

توسعه یک الگوی بارگذاری مناسب برای تحلیل استاتیکی غیرخطی پل‌های مختلط تحت اثر بار انفجار

علیرضا حبیبی^{۱*}، ارشاد صحابی^۲

۱- دانشیار، ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه کردستان

(دریافت: ۹۳/۰۶/۱۷، پذیرش: ۹۴/۰۷/۱۹)

چکیده

پل‌ها سازه‌های مهمی در سامانه حمل و نقل هستند که ممکن است یکی از اهداف حملات تروریستی باشند. با توجه به پیچیدگی تحلیل پل‌ها در برابر انفجار، هدف از این تحقیق، تعیین یک الگوی بارگذاری استاتیکی معادل مناسب برای تحلیل غیرخطی پل‌های با عرشه مختلط فولادی تحت بار انفجار می‌باشد. به این منظور ابتدا روش شبیه‌سازی انفجار و مدل‌سازی پل‌های با عرشه مختلط مورد بررسی قرار گرفته و دقت روش مدل‌سازی ارائه شده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. سپس نمونه‌های متعددی از پل‌های با عرشه مختلط تحت بار انفجار با شدت‌های مختلف مدل‌سازی شده و تحلیل دینامیکی غیرخطی بر روی آن‌ها انجام می‌شود. با پیشنهاد یک الگوی بارگذاری مناسب و پس از انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی بر روی تمامی نمونه‌ها با روش کنترل تغییر مکان، ضریب بار معادل استاتیکی برای اصلاح الگوی مورد نظر در هر نمونه محاسبه می‌گردد. بر اساس نتایج تحلیل غیرخطی نمونه‌ها، یک رابطه برای ضریب بار معادل استاتیکی استخراج شده و مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

کلید واژه‌ها: پل، انفجار، الگوی بارگذاری، تحلیل استاتیکی غیرخطی، ضریب بار معادل.

Development of a Proper Load Pattern for Nonlinear Static Analysis of Composite Girder Bridges under Blast

A. R. Habibi*, E. Sahabi

University of Kurdistan

(Received: 08/09/2014; Accepted: 11/10/2015)

Abstract

Bridges are important structures in a transportation system which may be one of the targets of terrorist attacks. Given the complexity of bridges against the blast, the purpose of this research is determining a suitable equivalent static load pattern for nonlinear analysis of composite steel deck bridges under the load of the blast. For this purpose, at first, the simulation of blast and modeling of bridges with composite decks have been performed and the accuracy of the proposed modeling method is evaluated. Then several samples of bridges with the composite deck under the load of the blast have been modeled with different intensities and nonlinear dynamic analysis is carried out on them. By proposing a suitable load pattern and after the nonlinear static analysis on all samples using displacement control, the equivalent static load factor to correct the desired pattern in each sample is calculated. Based on the results of the nonlinear analysis of the samples, a correlation for the equivalent static load factor is extracted and evaluated.

Keywords: Bridge, Blast, Load Pattern, Nonlinear Static Analysis, Load Factor.

*Corresponding Author E-mail: ar.habibi@uok.ac.ir

۱. مقدمه

پل‌ها سازه‌های مهم در سامانه حمل و نقل هستند و از نظر اقتصادی، سیاسی و اجتماعی دارای اهمیت می‌باشند. علاوه بر مسائل اقتصادی - سیاسی - اجتماعی، پل‌ها نقش استراتژیک و تعیین کننده در مسائل نظامی دارند. از این لحاظ است که در تاریخ جنگ‌ها یکی از اهداف مهم بمباران‌های هوایی و عملیات تأخیری، پل‌های استراتژیک می‌باشد. هر پل در طول عمر خود احتمال دارد تحت بار انفجار قرار گیرد. آمار نشان داده است که فقط در بین سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۰، ۵۳ حمله تروریستی روی پل‌ها صورت گرفته است. در دنیای امروز با گسترش حملات تروریستی در سرتاسر جهان، طراحی مقاوم پل‌ها در مقابل انفجار بسیار ضروری به نظر می‌رسد.

تحقیقات بسیار کمی در مورد اثر بار انفجار روی پل‌ها انجام شده و با وجود اینکه روش‌ها و شاخص‌های مختلف در مورد بار زلزله، بار باد و برخورد کشتی در طراحی پل‌ها وجود دارد، اما هنوز شاخص اندازه‌گیری مشخصی در مورد بار انفجار ارائه نشده است.

هدف از این تحقیق به دست آوردن یک الگوی بارگذاری استاتیکی معادل مناسب برای پل‌های با عرشه مختلط، تحت اثر انفجار می‌باشد. این تحقیق سعی دارد، با معادل‌سازی اثرات دینامیکی انفجار با بار استاتیکی، یک روش ساده برای تحلیل و طراحی پل‌های با عرشه مختلط تحت اثر انفجار ارائه دهد. در این راستا پس از بیان پیشینه تحقیق در بخش دوم و همچنین ارائه توضیحات در مورد ماهیت بار انفجار در بخش سوم، به توضیح روش پیشنهادی در بخش چهارم پرداخته شده است. در این بخش مراحل به دست آمدن روش پیشنهادی توضیح داده شده و دقت روش ارائه شده مورد ارزیابی قرار گرفته است. در نهایت، در بخش پنجم نتیجه‌گیری بیان شده است.

۲. پیشینه تحقیق

تحقیقات در مورد بار انفجار سابقه‌ای در حدود چندین قرن دارد، به طوری که تحلیل‌های ابتدایی که به روش‌های تقریبی انجام می‌شد به قرن‌های ۱۳ و ۱۴ میلادی باز می‌گردد. با این وجود سابقه تحقیقات در مورد انفجار بر روی پل‌ها محدود بوده و به چند سال اخیر مربوط می‌شود. انور الاسلام و نور یزدانی [۱] به ارزیابی عملکرد پل‌های ساخته شده با تیرهای پیش‌تنیده تیپ ۳ که بر اساس آیین‌نامه اشتو و در برابر زلزله طراحی شده بودند، در برابر انفجار پرداختند. این تحقیق نشان داد که پل‌هایی که در برابر زلزله طراحی شده اند، تحت بار انفجار مقاوم نبوده و اغلب از حالت سرویس خارج می‌شوند. لوچیونی و همکاران [۲] به مطالعه رفتار روسازی‌های بتنی در مقابل بار انفجار پرداختند. آن‌ها یک نمونه روسازی بتنی را تحت بار انفجار قرار دادند. آن‌ها در نتیجه کار خود رابطه‌ای بین قطر حفره ایجاد شده در روسازی با فاصله و شدت انفجار ارائه دادند.

جان وی و همکاران [۳] مدل شکستی را برای اجزای پل تحت بار انفجار مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در تحقیقشان به بررسی مدل شکست بتن پرداختند. نتیجه این بود که مدل دینامیکی خسارت مورد نظر طبق سازوکار شکست بتن و مدل بار انفجار قابل قبول بود.

فوجیکارا و برونو [۴] به بررسی عملکرد پایه پل‌های طراحی شده در برابر بار انفجار پرداختند. آن‌ها دو نوع ستون را مورد بررسی قرار دادند: ستون‌های بتن مسلح با شکل‌پذیری بالا و ستون‌های غیر شکل‌پذیر با پوشش فولادی. آن‌ها مشاهده کردند که هیچ یک از ستون‌ها رفتار شکل‌پذیری در برابر انفجار از خود نشان ندادند و دچار گسیختگی برشی در پای ستون شدند. عبدالاحد و آروکیاسامی [۵] پل‌های با سامانه عرشه دال بتنی و تیر T شکل را در برابر بار انفجار ضعیف و متوسط مورد بررسی قرار دادند. از نتایج مهم تحقیق آن‌ها این بود که استفاده از بتن با مقاومت بالا تأثیر چندانی در افزایش مقاومت پل در انفجار نداشت. دنگ و جین [۶] آسیب وارد بر پل‌های تحت بار انفجار را بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که خرابی‌های ایجاد شده به علت بار انفجار، موضعی و در نزدیک منبع انفجار هستند. ژو و آروکیاسامی [۷] نحوه ارزیابی اثرات انفجار روی پل‌های با عرشه مختلط را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها یک نمونه پل را در معرض چند سناریوی محتمل انفجار تحلیل کردند. آن‌ها موفق شدند روشی برای مدل‌سازی انفجار در یک پل با عرشه مختلط ارائه کنند.

تنگ و هائو [۸] به شبیه‌سازی المان محدود یک پل کابلی در برابر انفجار پرداختند. آن‌ها دریافتند که روسازی بتنی در نقاط نزدیک انفجار به طور کامل تخریب شد اما شاه‌تیرهای فولادی آسیب کمی دیدند. سان و لی [۹] به بررسی عملکرد دکل پل کابلی در برابر انفجار پرداختند. آن‌ها موفق به ارائه الگوهای خرابی شدند. در این تحقیق نشان داده شده است که دکل‌های کامپوزیت (بتن و فولاد) عملکرد بهتری نسبت به دکل‌های جعبه‌ای فولادی توخالی دارند. تای و همکاران [۱۰] به شبیه‌سازی المان محدود دال‌های بتنی در برابر انفجار پرداختند. آن‌ها شاخص‌هایی برای بیان خرابی دال‌های بتن مسلح در برابر انفجار ارائه کردند.

شوشتری و صالحی آباد [۱۱] به بررسی و مقایسه روش‌های تعیین پارامترهای انفجار سطحی پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که روابط مبحث ۲۱ مقررات ملی ساختمان [۱۲]، در مقایسه با نتایج آزمایش از دقت مناسبی برخوردار است. همچنین نشان داده شد که نتایج حاصل از برنامه ConWep به عنوان یکی از ابزارهای شناخته شده در محاسبه پارامترهای انفجار هماهنگی مناسبی با نتایج آزمایش دارد. خالدی [۱۳] یک روش معادل استاتیکی برای تحلیل پل‌های با عرشه مختلط در برابر انفجار بر اساس الگوی بارگذاری یکنواخت ارائه کردند. در آن تحقیق برای به دست آوردن بار استاتیکی معادل، از الگوی بارگذاری یکنواخت استفاده شد. نتایج نشان داد که الگوی بارگذاری استاتیکی در نظر گرفته شده منتهی به

نتایج محافظه کارانه‌ای در طراحی می‌شود.

۳-۱. روابط براد^۱

مقدار فشار مبنای انفجار در حوزه نزدیک (وقتی P_{So} بزرگ‌تر از ۱۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع است) و در حوزه‌های میانی و یا دور (برای P_{So} بین ۰/۱ و ۱۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع است) طبق روابط زیر محاسبه می‌شود [۱۵]:

$$P_{So} = \frac{6.7}{Z^3} + 1 \quad (P_{So} > 10 \text{ kg/cm}^2) \quad (1 - \text{الف})$$

$$P_{So} = \frac{0.975}{Z} + \frac{1.455}{Z^2} + \frac{5.85}{Z^3} - 0.019$$

$$(0.1 < P_{So} < 10 \text{ kg/cm}^2) \quad (1 - \text{ب})$$

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \quad (2)$$

۳-۲. روابط هنریش^۲

برای محاسبه فشار انفجار، روابط دیگری به شرح زیر ارائه شده است [۱۵]:

$$P_{So} = \frac{14.072}{Z} + \frac{5.54}{Z^2} + \frac{0.357}{Z^3} + \frac{0.00625}{Z^4} \quad (0.0 \leq Z < 0.3) \quad (3 - \text{الف})$$

$$P_{So} = \frac{6.194}{Z} + \frac{0.326}{Z^2} + \frac{2.132}{Z^3} \quad (0.3 \leq Z < 1) \quad (3 - \text{ب})$$

$$P_{So} = \frac{0.662}{Z} + \frac{4.05}{Z^2} + \frac{3.288}{Z^3} \quad (1 \leq Z < 10) \quad (3 - \text{پ})$$

۴. روش پیشنهادی

در این بخش، موضوع اصلی تحقیق که ارائه الگوی بارگذاری مناسب برای معادل سازی استاتیکی بار انفجار وارد بر پل‌های با عرشه مختلط می‌باشد، بررسی شده است. در این بخش بعد از محاسبه فشار پیک انفجار با استفاده از روابط براد و هنریش و سپس تعیین مؤلفه قائم آن در هر نقطه از سطح پل، منحنی درجه سه‌ای با دقت مناسب از نمودار فشار قائم بر حسب فاصله شعاعی از مرکز وقوع انفجار، برآزش شده و به عنوان الگوی بارگذاری انتخاب شده است. سپس مدل اجزا محدود نمونه‌هایی از پل مختلط، توسط نرم‌افزار آباکوس ایجاد شده و مورد تحلیل دینامیکی غیرخطی قرار گرفته است. به منظور ارزیابی دقت الگوی بارگذاری انتخاب شده نیز تحلیل استاتیکی غیرخطی با روش کنترل جابه‌جایی انجام شده و در نهایت ضرایبی جهت اصلاح الگوی بارگذاری استاتیکی ارائه شده است.

۴-۱. الگوی بارگذاری انفجار

ژو و آروکیاسامی [۷] به بررسی مدل سازی پل با عرشه مختلط تحت بار انفجار پرداختند. آن‌ها فشار انفجار را در فواصل شعاعی از محل وقوع انفجار را با استفاده از نرم‌افزار AT-Blast محاسبه کردند. این نرم‌افزار، شامل فلوجارتی است که نشریه TM5-1300 [۱۶]، برای

از آنجا که تحلیل پل تحت اثر زلزله به صورت بار استاتیکی معادل انجام می‌شود. در عمده تحقیقات مربوط به انفجار نیز، تحلیل پل‌ها به صورت استاتیکی و فقط با در نظر گرفتن پیک نمودار تاریخچه زمانی بار انفجار، انجام شده است [۱۳ و ۱۴]، اما باید توجه داشت که استفاده از تحلیل استاتیکی به عنوان جایگزین تحلیل دینامیکی بدون در نظر گرفتن مدل سازی با فرضیات صحیح، منجر به نتایج غیر واقعی خواهد شد. از طرف دیگر شبیه‌سازی انفجار بر نمونه‌های پل مستلزم صرف هزینه و زمان بسیار زیاد می‌باشد و در عمده تحقیقات قبلی، مدل‌ها با نتایج واقعی صحت سنجی نشده‌اند [۱۴ و ۱۵]. استفاده از فرضیات ساده کننده بدون صحت سنجی نتایج، اطمینان به مدل‌ها را دچار تردید کرده است.

از آنجا که انفجار در یک زمان کوتاه و به صورت دینامیکی رخ می‌دهد، پیچیدگی تحلیل پاسخ دینامیکی پل در بارهای انفجاری تحت اثر کرنش‌های بسیار زیاد و رفتار غیرخطی مصالح غیرالاستیک تحت بارهای نامعین انفجاری، محاسبات را بسیار پیچیده کرده و تغییر شکل‌ها را وابسته به زمان می‌کند. یکی از مشکلاتی که مهندسين سازه در لحاظ نمودن اثر بار انفجار در طراحی‌ها با آن مواجه می‌شوند، همین دشواری و پیچیدگی تحلیل دینامیکی می‌باشد. بنابراین دستیابی به یک روش تحلیل ساده‌تر که از دقت خوبی نیز برخوردار باشد، می‌تواند بسیار حائز اهمیت باشد.

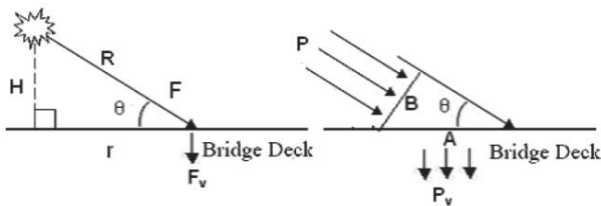
۳. پیش‌بینی فشار موج انفجار

در شرایط وقوع انفجار در هوا، اضافه فشار ایجاد شده را فشار مبنای انفجار نامیده و با P_{So} نشان می‌دهند. رابطه دقیق جهت تعیین فشار مبنای انفجار بسیار پیچیده است. برای تعیین فشار مبنای انفجار ناشی از حرکت موج انفجار، روابط مختلفی توسط محققین ارائه شده است که در این میان روابط براد و هنریش از اهمیت بیشتری برخوردارند. در این تحقیق از روش براد و هنریش برای محاسبه فشار مبنای انفجار استفاده شده است که در این بخش به این دو روش پرداخته شده است. وزن معادل مواد منفجره با معادل سازی برحسب وزن TNT معادل بیان می‌شود. استفاده از ماده منفجره نوع TNT به عنوان مرجع انفجار در محاسبات انفجاری، کاربرد عمومی و جهانی داشته و به عنوان ماده مینا در نظر گرفته می‌شود. در تعیین کمیت موج انفجار از منابعی به غیر از TNT، تبدیل جرم واقعی خرج به معادل TNT انجام می‌شود. برای نسبت فاصله نیز از فرمول $Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}}$ استفاده می‌شود که در Z فاصله همپایه شده، R فاصله مؤثر واقعی از انفجار و W وزن معادل TNT خرج انفجار است.

¹ Brode

² Henrych

(F) را برحسب فشار انفجار (P) نشان داده و همچنین روابط (۶) و (۷)، می‌توان فشار قائم انفجار (P_V) را با استفاده از رابطه (۸)، در هر نقطه محاسبه کرد.



شکل ۲. مؤلفه قائم فشار پیک انفجار

$$A = B / \sin \theta \quad (۴)$$

$$F = B \times P \quad (۵)$$

$$F_V = F \times \sin \theta = B \times P \times \sin \theta \quad (۶)$$

$$F_V = P_V \times A = P \times B \times \sin \theta \quad (۷)$$

$$P_V = P \times \sin^2 \theta \quad (۸)$$

تعیین الگوی بار انفجار بر اساس فشار مبنای انفجار: در تحقیق حاضر، بر اساس قدرت انفجارهای احتمالی سه مقدار ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ پوند TNT، در نظر گرفته شده است، که بر حسب کیلوگرم به ترتیب معادل ۱۱۳/۵، ۲۲۷ و ۴۵۴ کیلوگرم TNT می‌باشد. فشار پیک قائم برای هر یک از سه مقدار خرج انفجار، در فاصله‌های صفر تا ۳۰ متری از مرکز وقوع انفجار، بر حسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع محاسبه شده است. فشار پیک قائم انفجار در فواصل شعاعی بیشتر از ۶ متر نسبت به فواصل نزدیک‌تر به مرکز وقوع انفجار، ناچیز و قابل چشم‌پوشی است. به همین دلیل در این مقاله برای به‌دست آوردن الگوی بار استاتیکی از اثر فشار انفجار در فواصل بیشتر از ۶ متر، صرف نظر شده است. نمودار فشار پیک قائم انفجار برحسب فاصله‌های شعاعی (از صفر تا ۶ متر)، برای سه مقدار ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ پوند TNT، به ترتیب در شکل‌های (۵-۳) ارائه شده است. با استفاده از نرم‌افزار اکسل، برای هر سه نمودار، نشان داده شده در شکل‌های (۵-۳)، چند جمله‌ای درجه سه برازش شده است. توابع منحنی‌های برازش شده برای سه مقدار ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ پوند TNT، به ترتیب در روابط (۹، ۱۰ و ۱۱) آمده است. از توابع به‌دست آمده به عنوان الگوی بار انفجار در تحلیل استاتیکی غیرخطی نمونه‌های پل در این تحقیق استفاده شده است.

$$P_V = -0.872r^3 + 12.72r^2 - 60.89r + 96.35 \quad (۹)$$

$$P_V = -1.648r^3 + 23.94r^2 - 114r + 179 \quad (۱۰)$$

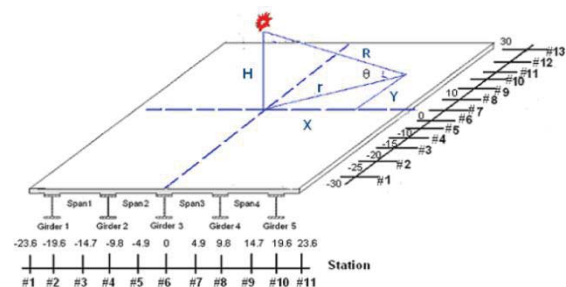
$$P_V = -3.19r^3 + 45.91r^2 - 216.5r + 336.5 \quad (۱۱)$$

تعیین پارامترهای انفجار، ارائه کرده است. ژو و آروکیاسامی در تحقیق خود بعد از محاسبه فشار پیک انفجار در هر فاصله، مؤلفه‌های قائم آن را به عنوان فشارهای مؤثر در هر فاصله از منبع انفجار بدون در نظر گرفتن اثر زمان، برای خرج انفجار ۵۰۰ پوند TNT، ارائه دادند.

در این تحقیق نیز روش محاسبه فشار قائم انفجار در هر فاصله از منبع انفجار مشابه با روش ژو و آروکیاسامی می‌باشد، با این تفاوت که در این تحقیق، فشار انفجار با استفاده از روابط براد و هنریش که در بخش دوم توضیح داده شد، به‌دست آمده است. مطالعات تجربی و آزمایشگاهی نشان می‌دهند که روابط براد انطباق خوبی با نتایج تجربی برای فواصل میانی و دور از چشمه انفجار دارد، در حالی که روابط هنریش برای انفجار حوزه نزدیک انطباق خوبی با نتایج تجربی از خود نشان می‌دهند. از این‌رو برای فواصل نزدیک (کمتر از ۱۵ متر) از رابطه هنریش و در فواصل دور (بیشتر از ۱۵ متر) از نتایج رابطه براد استفاده شده است.

روش محاسبه فشار قائم انفجار وارد بر سطح عرشه پل:

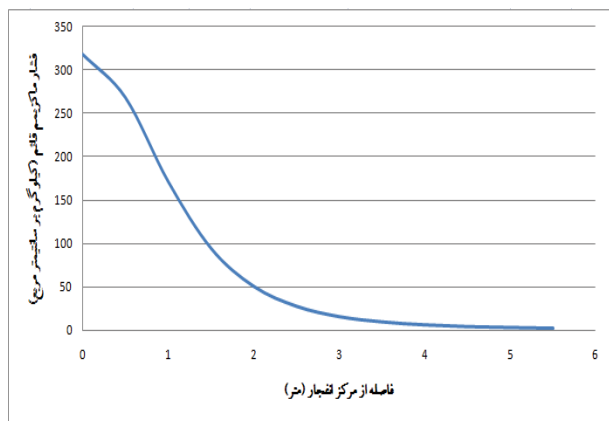
که به عنوان نمونه جهت محاسبه فشار انفجار در نظر گرفته شده، همان نمونه پل با عرشه مختلط می‌باشد که در تحقیقات ژو و آروکیاسامی مورد بررسی قرار گرفته است. عرشه پل مورد نظر شامل ۵ شاه‌تیر فولادی است. تعداد تیر و فاصله بین تیرها تأثیری در نحوه محاسبه فشار انفجار ندارد و نمونه پل مورد نظر تنها در جهت کمک به ارائه روابط استفاده شده است. ابتدا لازم است که ارتفاع مرکز وقوع انفجار از سطح پل مشخص باشد. با توجه به اینکه مواد منفجره ممکن است در یک اتومبیل قرار بگیرد، به طور تقریبی فرض شده که مرکز وقوع انفجار در ارتفاع ۶ فوتی (۱/۸۳ متری) بالای سطح پل قرار دارد. مطابق با شکل (۱)، ارتفاع مرکز وقوع انفجار، با H نمایش داده شده است. در ضمن، فاصله هر نقطه بر روی سطح پل از مرکز وقوع انفجار با R و تصویر فاصله شعاعی هر نقطه بر روی سطح پل، از مرکز وقوع انفجار با r نمایش داده می‌شود. θ نیز زاویه وارد شدن شتاب انفجار در هر نقطه می‌باشد.



شکل ۱. موقعیت انفجار در بالای سطح عرشه [۷]

بر اساس شکل (۲)، فرض شده است که فشار انفجار (P)، به صورت مورب بر سطح $B \times 1$ وارد می‌گردد. سطح افقی A از رابطه (۴)، به‌دست می‌آید. با توجه به رابطه (۵)، که نیروی ناشی از فشار انفجار

نیز طبق نشریه شماره ۳۹۵ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، طراحی شده‌اند [۱۸ و ۱۹]. محل قرارگیری پل‌ها، استان کردستان و شهر سنندج در نظر گرفته شده است. مشخصات مصالح برای تمامی نمونه‌ها مطابق با جدول (۱)، می‌باشد. در این تحقیق مدل آسیب‌دیده خمیری برای بتن به کار گرفته شده است. برای فولاد استفاده شده برای میلگردها از مدل الاستیک-پلاستیک ایده‌آل و برای شاه‌تیرها از مدل دوخطی با در نظر گرفتن سخت‌شدگی بر اساس مقادیر نمودار تنش کرنش واقعی ماده، استفاده شده است.



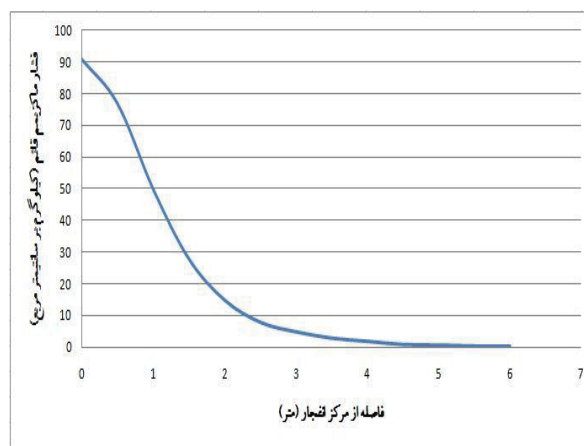
شکل ۵. فشار پیک قائم برای خرج انفجار ۱۰۰۰ پوند TNT

جدول ۱. مشخصات مصالح در نمونه‌ها

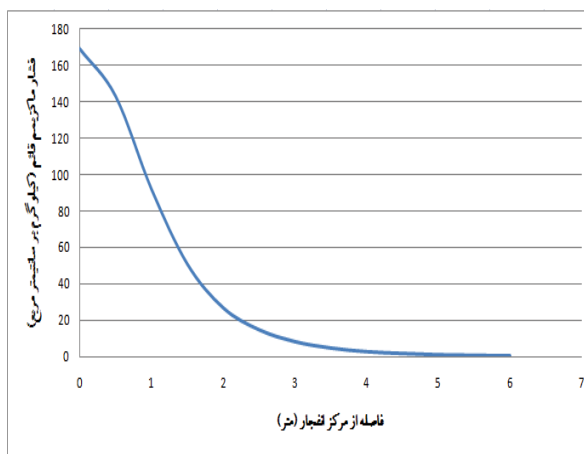
میلگرد	تیر	دال	مشخصات مصالح
۱۹۰	۱۸۰	۲۷/۸	مدول یانگ GPa
۵۰۰	۲۷۰	--	تنش تسلیم MPa
۵۰۰	۴۱۰	--	تنش نهایی MPa
--	--	۴۳	مقاومت فشاری MPa

در این پژوهش دال با استفاده از المان Shell S4R با پنج نقطه انتگرال‌گیری در طول ضخامت مدل شده است. این المان، یک المان پوسته‌ای می‌باشد. یک پوسته عبارت است از ماده‌ای که یکی از ابعاد آن در مقایسه با دو بعد دیگر قابل نظر کردن است و از توزیع تنش در طول آن بعد صرف نظر می‌شود. Shell S4R، یک المان چهار گره‌ای کاهش یافته است. هر گره دارای شش درجه آزادی می‌باشد که برای مدل کردن تغییر شکل‌های بزرگ و غیرخطی مناسب است. برای تعریف میلگردهای دال از قابلیت نرم‌افزار آباکوس برای المان Shell استفاده شده است. با استفاده از این قابلیت لازم است که فقط مختصات لایه آرماتور، سطح مقطع میلگرد، و فاصله آن‌ها به نرم‌افزار معرفی شود.

شاه تیر فولادی با المان سه گره‌ای تیر فضایی تیموشنکو مدل شده است. المان تیر، جهت مدل‌سازی سازه‌های بلند و باریک که دارای استحکام کششی و خمشی می‌باشند، استفاده می‌شوند. در المان تیر، سطح مقطع در مقایسه با طول سازه کوچک فرض می‌شود. اتصال بین دال و تیر نیز، توسط قیده‌های MPC ایجاد شده است.



شکل ۳. فشار پیک قائم برای خرج انفجار ۲۵۰ پوند TNT



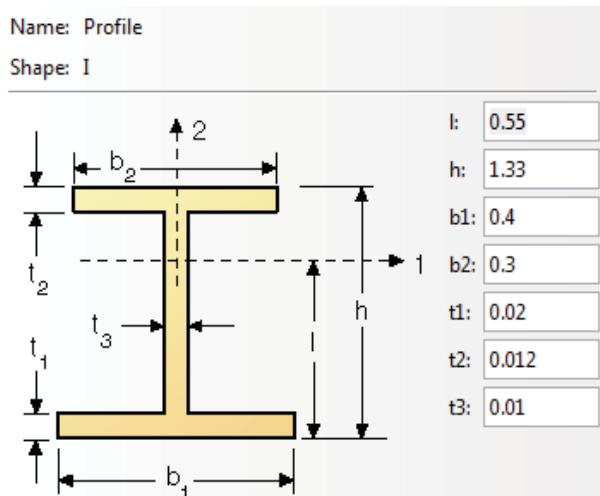
شکل ۴. فشار پیک قائم برای خرج انفجار ۵۰۰ پوند TNT

۴-۲. معرفی نمونه‌های پل مختلط مورد بررسی در برابر انفجار

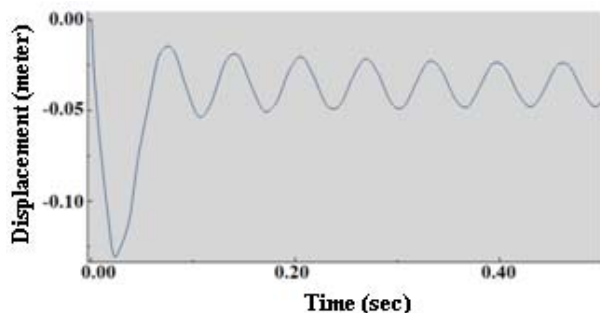
در یک پل انفجار ممکن است روی عرشه، زیر عرشه و یا در کنار پایه پل رخ دهد، در این تحقیق فقط انفجارهایی که ممکن است روی عرشه پل رخ دهد، بررسی شده است. با توجه به سختی قابل توجه زیرسازه (پایه‌ها و فونداسیون) نسبت به روسازه (عرشه پل)، زیرسازه به صورت صلب در نظر گرفته شده، از تغییر شکل زیرسازه پل صرف نظر شده و روسازه به تنهایی مدل شده است. اجزای سازه‌ای عرشه پل مختلط فولادی، شامل دال بتن آرمه و شاه‌تیرهای فولادی می‌باشد که از قیده‌هایی مانند گل‌میخ یا ناودانی جهت ایجاد عملکرد مختلط دال با شاه‌تیرها استفاده می‌شود. پل‌های با عرشه مختلط فولادی، حداکثر برای دهانه‌های با طول ۵۰ متر طراحی و ساخته می‌شوند. علت این امر، غیر اقتصادی بودن ساخت این نوع پل برای دهانه‌های بیش از ۵۰ متر است. نمونه پل‌های انتخاب شده برای این تحقیق نیز، دارای دهانه‌های ۱۰ متری تا ۵۰ متری می‌باشند. در تمامی نمونه‌ها عرض عرشه ۱۱ متر، تعداد تیرها ۴ عدد، فاصله تیرهای میانی ۳ متر و طول طره ۱ متر است.

بارگذاری مرده و زنده برای پل‌های مورد بررسی بر اساس نشریه شماره ۱۳۹ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، انجام شده است [۱۷]. میلگردها و ضخامت دال طبق نشریه شماره ۳۸۹ و ابعاد تیرها

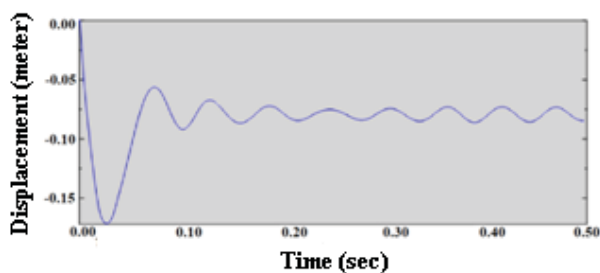
شکل وسط شاه‌تیر دوم در نمونه‌های مورد بررسی، به عنوان معیار کنترل در تحلیل استاتیکی غیرخطی (تحلیل بارافزون)، مورد نظر می‌باشد. ابتدا تاریخچه زمانی تغییرشکل حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی برای یکی از نمونه‌ها، ارائه شده است. نمونه انتخاب شده، پل با دهانه ۱۵ متری می‌باشد که مقطع عرضی تیر آن مطابق با شکل (۷) است. نتایج تغییرشکل تحلیل دینامیکی غیرخطی در مدت زمان ۰/۵ ثانیه، برای پل دهانه ۱۵ متری، تحت اثر سه انفجار ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ پوند TNT، به ترتیب در شکل‌های (۱۰-۸)، نمایش داده شده است. در این شکل‌ها زمان برحسب ثانیه و جابه‌جایی برحسب متر می‌باشد.



شکل ۷. مشخصات مقطع تیر در نمونه پل با دهانه ۱۵ متر



شکل ۸. تغییرشکل وسط شاه‌تیر دوم پل ۱۵ متری تحت بار انفجار ۲۵۰ پوند TNT (۱۱۳/۵ کیلوگرم TNT)



شکل ۹. تغییرشکل وسط شاه‌تیر دوم پل ۱۵ متری تحت بار انفجار ۵۰۰ پوند TNT (۲۲۷ کیلوگرم TNT)

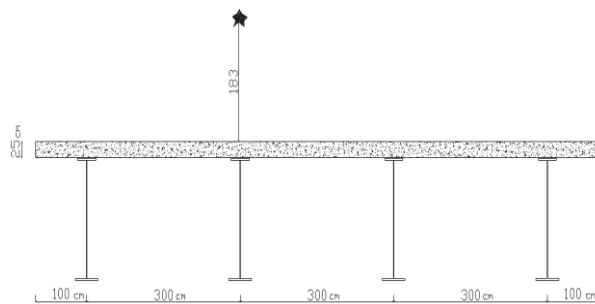
۳-۴. مدل‌سازی و تحلیل نمونه‌ها با استفاده از نرم‌افزار آباکوس

در مدل‌سازی سازه تحت بار انفجار، سه مسئله عمده وجود دارد: مدل‌سازی انفجار، مدل‌سازی سازه و مدل‌سازی اندرکنش سازه با بار انفجار. پدیده‌هایی که در طی فرایندهای دینامیکی با سرعت بالا اتفاق می‌افتد معمولاً در آزمایش‌های تجربی به سختی قابل مشاهده و ثبت هستند، در حالی که در یک تحلیل عددی معمولاً کل فرآیند را می‌توان شبیه‌سازی کرد. در این تحقیق برای مدل‌سازی بار انفجار، از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس^۱ استفاده شده است. آباکوس به خوبی توانایی مدل‌سازی هر سه قسمت از مدل (سازه، انفجار و اندرکنش سازه با بار انفجار) را دارد، از این جهت برای مدل‌سازی‌ها در این پژوهش انتخاب شده است.

در نرم‌افزار آباکوس، برای تحلیل مدل‌ها از تحلیل‌گر صریح^۲ استفاده شده است. این روش جهت مدل‌سازی مسائل دینامیکی با فرکانس بالا و سرعت زیاد، بسیار مناسب است. شرایط گوناگون تماس و نیز پدیده‌های با ناپیوستگی زیاد به گونه مناسبی با روش صریح مدل و فرموله می‌شوند و می‌توانند به صورت گره به گره و بدون نیاز به تکرار حل شوند.

۴-۴. تحلیل دینامیکی غیرخطی نمونه‌ها تحت اثر انفجار

در این بخش نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی برای نمونه‌ها بررسی شده است. همان‌طور که در بخش‌های قبل، توضیح داده شد. با توجه به سطوح خطر در نظر گرفته شده برای انفجارها، سه مقدار انفجار ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ پوند TNT که به ترتیب معادل هستند با ۱۱۳/۵، ۲۲۷ و ۴۵۴ کیلوگرم TNT، فرض شده است. مرکز وقوع انفجار در تمامی نمونه‌ها در وسط دهانه، در عرض ۴ متری از لبه عرشه (بر روی شاه‌تیر دوم) و ارتفاع ۱/۸۳ متری قرار دارد. شکل (۶)، محل وقوع انفجار را در نمونه‌های مورد بررسی نشان می‌دهد.



شکل ۶. محل وقوع انفجار در نمونه‌های مورد بررسی

در تحلیل دینامیکی غیرخطی، تغییر شکل و نیروهای داخلی و به طور کلی پاسخ سازه با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی مصالح و رفتار غیرخطی هندسی سازه محاسبه شده است. در این پژوهش، تغییر

^۱ Abaqus

^۲ Explicit

شکل ۱۱. تغییر شکل وسط شاه تیر دوم پل ۱۵ متری تحت بار انفجار ۲۵۰ پوند TNT (۱۱۳/۵ کیلوگرم TNT) [۲۸]

بر اساس نتایج شکل (۱۱)، ضریب بار متناظر با تغییر مکان ۱۳/۰۹ سانتی متر که از تحلیل دینامیکی غیرخطی حاصل شده، برابر با ۰/۱۴۱ است. در نتیجه الگوی بار استاتیکی طبق رابطه (۱۲)، برای نمونه پل با دهانه ۱۵ متری، در تحلیل استاتیکی منجر به همان تغییر شکلی می‌شود که از تحلیل دینامیکی غیرخطی همان پل تحت بار انفجار ۲۵۰ پوند TNT، به دست آمده است. K ضریب اصلاح بار تعریف می‌شود.

$$P_V = (-0.872r^3 + 12.72r^2 - 60.89r + 96.35) \times K \quad (12)$$

مقدار ضرایب بار جهت اصلاح الگوهای بارگذاری برای تمامی نمونه‌ها جهت محاسبه ضریب اصلاح بار، به دست آمده و در جدول (۲) نمایش داده شده است.

۴-۶. تعیین رابطه ضریب اصلاح الگوی بار معادل انفجار

در این بخش به بررسی رابطه بین پارامترهای تأثیرگذار و ضریب اصلاح الگوی بار استاتیکی معادل انفجار، پرداخته شده است. پارامترهایی که تأثیر آن‌ها در ضرایب اصلاح بار مورد بررسی قرار گرفته است، عبارتند از:

الف- شدت انفجار

ب- زمان تناوب سازه

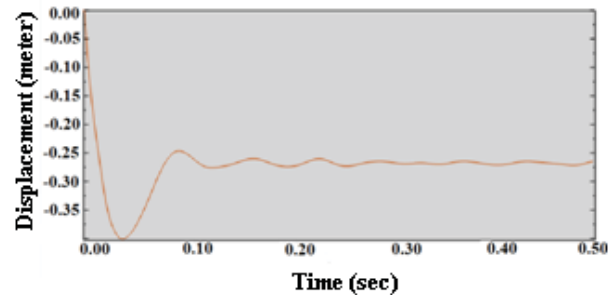
ج- زمان تداوم انفجار

از آنجا که ضرایب اصلاح بار به دست آمده در نمونه‌های مورد بررسی به هر یک از سه پارامترهای ذکر شده وابسته است، ارائه رابطه مستقل به طور جداگانه با هر یک از آن‌ها ممکن نیست. به همین دلیل سعی شده است با ارائه رابطه‌ای با دقت مناسب، هر سه پارامتر به طور هم‌زمان تأثیر داده شود.

جدول ۲. ضرایب اصلاح الگوی بار استاتیکی برای سطوح خطر

انفجار ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ پوند TNT

طول دهانه (متر)	ضریب اصلاح الگوی بار استاتیکی		
	انفجار ۲۵۰ پوند TNT	انفجار ۵۰۰ پوند TNT	انفجار ۱۰۰۰ پوند TNT
۱۰	۰/۱۵۵	۰/۱۰۵	۰/۰۶۸
۱۵	۰/۱۴۱	۰/۱۲۰	۰/۰۸۲
۲۰	۰/۱۳۳	۰/۱۰۵	۰/۰۷۲
۲۵	۰/۱۸۶	۰/۱۲۱	۰/۰۷۸
۳۰	۰/۱۸۷	۰/۱۲۸	۰/۰۸۰
۳۵	۰/۱۷۵	۰/۱۳۲	۰/۰۸۰
۴۰	۰/۱۰۷	۰/۰۸۶	۰/۰۷۰
۴۵	۰/۰۹۲	۰/۰۵۰	۰/۰۶۶
۵۰	۰/۰۸۳	۰/۰۷۵	۰/۰۶۳



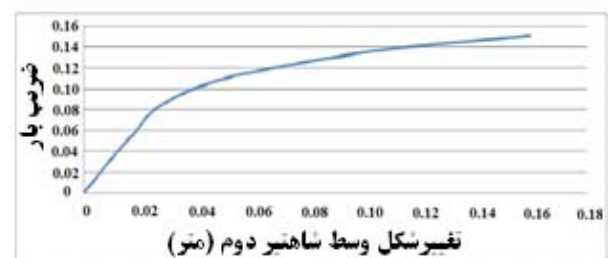
شکل ۱۰. تغییر شکل وسط شاه تیر دوم پل ۱۵ متری تحت بار انفجار ۱۰۰۰ پوند TNT (۴۵۴ کیلوگرم TNT)

با توجه به شکل‌های (۱۰-۸) مشاهده می‌شود که شاه تیر دوم در نمونه پل با دهانه ۱۵ متری، تحت هر سه شدت بار انفجار وارد ناحیه غیرالاستیک شده است. با این تفاوت که طبق شکل (۸)، تیر در پل تحت بار ۲۵۰ پوند TNT، به مقدار اندکی از ناحیه الاستیک خارج شده، اما مطابق با شکل (۱۰)، تیر در پل تحت شدت بار ۱۰۰۰ پوند TNT، به مقدار قابل توجهی به ناحیه پلاستیک وارد شده است. تغییر مکان حداکثر وسط شاه تیر پل در حالت انفجار ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ پوند TNT، به ترتیب برابر ۱۳/۰۹، ۱۳/۱۳ و ۴۰/۱۳ سانتی متر، به دست آمده است.

تغییر شکل تحلیل دینامیکی غیرخطی در وسط شاه تیر دومی، برای تمامی نمونه‌ها تحت سه مقدار بار انفجار ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ پوند TNT، به دست آمده و ثبت شده است.

۴-۵. تحلیل نمونه‌ها به روش بارافزون

تحلیل استاتیکی غیرخطی با کنترل تغییر مکان بر روی کلیه نمونه‌ها انجام شده و ضرایب بار برای اصلاح الگوی بارگذاری در ایجاد تغییر شکل حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی، به دست آمده است. بار استاتیکی بر اساس الگوی بار انفجار به دست آمده در بخش ۴-۱، در سطح عرشه اعمال شده و به آهستگی افزایش یافته تا تغییر مکان نقطه کنترل (وسط شاه تیر دومی) به مقدار تغییر مکان به دست آمده از تحلیل دینامیکی برسد. با رسیدن تغییر مکان نقطه کنترل به تغییر مکان مورد نظر، مقادیر ضرایب بار ثبت شده است. الگوی بارگذاری حاصل از روابط (۹-۱۱)، با ضرب در این ضرایب همان تغییر مکانی را به وجود می‌آورد که از تحلیل دینامیکی غیرخطی حاصل شده است. نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی، در قالب نمودار ضریب بار بر حسب افزایش تغییر مکان برای نمونه پل با دهانه ۱۵ متری تحت اثر مقدار ۲۵۰ پوند TNT، در شکل (۱۱) ارائه شده است [۲۸].



جدول ۳. ضریب اصلاح بار استاتیکی معادل انفجار برای ۲۵۰

پوند TNT

طول دهانه (متر)	انفجار ۲۵۰ پوند TNT		
	K	$\frac{t_d}{T}$	$\frac{W_{TNT}}{1000}$
۱۰	۰/۱۵۵	۰/۲۰۳	۰/۲۵
۱۵	۰/۱۴۱	۰/۱۰۲	۰/۲۵
۲۰	۰/۱۳۳	۰/۰۵۸	۰/۲۵
۲۵	۰/۱۸۶	۰/۰۵۲	۰/۲۵
۳۰	۰/۱۸۷	۰/۰۳۸	۰/۲۵
۳۵	۰/۱۷۵	۰/۰۳۴	۰/۲۵
۴۰	۰/۱۰۷	۰/۰۲۸	۰/۲۵
۴۵	۰/۰۹۲	۰/۰۲۴	۰/۲۵
۵۰	۰/۰۸۳	۰/۰۲۱	۰/۲۵

جدول ۴. ضریب اصلاح بار استاتیکی معادل انفجار برای ۵۰۰

پوند TNT

طول دهانه (متر)	انفجار ۵۰۰ پوند TNT		
	K	$\frac{t_d}{T}$	$\frac{W_{TNT}}{1000}$
۱۰	۰/۱۰۵	۰/۲۶۴	۰/۵
۱۵	۰/۱۲۰	۰/۱۳۲	۰/۵
۲۰	۰/۱۰۵	۰/۰۷۶	۰/۵
۲۵	۰/۱۲۱	۰/۰۶۷	۰/۵
۳۰	۰/۱۲۸	۰/۰۵۰	۰/۵
۳۵	۰/۱۳۲	۰/۰۴۴	۰/۵
۴۰	۰/۰۸۶	۰/۰۳۶	۰/۵
۴۵	۰/۰۵۰	۰/۰۳۱	۰/۵
۵۰	۰/۰۷۵	۰/۰۲۷	۰/۵

جدول ۵. ضریب اصلاح بار استاتیکی معادل انفجار برای

پوند ۱۰۰۰ TNT

طول دهانه (متر)	انفجار ۱۰۰۰ پوند TNT		
	K	$\frac{t_d}{T}$	$\frac{W_{TNT}}{1000}$
۱۰	۰/۰۶۸	۰/۳۰۷	۱
۱۵	۰/۰۸۲	۰/۱۵۴	۱
۲۰	۰/۰۷۲	۰/۰۸۸	۱
۲۵	۰/۰۷۸	۰/۰۷۸	۱
۳۰	۰/۰۸۰	۰/۰۵۸	۱
۳۵	۰/۰۸۰	۰/۰۵۱	۱
۴۰	۰/۰۷۰	۰/۰۴۲	۱
۴۵	۰/۰۶۶	۰/۰۳۶	۱
۵۰	۰/۰۶۳	۰/۰۳۱	۱

در نمونه‌های مورد بررسی، شدت انفجار بر اساس وزن معادل TNT، بیان شد و هر نمونه تحت اثر سه سطح خطر انفجار محتمل ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ پوند TNT، مورد بررسی قرار گرفت. تأثیر شدت انفجار در نتایج ضرایب اصلاح با نسبت وزن معادل TNT وارد بر هر نمونه بر بزرگ‌ترین مقدار انفجار (۱۰۰۰ پوند TNT)، در نظر گرفته شده است. نسبت بدون بعد وزن معادل TNT به بزرگ‌ترین مقدار انفجار (۱۰۰۰ پوند TNT)، برای هر نمونه محاسبه شده و در جدول‌های (۳-۵) ارائه شده است.

زمان فاز مثبت یا زمان تداوم انفجار، t_d ، مدت زمانی است که در حین آن فشار انفجار بیش از فشار جو است. در حقیقت مدت زمان انفجار زمانی است که اعمال تکانه (ضربه) ویژه انفجار بر روی سازه خاتمه می‌یابد. این زمان علاوه بر اینکه به زمان اعمال فشار مبنای انفجار و فشار بازتاب انفجار بستگی دارد، به سرعت حرکت موج شوک نیز بستگی دارد. بدیهی است که مدت زمان اعمال بار، پارامتر مهمی در محاسبه پاسخ سازه است. زمان شروع انفجار در فاصله شعاعی ۶ متری از مرکز وقوع انفجار به علاوه زمان تداوم انفجار در آن نقطه، به عنوان زمان تداوم کل فشار انفجار در نظر گرفته شده است. شعاع ۶ متری به این دلیل انتخاب شده است که در فاصله‌های بیش از ۶ متر اثر انفجار ناچیز و از آن صرف نظر شده است. نسبت زمان تداوم انفجار به زمان تناوب پل، T ، نیز به عنوان یکی دیگر از پارامترهای تأثیرگذار برای هر نمونه پل محاسبه شده و در جدول‌های (۳-۵) ارائه شده است.

برای به دست آوردن رابطه بین ضریب اصلاح الگوی بار استاتیکی معادل انفجار (K) و دو پارامتر شامل نسبت زمان تداوم به زمان تناوب ($\frac{t_d}{T}$) و وزن تی‌ان‌تی بر حسب تن ($\frac{W_{TNT}}{1000}$)، از نرم‌افزار آماری SPSS استفاده شد. طبق داده‌های جدول‌های (۳-۵) و با استفاده از نرم‌افزار مذکور، رابطه ضریب اصلاح الگوی بار استاتیکی معادل انفجار بر حسب دو پارامتر فوق‌الذکر، به صورت رابطه‌ی نمایی (۱۳)، با ضریب همبستگی ۰/۷۵، به دست آمد.

$$K = 0.094 \times \left(\frac{t_d}{T}\right)^{0.095} \times \left(\frac{TNT}{1000}\right)^{-0.450} \quad (13)$$

که در آن، TNT مقدار انفجار بر حسب کیلوگرم TNT، t_d زمان تداوم انفجار، T زمان تناوب سازه و K ضریب اصلاح بار است.

برای بررسی دقت رابطه (۱۳)، ضریب اصلاح حاصل از این رابطه با نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی مقایسه شده و مقدار خطای رابطه (۱۳)، در مقایسه با نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی در جدول‌های (۶-۸) ارائه شده است.

مستقیم از رابطه (۱۳)، از نتایج جدول (۲) استفاده گردد.

جدول ۸. خطای رابطه ضریب اصلاح استاتیکی در مقایسه با مقادیر به دست آمده از تحلیل دینامیکی غیرخطی برای انفجار ۱۰۰۰ پوند TNT

طول دهانه (متر)	انفجار ۱۰۰۰ پوند TNT		
	مقدار دقیق	مقدار حاصل از رابطه ۱۳	خطا (%)
۱۰	۰/۰۶۸	۰/۰۸۴	۲۳
۱۵	۰/۰۸۲	۰/۰۷۸	-۴
۲۰	۰/۰۷۲	۰/۰۷۴	-۳
۲۵	۰/۰۷۸	۰/۰۷۴	-۶
۳۰	۰/۰۸۰	۰/۰۷۲	-۱۰
۳۵	۰/۰۸۰	۰/۰۷۰	-۱۱
۴۰	۰/۰۷۰	۰/۰۶۹	-۰/۸
۴۵	۰/۰۶۶	۰/۰۶۸	۳/۶
۵۰	۰/۰۶۳	۰/۰۶۷	۷

بر اساس جزئیات روش پیشنهادی تحقیق جهت تحلیل و طراحی پل‌های مختلط فولادی تحت اثر انفجار که در بخش‌های پیشین این فصل بیان شد، می‌توان مراحل انجام تحلیل انفجاری پل مختلط را به صورت ذیل خلاصه نمود:

الف- تعیین مشخصات سازه پل بر اساس آیین‌نامه‌های تحلیل و طراحی پل

ب- تعیین سطوح خطر انفجار بر اساس نمودارها و جداول ارائه شده در آیین‌نامه‌های انفجار

ت- محاسبه زمان تناوب سازه

ث- محاسبه مدت تداوم انفجار بر اساس نشریه TM 5-1300 [۱۶].

ج- محاسبه ضریب اصلاح بار از رابطه (۱۳) و یا جدول (۲)

ح- تعیین الگوی بارگذاری استاتیکی معادل انفجار از روابط (۹-۱۱)

خ- مدل‌سازی غیرخطی سازه پل و اعمال الگوی بارگذاری استاتیکی حاصل از مرحله قبل بر روی پل

د- تحلیل استاتیکی غیرخطی پل و استخراج نتایج

ذ- کنترل ضوابط طراحی پل بر اساس آیین‌نامه‌های موجود

۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق به ارائه الگوی بارگذاری استاتیکی معادل، برای پل‌های با عرشه مختلط تحت بار انفجار پرداخته شد. به این منظور ابتدا روش شبیه‌سازی انفجار و مدل‌سازی پل‌های با عرشه مختلط بررسی شد و سپس دقت روش مدل‌سازی ارائه شده مورد ارزیابی قرار گرفت. بعد از آن نمونه‌های متعددی از پل‌های با عرشه مختلط تحت بار انفجار با شدت‌های مختلف در نظر گرفته شده و تحلیل دینامیکی

جدول ۶. خطای رابطه ضریب اصلاح استاتیکی در مقایسه با مقادیر به دست آمده از تحلیل دینامیکی غیرخطی برای انفجار ۲۵۰ پوند TNT

طول دهانه (متر)	انفجار ۲۵۰ پوند TNT		
	مقدار دقیق	مقدار حاصل از رابطه (۱۳)	خطا (%)
۱۰	۰/۱۵۵	۰/۱۵۰	-۳
۱۵	۰/۱۴۱	۰/۱۴۱	۰
۲۰	۰/۱۳۳	۰/۱۳۳	۰
۲۵	۰/۱۸۶	۰/۱۳۲	-۲۹
۳۰	۰/۱۸۷	۰/۱۲۸	-۳۱
۳۵	۰/۱۷۵	۰/۱۲۷	-۲۸
۴۰	۰/۱۰۷	۰/۱۲۵	۱۶
۴۵	۰/۰۹۲	۰/۱۲۳	۳۳
۵۰	۰/۰۸۳	۰/۱۲۱	۴۶

جدول ۷. خطای رابطه ضریب اصلاح استاتیکی در مقایسه با مقادیر به دست آمده از تحلیل دینامیکی غیرخطی برای انفجار ۵۰۰ پوند TNT

طول دهانه (متر)	انفجار ۵۰۰ پوند TNT		
	مقدار دقیق	مقدار حاصل از رابطه ۱۳	خطا (%)
۱۰	۰/۱۰۵	۰/۱۱۳	۷
۱۵	۰/۱۲۰	۰/۱۰۶	-۱۲
۲۰	۰/۱۰۵	۰/۱۰۰	-۴/۵
۲۵	۰/۱۲۱	۰/۰۹۹	-۱۸
۳۰	۰/۱۲۸	۰/۰۹۶	-۲۵
۳۵	۰/۱۳۲	۰/۰۹۵	-۲۷
۴۰	۰/۰۸۶	۰/۰۹۳	۸/۵
۴۵	۰/۰۵۰	۰/۰۹۲	۸۴
۵۰	۰/۰۷۵	۰/۰۹۱	۲۵

نتایج جدول‌های (۸-۶) نشان می‌دهد که در بیشتر نمونه‌ها دقت رابطه به دست آمده مناسب است. با توجه به اینکه خطای قابل توجه ۸۴ درصدی در نمونه ۴۵ متری تحت بار ۵۰۰ پوندی در جهت محافظه‌کارانه می‌باشد، با چشم پوشی از این خطا می‌توان رابطه ضریب اصلاح (۱۳) را به عنوان یک رابطه ساده جهت تحلیل و طراحی پل‌های مختلط فولادی تحت اثر انفجار پیشنهاد نمود. بنابراین با معلوم بودن شدت بار انفجار، زمان تداوم انفجار و زمان تناوب سازه، الگوی بار استاتیکی معادل بار انفجار به دست می‌آید و می‌توان اثر دینامیکی انفجار را با استفاده از الگوی مورد نظر به صورت استاتیکی شبیه‌سازی کرد. شایان ذکر است در صورتی که طول دهانه پل دقیقاً یکی از مقادیر ارائه شده در جدول (۲) باشد، بهتر است جهت افزایش دقت و کاهش خطا، به جای استفاده

- [11] Salehabadi, M.; Shushtari, A. "Dynamic Analysis of Asymmetric Structures under Blast Loading"; In Proc. of the Sixth Eng. Conf., Semnan University, 1390. (In Persian)
- [12] Ministry of Roads and Urban Development Deputy for Housing and Building "Passive defense"; Sixth Ed. 1388.
- [13] Khaledi, N. "Equivalent Static Analysis of Composite Steel Girder Bridges Subjected to Blast Loading"; M.Sc. Thesis, University of Kurdistan, 2012 (In Persian).
- [14] Habibi, A.R.; Khaledi, N. "Evaluating Rectangular Loading Pattern in Nonlinear Static Analysis of Composite Bridges Under Blast", Journal of Ferdowsi Civil Engineering, 26, 2, 67-84, 2015(In Persian).
- [15] Sahabi, E. "Development of a Proper Load Pattern for Nonlinear Static Analysis of Composite Girder Bridges under Blast", M.Sc. Thesis, University of Kurdistan, 2014(In Persian).
- [16] US Army Corps of Engineers "Structures to Resist the Effect of Accidental Explosions"; TM 5-1300, 1990.
- [17] Islamic Republic of Iran Management and Planning Organization "Standard Loads for Bridges"; N.139, First Ed. 1379 (In Persian).
- [18] Islamic Republic of Iran Management and Planning Organization "The Code of Practice for the Analysis and Design of Concrete Bridges"; N.389, First Ed. 1387.
- [19] Islamic Republic of Iran Management and Planning Organization "The Code of Practice for the Analysis and Design of Steel Bridges"; N395, First Ed. 1387.

غیرخطی بر روی آن‌ها انجام شد. همچنین بر روی تمامی نمونه‌ها، تحلیل استاتیکی غیرخطی با روش کنترل تغییر مکان انجام شد و ضریب بار معادل استاتیکی برای اصلاح الگوی مورد نظر در هر نمونه محاسبه گردید. بر اساس نتایج عددی حاصله، رابطه‌ای برای ضریب اصلاح الگوی بارگذاری استخراج شد و یک الگوی بارگذاری استاتیکی جهت معادل‌سازی اثرات انفجار پیشنهاد شد. تحلیل‌های انجام شده بر روی پل‌های مختلف فولادی تحت اثر انفجارهای محتمل، نشان داد که پل‌های طراحی شده بر اساس آیین‌نامه‌های متداول، در مقابل انفجار مقاوم نیستند و اغلب دچار شکست‌های خمشی در تیر و یا شکست‌های موضعی در دال می‌شوند. نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی نشان داد که شکست خمشی شاه‌تیر بیشتر در پل‌های با دهانه کوتاه‌تر رخ می‌دهد و در دهانه‌های بزرگ‌تر احتمال شکست خمشی در تیر کم می‌باشد و عمدتاً شکست‌های موضعی باعث خرابی پل می‌شود. از طرف دیگر، نشان داده شد که با معلوم بودن شدت بار انفجار، زمان تداوم انفجار و زمان تناوب سازه، الگوی بار استاتیکی معادل انفجار بر روش پیشنهادی تحقیق به‌دست آمده و می‌توان اثر دینامیکی انفجار روی پل مختلط را به صورت استاتیکی شبیه‌سازی نمود. نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی غیرخطی نمونه‌های مورد بررسی نشان داد که الگوی بارگذاری پیشنهادی با دقت مناسبی می‌تواند اثرات انفجار بر روی پل مختلط را شبیه‌سازی کند.

۶. مراجع

- [1] Anwarul Islam, A. K. M. and Nur Yazdani. "Performance of AASHTO Girder Bridges under Blast Loading"; Engineering Structures, 30, 7, 1922-1937, 2008.
- [2] Luccioni, B. M.; Mariela, L. "Concrete Pavement Slab under Blast Loads"; Int. J. Impact Eng. 2006, 32, 8, 1248-1266.
- [3] Wei, J.; Quintero, R.; Galati, N.; Nanni, A. "Failure Modeling of Bridge Components Subjected to Blast Loading"; Int. J. Concrete Structures and Materials 2007, 1, 19-28.
- [4] Fujikara, S.; Bruneau, M. "Blast Resistant of Seismically Designed Bridge Piers"; In Proc. of the 14th World Conf. on Earthquake Eng., 2008.
- [5] Abdelahad, F. A. "Analysis of Blast/Explosion Resistant Reinforced Concrete Solid Slab and T-Beam Bridges"; Thesis, Atlantic University Boca Raton, Florida, 2008.
- [6] Deng R. B.; Jin X. L. "Numerical Simulation of Bridge Damage under Blast Loads"; WSEAS Trans. on Computers 2009, 9, 1564-1574.
- [7] Zhou, F.; Arockiasamy, M. "Blast/Explosion Resistant Analysis of Composite Steel Girder Bridge System"; Thesis, Florida University, 2009.
- [8] Tang, E. K. C.; Hao, H. "Numerical Simulation of A Cable-Stayed Bridge Response to Blast Loads, Part I: Model Development and Response Calculations"; Engineering Structures 2010, 32, 3180-3192.
- [9] Son, J.; Lee, H. J. "Performance of Cable-Stayed Bridge Pylons Subjected to Blast Loading"; Engineering Structures 2011, 33, 1133-1148.
- [10] Tai, Y. S.; Chu, T. L.; Hu, H. T.; Wu, J. Y. "Dynamic Response of a Reinforced Concrete Slab Subjected to Air Blast Load"; Theoretical and Applied Fracture Mechanics 2011, 56, 140-147.