

نشریه علمی پدافند غیرعامل

سال دوازدهم، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۰، (پیاپی ۴۷): صص ۶۱-۷۰

علمی - ترویجی

تأثیر پیش‌تنیدگی در پاسخ دینامیکی دال‌های بتنی در برابر انفجار

سیدشهاب امامزاده^{*}

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۱۷

چکیده

این پژوهش به منظور بررسی توانایی دال‌های پیش‌تنیده بتنی در مقابل انفجار با اهداف پدافند غیرعامل به روش سازه‌ای صورت پذیرفته است. در این تحقیق با نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس دال‌های یک‌طرفه و دوطرفه بتنی مدل شده‌اند و تحلیل دینامیکی به روش تاریخچه زمانی از نوع گام به گام صریح انجام شد. برای بتن مدل غیرخطی خرابی پلاستیک و برای فولاد و تاندون‌های پیش‌تنیدگی مدل خطی بکار گرفته شد. بارگذاری انفجاری به روش تجربی و با استفاده از مدل CONWEP به نمونه‌های دال اعمال گردید و شرایط مرزی آزاد، مفصلی برای لبه‌های دال‌های مورد بررسی تعریف گردید. نتایج حاصل نشان داد رفتار بتن در برابر انفجار، با پیش‌تنیدگی کاملاً بهبود می‌یابد. البته مقدار بهینه پیش‌تنیدگی و فاصله تاندون‌ها برای بهبود رفتار دال در برابر انفجار با مدل‌سازی‌های بیشتر قابل محاسبه است. نتایج مدل اجزای محدود نشان داد که حداکثر تنش در بتن پیش‌تنیده به سه برابر تنش تجربه‌شده در بتن آرمه می‌رسد. همچنین پیش‌تنیده کردن دال، خیز حداکثر را حدود ۳ cm نسبت به دال بتن آرمه کاهش داد. می‌توان به‌طور قطعی گفت که پیش‌تنیدگی مسیری مناسب برای بهبود رفتار دال‌ها در برابر انفجار در استحکامات پدافندی ضد انفجار است. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان می‌دهد که هندسه دال اعم از یک‌طرفه یا دوطرفه بودن آن و موقعیت انفجار بر مقادیر تنش و خیز ناشی از بارگذاری انفجاری تأثیر دارد.

کلیدواژه‌ها: دال بتنی، پیش‌تنیده، آباکوس، انفجار

۱- مقدمه

موج انفجار، ضربه‌ای متشکل از هوای فشرده است که به‌صورت شعاعی و با سرعت فراصوت از سطح ماده منفجره به سمت محیط اطرافش منتشر می‌شود، با انبساط این موج و در زمانی که موج در مسیر انفجار به موانع برخورد می‌کند، منعکس شده و در نتیجه فشار ناشی از این موج چند برابر می‌شود و می‌تواند باعث خسارات مالی و جانی گسترده‌ای شود؛ بنابراین رفتار اعضای سازه‌ای در مقابل اثرات انفجار از اهمیت قابل توجهی برخوردار است و تجارب طراحی زیادی در این زمینه به‌دست آمده است [۲].

پدیده انفجار عمدتاً یک واکنش شیمیایی در مقیاس بسیار بزرگ و ناگهانی است که در اثر آن ماده منفجره اولیه به گازی با دما و فشار بسیار بالا تبدیل می‌شود (تغییر حالت) که می‌توان آن را نیروی دینامیکی از نوع ضربه قلمداد کرد. به عبارتی انفجار به‌صورت آزاد شدن ناگهانی و بسیار سریع حجم زیادی از انرژی می‌باشد که تولید نور، گرما، صدا و موج ضربه‌ای می‌نماید. موج ضربه‌ای شامل هوای بسیار متراکمی است که به‌صورت شعاعی و کروی با سرعتی در حدود سرعت صوت از منبع انفجار به سمت خارج حرکت می‌کند.

با توجه به حوادث ناشی از وجود لوله‌های گاز، حوادث غیرمترقبه، منفجر شدن خودروها در پارکینگ به علت نشت بنزین و ... که منجر به منفجر شدن ساختمان می‌شوند و یا اتفاقات عمدی مانند خرابکاری، بمب‌گذاری و اعمال تروریستی در اقصی نقاط جهان، شناسایی راهکارهای لازم برای محافظت از ساختمان در برابر انفجار ضروری است. دال‌های پیش‌تنیده بتنی می‌توانند کسب اطمینان برای موضوع فوق‌الذکر را حاصل نمایند.

معمول‌ترین کاربرد پیش‌تنیدگی در بتن است که با اعمال آن به عضو بتنی موجب به‌وجود آمدن یک نیروی فشار محوری می‌شود که همه یا قسمتی از تنش‌های کششی عضو تحت اثر بارگذاری خارجی را بی‌اثر می‌کند. بتن پیش‌تنیده کاربردهای بسیاری از جمله در روسازی، تیرها و دال‌ها دارد. دال‌های پیش‌تنیده دارای مقاومت بالا در مقابل انفجار و ضربه هستند؛ و به‌جای سازه‌های بتنی معمولی در استحکامات ضد انفجار بکار می‌روند.

ارزیابی احتمالاتی خرابی پیش‌رونده به علت انفجار نشان می‌دهد که طرح مقاوم‌سازی لرزه‌ای تا حدود زیادی بر افزایش مقاومت اعضای سازه‌ای در برابر انفجار و کاهش احتمال خرابی پیش‌رونده تأثیرگذار است [۳].

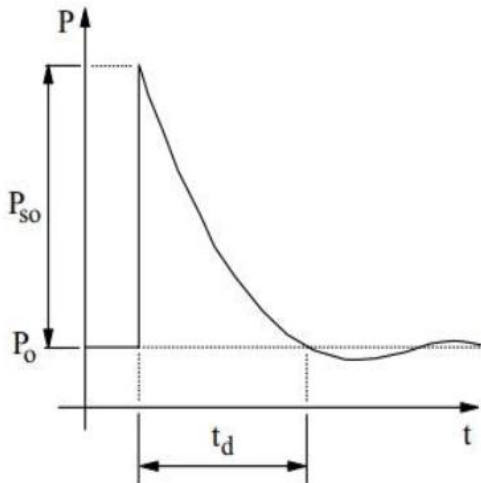
در برخی تحقیقات، قابلیت اعتماد تیرها و دال‌های بتنی با شرایط تکیه‌گاهی مختلف تحت اثر بار انفجاری ارزیابی شده و احتمال شکست برشی و خمشی به‌دست آمده است [۴]. به‌علت

بیشتر مطالعات در زمینه بررسی اثر انفجار بر سازه‌ها به سال‌های ۱۹۳۹ تا ۱۹۴۵ (زمان جنگ جهانی دوم) برمی‌گردد. می‌توان گفت جنگ جهانی دوم منبعی از آزمایش‌های ارزشمند (بدون در نظر گرفتن خسارت‌های جانی) به شمار می‌آید که از ساده‌ترین سازه‌ها مانند دیوار و پناهگاه تا سازه‌های سنگین مانند پل، تونل و پناهگاه‌های زیر دریا تحت تأثیر انفجار قرار گرفتند. به همین دلیل در سال ۱۹۳۸ کمیته‌ای به نام تحقیقات دفاع ملی تشکیل شد و به بررسی اثر انفجار بر سازه‌های مختلف پرداخت و میزان خرابی وارد بر سازه‌ها نسبت به نوع سازه، ضخامت سطح برخورد، نوع و وزن ماده منفجره و میزان فاصله از محل انفجار را بررسی کرد.

افزایش رفتارهای تروریستی بر سازه‌های زیربنایی و حمل و نقل، یک هشدار برای امنیت ملی است. طراحی سازه‌ها در برابر بارهای انفجاری در گذشته فقط محدود به ساختمان‌های نظامی و ساختمان‌های مرتبط با فعالیت‌های هسته‌ای و سوختی می‌شد. امروزه اکثر سازه‌های ارتباطی از جمله جاده‌ها و پل‌ها نیز باید در برابر انفجار مقاوم باشند [۱].

افزایش حملات تروریستی در سراسر دنیا و امکان بمب‌گذاری در نزدیکی و همچنین داخل ساختمان‌ها و اماکن شهری باعث شده است که طراحی ساختمان‌ها در مقابل بارهای دینامیکی ناشی از انفجار مورد توجه ویژه قرار گیرد. کاهش خطرات ناشی از حملات تروریستی بر ضد ساختمان‌های مسکونی مسأله بحث‌برانگیزی است. از طرف دیگر تعیین و پیش‌بینی زمان، دلیل و چگونگی وقوع حملات تروریستی کاری دشواری است؛ بنابراین پارامترهای زیادی برای احداث یک سازه مقاوم در برابر انفجار باید در نظر گرفته شود. مطالعاتی که تاکنون در این زمینه انجام گرفته بر روی سازه‌ها و ساختمان‌های نظامی و صنعتی متمرکز بوده است، لیکن با توجه به افزایش حملات تروریستی در رابطه با ساختمان‌های غیرنظامی، بی‌تردید طراحی سازه‌های ساختمانی در برابر بارهای ناشی از انفجار بسیار مهم و ضروری است.

انفجارها، آسیب شدیدی به ساختمان‌ها وارد می‌کنند و گاهی سبب خرابی پیش‌رونده و کامل می‌شوند. فشارهای ناشی از انفجار یکی از مخرب‌ترین بارهایی است که سازه ممکن است تجربه کند. بسیاری از سازه‌های موجود در مقابل بارهای ناشی از موج انفجار آسیب‌پذیر بوده و باید مقاومت آنها در برابر چنین بارهایی مورد بررسی قرار گیرد تا با تشخیص نقاط حساس و بحرانی بتوان با استفاده از مصالح و شیوه‌های اجرایی مناسب با بهره‌گیری از روش‌های مختلف، سازه را مقاوم ساخت.



شکل (۱): تاریخچه فشار وارد به سازه ناشی از انفجار در مدل کانوپ

تاریخچه زمانی فشار ناشی از انفجار در مدل CONWEP طبق رابطه (۱) که به تابع نمایی فریدلندر معروف است به دست می‌آید [۱۶]:

$$P(t) = P_0 + P_{s0} \left(1 - \frac{t}{t_d}\right) \exp\left(-b \frac{t}{t_d}\right) \quad (1)$$

در این رابطه فشار حداکثر رویداد انفجار P_{s0} بر حسب bar از تحقیقات کینگری-بولماش [۱۷] طبق رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$P_{s0} = 6784 \frac{w}{R^3} + 93 \left(\frac{w}{R^3}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

که در آن w وزن ماده منفجره معادل TNT و R فاصله محل انفجار تا سازه و b یک ضریب ثابت تجربی است.

۲-۲- مدل رفتار خرابی بتنی

بتن با تنش تسلیم فشاری و کششی مستخرج از نتایج آزمایشگاهی و با رفتار خرابی خمیری (CDP مدل شده می‌شود [۱۸]). مدل توانایی در نظر گرفتن نرخ کرنش بتن را به صورت خودکار ندارد (بر خلاف فولاد). لذا باید اطلاعات جدید مربوط به منحنی سختی کششی را به صورت جدولی از کرنش ترک خوردگی (یا جابه‌جایی) و همچنین اطلاعات جدید مربوط به سخت شدگی فشاری به صورت جدول کرنش غیرالاستیک به طور دستی در نرم‌افزار تعریف گردد [۱۹]. در این پژوهش، از روش تکرار برای در نظر گرفتن تأثیر نرخ بارگذاری روی خواص بتن استفاده شده است. این روش در هر تکرار خود شامل دو گام است. در گام نخست پس از تحلیل بتن با خواص استاتیکی، به

اهمیت اعضای بتنی در استحکامات، در تحقیقات دیگری آزمایش انفجار در هوا با مقیاس کامل بر روی دال‌هایی با شرایط مرزی مختلف انجام شده است [۵].

تاکنون تجارب بسیاری در تحلیل و طراحی برخی اعضای مقاوم در برابر انفجار مانند عرشه پل‌ها [۶]، ستون بتنی [۷]، دال بتنی [۸، ۹ و ۱۰] و سایر سازه‌های بتنی در برابر انفجار به دست آمده است [۲]. بیشتر این تحقیقات بر روی بتن‌های با عملکرد بالا [۱۱ و ۱۲] یا بتن‌های مسلح به نوارهای FRP انجام شده است [۱۳]. با این حال در مراجع طراحی دال‌های پیش‌تنیده [۱۴ و ۱۵] کمتر به بارگذاری انفجاری پرداخته شده است. لذا در ادامه به مقایسه مقاومت دال‌های پیش‌تنیده با دال‌های بتن آرمه در برابر بارهای انفجاری پرداخته می‌شود.

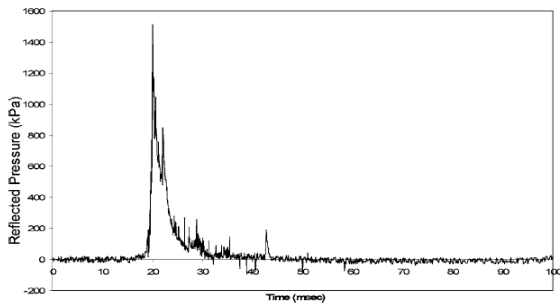
۲- معادلات حاکم

۲-۱- مدل انفجار

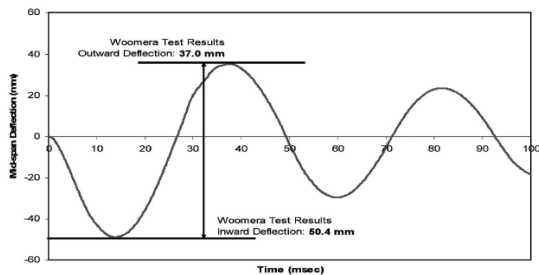
از محل انفجار تا سازه معادله انتشار موج سه‌بعدی حاکم است. این معادله در هر لحظه فشار ناشی از انفجار را در هر نقطه دلخواه مشخص می‌نماید. تاریخچه زمانی فشار در هر نقطه دلخواه مطابق شکل (۱) است. مدت زمان موج انفجار t_d بسیار کوچک و دامنه فشار آن P_{s0} بسیار بزرگ است. برای اعمال بار انفجار می‌توان از مدل‌های تجربی استفاده نمود. در این حالت نیازی به حل معادلات موج نبوده و بر مبنای محدوده وسیعی از داده‌های آزمایشی روابطی برای تاریخچه فشار ناشی از انفجار به دست می‌آید. یکی از این مدل‌ها CONWEP است که در نرم‌افزار آباکوس تعریف شده است. این مدل برای هر دو نوع انفجارهای زمینی (surface blast) و انفجارهای هوایی (air blast) قابل استفاده است اصلی‌ترین مزیت این مدل در آن است که بارگذاری به طور مستقیم بر روی سازه تحت انفجار تعریف می‌شود و در حقیقت نیازی به مدل‌سازی و در نظر گرفتن محیط سیال (هوا) نیست. در این مدل داده‌های تجربی برای دو نوع از موج‌ها موجود است. نوع اول موج‌های کروی که در هوا ایجاد می‌شوند و نوع دوم موج‌های نیمکره که در انفجار روی سطح زمین ایجاد می‌شوند. در حالت دوم اثرات زمین در مدل‌سازی لحاظ شده است. در مدل CONWEP انعکاس موج شوک در نظر گرفته نمی‌شود. و این مدل صرفاً در تحلیل‌های سه‌بعدی استفاده می‌شود. در این مدل، سطحی که برای اعمال بارگذاری شوک انتخاب می‌شود، باید متعلق به المان‌های توپر solid، پوسته‌ای shell و یا غشایی membrane باشد.



شکل (۲): تصویری از نمونه مورد آزمایش [۲۱]

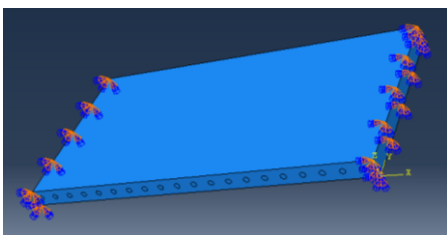


شکل (۳): تاریخچه فشار بارگذاری انفجار در فاصله ۳۰ متری



شکل (۴): تاریخچه تغییر شکل ماکزیمم در مدت انفجار

جهت نشان دادن صحت نرم‌افزار مورد استفاده در این پژوهش (آباکوس) مدلی دقیقاً مطابق با شکل و ابعاد ارائه شده در مقاله و همچنین شرایط بارگذاری و شرایط مرزی منطبق با نمونه آزمایش شده UHSC-1، شبیه‌سازی شده است. تلاش شده است که تمامی شرایط شبیه‌سازی مدل دال بتنی پیش‌تنیده مانند هندسه و بارگذاری و شرایط مرزی، مطابق با شرایط واقعی بیان شده در مرجع [۲۱] باشد؛ مدل هندسی در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل (۵): مدل هندسی و شرایط تکیه‌گاهی

کمک نمودار تاریخچه زمانی کرنش فشاری و کششی و با در نظر گرفتن بیشترین مقدار کرنش بتن در طول زمان بارگذاری، نرخ کرنش متوسط بتن به دست می‌آید. سپس در گام دوم، با استفاده از روابط مندرج در مرجع [۲۰] مقادیر ضریب افزایش دینامیکی DIF به دست آمده و به کمک آنها خواص بتن در کشش و فشار بروز شده و بتن با این خواص جدید تحلیل می‌شود. نرخ کرنش جدید به دست آمده با نرخ کرنشی که تحلیل گام دوم با آن انجام شد، مقایسه می‌گردد و در صورت اختلاف زیاد، این مرحله‌ها دوباره انجام می‌شوند. این چرخه آن قدر تکرار می‌شود تا مقادیرهای نرخ کرنش بتن به یک عدد همگرا شوند.

۳- مدل عددی

مدل عددی بر مبنای روش اجزای محدود و با فرض رفتار غیرخطی بتن و اعمال نیروی پیش‌تنیدگی در کابل‌ها خواهد بود. در ادامه نحوه مدل‌سازی و سپس صحت سنجی مدل و نهایتاً تحلیل یک نمونه موردی ارائه خواهد شد.

۳-۱- صحت سنجی مدل عددی

اولین مرحله در مدل‌سازی عددی، اطمینان از صحت نتایج به دست آمده از نرم‌افزار مورد استفاده (آباکوس) است. برای اعتبارسنجی نرم‌افزار از نتایج تحقیقات آزمایشگاهی انگو و همکاران [۲۱] تحت عنوان بررسی رفتار دال‌های بتنی پیش‌تنیده پرمقاومت تحت بارگذاری انفجار استفاده می‌شود. در این تحقیق، یک دال بتنی پیش‌تنیده پرمقاومت با مشخصات جدول (۱) و شکل (۲) تحت فشار بار انفجار واقعی طبق شکل (۳) قرار گرفته و نتایج آزمایش به صورت نمودار حداکثر تغییر شکل در مدت انفجار در شکل (۴) ارائه شده است.

جدول (۱): مشخصات نمونه مورد آزمایش [۲۱]

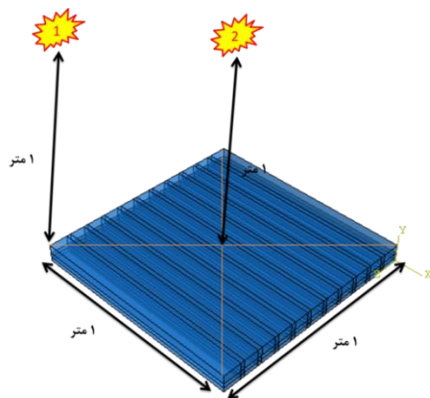
نام پنل	نوع پائل	مقاومت بتن (MPa)	ضخامت (mm)	فاصله انفجار (m)	ابعاد (m)
UHSC-1	پیش‌تنیده	۱۶۴/۲	۱۰۰	۳۰	۲×۱

کابل‌ها پیش‌تنیده بدون غلاف (Bounded) بوده و با المان محدود توپر بنام Solid و به قطر ۲ cm و جنس فولاد با معیار تسلیم فون مایسز، مدل‌سازی می‌شوند. فاصله کابل‌ها از هم ۱۰ cm است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، شکل نمودار، میزان جابجایی و همچنین شیب نمودار در هر دو روش تجربی و عددی، همخوانی دارد که این نشان‌دهنده صحت عملکرد نرم‌افزار مورد استفاده در این پژوهش (آباکوس) است.

۳-۲- مدل دال بتنی دوطرفه

یک دال بتنی با دو نوع تسلیح آرماتور و کابل پیش‌تنیدگی مطابق شکل (۹)، به ابعاد $1 \times 1 \text{ m}$ و به ضخامت 8 cm تعریف شده است. این دال در معرض انفجار 1 کیلوگرم TNT در فاصله مقیاس شده z برابر 0.215 قرار دارد.



شکل (۹): موقعیت قرارگیری نقاط انفجار نسبت به دال بتنی

بر اساس موقعیت انفجار، نوع تسلیح بتن و نسبت طول به عرض، شش مدل طبق جدول (۲) ساخته شده است.

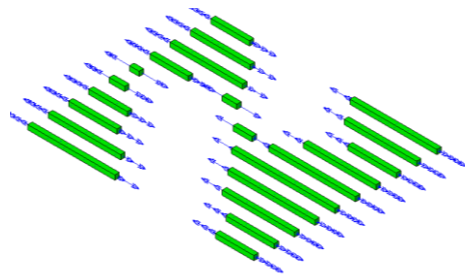
جدول (۲): تعریف مدل‌ها

نام مدل	نوع تسلیح	نقطه انفجار
مدل ۱	دال بتن مسلح دوطرفه	۱
مدل ۲	دال بتن مسلح دوطرفه	۲
مدل ۳	دال پیش‌تنیده دوطرفه	۱
مدل ۴	دال پیش‌تنیده دوطرفه	۲
مدل ۵	تاندون پیش‌تنیده دال یک‌طرفه	۱
مدل ۶	میلگرد دال یک‌طرفه	۱

۳-۲-۱- شبیه‌سازی عددی

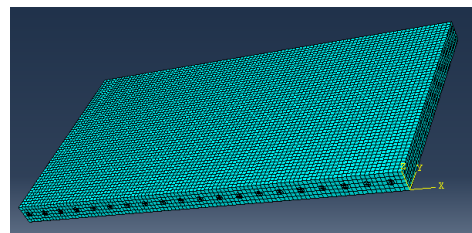
در شبیه‌سازی المان محدود، دال بتنی با المان‌های آجری هشت‌گانه و میلگردها با المان‌های دوگره‌ای خطی از نوع خرپا (Truss) مدل شدند که در اجزای خرابایی فقط نیروی محوری تعریف می‌شود. تاندون‌های پیش‌تنیده به قطر 2 cm نیز با

همچنین علاوه بر شرایط مرزی کلی، یک میدان پیش‌تنیدگی در کابل‌ها تعریف می‌شود که نیروی پیش‌تنیدگی را به نرم‌افزار و اعضای کابلی گسسته‌سازی شده با المان‌های solid معرفی می‌کند. این نیروی پیش‌تنیدگی که معادل 2 مگاپاسکال تعریف شده است در شکل (۶) کاملاً قابل مشاهده است.



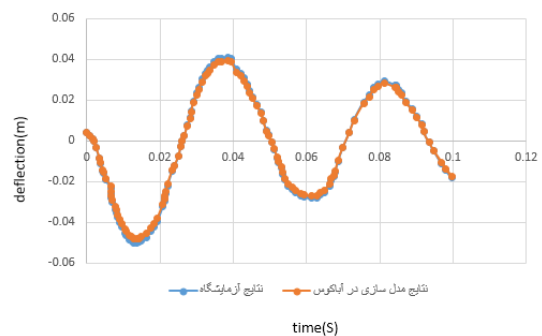
شکل (۶): تعریف میدان پیش‌تنیدگی برای کابل‌ها

پس از انجام چندین تحلیل با ابعاد شبکه درشت تا ریز، جواب‌های مستقل از شبکه به دست آمد که طرح نهایی شبکه اجزای محدود با حداکثر بعد 3 cm برای المان‌ها در شکل (۶) نشان داده شده است.



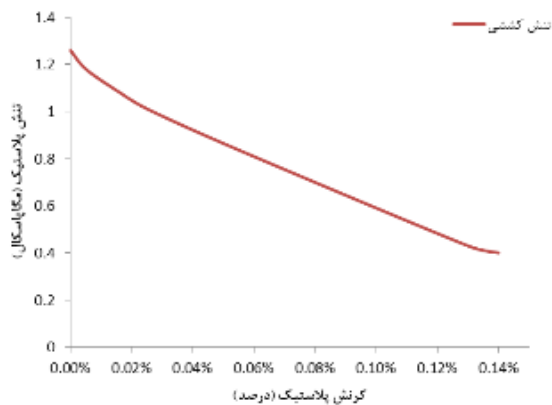
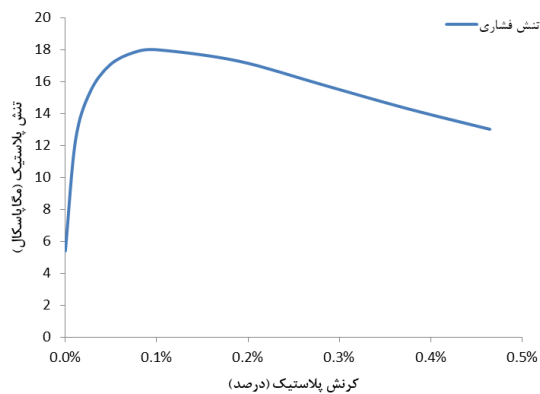
شکل (۷): مش‌بندی مدل دال پیش‌تنیده

شکل (۸) نشان‌دهنده میزان تغییر شکل حداکثر دال بتنی پیش‌تنیده تحت بارگذاری بار انفجار است؛ نمودار آبی، میزان جابجایی به دست آمده از آزمایش صورت گرفته در مقاله نگو و همکاران و نمودار نارنجی، جابجایی مدل شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس را نشان می‌دهد.



شکل (۸): مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی

که در فاصله ۱ متری مدل قرار دارد.



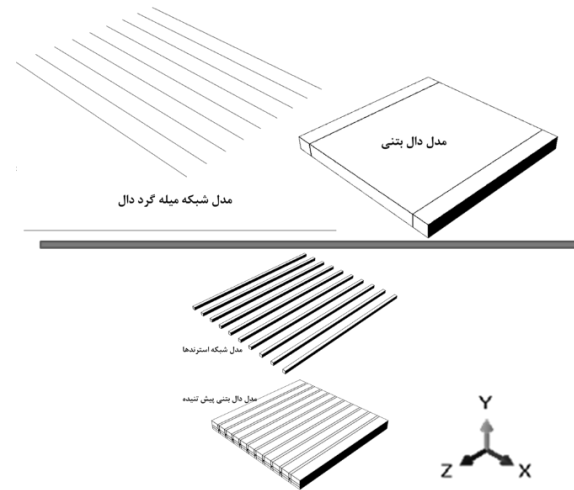
شکل (۱۱): نمودار تنش-کرنش غیرخطی بتن

جدول (۳): تعریف پارامترهای مدل کانوپ

مقدار	نام نرم‌افزاری	پارامتر
۱۰۰	Equivalent mass of TNT	جرم معادل TNT
۱	Conversion for mass to kg	ضریب تبدیل جرم به کیلوگرم
۱	Conversion for mass to meters	ضریب تبدیل طول به متر
۱	Conversion for mass to seconds	ضریب تبدیل زمان به ثانیه
۱	Conversion for mass to pascal	ضریب تبدیل فشار به پاسکال
۰/۰۰۱	Time of detonation	زمان دتوئیشن
۰/۰۱	Magnitude scale factor	بزرگی ضریب مقیاس

به‌منظور مدل‌سازی انفجار، دو نقطه فرضی RP1 و RP2 به نرم‌افزار معرفی شده که تصویر آنها در صفحه دال به‌ترتیب بر روی گوشه و مرکز سطح دال قرار می‌گیرد. بار انفجار، معادل ۱ کیلوگرم TNT است که در ارتفاع یک متری به‌صورت کروی منفجر می‌شود و دال را تحت تأثیر قرار می‌دهد. دال علاوه بر بار

المان‌های آجری هشت‌گه‌ری شبیه‌سازی شدند. فاصله آرماتورها و کابل‌ها از یکدیگر ۱۰cm و در یک سفره فرض شده است. نیروی پیش‌تندیگی نیز ۲ مگاپاسکال فرض شده است. در شکل (۱۰) اجزای دال پیش از سرهم‌بندی و به‌صورت مجزا دیده می‌شوند.



شکل (۱۰): مقاطع مدل‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس

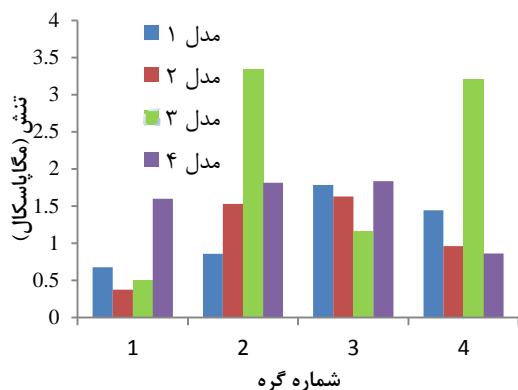
۳-۲-۲- رفتار غیرخطی بتن

در بخش معرفی مصالح نرم‌افزار، فولاد میله‌گردها با تنش تسلیم ۳۷۰ مگاپاسکال و مدول الاستیسیته ۲۰۵ مگاپاسکال به همراه مشخصات پلاستیک بر اساس تنش-کرنش معرفی شده است. همچنین برای معرفی بتن با تنش تسلیم فشاری و کششی مطابق شکل (۱۱) و رفتار آسیب خمیری و برای مدل‌سازی رفتار استرندهای پیش‌تندیگی از مدل فون مایسز استفاده شد.

۳-۲-۳- شرایط مرزی و بارگذاری

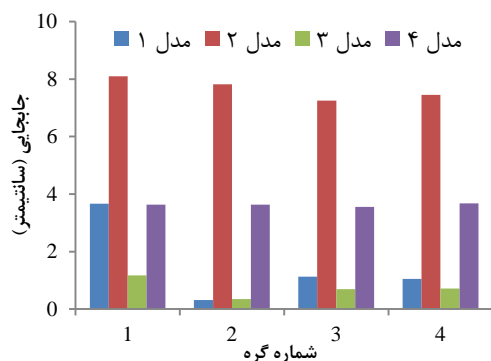
برای اعمال بار انفجار به مدل نرم‌افزاری از روش CONWEP استفاده شده است. این روش بر پایه محدوده وسیعی از داده‌های آزمایشی استوار است؛ نخست مقدار خرج انفجار بر حسب TNT معادل وارد شده که در یک نقطه مرجع در فاصله ۱ متری از مرکز دال انتخاب شده و سطح بالای دال در معرض انفجار، انتخاب شده و بار انفجاری که شکل کروی دارد اعمال می‌گردد. همان‌طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود مقدار TNT معادل ۱۰۰kg انتخاب شده که در تعریف موج انفجار بزرگی آن با مقیاس ۰/۰۱ تبدیل به TNT معادل ۱ kg شده است. همچنین زمان انفجار از ۱ ثانیه تبدیل به ۰/۰۰۱ ثانیه یا همان ۱ میلی‌ثانیه شده است. سطح صورتی‌رنگ، سطحی است که تحت تأثیر موج انفجار قرار می‌گیرد و نقطه قرمز رنگ محل انفجار است

همچنین خطوط خط‌چین مرتبط با مدل‌های منفجر شده در نقطه ۱ و خطوط ممتد مرتبط با مدل‌های منفجر شده در نقطه ۲ است.



شکل (۱۴): مقایسه تنش‌های مدل‌های چهارگانه در گره‌های مرجع

در شکل (۱۵) مقایسه جابجایی نهایی برای مدل‌های چهارگانه ارائه شده است. خطوط قرمز رنگ مربوط به مدل‌های پیش‌تنیده و خطوط مشکی مرتبط با مدل‌های بتن‌آرمه است. همچنین خطوط خط‌چین مرتبط با مدل‌های منفجر شده در نقطه ۱ و خطوط ممتد مرتبط با مدل‌های منفجر شده در نقطه ۲ است. همان‌طور که دیده می‌شود، با توجه به موقعیت انفجار و گره موردنظر، در جابجایی‌ها دال بتنی پیش‌تنیده بهترین عملکرد را دارد و نسبت به مدل‌های بتن‌آرمه جابجایی حداکثر (حدود ۸ cm در برابر حدود ۳/۵ cm کمتری دارند).

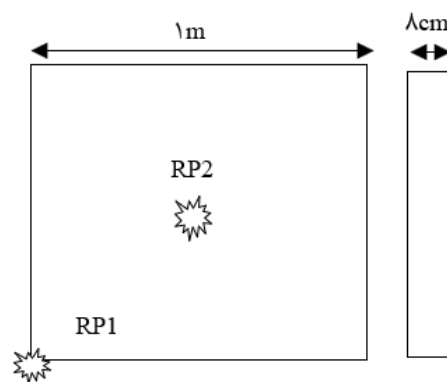


شکل (۱۵): مقایسه جابجایی‌های مدل‌های چهارگانه در گره‌های مرجع

۳-۳- مدل دال بتنی یک‌طرفه

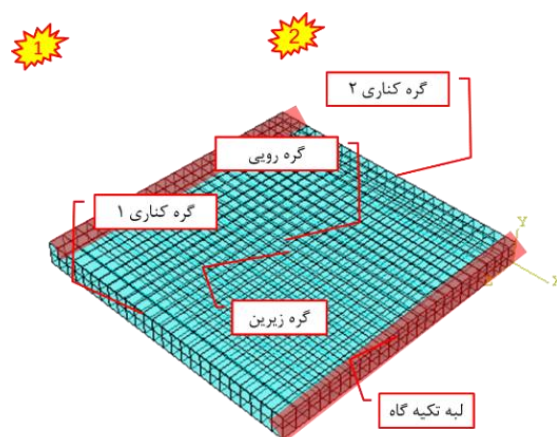
به‌منظور بررسی وضعیت رفتار پیش‌تنیده و بتن‌آرمه مدلی یک‌طرفه با دهانه بلند با نسبت طول به عرض برابر شش ساخته و که پلان آن در شکل (۱۶) نشان داده شده است. انفجار در مرکز دال و به فاصله ۱ متری از آن در نظر گرفته شده است.

انفجار تحت وزن خودش هم هست، همچنین شرایط مرزی مدل برای دال، در محل تکیه‌گاه فرضی دال (قرارگیری بر تیرها) دال به‌صورت مفصلی در هر سه راستا مقید شده است. همچنین برای اندرکنش بین میله‌گرد/استرند و بتن، آرماتورها را به‌صورت مدفون در نظر گرفته و دال بتنی به‌عنوان ناحیه میزبان در نرم‌افزار معرفی می‌شود. در شکل (۱۱) شرایط مرزی و موقعیت نقاط انفجار قابل مشاهده است.



شکل (۱۲): پلان موقعیت نقاط انفجار

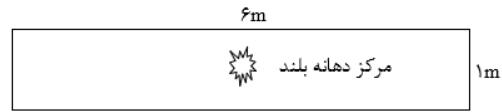
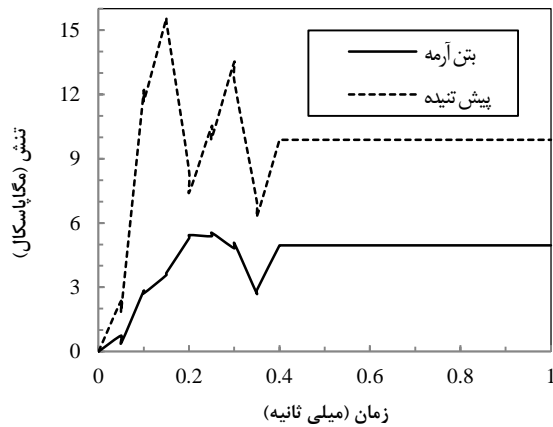
چهار نقطه مرجع روی دال بتنی به‌منظور مقایسه مدل‌ها تعریف شد. طبق شکل (۱۳)، نقاط مرجع عبارت‌اند از گره کناری ۱، گره کناری ۲، گره رویی ۳ و گره زیرین ۴. گره‌های کناری در دو لبه آزاد دال و گره رویی و زیرین در مرکز صفحه بالا و پایین دال قرار دارند. محل انفجار در نقاط ۱ و ۲ مشخص شده است.



شکل (۱۳): معرفی نقاط مرجع برای مقایسه نتایج

۳-۲-۴- نتایج

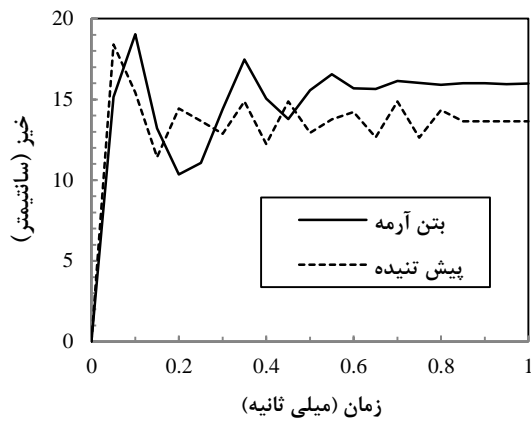
برای مقایسه دال بتن‌آرمه با پیش‌تنیده دو کمیت تنش و جابجایی مورد بررسی قرار گرفت. در شکل (۱۴) تنش‌ها در نقاط مرجع با یکدیگر مقایسه شده‌اند. محور افقی شماره گره‌های مرجع شکل (۱۳) است، خطوط قرمز رنگ مربوط به مدل‌های پیش‌تنیده و خطوط مشکی مرتبط با مدل‌های بتن‌آرمه است.



شکل (۱۶): پلان موقعیت انفجار در فاصله ۱ متری از دال یک طرفه

مطابق شکل (۱۷)، تنش‌های بیشتری تا سه برابر در بتن پیش‌تنیده نسبت به بتن آرمه ایجاد می‌شود. می‌توان این‌طور برداشت نمود که در حالت پیش‌تنیدگی بتن تمام ظرفیت خود را برای مقاومت در برابر نیروهای وارده به کار می‌گیرد و از این روی تنش‌های بیشتری در برابر خیز کمتری ایجاد می‌شود. این تفاوت مشابه مدل‌های قبلی است و می‌توان مشاهده کرد که در دهانه‌های بلند هم همچنان دال‌های پیش‌تنیده دارای عملکرد بهتری نسبت به دال‌های بتن آرمه هستند. حداکثر تنش در دال پیش‌تنیده برابر ۱۵/۵ مگاپاسکال به دست آمد که در دال بتن آرمه این مقدار به ۵/۲ مگاپاسکال کاهش یافت.

شکل (۱۷): مقایسه نتایج تاریخچه حداکثر تنش دال یک طرفه بلند

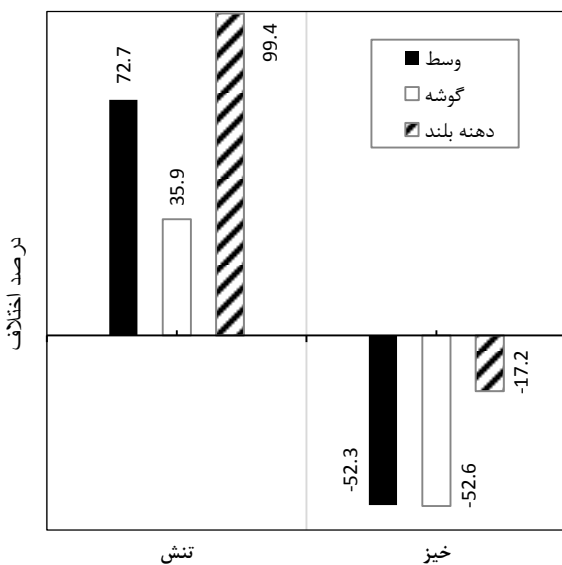


طبق شکل (۱۸)، خیز نهایی دال پیش‌تنیده حدود ۳ سانتیمتر کمتر از دال بتن آرمه است، در حالیکه تنش نهایی دال پیش‌تنیده دو برابر تنش نهایی دال بتن آرمه در مدل ۵ و ۶ است.

با دقت در شکل (۱۸) می‌توان دریافت که در دال با دهانه بلند میزان خیز در لحظه انفجار در هر دو حالت پیش‌تنیده و بتن آرمه مشابه است، اما خیز نهایی (پسماند) بتن پیش‌تنیده ۳ cm کمتر از بتن آرمه است. در شکل (۱۹)، درصد اختلاف تنش و خیز میان مدل‌های پیش‌تنیده و بتن آرمه مقایسه شده‌اند. محور افقی، تنش و خیز را به‌طور مجزا نشان می‌دهد. در محور قائم درصد اختلاف میان نمونه‌های پیش‌تنیده و بتن آرمه به نمایش درآمده است که مقادیر مثبت بیانگر بیشتر بودن مقادیر نسبت به مدل‌های بتن آرمه و بالعکس می‌باشد. همچنین نمودار هیستوگرام به سه دسته تقسیم‌بندی شده است. دسته مشکی مربوط به مدل‌هایی است که محل انفجار آنها در وسط دال دوطرفه (نقطه RP2)، دسته سفید مدل‌های منفجرشده در گوشه دال دوطرفه (نقطه RP1) و دسته هاشور مربوط به مدل‌های با دال یک طرفه و انفجار در فاصله یک متری از مرکز دهانه بلند است.

شکل (۱۸): مقایسه خیز وسط دهانه در مدل ۵ و ۶

با دقت در هیستوگرام شکل (۱۹) می‌توان مشاهده کرد که



شکل (۱۹): اختلاف حداکثر تنش و خیز دال پیش‌تنیده نسبت به بتن آرمه

وقتی محل انفجار در نقطه وسط دال باشد، تنش‌های پیش‌تنیده تا ۷۳٪ بیشتر از حالت بتن آرمه است، اما این اختلاف وقتی محل انفجار در گوشه دال باشد به ۳۶٪ کاهش پیدا می‌کند. در دهانه‌های بلند تقریباً دو برابر حالت بتن آرمه، در بتن پیش‌تنیده تنش ایجاد می‌شود، در حالی که خیز آن تنها ۱۷٪ کمتر از حالت بتن آرمه است. همچنین مقدار اختلاف خیز برای نقطه انفجار در گوشه دال یا وسط دال (مربعی) تفاوتی ندارد و در هر دو حالت میزان خیز حالت پیش‌تنیدگی حدود ۵۲٪ کمتر از خیز بتن آرمه است.

structures,” *Advances in Structural Engineering*, vol. 19, no. 8, pp. 1193-1223, 2016.

- [3] D. Asprone, F. Jalayer, A. Prota and G. Manfredi, “Probabilistic Assessment of Blast-Induced Progressive Collapse in A Seismic Retrofitted RC Structure,” In 14th World Conf. on Earthquake Engineering, Beijing, China 2008.
- [4] H.Y. Low and H. Hao, “Reliability analysis of direct shear and flexural failure modes of RC slabs under explosive loading,” *Engineering Structures*, vol. 24, no.2, pp. 189-198, 2002.
- [5] R. Castedo, P. Segarra, A. Alanon, L. M. Lopez, A. P. Santos, and J. A. Sanchidrian, “Air blast resistance of full-scale slabs with different compositions: Numerical modeling and field validation,” *International Journal of Impact Engineering*, vol. 86, pp. 145-156, 2015.
- [6] E. MahdaviSefat and M. Vatani, “Behaviour of Prestressed Concrete Bridge Under Blast Loading,” *Passive Defense*, vol.7, no.1, pp. 1-10, 2016. (In Persian)
- [7] H. Hao, M. Stewart, Z. Xian Li and Y. Shi, “RC Column Failure Probabilities to Blast Loads,” *International Journal of Protective Structures*, vol. 1, pp. 571-591, 2010.
- [8] W. Wang, D. Zhang, F. Lu, S. Wang, and F. Tang. “Experimental study and numerical simulation of the damage mode of a square reinforced concrete slab under close-in explosion,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 27, pp. 41-51, 2013.
- [9] S. Yao, D. Zhang, X. Chen, F. Lu, and W. Wang, “Experimental and numerical study on the dynamic response of RC slabs under blast loading,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 66, pp. 120-129, 2016.
- [10] G. Thiagarajan, A.V. Kadambi, S. Robert, and C.F. Johnson, “Experimental and finite element analysis of doubly reinforced concrete slabs subjected to blast loads,” *International Journal of Impact Engineering*, vol. 75, pp. 162-173, 2015.
- [11] J. Li, CH. Wu, and H. Hao, “Investigation of ultra-high performance concrete slab and normal strength concrete slab under contact explosion,” *Engineering Structures*, vol. 102, pp. 395-408, 2015.
- [12] L. Mao, S. J. Barnett, A. Tyas, J. Warren, G. K. Schleyer and S. S. Zaini, “Response of small scale ultra high-performance fibre reinforced concrete slabs to blast loading,” *Construction and Building Materials*, vol. 53, pp. 822-830, 2015.
- [13] Z. Tabatabaei and S. Jeffery, “Experimental and numerical analyses of long carbon fiber reinforced concrete panels exposed to blast loading,” *International Journal of Impact Engineering*, vol. 57, pp. 70-80, 2013.
- [14] M.K. Hurst, “Prestressed concrete design,” 2nd Edition CRC Press, 2019.
- [15] F.K. Kong and R.H. Evans, “Reinforced and prestressed concrete,” 3rd edition, CRC Press, 2017.
- [16] D. W. Hyde, “User’s Guide for Microcomputer Programs CONWEP and FUNPRO Applications of TM5-855-1: Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons,” U.S. Army Engineers, 1988.
- [17] C. N. Kingery and G. Bulmash, “Airblast Parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Surface Burst,” Report ARBL-TR-02555, U.S. Army BRL, Aberdeen Proving Ground, MD, 1984.
- [18] ABAQUS User Manual, 2019.
- [19] T. Telford, MC90 FIP-CEB Model Code, 1990.

۴- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر اثر پیش‌تنیدگی دال‌های بتنی به‌صورت عددی با مدل بارگذاری CONWEP برای تعیین فشار ناشی از انفجار مدل‌سازی شدند. تحلیل دینامیکی دال‌ها به روش گام به گام صریح انجام شد و تاریخچه حداکثر تنش و خیز ثبت گردید. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی نشان داد که هندسه دال اعم از یک‌طرفه یا دوطرفه بودن آن و موقعیت انفجار بر مقادیر تنش و خیز ناشی از بارگذاری انفجاری تأثیر دارد. در قسمت دیگری از این تحقیق پاسخ دینامیکی دال‌های بتنی پیش‌تنیده با دال بتن-آرمه مقایسه گردید. نتایج مدل اجزای محدود نشان داد که حداکثر تنش در بتن پیش‌تنیده به سه برابر تنش تجربه شده در بتن آرمه می‌رسد. همچنین پیش‌تنیده کردن دال، خیز حداکثر را حدود ۳ cm نسبت به دال بتن‌آرمه کاهش داد. می‌توان این‌طور برداشت نمود که در حالت پیش‌تنیدگی بتن تمام ظرفیت خود را برای مقاومت در برابر نیروهای وارده به کار می‌گیرد و از این روی تنش‌های بیشتری در برابر خیز کمتری ایجاد می‌شود. همچنین وقتی که محل انفجار در نقطه وسط دال باشد، تنش‌های پیش‌تنیده تا ۷۳٪ بیشتر از حالت بتن‌آرمه است، اما این اختلاف وقتی محل انفجار در گوشه دال باشد به ۳۶٪ کاهش پیدا می‌کند. در دهانه‌های بلند و در دال پیش‌تنیده تا دو برابر دال بتن‌آرمه، تنش‌ها افزایش می‌یابد، در حالی که خیز دال پیش‌تنیده تنها ۱۷٪ کمتر از دال بتن‌آرمه است. همچنین مقدار اختلاف خیز برای نقطه انفجار در گوشه دال یا وسط دال (مربعی) تفاوتی ندارد و در هر دو حالت میزان خیز دال پیش‌تنیده ۵۲٪ کمتر از خیز دال بتن‌آرمه به‌دست آمد. در دال‌های یک‌طرفه با دهانه‌های بلند نیز مشاهده شده که همچنان دال‌های پیش‌تنیده دارای عملکرد بهتری نسبت به دال‌های بتن‌آرمه هستند. در مجموع نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که رفتار بتن در برابر انفجار، با پیش‌تنیدگی کاملاً بهبود یافته است، اما مقدار بهینه پیش‌تنیدگی، فاصله‌گذاری استرندها و حداکثر دهانه دال برای بهینه‌ترین بهبود رفتار دال با مدل‌سازی‌های بیشتر و مطالعات بیشتر قابل انجام است و آنچه مشخص است می‌توان به‌طور قطعی گفت که پیش‌تنیدگی مسیری مناسب برای بهبود رفتار دال‌ها در برابر انفجار است.

۵- مراجع

- [1] K. Bi, and H. Hao, “Numerical simulation of pounding damage to bridge structures under spatially varying ground motions,” *Engineering Structures*, vol. 46, pp. 62-76, 2013.
- [2] H. Hao, Y. Hao, J. Li and W. Chen, “Review of the current practices in blast-resistant analysis and design of concrete

-
- [20] A. K. Zanganeh, "Shear Strength of Reinforced Concrete Beams Subjected to Blast Loading," KTH Architecture and Building, M.Sc. Thesis, Stockholm Sweden, 2012.
- [21] T. Ngo, P. Mendis and T. Krauthammer, "Behavior of ultrahigh-strength prestressed concrete panels subjected to blast loading," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 133, no. 11, pp. 1582-1590, 2007.

The Effect of Prestressing on the Dynamic Response of Concrete Slabs under Blast Loading

S. Sh. Emamzadeh*

Abstract

This study has been conducted to investigate the ability of prestressed concrete slabs against explosion with passive defense objectives by the structural method. In this research, one-way and two-way concrete slabs have been modeled with Abaqus finite element software. The dynamic analysis has been performed by the explicit step-by-step time history method. The non-linear plastic failure model has been used for the concrete behavior, whilst a linear model has been used for the steel and prestressed tendons. Explosive loading has been applied to the slab samples experimentally using the CONWEP model and free boundary conditions have been defined for the edges of the studied slabs. The results of the finite element model shows that the maximum stress in prestressed concrete reaches three times the stress experienced in the reinforced concrete. Also, prestressing the slab reduces the maximum deformation by about 3 cm compared to the reinforced concrete slab. The results show that the behavior of concrete against explosion is remarkably improved by prestressing. However, the optimal amount of prestressing and the distance of the tendons required to improve the slab behavior against explosion, can be calculated through more modeling. It can be said with certainty that prestressing is a good way to improve the behavior of slabs against explosion in explosion-proof defensive fortifications. The results show that the effect of slab geometry, whether it is one-way or two-way and the location of the explosion, affect the values of stress and deflection due to the explosive load.

Key Words: *Concrete Slab, Prestress, Explosion, Abaqus*