



Semnan University



## Research Article

# Damage Evaluation of Concrete Bridge with Steel Piers Subjected to Explosive Loads

Sohrab Mirassi <sup>a</sup>, Mohammad Momeni <sup>b</sup>, Ahmad Hosseini Moorderaz <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Shahrekord Branch, Islamic Azad University, Shahrekord, Iran

<sup>b</sup> Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Fasa University, Fasa, Iran

<sup>c</sup> MSc Student, Department of Civil Engineering, Bushehr Branch, Islamic Azad University, Bushehr, Iran

## PAPER INFO

### Paper history:

Received: 03 September 2022

Revised: 08 February 2024

Accepted: 17 February 2024

### Keywords:

Concrete bridge with steel piers,  
Blast loading,  
Finite element analysis,  
Damage assessment,  
Support rotation.

## ABSTRACT

The transportation system infrastructure in any country encompasses roads, highways, and crucially, bridges. Among these components, bridges hold significant importance. Throughout their operational lifespan, structures endure various loadings that impact their design and necessitate strengthening measures. Evaluating and assessing the behavior of bridges designed and implemented decades ago, adhering to outdated regulations but still serving as access routes today, is vital. Notably, certain older bridges, particularly those with steel piers, require special attention due to the effects of aging on their behavior and susceptibility to various loads, including explosive ones. Finding solutions for ensuring their safety and implementing rehabilitation measures becomes imperative. This paper delves into a case study on a communication bridge in Kazerun city, focusing on bridges with steel piers. The investigation explores the bridge's behavior under the influence of different explosive loads through finite element analysis. The LS-DYNA finite element software was employed for the necessary analysis, evaluating both the local failure of the bridge piers and the overall failure of the entire bridge using the support rotation criterion. The study reveals that, as the explosive charge weight increases, the permanent displacement in the concrete slab of the bridge rises, leading to a shift in damage levels from low to medium. Furthermore, incorporating steel beams in the longitudinal direction of the concrete slab proves effective in reducing deformation caused by explosive loads, subsequently minimizing damage. The proximity of a specific bridge member to the explosion center correlates with a higher local failure rate. Ultimately, the areas experiencing greater local failure witness a subsequent general failure of the steel piers, bringing the bridge closer to collapse.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.28278.2328>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

\* Corresponding author.

E-mail address: [s.mirasi@sutech.ac.ir](mailto:s.mirasi@sutech.ac.ir)

## How to cite this article:

Mirassi, S., Momeni, M., & Hosseini Moorderaz, A. (2024). Damage evaluation of concrete bridge with steel piers subjected to explosive loads. *Journal of Modeling in Engineering*, 22(78), 307-326. doi: 10.22075/jme.2024.28278.2328

## ارزیابی میزان خرابی پل بتنی با پایه‌های فولادی تحت اثر بارهای انفجاری

سهراب میراثی<sup>۱\*</sup>، محمد مومنی<sup>۲</sup>، احمد حسینی مور دراز<sup>۳</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۱۲	<p>زیربنای سیستم حمل‌ونقل در هر کشوری شامل راه‌ها، بزرگراه‌ها و پل‌ها می‌باشد که از این بین پل‌ها از اهمیت بسیار بالایی برخوردارند. هر سازه در طول عمر مفید خود تحت اثر بارگذاری‌های متنوعی قرار می‌گیرد که میزان خطرپذیری آن در برابر بارهای وارده، بر طراحی و مقاوم‌سازی آن تأثیرگذار است. تعیین رفتار پلهایی که در گذشته و بر اساس آئین‌نامه‌های قدیم طراحی و اجرا شده‌اند و امروزه نیز به‌عنوان راه‌های دسترسی از آن‌ها استفاده می‌شوند بسیار حائز اهمیت است و باید مورد ارزیابی و قضاوت قرار گیرند. از نمونه این پل‌های قدیمی می‌توان به پل‌هایی اشاره کرد که دارای پایه‌های فولادی هستند که با توجه به گذشت زمان، ارزیابی رفتار و میزان خرابی آن‌ها در برابر بارهای ورودی از جمله بارهای انفجاری بیش‌ازپیش احساس می‌گردد تا در صورت نیاز راهکارهایی برای ایمن‌سازی و مقاوم‌سازی آن‌ها ارائه گردد. در این مقاله با استفاده از تحلیل اجزای محدود به مطالعه موردی بر روی یک پل ارتباطی با پایه‌های فولادی در شهر کازرون پرداخته شده است و رفتار پل مذکور تحت اثر بارهای مختلف انفجاری مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای انجام تحلیل‌های موردنیاز، از نرم‌افزار اجزای محدود LS-DYNA استفاده شده است و خرابی موضعی پایه‌های پل و خرابی کلی پل با استفاده از معیار چرخش تکیه‌گاهی مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین، با افزایش میزان ماده منفجره، میزان تغییر مکان دائمی ایجادشده در دال بتنی پل بیشتر می‌گردد که منجر به تغییر میزان خرابی از سطح کم به سطح متوسط می‌شود. علاوه بر این، نتایج نشان داد که استفاده از تیرهای فولادی در راستای طول دال بتنی پل، میزان تغییر شکل‌های ایجادشده تحت اثر بارهای انفجاری را کاهش می‌دهد و متعاقباً میزان خرابی ایجادشده نیز کاهش می‌یابد همچنین نتایج نشان داد که هر چقدر عضو موردنظر به کانون انفجار نزدیک‌تر باشد میزان خرابی موضعی بیشتر بوده که در نهایت از محلی که خرابی موضعی بیشتر است پایه فولادی پل دچار خرابی کلی و فروریزش می‌گردد.</p>
بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۱۹	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۲۸	
<b>واژگان کلیدی:</b>	
پل بتنی با پایه‌های فولادی، بارگذاری انفجار، تحلیل اجزای محدود، ارزیابی خرابی، چرخش تکیه‌گاهی.	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.28278.2328>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱-مقدمه  
 با توجه به افزایش روزافزون حملات تروریستی در جوامع بشری، ضرورت انجام کارهای تحقیقاتی به منظور تعیین رفتار سازه‌ای پل‌ها تحت اثر بارهای شدید انفجاری

بیش‌ازپیش توسط محققان احساس شده و توجه آنان را به خود جلب نموده است. پل‌ها نقش مهمی در کمک‌رسانی یا تخلیه یک منطقه بحران‌زده بر عهده دارند و جز شریان‌های حیاتی هر کشوری محسوب می‌شوند که از بار ترافیکی

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: s.mirasi@sutech.ac.ir

۱. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران

۲. استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فسا، فسا، ایران

استناد به این مقاله:

میراثی، سهراب، مومنی، محمد، و حسینی مور دراز، احمد. (۱۴۰۳). ارزیابی میزان خرابی پل بتنی با پایه‌های فولادی تحت اثر بارهای انفجاری. مدل سازی در مهندسی،

۲۲(۷۸)، ۳۰۷-۳۲۶. doi: 10.22075/jme.2024.28278.2328

در سال ۲۰۱۰ [۵ و ۶] رفتار پل‌های بزرگ نگهداری شده توسط کابل‌ها را به صورت عددی با استفاده از مدل‌سازی توسط نرم‌افزار LS-DYNA تحت اثر بارگذاری دینامیکی انفجار بررسی نمودند. نتایج تحقیقات ایشان نشان داد که استفاده از FRP<sup>۴</sup> تأثیر بسیار خوبی بر بهبود رفتار پل تحت بارگذاری‌های دینامیکی انفجار دارد. Kovar و Foglar در سال ۲۰۱۳ [۷] آثار بارگذاری دینامیکی ناشی از انفجار را بر رفتار عرشه پل بتن مسلح به صورت آزمایشگاهی و در مقیاس واقعی به همراه مدل‌سازی عددی بررسی نمودند. نتایج آزمایش‌های ایشان در قالب تأثیر الیاف بر بهبود رفتار دال‌ها و تغییر مقاومتی بتن ارائه گردید به طوری که با افزودن الیاف به نمونه‌های آزمایشگاهی از حجم تخریب کاسته شده و رفتار نمونه‌ها از حالت ترد به حالت شکل‌پذیر تغییر یافت. Li و همکاران در سال ۲۰۱۸ [۸] به بررسی آزمایشگاهی و عددی سازوکار آسیب‌دیدگی ستون‌های پل‌های از نوع مقطع فولادی دوجداره پرشده با بتن واقع در معرض بارهای انفجاری به صورت آزمایشگاهی و عددی پرداختند. نتایج نشان داد که آسیب موضعی در مجاورت منطقه انفجار از جمله ایجاد دهانه در اطراف نقطه انفجار، شکستگی یا پارگی لوله فولادی بیرونی، و شکستگی در دیوار ساندویچی جلویی متمرکز می‌شود. همچنین شکست بتن هسته نقش غالب در مکانیسم جذب انرژی ستون‌های دوجداره فولادی پر شده با بتن (CFDST)<sup>۵</sup> به دلیل اثر محصور شدن توسط لوله‌های فولادی ایفا می‌کند. Pan و همکاران در سال ۲۰۱۳ [۹] به شبیه‌سازی عملکرد سه نوع پل مدرن بتن مسلح، از جمله پل دال روی تیر، پل باکس تیر و پل کابلی با دهانه بلند تحت اثر بارهای دینامیکی انفجاری مختلف پرداختند. اثرات سناریوهای مختلف بارگذاری انفجار از نظر وزن و موقعیت و اندرکنششان با سازه‌های پل مورد بررسی قرار گرفت و هر دو مکانیسم آسیب موضعی و پاسخ کلی سه پل در نظر گرفته شده مورد تحلیل قرار گرفت. یکی از نتایج مهمی که ایشان گرفتند این بود که، استفاده از الیاف CFRP<sup>۵</sup> می‌تواند به طرز مؤثری میزان خرابی پل و تغییر شکل‌ها را کاهش دهد. Hashemi و همکاران در سال ۲۰۱۶ [۱۰] به بررسی و مطالعه عددی پاسخ

منطقه خود می‌کاهند و خدمت‌پذیری را تسریع می‌نمایند؛ بنابراین همواره پل‌ها در جنگ‌ها و حملات تروریستی از اهداف مهم برای تروریست‌ها محسوب می‌شوند. تحقیقات بسیار زیادی در زمینه بررسی رفتار پل‌ها تحت اثر بارهای انفجاری به صورت آزمایشگاهی و عددی انجام شده است که در ادامه به تعدادی از آن‌ها اشاره خواهد شد. Fujikura و همکاران در سال ۲۰۰۸ [۱] به بررسی آزمایشگاهی پایه‌های پل مقاوم چند خطری دارای لوله فولادی پر شده از بتن تحت بارگذاری انفجاری پرداختند. ایشان در تحقیق خود به ارائه پایه خمشی چند ستونی با ستون‌های لوله فولادی پر شده با بتن (CFST)<sup>۶</sup> پرداختند و کفایت سیستم موردنظر را به طور آزمایشگاهی تحت بارگذاری دینامیکی انفجار مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که ستون‌های CFST عملکرد لرزه‌ای رضایت‌بخشی در برابر بارهای لرزه‌ای دارند و از سوی دیگر مقاومت کافی نیز در برابر بارهای انفجاری را تأمین می‌کند. Williams و Williamson در سال ۲۰۱۱ [۲] به بررسی دقیق نحوه رفتار ستون‌های بتنی پل تحت اثر بارهای انفجاری پرداختند. ایشان در تحقیق خود به دنبال به کارگیری روش اجزا محدود به منظور مدل‌سازی مکانیزم خرابی ستون تحت اثر بار انفجار بودند و مطالعه دقیقی بر روی نحوه کنده شدن پوشش بتن در وجه روبرویی و پشتی ستون تحت بار انفجار انجام دادند و نتایج حاصل با آنچه که از آزمایش بدست آورده شده بود را مورد مقایسه قرار دادند. Yi و همکاران در سال ۲۰۱۴ [۳] به بررسی اثرات بارهای انفجاری بر پل‌های آزادراه‌ها و مدل‌سازی آن پرداختند و رویکرد جدیدی برای اعمال بارهای انفجاری بر روی اجزای پل ارائه نمودند که قابلیت مدل‌سازی بارهای انفجاری را دارد و اثرات شکست و انعکاس بارهای انفجاری را می‌تواند به درستی شبیه‌سازی نماید. Yazdani و Islam در سال ۲۰۰۸ [۴] به بررسی و ارزیابی عملکرد پل‌های ارائه شده در آیین‌نامه AASHTO تحت اثر بارگذاری دینامیکی انفجار پرداختند. ایشان تحقیقات خود را به صورت موردی بر روی یک پل بزرگ بین ایالتی انجام دادند. نتایج حاصل نشان داد که پل در نظر گرفته شده تحت اثر بار دینامیکی انفجار دچار شکست شده و مقاومت لازم و کافی برای مقابله با بارهای وارده را ندارد. Tang و Hao

<sup>4</sup> Concrete-filled double skin steel tubular

<sup>5</sup> Carbon fiber-reinforced plastic

<sup>2</sup> Concrete-filled steel tubular

<sup>3</sup> Fibre-reinforced polymer

سال ۲۰۲۳ [۱۴] به ارزیابی آسیب‌پذیری احتمالی یک پایه پل بتن مسلح تحت بارگذاری انفجاری پرداختند و منحنی آسیب‌پذیری مربوط سطوح مختلف عملکردی را ارائه نمودند. نتایج حاصل از تحقیقات ایشان نشان داد که آسیب ناشی از انفجار به پایه پل تأثیر قابل توجهی بر ظرفیت باربری محوری دارد و حالت‌های آسیب احتمال شکست اسکله مربوط به سطوح عملکرد مختلف با افزایش ماده منفجره افزایش می‌یابد. همچنین نشان دادند زمانی که وزن ماده منفجره تی ان تی از ۵۰۰ کیلوگرم تجاوز نکند، احتمال فروپاشی اسکله کمتر از ۲۰ درصد است. تحقیقات انجام شده توسط Kong و همکاران در سال ۲۰۲۳ [۱۵] نشان داد که آسیب خمشی در پایه‌های پل شبیه به تیرهای کنسول تحت بارهای مقاومتی مختلف است، درحالی‌که آسیب اعضای پایه دو ستونی تحت جابجایی ثابت با افزایش زاویه موج انفجار افزایش می‌یابد. Nassr و همکاران [۲۱-۱۶] آزمایشات میدانی گسترده‌ای را بر روی تعدادی ستون فولادی با مقاطع بال‌پهن تحت انفجارهای مختلف انجام دادند. مقادیر میانگین فشار بیشینه بازتاب شده و مدت‌زمان تداوم فاز مثبت در هر آزمایش توسط سنسورهایی ثبت شده است که به منظور تحلیل‌های عددی از آن‌ها استفاده شده است. ایشان نتایج آزمایشگاهی به‌دست‌آمده را با شبیه‌سازی‌های عددی مقایسه نمودند. Li و همکاران [۲۲] به منظور بررسی ظرفیت باقی‌مانده ستون‌های بتنی پس از انفجار، دو دسته ستون بتنی با و بدون در نظر گرفتن محدودیت‌های لرزه‌ای را تحت بار انفجار شبیه‌سازی شده توسط محرک‌های هیدرولیکی مورد آزمایش قرار دادند. ایشان نتیجه گرفتند که ستون بتنی با در نظر گرفتن ملاحظات لرزه‌ای، ظرفیت باقی‌مانده پس از انفجار بیشتری دارد. Al-Thairy [۲۳] به منظور محاسبه پاسخ ستون‌های فولادی تحت اثر توأم نیروی محوری و بار انفجار، به اصلاح روش یک درجه آزادی معادل پرداخت. جهت اصلاح روش یک درجه آزادی معادل از تابع مقاومت غیرخطی استفاده نمود که قابلیت در نظر گرفتن بارهای محوری توأم با بار جانبی انفجار را دارا می‌باشد. ایشان نتایج حاصل از روش خود را با نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل اجزای محدود توسط نرم‌افزار ABAQUS و نتایج آزمایشگاهی Nassr و همکاران مقایسه نمود و همخوانی بسیار خوبی بین نتایج وجود داشت. Hadianfard و همکاران [۲۴] در

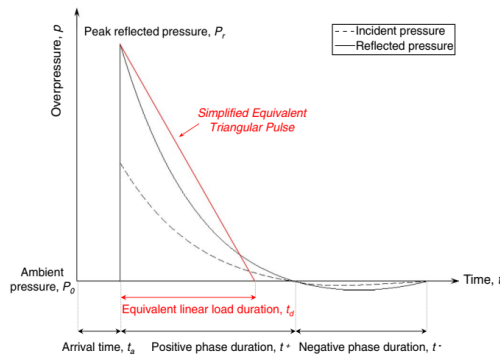
دینامیکی پل‌های کابلی تحت بارهای انفجاری با استفاده از نرم‌افزار LS-DYNA پرداختند. نتایج حاصل نشان داد که قسمت‌هایی از پل که به محل انفجار نزدیک‌تر است میزان خرابی بیشتری را متحمل شده‌اند و با فاصله گرفتن از محل انفجار از میزان خرابی کاسته شده است. Hacıfendioğlu و همکاران در سال ۲۰۱۵ [۱۱] به بررسی پاسخ دینامیکی پل‌های مصالح بنایی تاریخی تحت اثر ضربه‌های زمینی ناشی از بارهای دینامیکی انفجاری با استفاده از روش طیف پاسخ شوک چند نقطه‌ای پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که تفاوت‌های قابل توجهی بین حرکت زمین ناشی از انفجار یکنواخت و چند نقطه‌ای وجود دارد. Tetougueni و همکاران در سال ۲۰۲۰ [۱۲] به مطالعه ارزیابی آسیب ناشی از یک بار تصادفی مانند بارگذاری دینامیکی انفجار بر یک پل کابلی پرداختند. ایشان نشان دادند که از طریق تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی، می‌توان پاسخ سازه‌های پل‌های کابلی را ارزیابی کرد و سپس با در نظر گرفتن پارامترهای بارگذاری و موقعیت‌های مختلف، آسیب‌های احتمالی آنی و آتی را مشخص نمود. Gholipour و همکاران در سال ۲۰۲۱ به بررسی آسیب‌پذیری پایه پل عرشه فولادی با پایه‌های بتن مسلح (RC) به‌صورت عددی با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود در نرم‌افزار LS-DYNA تحت اثر بارهای هم‌زمان ناشی از برخورد کشتی و بارگذاری انفجار پرداختند. نتایج حاصل نشان داد که وقتی بارهای ضربه‌ای و انفجاری به‌صورت هم‌زمان در یک ارتفاع یکسان بر روی ستون پایه اعمال شوند، پایه‌های پل دچار شکست موضعی شدیدتری شده که احتمال وقوع این شرایط در هنگام برخورد بار (شناوری که برای ترابری اجسام سنگین و حجیم بر روی آب به کار می‌رود) بیشتر است. علاوه بر این، مشخص شد که پایه‌های پل نیروهای داخلی بیشتری را زمانی که بارگذاری انفجاری متوالی در زمان وقوع نیروی ضربه اوج اعمال می‌شود، تجربه می‌کند. در تحقیق انجام شده توسط Maiorana و همکاران در سال ۲۰۲۲ [۱۳] یک مدل منسجم، با استفاده از روش تحلیل المان محدود، برای بررسی رفتار پل‌های فولادی با تمرکز بر مکانیزم فروپاشی توسعه داده شد و از اطلاعات مربوط به تنش‌ها، کرنش‌ها و جابجایی به‌عنوان تابعی از موقعیت و شدت آسیب دال به منظور بررسی رفتار سازه استفاده گردید. Lv و همکاران در

<sup>6</sup> Reinforced concrete

تحقیق مشخصی بر روی پل‌های قدیمی با پایه‌های فولادی تحت اثر بارهای انفجاری انجام نشده و رفتار آن مورد بررسی قرار نگرفته است. با توجه به اینکه پل‌های قدیمی این‌چنینی همچنان به‌عنوان راه ارتباطی در کشور عزیزمان ایران استفاده می‌شوند لذا بررسی رفتار این پل‌ها و ایمنی آن‌ها در برابر بارهای وارده انفجاری بسیار حائز اهمیت است. در این مقاله با استفاده تحلیل اجزا محدود در نرم‌افزار LS-DYNA به ارزیابی میزان خرابی پل با پایه‌های فولادی پرداخته شده است. از این رو یک پل موردی که در شهرستان کازرون واقع است در نظر گرفته شده است و توسعه مدل‌سازی عددی بر روی آن انجام شده است. برای مدل‌سازی اجزای پل از المان پوسته استفاده گردید که دقت قابل قبولی در تعیین پاسخ عضو دارد. رفتار پل و رفتار پایه‌های فولادی تحت اثر سناریوهای انفجاری مختلف شامل انفجار رخ داده بر روی زمین در کنار پل و انفجار رخ داده بر روی دال بتنی پل بررسی گردید و میزان خرابی ایجاد شده نیز در هر حالت بر اساس روش معیار چرخش تکیه‌گاهی برای پایه‌های پل و دال بتنی پل محاسبه گردید.

## ۲- بارگذاری انفجار

انفجار عبارت است از آزادسازی ناگهانی انرژی از منبع انفجار که موجب به وجود آمدن گازهایی با فشار و دمای بسیار بالا می‌گردد که این تغییر باعث افزایش ناگهانی فشار محیطی تا فشار رخداد<sup>۷</sup> می‌شود [۳۴-۳۶]. شکل (۱) نشان‌دهنده تابع زمانی فشار انفجار می‌باشد. همان‌طور که از شکل پیداست، دقیقاً بعد از انفجار، یک افزایش ناگهانی در فشار محیطی تا رسیدن به بیشینه فشار انعکاسی رخ می‌دهد [۳۷]. پس از آن فشار بیشینه به‌صورت نمایی کاهش می‌یابد تا به فشار محیطی برسد.



شکل ۱- بارگذاری انفجار ایده‌آل‌سازی شده به‌صورت نمایی یا

مثلی [۳۸]

پژوهشی به بررسی رفتار ستون‌های فولادی با مقاطع بال-پهن، صلیبی و قوطی با شرایط مرزی دوسر مفصل و دوسر گیردار در معرض دو زاویه گسترش موج انفجار صفر و ۴۵ درجه پرداختند. ایشان نشان دادند که در انفجار با زاویه گسترش صفر درجه، مقطع IPB و در انفجار با زاویه گسترش ۴۵ درجه مقاطع دارای دو محور قوی، عملکرد مطلوبی از خود نشان می‌دهند. Mazurkiewicz و همکاران [۲۵] تأثیر مقدار ماده منفجره، موقعیت انفجار و شکل ماده منفجره را بر روی میزان ظرفیت باربری پس از انفجار ستون‌های فولادی با مقطع I شکل بررسی نمودند. ایشان نتیجه گرفتند که شکل ماده منفجره و موقعیت محل انفجار علاوه بر وزن ماده منفجره می‌تواند تأثیر چشم‌گیری در خرابی و انهدام سازه داشته باشد. Sutton- و Kelliher [۲۶] یک ساختمان بتن مسلح را با فرضیاتی جهت ساده‌سازی مدل در نرم‌افزار LS-DYNA تحلیل کرده‌اند و میزان خرابی ساختمان تحت اثر انفجارهای مختلف در طبقه پارکینگ، بر اساس معیار جابجایی دال‌ها بررسی کرده‌اند. در این پژوهش، با تولید انفجار به‌صورت تصادفی در طبقه همکف، منحنی‌های احتمالاتی مربوط به درصد خرابی سازه را به دست آوردند و نهایتاً الگویی برای میزان خسارت وارده بر ساختمان بر اساس تابع توزیع وایبول ارائه نمودند. معیار خرابی بر اساس جابجایی عمودی دال در نظر گرفته شد و متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شده شامل موقعیت رخداد انفجار برای یک سناریوی تروریستی در نظر گرفته شده، تاریخچه بارگذاری انفجار، بارهای ثقلی وارد بر سازه و ضخامت دال‌ها می‌باشند. Momeni و همکاران [۲۷-۳۳] تحقیقات کامل و جامعی را بر روی رفتار احتمالاتی ستون‌های فولادی بال‌پهن تحت اثر بار انفجار با در نظر عدم قطعیت‌های مربوط به بارگذاری انفجار و مصالح فولاد ارائه دادند. ایشان نشان دادند که در نظر گرفتن عدم قطعیت در طراحی سازه‌ها تحت بار انفجار حائز اهمیت می‌باشد و شرایط تکیه‌گاهی تأثیر بسزایی بر میزان احتمال خرابی ستون فولادی تحت بار انفجار دارد و با تغییر شرایط تکیه‌گاهی از دوسر مفصل به دوسر گیردار احتمال خرابی عضو کاهش می‌یابد. با توجه به تحقیقات ارائه شده در فوق مشخص می‌شود که ارزیابی رفتار سازه‌ها تحت اثر بارهای دینامیکی انفجار بسیار حائز اهمیت است و از این رو محققان توجه ویژه‌ای به آن مبذول داشته‌اند. از سوی دیگر، تاکنون

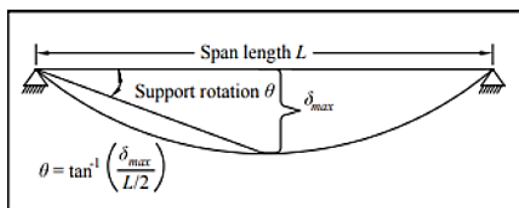
<sup>7</sup> Incident pressure

هشت برابر اضافه فشار می‌گردد. لازم به ذکر است که با توجه به اینکه در انفجارهای سطحی، انفجار دقیقاً بر روی سطح زمین و یا با فاصله خیلی کم از سطح زمین صورت می‌گیرد، برای در نظر گرفتن اندرکنش بین امواج انفجار و سطح زمین که باعث تقویت موج انفجار خواهد شد، برای محاسبه پارامترهای مربوط به انفجار، وزن ورودی مورد استفاده در روابط باید در ضریب ۱/۸ ضرب گردد [۲۶، ۴۵-۴۸].

### ۳- ارزیابی میزان خرابی عضو بر اساس معیار چرخش تکیه‌گاهی

معیار چرخش تکیه‌گاهی ( $\theta$ ) یکی از مرسوم‌ترین روش‌های تعیین و ارزیابی میزان خرابی وارد شده به یک عضو (تیر، ستون، دال، دیوار و ...) تحت اثر بار انفجار است. این معیار تابعی از طول عضو ( $L$ ) و ماکزیمم جابجایی جانبی عضو تحت اثر بار انفجار می‌باشد که توسط رابطه ۰ تعیین می‌گردد [۳۴، ۴۹] و نحوه تعیین آن برای یک عضو سازه‌ای به صورت نمادین در شکل (۲) نشان داده شده است.

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{y_{\max}}{0.5L} \right) \quad (5)$$



شکل ۲- شکل نمادین از نحوه تعیین چرخش تکیه‌گاهی

برای تعیین پذیرش یا عدم پذیرش عضو سازه‌ای تحت اثر بار انفجار، چرخش تکیه‌گاهی به دست آمده از رابطه ۰ را باید با مقادیر مجاز آئین‌نامه‌ای [۳۴] مقایسه کرد. برای اعضای فولادی (مثل ستون) و برای اعضای بتنی (مثل تیر، دال و دیوار) مقادیر مجاز آئین‌نامه‌ای چرخش تکیه‌گاهی برای سطوح خرابی کم، متوسط و زیاد به ترتیب در جدول ۱ و ۲ ارائه شده است. با دقت و توجه در اعداد این جداول می‌توان به این نکته رسید که هر چقدر میزان بار محوری روی ستون بیشتر باشد، آئین‌نامه مقادیر سخت‌گیرانه‌تری برای میزان چرخش در نظر گرفته است و به عبارت دیگر

برای بیان تاریخچه زمانی فشار انفجار ( $P_b(t)$ ) از رابطه Friedlander استفاده می‌شود که به صورت زیر بیان می‌گردد [۳۹، ۴۰].

$$P_b(t) = P_0 + P_{so} \left( 1 - \frac{t-t_a}{t^+} \right) \exp \left( -\alpha \frac{t-t_a}{t^+} \right) \quad (1)$$

در رابطه ۰  $P_{so}$  بیشینه اضافه فشار (فشار مینا)  $P_0$  فشار محیطی  $1.013 \text{ kPa}$ ،  $t^+$  مدت زمان فاز مثبت  $t_a$ ، زمان ورود  $11$  موج انفجار و  $\alpha$  پارامتر شکل  $12$  موج می‌باشد. جهت محاسبه فشار مینا و مدت زمان فاز مثبت انفجار می‌توان از نمودارهای ارائه شده در آئین‌نامه UFC3-340-02 [۳۴] (که عمدتاً از نتایج آزمایشگاهی به دست آمده‌اند) بر حسب فاصله مقیاس شده  $Z$  استفاده نمود. یکی از مرسوم‌ترین روابط برای فاصله مقیاس شده توسط Hopkinson [۴۱] و Cranz [۴۲] ارائه شده است که به شرح زیر است:

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (2)$$

در رابطه (۲)،  $R$  فاصله محل انفجار تا عضو سازه‌ای (سازه) بر حسب متر و  $W$  وزن معادل ماده منفجره بر حسب کیلوگرم تی‌ان‌تی می‌باشد. همچنین برای محاسبه ضریب شکل موج، روابط تقریبی بسیار زیادی ارائه گردیده است که از جمله جدیدترین و پرکاربردترین آن‌ها می‌توان به رابطه ارائه شده توسط Borgers و Vantomme [۴۳، ۴۴] اشاره نمود که به صورت زیر بیان می‌گردد.

$$\alpha = 1.5 Z^{-0.38} \quad \text{for} \quad 0.1 < Z < 30 \quad (3)$$

در نهایت برای محاسبه فشار انعکاسی  $14$  از رابطه ارائه شده توسط Rankine و Hugoniot [۴۰] استفاده می‌گردد. این رابطه تابعی از  $P_0$  و  $P_{so}$  می‌باشد و به صورت زیر بیان می‌گردد.

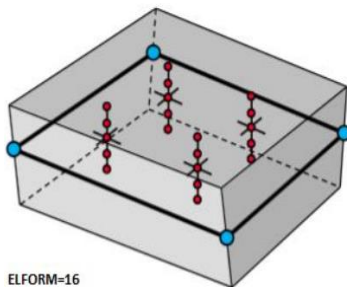
$$P_r = 2P_{so} \left[ \frac{7P_0 + 4P_{so}}{7P_0 + P_{so}} \right] \quad (4)$$

در رابطه فوق اگر مقدار  $P_{so}$  به اندازه کافی کوچک باشد، در این حالت فشار انعکاسی تقریباً دو برابر اضافه فشار و اگر  $P_{so}$  به اندازه کافی بزرگ باشد آنگاه فشار انعکاسی در حدود

<sup>12</sup> Shape parameter  
<sup>13</sup> Scaled distance  
<sup>14</sup> Reflected pressure

<sup>8</sup> Peak overpressure  
<sup>9</sup> Ambient atmospheric pressure  
<sup>10</sup> Positive phase duration  
<sup>11</sup> Arrival time

نرم افزار اجزا محدود و انتخاب المان مناسب برای بیان رفتار هر جز می باشد. به طوری کلی برای مدل سازی یک سازه، می توان از المان های تیر، پوسته و جامد استفاده نمود که انتخاب نوع المان بستگی به دقت مورد نیاز دارد. به طور کلی، المان جامد از دقت بیشتری نسبت به المان های پوسته و تیر برخوردار است ولی هزینه محاسباتی بالایی دارد و در مقیاس های بزرگ (مدل سازی یک سازه کلی به صورت سه بعدی) انتخاب مناسبی نیست. در تحلیل های اجزا محدود، بسته به نوع المان انتخاب شده برای مدل سازی، دقت نتایج و هزینه محاسباتی دستخوش تغییر می گردد [۵۱، ۵۲]. در این مقاله، برای مدل سازی پایه های فولادی پل از المان پوسته با پنج نقطه انتگرال گیری در راستای ضخامت استفاده شده است که در شکل (۳) نشان داده شده است. همچنین برای مدل سازی تیرها، از المان تیر Hughes-Liu استفاده گردیده است که برای افزایش دقت آن، از ضریب تظریف<sup>۱۶</sup> برابر با ۵ استفاده شده است که این رویکرد منجر به افزایش نقاط انتگرال گیری در روش اجزا محدود شده و دقت را تا حد مناسبی بالا می برد. به منظور یافتن المان مناسب برای تحلیل (منظور المانی است که هم دقت مناسب داشته باشد و هم مدت زمان تحلیل را تا حد ممکن کاهش دهد) از تحلیل حساسیت استفاده شده است و تحلیل های بسیار زیادی بر روی ابعاد المان های مربوطه و تأثیر آن بر پاسخ های خروجی انجام شد. نهایتاً این نتیجه به دست آمد که المان پوسته با حداکثر بعد ۴۰ میلی متر رفتار خوبی را نشان می داد و مدت زمان تحلیل را نیز به حداقل ممکن (با حفظ دقت) می رساند.



شکل ۳- المان پوسته به کار گرفته شده در مدل سازی پایه های فولادی پل [۵۳]

برای مدل سازی دال بتنی از روش پیشنهادی Luccioni و همکاران [۵۴] و Kelliher و Swaby [۲۶] استفاده شده

اجازه چرخش کمتری را به عضو مورد نظر می دهد. با استفاده از این مقادیر مجاز می توان میزان خرابی به یک عضو تحت اثر بارهای انفجاری را تعیین کرد که در ادامه و در بخش های بعدی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

جدول ۱- مقادیر مجاز آئین نامه برای میزان خرابی اعضای

سازه های فولادی [۳۴]

مؤلفه	پاسخ کم		پاسخ متوسط		پاسخ زیاد	
	$\theta_a$	$\mu_a$	$\theta_a$	$\mu_a$	$\theta_a$	$\mu_a$
اعضای سازه فولادی (بار محوری قابل توجه)*	۱/۵	۱/۰	۲/۰	۱/۵	۳/۰	۲/۰
اعضای سازه فولادی (بار محوری ناچیز)*	۱/۵	۱/۰	۳/۰	۲/۰	۶/۰	۴/۰

\* "بار محوری قابل توجه" به منزله اعمال بار فشاری محوری اولیه عضو بیشتر از ۲۰٪ ظرفیت محوری عضو است.

جدول ۲- مقادیر مجاز آئین نامه برای میزان خرابی اعضای

تیرهای بتنی، دال های بتنی و پانل های دیواری [۳۴]

مؤلفه	پاسخ کم		پاسخ متوسط		پاسخ زیاد	
	$\theta_a$	$\mu_a$	$\theta_a$	$\mu_a$	$\theta_a$	$\mu_a$
تیرهای بتن مسلح، دال ها و پانل های دیوار (بدون تسلیح برشی)	-	۱/۰	-	۲/۰	-	۵/۰
تیرهای بتن مسلح، دال ها و پانل های دیوار (تسلیح فشاری و برشی در نواحی با حداکثر لنگر)	-	۲/۰	-	۴/۰	-	۶/۰

#### ۴- اثرات نرخ کرنش در بارگذاری های سریع

یکی از نکات مهمی که برای تحلیل یک سازه تحت اثر بار انفجار باید به آن توجه نمود اثرات نرخ کرنش است که در هنگام اعمال بارهای دینامیکی آبی، مصالح نرخ کرنش بسیار بیشتری نسبت به زمان اعمال بارهایی همچون بار زلزله، بار باد و بار زنده تجربه می کنند و به موجب آن مشخصات مکانیکی مصالح دستخوش تغییر می شود. به منظور در نظر گرفتن اثرات نرخ کرنش از ضریب افزایش دینامیکی<sup>۱۵</sup> (DIF) استفاده می شود که به صورت زیر تعریف می گردد [۵۰] به رابطه کوپر-سیموندز معروف است:

$$DIF = \frac{F_{dy}}{F_y} = 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C_c} \right)^{\frac{1}{P_c}} \quad (۶)$$

در رابطه فوق،  $F_y$  بیانگر میزان تنش تسلیم استاتیکی،  $F_{dy}$  تنش تسلیم دینامیکی و  $\dot{\epsilon}$  نرخ کرنش مصالح است.

#### ۵- راه کار کلی مدل سازی اجزا محدود

اولین گام در هر تحلیل عددی، مدل سازی هندسه سازه در

<sup>16</sup> Refinement factor

<sup>15</sup> Dynamic increase factor



DYNA از مدل ماده MAT PLASTICITY WITH DAMAGE استفاده شده است که اثرات نرخ کرنش را می‌تواند بر اساس مدل کوپر-سیموندز که ضرایب آن در جدول ۳ ارائه شده است بیان کند. لازم به ذکر است که برای شبیه‌سازی دال بتنی، از المان پوسته استفاده شده است و مشخصات مصالح تعریف شده در فوق به آن اعمال شده است. به منظور تعریف و تعیین مشخصات فولاد به کاررفته در ستون‌ها و تیرها در نرم‌افزار LS-DYNA، از مدل ماده MAT PLASTIC KINEMATIC استفاده شده است که قابلیت در نظر گرفتن اثرات نرخ کرنش بر اساس رابطه کوپر-سیموندز را دارد. همچنین برای مصالح فولادی در نظر گرفته شده در مدل‌سازی پایه‌های فولادی، پارامترهای C و P به ترتیب برابر با ۴۰/۴ و ۵ در مدل‌سازی در نظر گرفته شده است.

است. در این راهکار به جای مدل‌سازی بتن و میلگرد به صورت مجزا (که در وسعت یک پل، در تحلیل اجزا محدود هزینه محاسباتی بسیار زیادی را تحمیل می‌کند)، بتن و میلگرد به صورت یک ماده همگن معادل‌سازی می‌گردد به طوری رفتار این ماده معادل بتواند رفتار بتن مسلح را تا نقطه شکست با تقریب مناسبی شبیه‌سازی کند. جهت مدل‌سازی این ماده همگن، پارامترهایی همچون  $\rho$  جرم واحد حجم،  $\nu$  ضریب پواسون، E مدول الاستیسیته در بخش الاستیک،  $E_{tan}$  مدول الاستیسیته در بخش سخت‌شوندگی کرنشی،  $\sigma_y$  تنش تسلیم،  $\epsilon_{ult}$  کرنش نهایی و C و P مربوط به ضرایب ثابت موجود در رابطه کوپر-سیموندس برای اعمال افزایش مقاومت ناشی از نرخ سریع کرنش لازم می‌باشد که در جدول ۳ نمایش داده شده است. به منظور مدل‌سازی این ماده همگن در نرم‌افزار LS-

جدول ۳- مشخصات مصالح همگن معادل بتن مسلح مربوط به دال بتنی پل [۲۶]

خصوصیات مصالح	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\nu$	E (Gpa)	$\sigma_y$ (Mpa)	$E_{tan}$ (Gpa)	$\epsilon_{ult}$	C	P
دال بتنی	۲۶۱۵	۰/۲	۳۸/۶۹	۷/۷۵۴	۲/۸۵۰	۰/۰۰۰۵۱	۳۲	۲/۶۵

بر روی ستون انتخابی نیز برابر ۲۷۰ کیلو نیوتن بوده است. نحوه اعمال شرایط تکیه‌گاهی به این صورت است که حرکت انتقالی نودها در قسمت پایین ستون در کلیه راستاها مقید می‌شود، در صورتی که در قسمت بالای ستون نودها می‌توانند در راستای محوری ستون حرکت داشته باشند تا تغییر شکل محوری ناشی از بار محوری لحاظ گردد. لازم به ذکر است که برای اعمال بار محوری ۲۷۰ کیلو نیوتن، این بار بین نودهای بالای ستون تقسیم می‌شود و از دستور LOAD\_NODE\_SET در نرم‌افزار LS-DYNA برای اعمال آن استفاده شده است. در این آزمایش وزن ماده منفجره و فاصله رخداد آن به ترتیب برابر با ۱۵۰ کیلوگرم ANFO<sup>۱۷</sup> و ۹ متر بوده است. برای مدل‌سازی بار انفجار مطابق آنچه که در آزمایش انجام شده است، از پارامترهای فشار انعکاسی و مدت زمان فاز مثبت انفجار ثبت شده در آزمایش استفاده شده است که توسط حس‌گرهای پیشرفته اندازه‌گیری شده است. به این ترتیب فشار انعکاسی میانگین برابر با ۱۵۶۰ کیلو پاسکال و مدت زمان میانگین فاز مثبت برابر با ۶/۲ میلی ثانیه گزارش شده است که در تحلیل اجزا محدود نیز این رقم‌ها استفاده شده است. لازم به ذکر است

برای اعمال شرایط تکیه‌گاهی نیز بسته به اینکه چه حرکتی از سازه و در چه راستایی انتظار می‌رود، می‌توان قیدهای موردنظر را اعمال کرد. به عنوان مثال، برای در نظر گرفتن اثر نیروی محور وارده به پایه‌های فولادی از سوی دال بتنی پل، باید جابجایی نودهای بالایی ستون در راستای محوری را باز نمود تا با وارد شدن نیروی محوری، تغییر شکل محوری لحاظ گردد تا در صورتی که بار جانبی‌ای نیز به ستون وارد شد، اثرات P- $\Delta$  ناشی از این نیروی محوری نیز وارد کار گردد.

#### ۶- صحت‌سنجی مدل اجزا محدود

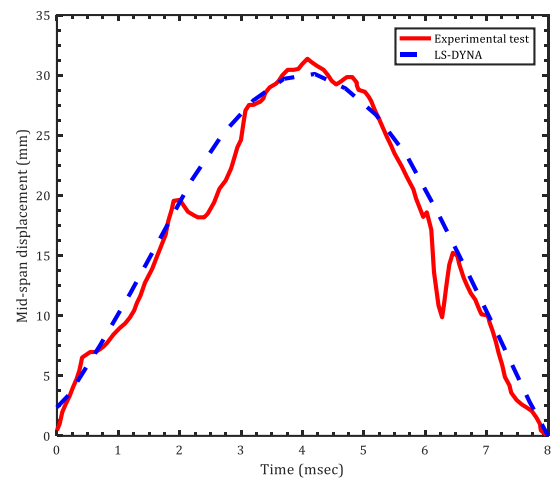
به منظور صحت‌سنجی دقت نرم‌افزار LS-DYNA در تعیین پاسخ سازه تحت اثر بارهای انفجاری، از تحقیقات Nassr و همکاران [۱۸، ۱۹] استفاده شده است که به صورت آزمایشگاهی رفتار تعدادی ستون فولادی را تحت اثر بارهای انفجاری موردبررسی قرار داده‌اند. برای این منظور، ستونی فولادی به طول ۲/۴۱۳ متر با سطح مقطع  $W24 \times 15$  در نظر گرفته شده است که در تحقیقات ایشان مورد آزمایش قرار گرفته است. شرایط تکیه‌گاهی ستون در بالا و پائین به صورت مفصلی بوده و نیروی محوری موجود

<sup>17</sup> Ammonium nitrate and fuel oil



را تأمین می‌کند (انتهای شهرستان کازرون) و از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. انتخاب این پل به این دلیل انجام شد که کمتر تحقیقی بر روی این گونه پل‌های قدیمی انجام گردیده است و با توجه به اینکه عمر این پل‌ها بیش از ۵۰ سال می‌باشد، لذا نه تنها طرح‌های بهسازی و مقاوم‌سازی آن‌ها حائز اهمیت است بلکه طرح‌های پدافندی و تأثیر بارهای انفجاری نیز بر روی این پل‌ها اهمیت پیدا می‌کند. ستون‌های این پل بر روی پی‌هایی قرار گرفته است که ارتفاع تقریبی آن‌ها در حدود ۹۰ سانتیمتر می‌باشد (شکل-۶). در تحلیل اجزا محدود نحوه اتصال ستون‌های پل به این پی‌ها (با توجه به اینکه پی‌های موردنظر مصالح بنایی است) در جهت اطمینان مفصلی در نظر گرفته می‌شود تا حداکثر میزان تغییر شکل برای آن لحاظ گردد. تعداد دهانه‌های کلی این پل ۱۶ می‌باشد که هر دهانه ۱۳ عدد تیر IPE300 با ارتفاع ۳۰ دارد که طول هر کدام از آن‌ها ۷ متر می‌باشد (شکل-۷). در مجموع تعداد کلی ستون‌ها ۸۰ می‌باشد و طول کلی پل ۱۱۲ متر می‌باشد. محیط هر کدام از پایه‌های فولادی به کار گرفته شده در حدود ۱/۰۵ متر (قطر ۳۳ سانتیمتری و ضخامت ۱۲/۵ میلی‌متر) می‌باشد. بر روی گروه ستون‌هایی که در ردیف یکسان قرار دارند، دو عدد تیر آهن IPE300 قرار دارد که به صورت دابل به هم متصل شده‌اند و نقش باربری برای انتقال نیرو از کف سازی پل (شامل تیر، بتن، آسفالت و ...) به ستون‌ها را در بر دارد. همانند فرضی که برای نحوه اتصال ستون به پی در نظر گرفته شد، فرض می‌شود که پایه‌ها در محل اتصال به تیرها دارای اتصال مفصلی است (شکل-۸) تا در پاسخ به دست‌آمده از پایه‌ها حداکثر تغییر مکان لحاظ گردد و به عبارت دیگر، آنچه از تحلیل به دست می‌آید برای حالتی باشد که بیشترین پتانسیل خرابی را داشته باشد. ضخامت دال بتنی قرار گرفته بر روی تیرهای فرعی ۴۰ سانتیمتر می‌باشد و عرض دال ۸/۴ متر می‌باشد؛ به عبارت دیگر، دهانه بارگیر برابر با  $8/4 \times 7/0 = 58/8$  مترمربع است که بعد در تحلیل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که ضخامت آسفالت نیز در حدود ۵ سانتیمتر در نظر گرفته شده است که وزن سربار آن به مدل وارد می‌گردد. همچنین فرض می‌شود که تنش تسلیم فولاد برابر با ۲۴۰ مگاپاسکال و مدول الاستیسیته فولاد نیز برابر با ۲۱۰ گیگاپاسکال در نظر گرفته می‌شود.

که از این مقادیر به منظور تعریف تاریخچه زمانی بار انفجار در مدل‌های اجزا محدود استفاده گردیده است خمش ناشی از بار انفجار حول محور قوی ستون رخ داده است و چگالی، تنش تسلیم، ضریب ارتجاعی، نسبت پواسون و کرنش شکست فولاد سازنده ستون به ترتیب برابر با ۷۸۵۰ کیلوگرم بر مترمربع، ۴۷۰ مگاپاسکال، ۲۱۰ گیگاپاسکال، ۰/۲ و ۰/۳ بوده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام شده توسط نرم‌افزار LS-DYNA (با المان پوسته) و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی در شکل (۴) ارائه شده است.



شکل ۴- مقایسه جابجایی میان دهانه ستون فولادی به دست‌آمده از تحلیل اجزا محدود با المان پوسته با نتایج آزمایشگاهی Nassr و همکاران [۱۸، ۱۹]

بر اساس شکل (۴) مشاهده می‌گردد که یک هم‌خوانی بسیار خوبی بین نتایج به دست‌آمده از روش اجزا محدود و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد. به همین منظور ماکزیمم جابجایی میان دهانه به دست‌آمده از روش اجزا محدود برای ستون فولادی برابر با ۳۰/۱۵ میلی‌متر است که مقدار به دست‌آمده آزمایشگاهی ۳۱/۳۶ میلی‌متر بوده است که در حدود ۳/۸۶ درصد اختلاف دارد که نشان از دقت بسیار بالای نرم‌افزار LS-DYNA در تعیین پاسخ سازه دارد. ذکر این نکته حائز اهمیت است که در مدل‌سازی ستون از المان پوسته با حداکثر بعد ۴۰ میلی‌متر استفاده شده است.

## ۷- مشخصات پل در نظر گرفته شده به صورت مطالعه موردی

در این مقاله رفتار یک پل قدیمی با پایه‌های فولادی که در شکل (۵) نشان داده شده است مورد بررسی قرار گرفته است. پل در نظر گرفته شده راه ارتباطی محور خشت به میشان

اندرکنش فشار انفجار با زمین در تعیین میزان فشار انفجار نیز لحاظ گردد.



شکل ۸- نحوه اتصال پایه‌های پل به تیرهای فرعی و نمایش تیرهای دابل بالای پایه‌ها

برای تعیین بار انفجار در نرم‌افزار LS-DYNA از دستور Load\_Blast\_Enhanced استفاده می‌شود. فرض شده است که انفجار در لحظه ۵۰ میلی‌ثانیه رخ دهد که در زمان صفر تا ۵۰ میلی‌ثانیه فرض شده است که بار محوری (معادل ۲۰٪ ظرفیت محوری عضو) به پایه فولادی وارد شده و بعد از آن ثابت می‌ماند. از لحظه ۵۰ میلی‌ثانیه انفجار شروع می‌شود و نهایتاً در لحظه ۱۲۰ میلی‌ثانیه (که در منوی Death وارد می‌گردد) بار انفجار به اتمام می‌رسد. دلیل اینکه در مدت زمان ۵۰ میلی‌ثانیه بار محوری به ستون وارد می‌شود این است که بار ثقلی توسط نرم‌افزار به صورت بار ضربه‌ای تلقی نگردد. بعد از انجام تحلیل اجزا محدود توسط نرم‌افزار LS-DYNA، نتایج حاصل از تحلیل در گام‌های زمانی مختلف استخراج گردید تا نحوه رفتار پایه فولادی پل مشخص گردد. نتایج حاصل از تحلیل اجزا محدود در گام‌های زمانی مختلف در شکل ۹- نشان داده شده است. با توجه به شکل مشخص می‌شود که ستون در لحظه زمانی ۰ تا ۵۰ میلی‌ثانیه تحت اثر نیروی محوری خالص قرار دارد (این نیرو تحت عنوان نیروی ثقلی لحاظ می‌گردد) و تنش‌های ایجاد شده نیز کاملاً نشان می‌دهد که ستون تحت اثر تنش فشاری قرار گرفته است. بعد از اعمال بار انفجار، جابجایی بین دهانه‌ای عضو مشاهده می‌شود که



شکل ۵- پل در نظر گرفته برای مطالعه موردی



شکل ۶- پی‌های مصالح بنایی پل



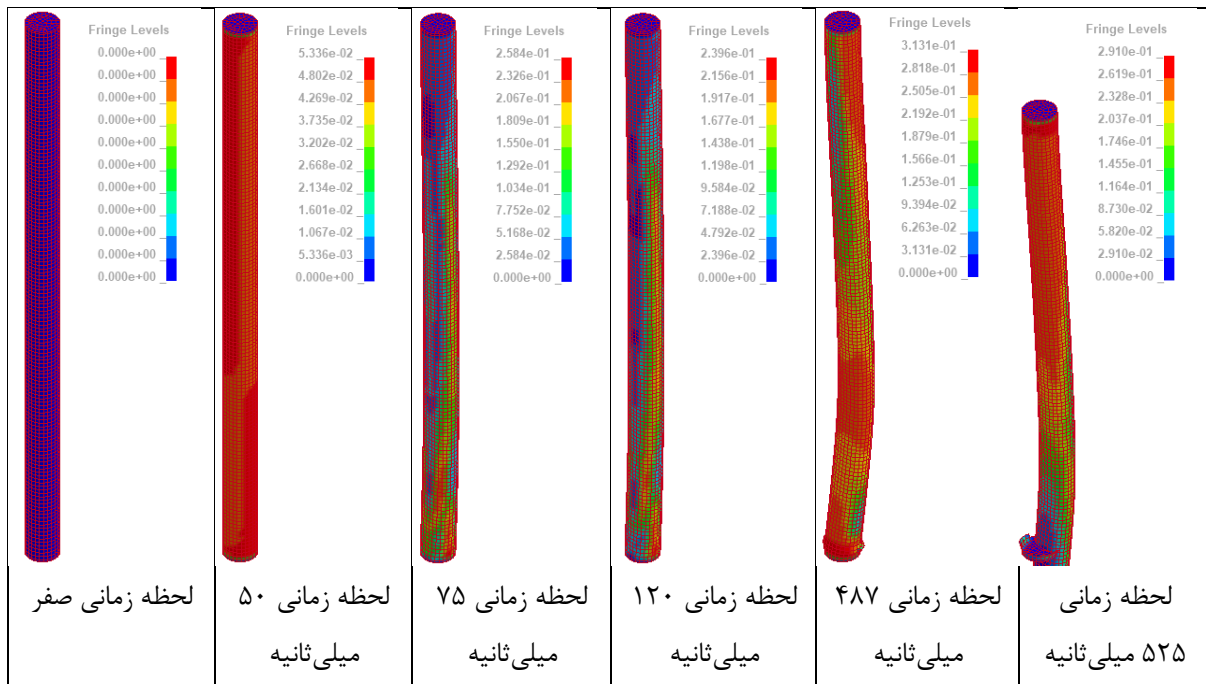
شکل ۷- نمایی از تیرهای فولادی فرعی و بادبندها

## ۸- بحث و بررسی نتایج عددی

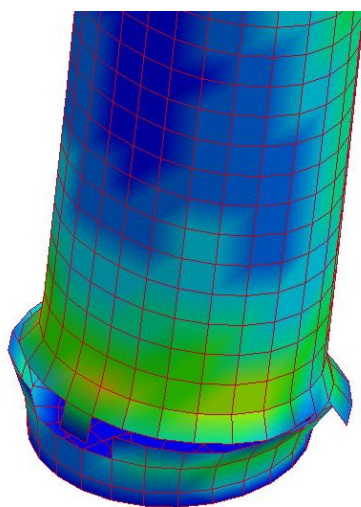
در ابتدا فرض شده است که سناریوی انفجار بر روی زمین و در اطراف پایه‌های پل رخ دهد. به این منظور رفتار پایه پل موردنظر تحت اثر بار انفجار با میزان ماده منفجره ۳۰۰ کیلوگرم تی ان تی که در فاصله ۴ متری از سازه قرار دارد بررسی گردید و فرض شده است که محل رخداد انفجار به فاصله یک متری زمین باشد که انفجار تشکیل شده از نوع انفجار نیمه کروی (انفجار سطحی) تلقی گردد و اثرات

ایجاد خرابی، تصویر بزرگنمایی شده پایین ستون در لحظه‌های زمانی ۴۸۵ و ۴۹۰ میلی‌ثانیه به ترتیب در شکل (۱۰) و شکل (۱۱) نشان داده شده است. (محل شروع خرابی در پایین ستون بوده است به این دلیل میزان خرابی در پایه ستون بیشتر بوده است که فرض شده است انفجار در فاصله ۱ متری از سطح زمین بوده است و به همین خاطر جبهه موجه انفجار و متعاقباً فشار انفجار حداکثر در قسمت‌های پایین ستون رخ می‌دهد که استارت خرابی‌ها نیز از همین نقطه می‌باشد).

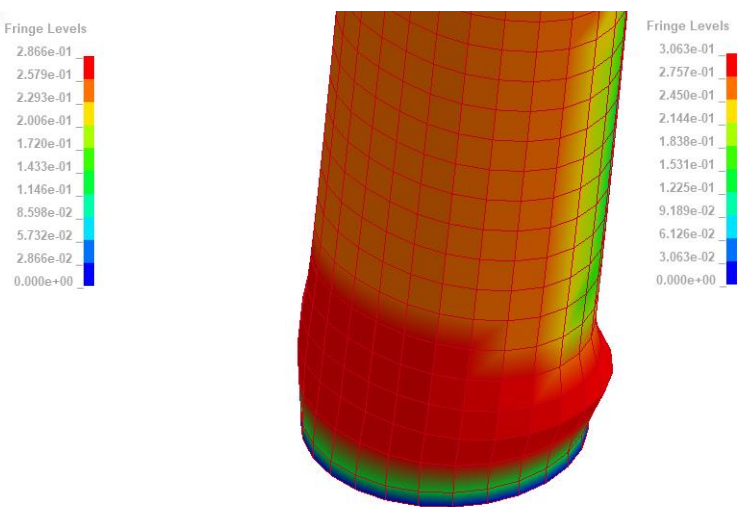
منجر به یک تغییر شکل ماندگار در عضو می‌گردد که این تغییر شکل ماندگار منجر به اثر  $P-\Delta$  در عضو نیز می‌شود که خرابی‌های ایجاد شده در ستون را تشدید می‌کند. بعد از اتمام فاز انفجار و افزایش مجدد نیروی محوری، در لحظه زمانی ۴۸۷ میلی‌ثانیه، ستون به حداکثر ظرفیت باربری پس از انفجار خود رسیده است و بعد از این لحظه، ستون دچار خرابی شده و مهدم می‌گردد که در گام زمانی ۵۲۵ میلی‌ثانیه این حالت نشان داده شده است. برای نشان داده هر چه بهتر تغییر شکل‌های ایجاد شده در ستون در محل



شکل ۹- رفتار ستون فولادی تحت اثر انفجار ۳۰۰ کیلوگرم تی ان تی در فاصله ۴ متری از سازه در گام‌های مختلف زمانی (مقادیر نشان داده شده در هر شکل تنش ون-مایسز بر حسب گیگاپاسکال می‌باشد).



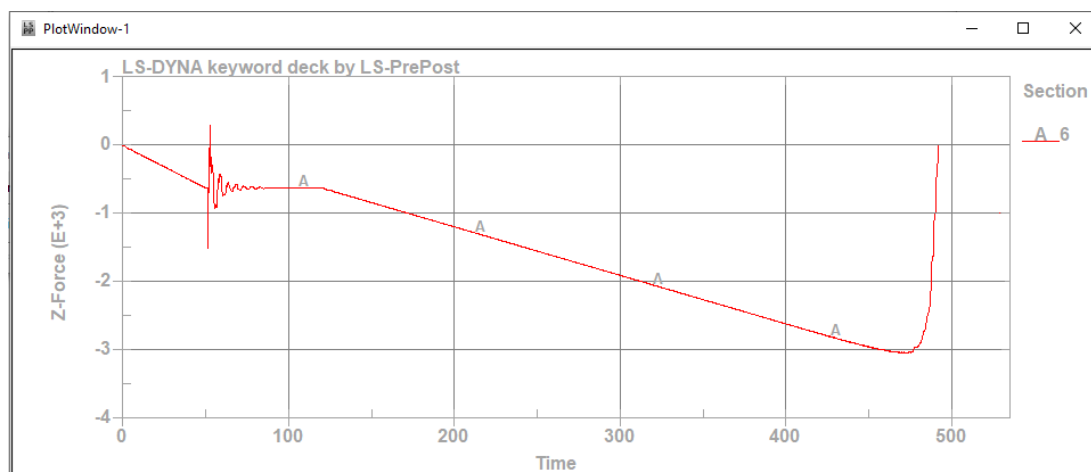
شکل ۱۱- تغییر شکل ستون در لحظه زمانی ۴۹۰ میلی‌ثانیه



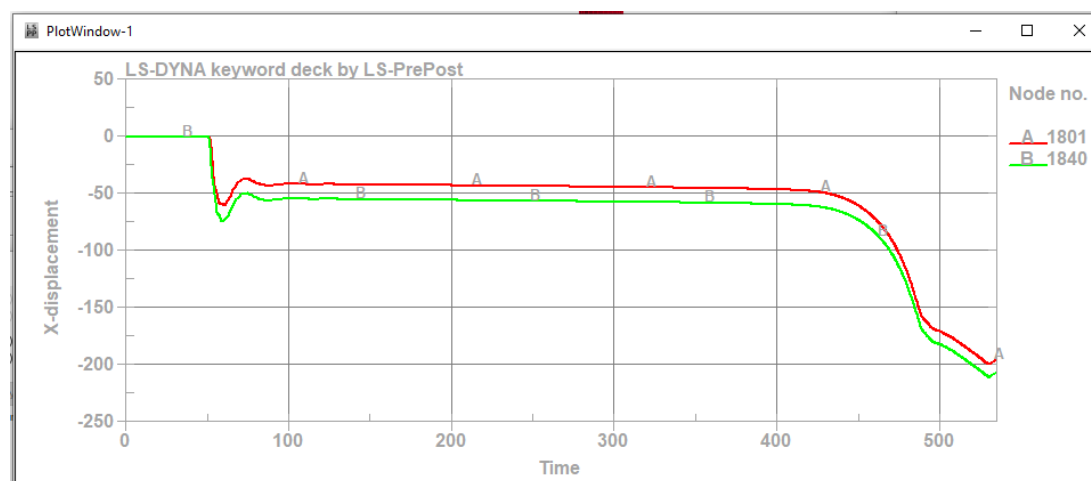
شکل ۱۰- تغییر شکل ستون در لحظه زمانی ۴۸۵ میلی‌ثانیه

پشتی ستون می‌باشد که با هم متفاوت هستند. دلیل این تفاوت به خاطر تغییر شکل‌های ایجاد شده در هندسه مقطع می‌باشد که وقتی تحت اثر انفجار قرار می‌گیرد، سطح مقطع حالت دایره‌ای خود را از دست می‌دهد و دچار تغییر شکل می‌گردد و این اختلاف از این جهت شکل می‌گیرد؛ به عبارت دیگر، علاوه بر این که ستون دچار تغییر مکان جانبی می‌گردد، خود سطح مقطع نیز دچار تغییر شکل می‌گردد که منجر به تغییر در جابجایی وجه‌های روبرویی و پشتی ستون می‌گردد. برای روشن شدن بهتر این مطلب، شکل (۱۴) را در نظر بگیرید که شکل تغییر یافته مقطع عرضی ستون بعد از اعمال بار انفجار (مقطع آبی‌رنگ) با شکل اولیه مقطع عرضی ستون قبل از اعمال بار انفجار (مقطع قرمز رنگ) مقایسه شده است که نحوه تغییر شکل مقطع عرضی ستون را نشان می‌دهد.

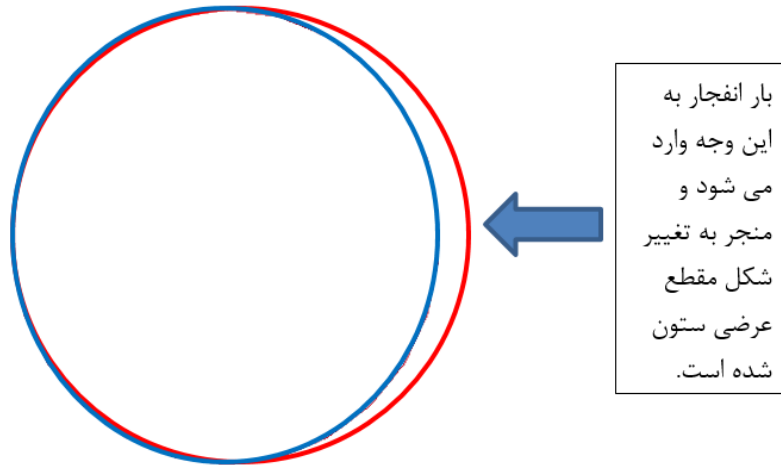
با توجه به شکل‌های (۱۰) و (۱۱) کاملاً واضح است که با افزایش بار محوری در نرم‌افزار بعد از اتمام بار انفجار و به منظور تعیین ظرفیت باقیمانده محوری، در مدت زمان بسیار کمی نیروی محوری ستون از مقدار بیشینه خود به کمترین مقدار یعنی صفر می‌رسد. نحوه تغییر نیروی محوری بر حسب زمان در شکل (۱۲) نشان داده شده است. بر اساس شکل واضح است که ظرفیت باقیمانده محوری پس از ستون در حدود ۳۰۴۱ کیلونیوتن می‌باشد که در لحظه زمانی ۴۶۹ میلی‌ثانیه رخ داده است. تاریخچه زمانی جابجایی میان دهانه ستون برای وجه روبرویی ستون و پشت ستون در شکل-۱۳ نشان داده شده است. با توجه به شکل مشخص است که ظرفیت باقیمانده محوری پس از انفجار عضو در حدود ۳۰۴۵ کیلونیوتن می‌باشد. در شکل (۱۳) نمودار زرد رنگ میزان جابجایی وجه روبرویی ستون به انفجار را نشان می‌دهد و نمودار قرمز رنگ بیانگر میزان جابجایی وجه



شکل ۱۲- نحوه تغییر نیروی محوری ستون بر حسب زمان



شکل ۱۳- جابجایی میان دهانه عضو در وجه روبرویی و پشتی ستون



شکل ۱۴- شکل مقطع عرضی ستون قبل و بعد از اعمال بار انفجار: رنگ قرمز بیانگر شکل اولیه مقطع عرضی ستون، رنگ آبی شکل تغییر یافته مقطع عرضی ستون بعد از اعمال بار انفجار

ماده منفجره افزایش یابد و متعاقباً فاصله کانون انفجار از سازه کمتر گردد اثر انفجار بر کل سازه افزایش می یابد و در این حالت ممکن است کلیه اعضای سازه بار قابل توجهی از انفجار دریافت کنند و سازه در مرحله اول بارگذاری انفجار (بدون اثرات ناشی از خرابی پیش رونده) دچار فروریزش گردد. با توجه به اینکه طول دهانه ۷ متر می باشد، لذا فرض شده است که سناریوهای انفجار در بدترین حالت خود یعنی در میان دهانه پل رخ دهد که بیشترین تغییر شکل خمشی و برشی را در مقطع ایجاد کند. پل مورد نظر در حالت های مختلف بررسی گردید. یک بار فرض شده است که پل دارای تیر فولادی نمی باشد و تمام توسط دال بتنی مدل سازی شده است و بار دیگر فرض شده است که پل همراه با تیرهای فولادی عرضی و طولی مدل شده است که نشان داده شود مدل سازی عددی انجام شده از دقت بالایی برخوردار است و با مدل سازی تیرهای فولادی از میزان جابجایی ها کاسته می شود. سناریوهای انفجاری که در نظر گرفته شده است دو سناریو تحت عنوان سناریو ۱ و ۲ بوده است که در آن ها به ترتیب میزان بار منفجره برابر با ۳۰۰ و ۵۰۰ کیلوگرم تی ان تی فرض شده است که توسط وسیله نقلیه بر روی پل حمل شده است. فرض شده است انفجار در فاصله کمتر از ۱ متری نسبت به روسازی پل رخ می دهد تا انفجار ایجاد شده انفجار سطحی (نیمه کروی) با حداکثر پتانسیل خرابی باشد. ۰ (۱۵) را در نظر بگیرید که مدل سازی سه بعدی از پل بتنی با ستون های فولادی را نشان می دهد. برای مدل سازی ستون ها، از المان پوسته با حداکثر بعد ۴۰ میلی متر استفاده شده است. برای

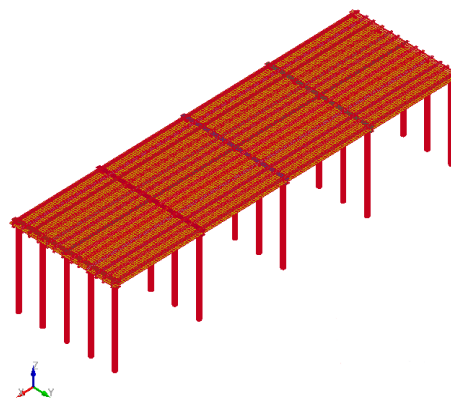
با استفاده از نتایج به دست آمده از تحلیل اجزا محدود ماکزیمم جابجایی میان دهانه عضو تحت اثر بار انفجار را به دست آورده و میزان خرابی بر اساس چرخش تکیه گاهی مشخص می گردد. ماکزیمم جابجایی میان دهانه عضو از تحلیل اجزا محدود برابر با ۶۰/۷ میلی متر می باشد که با قرار دادن در رابطه ۵ میزان چرخش تکیه گاهی برابر با ۱/۱۶ درجه به دست می آید که با توجه به مقادیر مجاز آئین نامه ای، میزان خرابی اعمال شده به ستون متوسط می باشد.

برای توسعه مدل سازی عددی، رفتار کل پل با پایه های فولادی نیز به صورت سه بعدی مدل سازی می گردد تا سناریوهای بار انفجار که بر روی پل نیز رخ می دهد مورد بررسی قرار گیرد. به این منظور، از رویکرد اجزا محدود استفاده LS-DYNA استفاده و یک مدل سه بعدی از پل مورد نظر در نرم افزار ایجاد گردید. لازم به ذکر است که با توجه به سنگین شدن مدل سه بعدی و افزایش حجم محاسبات عددی، تنها چهار دهانه از پل با تمامی جزئیات مدل سازی گردید که با توجه به موضعی بودن بار انفجار، فرض در نظر گرفته شده درست می باشد و خللی در محاسبات ایجاد نخواهد کرد. دلیل موضعی بودن بار انفجار به این خاطر است که هر چقدر فاصله عضو سازه ای از مرکز انفجار بیشتر شود احتمال آسیب آن کمتر می شود؛ بنابراین در یک سازه عضوی دچار بیشترین آسیب می شود که به محل وقوع انفجار نزدیک تر باشد و اعضای که در فاصله دورتری قرار می گیرند آسیب کمتری را متحمل می شوند. البته ذکر این نکته حائز اهمیت است که هرچقدر میزان



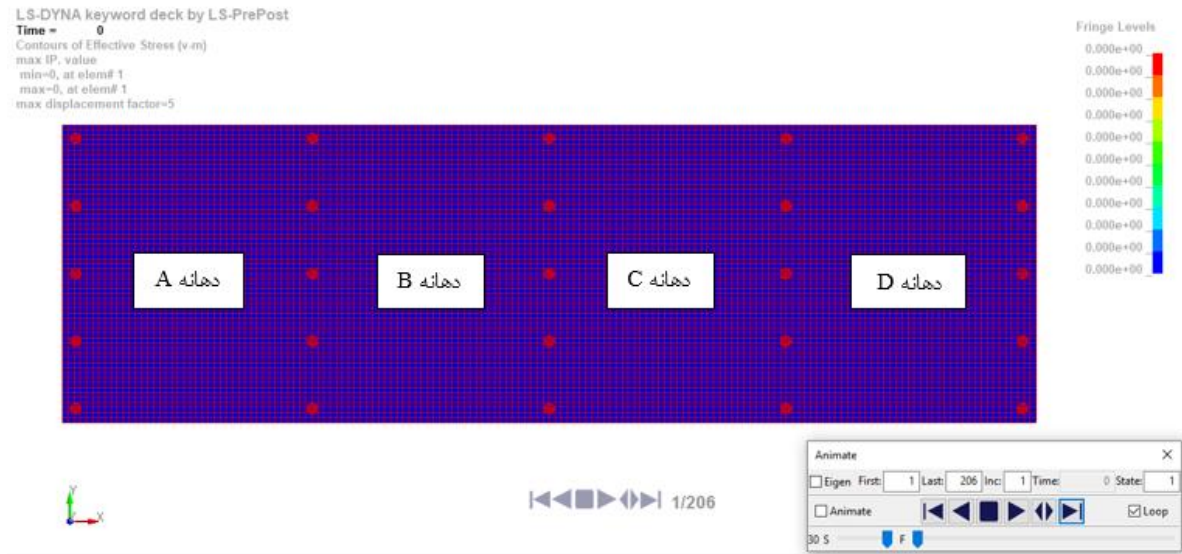
می‌رسد کمتر خواهد بود (به دلیل میرا شدن موج انفجار) و به همین دلیل است که بیشترین تغییر مکان را در وسط دال B می‌توان مشاهده کرد که دقیقاً در محل رخداد انفجار است؛ به عبارت دیگر، یکی از دلایلی که در طراحی سازه‌ها تحت اثر بار انفجار، عمدتاً رفتار یک عضو بررسی می‌شود هم همین موضوعی است که به آن اشاره گردید. در دهانه B همان‌طور که در شکل می‌توانید مشاهده کنید، میزان تغییر مکان دائمی ایجاد شده در دال بتنی (تغییر مکان پلاستیک) در حدود ۴۳ میلی‌متر بوده است که نشان می‌دهد دال بتنی تغییر شکل‌های شدیدی را با وجود تیرهای فرعی و طولی تحت اثر بار انفجار متحمل شده است. دلیل اینکه تغییر مکان میان دهانه عضو به‌عنوان پارامتر تعیین‌کننده در نظر گرفته شده است این است که بیشترین تغییر مکان در میانه عضو رخ می‌دهد که منجر به بیشترین چرخش تکیه‌گاهی بر اساس شاخص چرخش تکیه‌گاهی می‌گردد. برای اینکه این مورد نیز نشان داده شود، دهانه B همان‌طور که در شکل (۱۸) نشان داده شده است به پنج قسمت تقسیم شده است که نام‌های A، B، C، D و E به ترتیب برای ابتدای دهانه، یک‌چهارم دهانه، میانه دهانه، سه‌چهارم دهانه و انتهای دهانه در نظر گرفته شده است تا تغییر مکان دال در این نقاط به نمایش در آید. تاریخچه زمانی تغییر مکان مربوط به این نقاط در شکل (۱۸) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌کنید، بیشترین تغییر مکان مربوط به میان دهانه عضو بوده و کمترین تغییر مکان مربوط به نقاط ابتدایی و انتهایی دهانه می‌باشد که دلیل آن وجود ستون‌های به‌عنوان تکیه‌گاه می‌باشد که جلوی تغییر شکل شدید دال در این نقاط را گرفته است. همان‌طور که در شکل (۱۹) نشان داده شده است، نحوه تغییر شکل دال به‌صورت متقارن بوده و جابجایی ایجاد شده در نقاط B و D و همچنین نقاط A و E تقریباً با یکدیگر برابر می‌باشد که نشان می‌دهد موج انفجار به‌صورت نیمه کروی با مرکزیت وسط دال منتشر می‌شود و کلیه دال را در بر می‌گیرد و بنابراین این انتظار می‌رفت که تغییر شکل‌های ایجاد شده به‌صورت متقارن باشند.

مدل‌سازی تیرهای طولی و فرعی، از المان تیر استفاده شده است که مشخصات تیرهای نمره ۳۰ به آن اعمال شده است. برای مدل‌سازی دال بتنی، از المان پوسته با حداکثر اندازه ۱۴۷ میلی‌متر استفاده شده است و مشخصات دال بتنی توسط مدل همگن ارائه شده در جدول ۱ به آن اعمال گردید.

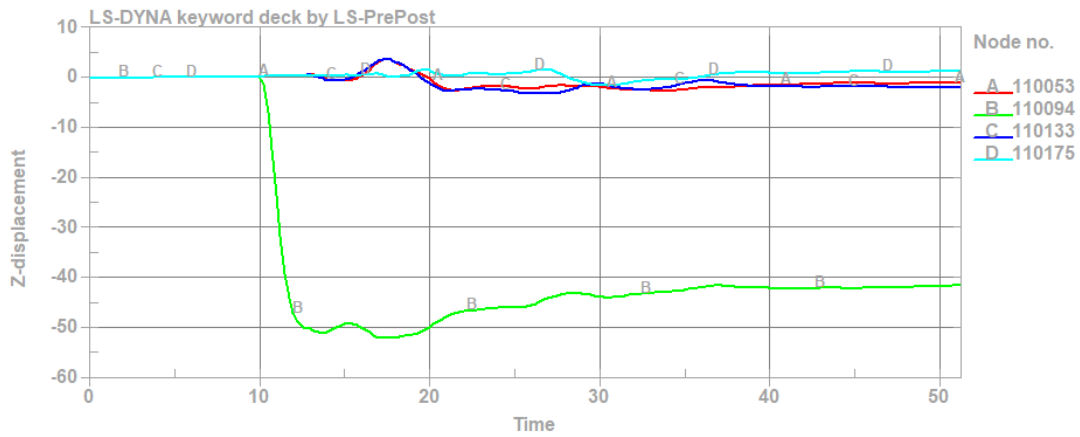


شکل ۱۵- مدل‌سازی پل بتنی با ستون‌های فولادی با سطح مقطع دایره‌ای

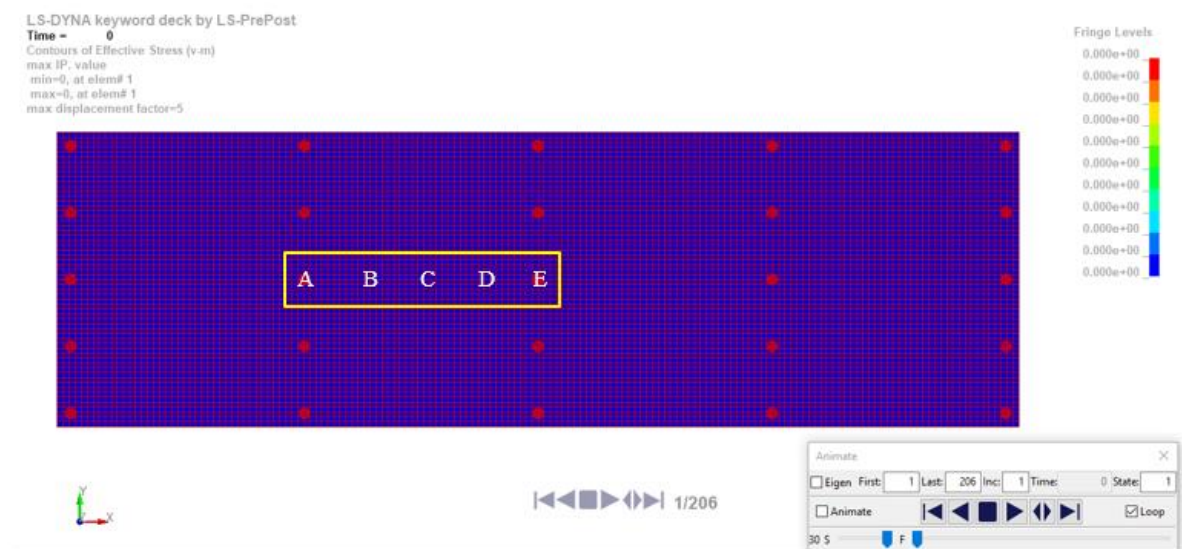
برای تعیین میزان جابجایی ایجاد شده قائم در دال‌های پل، دهانه‌های پل بر اساس شکل (۱۶) نام‌گذاری شده‌اند و دهانه B دهانه‌ای است که در آن سناریوی انفجار رخ داده است. برای مقایسه میزان جابجایی ایجاد شده در کلیه دهانه‌ها، تاریخچه زمانی تغییر مکان میان دهانه دال‌های مشخص شده استخراج و در شکل (۱۷) نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل مشخص است، بیشترین تاریخچه زمانی تغییر مکان میان دهانه مربوط به دهانه B بوده است که در حدود ۵۳ میلی‌متر بوده است حال آنکه مابقی دهانه‌ها دارای تغییر شکل‌های تقریباً الاستیک بوده که با گذشت مدت‌زمان ۵۰ میلی‌ثانیه تقریباً تغییر مکان آن به صفر گرائیده است. دلیل اینکه تغییر مکان ایجاد شده در دهانه‌های A، C و D کم است به این دلیل است که نحوه اعمال بار انفجار به‌صورت موضعی می‌باشد و کل سازه را در بر نمی‌گیرد؛ به عبارت دیگر، نیرو از یک نقطه موضعی به سازه اعمال می‌شود و سپس به نقاط دیگر گسترش می‌یابد و در نهایت کل سازه را در بر می‌گیرد. هر چقدر فاصله نقاط سازه از مرکز انفجار دورتر باشد نیرویی که از انفجار به آن‌ها



شکل ۱۶- نحوه نام‌گذاری دهانه‌های پل برای نشان دادن میزان جابجایی میان دهانه

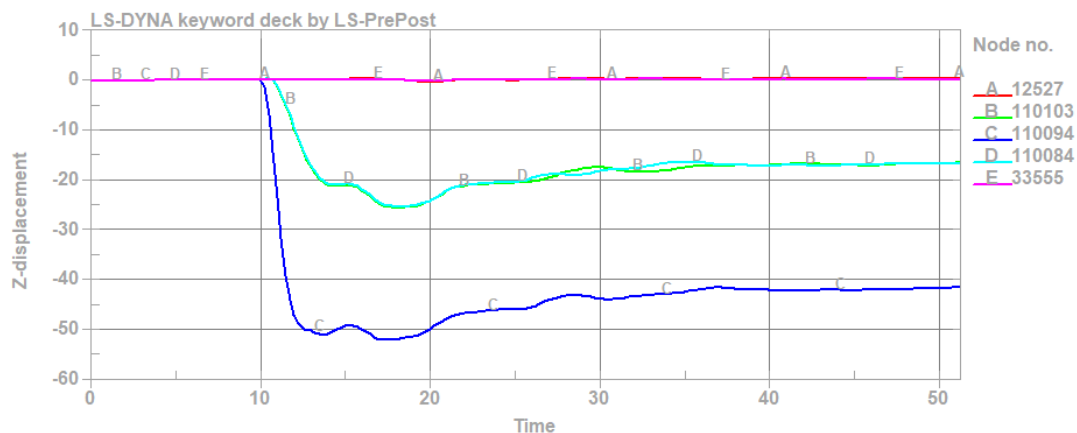


شکل ۱۷- تاریخچه زمانی تغییر مکان میان دهانه‌های پل بر اساس نام‌گذاری ارائه شده در شکل ۱۶



شکل ۱۸- نحوه نام‌گذاری نقاط ابتدای دهانه (A)، یک‌چهارم دهانه (B)، میان دهانه (C)، سه‌چهارم دهانه (D) و انتهای دهانه (E) محل رخداد انفجار

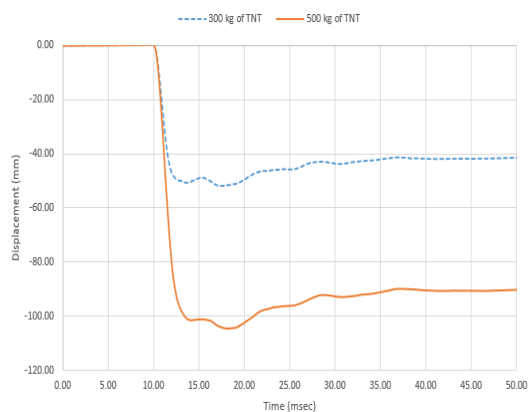




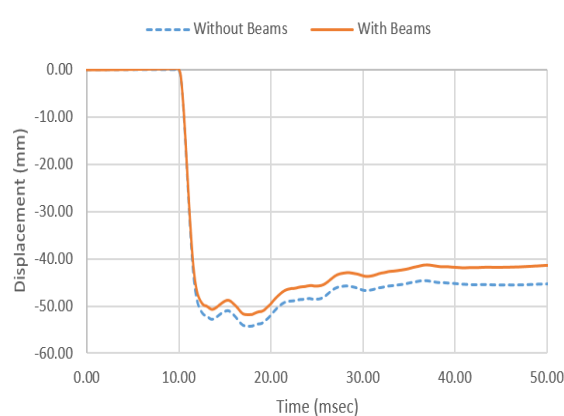
شکل ۱۹- تاریخچه زمانی تغییر مکان نقاط ابتدای دهانه (A)، یک‌چهارم دهانه (B)، میان دهانه (C)، سه‌چهارم دهانه (D) و انتهای دهانه (E) محل رخداد انفجار نام‌گذاری شده در شکل-۱۸

علاوه بر سناریو ۱، رفتار پل تحت اثر سناریوی شماره ۲ (۵۰۰ کیلوگرم تی ان تی) نیز مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آن با رفتار پل تحت اثر سناریوی شماره ۱ (۳۰۰ کیلوگرم تی ان تی) مورد مقایسه قرار گرفت. شکل (۲۱) نشان‌دهنده تاریخچه زمانی تغییر مکان میان دهانه B می‌باشد که برای سناریوهای ۱ و ۲ ترسیم شده است. همان‌طور که در شکل می‌توان مشاهده کرد، افزایش میزان ماده منفجره، منجر به افزایش تغییر شکل‌های ایجاد شده در پل می‌گردد و خرابی‌های بیشتری را به بار می‌آورد. همچنین تغییر شکل‌های دائمی ایجاد شده در عضو با افزایش میزان ماده منفجره نیز افزایش می‌یابد. یکی از راهکارهایی که می‌توان برای جلوگیری از آسیب به پل از لحاظ پدافندی انجام داد این است که قبل از ورودی پل، ایستگاه‌های ایست و بازرسی قرار داده شود که بتوان عبور و مرور ماشین‌های مشکوک را مورد بررسی قرار داد و حتی‌الامکان پیش از وقوع حادثه از وقوع آن جلوگیری کرد.

برای اینکه تأثیر تیرهای فرعی و طولی به کار گرفته شده در پل در تحلیل اجزا محدود نشان داده شود، خروجی‌های حاصل از تحلیل پل با و بدون در نظر گرفتن تیرهای فولادی طولی و عرضی نیز استخراج و در نشان داده شد. همان‌طور که در نشان داده شده است، در نظر گرفتن تیرهای طولی و عرضی منجر به کاهش تغییر مکان قائم دال بتنی شده است و به عبارتی میزان تغییر شکل در سازه را کاهش می‌دهد. اگر بخواهیم بر اساس موضوع پدافند غیرعامل به این وضعیت نظاره کنیم، مشاهده می‌شود که هر اقدامی که منجر به تقویت پل گردد می‌تواند سلامت پل را در برابر بارهای انفجاری تأمین کند. به‌عنوان مثال، استفاده از تیرهای فولادی توانسته میزان تغییر مکان ایجاد شده در مرکز دال بتنی پل را کاهش دهد. حال اگر اقدام به تقویت دال بتنی پل شود، مثلاً استفاده از FRP، قاعدتاً میزان تغییر شکل بیشتر کاهش می‌یابد و سلامت پل هر چه بهتر تأمین می‌گردد.



شکل ۲۱- مقایسه جابجایی ایجاد شده در پل در دهانه B تحت اثر انفجار با ۳۰۰ و ۵۰۰ کیلوگرم تی ان تی



شکل ۲۰- مقایسه تغییر شکل دال بتنی پل با و بدون در نظر گرفتن تیرهای عرضی و طولی در مدل اجزا محدود

نرم‌افزار اجزا محدود LS-DYNA استفاده گردید و خرابی پایه‌های پل و دال بتنی پل با استفاده از معیار چرخش تکیه‌گاهی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر می‌باشد.

- نتایج نشان داد که با افزایش میزان ماده منفجره، میزان تغییر مکان قائم دال بتنی افزایش یافت و میزان خرابی از محدوده کم به متوسط تغییر کرد.

- نتایج نشان داد که در نظر گرفتن تیرهای طولی و عرضی فولادی به کاررفته در دال بتنی در مدل‌سازی اجزا محدود منجر به کاهش تغییر مکان قائم دال بتنی تحت اثر بارگذاری انفجار می‌شود.

- نتایج نشان داد که با افزایش میزان ماده منفجره مقدار ظرفیت باقیمانده محوری عضو کاهش می‌یابد. همچنین بعد از رخداد کمانش کلی در ستون، ظرفیت باقیمانده محوری عضو در مدت‌زمان بسیار کوتاهی به مقدار صفر می‌رسد، یا به عبارت دیگر ستون دچار فروریزش یا خرابی کامل می‌شود.

- نتایج نشان داد که جابجایی میان دهانه پایه فولادی در وجه پشتی و وجه رو به جبهه انفجار به‌موجب تغییر شکل‌های موضعی ایجاد شده با یکدیگر متفاوت هستند و این تغییر شکل‌های موضعی منجر به کاهش ظرفیت عضو شده و روی باربری کلی عضو تأثیرگذار است.

- نتایج حاصل از تحلیل اجزا محدود نشان داد که هرچقدر عضو موردنظر به کانون انفجار نزدیک‌تر باشد میزان خرابی‌های موضعی ایجاد شده در آن بیشتر است. همچنین خرابی کلی عضو از محل خرابی‌های موضعی ایجاد شده در عضو شروع و در نهایت منجر به خرابی کلی عضو می‌شود.

برای تعیین میزان خرابی ایجاد شده در دهانه B تحت اثر سناریوهای شماره ۱ و ۲، از معیار چرخش تکیه‌گاهی استفاده می‌شود و از جابجایی‌های ایجاد شده در عضو که از تحلیل اجزا محدود به‌دست‌آمده است استفاده می‌گردد. مقادیر مجاز چرخش تکیه‌گاهی برای دال بتنی با توجه به جدول ۲ تعیین می‌گردد که برای خرابی کم، متوسط و زیاد میزان چرخش تکیه‌گاهی مجاز به ترتیب برابر با ۱، ۲ و ۵ درجه می‌باشد. با توجه به شکل (۲۱) جابجایی ماکزیمم ایجاد شده در عضو در سناریوی شماره یک تقریباً برابر با ۵۲ میلی‌متر و در سناریوی شماره دو تقریباً برابر با ۱۰۵ میلی‌متر می‌باشد که با جایگذاری در رابطه-۵ میزان چرخش تکیه‌گاهی ایجاد شده برای سناریوهای شماره یک و دو به ترتیب برابر با ۰/۸۵ و ۱/۷۱۸ به دست می‌آید. با مقایسه مقادیر چرخش تکیه‌گاهی ایجاد شده در دهانه پل مشاهده می‌گردد که در سناریوی شماره یک، میزان خرابی ایجاد شده در محدوده خرابی کم می‌باشد در صورتی که با افزایش میزان تی ان تی از ۳۰۰ به ۵۰۰ کیلوگرم، میزان چرخش تکیه‌گاهی افزایش یافته و خرابی ایجاد در محدوده متوسط قرار می‌گیرد. به‌طور کلی می‌توان گفت که با افزایش میزان ماده منفجره، انتظار می‌رود خرابی‌های بیشتری در سازه ایجاد گردد.

## ۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از تحلیل اجزای محدود به مطالعه موردی بر روی یک پل ارتباطی بتنی با پایه‌های فولادی در شهر کازرون پرداخته شد و رفتار این پل تحت اثر بارهای مختلف انفجاری مورد بررسی قرار گرفت. برای انجام تحلیل‌های موردنیاز، از تحلیل اجزا محدود مبتنی بر

## مراجع

- [1] S. Fujikura, M. Bruneau, and D. Lopez-Garcia. "Experimental investigation of multihazard resistant bridge piers having concrete-filled steel tube under blast loading." *Journal of Bridge Engineering* 13, no. 6 (2008): 586-594.
- [2] G.D. Williams, and E.B. Williamson. "Response of reinforced concrete bridge columns subjected to blast loads." *Journal of Structural Engineering* 137, no. 9 (2011): 903-913.
- [3] Z. Yi, A. Agrawal, M. Ettouney, and S. Alampalli. "Blast load effects on highway bridges. I: Modeling and blast load effects." *Journal of Bridge Engineering* 19, no. 4 (2014): 04013023.
- [4] A.A. Islam, and N. Yazdani. "Performance of AASHTO girder bridges under blast loading." *Engineering Structures* 30, no. 7 (2008): 1922-1937.
- [5] E.K. Tang, and H. Hao. "Numerical simulation of a cable-stayed bridge response to blast loads, Part I: Model development and response calculations." *Engineering Structures* 32, no. 10 (2010): 3180-3192.

- [6] H. Hao, and E.K. Tang. "Numerical simulation of a cable-stayed bridge response to blast loads, Part II: Damage prediction and FRP strengthening." *Engineering Structures* 32, no. 10 (2010): 3193-3205.
- [7] M. Foglar, and M. Kovar. "Conclusions from experimental testing of blast resistance of FRC and RC bridge decks." *International Journal of Impact Engineering* 59 (2013): 18-28.
- [8] M. Li, Z. Zong, L. Liu, and F. Lou. "Experimental and numerical study on damage mechanism of CFDST bridge columns subjected to contact explosion." *Engineering Structures* 159 (2018): 265-276.
- [9] Y. Pan, C.E. Ventura, and M.M. Cheung. "Performance of highway bridges subjected to blast loads." *Engineering Structures* 151 (2017): 788-801.
- [10] S. Hashemi, M. Bradford, and H. Valipour. "Dynamic response of cable-stayed bridge under blast load." *Engineering Structures* 127 (2016): 719-736,
- [11] K. Haciefendioğlu, S. Banerjee, K. Soyluk, and O. Köksal. "Multi-point response spectrum analysis of a historical bridge to blast ground motion." *Structural Engineering and Mechanics* 53, no. 5 (2015): 897-919.
- [12] C.D. Tetougueni, P. Zampieri, and C. Pellegrino, "Structural performance of a steel cable-stayed bridge under blast loading considering different stay patterns." *Engineering Structures* 219 (2020): 110739.
- [13] E. Maiorana, C.D. Tetougueni, and P. Zampieri. "Effect of blast load on the structural integrity of steel arch bridge slab." *Engineering Failure Analysis* 139 (2022): 106498.
- [14] C. Lv, Q. Yan, L. Li, and S. Li. "Field test and probabilistic vulnerability assessment of a reinforced concrete bridge pier subjected to blast loads." *Engineering Failure Analysis* 143 (2023): 106802.
- [15] W. Kong, S. Yang, S. Wang, Z. Liu, R. Zhang, W. Zhong, and X. Yao. "On dynamic response and damage evaluation of bridge piers under far-field explosion loads." In *Structures*, vol. 51, pp. 985-1003. Elsevier, 2023.
- [16] A. Nassr, A. Razaqpur, M. Tait, M. Campidelli, and S. Foo. "Measured versus predicted response of steel beams under blast load." in *Proc., 1st Int. Conf. of Protective Structures, Armour & Protection Science & Technology Centre, Defence Science and Technology Laboratory (DSTL), Ministry of Defence Wiltshire, UK* (2010).
- [17] A. Nassr, A. Razaqpur, M. Tait, M. Campidelli, and S. Foo. "Evaluation of Nonlinear Response of Steel Members under Blast Loading." in *2nd Specialty Conference on Disaster Mitigation, CSCE*, (2010): 9-12 .
- [18] A.A. Nassr, A.G. Razaqpur, M.J. Tait, M. Campidelli, and S. Foo. "Dynamic response of steel columns subjected to blast loading." *Journal of Structural Engineering* 140, no. 7 (2013): 04014036.
- [19] A.A. Nassr, A.G. Razaqpur, M.J. Tait, M. Campidelli, and S. Foo, "Strength and stability of steel beam columns under blast load." *International Journal of Impact Engineering* 55 (2013): 34-48.
- [20] A.A. Nassr, A.G. Razaqpur, M.J. Tait, M. Campidelli, and S. Foo. "Experimental performance of steel beams under blast loading." *Journal of Performance of Constructed Facilities* 26, no. 5 (2012): 600-619.
- [21] A.A. Nassr, A.G. Razaqpur, M.J. Tait, M. Campidelli, and S. Foo. "Single and multi degree of freedom analysis of steel beams under blast loading." *Nuclear Engineering and Design* 242 (2012): 63-77.
- [22] B. Li, A. Nair, and Q .Kai, "Residual axial capacity of reinforced concrete columns with simulated blast damage." *Journal of Performance of Constructed Facilities* 26, no. 3 (2012): 287-299.
- [23] H. Al-Thairy. "A modified single degree of freedom method for the analysis of building steel columns subjected to explosion induced blast load." *International Journal of Impact Engineering* 94 (2016): 120-133.

- [24] M.A. Hadianfard, A. Nemati, and A. Johari. "Investigation of Steel Column Behavior with Different Cross Section under Blast Loading." *Modares Civil Engineering Journal* 16, no. 4 (2016): 265-278.
- [25] L. Mazurkiewicz, J. Malachowski, and P. Baranowski. "Blast loading influence on load carrying capacity of I-column." *Engineering Structures* 104 (2015): 107-115.
- [26] D. Kelliher and K. Sutton-Swaby. "Stochastic representation of blast load damage in a reinforced concrete building." *Structural Safety* 34, no. 1 (2012): 407-417.
- [27] M. Momeni, M.A. Hadianfard, C. Bedon, and A. Baghlani. "Damage evaluation of H-section steel columns under impulsive blast loads via gene expression programming." *Engineering Structures* 219 (2020): 110909.
- [28] M. Momeni. "Damage evaluation of steel beam-columns subjected to impulsive loads using reliability approach." *Ph.D. Thesis (In Persian), Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran, (2021)*.
- [29] M. Momeni, M.A. Hadianfard, and A. Baghlani. "Implementation of Weighted Uniform Simulation Method in Failure Probability Analysis of Steel Columns under Blast Load." *Presented at the 11th International Congress on Civil Engineering, University of Tehran, Iran, (2018)*.
- [30] M. Momeni, M.A. Hadianfard, C. Bedon, and A. Baghlani. "Numerical damage evaluation assessment of blast loaded steel columns with similar section properties." *Structures* 20 (2019): 189-203.
- [31] S. Mohitpour, M. Momeni, and M.A. Hadianfard. "Numerical Study of Fiber Concrete Panels Behavior under Blast Loading." *In 11th International Congress on Civil Engineering, University of Tehran, Iran (2018)*.
- [32] M.A. Hadianfard, S. Malekpour, and M. Momeni, "Reliability analysis of H-section steel columns under blast loading." *Structural Safety* 75 (2018): 45-56.
- [33] M. Momeni, C. Bedon, and M.A. Hadianfard. "Probabilistic Evaluation of Steel Column Damage under Blast Loading via Simulation Reliability Methods and Gene Expression Programming." *Engineering Proceedings* 53, no. 1 (2023): 20.
- [34] U. DoD. "Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions. US DoD, Washington, DC, USA." *UFC* (2008): 320-340.
- [35] M. Mahboubi Niazmandi, S. Mirasi, M. Hashemi Jokar, and M. Momeni. "The effect of combined loading on the bearing capacity of strip footings located on two-layered clayey soils adjacent to geogrid-reinforced slopes." *Amirkabir Journal of Civil Engineering* 55, no. 9 (2023): 1825-1844.
- [36] M. Mahboubi Niazmandi, S. Mirassi, M. Momeni, M. Bakhshandeh, and H. Lotfi. "The effects of pulse-like motions of near-fault earthquakes with forward-directivity characteristic on the response of concrete structures." *Journal of Structural and Construction Engineering* 10, no. 6 (2023): 34-58.
- [37] H. Rahnema, and S. Mirassi. "Effect of frequency content of seismic source load on Rayleigh and P waves in soil media with cavity." *Journal of Structural and Construction Engineering* 8, no. 2 (2021): 280-300.
- [38] J. Sideri, C.L. Mullen, S. Gerasimidis, and G. Deodatis. "Distributed Column Damage Effect on Progressive Collapse Vulnerability in Steel Buildings Exposed to an External Blast Event." *Journal of Performance of Constructed Facilities* 31, no. 5 (2017): 04017077.
- [39] G.F. Kinney, and K.J. Graham. *Explosive shocks in air*, Springer Science & Business Media, 2013.
- [40] G. Mays, and P. Smith. "Blast effect on building: Design of buildings to optimize resistance to blast loading." *Thos Telford, London, UK, (1995)*.
- [41] B. Hopkinson. "British ordnance board minutes." *The National Archives, Kew, UK, (1915)*: 13565.
- [42] C. Cranz. "Lehrbuch der Ballistic." *Textbook of ballistics, (1926)*.

- [43] J. Borgers, and J. Vantomme. "Improving the accuracy of blast parameters using a new Friedlander curvature  $\alpha$ ." in *DoD Explosives Safety Seminar* (2008).
- [44] M. Teich and N. Gebbeken. "The influence of the underpressure phase on the dynamic response of structures subjected to blast loads." *International Journal of Protective Structures* 1, no. 2 (2010): 219-233.
- [45] F. Beshara. "Modelling of blast loading on aboveground structures—I. General phenomenology and external blast." *Computers & Structures* 51, no. 5 (1994): 585-596.
- [46] S.S.S. Design. "Analysis Handbook." *US Army Corps of Engineers, Huntsville Division, HNDM-1110-1-2*, (1997).
- [47] V. Karlos, and G. Solomos. "Calculation of blast loads for application to structural components." *Luxembourg: Publications Office of the European Union*, (2013).
- [48] T. Krauthammer. "Blast effects and related threats." *Penn State University*, (1999).
- [49] W.L. Bounds. "Design of blast-resistant buildings in petrochemical facilities." *ASCE Publications*, (2010).
- [50] G.R. Cowper, and P.S. Symonds. "Strain-hardening and strain-rate effects in the impact loading of cantilever beams. Providence (RI): Division of Applied Mathematics." C11 28 (1957).
- [51] S. Mirassi and H. Rahnema. "Improving the performance of absorbing layers with increasing damping in the numerical modeling of surface waves propagation using finite element method." *Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology* 13, no. 2 (2020): 13-26.
- [52] S. Mirassi, H. Rahnema, and A. Eshaghi. "Evaluation of surface wave components for identification of subsurface cavities using 2D and 3D finite element modeling method." *Journal Of Research on Applied Geophysics* 6, no. 2 (2020): 219-233.
- [53] A. Haufe, K. Schweizerhof, and P. DuBois. "Properties & limits: Review of shell element formulations." *Livermore Software Technology Corporation*, (2013).
- [54] B. Luccioni, R. Ambrosini, and R. Danesi. "Analysis of building collapse under blast loads." *Engineering Structures* 26, no. 1 (2004): 63-71.