

Analysis of Reinforced Concrete Bridge Deck Slab Behavior Under Blast Loading

Yaser Moeini , Ahmad Ganjali* , Mohammad Taji

*Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran
(Received: 19/10/2024, Revised: 11/12/2024, Accepted: 25/12/2024, Published: 21/07/2025)

DOR: 20.1001.1.20086849.1404.16.2.4.0

ABSTRACT

In recent decades, many terrorist attacks have occurred all over the world, which have left many financial and human damages. As a result of these events, engineers felt the need to design explosion-resistant structures. Among the important structures in transportation systems are bridges. On the other hand, this important structure can be an attractive target for terrorist attacks. Therefore, the analysis and investigation of explosive loading on this structure is very important. Considering the frequency and expansion of the construction of concrete deck bridges in Iran, this research has investigated and numerically analyzed the deck slab of a reinforced concrete bridge. The parameters investigated in this research include deck displacement and deflection, stress, element removal, the amount of deck destruction and how cracks are formed, the change in scale distance and the mass of the explosive. Also, LS-DYNA finite element software has been used for modeling. The results show that on the concrete decks in the bridges, the parameters of the amount and location of the explosion are very important and effective in such a way that it causes extensive damages at the level of the near explosions. Based on the results obtained, with the increase in the weight of the explosive, the displacement and stress values in the structure increase in such a way that after the explosion of 250 kg of explosive in the air, linear cracks were created, while after the explosion of 500 kg of the explosive on the surface of the concrete bridge deck, there is a spherical punch-like destruction with an approximate diameter of 2.4 meters. Also, by changing the explosive material from 250 kg to 500 kg TNT, the amount of displacement for the center of the bridge deck will increase by 5.5 times, and by changing the explosive material from 500 kg to 700 kg TNT, we will see an increase in the amount of displacement at the edge of the deck by 2.5 times.

Keywords: Reinforced concrete, Bridge deck, Blast loading, Numerical analysis, Ls_dyna

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University

 Authors



* Corresponding Author Email: ahmad.ganjali@iau-shahrood.ac.ir



پدافند غیرعامل

سال پانزدهم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۴ (پیاپی ۶۲): صص ۴۳-۵۲

شاپای چاپی: ۶۹۴۹-۲۰۰۸ | شاپای الکترونیکی: ۸۰۳۰-۲۹۸۰

علمی - پژوهشی

تحلیل رفتار دال عرشه پل بتن مسلح تحت بارگذاری انفجار

یاسر معینی^۱، احمد گنجعلی^{۲*}، محمد تاجی^۳

DOR: 20.1001.1.20086849.1404.16.2.4.0

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۰۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۲۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۲۱

چکیده

در دهه‌های اخیر حملات تروریستی فراوانی در سراسر دنیا به وقوع پیوسته که صدمات مالی و جانی بسیاری را بر جای گذاشته است. این رویدادها احساس نیاز بیشتری در میان مهندسان به طراحی سازه‌های مقاوم در برابر انفجار را ایجاد کرده است. پل‌ها به عنوان یکی از سازه‌های مهم در سامانه‌های حمل و نقل، می‌توانند هدف جذابی برای حملات تروریستی باشند. بنابراین تحلیل و بررسی بارگذاری انفجاری بر روی این سازه از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به فراوانی و گسترش ساخت پل‌های عرشه بتنی در ایران، این پژوهش به بررسی و تحلیل عددی دال عرشه‌ی یک پل بتن مسلح پرداخته است. پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق، شامل جابجایی و خیز عرشه، تنش، حذف المان، مقدار تخریب عرشه و نحوه شکل‌گیری ترک‌ها، تغییر فاصله مقیاسی و جرم ماده منفجره است. همچنین، از نرم افزار اجزای محدود LS-DYNA، برای مدلسازی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد، بر روی عرشه‌های بتنی در پل‌ها، متغیرها و محل انفجار بسیار حائز اهمیت و موثر بوده به نحوی که خرابی‌های وسیعی را در سطح انفجارهای نزدیک به وجود می‌آورد. بر اساس نتایج بدست آمده با افزایش وزن ماده منفجره، مقادیر جابجایی و تنش در سازه افزایش می‌یابد به گونه‌ای که بعد از انفجار ۲۵۰ کیلوگرم ماده منفجره در هوا ترک‌هایی خطی شکل ایجاد گردید در حالی که، بعد از انفجار ۵۰۰ کیلوگرم ماده منفجره بر روی سطح عرشه پل بتنی، تخریبی کروی پانچ مانند به قطر تقریبی ۲/۴ متر ایجاد شده است. همچنین، با تغییر ماده منفجره از ۲۵۰ کیلوگرم به ۵۰۰ کیلوگرم TNT، مقدار جابجایی برای مرکز عرشه پل ۵/۵ برابر و با تغییر ماده منفجره از ۵۰۰ کیلوگرم به ۷۰۰ کیلوگرم TNT، ۲/۵ برابر افزایش مقدار جابجایی و خیز عرشه را شاهد خواهیم بود.

کلیدواژه‌ها: عرشه پل بتن مسلح، بارگذاری انفجاری، تحلیل عددی، LS-DYNA

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران
^۲ استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران (ahmad.ganjali@iau-shahrood.ac.ir)
نویسنده مسئول

^۳ استادیار، گروه مهندسی معدن، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران



* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY) توزیع شده است.

نویسندگان ©

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

۱- مقدمه

افزایش تعداد حملات تروریستی در سال‌های اخیر، نشان داده است که تأثیر بارهای انفجار بر روی سازه‌ها موضوعی جدی است که باید در فرایند طراحی مورد توجه قرار گیرد. این حملات ساخته دست بشر هستند و ممکن است در پی آن فاجعه‌ای رخ دهد. بارهای انفجار در واقع بارهای دینامیکی هستند که باید دقیقاً مانند بارهای زلزله و باد محاسبه شوند [۱]. امروزه، طراحی و ساخت سازه‌ها با کاربری عمومی، در جهت افزایش امنیت در برابر انواع انفجارها، مورد توجه ویژه از سمت مهندسان سازه قرار گرفته است. از سازه‌ها با کاربری عمومی می‌توان به سیستم های حمل و نقل اشاره نمود. اطلاعات جمع آوری شده توسط موسسه ترابری مینتا حاکی از آن است که حداقل ۵۳ مورد حمله تروریستی در بین سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۶ برای انهدام پل‌ها در نقاط مختلف دنیا اتفاق افتاده است [۲]. یکی از مهم‌ترین سازه‌ها در حوزه حمل و نقل، پل‌ها هستند. همچنین، پل‌ها می‌توانند به عنوان قسمتی از راه‌های دسترسی از قبیل: خطوط راه‌آهن، جاده‌ها، زیرگذر و روگذرهای داخل شهر، بزرگراه‌ها و آزادراه‌ها مورد استفاده قرار گیرند. تخریب یک پل، می‌تواند باعث عدم دسترسی به یک مکان مشخص شده و در حوزه حمل و نقل اختلال ایجاد کرده و به هنگام وقوع بحران، امدادسانی به محل را مختل کند [۳]. به جز حملات تروریستی، حوادثی که به‌طور غیر عمدی منجر به انفجار بر روی پل می‌شوند نیز، از جمله خطرات انفجاریست که پل‌ها را تهدید می‌کند. تصادف خودروها و انفجار آن‌ها که منجر به فرو ریزش پل ویران‌آی-۴۰ شد، مثالی از این نوع خطر است. همچنین پل آی-۳۵ در مینسوتا نیز به شکلی مشابه فرو ریخت [۴]. در سال ۲۰۱۰، ویلیامسون و همکارانش به بررسی شکل مقطع ستون‌های پل که تحت اثر انفجار قرار گرفته است پرداختند، با استفاده از نتایج تحلیل‌های عددی و آزمایشگاهی توانستند اثر شکل مقطع ستون در ضربه خالص حاصله از انفجار را بررسی کنند و ضرایب شکل ستون را برای کاهش اثر ضربه وارده در معادلات، توسعه و ارائه دهند. ترکیب این معادلات با پاسخ‌های سیستم یک درجه آزادی منجر به پدیدآمدن روش ساده‌ای برای پیش بینی پاسخ ستون‌ها شد [۵].

مطالعات نشان می‌دهند که بارگذاری انفجاری می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر رفتار دینامیکی پل‌ها داشته باشد. به عنوان مثال، استفاده از تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی می‌تواند به مهندسان کمک کند تا رفتار واقعی سازه‌ها تحت بارگذاری انفجاری را بهتر درک کنند [۶]. از طرف دیگر، بر اساس دستورالعمل پدافند غیرعامل و همچنین مبحث بیست و یکم

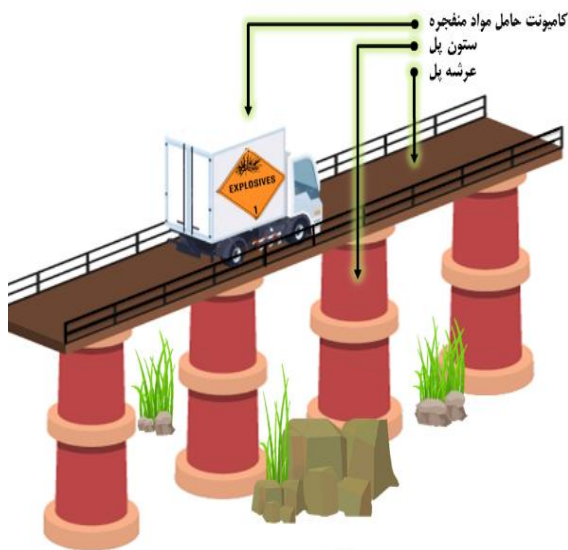
از مقررات ملی ساختمان لازم است سازه‌ها در مقابل بار ناشی از انفجار نیز تحلیل و بررسی گردند [۷]. آستانه اصل و همکارانش به بررسی اثر انفجار بر عرشه فولادی اورتوتروپیک پرداختند و با تغییر بار منفجره و نیروی محوری وارد بر عرشه پل سعی در کشف رفتار واقعی عرشه پل نمودند. نتایج حاصل از تحقیقات آن‌ها نشان داد که در نرخ کرنش بالا زمان گسیختگی اعضای فولادی ۱/۸ برابر زمان تسلیم آن‌ها بوده است در حالی که در نرخ کرنش معمولی این ضریب ۱/۴ می‌باشد، این نتیجه بیانگر اهمیت زیاد نرخ کرنش در مدل‌سازی است تا جایی که با در نظر نگرفتن آن ممکن است پل فرو ریزد [۸]. در سال ۲۰۱۴، در پژوهشی با عنوان بررسی عرشه پل بتنی و تحلیل عددی مقدار آسیب پذیری آن، به کمک مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی، نشان داده شد که اختلاف بین نتایج عددی و تجربی در مقدار جابجایی میان دهانه پل در حدود ۱۰٪ بوده است [۹]. در سال ۲۰۲۰، در تحقیقی، روشی برای ارزیابی عملکرد ساختاری مقاومت در برابر انفجار، برای پل‌های کابلی پیشنهاد شده است نتایج نشان داد که محدوده آسیب اجزای پل با افزایش بار انفجاری افزایش می‌یابد. از آسیب‌های مشاهده شده می‌توان به پانچ شدن دال اشاره کرد [۱۰]. تحقیقات نشان داده‌اند که استفاده از تکنیک‌های نوین مانند طراحی مقاوم در برابر انفجار و مصالح هوشمند می‌تواند به طور قابل توجهی عملکرد پل‌ها را در برابر بارهای انفجاری بهبود بخشد. به عنوان مثال، استفاده از بتن‌های خود ترمیم شونده می‌تواند به کاهش ترک‌خوردگی و افزایش عمر مفید سازه کمک کند [۱۱].

تحقیقات اخیر نشان می‌دهند که استفاده از مصالح ترکیبی، مانند بتن‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه یا الیاف کربن، می‌تواند به طور قابل توجهی مقاومت سازه‌ها در برابر بارهای انفجاری را افزایش دهد. این نوع مصالح به دلیل افزایش خاصیت کششی و فشاری، می‌توانند به بهبود رفتار سازه‌ها در شرایط بحرانی کمک کنند [۱۲].

از سال ۱۸۷۰ میلادی، ارتش ایالات متحده آمریکا مطالعات خود را بر روی پارامترهای انفجار آغاز نموده که بر اساس نتایج بدست آمده از این مطالعات، آئین نامه‌ای در دپارتمان مهندسی ارتش آمریکا تحت عنوان (TM5-855-1) تهیه و تنظیم گردید [۱۳]. که از پرکاربردترین آئین نامه‌ها و راهنماهای طراحی سازه در برابر انفجار می‌باشد. امروزه شبیه‌سازی‌های عددی جایگزین آزمایش‌ها در حوزه انفجار شده است و از داده‌های آزمایشگاهی برای اعتبارسنجی برنامه‌های رایانه‌ای مختلف استفاده می‌شود [۱۴]. شبیه‌سازی‌های عددی قابل اعتماد و دقیق، می‌توانند جایگزین مناسبی برای آزمایشات میدانی در این حوزه بوده و جهت اعتبارسنجی آن، می‌توان از مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی و میدانی بهره برد. اغلب برنامه‌های عددی بر مبنای

است به منظور بارگذاری انفجاری بر روی عرشه یک پل بتنی در نظر گرفته شده است. مطابق شکل (۱) اگر گروهی تروریستی، یک کامیونت حاوی مواد منفجره را به منظور تخریب یک پل بتنی، دقیقاً در میانه عرض پل متوقف کرده و اقدام به منفجر کردن کامیونت کند، قاعدتاً، با قرار داشتن مواد منفجره در قسمت بار این کامیونت، با در نظر گرفتن ارتفاع وسیله نقلیه، ارتفاع این مواد از سطح پل حدود ۲ متر خواهد بود، بنابراین، سناریو مقادیر مختلف ماده منفجره با فاصله کیفی نزدیک و فاصله کمی ۲ متر که به رنگ متمایز در شکل شماره ۲ مشخص گردیده، مدنظر خواهد بود و بقیه حالات برای پل صدق نخواهد کرد. برای حالات بیان شده نوع بارگذاری انفجار، هوایی با شکل موج کروی خواهد بود.

در این تحقیق، پارامترهای موثری از قبیل: تنش و فشار به وجود آمده در عرشه، جابجایی و خیز، فاصله مقیاس شده و مقدار جرم ماده منفجره، نحوه‌ی شکل گیری ترک و مقدار حذف المان مورد بررسی قرار گرفته است. از شبیه سازی‌های عددی که با نتایج آزمایشات میدانی اعتبار سنجی شده‌اند، می‌توان به صورت گسترده، برای توسعه و آزمایش سناریوهای مختلف، استفاده نمود [۱۸]. با اینکه آزمایشات میدانی قابل اطمینان هستند اما به علت پرهزینه بودن این آزمایشات و محدودیت‌های مختلف می‌توان از یک شبیه سازی عددی قابل اعتماد استفاده کرد. به همین منظور پژوهشگران نیز، از نرم افزارهای شبیه‌سازی استفاده می‌کنند [۱۹]. یکی از نرم افزارهای شبیه‌سازی و محاسبه پارامترهایی از قبیل تنش و جابجایی برای سازه‌های مختلف طراحی شده، تحت بارگذاری انفجار و بررسی مقدار اثر آن، نرم افزار LS-DYNA می‌باشد [۲۰].



شکل (۱): موقعیت قرارگیری کامیونت حامل بمب انفجاری بر روی پل بتنی

دستورالعمل‌های طراحی موجود در برابر انفجار، نوشته شده‌اند. مزیت شبیه سازی‌های عددی، اعمال بارگذاری دقیق بر سازه و کم هزینه تر بودن نسبت به آزمایشات میدانی است. با توجه به فراوانی و گسترش ساخت پل‌های عرشه بتنی در ایران، هدف در این مطالعه، بررسی و تحلیل دال عرشه‌ی یک پل بتن مسلح به کمک یک شبیه سازی صحت سنجی شده توسط نرم افزار اجزای محدود ls-dyna، است.

۲- بارگذاری انفجار

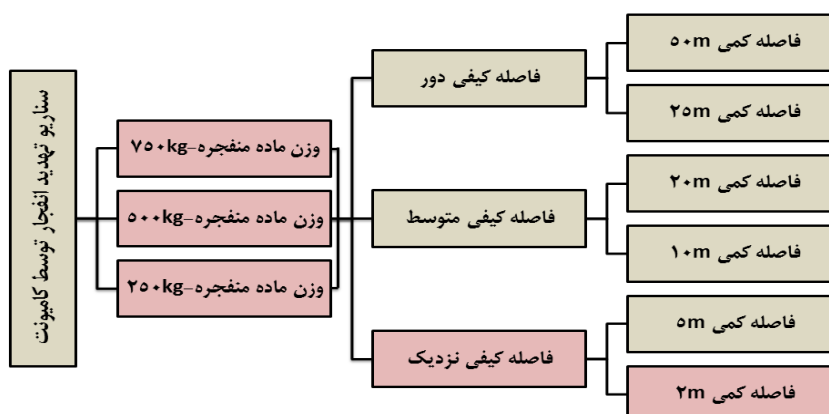
مطالعات اخیر نشان می‌دهند که استفاده از مواد منفجره با ویژگی‌های خاص، مانند مواد منفجره با سرعت انفجار بالا، می‌تواند الگوی توزیع فشار و اثرات انفجار را تغییر دهد. این موضوع می‌تواند به مهندسان کمک کند تا طراحی‌های بهتری برای پل‌ها داشته باشند [۱۵].

انفجار ناشی از ماده منفجره کروی شکل، در هوای آزاد، امواجی با سرعت و فشار بالا به شکل کروی ایجاد کرده و در محیط اطراف منتشر می‌کند. با گذشت زمان، هر قدر که شعاع کره و به تبع آن حجم محیط متأثر از امواج انفجار بیشتر شود، فشار و سرعت موج ناشی از انفجار کاهش می‌یابد. یک امر مهم در طراحی، تجزیه و تحلیل سازه‌ها در برابر انفجار، مقایسه آثار انفجار ماده منفجره در فواصل مختلف از سازه هدف است. چنین مقایسه‌ای با به کارگیری مقیاس قابل قبول در مسئله، با سهولت انجام می‌شود. برای محاسبه پارامترهای انفجار معمولاً از روشی به نام روش فاصله مقیاس‌بندی شده استفاده می‌کنند [۱۶]. این روش، استفاده از ریشه سوم مقیاس است که در آن آثار انفجارهای مختلف را با سطوح انرژی متناظر آنها مرتبط می‌کنند. اگر R بیانگر فاصله از ماده منفجره با واحد طول و W وزن خرج انفجاری باشد، در این صورت فاصله مقیاس شده به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$Z = \frac{R}{W_{TNT}^{1/3}} \quad (۱)$$

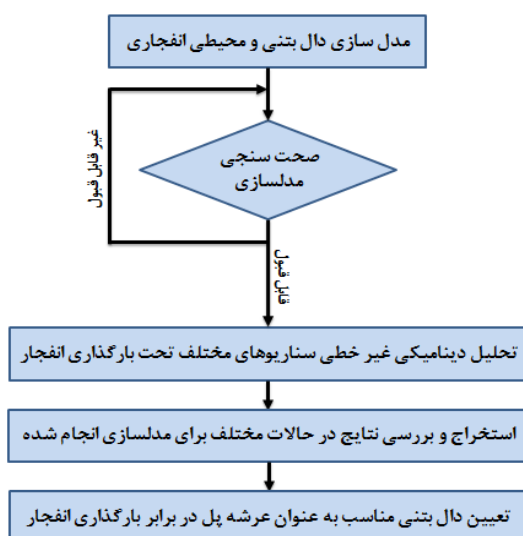
مبنای تعریف رابطه (۱) بر این است که سطوح انرژی آزاد شده از انفجار نقطه‌ای به صورت کروی انتشار می‌یابد. به عبارت دیگر، آثار مختلف انفجار با انرژی واحد حجم (یا همان انرژی مخصوص) متناسب خواهد بود. برای مواد منفجره با فاصله‌ای دور از هدف، می‌توان هر نوع انفجار را به صورت انفجار نقطه‌ای فرض کرد و از روابط مربوط به ریشه سوم مقیاس شده استفاده کرد [۱۷].

در این پژوهش، با فرض یک حمله تروریستی، مقادیر مختلف (۲۵۰ کیلوگرم، ۵۰۰ کیلوگرم و ۷۵۰ کیلوگرم) ماده منفجره (TNT) که بیانگر ظرفیت مقدار قابل حمل توسط یک کامیونت



شکل (۲): سناریوهای مختلف تهدید توسط کامیونت حامل ماده منفجره

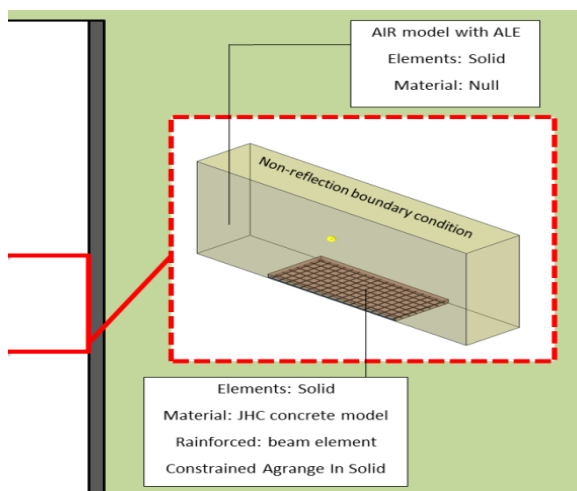
منفجره به هنگام وقوع انفجار بیان می‌شود. برای غلبه بر محدودیت‌های روش‌های لاگرانژی و اویلری، روشی مبتنی بر تلفیق این روش‌ها به نام ALE بنا نهاده شده است. در این روش که خود مبتنی بر یک فرمولاسیون مکانیک محیط پیوسته منحصر به فرد است، هر وقت تغییر فرم المان‌های لاگرانژی از حدی بیشتر شود، با استفاده از روش‌های اویلری ماده درون سلول‌ها جابجا شده و مش‌بندی جدیدی لاگرانژی مطابق با محل جدید ماده مورد بررسی ایجاد می‌گردد. بدین ترتیب هم می‌توان از قابلیت منحصر به فرد روش اویلری در تغییر فرم‌های بسیار بزرگ بهره برد و هم مرزهای مواد را با دقت مناسبی پیش‌بینی کرد. روش ALE به وفور در مدل‌سازی محیط‌های واسط در مسائل برهم کنش سیال و سازه مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل (۴): روند بررسی و تحلیل موضوع در این پژوهش

۳- روش اجزا محدود

توسعه نرم‌افزارهای شبیه‌سازی پیشرفته به مهندسان این امکان را می‌دهد که رفتار سازه‌ها را تحت بارهای انفجاری با دقت بیشتری مدل‌سازی کنند. این نرم‌افزارها با قابلیت‌های پیشرفته خود، می‌توانند تحلیل‌های پیچیده‌ای را انجام دهند که شامل اثرات حرارتی و دینامیکی ناشی از انفجار می‌شود [۲۱]. از روش‌های عددی، جهت مدل‌سازی انفجار و تاثیر آن بر یک سازه که شامل مدل‌سازی مواد منفجره و هوا بوده، استفاده از فرمولاسیون لاگرانژی-یولرین چند ماده‌ای (MM-ALE) است که در آن یک معادله حالت مناسب برای مواد و مدل رفتار ماده



شکل (۳): مشخصات دال عرشه‌ی پل بتن مسلح

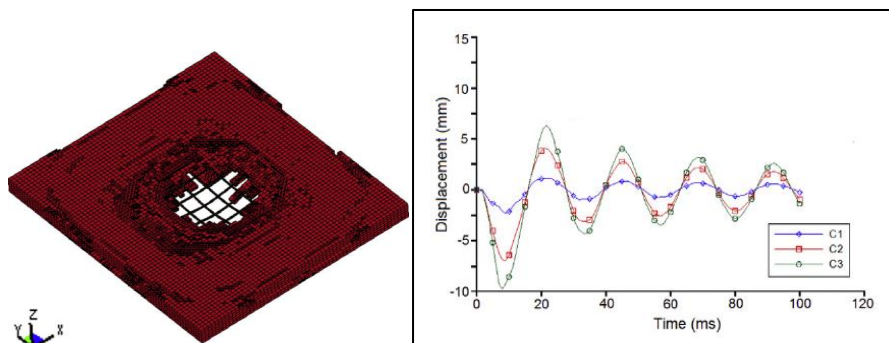
از مدل D-1 contact که اتصال لغزشی میان بتن و فولاد را در نظر می‌گیرد، انجام شده است.

با توجه به نرخ بالای بارگذاری حاصل از انفجار می‌توان از اتصال لغزشی میان بتن و میلگرد صرف نظر کرد [۲۳]. همچنین، برای تماس و اتصال بین بتن و میلگرد از مدل Lagrange in Solid استفاده شده است. از آنجاکه صحت‌سنجی بتن و میلگرد به همراه شبیه‌سازی انفجار، امری مهم برای اطمینان از نتایج به دست آمده می‌باشد، به همین منظور جهت صحت مدل عددی بتن و میلگرد و همچنین شبیه‌سازی انفجار از نتایج مطالعات آزمایشگاهی تای و همکاران [۲۴] مطابق شکل (۵)، استفاده شده است که پس از مدلسازی نتایجی مطابق با شکل (۶) حاصل گردید.

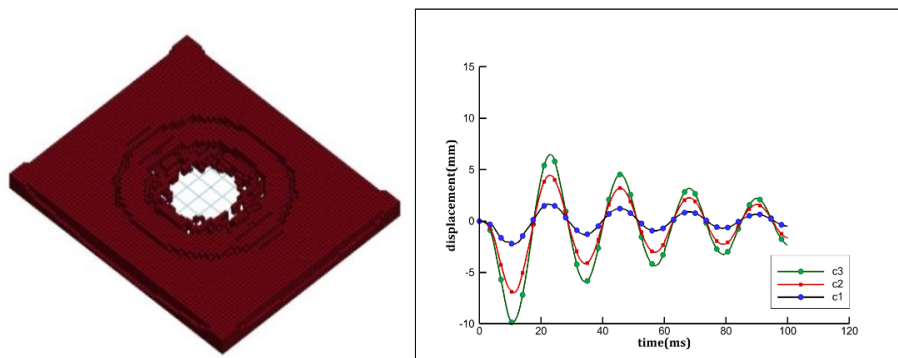
در این پژوهش، روند بررسی و تحلیل موضوع به صورت بیان شده در شکل (۴) در نظر گرفته شده است.

۴- مدلسازی عددی و صحت سنجی

در این پژوهش، به منظور بررسی رفتار دال عرشه پل بتن مسلح تحت بارگذاری انفجاری، از نرم افزار LS-DYNA استفاده شده است. برای مدل سازی مطابق شکل (۳) از المان Solid و مدل مصالح Johnson-Holmsquist Concrete استفاده شده است [۲۲]. همچنین جهت، مدلسازی آرماتورها از المان Beam و مدل plastic-kinematic استفاده شده است. روش و الگوهای مختلفی برای بیان در تماس بودن بتن و میلگرد وجود دارد. ترکیب کردن المان های تیر با المان های بتن در گرهای مشترک و متصل کردن المان های تیر به المان های بتن با استفاده



شکل (۵): نتایج خیز برای (5kg) ماده منفجره و مقدار آسیب برای (10kg) ماده منفجره در آزمایشات تای و همکاران [۲۴]

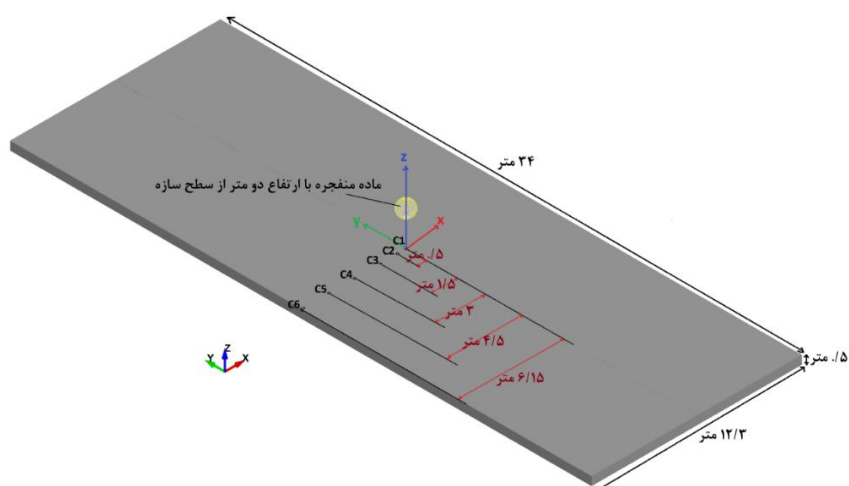


شکل (۶): نتایج بدست آمده خیز برای (5kg) ماده منفجره و مقدار آسیب برای (10kg) ماده منفجره در این پژوهش

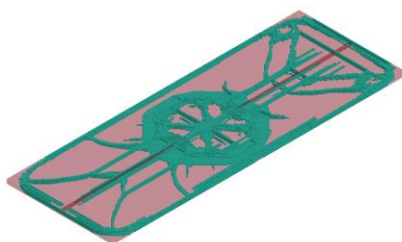
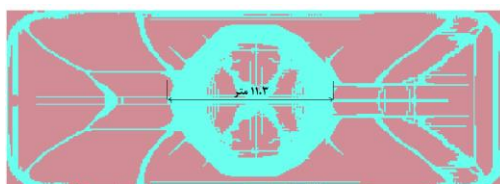
مرکز دال و با ارتفاع ۲ متری از سطح دال بتنی قرار گرفته است. به منظور بررسی دقیق تر برخی پارامترها از قبیل جابجایی و تنش به علت قرینه بودن شکل هندسی دال، نقاطی با عناوین C1, C2, C3, C4, C5, C6 مطابق شکل (۷) انتخاب و در مدلسازی نیز نیمی از دال بتنی مدل گردید. مشخصات بتن و فولاد به کار گرفته شده و همچنین ابعاد میلگردها به ترتیب در جداول شماره ۱، ۲ و ۳ آمده است.

۱-۴- هندسه و مشخصات مدل

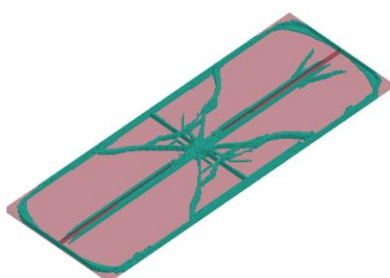
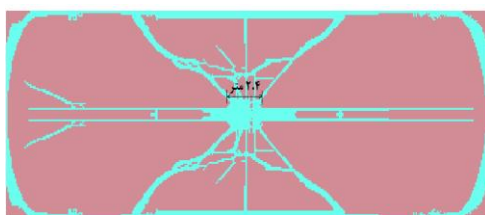
در این پژوهش، به منظور درک بهتر و مصور، برای انتخاب ابعاد دال عرشه بتنی از ابعاد موجود در یک پل واقعی استفاده شد و یک دال بتن مسلح در ابعاد واقعی ۳۴ متر طول، ۱۲/۳ متر عرض و ارتفاع ۰/۵ متر، که بیانگر عرشه پل می‌باشد، مدلسازی شده است. مشخصات دال بتنی بر اساس پژوهشی بر روی یک پل بتنی با ابعاد واقعی توسط لی و همکاران در سال ۲۰۲۰ انتخاب گردید [۲۵]. محل قرارگیری ماده منفجره مطابق شکل (۷) در



شکل (۷): مشخصات هندسی مدل و موقعیت نقاط منتخب



شکل (۹): مقدار و نحوه‌ی ترک خوردگی بر روی عرشه پل بتنی تحت بار انفجار ۵۰۰ کیلوگرم ماده منفجره



شکل (۱۰): مقدار و نحوه‌ی ترک خوردگی بر روی عرشه پل بتنی تحت بار انفجار ۷۰۰ کیلوگرم ماده منفجره

جدول (۱): مشخصات عمومی بتن

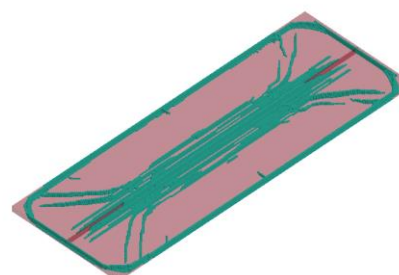
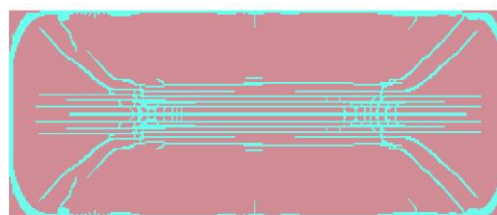
مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	ضریب پواسون	چگالی (Kg/m^3)	مدول الاستیته (GPa)
۲۵	۳	۰/۱۵	۲۴۰۰	۱۸/۹۷

جدول (۲): مشخصات عمومی فولاد

تنش تسلیم (MPa)	ضریب پواسون	چگالی (Kg/m^3)	مدول الاستیته (GPa)
۴۰۰	۰/۳	۷۸۰۰	۲۱۰

جدول (۳): مشخصات میلگرد

ابعاد میلگردهای عمودی	ابعاد میلگردهای افقی
H19@ 150	H16@ 150



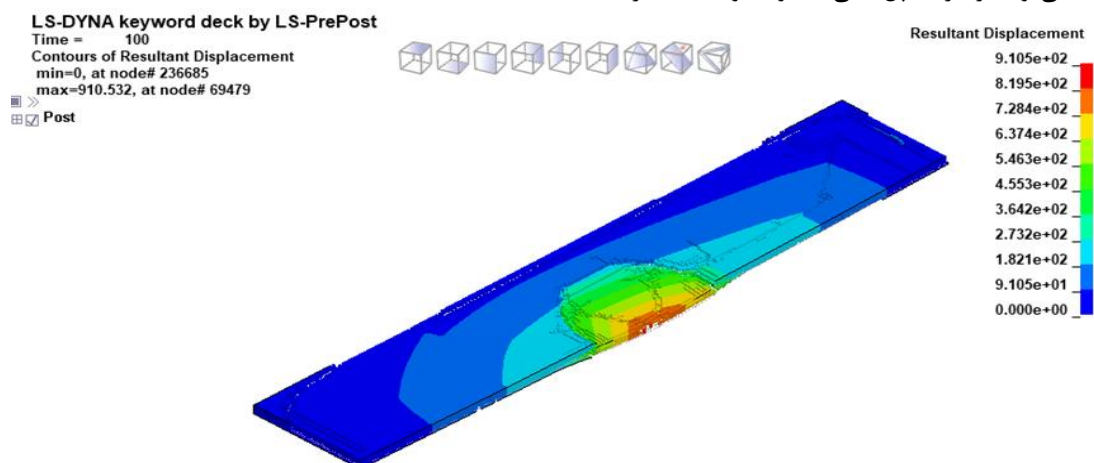
شکل (۸): مقدار و نحوه‌ی ترک خوردگی بر روی عرشه پل بتنی تحت بار انفجار ۲۵۰ کیلوگرم ماده منفجره

آنجایی که قطر و ابعاد آرماتور و مقدار مصالح بکار رفته در همه نمونه‌ها به صورت یکسان می‌باشد، عواملی از قبیل: مقدار ماده منفجره و فاصله مقیاس شده پارامترهای موثر در تغییر مقدار جابجایی عرشه پل خواهند بود. مطابق شکل شماره ۱۱ عرشه پل بتنی تحت بار انفجاری ناشی از ۷۰۰ کیلوگرم ماده منفجره نسبت به مقادیر دیگر ماده منفجره، بیشترین مقدار خیز و جابجایی را داشته است. شکل شماره ۱۲ مقدار تغییرات جابجایی و خیز نقاط منتخب بر روی عرشه پل بتنی برای مقادیر مختلف ماده منفجره را نشان می‌دهد. پس از مقایسه نتایج بدست آمده، مقادیر جابجایی برای نقاط منتخب بر روی عرشه پل، هر چه نقطه انتخابی به مرکز عرشه نزدیک‌تر باشد، جابجایی بیشتری خواهد داشت.

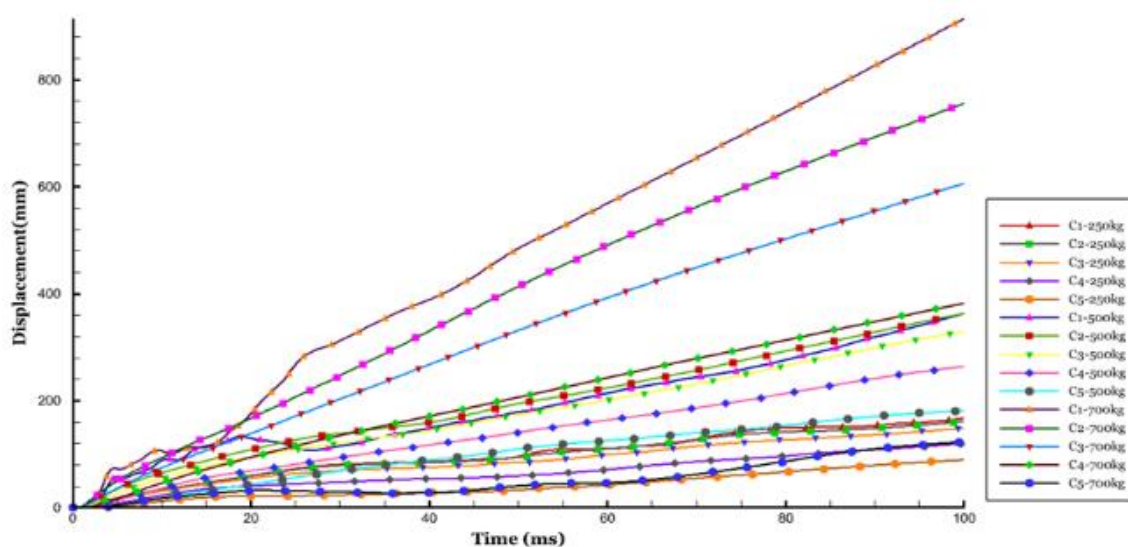
مطابق شکل (۸) بعد از انفجار ۲۵۰ کیلوگرم ماده منفجره در هوا ترک‌هایی خطی شکل ایجاد گردید در حالی که مطابق اشکال شماره ۹ و ۱۰، بعد از انفجار ۵۰۰ کیلوگرم ماده منفجره بر روی سطح عرشه پل بتنی، تخریبی نیم کروی پانچ مانند به قطر تقریبی ۲/۴ متر ایجاد شده است. در حالیکه قطر این نیم کره تخریبی بعد از انفجار ۷۰۰ کیلوگرم ماده منفجره تقریباً معادل ۱۱/۳ متر می‌باشد که با توجه به اینکه عرض عرشه پل بتنی مدل شده ۱۲/۳ متر در نظر گرفته شده است، این امر نشان دهنده تخریب و آسیب جدی، در عرض عرشه‌ی پل خواهد بود.

۲-۴ - خیز و جابجایی عرشه پل بتنی تحت اثر انفجار

با توجه به استفاده از مقادیر مختلف ماده منفجره، نتایج حاصل از جابجایی و خیز عرشه پل بتنی متفاوت بوده است. از



شکل (۱۱): تغییرات جابجایی و خیز برای نیمی از عرشه پل بتنی برای ۷۰۰ کیلوگرم ماده منفجره

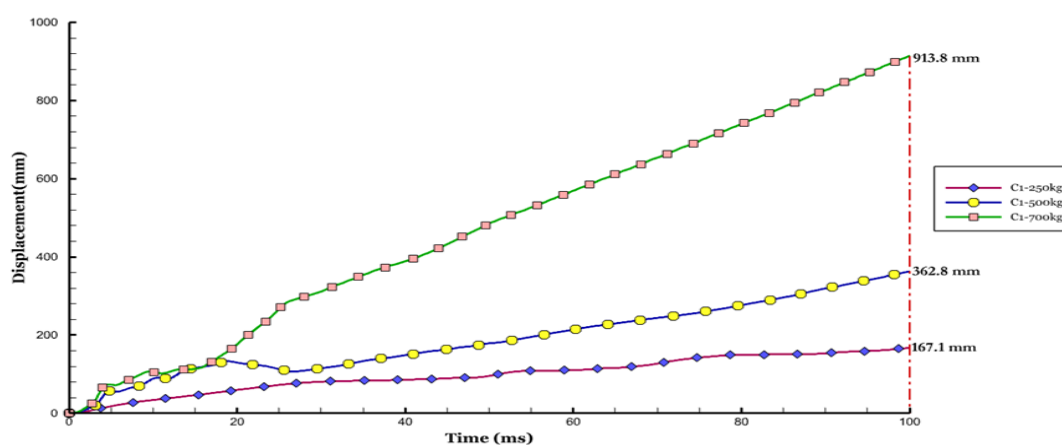


شکل (۱۲): تغییرات جابجایی و خیز نقاط منتخب بر روی عرشه پل بتنی برای مقادیر مختلف ماده منفجره

۳-۴- تنش عرشه پل بتنی تحت اثر انفجار

برای ارزیابی تخریب بر مبنای تنش موثر از تنش فون میسر می توان بهره برد. تنش فون میسر در قالب معادل، غیر محوری، برای تنش چند محوری در نظر گرفته شده و در بسیاری از معیارهای تخریب و تسلیم استفاده می گردد [۲۶]. مطابق نتایج جدول (۴) با افزایش مقدار ماده منفجره و به تبعیت از آن افزایش فاصله مقیاس شده، مقدار تنش در نقاط منتخب بر روی عرشه پل افزایش می یابد. همچنین با پیشروی از مرکز عرشه پل به سمت حاشیه و لبه عرشه مقدار تنش در سازه کاهش پیدا می کند.

بدین ترتیب در نقطه C1 که دقیقاً در مرکز عرشه پل قرار دارد و ماده منفجره دقیقاً به موازات آن با فاصله ۲ متری از سطح عرشه جایگذاری شده است، بیشترین مقدار جابجایی را برای هر ۳ مقدار ماده منفجره نسبت به دیگر نقاط به خود اختصاص داده است. این در حالی است که از مقایسه تغییرات جابجایی برای نقطه C1، مطابق شکل (۳)، مقدار جابجایی و خیز عرشه پل بتنی توسط ۷۰۰ کیلوگرم ماده منفجره حدوداً ۵/۵ برابر مقدار جابجایی همان نقطه برای انفجار ۲۵۰ کیلوگرم ماده منفجره و ۲/۵ برابر مقدار جابجایی آن برای انفجار ۵۰۰ کیلوگرم ماده منفجره بوده است.



شکل (۱۳): تغییرات جابجایی و خیز نقطه C1 بر روی عرشه پل بتنی برای مقادیر مختلف ماده منفجره

جدول (۴): مقادیر تغییرات تنش فون میسر برای نقاط منتخب روی عرشه پل بتنی تحت بار انفجار

ردیف	مقدار ماده منفجره (kg)	فاصله مقیاس شده m/(kg ^{1/3})	حداکثر مقدار تنش فون میزس (MPa)	حداکثر مقدار جابجایی (mm)
۱	۲۵۰ کیلوگرم-C1	۰/۲۲	۴۰/۹۵	۱۶۶/۸
۲	۲۵۰ کیلوگرم-C2	۰/۲۲	۳۷/۲۲	۱۶۰/۹
۳	۲۵۰ کیلوگرم-C3	۰/۲۲	۲۶/۸۲	۱۴۸/۱۵
۴	۲۵۰ کیلوگرم-C4	۰/۲۲	۲۱/۶۰	۱۱۹/۶۲
۵	۲۵۰ کیلوگرم-C5	۰/۲۲	۱۱/۸۰	۸۹/۱۶
۶	۲۵۰ کیلوگرم-C6	۰/۲۲	۱۳/۷۰	۰
۷	۵۰۰ کیلوگرم-C1	۰/۲۵	۲۶/۲۰	۳۶۳/۰۷
۸	۵۰۰ کیلوگرم-C2	۰/۲۵	۲۷/۶۰	۳۶۲/۶۱
۹	۵۰۰ کیلوگرم-C3	۰/۲۵	۲۳/۴۰	۳۲۹/۳۱
۱۰	۵۰۰ کیلوگرم-C4	۰/۲۵	۱۹/۶۱	۲۶۴/۱۲
۱۱	۵۰۰ کیلوگرم-C5	۰/۲۵	۱۶/۳۵	۱۸۱/۵۹
۱۲	۵۰۰ کیلوگرم-C6	۰/۲۵	۱۳/۰۵	۰
۱۳	۷۵۰ کیلوگرم-C1	۰/۳۱	۲۸/۹۰	۹۱۴/۳۲
۱۴	۷۵۰ کیلوگرم-C2	۰/۳۱	۳۶/۱۰	۷۵۵/۹۲
۱۵	۷۵۰ کیلوگرم-C3	۰/۳۱	۳۱/۹۲	۶۰۶/۰۱
۱۶	۷۵۰ کیلوگرم-C4	۰/۳۱	۲۷/۵۹	۳۸۲/۰۲
۱۷	۷۵۰ کیلوگرم-C5	۰/۳۱	۱۶/۷۴	۱۲۳/۱۶
۱۸	۷۵۰ کیلوگرم-C6	۰/۳۱	۱۳/۹۴	۰

مقدار جابجایی و خیز عرشه پل بتنی با انفجار ۷۰۰ کیلوگرم ماده منفجره حدوداً ۵/۵ برابر مقدار جابجایی برای انفجار ۲۵۰ کیلوگرم ماده منفجره و ۲/۵ برابر مقدار جابجایی آن برای انفجار ۵۰۰ کیلوگرم ماده منفجره بوده است.

تنش فون میسر در نقطه C6 که بیانگر حاشیه و کناره‌های عرشه پل می‌باشد، با توجه به موقعیت و قرارگیری ماده منفجره، برای تمامی فواصل مقیاس شده تقریباً یکسان و معادل تقریبی ۱۳ مگاپاسکال گزارش شد.

برای نقطه C1 میزان تنش فون میسر برای ۲۵۰ کیلوگرم ماده منفجره تقریباً ۱/۵ برابر میزان تنش همان نقطه برای ۵۰۰ کیلوگرم ماده منفجره بوده است، همچنین برای ۷۰۰ کیلوگرم خرج انفجاری میزان تنش نقطه C1، ۰/۹ برابر میزان تنش همان نقطه برای ۵۰۰ کیلوگرم است. برای دیگر نقاط نیز این تناسب تقریباً حفظ شده، و با دورتر شدن از مرکز عرشه از میزان هر کدام از ضرایب کاهش می‌یابد.

۶- مراجع

- [1] Z. Koccz, F. Sutcu, and N. Torunbalci, "Architectural and structural design for blast resistant buildings," in The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 2008.
- [2] B. M. Jenkins and L. N. Gersten, "Protecting public surface transportation against terrorism and serious crime," Mineta Transportation Institute, San Jose, CA, USA, 2001, pp. 23-29.
- [3] A. Habibi, A. Khaledi, and N., "Evaluation of the rectangular loading pattern in the nonlinear analysis of bridges with mixed decks under the effect of explosion," *Ferdowsi Civil Engineering Journal*, vol. 26, no. 2, pp. 67-68, 2015. (In Persian)
- [4] Minnesota Department of Transportation, "Interstate 35W Bridge Collapse," Apr. 20, 2008. [Online]. Available: <http://www.dot.state.mn.us/i35wbridge/index.html>. [Accessed: Jan. 1, 2023].
- [5] E. B. Williamson, O. Bayrak, G. D. Williams, and C. E. Davis, "Blast-resistant highway bridges: design and detailing guidelines," National Academy of Sciences, 2010, pp. 45-51.
- [6] A. M. Alhassan and M. A. Alshahrani, "Nonlinear dynamic analysis of reinforced concrete bridges under blast loading," *Journal of Structural Engineering*, vol. 147, no. 7, pp. 04021078, 2021.
- [7] S. Payman, M. Hosseini, and M. H. Taghvi Parsa, "Analysis of the effects of protective concrete layer on the behavior of underground structures under surface explosive load," *Civil Defense*, vol. 11, no. 1, pp. 83-90, 2020. (In Persian)
- [8] A. Astaneh-Asl and J. Son, "Blast resistance of steel orthotropic bridge decks," report no. UCB/CEE-STEEL-08/01, Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley, CA, USA, 2008. (In Persian)
- [9] W. Ren, L. H. Sneed, Y. Yang, and R. He, "Numerical simulation of prestressed precast concrete bridge deck panels using damage plasticity model," *International Journal of Concrete Structures and Materials*, vol. 9, pp. 45-54, 2015.
- [10] J. Lee, K. Choi, and C. Chung, "Numerical analysis-based blast resistance performance assessment of cable-stayed bridge components subjected to blast loads," *Applied Sciences*, vol. 10, pp. 23-29, 2020.
- [11] TM5-855-1, "Fundamentals of protective design for conventional weapons," Department of US Army Security Engineering, Washington, DC, USA, Nov. 1986.

در این پژوهش بازه زمانی انفجار ۱۰۰ میلی‌ثانیه بوده است، و مقادیر تغییرات تنش فون میسر برای نقاط منتخب روی عرشه پل بتنی تحت بار انفجار طبق جدول شماره ۴ قابل مشاهده است. مطابق جدول (۴) با افزایش میزان تنش فون میسر آسیب و تخریب به سازه افزایش می‌یابد که بالا رفتن میزان جابجایی نقاط متناسب با افزایش تنش فون میسر گواه بر این امر است.

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به پیشرفت‌های اخیر در فناوری مواد و روش‌های شبیه‌سازی، انتظار می‌رود که در آینده، طراحی و ساخت پل‌های مقاوم در برابر انفجار به یک استاندارد صنعتی تبدیل شود. این پیشرفت‌ها می‌توانند به کاهش خسارات مالی و جانی ناشی از حملات تروریستی و حوادث غیرمترقبه کمک کنند [۲۷].

در پژوهش حاضر، برای ارزیابی اثرات انفجار بر روی یک پل بتن مسلح، به منظور شبیه‌سازی عددی از نرم افزار LS_DYNA استفاده شده است. بر این اساس نتایج به دست آمده به شرح ذیل می‌باشد:

با توجه به خطرات و هزینه بالای مطالعات میدانی و آزمایشگاهی برای تحلیل رفتار سازه‌ها تحت بارگذاری انفجار، صحت سنجی انجام شده در این پژوهش این اطمینان را داد که شبیه‌سازی دال عرشه پل بتن مسلح تحت بارگذاری انفجار جایگزین مناسبی برای مطالعات میدانی و آزمایشگاهی آن است.

در بارگذاری انفجاری هوایی، محل قرارگیری ماده منفجره بسیار حائز اهمیت است. برای پژوهش درخصوص عملکرد سازه‌هایی مانند: پل در برابر انفجار بایستی به عامل فاصله مقیاس شده و میزان ماده منفجره دقت داشت، زیرا با کوچکترین تغییری در مقادیر آن شرایط بعد از اعمال بارگذاری انفجاری متفاوت خواهد بود.

الگوی ترک‌خوردگی عرشه پل در سه حالت انفجار با ۵۰۰، ۲۵۰ و ۷۰۰ کیلوگرم با تغییراتی همراه است که مهمترین آن ایجاد یک محدوده نیم کره پانچ شده در مرکز عرشه پل است که با افزایش مقادیر ماده منفجره شعاع آن افزایش یافته است. با انفجار ۲۵۰ کیلوگرم خرج انفجاری شکل ترک‌ها به صورت تقریباً خطی شکل گردید و با انفجار ۵۰۰ کیلوگرم ماده منفجره بر روی سطح عرشه پل بتنی، تخریبی دایره‌ای شکل به قطر تقریبی ۲/۴ متر ایجاد شد. در حالیکه قطر این دایره‌ی تخریبی بعد از انفجار ۷۰۰ کیلوگرم ماده منفجره تقریباً معادل ۱۱/۳ متر است که با توجه به اینکه عرض عرشه پل بتنی مدل شده ۱۲/۳ متر در نظر گرفته شده است، این امر نشان دهنده‌ی تخریب و آسیب جدی، در عرض عرشه‌ی پل خواهد بود.

بیشترین مقدار خیز و جابجایی در مرکز عرشه پل گزارش شد و این مقدار با حرکت از مرکز عرشه به سمت حاشیه کاهش یافت.

- [20] Y. S. Tai, T. L. Chu, H. T. Hu, and J. Y. Wu, "Dynamic response of a reinforced concrete slab subjected to air blast load," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 56, pp. 140-147, 2011.
- [21] J. Lee and K. C., "Numerical analysis-based blast resistance performance assessment of cable-stayed bridge components subjected to blast loads," *Applied Sciences*, vol. 11, pp. 63-75, 2020.
- [22] S. Peyman and M. H. Parsa, "Analysis of the effects of surface blasting on underground tunnels," *Passive Defense Promotion Scientific Quarterly*, pp. 1-12, 2017. (In Persian)
- [23] K. Van Tittelboom, N. De Belie, and P. Jacobs, "Self-healing concrete: a review," *Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 3, pp. 223-237, 2010.
- [24] M. R. Al-Rub and K. K. A. A. Al-Omari, "Mechanical properties of hybrid fiber reinforced concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 236, p. 117554, 2020.
- [25] F. A. S. Al-Mansoori, M. A. Al-Mansoori, and A. A. Al-Obaidy, "Effects of high-explosive charges on reinforced concrete structures," *Journal of Civil Engineering and Architecture*, vol. 12, no. 2, pp. 153-162, 2018.
- [26] T. H. A. A. Al-Shahrani and M. F. A. Al-Mansoori, "Protective coatings for reinforced concrete structures under explosive loading," *Materials*, vol. 14, no. 12, p. 3346, 2021.
- [27] R. C. H. K. N. Al-Jabari and H. A. A. Al-Din, "Future directions in blast-resistant design of structures," *Journal of Structural Engineering*, vol. 147, no. 5, p. 04021032, 2021.
- [12] A. Nayyeri, "Designing safe structures (basic principles and concepts)," Tehran: Malek Ashtar University of Technology, 2013, pp. 45(s). (In Persian)
- [13] M. Chiquito, L. M. López, R. Castedo, and A. P. Pérez-Caldentey, "Behaviour of retrofitted masonry walls subjected to blast loading: damage assessment," *Engineering Structures*, vol. 14, pp. 201, 2019.
- [14] S. Payman and M. H. Taghvi Parsa, "Analysis of side surface explosive loading effects in a three-dimensional numerical model of reinforced concrete underground structure with RHT resistance model," *Civil Defense*, vol. 8, no. 3, pp. 35-44, 2017. (In Persian)
- [15] M. Taji, A. Hosseinzadeh Barforoosh, and A. Abedi, "Comparison of experiment and simulation of blast loading on the steel beam," in *11th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*, NSW, Australia, 2015, pp. 24-26. (In Persian)
- [16] P. Hassanvand and M. Hosseini, "Reinforcement of concrete bridge columns against explosive loading and comparison of different reinforcement methods," *Civil Defense*, vol. 14, no. 3, pp. 27-39, 2023. (In Persian)
- [17] J. Li, X. Huang, and G. Ma, "Blast protection shelter by using hollow steel filled with recycled concrete," *Tianjin University and Springer*, vol. 14, pp. 426-429, 2008.
- [18] T. J. Holmquist, G. R. Johnson, and W. H. Cook, "A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures," in *The 14th International Symposium on Ballistics*, pp. 591-600, 1993.
- [19] K. Xu and Y. Lu, "Numerical simulation study of spallation in reinforced concrete plates subjected to blast loading," *Computers & Structures*, vol. 84, pp. 431-438, 2006.