

محافظت از پایه پل‌های بتنی با عرشه گسترده به وسیله ژاکت‌های بتن مسلح در مقابل بار انفجار

شاپور طاحونی^۱، میلاد رومیانی^{۲*}، حسین مهراد^۳

۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- کارشناسی ارشد مهندسی عمران - سازه، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳- کارشناسی ارشد مهندسی عمران - سازه‌های دریایی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۴-

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

چکیده

سازه‌های ساختمانی و غیر ساختمانی تحت اثر بارهای متنوعی قرار می‌گیرند و با توجه به میزان خطرپذیری که برای آن‌ها در نظر گرفته می‌شود، طراحی می‌شوند. به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عواملی که سلامت پل‌ها را تهدید می‌کند می‌توان به بار انفجار حاصل از حوادث تروریستی اشاره نمود. هدف این مطالعه بررسی اثر انفجار بر پل‌های بزرگراهی است لذا در ابتدا مروری بر مطالعات انجام شده پیشین صورت گرفته و سپس عملیات شبیه‌سازی انفجار و اثر آن بر سازه صحت‌سنجی شده است. در نهایت یک نمونه از پل‌های بزرگراهی کشور به کمک نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS تحت اثر بار انفجار قرار گرفته است. بعد از مشاهده ضعف در عملکرد پل مذکور در مقابل بار انفجار؛ رویکرد مقاوم‌سازی با استفاده از ژاکت بتن مسلح مطرح شده و نتایج حاصل از تحلیل حالات با و بدون مقاوم‌سازی با یکدیگر مقایسه شده است. در بخش دیگری از این پژوهش، اثر آرمان‌گذاری عرضی و دورپیچ بر محصورشدگی پایه پل بررسی شده و نتایج این دو حالت با یکدیگر مقایسه شده‌اند. بر اساس نتایج بدست آمده می‌توان اظهار داشت که بتن پایه‌های پل به علت ضعف در عملکرد کششی در زمان پیشروی موج انفجار آسیب دیده و استفاده از ژاکت بتن مسلح به علت ایجاد محصورشدگی، برای رفع این مشکل مفید می‌باشد.

کلمات کلیدی: پل بتنی، مقاوم‌سازی، انفجار، ژاکت بتنی، پایه پل

۱. مقدمه

گام اول در صورت دادن هر طرح پژوهشی آشنایی کلی با موضوع مورد مطالعه و کسب اطلاعاتی کامل و جامع در حوزه مورد نظر می‌باشد لذا در این فصل طبق روال پژوهش‌های کاربردی، ابتدا اطلاعاتی مختصر در باب پل‌های بتنی و عوامل مؤثر بر آن‌ها آورده شده است. واضح است که بارگذاری انفجاری از جمله بارهایی است که سلامت پل‌ها را تهدید می‌کند و ارزیابی میزان خسارت و عملکرد پل‌ها تحت اثر این بارگذاری به علت اهمیت راهبردی آن‌ها ضروریست لذا در این مطالعه یکی از پل‌های بزرگراهی کشور که در حال سرویس‌دهی می‌باشد مورد تحلیل نرم‌افزاری دقیق قرار گرفته و اثرات مخرب حاصل از بارگذاری انفجاری بر آن مشخص شده است و در نهایت پایه‌های پل به‌عنوان کلیدی‌ترین جز پل در مواجهه با انفجار مورد مقاوم‌سازی قرار گرفته و تأثیر انواع مختلف مقاوم‌سازی در مقاومت آن بررسی شده است.

۲. مرور مطالعات صورت گرفته پیشین

• مطالعه اثر انفجار بر پل‌های بزرگراهی (فاز اول)

آگراول و همکاران مطالعه‌ای با عنوان (اثر انفجار بر پل‌های بزرگراهی: مدل‌سازی و اثر بار انفجار) انجام دادند [1]. پس از خطری که سازمان‌های متصدی حفاظت از زیرساخت‌های کشورها در مورد امنیت پل‌ها احساس کردند، مطالعات زیادی در حوزه بررسی اثر بار انفجار بر سازه‌ها صورت گرفت، البته شایان ذکر است که این نگرانی‌ها از سال ۲۰۰۱ به دلیل حمله تروریستی که بر علیه برج‌های تجارت جهانی رخ داد، شدت گرفته است [1].

آنالیز پل‌های بزرگراهی تحت اثر بارهای انفجاری نیازمند ایجاد یک برنامه انفجاری نزدیک به واقعیت و درک مناسبی از رفتار مولفه‌های پل در برابر نرخ کرنش بالای ایجاد شده در مصالح به علت بارگذاری انفجاری است. در این مطالعه رویکرد جدیدی برای کاربرد بار انفجار و وارد کردن آن بر اجزاء پل معرفی شده است. این رویکرد که در نرم‌افزار LS-DYNA ایجاد شده و نتایج آن توسط دو نمونه از تیرهای آزمایش شده تحت اثر بار انفجار صحت سنجی شده است، می‌تواند بازتاب اثرات ناشی از بار انفجار را به شکل خوبی نشان دهد [1]. در این مطالعه یک مدل از پل‌های بزرگراهی سه دهانه به جهت بررسی اثرات بار انفجار بر پل‌های بتنی مسلح شده ایجاد شده است و در نتیجه آن مشاهده شد که رنج اثرات اعمال شده بر اجزاء پل در طول اعمال بار انفجار می‌تواند به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از اثرات حاصل از خطرات احتمالی دیگر باشد [1].

• مطالعه اثر انفجار بر پل‌های بزرگراهی (فاز دوم)

آگراول و همکاران مطالعه‌ای با عنوان (اثر انفجار بر پل‌های بزرگراهی: مودهای شکست و همگرایی چند خطر) انجام دادند [2]. در این مطالعه پل‌ها با سطوح طراحی لرزه‌ای گوناگون و مقاومت فشاری متنوع بتن برای سه سطح مختلف از بارگذاری انفجاری در زیر عرشه تحلیل شده‌اند.

در این مطالعه یک شبیه‌سازی کلی و گسترده از پل صورت گرفته است که هدف آن ایجاد ارتباط بین نسبت شکل‌پذیری به فاکتور کاهش مقاومت (μ/R) با تغییر مکان بالای ستون برای بتن با مقاومت‌های فشاری متفاوت است. در همین راستا مشاهده شد که جابجایی نسبی بالای ستون برای $\mu/R \geq 6$ به شدت کاهش یافته است، علاوه بر این از نتیجه ۲۷ شبیه‌سازی صورت گرفته مشاهده شد که پایه‌های پل با نسبت $\mu/R \geq 6$ در مقابل سطح بالایی از بار انفجار دوام می‌آورند [2].

اگر بخواهیم روند انجام این پژوهش را بیشتر شرح دهیم باید اشاره کرد که در این پژوهش بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی پل‌ها تحت اثر سطوح مختلف بارگذاری، ۱۴ نوع مکانیزم خسارت برجسته شناسایی شد که عبارت‌اند از: خرابی بتن پایه پل‌ها، شکست اجزا پل بر اثر انفجار، ورقه ورقه شدن سطح بتن، قطع میلگردها، تشکیل لولای پلاستیک، شکست پایه‌ها، خرد شدن بتن و [2].

• مطالعه عملکرد پایه‌های پل تحت اثر بار انفجاری

ویلیامسون و همکارانش مطالعه‌ای با موضوع (عملکرد پایه‌های پل تحت اثر بار انفجاری) انجام دادند [3]. در شرح ضرورت انجام این طرح آزمایشگاهی عنوان شده است که با توجه به افزایش روزافزون حملات تروریستی بر علیه زیرساخت‌های ارتباطی کشورها و با توجه به این که تهدیدات مذکور در دهه‌های اخیر به سمت پل‌های بزرگراهی سوق پیدا کرده است، گروه ملی تحقیقات پل‌ها با دستور انجمن مهندسی پل آمریکا مطالعاتی برای مشاهده اثر انفجار بر پارامترهای حساس پل‌ها ترتیب داد [4]. این مقاله شرح برنامه تحقیقاتی ذکر شده را در قالب بررسی آزمایشگاهی ۱۰ نمونه مختلف از ستون‌هایی با مقیاس ۱/۲ بیان کرده است. در این مقاله اثر تغییرات طیف گسترده‌ای از پارامترهای طراحی بر مقاومت پایه‌های بتنی پل‌ها مطالعه شده است. آنچه این پژوهش را از تحقیقات دیگر متمایز می‌سازد، ساینز نمونه‌ها و شدت تهدیدات انفجاری اعمال شده است، به صورتی که یکی از مراحل اصلی در صورت دادن این آزمایشات فراهم نمودن یک سیستم تکیه‌گاهی خاص برای تحمل اثرات بارهای انفجاری

و نیروهای تکیه‌گاهی منتقل شده از ستون است [3]. ویژگی بارز دیگری که این مطالعه دارد این است که آزمایشات صورت گرفته به دودسته تقسیم شده‌اند؛ گروه اول آزمایشات در فاصله‌ای انجام می‌شوند تا مدهای گسیختگی ستون‌ها مشاهده شود. گروه دوم آزمایشات در فاصله خیلی نزدیک به ستون‌ها انجام می‌شوند تا الگوهای خردشدگی ستون بتنی مشاهده گردد [4].

• مطالعه بررسی اثر انفجار بر پل‌های با پایه فلزی و پر شده با بتن [5]

فوجیکارا و همکاران مطالعه‌ای با موضوع بررسی آزمایشگاهی مقاومت چند خطر پایه‌های لوله‌ای پر شده با بتن تحت اثر بارگذاری انفجاری انجام دادند. این مطالعه آزمایشگاهی به منظور بررسی پایه‌های (پر شده با بتن) پل‌ها تحت شرایط مختلف الخطر ارائه شده است و هدف آن معرفی یک طرح ایده آل برای پایه پل‌ها به منظور ارائه سطح مناسبی از مقاومت در برابر 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 وسیله آزمایش‌های انفجاری بررسی شده است [5]. در این پژوهش مشاهده شد که پل‌های با پایه CFST می‌توانند هر دو فاکتور عملکرد لرزه‌ای مناسب و سطح مقاومت انفجاری کافی را برآورده سازند [5]. در نهایت با فرض اینکه انرژی حاصل از بار انفجاری وارد بر سازه به انرژی کرنشی داخلی شود، نتایج زیر از این مطالعه حاصل شده است:

وجود لایه‌های فولادی به علت جلوگیری از نقص و ورقه شدن بتن باعث ایجاد عملکرد مناسب این ستون‌ها در مقابل بار انفجار و القانات ناشی از آن شده است. لوله‌های فولادی در صورت داشتن ضخامت و قطر مناسب باعث می‌شوند تا ستون‌های CFST بتوانند عملکرد مناسبی در مقابل بارهای وارده داشته باشند.

آزمون نمونه‌ها نشان می‌دهد که ستون‌های CFST به عنوان پایه‌های پل یک رفتار انعطاف‌پذیر رضایت‌بخش از خود نشان داده‌اند. مقایسه نتایج به دست آمده از تست‌های انفجاری با نتایج حاصل از تحلیل سازه معادل نشان داد که اثر فشار مؤثر انفجار بر ستون‌های دایره‌ای معادل ۰,۴۵ اثر آن بر سطوح مسطح است.

• مطالعه اثر انفجار بر پایه‌های پل با مقیاس کوچک [6]

طی مطالعاتی که مرکز تحقیق و توسعه مهندسی^۱ آمریکا انجام داد، ۸ آزمایش در مقیاس کوچک در چهار فاصله مختلف برای تعیین پارامترهای انفجار صورت گرفت. هدف از این آزمایش تعیین اثر بار انفجار وارده بر اشکال مختلف پایه‌های پل بود. مشاهدات نشان داد که شکل مقطع ستون، فاصله از محل انفجار و موقعیت قرارگیری مواد منفجره نسبت به ستون چگونه در فشار انفجاری وارد بر سطح جلویی، عقبی و کناری ستون تأثیر می‌گذارند. در نهایت داده‌های جمع‌آوری شده از این مطالعه برای دستیابی به روش‌های کلاسیک پیش‌بینی بار انفجار مورد استفاده قرار گرفت. ناگفته نماند که تأثیر سطوح تخت بر نحوه توزیع بار انفجاری قبلاً توسط ارتش آمریکا بررسی شده بود.

۳. شبیه‌سازی و تحلیل پایه‌های بتن مسلح تحت اثر بار انفجار

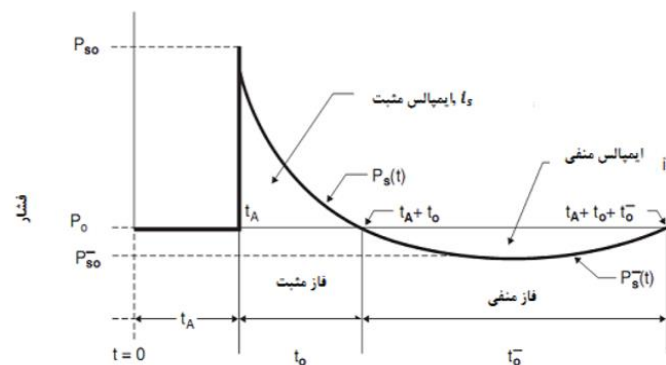
• رفتار مصالح بتن مسلح

تحلیل غیرخطی سازه‌های بتن مسلح و اجزای آن‌ها می‌تواند با استفاده از مدل رفتاری برای آرماتور و بتن، به علاوه مدل رفتاری پیوند بین بتن و آرماتور انجام شود ولی استفاده از این مدل رفتاری منجر به افزایش درجات آزادی و هزینه‌ی محاسباتی بالا می‌شود. لذا استفاده از روش‌های ترک پخشی و خسارت خمیری در سالیان اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است [5]. در

این روش‌ها همان تماسی به صورت صریح مدل نمی‌شود و چسبندگی با استفاده از مدل‌های رفتاری متوسط برای بتن و آرماتور، به صورت غیرمستقیم وارد محاسبات می‌شود. در روش خسارت خمیری، بتن ترک‌خورده به‌عنوان یک ماده همگن و پیوسته در نظر گرفته می‌شود و به جای مدل‌سازی ترک‌ها، آسیب‌دیدگی نمونه بتنی توسط کاهش سختی آن در نظر گرفته می‌شود [5]. جهت شبیه‌سازی مصالح فولادی اعم از ورق‌ها و نبشی‌ها از فولاد St37 استفاده شده است. رفتار آرماتورها به صورت پلاستیک، با سخت‌شدگی مجدد در مرحله پلاستیک‌شدگی در نظر گرفته شده است [6].

• معرفی بار انفجار

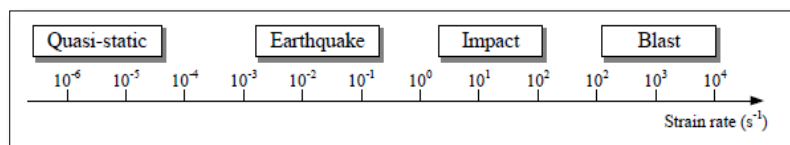
فشار انفجار، فشاریست که به علت انفجار به فشار محیط اضافه می‌شود. هنگامی که اضافه‌فشار ناشی از انفجار در حال کاهش به سمت صفر است درست در لحظه‌ای که وارد فاز منفی می‌شود فشار به یک‌باره کمی افزایش می‌یابد، دلیل آن نیز این است که است که موج قوی از سمت انفجار می‌رسد که فشار را افزایش می‌دهد. با برگشت موج ضعیف شده به سمت انفجار از فشار کاسته شده و دوباره به سمت صفر پیش می‌رود، دوباره با رسیدن موج از سمت انفجار به‌طور ناگهانی فشار کمی افزایش می‌یابد ولی این بار کمتر از مرحله قبل. به نمودار تغییرات فشار در پروسه‌ای که ذکر شد نمودار فشار دینامیکی گویند. شکل ۱ تغییرات اضافه‌فشار و فشار دینامیکی در زمان را نشان می‌دهد [7].



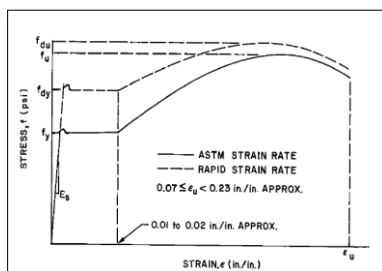
شکل ۱- نمودار تغییرات فشار دینامیکی انفجار [7]

• رفتار مصالح در نرخ کرنش بالا

مقاومت مصالح هنگامی که تحت بارهای دینامیکی قرار می‌گیرند بیشتر از حالتی است که تحت اثر بار استاتیکی قرار می‌گیرند. مقدار افزایش مقاومت مصالح در بارگذاری‌های دینامیکی به نرخ کرنش بارگذاری بستگی دارد. بنابراین چنانچه بارگذاری دینامیکی باشد، بایستی اثر نرخ کرنش بارگذاری را در مقاومت مصالح در نظر گرفت [8]. شکل ۲ محدوده‌ی نرخ کرنش در بارگذاری‌های مختلف و شکل ۳ اثر نرخ کرنش در نمودار تنش کرنش فولاد را نشان می‌دهند.



شکل ۲- محدوده‌ی نرخ کرنش در بارگذاری‌های مختلف [8]



شکل ۳- نمودار تنش کرنش فولاد برای دو حالت مختلف بارگذاری [8]

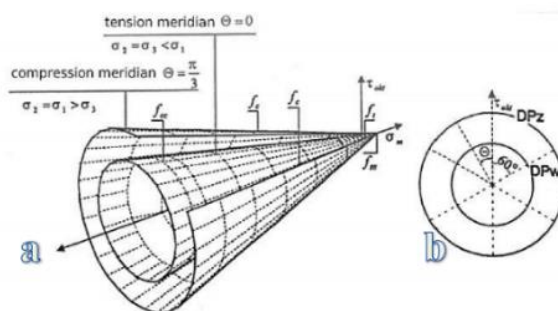
۴. مدل سازی پایه بتنی پل در نرم افزار

برای مدل سازی اجزای بتنی و آرماتورها در نرم افزار به ترتیب از حالت های solid و wire استفاده شده و جهت مدفون سازی آرماتورها در بتن از مدل Embedded region استفاده شده است. برای تعریف رفتار غیرخطی فشاری و کششی بتن از Concrete Damage Plasticity بهره گرفته شده است. جهت مش بندی مقاطع بتنی از المان های هشت گره ای C3D8 و از المان Truss برای مش بندی آرماتورها با اندازه مناسب استفاده شده است.

در این قسمت تمامی موارد مورد نیاز در نرم افزار ABAQUS اعم از پارامترهای مورد نیاز شبیه سازی و نوع المان های انتخابی برای مدل سازی پایه های بتنی توضیح داده شده است.

- سطح تسلیم مدل خسارت پلاستیک بتن

مدل خسارت پلاستیک بتن تعمیم یافته معیار شکست دراگر-پراگر (۱۹۵۲) می باشد. این معیار یک سطح شکست مخروطی مطابق شکل ۴ دارد و یکی از تئوری های قوی در مدل سازی شکست بتن آرمه می باشد [8].



شکل ۴: معیار شکست بتن دراگر-پراگر (۱۹۵۲) [8].

- پتانسیل خروج از مرکزیت پلاستیک

عدد کوچک مثبتی است که برابر نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری بتن می باشد. مقدار پیش فرض آن برابر ۰.۱ است. وقتی که این عدد برابر صفر باشد در واقع شکل مریدین تبدیل به یک خط راست می شود (معیار دراگر-پراگر کلاسیک) [8].

- تعیین پارامتر f_{b0}/f_c

نسبت مقاومت فشاری دوماحوره بتن به مقاومت فشاری تک محوره می باشد. نتایج حاصل از آزمایش ها نشان می دهد که ارتباط بین مقاومت فشاری تک محوره و دوماحوره بتن مطابق رابطه زیر است [8].

$$f_{b0} = 1.16248f_c \quad (1)$$

• تعیین پارامتر زاویه اتساع (Ψ)

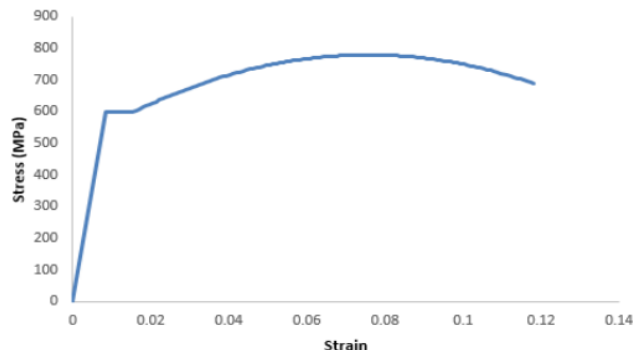
زاویه اتساع (Ψ) شیب صفحه گسیختگی به طرف صفحه هیدرو استاتیک در صفحه مریدین می باشد. از لحاظ فیزیکی Ψ زاویه اصطکاک داخلی بتن می باشد؛ که در اغلب موارد مقدار آن ۳۶ تا ۴۰ فرض می شود [8].

• پارامتر ویسکوالاستیک (μ)

پارامتر ویسکوالاستیک (μ) که در مدل خسارت پلاستیک وجود دارد در واقع برای همگرایی بهتر گامها در Abaqus Standard استفاده می شود و مقدار آن بایستی با چند بار تحلیل به دست آورد. μ کوچک ترین عدد مثبتی است که باعث همگرایی بهتر تحلیل می شود. این پارامتر امکان خروج تدریجی از سطح پتانسیل را در شرایط ناهمگرایی جزئی تحلیل فراهم می سازد [8].

رفتار مصالح فولاد

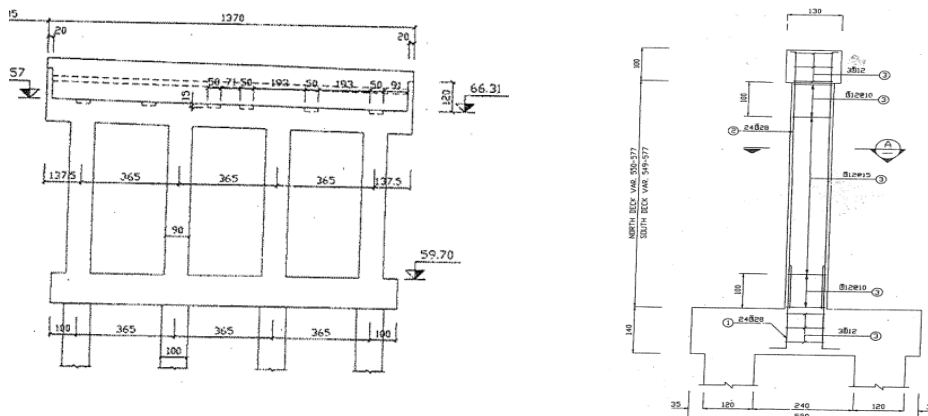
جهت شبیه سازی مصالح فولادی اعم از ورقها و نبشیها از فولاد St37 استفاده شده است. رفتار آرماتورها به صورت الاستوپلاستیک و با سخت شدگی مجدد در نظر گرفته شده است. نمونه ای از این رفتار که مربوط به آرماتور با قطر ۱۶ میلی متر و مقاومت تسلیم ۶۰۰ مگا پاسکال می باشد، در ادامه نشان داده شده است.



شکل ۵: نمودار تنش کرنش فولاد مورد استفاده در شبیه سازی آرماتورها.

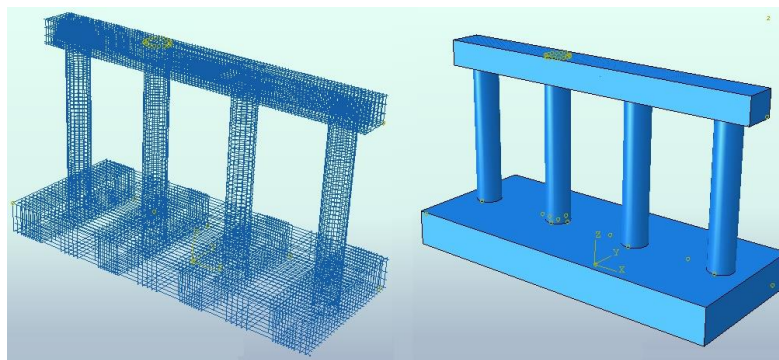
در مدل سازی مصالح فولادی برای در نظر گرفتن سخت شدگی فولاد و همچنین دقت در تعیین مشخصات مصالح فولادی از نرم افزار KSU_RC [8] که توسط دانشگاه Kansas State گسترش داده شده، استفاده شده است. قابل ذکر است که برای شبیه سازی میلگردهای مختلف از فولادهایی با مشخصات مختلف استفاده شده است.

در این مطالعه پایه های یک پل بتنی با تابلیه گسترده به عنوان نمونه موردی شبیه سازی شده و مورد تحلیل نرم افزاری قرار گرفته است. پل مذکور یک پل بتنی ساده با سیستم شاه تیر و دال بوده و دارای ۴ دهانه با اندازه های حدود ۲۴ و ۱۴ متر می باشد. بتن مورد استفاده در ساخت این پل دارای مقاومت فشاری نمونه استوانه ای ۲۸ روزه معادل ۲۸۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع می باشد. حداقل مقاومت جاری شدن میلگردهای با قطر ۱۴ و بالاتر برابر ۴۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع بوده و حداقل مقاومت جاری شدن میلگردهای با قطر ۱۲ و کمتر برابر ۳۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع است. جزئیات اندازه گذاری و آرماتوربندی پایه های پل مورد مطالعه در شکل ۶ آمده است.

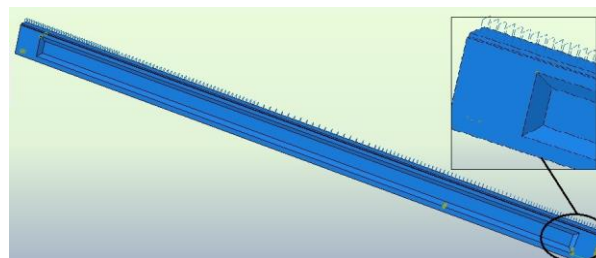


شکل ۶- جزئیات اندازه‌گذاری و آرماتوربندی پل مورد مطالعه

مدل شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار Abaqus [9] در شکل ۷ و ۸ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که تمامی نکات مربوط به شبیه‌سازی نرم‌افزاری اعم از مشخصات مصالح، نوع المان‌های انتخابی و روش‌های تحلیلی دقیقاً شبیه به موارد مطرح شده در عملیات صحت‌سنجی می‌باشد. بعد از اعمال بار انفجار بر پایه‌های پل و مشاهده ضعف عملکرد این پایه‌ها در مقابل بارگذاری مذکور، رویکرد مقاوم‌سازی با ژاکت بتنی مطرح شد که در بخش بعدی مشخصات، مزایا و معایب آن ذکر شده است.



شکل ۷- سیستم پایه چند ستونی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار



شکل ۸- تیرهای بتن مسلح شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار

۵. مقاومت‌سازی با ژاکت بتنی

در این روش اعضاء با افزایش مقطع تیر و ستون از پوشش بتن مسلح تقویت می‌گردند. شکل ۹ نمونه‌ای از اجرای این روش را به همراه جزئیات معمول اجرایی آن نشان می‌دهد.

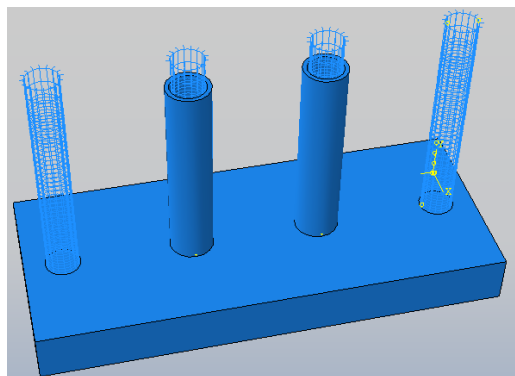


شکل ۹- ستون بتنی مقاومت‌سازی شده با ژاکت بتنی

کاربرد این روش در موارد زیر است:

- ✓ محصور کردن بتن
- ✓ افزایش مقاومت برشی
- ✓ افزایش مقاومت خمشی
- ✓ افزایش سختی جانبی

به‌منظور بررسی عملکرد مقاومت‌سازی با ژاکت بتنی؛ پایه‌های پل بتنی مورد مطالعه در این پژوهش به‌وسیله ژاکت بتنی مقاومت‌سازی شده و نتیجه آن با نتایج حاصل از حالت بدون مقاومت‌سازی مقایسه شده است. شکل ۱۰ پایه‌های مقاومت‌سازی شده با ژاکت بتن مسلح را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰- پایه‌های مقاومت‌سازی شده با ژاکت بتن مسلح

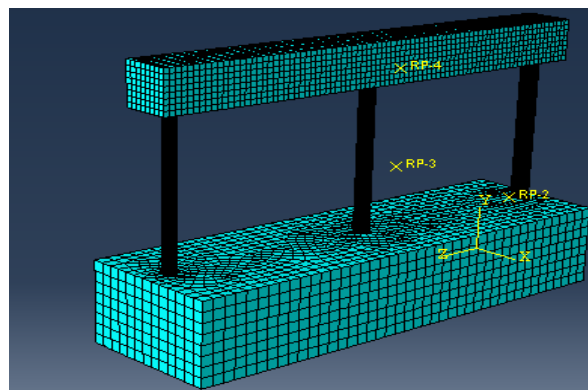
۶. صحت‌سنجی نتایج تحلیل سازه بتن مسلح تحت اثر بار انفجار

در این قسمت یکی از حالات آزمایش به‌منظور صحت‌سنجی نتایج نرم‌افزاری آورده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، این نمونه در مقیاس $1/4$ ساخته شده و تحت بارگذاری انفجاری مطابق با آیین‌نامه قرار گرفته است.



شکل ۱۱- بررسی آزمایشگاهی اثر بار انفجار بر پایه پلها [8].

تصویر مدل شبیه‌سازی شده پایه‌های پل در شکل ۱۲ نشان داده شده است. تمامی مشخصات این مدل اعم از مشخصات مصالح، شرایط مرزی و بارگذاری خارجی منطبق بر شرایط نمونه واقعی می‌باشد.

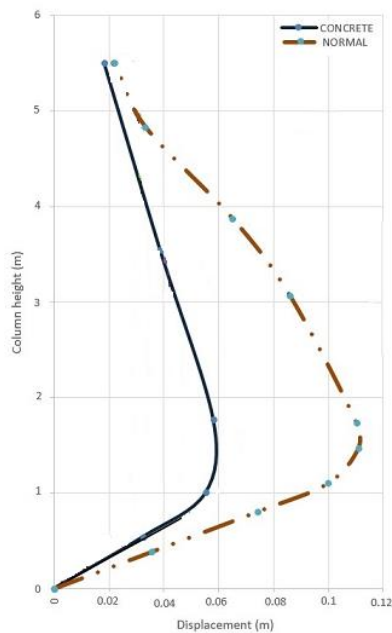


شکل ۱۲- سیستم پایه پل شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار

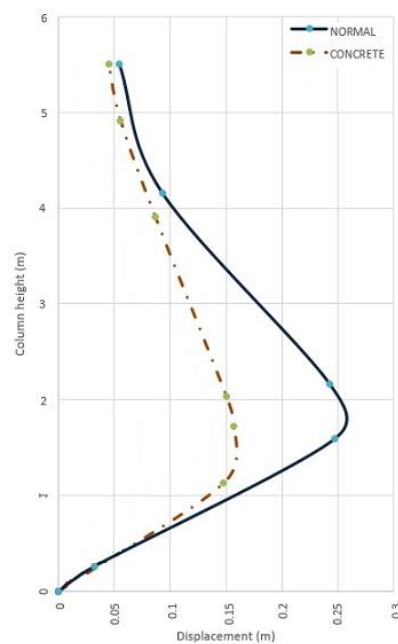
در آزمون آزمایشگاهی، بار حاصل از انفجار TNT در فاصله‌ای مشخص (برحسب X) از ستون‌های میانی باعث ایجاد تغییر مکانی به اندازه ۲۵ میلی‌متر شده است. مشاهده می‌شود که جابجایی ایجاد شده در تحلیل نرم‌افزاری همین نمونه تقریباً برابر با مقدار حاصل از آزمون آزمایشگاهی است.

۷. نتایج تحلیل پایه‌های بدون مقاوم‌سازی شده با حالت مقاوم‌سازی شده

نمودار تغییر مکان جانبی - ارتفاع ستون برای نمونه‌های با و بدون مقاوم‌سازی تحت اثر بارگذاری حاصل از انفجار ۷۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT در اشکال ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است.



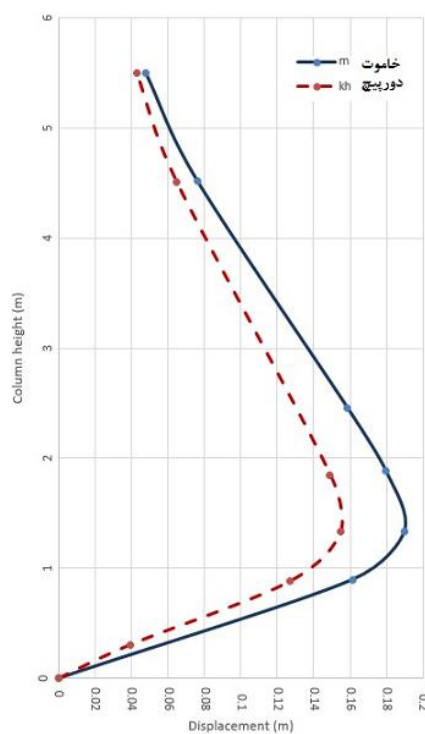
شکل ۱۴- نتایج اعمال انفجار ۷۰۰ کیلوگرم TNT



شکل ۱۳- نتایج اعمال انفجار ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT

۸. بررسی اثر انواع محصورشدگی بر مقاومت در مقابل با انفجار

نتایج تحلیل نرم‌افزاری پایه‌های بتنی تحت اثر بار انفجار به صورت نمودار تغییرمکان - ارتفاع ستون در شکل ۱۵ آمده است. این نتایج شامل دو منحنی مربوط به مقاوم‌سازی بتن مسلح با خاموت‌های عرضی معمولی و آرمانتورهای دورپیچ با گام ۸ سانتی‌متر است.



شکل ۱۵- مقایسه آرمانتورگذاری دورپیچ و عرضی معمولی

۹. نتیجه گیری

- ❖ تحت اثر انفجار معادل ۷۰۰ کیلوگرم TNT مقاوم‌سازی بتنی جابجایی حداکثر ستون را به مقدار ۴۵ درصد کاهش می‌دهد.
- ❖ تحت اثر انفجار معادل ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT مقاوم‌سازی بتنی جابجایی حداکثر ستون را به مقدار ۳۲ کاهش می‌دهد.
- ❖ اثر نوع آرماتور گذاری عرضی در ژاکت بتنی تقویت‌کننده نشان داد که استفاده از آرماتورهای دور پیچ به جای خاموت‌های عرضی باعث کاهش جابجایی حداکثر ستون به مقدار ۱۸ درصد خواهد شد.
- ❖ خرابی ناشی از اثر بار انفجاری به صورت موضعی است، ولی شدت آن آنقدر زیاد است که اگر خرابی در نقاط حساس باشد می‌تواند منجر به خرابی کامل شود.
- ❖ خرابی بتن با پیشروی موج کششی انفجار بیشتر می‌شود؛ بنابراین بتن به علت کمبود مقاومت کششی خرد شده است.

۱۰. منابع

- [1] Yi, Z., Agrawal, A., Ettouney, M., and Alampalli, S; “Blast Load Effects on Highway Bridges. II: Failure Modes and Multihazard Correlations”, J. Bridge Eng, Volume 19, April 2014.
- [2] Yi, Z., Agrawal, A., Ettouney, M., and Alampalli, S; “Blast Load Effects on Highway Bridges. II: Modeling and Blast Load Effects”, J. Bridge Eng, Volume 19, April 2014.
- [3] Williamson, E., Bayrak, O., Davis, C., and Daniel Williams, G; “Performance of Bridge Columns Subjected to Blast Loads. I: Experimental program.”, J. Bridge Eng, Volume 16, 693-702, Number ۲۰۱۱.
- [4] Williamson, E. B. et al; “Blast-resistant Highway Bridges: Design and Detailing Guidelines.”, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Report 645, 2010.
- [5] Chang, G. A., & J. B. Mander, “Seismic Energy Based Fatigue Damage Analysis of Bridge Columns: Part I- Evaluation of Seismic Capacity” State University of New York, New York. NCEER Technical Report, 1994.
- [6] A. Esmaeily, Writer, KUS_RC. Kansas State University.
- [7] Hopkingson B, British Ordnance board minutes 13565, 1915.
- [8] UFC-3-340-02. “Structures to resist the effect of accidental explosions” US Department of the Army, Navy and Air Force Technical Manual; 2008.
- [9] ABAQUS 6.13 Analysis User,s Manual Volume III.