	درصد کاهش قطر پوسته شدگی
الف	دال بدون لایه محافظ ماسه	۳۵	-
ب	دال با ۵۰ mm لایه محافظ ماسه	۲۵	۲۸/۶ %
ج	دال با ۱۰۰ mm لایه محافظ ماسه	۱۷	۵۱/۴ %
د	دال با ۱۵۰ mm لایه محافظ ماسه	۱۶	۵۴/۳ %
ه	دال با ۲۰۰ mm لایه محافظ ماسه	۱۵	۵۷/۱ %

۲.۳. پیشینه تغییر مکان مرکز دال

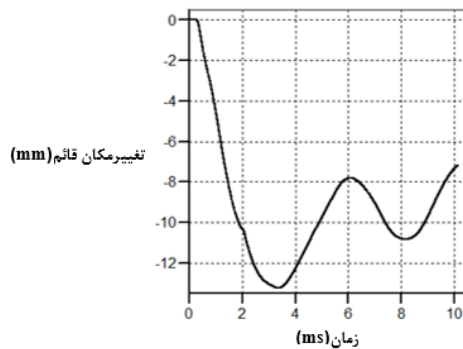
در شکل ۷، منحنی تاریخچه زمانی تغییر مکان مرکز دال در حالت های مختلف قابل مشاهده است.



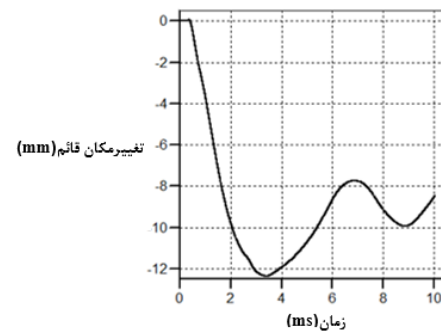
(الف)



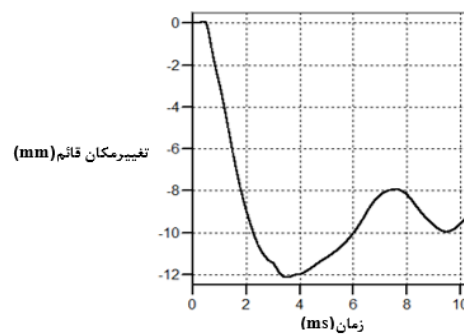
(ب)



(ج)



(د)



(ه)

شکل ۷- منحنی تاریخچه زمانی تغییر مکان مرکز دال بتن مسلح در حالات (الف) بدون لایه محافظ ماسه، (ب) با ۵۰ mm لایه محافظ ماسه، (ج) با ۱۰۰ mm لایه محافظ ماسه، (د) با ۱۵۰ mm لایه محافظ ماسه، (ه) با ۲۰۰ mm لایه محافظ ماسه.

مطابق شکل ۷، دال حالت (الف) دارای تغییر مکان مرکزی بیشینه ۲۱ میلی متر است و در دال در حالت های (ب)، (ج)، (د) و (ه) به ترتیب میزان تغییر مکان بیشینه مرکز دال ۱۵/۵، ۱۳/۸، ۱۲/۵ و ۱۲ میلی متر است. همان گونه که ملاحظه شود دال حالت (ب) نسبت به دال حالت (الف) (دال مینا) دارای کاهش در تغییر مکان بیشینه است و افزایش ضخامت لایه محافظ ماسه سبب کاهش مقدار بیشینه تغییر مکان مرکز دال می شود. میزان تغییر مکان وسط دال و

درصد کاهش تغییر مکان بیشینه مرکز دال در حالت های مختلف نسبت به دال مبنا در ازای افزایش ضخامت لایه محافظ ماسه به طور خلاصه در جدول ۳، ذکر شده است.

جدول ۳- تغییر مکان بیشینه و درصد کاهش تغییر مکان بیشینه مرکز دال ها.

حالت	نوع دال	تغییر مکان بیشینه مرکز دال (mm)	درصد کاهش تغییر مکان بیشینه مرکز دال
الف	دال بدون لایه محافظ ماسه	۲۱	-
ب	دال با mm ۵۰ لایه محافظ ماسه	۱۵/۵	۲۸/۶٪
ج	دال با mm ۱۰۰ لایه محافظ ماسه	۱۳/۸	۳۴/۳٪
د	دال با mm ۱۵۰ لایه محافظ ماسه	۱۲/۵	۴۰/۵٪
ه	دال با mm ۲۰۰ لایه محافظ ماسه	۱۲	۴۲/۹٪

۴. نتیجه گیری

در این مطالعه رفتار یک دال بتن مسلح محافظت شده در برابر انفجار مورد بررسی قرار گرفت. حفاظت از دال توسط لایه ای از ماسه که در وجه فوقانی دال واقع شده انجام می پذیرد. هدف اصلی این تحقیق تعیین اثر میزان ضخامت لایه ماسه در کاهش خسارات دال و بهبود عملکرد آن می باشد. عمده ترین نتایج این تحقیق که از تحلیل در گیر حاصل شده است عبارتند از:

۱- بیشینه تغییر شکل اندازه گیری شده در مرکز دال در حالت های (الف)، (ب)، (ج)، (د) و (ه) به ترتیب برابر با ۲۱، ۱۵/۵، ۱۳/۸، ۱۲/۵ و ۱۲ میلی متر است. در نتیجه هر چه ضخامت لایه ماسه افزایش پیدا کند پارامتر بیشینه تغییر مکان مرکز دال کاهش می یابد.

۲- قطر خسارت پوسته شدگی وجه تحتانی اندازه گیری شده دال در حالت های (الف)، (ب)، (ج)، (د) و (ه) به ترتیب برابر با ۳۵، ۲۵، ۱۷، ۱۶ و ۱۵ میلی متر است. زمانی که ضخامت لایه ماسه ۵۰ و ۱۰۰ میلی متر باشد کاهش قطر پوسته شدگی نسبت به دال مبنا قابل ملاحظه است و از ضخامت ماسه ۱۵۰ میلی متر به بعد دیگر قطر پوسته شدگی در یک محدوده ثابت است و کاهش چندانی ندارد. بنابراین ضخامت ۱۵۰ میلی متر ماسه به عنوان ضخامت بهینه برای مقاوم سازی دال مورد مطالعه تعیین شد.

۳- حالت های (الف) و (ب) پوسته شدگی وجه فوقانی رخ می دهد که میزان پوسته شدگی در حالت (ب) نسبت به حالت (الف) کمتر است. در حالی که در حالت های (ج)، (د) و (ه) پوسته شدگی وجود ندارد و خسارت وجه فوقانی دال با افزایش ضخامت لایه ماسه کاهش می یابد.

۵. مراجع

- [1] J. Li, H. Hao, Influence of brittle shear damage on accuracy of the two-step method in prediction of structural response to blast loads, International Journal of Impact Engineering 54 (2013) 217– 231.
- [2] J. Li, H. Hao, Numerical study of structural progressive collapse using substructure technique, Eng. Struct. 52 (2013) 101–113.
- [3] US_Department_of_Defense, Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions (UFC 3-340-02), Unified Facilities Criteria, Washington, DC, 2008.

- [4] H.Y. Low, H. Hao, Reliability analysis of reinforced concrete slabs under explosive loading, *Struct. Saf.* 23 (2001) 157–178.
- [5] C. Kot, R. Valentin, D. McLennan, P. Turula, Effects of Air Blast on Power Plant Structures and Components, Argonne National Lab., IL (USA), 1978.
- [6] C. Kot, Spalling of concrete walls under blast load, *Structural Mechanics in Reactor Technology*, 1977.
- [7] J. Henrych, *The Dynamics of Explosion and its Use*, Elsevier Amsterdam, 1979.
- [8] M.K. McVay, Spall Damage of Concrete Structures DTIC Document 1988.
- [9] W. Wang, D. Zhang, F. Lu, S.-c. Wang, F. Tang, Experimental study and numerical simulation of the damage mode of a square reinforced concrete slab under close-in explosion, *Eng. Fail. Anal.* 27 (2013) 41–51.
- [10] Y. Shi, L. Chen, Z. Wang, X. Zhang, Field tests on spalling damage of reinforced concrete slabs under close-in explosions, *International Journal of Protective Structures* 6 (2015) 389–402.
- [11] M.M. Swisdak Jr., J.W. Tatom, C.A. Hoing, Procedures for the Collection, Analysis and Interpretation of Explosion-Produced Debris-Revision 1 DTIC Document 2007.
- [12] C. Wu, R. Nurwidayati, D.J. Oehlers, Fragmentation from spallation of RC slabs due to airblast loads, *International Journal of Impact Engineering* 36 (2009) 1371–1376.
- [13] X.Q. Zhou, H. Hao, Mesoscale modelling and analysis of damage and fragmentation of concrete slab under contact detonation, *International Journal of Impact Engineering* 36 (2009) 1315–1326.
- [14] A. Rouabhi, M. Tijani, P. Moser, D. Goetz, Continuum modelling of dynamic behavior and fragmentation of quasi-brittle materials: application to rock fragmentation by blasting, *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.* 29 (2005) 729–749.
- [15] A. Brara, F. Camborde, J. Klepaczko, C. Mariotti, Experimental and numeric.
- [16] Wang, W., Zhang, D., Lu, F., Wang, S/C., and Tang, F. (2013). “Experimental study and numerical simulation of the damage mode of a square reinforced concrete slab under close-in explosion.” *Engineering Failure Analysis*, 27, 41-51.
- [17] Wei, J., Quintero, R., Galati, N., and Nanni, A, (2007). “Failure modeling of bridge components subjected to blast loading.” *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 1, 1, 19-28.
- [18] Nam, J.W., Kim H.J., Kim, S.B., Yi, N/H., and Kim, J.H., (2010). “Numerical evaluation of the retrofit effectiveness for GFRP retrofitted concrete slab subjected to blast pressure.” *Compps, Struct* =, 92, 1212-22.
- [19] Li, J., and Hao, H, (2014). “Numerical study of concrete spall damage to blast loads.” *Int. J. Impact/ Eng.*, 68, 41-55.
- [20] AUTODYN. Theory Manual. Century Dynamics; 4116.
- [۲۱] بهمن اورامانی، سارا. توپچی نژاد، حمید. بررسی عملکرد دینامیکی یک دال بتن مسلح تحت اثر انفجار نزدیک (۱۳۹۶). سومین همایش بین المللی معماری عمران و شهرسازی در آغاز هزاره سوم، تهران، شهریور ۱۳۹۶.
- [22] Grady D. The spall strength of condensed matter. *J Mech Phys Solids* 1988;36:353–84.
- [23] Johnson, G.R. and Cook, W.H., 1983, April. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. In *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics* (Vol. 21, No. 1983, pp. 541-547).
- [۲۴] مسعودی، احسان. (۱۳۹۴). مقاوم سازی دال های بتن مسلح در برابر انفجار. (پایان نامه کارشناسی ارشد)، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.
- [25] Nash PT, Vallabhan C, Knight TC. Spall damage to concrete walls from close-in cased and uncased? Explosions in air. *ACI Struct J* 1995;92.