

روش جدید برای کاهش آثار مخرب بارهای انفجاری بر عرشه پل‌های بتنی

حمیدرضا احمدی^{*}، مازیار فهیمی فرزام^۱، یاسر قربان نژاد^۲

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه

*ahmadi@maragheh.ac.ir

تاریخ دریافت: [۹۹/۳/۱۰]

تاریخ پذیرش: [۹۹/۱۰/۳]

چکیده

عملیات تروریستی در سطح جهان رو به فزونی گذاشته است. در این بین پل‌ها به عنوان شریان‌های حیاتی از سازه‌های در دسترس برای عملیات تروریستی به حساب می‌آیند که البته با توجه به اهمیت آن‌ها لازمست راهکارهایی برای کاهش آسیب-پذیری پل‌ها در برابر بارهای انفجاری ارائه شود. با توجه به گستردگی عرشه‌های دوعنصری در ایران و جهان، در این پژوهش رفتار عرشه دوعنصری پل‌های بتنی منظم در پلان در برابر بارهای انفجار بررسی شده است. بدین منظور پل شهید صنیع‌خانی تهران بر اساس نقشه‌های سازه موجود در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس مدل‌سازی شده و بارهای انفجاری به آن اعمال شده است. مواد منفجره در وزن‌های ۴/۴۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم و در فواصل ۰/۵، ۱/۲، ۱/۸۳، ۲/۵۴ و ۳/۸۱ متری از سطح عرشه دال منفجر شده و عملکرد عرشه بررسی شده است. سپس به منظور بهبود عملکرد عرشه در برابر بارهای انفجاری یک سیستم جدیدی پیشنهاد شد که بدون تغییر در مصالح، عملکرد عرشه در برابر انفجار بهبود یابد. بر اساس نتایج به دست آمده مقدار ایمن و فاصله ایمن مواد منفجره نسبت به عرشه پل بررسی شد. نتایج این پژوهش نشان داد که افزایش وزن ماده منفجره منجر به افزایش تغییر مکان ایجاد شده در عرشه پل شده و گسترش خرابی را به دنبال خواهد داشت. همچنین افزایش فاصله ماده منفجره از سطح پل منجر به کاهش خرابی در آن می‌شود. با کاربرد سیستم سازه اصلاح شده، آسیب‌پذیری عرشه نسبت به بارهای انفجاری به شدت کاهش می‌یابد. باین وجود و با توجه به سهولت اجرا و عدم تغییر قابل توجه در مصالح مورد استفاده و هزینه عملیات اجرایی، می‌تواند در اجرای عرشه پل‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: عرشه دوعنصری، انفجار، تحلیل اجزاء محدود، سطح عملکرد

۱- مقدمه

وقوع انفجار در سازه‌ها می‌تواند منجر به آسیب شدید و حتی خرابی کامل آن‌ها شود. بنابراین با توجه به آسیب‌پذیری بسیاری از سازه‌ها در برابر بارهای انفجار و افزایش حملات تروریستی در سالین اخیر، باید تمهیدات لازم برای به حداقل رساندن آسیب سازه‌ای در برابر بارهای انفجار اندیشیده شود. با توجه به اهمیت پل‌ها و لزوم سرویس‌دهی آن‌ها در مواقع بحرانی، بسیاری از پژوهشگران در خصوص اثر انفجار روی پل‌ها تحقیق کرده‌اند. اسلام^۱ و یزدانی^۲ [1] در سال ۲۰۰۸ به بررسی عملکرد پل‌های ارائه شده در آیین‌نامه AASHTO [2] تحت بارگذاری انفجار پرداختند. این آیین‌نامه با وجود داشتن روابط و توصیه‌هایی برای طراحی پایه‌های پل‌ها در برابر بارهای ناشی از برخورد کشتی‌ها و وسایل دیگر فاقد ضوابط و راهنما برای طراحی در برابر بارگذاری انفجار است. پس اسلام و همکارش در این پژوهش یک پل بزرگ بین ایالتی را طبق روابط ارائه شده در این آیین‌نامه [2] در نظر گرفته و مدل‌سازی نمودند. نتایج این پژوهشها نشان داد که این پل تحت انفجار دچار شکست شده و برای مقابله با بارهای انفجار ظرفیت کافی را ندارد. سیفاللهی و مرشد [3] در سال ۱۳۹۶ به بررسی رفتار دال‌های بتن‌آرمه تحت انفجار پرداخته و نشان دادند که مدل‌های مطالعه شده تحت انفجار نزدیک کاملاً گسیخته شده و افزایش ضخامت منجر به کاهش خیز ایجاد شده در دال‌ها می‌شود. تاجور و همکاران [4] در سال ۱۳۹۷ به مطالعه تحلیلی رفتار دال‌های بتنی مقاوم شده با فنس فولادی در برابر بارهای انفجاری پرداخته و تأثیر عواملی مانند تأثیر تعداد لایه‌های فنس، ضخامت دال‌ها و مقاومت فشاری بتن بر تغییر مکان، شعاع خرابی و عملکرد دال‌ها را بررسی کردند. نتایج پژوهش‌های ایشان نشان داد که افزودن فنس به دال با مقاومت و ضخامت‌های مختلف سبب کاهش شعاع خرابی و تغییر مکان دال‌ها شده و با افزایش تعداد لایه‌های فنس، درصد کاهش خرابی و تغییر مکان دال بیشتر می‌شود. همچنین دال‌ها با ضخامت و مقاومت فشاری

بالا دارای سطح عملکرد ایمنی جانی و استفاده بی‌وقفه است و افزودن فنس، سبب بهبود نسبی سطح عملکرد آن‌ها می‌شود. فوگلار^۳ کووار^۴ [5] در سال ۲۰۱۳ رفتار عرشه پل بتن مسلح را تحت اثر بارگذاری انفجار به‌صورت آزمایشگاهی و در مقیاس واقعی بررسی نمودند. نتایج آزمایش‌های ایشان نشان از تأثیر الیاف بر بهبود رفتار دال‌ها تحت بارگذاری‌های انفجار داشت. به‌طوری‌که با افزودن الیاف به نمونه‌های آزمایشگاهی از حجم تخریب کاسته شده و رفتار نمونه‌ها از ترد^۵ به شکل‌پذیر^۶ تغییر کرد. هاو^۷ و تانگ^۸ [6] در سال ۲۰۱۰ آثار بارگذاری انفجار بر رفتار پل‌های بزرگ نگهداری شده توسط کابل‌ها را مطالعه کردند. در این پژوهش فاصله امن برای پل‌ها به منظور در امان ماندن از آثار بارگذاری‌های انفجار را تعیین کرده و همچنین آثار استفاده از الیاف FRP را بررسی نموده، و ملاحظه کردند که استفاده از الیاف CFRP با ضخامت ۱ و ۳ میلی‌متر منجر به بهبود رفتار نمونه‌های مطالعه شده است. فوجیکورا^۹ و برونو^{۱۰} [7] در سال ۲۰۰۸ مقاومت پایه‌های پل طراحی شده بر اساس آیین‌نامه لرزه‌ای رایج در برابر بارهای انفجار را بررسی کردند. ستون‌ها در آزمایش ایشان با مقیاس ۱:۴ در دو نوع بتن مسلح و بهسازی شده توسط ژاکت فولادی طراحی و آزمایش شدند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که نمونه‌های مورد مطالعه رفتار شکل‌پذیری از خود نشان نداده و تحت اثر برش در پایه دچار شکست شدند. لی و همکاران^{۱۱} [8] در سال ۲۰۱۸ به بررسی آزمایشگاهی و عددی سازوکار آسیب‌دیدگی ستون‌های پل‌های از نوع مقطع فولادی دوجداره پر شده با بتن^{۱۲} واقع در معرض بارهای انفجار سطحی را به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی کردند. نتایج پژوهشها نشان داد که آسیب ایجاد شده در این ستون‌ها موضعی بوده و گاهی در

3 Foglar

4 Kovar

5 Brittle

6 Ductile

7 Hao

8 Tang

9 Fujikura

1 Bruneau 0

1 Steel Jacketing

1 Li, et al 2

1 Concrete-filled Double-Skin steel tube

1 Islam

2 Yazdani

مجاورت محل انفجار متمرکز شده‌اند. لی و همکاران [9] در سال ۲۰۱۷ رفتار دال بتن مسلح را تحت بارگذاری انفجار به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد مطالعه قرار دادند. ایشان همچنین از شبکه فولاد اضافی به عنوان تقویت ثانویه علاوه بر میلگردهای طراحی شده استفاده نمودند. نتایج پژوهش‌های عددی و آزمایشگاهی ایشان نشان داد که استفاده از تقویت ثانویه منجر به بهبود رفتار دال در مقایسه با عدم وجود شبکه اضافی فولادی می‌شود. عملکرد پل بزرگراه‌های در معرض بارهای انفجار، در پژوهش پان^۵ و همکاران در سال ۲۰۱۷ [10] بررسی شد. یکی از نتایج مهم این بود که، استفاده از الیاف CFRP می‌تواند به‌طور مؤثری باعث کاهش خرابی پل شده و تغییر شکل‌ها را کاهش دهد. ایشان همچنین دریافتند که کاهش فاصله ماده منفجره به‌طور قابل توجهی منجر به کاهش آسیب و خیز شاه‌تیرها می‌شود. در پژوهش لیو^۶ و همکاران [11] در سال ۲۰۱۸ به بررسی رفتار تیرها و ستون‌های بتن‌آرمه تحت بارگذاری انفجار پرداخته شده است. در این پژوهش ۱۰ نمونه آزمایشگاهی در مقیاس ۱:۲ را در معرض سطوح مختلف بارهای انفجار بررسی نمودند. نتایج نشان داد که افزایش وزن ماده منفجره منجر به افزایش آسیب در تیرهای بتن مسلح در شرایط یکسان می‌شود. وانگ^۷ و همکاران [12] در سال ۲۰۱۴ رفتار یک پل آسیب‌دیده تحت اثر یک بار انفجار تصادفی را بررسی کردند. تجزیه و تحلیل یک پل ناشی از انفجار با جرم معادل TNT انجام شده و واکنش پل به این بار دینامیکی ناشی از انفجار توسط الگوریتم‌های مهندسی و شبیه‌سازی عددی مدل‌سازی شد. نتایج نشان دهنده یک بار دینامیکی ممکن است، که به‌طور تصادفی روی سازه‌های ثابت اعمال شود که آثار این بارها باید مدنظر قرار گیرد. هاشمی و همکاران [13] در سال ۲۰۱۶ پاسخ دینامیکی پل‌های کابلی تحت بارهای انفجاری را مطالعه کردند. در این پژوهش مدل‌های کاملی از تحلیل اجزاء محدود برای بررسی رفتار پل‌های کابلی تحت اثر مواد منفجره با وزن‌های متفاوت انجام شده و مواد منفجره در نقاط

مختلف بالاتر از سطح عرشه قرار داده شد. ویلیامسون^۸ و همکاران [14] در سال ۲۰۱۱ به بررسی عملکرد ستون‌های پل‌ها تحت اثر بار انفجاری پرداختند. نتایج حاصل از این پژوهش تأیید می‌کند که بحرانی‌ترین پاسخ برای ستون‌های در معرض بار انفجار زمانی ایجاد می‌شود که محل انفجار نزدیک به زمین باشد. وینجت^۹ و همکاران [15] در سال ۲۰۰۵ به بررسی و تحلیل پل‌های بحرانی در معرض بارگذاری انفجار پرداختند. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که هندسه پل می‌تواند به شکل قابل توجهی بر بارهای انفجار که در زیر عرشه ایجاد می‌شود، تأثیر بگذارد. سیمون^{۱۰} و سراج‌الدین^{۱۱} [16] در سال ۲۰۱۷ تأثیر فاصله محل وقوع انفجار بر عملکرد پل را تحت بارگذاری انفجاری به صورت پارامتریک مورد بررسی قرار دادند. پترو^{۱۲} و همکاران [17] در سال ۲۰۰۸ به بررسی مقاومت‌سازی دال‌های پله‌ای بتن‌آرمه با استفاده از الیاف پلیمر کربنی پرداختند. این پژوهش ۴ نمونه آزمایشگاهی دال همراه با یک نمونه شاهد را با استفاده از الیاف مذکور آزمایش می‌کند. نتایج نشان دهنده مقاومت‌سازی دال‌های پل با استفاده از الیاف مزبور است که منجر به افزایش مقاومت و سختی سیستم می‌شود. هربراند^{۱۳} و همکاران [18] در سال ۲۰۱۷ به بررسی مقاومت‌سازی سازه‌های پل موجود با استفاده از منسوج کربن پرداختند. ایشان به این نتیجه رسیدند که استفاده از این روش برای مقاومت‌سازی پل‌ها حتی از روش مقاومت‌سازی به روش نوارهای الیاف کربن نیز بهتر است و جایگزین مناسبی برای روش‌های دیگر مقاومت‌سازی می‌تواند باشد.

با توجه به اهمیت موضوع در این پژوهش عملکرد عرشه دو عنصری پل‌های بتنی منظم در پلان در برابر بارهای انفجار بررسی شده است. بدین منظور ابتدا پل شهید صنیع‌خانی واقع در شهر تهران در نرم‌افزار آباکوس مورد مدل‌سازی قرار گرفت که توضیحات بیشتر درباره پل مورد بحث در بخش (۵) ارائه شده است. نتایج نشان داد که با افزایش فاصله محل

- 1 Williamson 8
- 1 Winget 9
- 2 Simon 0
- 2 Sirajuddin 1
- 2 Petrou 2
- 2 Herbrand 3

- 1 Li, etal 4
- 1 Pan 5
- 1 Liu 6
- 1 Wang 7

[20]. در این مدل فرض می‌شود که مهم‌ترین سازوکارهای خرابی بتن، ترک خوردن در کشش و خرد شدن در فشار باشد. پاسخ بتن تحت اثر کشش و فشار تک‌محوری با استفاده از پلاستیسیته مبتنی بر خسارت هم تعریف می‌شود. در این مدل، بتن تا رسیدن به تنش خرابی کششی σ_{t0} به صورت خطی رفتار می‌کند. تنش مزبور متناظر با آغاز ترک‌های ریز کششی در بتن است. زمانی که در شاخه نرم منحنی تنش- کرنش بتن باربرداری صورت گیرد، کاهش سختی صورت می‌گیرد که با استفاده از ۲ پارامتر خسارت d_c و d_t تعریف می‌شود [21]. مدل آسیب پلاستیک بتن در نواحی فشاری و کششی در شکل (۱) نشان داده شده است.

شکل ۱. مدل بتن آسیب‌دیده در فشار و کشش [21]

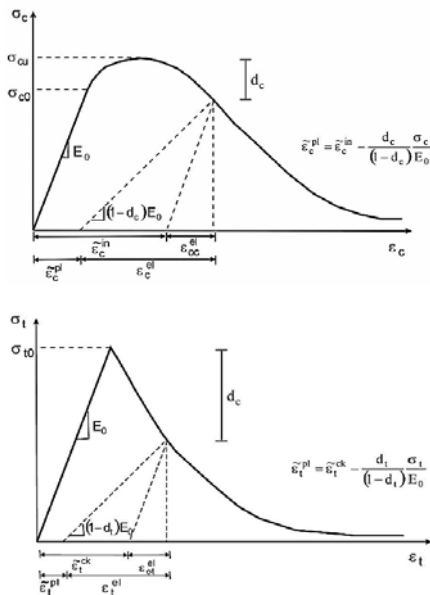


Fig. 1. Dependence in compression and tension for CDP model [21]

۳-۲ رفتار بتن در فشار تک‌محوری

از آنجایی که معرفی رابطه تنش- کرنش تک‌محوره بتن در فشار و کشش از پارامترهای مهم در معرفی مدل پلاستیسیته به نرم‌افزار است، پس برای معرفی رابطه تنش- کرنش فشاری تک‌محوره بتن به نرم‌افزار در این پژوهش، از رابطه

وقوع انفجار، پیشینه جابه‌جایی و همچنین تنش ایجادشده کاهش می‌یابد. علاوه بر این، پیشینه جابه‌جایی هنگام وقوع انفجار در زیر عرشه مشاهده می‌شود. این امر به این دلیل است که با انفجار زیر آن مقاومت در برابر تغییر شکل ایجاد نمی‌شود.

۲- تئوری انفجار

مقدار فشار P_s که بر اثر انفجار ماده TNT به وزن W کیلوگرم در فاصله R متری از ماده منفجره ایجاد می‌شود، از رابطه (۱) به دست می‌آید [19]:

$$\log_{10}[\log_{10} P_s] = -0.1319X^3 - 0.3231X + 0.4644$$

$$X = \log_{10}(Z) \quad (1)$$

در رابطه (۱) Z فاصله مقیاس شده انفجار است که طبق رابطه (۲) تعریف می‌شود:

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

W میزان ماده منفجره بر اساس کیلوگرم و R فاصله ماده منفجره تا هدف موردنظر برحسب متر است. P_s فشار ایجادشده در اثر انفجار بر حسب مگاپاسکال است.

۳- مدل سازی سازه بتنی در نرم‌افزار آباکوس

اطلاعات موردنیاز برای مدل کردن بتن و فولاد در نرم‌افزار آباکوس، در ادامه ارائه شده است.

۳-۱ مدل آسیب پلاستیک بتن

مدل رفتاری استفاده شده برای مدل‌سازی بتن در سازه‌ها تحت اثر بار انفجاری باید بتواند با دقت بالا رفتار خطی و غیرخطی بتن را دربرگیرد. بدین منظور پژوهشگران مختلف مدل‌های رفتاری متفاوتی را پیشنهاد نموده‌اند. هریک از این مدل‌ها دارای نقاط قوت و ضعف هستند. در این پژوهش مطابق با مراجع [20, 21, 22]، برای بتن عرشه از معیار پلاستیسیته بتن آسیب‌دیده^۴ در مدل‌سازی استفاده شده است

۳-۳- رفتار بتن در کشش تک محوری

برای معرفی رفتار کششی بتن از منحنی شکل (۳) استفاده شده است:

شکل ۳. منحنی تنش-کرنش بتن در کشش [20]

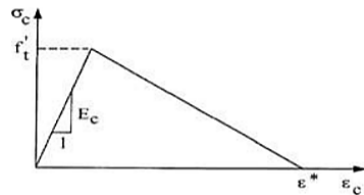


Fig. 3. Stress-strain curve of concrete in tension [20]

با توجه به شکل (۳) ناحیه اول یک خط مستقیم است که به مقاومت کششی حداکثر ختم می شود (رابطه ۶). ناحیه دوم نیز بخش نزولی است که بتن در کرنش کششی ۰/۰۰۱ از بین می رود (رابطه ۷).

$$f'_t = 0.33 \sqrt{f'_c} \quad (6)$$

$$\epsilon^* = 0.001 \quad (7)$$

۳-۴- مدل رفتاری میلگرد

به منظور واقعی تر شدن رفتار سازه باید اثر اندرکنش بین بتن و میلگرد را در رفتار المان با اصلاح رفتار میلگرد در نظر گرفت. در این پژوهش از مدل بلاربی [23] برای در نظر گرفتن این رفتار استفاده شده است. شکل (۴) نمودار رفتاری میلگرد بلاربی را نشان می دهد. در این شکل عبارات Bare Steel Bars و Steel Bars in Concrete اشاره به رفتار میلگرد فولادی تنها و میلگرد واقع در داخل بتن دارد. f_y تنش تسلیم میلگرد و f_n تنش تسلیم میلگرد واقع در داخل بتن است. ϵ_y و ϵ_n به ترتیب بیانگر کرنش متناظر با تنش تسلیم میلگرد تنها و میلگرد واقع در داخل بتن (میلگرد بلاربی) است. E_p و E_s به ترتیب بیانگر سختی اولیه و ثانویه میلگرد بلاربی در مدل دو خطی است.

هاگنستاد گنه اصلاح شده است، استفاده می شود. منحنی فوق الذکر در شکل (۲) نمایش داده شده است.

هم چنین از روابط (۳ و ۴) به منظور معرفی تنش فشاری بتن بر حسب کرنش فشاری به نرم افزار استفاده شده است.

$$f_c = f_c'' = k_s f_c' \left[\frac{2\epsilon_c}{\epsilon_0} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right] \quad (3)$$

$$f_c = f_c'' = \left[\frac{2\epsilon_c}{\epsilon_0} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right] \quad (4)$$

شکل ۲. منحنی هاگنستاد اصلاح شده [22]

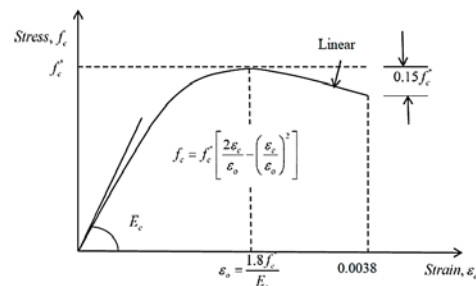


Fig. 2. Modified Hognestad curve [22]

در روابط ارائه شده ϵ_0 کرنش متناظر با تنش ماکزیمم است که در این پژوهش برابر ۰/۰۰۲ در نظر گرفته شده است. هم چنین رابطه f_c'' تنش ماکزیمم در عضو بتنی است. k_s نیز ضریب تأثیر است که برای مقاومت فشاری f'_c کمتر از ۱۵ مگاپاسکال برابر ۱ و برای بتن های با مقاومت ۲۰، ۲۵، ۳۰ و بالاتر از ۳۵ مگاپاسکال به ترتیب ۰/۹۷، ۰/۹۵، ۰/۹۳ و ۰/۹۲ است. بخش نزولی در منحنی هاگنستاد اصلاح شده از f_c'' و ϵ_0 به $(0.0038, 0.85 f_c'')$ خطی است [22]. مدول الاستیسیته را نیز می توان به صورت رابطه (۵) نوشت:

$$E_c = 5000 \sqrt{f'_c} \quad (5)$$

گفتنی است در رابطه فوق f'_c مقاومت مشخصه بتن بر حسب کیلوگرم بر سانتی متر مربع است.

این پژوهش در مرجع [24]، ۴ نمونه آزمایشگاهی مشابه با تفاوت در وزن ماده منفجره و فاصله ماده منفجره از سطح تیر موردنظر به صورت میدانی را بررسی کرده است. مشخصات این آزمایش‌ها در جدول (۱) نشان داده شده است. در این پژوهش، نمونه‌های آزمایش‌شده، در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده و مطابق با جدول (۱) تحت بارگذاری قرار گرفته است.

جدول ۱. نمونه‌های آزمایش‌شده در مرجع [24]

Tested beams	Charge mass (kg)	Stand-off distance (m)	Scaled distance (m.kg-1/3)
B2-2	0.87	0.65	0.68
B3-1	0.86	0.6	0.63
B3-2	1.1	0.65	0.63
B1-4	0.5	0.5	0.63

Table.1. Tested specimens at reference [24]

مدل‌ها بر اساس مصالح به کاررفته در تیرها و هندسه آن‌ها با استفاده از اطلاعات موجود در مرجع [24]، مدل‌سازی شده‌اند. در شکل (۵) مدل عددی ساخته شده، نشان داده شده است. مطابق با آزمایش‌ها، از تغییرشکل نقاط انتهایی تیر جلوگیری به عمل آمد.

برای مدل‌سازی بار انفجار در نرم‌افزار آباکوس از روش کانوپ^۸ استفاده شد. در ضمن مدل‌سازی تیر با المان Solid و مدل‌سازی میلگردها با استفاده از المان Wire صورت پذیرفت. هم‌چنین میلگردها توسط قید Embedded region در داخل بتن مدفون شدند. این مدل دارای المان مش از نوع C3D8R است. در شکل (۶) نمودار تغییر مکان-زمان برای نمونه‌های مزبور حاصل از مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته است. در شکل‌های (۷ و ۸) نیز تغییر شکل ایجاد شده در نمونه‌های آزمایشگاهی به صورت شماتیک با تغییر شکل به وجود آمده در مدل‌های عددی نشان داده شده است.

همان‌گونه که در نمودارهای شکل (۶) ملاحظه می‌شود، کمترین و بیشترین اختلاف بین مدل‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی به ترتیب در نمودارهای B3-1 و B1-3 مشاهده

شکل ۴. مدل رفتاری میلگرد در مدل‌سازی عددی [23]

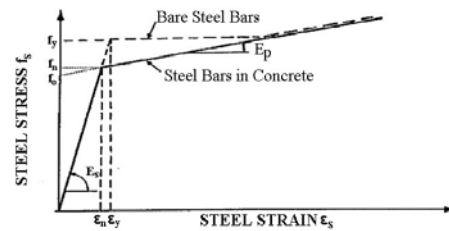


Fig. 4. Steel-strain curve of bars at analytical modeling [23]

۴-مدل‌های مطالعه شده

۴-۱-مدل‌سازی نمونه شاهد

به منظور کسب اطمینان از مدل‌سازی المان بتنی تحت اثر بار انفجار در نرم‌افزار آباکوس، از پژوهش‌های انجام‌شده توسط لیو^۷ و همکاران [24] استفاده شد. ایشان یک تیر بتنی با طول ۱۷۰۰ میلی‌متر و سطح مقطع ۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر مربع تحت اثر بارهای انفجاری به صورت آزمایشگاهی را بررسی کردند. مشخصات هندسی تیر آزمایش‌شده در شکل (۵) نشان داده شده است. بتن بکار رفته در این تیر دارای مقاومت فشاری ۳۰ مگاپاسکال و فولاد استفاده‌شده در آن دارای مقاومت تسلیم ۲۱۰ و مقاومت نهایی ۳۵۰ مگاپاسکال هستند. فاصله آرماتورهای عرضی از یکدیگر ۱۸۰ میلی‌متر است. در شکل (۶) نمایی از آزمایش انجام‌شده مشاهده می‌شود.

شکل ۵. مشخصات تیر آزمایش‌شده تحت بار انفجار [24]

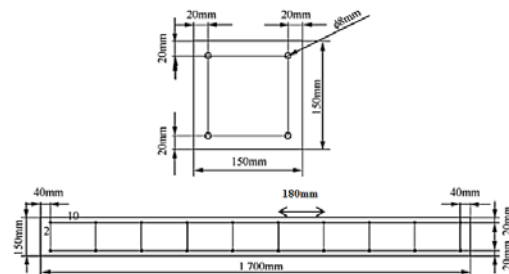


Fig. 5. Properties of tested beam under blast load [24]

جابه‌جایی این تیر در ابتدا و انتهای آن توسط یک تکیه‌گاه ساده مهار شده است. هم‌چنین ماده منفجره نیز در فواصل و وزن مختلف در بالای تیر منفجر شده و آثار آن روی تیر بررسی شده است.

۲-۴- مدل عددی عرشه پل

برای ارزیابی رفتار عرشه دو عنصری پل‌های بتنی منظم در پلان در برابر بارهای انفجاری، پس از انجام بررسی‌ها پل شهید صنیع‌خانی موردنظر قرار گرفت. پل شهید صنیع‌خانی از پل‌های مهم و مطرح در شهر تهران بوده و حجم ترافیک قابل توجهی از آن عبور می‌نماید. علاوه بر آن تعداد بسیار زیاد پل‌های دو عنصری از نوع تیر-دال در کشور و جهان هست و به طور کلی این نوع پل‌ها دارای گستردگی فراوانی هستند [25-27].

شکل ۷. مقایسه تغییرشکل نمونه‌های آزمایشگاهی و اجزاء محدود

نمونه‌های B2-2 و B3-1

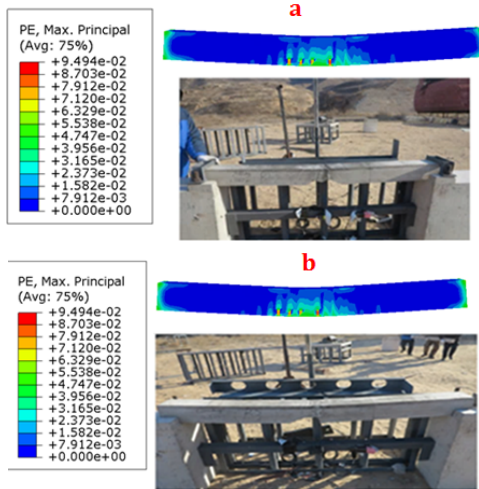


Fig. 7. Comparison between deformation of experimental and FE models a: B2-2 Specimen b: B3-1 Specimen

شکل ۸. مقایسه تغییرشکل نمونه‌های آزمایشگاهی و اجزاء محدود

نمونه‌های B3-2 و B1-4

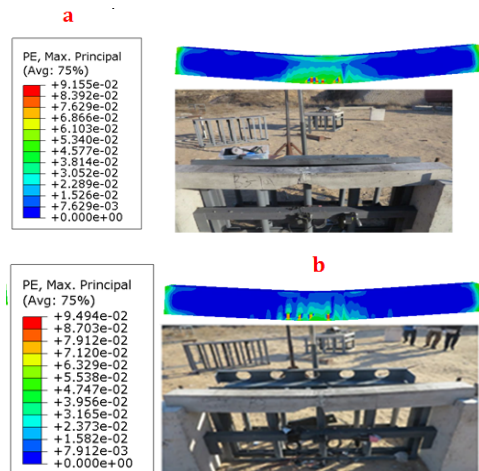


Fig. 8. Comparison between deformation of experimental and FE models a: B3-2 Specimen b: B1-4 Specimen

می‌شود. با این وجود، اختلاف بین نتایج ناچیز بوده و مدل‌سازی انجام‌شده از دقت قابل‌قبولی برخوردار است. لازم به ذکر است که برای تحلیل رفتار نمونه‌های مطالعه شده در مازول استپ^۹ نرم‌افزار آباکوس از تحلیل دینامیکی صریح^{۳۰} استفاده شد. در تحلیل رفتار نمونه‌ها نیز آثار غیرخطی هندسی^{۳۱} در نظر گرفته شد. همچنین برای بارگذاری انفجاری در مازول ایتراکشن^{۳۲} از بارگذاری انفجار در هوا^{۳۳} استفاده شد.

شکل ۶. مقایسه تغییر مکان مدل اجزاء محدود و مدل آزمایشگاهی

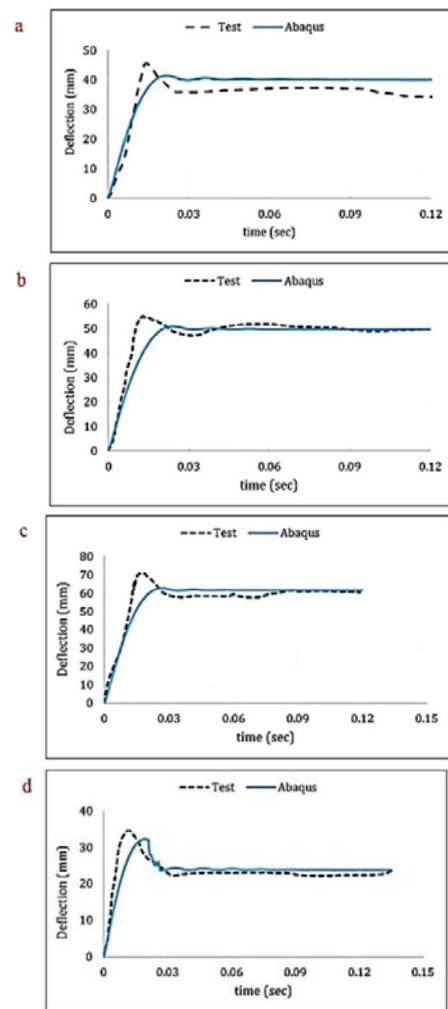


Fig. 6. Comparison between beam deflection of test and finite element model a: B2-2 Specimen b: B3-1 Specimen c: B3-2 Specimen d: B1-4 Specimen

- 2 Step Modul^۹
- 3 Dynamic Explicit
- 3 Nonlinear Geometry
- 3 Interaction Module
- 3 air blast 3

شکل ۱۰. مدل عددی از عرشه پل شهید صنیع‌خانی

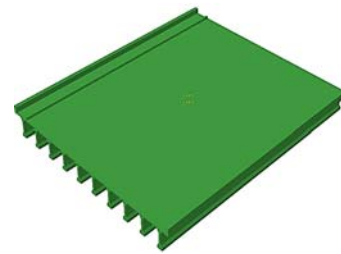


Fig. 12. Analytical model from deck of Shahid Sani-Khani's bridge

شکل ۱۱. عرشه با سیستم سازه اصلاح‌شده پل شهید صنیع‌خانی

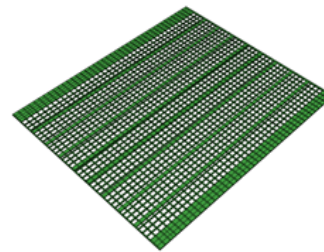


Fig. 11. Deck with Modified Structural System of Shahid Sani-Khani Bridge

شکل ۱۲. مقطع عرضی عرشه پل الف) وضع موجود ب) با استفاده از روش پیشنهادی

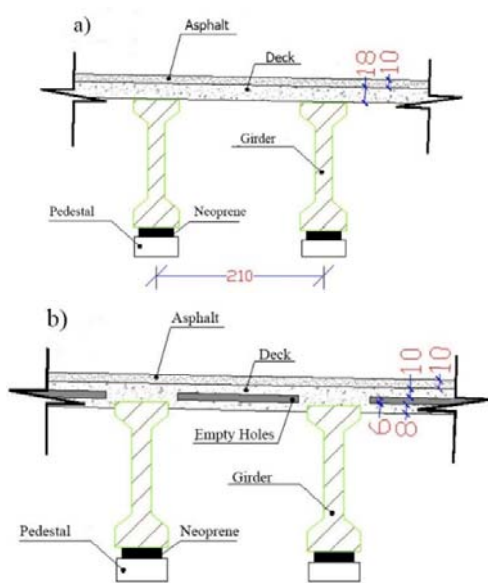


Fig. 12. Section of the bridge deck a) current status b) using the proposed method

۵- بررسی نتایج

در این بخش نتایج محاسبات صورت گرفته، ارائه شده است.

۵-۱- بررسی تغییر شکل عرشه

تغییر شکل عرشه یکی از عوامل اثرگذار در بهره‌برداری از پل‌ها است. بر اساس بررسی‌های انجام شده با افزایش فاصله محل وقوع انفجار از سطح عرشه میزان تغییر شکل نیز کاهش یافته است.

شکل ۱۳. تغییر مکان نقطه میانی عرشه دارای ماده منفجره به وزن ۴۵/۴

کیلوگرم در فواصل مختلف در مدل سازه موجود

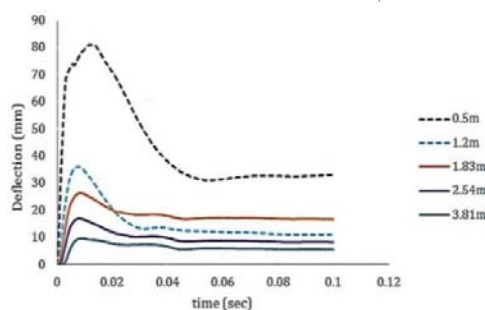


Fig. 13. Displacement of the midpoint of the deck under blast having 45.4 kg weight at various distances in the existing structural model

در این پژوهش یک روش جدید برای بهبود عملکرد عرشه پیشنهاد شده است. روش سازه اصلاح شده به گونه‌ای ارائه شده است که تغییر قابل توجهی در مصالح استفاده شده و هزینه عملیات اجرایی ایجاد نمی‌شود. پس از بررسی‌های مختلف و امکان‌سنجی روش‌های متعدد، در نهایت سیستم جدیدی پیشنهاد شد. در این سیستم ارتفاع عرشه افزایش پیدا می‌کند. البته تغییر چندانی در حجم مصالح مصرفی ایجاد نمی‌شود. در واقع این افزایش ارتفاع با ایجاد حفرات خالی در عرشه به وجود می‌آید. این سیستم مانند سیستم کوپاکس و یا یوبوت در سقف سازه‌ها است. بنابراین عرشه مطالعه شده به جای ۱۸ سانتی‌متر به دو عرشه ۱۰ و ۸ سانتی‌متری اجرا شده که بین آن‌ها ۶ سانتی‌متر فضای خالی در نظر گرفته می‌شود. به عبارت دیگر ضخامت عرشه در پل موجود برابر با ۱۸ سانتی‌متر است، لیکن در روش پیشنهادی ضخامت عرشه ۲۴ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. در شکل (۱۱) نمایی از مدل عددی ایجاد شده بر اساس سیستم سازه اصلاح شده نشان داده شده است. در شکل (۱۲) مقطع عرضی عرشه پل در حالت موجود و همچنین با استفاده از روش پیشنهادی مشاهده می‌شود.

می‌دهد. در این بخش میزان تغییر مکان پیشینه عرشه در سناریوهای مختلف محاسبه شده است. در اشکال (۱۳ تا ۱۸) تغییر مکان نقطه میانی عرشه در برابر زمان برای نمونه‌های مطالعه شده ارائه شده است. اشکال (۱۳، ۱۴ و ۱۵) مربوط به سازه موجود بوده و اشکال (۱۶، ۱۷ و ۱۸) نمودارهای حاصل از مدل‌های سازه اصلاح شده است.

شکل ۱۷. تغییر مکان نقطه میانی عرشه مدل سازه اصلاح شده دارای ماده

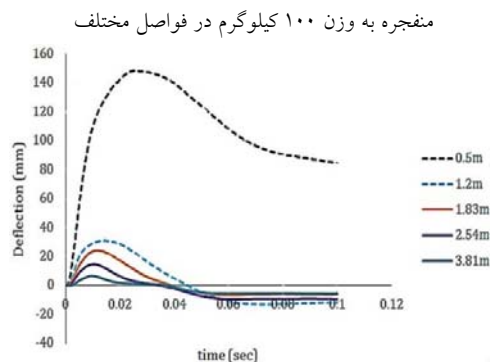


Fig. 17. Displacement of the midpoint of the deck under blast having 100 kg weight at various distances in the modified structural model

شکل ۱۸. تغییر مکان نقطه میانی عرشه مدل سازه اصلاح شده دارای ماده

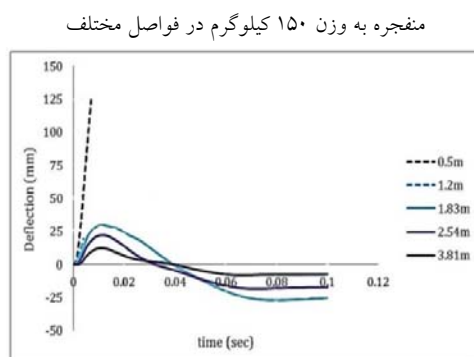


Fig. 18. Displacement of the midpoint of the deck under blast having 150 kg weight at various distances in the modified structural model

همان‌گونه که در شکل‌های (۱۳ تا ۱۸) ملاحظه می‌شود در نمونه‌های با وزن ماده منفجره ۴/۴۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم، با افزایش فاصله ماده منفجره از میزان تغییر شکل عرشه کاسته شده است. میزان تغییر مکان ماکزیم ناحیه میانی عرشه در نمونه‌های مطالعه شده در جدول (۴) ارائه شده است.

شکل ۱۴. تغییر مکان نقطه میانی عرشه دارای ماده منفجره به وزن ۱۰۰ کیلوگرم در فواصل مختلف برای سازه موجود

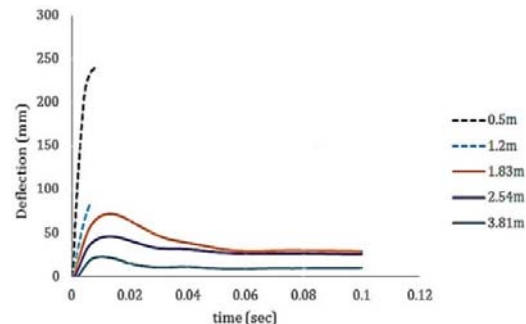


Fig. 14. Displacement of the midpoint of the deck under blast having 100 kg weight at various distances in the existing structural model

شکل ۱۵. تغییر مکان نقطه میانی عرشه دارای ماده منفجره به وزن ۱۵۰ کیلوگرم در فواصل مختلف برای سازه موجود

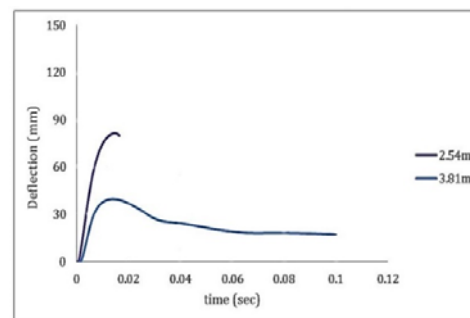


Fig. 15. Displacement of the midpoint of the deck under blast having 150 kg weight at various distances in the existing structural model

شکل ۱۶. تغییر مکان نقطه میانی عرشه سازه اصلاح شده دارای ماده

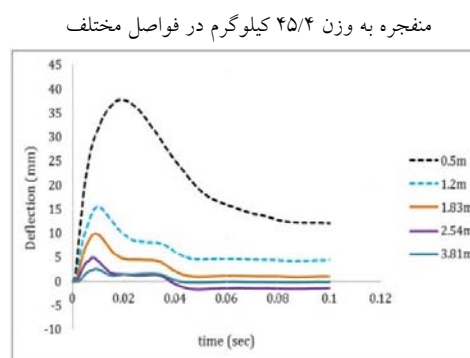


Fig. 16. Displacement of the midpoint of the deck under blast having 45.4 kg weight at various distances in the modified structural model

۲-۵- بررسی تغییر مکان عرشه

فشار ناشی از انفجار مواد منفجره باعث ایجاد تغییر مکان در عرشه‌های بتنی می‌شود که بیشترین آن در مرکز عرشه رخ

است. در نمونه‌های سازه اصلاح‌شده نکته قابل توجه این است که تحت اثر انفجار و در زمان بیشتر از $0/4$ ثانیه، عرشه به طرف بالاتر حرکت کرده است. در نمونه‌های با وزن ماده منفجره 150 کیلوگرم و در فاصله $0/5$ ، $1/2$ و $1/83$ متر، عرشه در زمان‌های ابتدایی از شروع انفجار دچار گسیختگی شده و بنابراین تحلیل متوقف شده است. در نمونه‌های سازه اصلاح‌شده با ماده منفجره به وزن $45/4$ کیلوگرم، میزان کاهش تغییرمکان بیشینه با افزایش فاصله از $0/5$ به $1/2$ متر، $1/83$ به $1/83$ متر، $2/54$ متر و $3/81$ متر به ترتیب 59 ، 36 ، 57 و 39 درصد است. بیشترین کاهش تغییرمکان بیشینه عرشه در ازای تغییر فاصله ماده منفجره از $0/5$ به $1/2$ متر صورت گرفته است. کمترین کاهش نیز در اثر افزایش فاصله از $1/2$ به $1/83$ متر صورت گرفته است. در نمونه‌های با ماده منفجره به وزن 100 کیلوگرم، میزان کاهش تغییرمکان بیشینه با افزایش فاصله از $0/5$ به $1/2$ متر، $1/83$ به $1/83$ متر، $2/54$ متر و $3/81$ متر به ترتیب 79 ، 22 ، 39 و 55 درصد است. بنابراین بیشترین کاهش تغییرمکان بیشینه عرشه در ازای تغییر فاصله ماده منفجره از $0/5$ به $1/2$ متر صورت گرفته است. در نمونه‌های با ماده منفجره به وزن 150 کیلوگرم، کاهش تغییرمکان بیشینه با افزایش فاصله از $0/5$ به $1/2$ متر، $1/83$ به $1/83$ متر، $2/54$ متر و $3/81$ متر به ترتیب 84 ، 25 ، 44 درصد است. عرشه با افزایش فاصله از $1/2$ به $1/83$ متر دچار افزایش تغییرمکان شده است که به توقف تحلیل در نمونه با فاصله $1/2$ متری مربوط است.

۳-۵- مقایسه عملکرد عرشه پل مطالعه شده در حالت موجود و در حالت اصلاح شده

هدف از ارائه این روش، کاهش میزان آسیب وارد شده به عرشه پل است. در اشکال (۱۹، ۲۰ و ۲۱) میزان بیشینه تغییرمکان ایجاد شده در ناحیه میانی عرشه در نمونه‌های سازه موجود و سازه اصلاح‌شده به صورت نظیر به نظیر مقایسه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، وجود سیستم سازه اصلاح‌شده منجر به کاهش قابل ملاحظه در تغییرمکان بیشینه

جدول ۴. مقادیر تغییرمکان ماکزیمم ناحیه میانی عرشه

weight	distance	deck displacement (mm)		Reduction of displacement (%)
		excising structure	modified structure	
45.4	0.5	81.13	37.74	53
	1.2	36.14	15.56	56
	1.83	26.36	9.87	62
	2.54	17	4.2	75
	3.81	9.62	2.54	73
100	0.5	242.6	148.44	38
	1.2	84.92	30.93	63
	1.83	71.81	24.02	66
	2.54	45.98	14.57	68
	3.81	22.58	6.55	71
150	0.5		123.98	
	1.2		19.27	
	1.83		29.63	
	2.54	81.22	22.22	72
	3.81	39.51	12.27	69

Table.4. maximum deflection of midpoint node of the deck

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، با افزایش فاصله ماده منفجره از عرشه از میزان تغییرمکان بیشینه کاسته شده است. گفتنی است که میزان تغییرمکان ایجادشده در نمونه‌های با فاصله $0/5$ متر بسیار بیشتر از سایر فاصله‌ها است. با توجه به جدول (۴)، در نمونه‌های سازه موجود با ماده منفجره به وزن $45/4$ کیلوگرم، میزان کاهش تغییرمکان بیشینه با افزایش فاصله از $0/5$ به $1/2$ متر، $1/83$ به $1/83$ متر، $2/54$ متر و $3/81$ متر به ترتیب 59 ، 36 ، 57 و 39 درصد است. بنابراین بیشترین کاهش تغییرمکان بیشینه عرشه در ازای تغییر فاصله ماده منفجره از $0/5$ به $1/2$ متر صورت گرفته است. در نمونه‌های با ماده منفجره 100 کیلوگرم، کاهش تغییرمکان بیشینه با افزایش فاصله از $0/5$ به $1/2$ متر، $1/83$ به $1/83$ متر، $2/54$ متر و $3/81$ متر به ترتیب 63 ، 66 ، 68 و 71 درصد است. پس بیشترین کاهش تغییرمکان بیشینه عرشه در ازای تغییر فاصله ماده منفجره از $0/5$ به $1/2$ متر صورت گرفته است. کمترین کاهش نیز در اثر افزایش فاصله از $1/2$ به $1/83$ متر صورت گرفته است. در نمونه‌های با ماده منفجره 150 کیلوگرم، افزایش فاصله محل انفجار از $2/54$ به $3/81$ متر موجب کاهش 51 درصدی تغییرمکان عرشه شده

شکل ۲۱. مقایسه بیشینه تغییر مکان عرشه در نمونه‌های سازه موجود و سازه اصلاح شده تحت اثر انفجار به وزن ۱۵۰ کیلوگرم

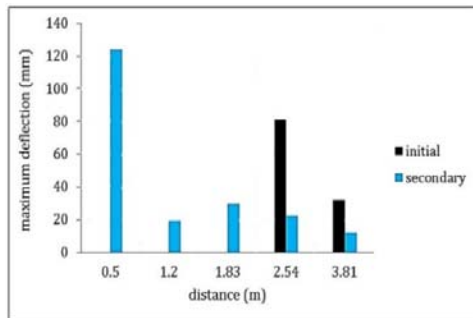


Fig. 21. Comparison of maximum displacement of the deck in samples of existing and modified structures under explosion with a weight of 150 kg

۴-۵- بررسی سطح عملکرد عرشه

برای کنترل آسیب‌های وارد شده بر عرشه، آیین‌نامه UFC-3-2 [28] محدودیت‌هایی را بر اساس عملکرد مورد انتظار ارائه می‌کند. کنترل آسیب ایجاد شده در دال‌ها مطابق با شکل (۲۲) به دو صورت کنترل دوران مفصل ایجاد شده در تکیه‌گاه یا ناحیه میانی دال صورت می‌گیرد. با استفاده از آیین‌نامه مورد نظر، دوران ایجاد شده در دال طبق رابطه (۶) محاسبه شد و با مقادیر سطوح عملکردی ارائه شده در آیین‌نامه طبق جدول (۵) مقایسه شد.

شکل ۲۲. دوران مفصل پلاستیک در تیرها و یا دال‌ها [28]

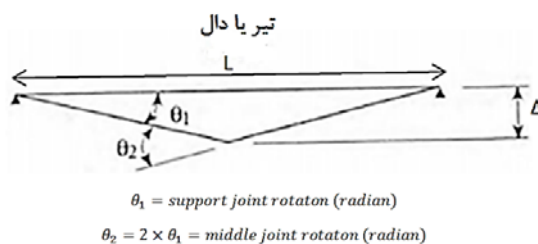


Fig. 22. Plastic hinge rotation of beams or slabs [28]

$$\theta = \arctan \left[\frac{\Delta}{L/2} \right] \quad (6)$$

در رابطه (۶) θ دوران مفصل، Δ تغییر مکان بیشینه عضو و L طول عضو برای به دست آوردن میزان ناپایداری عضو مورد نظر در ناحیه بحرانی است. مقادیر به دست آمده برای

شده است. با توجه به مقادیر جدول (۴)، در نمونه‌های با وزن ماده منفجره ۴۵/۴ کیلوگرم، در فواصل ۰/۵، ۱/۲، ۱/۳۸، ۲/۵۴ و ۳/۸۱ متر، استفاده از سیستم سازه اصلاح شده منجر به کاهش ۵۳، ۵۶، ۶۲، ۷۵ و ۷۳ درصدی تغییر مکان بیشینه شده است. در نمونه‌های با وزن ماده منفجره ۱۰۰ کیلوگرم، در فواصل ۰/۵، ۱/۲، ۱/۳۸، ۲/۵۴ و ۳/۸۱ متر نیز کاربرد این راهکار به کاهش ۳۸، ۶۳، ۶۶، ۶۸ و ۷۱ درصدی تغییر مکان بیشینه انجامیده است. با اعمال بار حاصل از ماده منفجره به وزن ۱۵۰ کیلوگرم، در فواصل ۲/۵۴ و ۳/۸۱ متر، کاربرد سیستم سازه اصلاح شده منجر به کاهش ۷۲ و ۶۹ درصدی تغییر مکان بیشینه شده است.

شکل ۱۹. مقایسه بیشینه تغییر مکان عرشه در نمونه‌های سازه موجود و سازه اصلاح شده تحت اثر انفجار به وزن ۴۵/۴ کیلوگرم

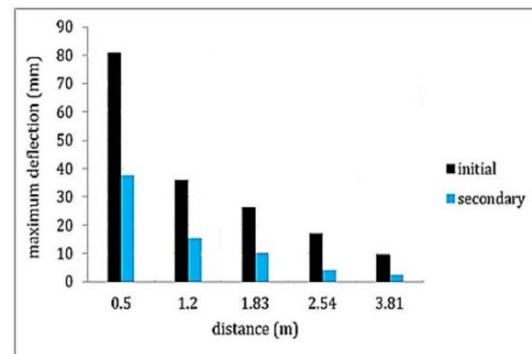


Fig. 19. Comparison of maximum displacement of the deck in samples of existing and modified structures under explosion with a weight of 45.4 kg

شکل ۲۰. مقایسه بیشینه تغییر مکان عرشه در نمونه‌های سازه موجود و سازه اصلاح شده تحت اثر انفجار به وزن ۱۰۰ کیلوگرم

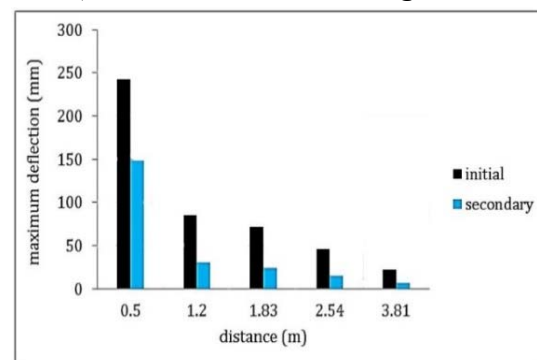


Fig. 20. Comparison of maximum displacement of the deck in samples of existing and modified structures under explosion with a weight of 100 kg

همان‌طور که در شکل های (۲۳ و ۲۴) ملاحظه می‌شود سطح عملکرد سازه موجود در همه سناریوها به‌جز نمونه با وزن ماده منفجره ۱۰۰ کیلوگرم و انفجار در فاصله ۰/۵ متری از سطح عرشه، در محدوده قابلیت استفاده پیوسته (IO) قرار دارد. سازه موجود تحت اثر ماده منفجره به وزن ۱۰۰ کیلوگرم و در فاصله ۰/۵ متری در محدوده ایمنی جانی (LS) قرار گرفته است. این در حالی است که عملکرد سازه اصلاح‌شده به صورت قابل توجهی بهبود یافته است. عملکرد سازه اصلاح‌شده در همه سناریوها در محدوده قابلیت استفاده پیوسته (IO) است.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی رفتار پل تحت اثر بارهای انفجاری در وزن و فواصل مختلف پرداخته شده است. بدین منظور برای حصول اطمینان از نتایج پژوهش، چندین تیر بتنی که به صورت آزمایشگاهی تحت اثر بارهای انفجاری مطالعه شده بودند، در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی، و تحلیل شد. سپس نتایج تحلیل با نتایج حاصل از آزمایش مقایسه شد. در بررسی صورت گرفته مشخص شد که مدل‌سازی انجام شده در نرم‌افزار آباکوس به‌خوبی قادر به پیش‌بینی رفتار موردنظر تحت اثر بارهای انفجاری است. برای بررسی رفتار پل‌ها تحت اثر بار انفجار، دهانه دوم از پل شهید صنیع‌خانی واقع در شهر تهران انتخاب شده و در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شد. برای این سناریوهای مختلفی از بارهای انفجاری تعریف شد. پل موردنظر در معرض ماده منفجره TNT با وزن ۴۵/۴، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم و در فاصله ۰/۵، ۱/۲، ۱/۳۸، ۲/۵۴ و ۳/۸۱ متری از سطح فوقانی عرشه قرار گرفت. علاوه بر آن یک روش سازه اصلاح شده جدید برای ارتقای عملکرد عرشه پل در برابر بارهای انفجاری ارائه شد. روش سازه اصلاح‌شده به‌گونه‌ای طراحی شده که بدون ایجاد تغییر قابل توجه در مصالح استفاده شده و همچنین هزینه عملیات اجرایی، قابلیت کاربرد داشته باشد. نتایج حاصل از محاسبات انجام شده به شرح ذیل است:

دوران بیشینه با سطوح عملکردی پیشنهاد شده توسط مرجع [28] مقایسه شده است.

جدول ۵. سطوح عملکرد دال تحت انفجار

Element type	Performance levels	rotation support (radian)
Slab	Immediate occupancy (IO)	0.035
	Life safety (LS)	0.07
	Collapse prevention (CP)	0.14

Table.5. Performance level of slab under explosion

شکل ۲۳. سطح عملکرد عرشه پل شهید صنیع‌خانی

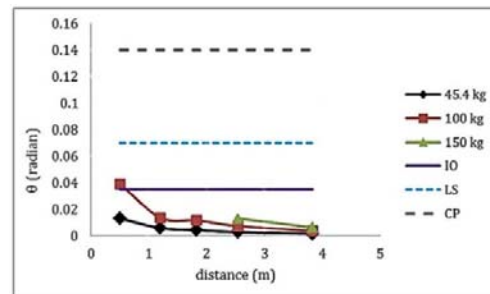


Fig. 23. Performance level of the deck of Shahid Sani-Khani Bridge

در شکل های (۲۳ و ۲۴) تأثیر وزن و فاصله ماده منفجره در نمونه‌های سازه موجود نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، تحت اثر وزن ثابت با افزایش فاصله، میزان دوران ایجادشده کاهش می‌یابد. همچنین میزان دوران ایجادشده در فاصله ثابت با افزایش وزن ماده منفجره نیز افزایش می‌یابد.

شکل ۲۴. سطح عملکرد عرشه پل شهید صنیع‌خانی با سیستم سازه اصلاح‌شده

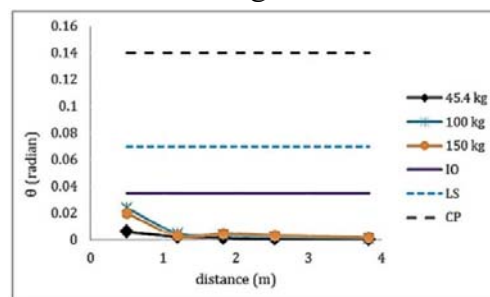


Fig. 24. Performance level of the deck of Shahid Sani-Khani Bridge with modified structural system

Damage prediction and FRP strengthening. *Engineering Structures*, 32(10), 3193-3205.

[7] Fujikura, S., & Bruneau, M. 2008 Blast resistance of seismically designed bridge piers. *Structural Engineer*, 2, 1.

[8] Li, M., Zong, Z., Liu, L., & Lou, F. 2018 Experimental and numerical study on damage mechanism of CFDST bridge columns subjected to contact explosion. *Engineering Structures*, 159, 265-276.

[9] Li, J., Wu, C., Hao, H., & Su, Y. 2017 Experimental and numerical study on steel wire mesh reinforced concrete slab under contact explosion. *Materials & Design*, 116, 77-91.

[10] Pan, Y., Ventura, C. E., & Cheung, M. M. 2017 Performance of highway bridges subjected to blast loads. *Engineering Structures*, 151, 788-801.

[11] Liu, Y., Yan, J. B., & Huang, F. L. 2018 Behavior of reinforced concrete beams and columns subjected to blast loading. *Defence Technology*, 14(5), 550-559.

[12] Wang, W., Liu, R., & Wu, B. 2014 Analysis of a bridge collapsed by an accidental blast loads. *Engineering Failure Analysis*, 36, 353-361.

[13] Hashemi, S. K., Bradford, M. A., & Valipour, H. R. 2016 Dynamic response of cable-stayed bridge under blast load. *Engineering Structures*, 127, 719-736.

[14] Williamson, E. B., Bayrak, O., Davis, C., & Daniel Williams, G. 2011 Performance of bridge columns subjected to blast loads. II: Results and recommendations. *Journal of Bridge Engineering*, 16(6), 703-710.

[15] Winget, D. G., Marchand, K. A., & Williamson, E. B. 2005 Analysis and design of critical bridges subjected to blast loads. *Journal of Structural Engineering*, 131(8), 1243-1255.

[16] Simon, E., & Sirajuddin, D. M. 2017 Parametric Study of Stand-Off Distance on a Bridge under Blast Loading. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology*, 8(2), 1-7.

[17] Petrou, M. F., Parler, D., Harries, K. A., & Rizos, D. C. 2008 Strengthening of reinforced concrete bridge decks using carbon fiber-reinforced polymer composite materials. *Journal of Bridge Engineering*, 13(5), 455-467.

[18] Herbrand, M., Adam, V., Classen, M., Kueres, D., & Hegger, J. 2017 Strengthening of existing bridge structures for shear and bending with carbon textile-reinforced mortar. *Materials*, 10(9), 1099.

[19] Izadifar, R., & Foroutan, M. 2010 Blastwave parameters assessment at different altitude using numerical simulation. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 34(1), 25-42.

• به‌طورکلی افزایش وزن ماده منفجره (در فاصله ثابت از سطح عرشه) موجب افزایش تغییر مکان‌های ایجاد شده در عرشه شده و به دنبال آن خرابی ایجاد شده در سیستم مزبور افزایش می‌یابد.

• افزایش فاصله ماده منفجره از مرکز عرشه با فرض ثابت نگه داشتن وزن ماده منفجره در سیستم‌های مطالعه شده در این پژوهش نشان داد که این افزایش فاصله می‌تواند منجر به کاهش تغییر مکان‌های ایجاد شده در عرشه شده، پس خسارت وارد آمده بر پل کاهش پیدا می‌کند.

• سیستم سازه اصلاح شده با وجود سهولت در اجرا و همچنین عدم تأثیر قابل توجه در هزینه ساخت، عملکرد عرشه را به صورت محسوس در برابر بارهای انفجاری افزایش داده است.

• سطح عملکرد عرشه پل و همچنین عرشه با سیستم سازه اصلاح شده، مطالعه شد. بر اساس بررسی‌های انجام شده عملکرد عرشه در محدوده قابلیت استفاده پیوسته قرار دارد. با این حال استفاده از روش سازه اصلاح شده به صورت قابل توجهی سطح عملکرد عرشه را بهبود می‌دهد.

References

۷- مراجع

[1] Islam, A. A., & Yazdani, N. 2008 Performance of AASHTO girder bridges under blast loading. *Engineering Structures*, 30(7), 1922-1937.

[2] Blue Ribbon Panel on Bridge and Tunnel Security 2003 Recommendations for Bridge and Tunnel Security. US Department of Transportation, Federal Highway Administration.

[3] Seifollahi H. & Morshed R. 2018 Behavior of Reinforced Concrete Slabs against the Blast Wave. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 49(4), (2018) 215-218. (In Persian)

[4] Nasserasadi K., tajvar A. & moradlou J. 2018 Analytical study of reinforced concrete slabs with ferrocement under blast load. *Modares Journal of Civil Engineering*, 18(1), 31-42. (In Persian)

[5] Foglar, M., & Kovar, M. 2013 Conclusions from experimental testing of blast resistance of FRC and RC bridge decks. *International Journal of Impact Engineering*, 59, 18-28.

[6] Hao, H., & Tang, E. K. 2010 Numerical simulation of a cable-stayed bridge response to blast loads, Part II:

- [25] Ahmadi, H. R., & Daneshjoo, F. 2012 A New Algorithm for Damage Detection in Simple Span Bridge Piers, Based on Power Spectral Density Function and Cosh Spectral Distance. 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal.
- [26] Ahmadi, H. R., & Anvari, D. 2018 New damage index based on least squares distance for damage diagnosis in steel girder of bridge's deck. *Structural Control and Health Monitoring*, 25(10), e2232.
- [27] Njafabadi, A. A., Daneshjoo, F., & Ahmadi, H. R. 2020 Multiple damage detection in complex bridges based on strain energy extracted from single point measurement. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 14, 722-730.
- [28] Unified Facilities Criteria (UFC) 3-340-02. Structures to resist the effects of accidental explosions. Washington D.C.: U.S. Department of Defense; 2008. p. 50e70.
- [20] Jankowiak, T., & Lodygowski, T. 2005 Identification of parameters of concrete damage plasticity constitutive model. *Foundations of civil and environmental engineering*, 6(1), 53-69.
- [21] Hu, H. T., Lin, F. M., & Jan, Y. Y. 2004 Nonlinear finite element analysis of reinforced concrete beams strengthened by fiber-reinforced plastics. *Composite Structures*, 63(3-4), 271-281.
- [22] Hognestad, E. 1951 Study of combined bending and axial load in reinforced concrete members. University of Illinois at Urbana Champaign, College of Engineering. Engineering Experiment Station.
- [23] Belarbi, A., & Hsu, T. T. 1994 Constitutive laws of concrete in tension and reinforcing bars stiffened by concrete. *Structural Journal*, 91(4), 465-474.
- [24] Liu, Y., Yan, J. B., & Huang, F. L. 2018 Behavior of reinforced concrete beams and columns subjected to blast loading. *Defence Technology*, 14(5), 550-559.

A new method to reduce the destructive effect of explosive loads on concrete bridge decks

Hamid Reza Ahmadi^{1*}, Mazyar Fahimi Farzam¹, Yaser Ghorbannejad²

1-Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh

2-MSc Graduated, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh

ahmadi@maragheh.ac.ir*

ABSTRACT

Terrorist operations have spread around the world. However, it is necessary to prepare for the dangers of terrorist operations. Explosions can cause severe damage to structures and even destroy them. Explosive stress is one of the most destructive loads a structure can experience. Many of the existing structures are vulnerable to loads caused by the blast wave, so their resistance to such loads should be checked to determine critical points of structures. Bridges are considered as important target structures for terrorist operations. However, given their importance, it is necessary to find methods to reduce the vulnerability of bridges due to explosive loads. In this study, the behavior of deck (beam- slab) of regular bridges against explosive loads was investigated. To ensure the accuracy of the modeling, a concrete beam, which was examined experimentally under explosive loads, was modeled in ABAQUS software. The results of the finite element model were compared with the experimental results, and the accuracy of the model was ensured. Then, the studies were followed by the evaluation of Shahid Sanikhani bridge in Tehran. The finite element model of the bridge was created in ABAQUS software. To investigate the application of the bridge deck under blast loading, TNT was applied to the slab in the weights of 45.4, 100, and 150 kg and at distances of 0.5, 1.2, 1.83, 2.54, and 3.2 meters from the deck surface. To improve the performance of the deck against explosive loads, a new construction method was proposed. The method is presented in such a way that there is no significant change in the used materials, and, in general, the cost of the construction. In this method, only the height of the slab of the deck is slightly increased. In fact, in the proposed method, similar to the Cobiax or U-Boot systems, the height of the deck increases by creating empty holes in the slab.

In this study, the safe weight of explosive materials as well as the safe distance of the explosive load from the bridge deck, were investigated. The results of this study showed that increasing the weight of the explosive materials will lead to an increase in the displacement created in the bridge deck and will lead to the spread of damage. In addition, increasing the distance of the explosive materials from the surface of the deck will reduce the damage. Based on the calculated results, using the proposed method, the vulnerability of the deck to explosive loads is greatly reduced. However, due to the ease of implementation and the lack of change in the volume of used materials and the cost of construction, in order to increase the deck's resistance to explosive loads, the proposed system can be used.

Keywords: concrete deck, blast loads, regular bridges, finite element analysis, performance level