

شبیه‌سازی آزمون آزمایشگاهی اثر انفجار بر سازه‌های بتن مسلح در نرم‌افزار اجزا محدود

غلامرضا هوایی^۱، شاپور طاحونی^۲، میلاد رومیانی^۳

۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳- کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

آدرس پست الکترونیکی نویسنده رابط (miladroomiani@aut.ac.ir)

چکیده

تجربه و آزمایش یکی از مهم‌ترین روش‌های تحلیل موضوعات علمی است که بر پایه استدلال استنتاجی بنا شده است. مطالعات آزمایشگاهی در زمینه مهندسی سازه نیز همچون حوزه‌های دیگر از جمله کارآمدترین روش‌های بررسی موضوعات علمی به شمار می‌آیند. سیر انجام مطالعات تجربی در مهندسی سازه به این صورت است که سازه یا قسمتی از آن در مقیاسی کوچک‌تر از اندازه واقعی ساخته شده و عوامل بیرونی همانند آنچه در واقعیت اتفاق می‌افتد بر نمونه ساخته شده اثر داده می‌شود. روش آزمون آزمایشگاهی علی‌رغم مزایای ذاتی خود دارای معایبی نیز می‌باشد که از جمله آن می‌توان به زمان‌بر و پرهزینه بودن آزمایشات اشاره کرد. در سالیان اخیر تلاش‌های زیادی به منظور مرتفع نمودن مشکلات مذکور صورت گرفته که حاصل آن معرفی روش‌های تحلیل عددی با دقت بالا و شبیه‌سازی نزدیک به واقعیت بوده است، روش اجزا محدود به‌عنوان یکی از روش‌های تحلیل عددی با وجود شبیه‌سازی دقیق آزمون‌های آزمایشگاهی، بسیار کم‌هزینه و تا حدودی سریع‌تر از روش‌های آزمایشگاهی است. مدل‌سازی سازه بتن مسلح و اعمال بارهای دینامیکی بر آن، به علت وجود پارامترهای تأثیرگذار متعدد و پیچیدگی‌های فراوان همواره مورد بحث بوده است لذا در این مطالعه اثر بار انفجار به‌عنوان یک بارگذاری دینامیکی نامتعارف بر اعضاء بتن مسلح به علت نیازی که به شبیه‌سازی آزمایشات پرهزینه انفجاری برای تحلیل علمی این پدیده وجود دارد، صورت گرفته است. نتیجه شبیه‌سازی‌های عددی و مقایسه آن‌ها با نتایج آزمایشگاهی نشان داد که چنانچه پارامترهای مؤثر در شبیه‌سازی مصالح بتن مسلح به‌صورت صحیح و بر اساس تئوری‌های معتبر در نظر گرفته شوند؛ تطابق قابل قبولی بین این نتایج مشاهده می‌شود که با توجه به این موضوع می‌توان تحلیل‌های عددی مذکور را جایگزین مناسبی برای تست‌های آزمایشگاهی انفجار دانست.

کلمات کلیدی: انفجار، اجزا محدود، بتن مسلح، آزمون آزمایشگاهی، بار دینامیکی

۱. مقدمه

با پیشرفت روزافزون روش‌های اجزا محدود در تحلیل مسائل علمی و برطرف شدن عدم قطعیت‌های موجود در این روش‌ها، مطالعات بسیار زیادی در زمینه مهندسی سازه با تکیه بر اصول تحلیل عددی و با استفاده از نرم‌افزارهای اجزا محدود صورت گرفته است. قابل‌اتکا بودن نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی نیازمند اعتبارسنجی این تحلیل‌هاست لذا به‌منظور حصول اطمینان از صحت نتایج این مطالعات نیاز است تا تست‌های آزمایشگاهی صورت گرفته در زمینه مطالعاتی موردنظر در این نرم‌افزارها شبیه‌سازی شده و نتایج این دو با یکدیگر مقایسه شوند.

همانطور که گفته شد در این مطالعه سعی شده است تا شبیه‌سازی اثر بار انفجار بر سازه بتن مسلح مورد اعتبارسنجی قرار گیرد لذا در ابتدا تاریخچه‌ای از چند پژوهش انفجاری مرور شده و سپس چند مورد از نمونه‌های آزمایشگاهی مورد مطالعه در تحقیقات معتبر اعتبارسنجی شده است. در نهایت با توجه به این که نتایج تحلیل‌های عددی قرابت قابل قبولی با نتایج تست‌های واقعی داشته‌اند؛ موارد و نکات مهمی که شبیه‌سازی دقیق اثر انفجار بر سازه بتن مسلح را ممکن ساخته در بخش نتایج تشریح شده است.

۲. مطالعات پیشین

هاو^۱ و همکارانش در سال ۲۰۱۰ در دانشگاه وسترن استرالیا تحقیقات خود را به دو بخش تقسیم کردند. ۱- شبیه‌سازی عددی برای پاسخ دینامیکی پل کابلی با دهانه بلند که تحت اثر انفجار بر روی عرشه قرار گرفته بود، ۲- پیش‌بینی خسارت و تقویت به کمک مصالح FRP. محل انفجار در ۱ متر بالاتر از عرشه و ۰٫۵ متری از پیلون فرض شد تا شبیه‌سازی به انفجار یک خودرو نزدیک شود. همچنین سازه پل را به ۴ عنصر اصلی عرشه کامپوزیتی در دهانه وسط، برج، ستون‌ها، عرشه بتن پیش‌تنیده دهانه‌های کناری تقسیم کردند. آن‌ها در قسمت اول کار خود به مدل‌سازی پل کابلی در نرم‌افزار LS-DYNA پرداختند [1]. پل تحت انفجار ۱۰۰۰ کیلوگرمی TNT قرار گرفته بود، که مکانیزم‌های خرابی و شدت آسیب به برج، ستون‌ها و عرشه پل مورد بررسی قرار گرفت. با انفجار ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT در کنار ستون‌ها در فاصله ۰٫۵ متری از آن‌ها و در تراز سطح زمین مشاهده شد که سطح جلویی ستون‌ها آسیب موضعی دیده است و سطح پشتی آسیب بیشتری دیده که علت آن کم بودن مقاومت کششی بتن است [1].

سان^۲ و همکارانش در مقاله‌ای با عنوان «عملکرد پیلون‌های پل کابلی تحت بار انفجاری» دو نوع پیلون را شبیه‌سازی عددی کردند: ۱- باکس فولادی ۲- کامپوزیت بتن پر. از آنجایی که انفجار خودرو بر روی عرشه محتمل‌تر از حملات تروریستی است محققان در این مقاله فرضیات خود را بر این اساس بنا نهادند. الگوهای آسیب را استخراج و عملکرد این ۲ نوع پیلون را بررسی کردند. بررسی‌ها نشان داد که اثر P-delta در باکس به دلیل تغییر شکل زیاد این نوع پیلون خیلی مهم و چشمگیر است و موجب شکست آن می‌شود [2].

بینگ^۳ و همکارانش به بررسی موردی آسیب پل خریایی مینپو^۴ که تحت اثر انفجار قرار گرفته بود، پرداختند. به کمک نتایج آزمایشگاهی و مقایسه نتایج تحلیلی سعی کردند اندازه مش مناسبی برای توزیع فشار انفجار پیدا کنند، که در نهایت مش‌های به‌اندازه ۵ سانتی‌متر را پیشنهاد دادند. محققین با نصب گیج‌های اندازه‌گیری شتاب و سرعت در چهار نقطه پی بردند که گیج‌ها به دلیل ضربه انفجار به یک‌باره جهش‌هایی را در سرعت و شتاب تجربه کرده‌اند. با دور شدن از محل انفجار سرعت و شتاب جهشی نشان داده شده توسط گیج‌ها کاهش یافته و همچنین زمان پایدار شدن کاهش می‌یابد [3].

ویلیامسون^۵ 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 حاصل از انفجار را بررسی کنند و ضرایب شکل ستون را برای کاهش اثر ضربه وارده در معادلات توسعه داده و ارائه دهند. ترکیب این معادلات با پاسخ‌های سیستم یک درجه آزادی منجر به پدید آمدن روش ساده‌ای برای پیش‌بینی پاسخ ستون‌ها شد [4].

۱- H_{ao}

۲- Son

۳- Bing

۴- Minpu

۵- Williamson

آستانه اصل^۶ و همکارانش به بررسی اثر انفجار بر عرشه فولادی اورتوتروپیک پرداختند. اهداف اصلی آن‌ها مطالعه پاسخ این عرشه به بار انفجاری و توسعه تکنولوژی و سیستم‌هایی، جهت جلوگیری از فروریزش پل. در این تحقیق محققین با تغییر بار منفجره و نیروی محوری وارد بر عرشه سعی در کشف رفتار واقعی عرشه پل نمودند. مودهای شکست سازه شناسایی شد. همچنین برای مانیتور کردن خرابی موضعی، یک نقطه بر روی عرشه به‌عنوان نماینده انتخاب شد و تغییرات سرعت و شتاب در آنجا مانیتور شد [5].

دراگوس به تلاش در ساده‌سازی اثر انفجار در محیط‌های محصور پرداخت تا طی آن بتواند پاسخ سازه به این حالت بارگذاری انفجاری را بدست آورد (انفجار در تونل، مترو، انبار مهمات و ...). نتیجه آن شد که هرچه بار انفجار محصور ساده شده نزدیک به مرکز بار انفجار محصور واقعی باشد ضربه وارده به مقدار واقعی خود نزدیک می‌شود و همچنین پاسخ سازه به مقدار واقعی خود بیشتر نزدیک می‌شود. همچنین هرچه زمان پاسخ سازه به بار انفجاری بیشتر باشد این روش دقت بالاتری دارد لذا می‌توان گفت برای سازه‌های شکل‌پذیر نتایج دقت بالایی دارند [5].

در مطالعه آزمایشگاهی صورت گرفته توسط Jun Li و همکارانش یک دال بتنی با ابعاد ۱*۲ متر ساخته شده و سپس برای حالات مختلفی از لحاظ نسبت فولاد و فاصله ایجاد انفجار مورد آزمایش قرار گرفته است. در فاز دوم این مطالعه، نمونه‌های ساخته شده در آزمایشگاه در نرم‌افزار اجزاء محدود شبیه‌سازی و تحلیل شده و در نهایت نتایج تحلیل مذکور با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. نتایج چند نمونه از دال‌های این مطالعه در پژوهش حاضر مورد صحت سنجی قرار گرفته‌اند [6].

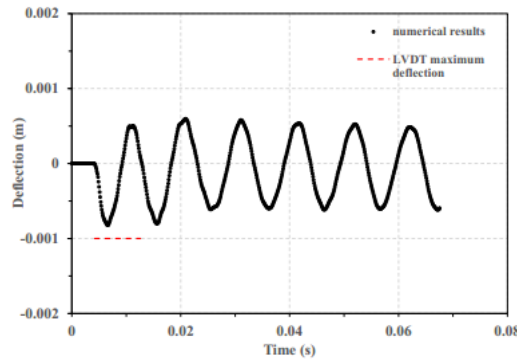
۳. تحلیل نرم‌افزاری دال‌های بتن مسلح با عملکرد فوق‌العاده بالا تحت اثر بار انفجار

در این قسمت چند نمونه تست آزمایشگاهی در نرم‌افزار شبیه‌سازی شده و نتایج به‌دست‌آمده به‌منظور کسب اطمینان از دقت تحلیل نرم‌افزاری، با نتایج آزمون آزمایشگاهی مقایسه می‌شوند. مصالح بتن مورد استفاده در این نمونه‌ها از بتن با مقاومت بالا (UHPC) و بتن با مقاومت معمولی (NSC) هستند. ۵ نمونه دال مورد آزمایش شامل ۴ نمونه دال ساخته شده از بتن با مقاومت بالا و درصد فولاد متفاوت و یک نمونه دال با بتن NSC و با نسبت فولاد نرمال است [7]. شدت انفجار ایجاد شده برحسب وزن TNT معادل مورد استفاده، در بازه ۱ تا ۱۴ کیلوگرم می‌باشد، همچنین فاصله انفجار با نسبت آن به وزن TNT مورد استفاده برحسب $(M/KG^{1/3})$ در بازه ۰٫۴۱ تا ۳٫۰۵ بیان می‌شود [7]. در این قسمت یک مورد از آزمایشات مذکور به کمک نرم‌افزار تحلیل شده و نتایج آن با نتایج نمونه واقعی مقایسه شده است. تصویر نمونه واقعی، نمونه شبیه‌سازی شده و نتایج حاصله در اشکال زیر نشان داده شده است.

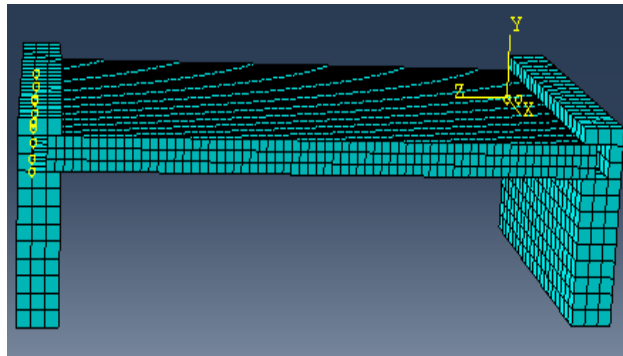


شکل ۱- آزمایش بار انفجار بر روی دال بتنی [7].

نتیجه آزمون آزمایشگاهی تحت اثر بار حاصل از انفجار ۱ کیلوگرم TNT در فاصله ۳,۰۵ متری از سطح دال به صورت زیر است. مشاهده می شود که جابجایی ایجاد شده حداکثر حدود ۰,۸ میلی متر است.

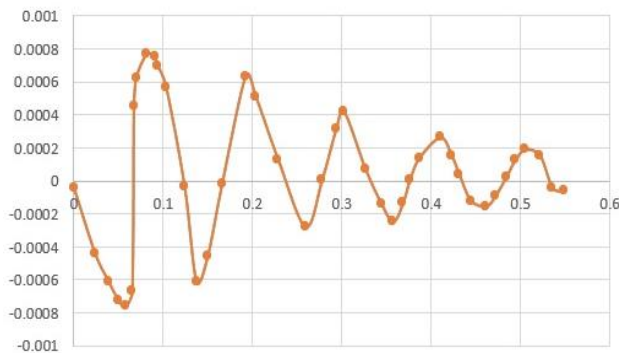


شکل ۲- نمودار افت برحسب زمان دال بتنی تحت اثر انفجار [7]



شکل ۳- نمونه دال بتنی شبیه سازی شده در نرم افزار [7]

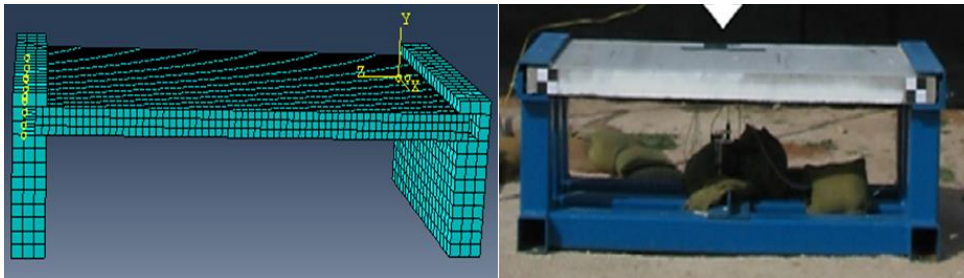
در شکل ۴ نتایج حاصل از تحلیل نرم افزاری اجزاء محدود نشان داده شده است. مشاهده می شود که جابجایی حداکثر ایجاد شده برابر ۰,۸ میلی متر و دقیقاً برابر با نتیجه حاصل شده از آزمون آزمایشگاهی است، البته در نتایج نرم افزاری دامنه تغییر مکان در ادامه روند بارگذاری کاهش یافته که این مورد با توجه به تفاوت میان روابط تئوری و آزمایشات واقعی قابل توجیه است.



شکل ۴- نتیجه اثر بار انفجار بر دال بتنی در تحلیل نرم افزاری

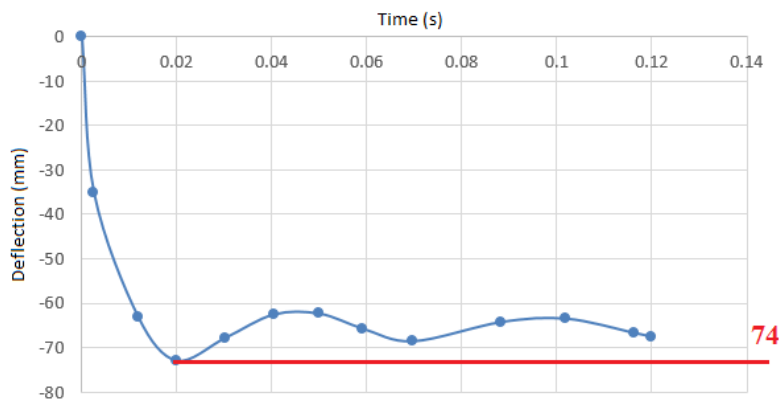
۴. تحلیل نرم‌افزاری دال‌های بتن مسلح با عملکرد فوق‌العاده بالا تحت اثر بار انفجار

به‌منظور کسب اطمینان بیشتر از نتایج تحلیل عددی یک مورد دیگر از آزمایشات دال بتنی به کمک نرم‌افزار تحلیل شده و نتایج آن با نتیجه آزمایش نمونه واقعی مقایسه شده است. تصویر نمونه واقعی، نمونه شبیه‌سازی شده و نتایج حاصله در اشکال ۵ و ۶ نشان داده شده است.



شکل ۵- نمونه آزمایشگاهی و شبیه‌سازی نرم‌افزاری دال بتنی تحت اثر بار انفجار [7].

آزمون آزمایشگاهی تحت اثر بار حاصل از انفجار ۸ کیلوگرم TNT در فاصله ۱ متری از سطح دال باعث ایجاد تغییر مکانی به اندازه ۷۲ میلی‌متر در وسط دال شد [7]. مشاهده می‌شود که جابجایی ایجاد شده در تحلیل نرم‌افزاری همین نمونه تقریباً برابر با مقدار حاصل از آزمون آزمایشگاهی است. شکل ۶ نمودار تغییر مکان برحسب زمان حاصل از تحلیل عددی را نشان می‌دهد.



شکل ۶- نمودار افت برحسب زمان حاصل از تحلیل نرم‌افزاری

۵. تحلیل نرم‌افزاری پل با پایه‌های مختلط تحت اثر بار انفجار

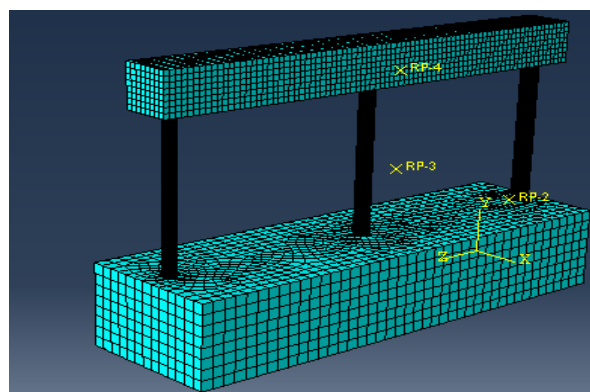
این مطالعه آزمایشگاهی به‌منظور بررسی پایه‌های بتن پر پل‌ها تحت شرایط مختلف خطر ارائه‌شده است و هدف آن معرفی یک طرح ایده آل برای پایه پل‌ها به‌منظور ارائه سطح مناسبی از مقاومت در برابر شکست در اثر بار لرزه‌ای و انفجاری (البته نه

به صورت هم‌زمان) بوده است. همان‌طور که گفته شد در این پژوهش مفهوم سیستم پایه چند ستونی با ستون‌های لوله‌ای فولادی پر شده با بتن پیشنهاد شده که کفایت آن به وسیله‌ی آزمایش‌های تحت اثر بار انفجاری بررسی شده است [8]. روند انجام این مطالعه به این صورت بوده که ابتدا سه ستون فولادی پر شده با بتن که از لحاظ قطر و ضخامت لایه فولادی با یکدیگر تفاوت داشتند تحت اثر بار انفجاری با فواصل متفاوت قرار گرفتند و سپس نتایج این آزمایشات در قالب نمودارهایی بر حسب فشار-ارتفاع ستون و جابجایی - ارتفاع ستون آورده شده است [8]. در این قسمت یکی از حالات آزمایش به منظور صحت‌سنجی نتایج نرم‌افزاری آورده شده است. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، این نمونه در مقیاس 1/4 ساخته شده و تحت بارگذاری انفجاری مطابق با آیین‌نامه قرار گرفته است.



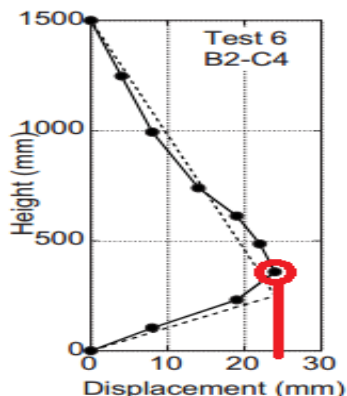
شکل ۷- بررسی آزمایشگاهی اثر بار انفجار بر پایه پل‌ها [8].

تصویر مدل شبیه‌سازی شده پایه‌های پل در شکل ۸ نشان داده شده است. تمامی مشخصات این مدل اعم از مشخصات مصالح، شرایط مرزی و بارگذاری خارجی منطبق بر شرایط نمونه واقعی می‌باشد.

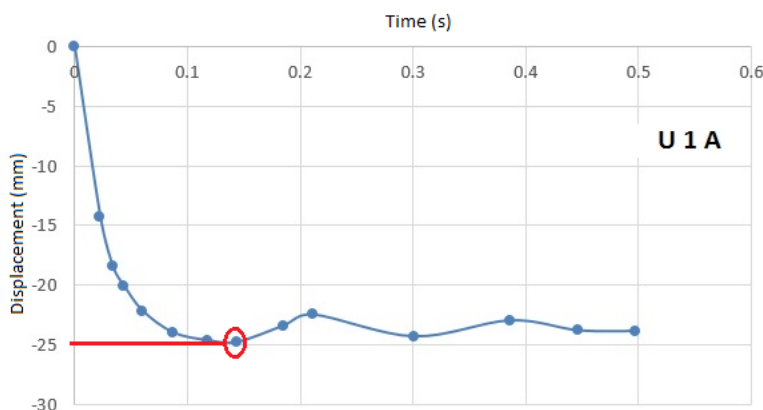


شکل ۸- سیستم پایه پل شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار

در آزمون آزمایشگاهی، بار حاصل از انفجار TNT در فاصله‌ای مشخص (بر حسب X) از ستون‌های میانی باعث ایجاد تغییر مکانی به اندازه ۲۵ میلی‌متر شده است. مشاهده می‌شود که جابجایی ایجاد شده در تحلیل نرم‌افزاری همین نمونه تقریباً برابر با مقدار حاصل از آزمون آزمایشگاهی است. شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب نمودار تغییر مکان بر حسب ارتفاع ستون واقعی و نمودار تغییر مکان حداکثر بر حسب زمان نمونه شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهند.



شکل ۹- نمودار تغییر مکان برحسب زمان نمونه آزمایشگاهی [8].



شکل ۱۰- نمودار تغییر مکان برحسب زمان مدل شبیه‌سازی شده

با توجه به مطالب مطرح‌شده در قسمت‌های قبل می‌توان نتیجه گرفت که شبیه‌سازی بار انفجار و اعمال آن بر سازه‌های مختلف نتایجی نزدیک به واقعیت به دست می‌دهد لذا بر همین اساس می‌توان در مطالعات تحلیلی به‌منظور بررسی سازه‌ها تحت اثر این نوع از بارگذاری، از نرم‌افزار اجزا محدود Abaqus [9] به‌عنوان یک گزینه مناسب استفاده نمود.

۶. نتیجه‌گیری:

- ❖ قرابت قابل قبولی بین نتایج حاصل از تحلیل عددی و آزمون آزمایشگاهی مشاهده شده است که بیانگر مناسب بودن استفاده از تحلیل‌های عددی به‌جای تست‌های آزمایشگاهی به‌منظور صرفه‌جویی در زمان و هزینه است.
- ❖ جابجایی حداکثر ایجادشده وسط دال بتن مسلح در اثر بار انفجار برای تحلیل عددی و آزمون آزمایشگاهی تقریباً برابر بوده اما روند استهلاک انرژی متفاوت بوده است؛ به‌صورتی که استهلاک انرژی در نمونه واقعی سریع‌تر از مدل شبیه‌سازی‌شده اتفاق می‌افتد.
- ❖ نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی نشان می‌دهد که معیار دارگر - پراگر (تئوری مندر) برای مدل‌سازی مصالح بتن مسلح و رفتار با سخت‌شدگی مجدد برای مدل‌سازی مصالح فولادی مناسب بوده و استفاده از این موارد در شبیه‌سازی آزمون آزمایشگاهی باعث استخراج نتایج نزدیک به واقعیت شده است.

- ❖ قرابت نتایج آزمون آزمایشگاهی و تحلیل عددی برای پایه‌های فلزی (بتن پر) بیشتر از دال بتن مسلح بوده است لذا می‌توان نتیجه گرفت که در سازه‌های ساخته شده از مصالح همگن شباهت بیشتری بین نتایج مذکور وجود دارد.
- ❖ در این مطالعه به‌منظور شبیه‌سازی مصالح بتن مسلح تحت اثر بار انفجار؛ از تکنیک مدفون‌سازی میلگردها در داخل بتن استفاده شده است که این راهکار باعث استخراج نتایج دقیق و نزدیک به واقعیت شده است.
- ❖ بعد از مقایسه کلی نتایج اعتبارسنجی صورت گرفته در این مطالعه می‌توان نتیجه گرفت که جابجایی حداکثر ایجاد شده در اثر اعمال بار انفجار تنها پارامتری است که مقدار آن در آزمون آزمایشگاهی و تحلیل عددی دقیقاً یکسان بوده و پارامترهای دیگر تا حدودی متأثر از وجود عدم قطعیت‌های موجود خواهند بود.

۷. منابع:

- [1] Hao H, Tang EKC. Numerical simulation of a cable-stayed bridge response to blast loads, Part I: Model Development and response calculations. Eng Struct 2010; 32:3193_205.
- [2] Son J, Lee HJ. Performance of cable-stayed bridge pylons subjected to blast loading. Eng Struct 2011; 33(4):1133-48.
- [3] Biggs, J. M. (1964). Introduction to structural dynamics, McGraw-Hill, Inc. New York.
- [4] Williamson, E. B. et al. (2010). "Blast-resistant highway bridges: Design and detailing guidelines." National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Report 645.
- [5] Son, J. and Astaneh-Asl, A. (2008). "Blast Resistance of Steel Orthotropic Bridge Decks", report no. UCB/CEE-STEEL-08/01, Dept. of Civil and Env. Engineering, Univ. of California, Berkeley
- [6] Li, J., Wu, Ch., and Hao, H; "An Experimental and Numerical Study of Reinforced Ultra-High Performance Concrete Slabs Under Blast Loads", *Materials & Design*, 82, 64-76, May 2015.
- [7] Xu, J., Wu, Ch., Su, Y., Li, Z., Fang, Q. and Hao- Hong, D; "Behaviour of Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete Columns Subjected to Blast Loading", *Engineering Structures*, 118, 97-107, July 2016.
- [8] Fujikura, S., Bruneau, M., and Lopez-Garcia, D; "Experimental Investigation of Multihazard Resistant Bridge Piers Having Concrete-Filled Steel Tube under Blast Loading", *J. Bridge Eng*, Volume 13, 586-594, November 2008.
- [9] ABAQUS 6.13 Analysis User,s Manual Volume III.