

مطالعه عددی تأثیر دال بتن آرمه فداشونده بر عملکرد سازه‌های بتن آرمه قوسی شکل زیرزمینی تحت بار انفجار

سید صفر صالح کوتاه

گروه مهندسی عمران، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

اسماعیل ایزدی زمان‌آبادی*

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

e.izadi@pci.iaun.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۹/۱۲ تاریخ پذیرش نهایی: ۹۶/۱۲/۰۵

چکیده:

با گسترش روزافزون تکنولوژی ساخت تجهیزات نظامی با تخریب بالا، نیاز به ساخت سازه‌هایی با مقاومت قابل قبول در برابر انفجار در مراکز حساس و حیاتی بیش از پیش احساس می‌شود. این سازه‌ها به عنوان امکانات شهری در زمان صلح و در زمان جنگ و بلایای طبیعی عاملی برای حفظ جان مردم محسوب می‌شوند. به علت عدم وجود اطلاعات تجربی مناسب و مشکلات روش‌های آزمایشگاهی در زمینه انفجار سازه‌ها، استفاده از روش‌های مدل‌سازی عددی و اجزا محدود می‌تواند کمک شایانی در طراحی سازه‌ها و برآورد بارهای وارد بر آنها داشته باشد. در این تحقیق تأثیر دال بتن آرمه فداشونده بر عملکرد سازه‌های بتن آرمه قوسی شکل زیرزمینی تحت بار انفجار با جزئیات متداول و همچنین پارامترهای تأثیرگذار مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. جهت حل از نرم‌افزار اجزا محدود *LS-Dyna* استفاده شده و مدل‌های بهینه‌سازی شده قوس‌های بتنی تحت میزان مختلف مواد منفجره مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحلیل‌های مختلف صورت گرفته نشان می‌دهد که در صورت قرار دادن دال بتنی فداشونده روی تاج سازه قوسی شکل زیرزمینی تخریبی روی سازه مورد مطالعه صورت نمی‌گیرد و فقط تخریب مربوط به دال بتنی خواهد بود که با افزایش میزان TNT تخریب روی آن بیشتر می‌شود و در اصل وجود این دال باعث پخش قدرت انفجار در سطح بیشتری از خاک می‌گردد که این موجب کاهش انتقال نیرو به سازه مورد مطالعه می‌باشد. بنابراین درجه ایمنی این سازه‌ها به لحاظ عملکرد در برابر بار انفجار به میزان قابل توجهی افزایش خواهد یافت.

کلید واژگان: بار انفجار، سازه قوسی شکل زیر زمینی، دال بتن آرمه فدا شونده، روش اجزا محدود

۱- مقدمه و بیان مسئله

با توجه به اینکه کشور ایران دارای موقعیتی استراتژیک و حیاتی است و تراکم جمعیت در شهرهای مهم و حساس آن بالا می‌باشد احداث سازه‌های امن زیرزمینی در محیط‌های شهری ضروری به نظر می‌رسد. بدین منظور سازه‌ها باید در زمین مناسب حفاری شوند و پیش‌بینی اولیه عمق بحرانی و عمق بهینه سازه مدفون با توجه به نوع خاک و مصالح تشکیل‌دهنده زمین انجام گردد. در انفجارهای مختلف از حجم‌های متفاوت ماده منفجره استفاده می‌شود که هر کدام عمق بحرانی خاصی را در خاک به خصوصی دارد، در کشور ایران نیز با توجه به تنوع خاک محیط‌های شهری تعیین نوع خاک و عمق بحرانی می‌تواند کمک مؤثری در طراحی سازه و تعیین ضرایب ایمنی آن داشته باشد. سیستم نگهداری که در طراحی این سازه‌ها در نظر گرفته می‌شود باید متفاوت از حالت استاتیکی بوده و طراحی سازه‌ها بر اساس حالت دینامیکی انجام گیرد. مطالعه تأثیر انفجار و ضربه حاصله بر روی سازه‌ها می‌تواند آینده روشنی در افزایش مقاومت و کاهش تأثیر بار دینامیکی بر روی سازه‌ها داشته باشد.

مطالعه در زمینه بارهای دینامیکی می‌تواند کمک شایانی در درک بارگذاری دینامیکی حالت انفجار داشته باشد. بارهای لرزه‌ای می‌تواند ناشی از یک زلزله و یا یک انفجار باشد که به نسبت نوع بار، باعث خساراتی در سازه‌های مختلف می‌شوند. تغییرات ناگهانی در حالت بارگذاری داخلی یا خارجی خاک تولید امواج دینامیکی را به دنبال دارد. این تغییرات در نتیجه حوادثی چون لغزش ناگهانی بر روی سطح ضعیف و گسل، گسیختگی و ریزش ناگهانی ستون‌های سنگی و بارگذاری یا باربرداری در سطح یک چاله انفجاری شکل می‌گیرد که این پدیده سبب تولید و انتشار امواج با سرعت معینی در محیط می‌شوند و تأثیرات قابل توجهی را در سازه‌های سطحی و زیرزمینی بر جای می‌گذارند.

برای تجزیه و تحلیل رفتار دینامیکی سازه‌ها تحت بار انفجار، می‌توان از سه روش مطالعات تئوری، آزمایش‌های تجربی و بررسی عددی استفاده کرد. به طور کلی در موضوعات مربوط به بارگذاری انفجاری سازه باید انتشار امواج ناشی از انفجار در هوا، سنگ یا خاک، رفتار دینامیکی سازه و آنالیز آسیب‌دیدگی مواد سازنده سازه مورد بررسی قرار گیرد [۱ و ۲]. بخش مهندسی ارتش آمریکا، چند آزمایش بزرگ انفجار در سال‌های ۱۹۴۸ تا ۱۹۵۲ در نزدیکی تونل بدون پوشش در ماسه سنگ انجام داد. هندرون در سال ۱۹۷۷ براساس آزمایش‌های انجام گرفته توسط بخش مهندسی ارتش آمریکا، مطالعات جامعی برای خرابی تونل در ماسه سنگ انجام داد [۳]. در این مطالعه، ناحیه‌های خرابی تونل در ماسه سنگ براساس سرعت اوج ذره*، به چهار ناحیه گسیختگی متناوب، گسیختگی محلی (موضعی)، گسیختگی کلی و بسته شدن دهانه تقسیم است. در روسیه یک آزمایش تجربی انفجار در سطح ساحل با مقدار ۱۰۰۰ تن TNT در سال ۱۹۸۷ انجام شد، این

آزمایش در فاصله حدود ۱۰۰ متری از خط ساحلی انجام گرفت [۴]. محدودیت‌های گوناگونی مانند انتخاب مناسب سازه مدل شده، غیرخطی بودن رفتار سنگها یا خاکهای مختلف، میزان بارهای موج ناشی از انفجار، هزینه بالای آزمایشها و... مانع پیشرفت مطالعات تجربی در زمینه اثر انفجار بر سازه‌ها شده است [۵].

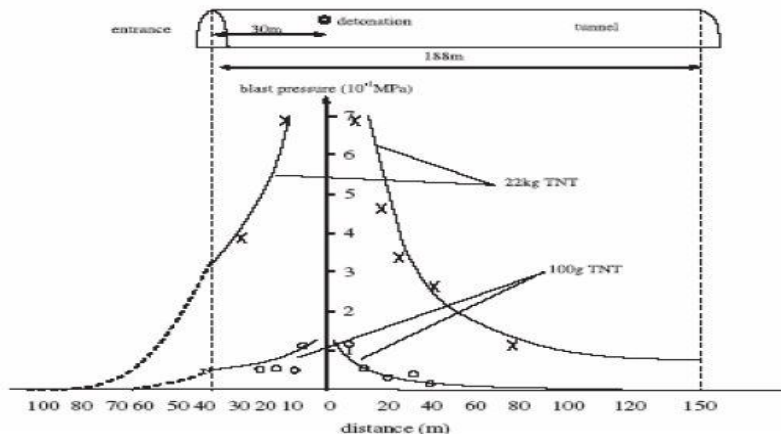
با پیشرفت تکنولوژی و مدل‌سازی در نرم‌افزارهای مختلف عددی، امکان بررسی تونلها تحت نیروی انفجار به وجود آمده است. همچنین تحلیل‌های عددی متعددی برای بررسی انفجار در سازه‌های زیرگذر انجام گرفته است. چیل و سالاد در سال ۱۹۹۸ پاسخ دینامیکی سایت الکتریکی زیرزمینی را تحت بارگذاری انفجار با استفاده از روش عددی سه بعدی بررسی کردند [۶]. لو و همکاران در سال ۲۰۰۵ مدلی را برای تحلیل دینامیکی سازه‌های مدفون در خاک تحت انفجار نفوذی، ارائه دادند [۷]. لیو و همکاران در سال ۲۰۰۷ پاسخ‌های دینامیکی تونلها را در برابر انفجار سطحی بررسی نمودند [۸]. چوی و همکاران در سال ۲۰۰۶ با استفاده از روش المان محدود به بررسی فشار ناشی از انفجار در تونل با پوشش بتنی پرداختند [۹]. جونبو و همکاران در سال ۲۰۰۸ مشخصه‌های بار روی یک سازه بتنی مدفون شده تحت انفجار سطحی را توسط شبیه‌سازی عددی مطالعه کردند [۱۰]. براساس مدل لو، نگی و همکاران در سال ۲۰۱۰ تحلیل دینامیکی سازه‌های دفن شده ناشی از انفجار سطحی را انجام دادند [۱۱].

فلاح‌زاده و بازیار در سال ۱۳۸۷ آزمایش‌هایی بر روی سازه‌های زیرزمینی انجام دادند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش فاصله نسبت به محل انفجار فشار به میزان زیادی کاهش می‌یابد (شکل ۱). آزمایش‌ها حاکی از اثر خاک به عنوان یک پارامتر مهم در کاهش فشار و شدت انفجار بوده است [۱۲].

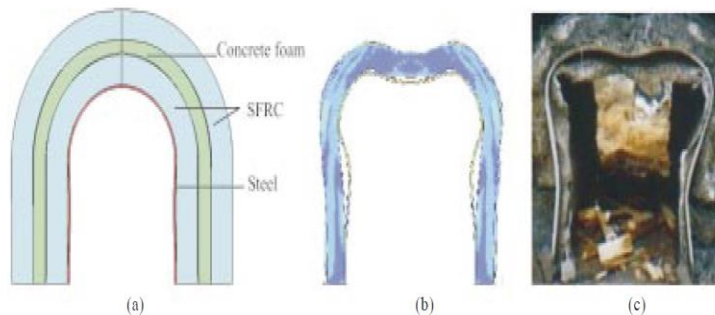
یانگ ژیانگ و همکاران در سال ۲۰۰۹ سازه‌های قوسی شکل لایه‌ای را که با مواد مختلفی ساخته شده‌اند به روش عددی مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه پارامترهای تغییرشکل، سرعت و شتاب ذرات تحت بارگذاری‌های یکسان مد نظر قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که استفاده از بتن در سازه قوسی شکل در لایه‌های بالا و فولادی در لایه‌های داخلی سازه عملکرد مقاومتی بهتری را بدست خواهد داد [۱۳]. شکل ۲ تغییرشکل سازه در مدل‌سازی در مقایسه با نتایج تجربی بدست آمده از این تحقیق را نشان می‌دهد.

یانگ و همکاران در سال ۲۰۱۰ رفتار تونل‌های با پوسته نازک مترو تحت بارهای انفجاری را مورد بررسی قرار دادند و بدین منظور از مدل‌سازی در نرم‌افزار المان محدود Ls-Dyna استفاده نمودند. نتایج عددی نشان می‌دهد که قسمت بالایی لاینینگ تونل با مقطعی به زاویه‌ی ۰ تا ۲۲/۵ درجه و فاصله‌ی ۰ تا ۷ متر از مرکز انفجار به عنوان ناحیه‌ی آسیب‌پذیر شناخته می‌شود [۱۴].

* Particle Peak Velocity (PPV)



شکل ۱- تغییرات فشار ناشی از انفجار نسبت به کانون انفجار [۱۲]



شکل ۲- مقایسه تغییر شکل سازه در مدل سازی در مقایسه با نتایج تجربی [۱۳]

انفجاری صورت گرفته است. در آخرین تحقیقات چن و همکاران در سال ۲۰۱۶ به بررسی نتایج حاصل از شبیه سازی عددی اثر انفجار بر روی سدهای بتنی پرداخته و اهمیت انفجار در زیر سطح آب در نزدیکی سدهای بتنی که باعث تخریب اساسی در آن‌ها می شود را بیان نمودند [۱۸].

با توجه به کمبود تحقیقات انجام شده نیازمندی در بررسی های جامع تر به منظور یافتن راهکارهایی در زمینه کاهش اثر انفجار بر سازه های زیرزمینی ضروری خواهد بود. در تحقیق حاضر تأثیر انفجار بر سازه بتن آرمه قوسی شکل بهینه سازی شده زیرزمینی در دو حالت معمولی و با استفاده از دال بتنی مسلح فداشونده مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. در سازه قوسی شکل از مدل بهینه سازی شده از نظر ابعاد هندسی استفاده شده و پارامترهای تأثیرگذار مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. جهت حل از نرم افزار اجزا محدود LS-Dyna استفاده شده و مقاومت سازه و عملکرد آن در برابر مواد منفجره TNT مورد مطالعه قرار گرفته شده است.

۲- مدل سازه قوسی شکل مورد مطالعه

به منظور طراحی سازه قوسی شکل مورد نظر در این تحقیق، آشنایی با ساختار قوسها و انتخاب مناسب ترین شکل قوس، از موارد

گوین و ترن در سال ۲۰۱۱ به بررسی دیوار سازه ای عمودی که توسط صفحه های مسلح شده در یک لبه و در ۴ لبه دیگر ثابت شده است پرداختند. نتایج عددی نشان می دهد که ضریب میرایی، مکان و فشار ناشی از انفجار در رفتار سازه تأثیرگذار است [۱۵]. مرتضایی در سال ۱۳۹۲ به بررسی فشار ناشی از انفجار و رابطه آن با فاصله نسبت به مرکز انفجار در ساختمان مورا در کشور آمریکا پرداخت. نتایج نشان داد که بیشتر خسارات سازه ای که در بمب گذاری سال ۱۹۹۵ ساختمان مورا در شهر اوکلاهما آمریکا اتفاق افتاد به سبب انهدام پیش رونده سازه بوده که خسارت ناشی از انفجار به عناصر باربر ثقیلی کلیدی منتشر گردید [۱۶].

اسماعیل نیا و گردان در سال ۱۳۹۳ [۱۷] به تحلیل دینامیکی غیرخطی نمونه دال های مسلح شده با کامپوزیت های FRP، تحت بارهای انفجاری پرداخته اند. برای مدل سازی نمونه ها و بارگذاری از نرم افزار LS-DYNA استفاده کردند و نتایج تحلیل با نتایج آزمایشگاهی موجود را مورد مقایسه قرار دادند که سازگاری پاسخ عددی نرم افزار و آزمایش به دست آمده است. به طور کلی نمونه های تقویت شده با کامپوزیت نسبت به نمونه های فاقد تقویت پاسخ بهتری در مقابل آزمایش های انفجاری داشته اند. علاوه بر این به تازگی پژوهش های جدیدی در زمینه اثر FRP در تقویت دال های بتن آرمه تحت بارهای

L: طول دهانه قوس برابر با ۲R (m)

t₀: ضخامت پایه (m)

t₁: ضخامت رأس (m)

k: نسبت ضخامت رأس به ضخامت پایه قوس

R: شعاع قوس (m)

W: وزن کل سازه در طول ۰/۲m

H: نیروی افقی (نیروی رانش) پاکار قوس مربوط به نصف دهانه (N)

ω/H: ضریب پایداری قوس (نسبت وزن نصف قوس به نیروی رانش

یک طرف)

(α)_{max}: تنش کششی ماکزیمم (N/m²)

جدول ۲- نتایج حاصل از بررسی شکل بهینه پنج او هفت معمولی [20]

t ₀ /R	t ₁ /R	K	ω/H
0/327-0/534	0/1394-0/123	0/2619- 0/3758	5/69-0/471

۳. طبقه‌بندی و بررسی بارهای ناشی از انفجار

در مبحث بیست و یکم مقررات ملی ساختمان، پدافند غیرعامل [۲۱] چهار سطح بار انفجار برای طراحی ساختمانها پیش‌بینی شده است، با توجه به درجه اهمیت ساختمان و پهنه‌بندی خطر، ساختمانها باید عملکردهای مناسبی در برابر این بارهای انفجاری داشته باشند. در جدول ۳ این سطوح مختلف همراه با خصوصیات آنها قابل مشاهده است. نتایج جدول ۳ بیان می‌کند که زمان تداوم انفجار بین ۲۲ تا ۵۲ میلی‌ثانیه است. بر همین اساس محدوده زمانی بررسی نتایج در این تحقیق ۲۰۰۰ میلی‌ثانیه در نظر گرفته شده است که با توجه به اینکه حداکثر زمان تداوم انفجار ۵۲ میلی‌ثانیه می‌باشد پس در نظر گرفتن محدوده زمانی ۲۰۰۰ میلی‌ثانیه برای بررسی نتایج حاصل از انفجار در این تحقیق قابل توجیح می‌باشد.

جدول ۳- سطوح بار انفجار تعریف شده در مبحث بیست و یکم مقررات ملی

ساختمان [21]

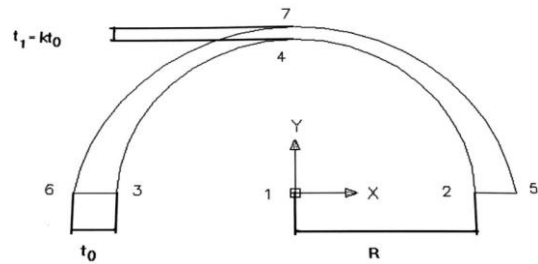
زمان تداوم انفجار (میلی ثانیه)	Pr (Kg/cm ²)	Pso (Kg/cm ²)	سطح خطر انفجار
۲۲	۲/۷۵	۱	۱
۲۸	۱/۲	۰/۵	۲
۳۴	۰/۴۳	۰/۲	۳
۵۲	۰/۰۵	۰/۰۲۵	۴

بسیار ضروری و مهم به شمار می‌آید. از جمله قوس‌های معروف ایرانی قوس پنج او هفت، قوس دو لنگه، قوس چیدری یا شبدری، قوس پاتوپا، قوس شاخ بزی، قوس بیز یا هلو چین، قوس نعل اسبی، قوس دسته سبدری (نیم بیضی)، قوس بیضی، قوس نیم بیضی، قوس نیم‌دایره، قوس ثلث دایره و... را می‌توان نام برد [۱۹]. از بین انواع قوس‌های نام برده بهینه‌ترین و مناسبترین قوسی که بتواند نیاز تحقیق یعنی مقاومت بالا در برابر انفجار را تأمین کند باید انتخاب شود.

در مدل‌سازی قوس باید نقاط کلیدی به صورت زیر تعریف گردند، برای روشن‌تر شدن مطلب، قوس نیم‌دایره با تعریف نقاط کلیدی به صورت پارامتر در شکل ۳ آورده شده که مختصات نقاط کلیدی به صورت زیر تعریف می‌شوند:

نقطه ۱: (0,0) نقطه ۲: (R,0) نقطه ۳: (-R,0) نقطه ۴: (0,R)

نقطه ۵: (0,R+t₁) نقطه ۶: (-R-t₀,0) نقطه ۷: (R+t₀,0)



شکل ۳- نقاط کلیدی در قوس نیم‌دایره‌ای

با توجه به این نحوه مدل‌سازی کیومرثی در سال ۱۳۸۳ عملکرد قوس‌های مختلف ایرانی را تحت بار زلزله مورد بررسی قرار داد و نتایج تحقیق صورت گرفته نشان داد که قوس پنج او هفت بهینه‌ترین و مناسبترین قوس در برابر بار انفجار می‌باشد [۲۰]. در جدول ۱ نتایج بهینه قوس پنج او هفت معمولی با دهانه‌های ۴، ۵، ۶ متر آورده شده است. در جدول ۲ نیز محدوده نتایج حاصل از بررسی شکل بهینه قوس پنج او هفت معمولی قابل مشاهده می‌باشد. بنابراین در این تحقیق نیز قوس مذکور تحت بارگذاری انفجار قرار گرفت و از نتایج جداول ۱ و ۲ استفاده گردید.

جدول ۱- نتایج بهینه قوس پنج او هفت معمولی با دهانه‌های ۴، ۵، ۶ متر

[20]

L (m)	t ₀ (m)	t ₁ (m)	K	t ₀ /R
۴	۰/۶۸۲/۱	۲/۷۹۷/۰	۲/۶۱۹/۰	۵/۳۴/۰
۵	۹/۸۶۹۳/۰	۳/۴۸۵۴/۰	۳/۵۳/۰	۳/۹۴/۰
۶	۹/۸۲۸۷/۰	۳/۶۹۴۳/۰	۳/۷۵۸/۰	۳/۲۷/۰
t ₁ /R	W (N)	H (N)	w/H	(σ _t) _{max}
۱۳۹/۰	۴۵۱	۸/۴۸	۶۲/۴	۴۸۶۹۲
۱۳۹۴/۰	۵۸/۴۶۲	۶۱/۴۰	۶۹/۵	۴۵۹۸۰
۱۲۳/۰	۵/۱۰۵۶	۱/۱۱۱۹	۴۷۱/۰	۵۳۱۷۵

انفجاری به نرم افزار Ls-Dyna ارسال گردیده است. در این راستا حجم معیار مورد نظر با استفاده از المان های مکعبی مش بندی می شود. حجم مورد نظر از چهار ماده هوا، TNT، خاک و سازه است. برای این محیط از المانهای ۸ گرهی solid 164 استفاده شده است. درجات آزادی هر گره این المان در سه بعد شامل جابجایی، سرعت و شتاب می باشد. شکل ۴ ابعاد هندسی و آرماتورگذاری سازه قوسی زیرزمینی بدون دال فداشونده را نشان می دهد. لازم به ذکر است که آرماتورگذاری ها در کف قوس دو ردیف و با فاصله ۶۰ سانتیمتری از یکدیگر و از نوع A3 آچار مدل گردیده اند.

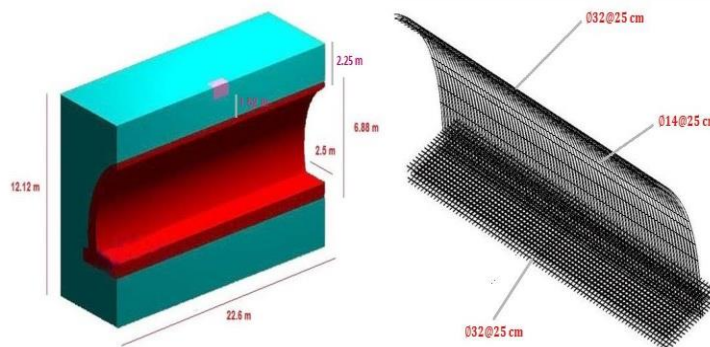
در این حالت ابتدا مدل ساخته شده با مشخصات فنی مکانیکی یکسان با دال بتنی و فاقد دال بتنی مدل سازی می شود. شکل ۵ سازه قوسی شکل زیرزمینی با دال بتنی فداشونده استفاده شده در بالای تاج به همراه آرماتوربندی های مدل شده برای اندازه وزنی متفاوت TNT را نشان می دهد.

در جدول بالا و به مقدار حداکثر اضافه فشار ناشی از انفجار هوایی در هر نقطه را فشار مبنای انفجار (P_{so}) و موج انفجار پس از برخورد با مانع صلب منعکس می شود که بازتاب موج در اطراف مانع، به زاویه ی برخورد موج، مشخصات هندسی ساختمان و اندازه آن، بستگی دارد که به فشار بازتاب (P_r) معروف است.

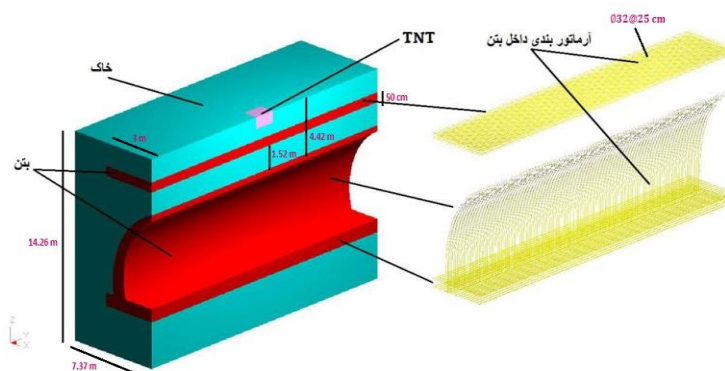
۴- روش تحقیق

۴-۱- جزئیات مدل سازی

در این مرحله از تحقیق ابتدا قوس بتنی مورد مطالعه مدل سازی شده است. در حالت کلی، مدل سازی سازه انجام شده شامل سه قسمت سازه بتنی مسلح، تقویتی ها و خاک می باشد. مدل مورد نظر در نرم افزار Solidwork طراحی شده و جهت مش زنی به نرم افزار Abaqus انتقال یافته و سپس بعد از مرحله مش زنی جهت شبیه سازی بارگذاری



شکل ۴- ابعاد هندسی و آرماتورگذاری سازه قوسی شکل زیرزمینی بدون دال بتنی فداشونده



شکل ۵- ابعاد هندسی و آرماتورگذاری سازه قوسی شکل زیرزمینی با دال بتنی فداشونده

جدول ۴ بوده و آرماتوربندی نیز از جنس فولاد لحاظ گردیده است که مشخصات آن براساس جدول ۵ می باشد. سازه تحت بارگذاری مقادیر مختلف TNT مورد بررسی و تحلیل قرار خواهد گرفت. در این راستا به تدریج وزن TNT افزایش یافته و تنش کششی سازه محاسبه خواهد شد و در مرحله ای که به حدود ۳/۵ مگاپاسکال برسد بارگذاری متوقف

۴-۲- بارگذاری و خواص مکانیکی مواد

بارگذاری به صورت انفجار TNT در قسمت بالایی سازه در اندازه های مختلف صورت می گیرد. برای پوشش سازه مورد نظر از بتن مسلح استفاده شده که مشخصات بتن مورد نظر در این تحقیق براساس

در رابطه های ۱ و ۲، C_0, C_1, C_2, C_3 و C_6 همگی برای هوا صفر و C_4 و C_5 هر دو $0/4$ می باشند. چگالی هوا $1/29 \text{ g/cm}^3$ در نظر گرفته می شود و انرژی اولیه هوا E_0 برابر $10^5 \times 2/5$ در فشار اتمسفر $1/0 \text{ g/cm}^3$ می باشد [۱۴].

در نهایت ماده انفجاری TNT که در نزدیکی سطح زمین و در مرکز سقف سازه قرار گرفته است و از رابطه ۳ که به معادله (JWL) معروف است برای محاسبه فشار آزاد شده از انرژی شیمیایی استفاده می کند با ماده نوع ۸ از LS-Dyna مدل سازی می شود.

$$P = \left(1 - \frac{\omega}{VR_1}\right) \exp(-R_1 V) + B \left(1 - \frac{\omega}{VR_2}\right) \exp(-R_2 V) + \frac{\omega E}{V} \quad (3)$$

در این رابطه، P فشار انفجار، E انرژی داخلی بر واحد حجم، V حجم محصول انفجار، A, B, R_1, R_2 و ω ثابت های مواد هستند که پارامترهای مربوط به TNT در جدول ۷ ارائه شده است [23].

جدول ۷- خواص مکانیکی TNT [23]

ρ (g/cm ³)	v_D (m/s)	P_{ej} (Mpa)	A (Mpa)	B (Mpa)
۱/۶۵	۵۵۰۰	$1/0 \times 10^4$	$7/4 \times 10^5$	$0/18 \times 10^5$
R_1	R_2	ϵ	V	E_0 (J/m ³)
۵/۵۶	۱/۶۵	۰/۳۵	۱/۰	۵/۵۶

۵. نتایج

در شکل ۶ کانتورهای تنش سازه قوسی شکل با در نظر گرفتن معیار تنش وان میز بدون دال بتنی فداشونده نشان داده شده است که از کانتورهای تنش مشهود است که با افزایش وزن TNT میزان تنش در سازه نیز افزایش یافته است. به طوری که در حالت (الف) که میزان مواد منفجره ۴۸۰ کیلوگرم TNT می باشد تنش برابر با $0/009$ مگاپاسکال بوده و سازه تنش چندانی را متحمل نمی شود. در شکل (ب) که مربوط به ۷۲۰ کیلوگرم TNT می باشد ماکزیمم تنش $0/11$ مگاپاسکال ثبت شده است. در 1000 کیلوگرم TNT مقدار کانتور $0/18$ مگاپاسکال و در 1400 کیلوگرم TNT تنش در تاج سازه قوسی به حداکثر تنش $3/5$ مگاپاسکال رسیده است که طبیعتاً در این حالت تنش به بیش از حد مجاز تنش کششی بتن رسیده و در اثر انفجار، سازه نه تنها تحت فشار است بلکه المان های بتن تحت کشش نیز قرار می گیرند به همین دلیل برای حد تسلیم بتن، بحرانی ترین حالت ممکن در شبیه سازی و معادل $3/5$ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است.

شده و با توجه به نوع طراحی که المان حذف شونده می باشد حد نهایی مقاومت سازه لحاظ خواهد شد که بحرانی ترین حالت می باشد.

جدول ۴- خواص مکانیکی بتن

چگالی بتن kg/m ³	۲۴۰۰	نفوذپذیری	1×10^{-10}
مقاومت فشاری Mpa	۳۵	ضریب انبساط حرارتی C	10^{-5}
مقاومت خمشی Mpa	۳	انقباض ناشی از خشک شدن	6×10^{-4}
مقاومت کششی Mpa	۳/۵	انقباض ناشی از خشک شدن بتن مسلح	3×10^{-4}
مدول الاستیسیته Mpa	۴۱۰۰۰	ضریب پواسون	۰/۲۰
مقاومت برشی Mpa	۱۱	ضریب حرارتی kJ/kg	۰/۷۵

جدول ۵- خواص مکانیکی فولاد

تنش تسلیم Mpa	مقاومت کششی Mpa	مدول الاستیسیته Mpa	ضریب پواسون
۴۰۰	۶۰۰	210×10^3	۰/۳۳

برای مشخصات خاک مدل شده از آیین نامه TM5-855-1 [22] ارتش مهندسی آمریکا استفاده شده است که در آن مشخصات خاکی که مخلوطی از رس و ماسه بوده و دارای حرارت هوا کمتر از ۱٪ است به صورت جدول ۶ می باشد.

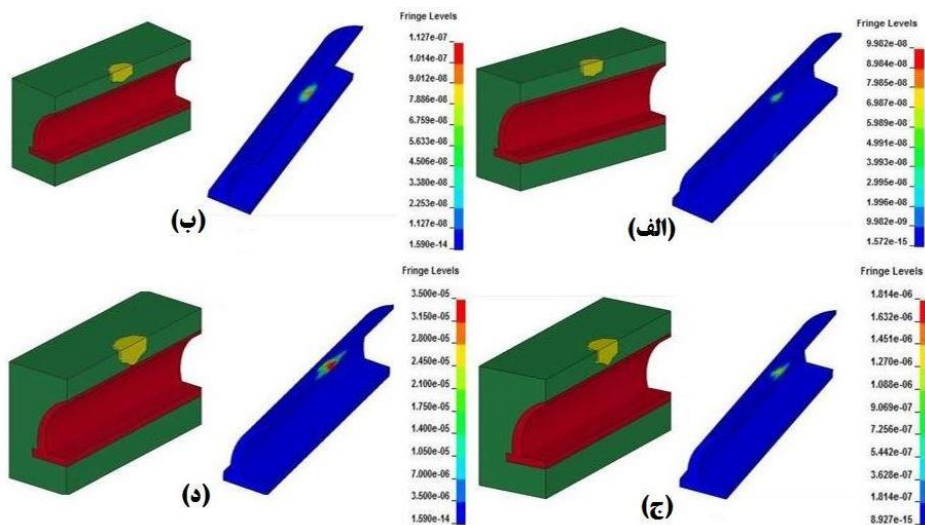
جدول ۶- خواص مکانیکی خاک [22]

ρ (g/cm ³)	G (Mpa)	K_u (Mpa)	a_0	a_1
0/33	1/2	۱۳۰	$3/3 \times 10^{-11}$	۰
a_2	P_{cut} (Mpa)	ρ_c 10 ⁶ (pa.s/m)	C (m/s)	N
۰	۰	29/38	۱۵۲۴	2/3

هوای فوقانی مطابق ماده ۹ از LS-Dyna انتخاب شده است. منظور از هوای فوقانی، هوای موجود در داخل فضای سازه قوسی شکل می باشد. هوا معمولاً توسط معادله حالت چند جمله ای خطی مدل می شود که مطابق رابطه های ۱ و ۲ می باشد.

$$P = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E_0 \quad (1)$$

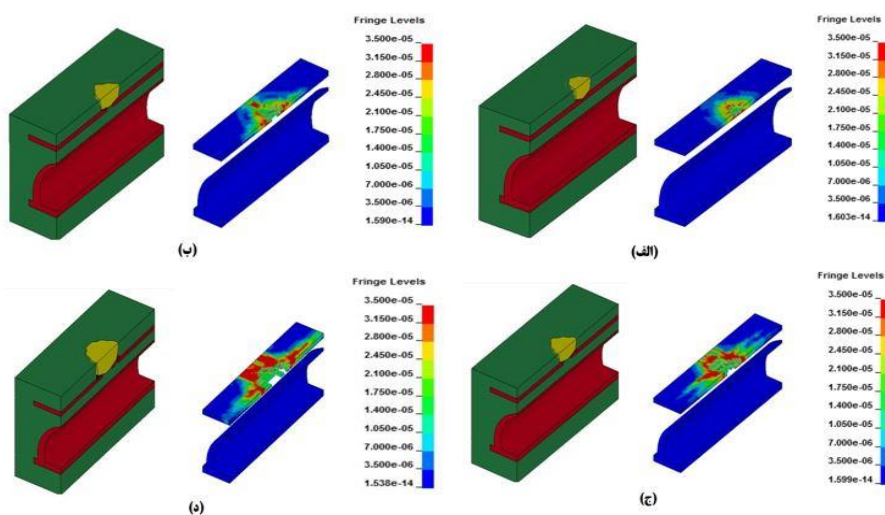
$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \quad (2)$$



شکل ۶- کانتور تنش مربوط به سازه قوس دار بدون دال بتنی
 (الف) TNT= 480 kg (ب) TNT= 720 kg (ج) TNT= 1000 kg (د) TNT= 1400 kg

منفجره در دال بتنی مسلح فداشونده رخ خواهد داد که طبیعتاً با افزایش میزان TNT تخریب روی دال نیز بیشتر خواهد شد. همان گونه که در شکل ۷ قابل مشاهده است در ۷۲۰ کیلوگرم TNT تنش حاصل در سطح دال از ۳/۵ مگاپاسکال گذشته و در آستانه تخریب و فداشدن قرار خواهد گرفت. در اصل وجود این دال باعث پخش قدرت انفجار در سطح بالایی سازه شده و از نفوذ به عمق زمین جلوگیری خواهد نمود. اجرای دال بتنی فداشونده موجب کاهش انتقال نیروی انفجار به سازه قوسی و افزایش دوام آن می شود.

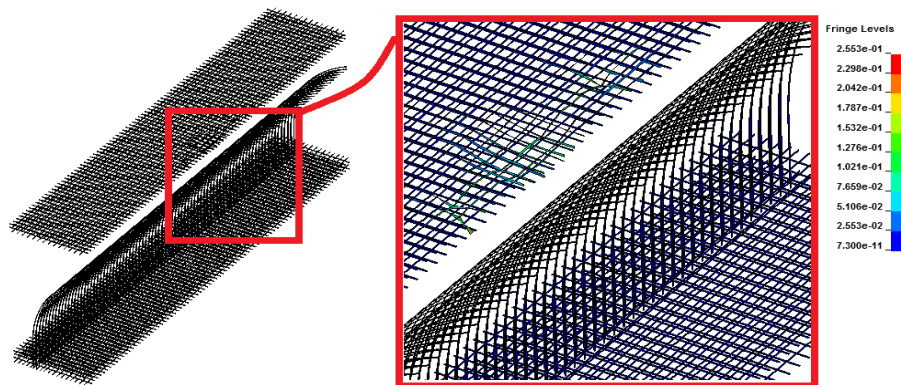
یکی از راههای افزایش مقاومت سازه در برابر بار انفجار استفاده از دال فدا شونده بتنی مسلح می باشد. به همین منظور در این تحقیق دال فداشونده بتنی مسلح با ضخامت ۵۰ سانتیمتر در فاصله ۱/۵۲ متری از تاج سازه طراحی و مدل سازی شده است. شکل ۷ کانتور تنش مربوط به سازه قوس دار با وجود دال بتنی فداشونده در مقادیر مختلف TNT را نشان می دهد که به طور کامل در نرم افزار Ls-Dyna مدل سازی و تحلیل گردیدند. همانطور که ملاحظه می گردد با وجود دال بتنی شکست روی قوس کنترل شده و انتظار می رود تا حد زیادی پارامترهای مختلف و تاثیر گذار کاهش یابند. تخریب ناشی از مواد



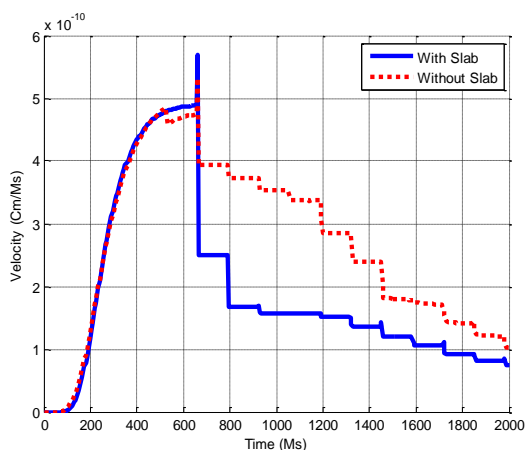
شکل ۷- کانتور تنش مربوط به سازه قوس دار با وجود دال بتنی
 (الف) TNT=720 kg (ب) TNT=1000 kg (ج) TNT=1400 kg (د) TNT=4800 kg

مطالعه به مقدار زیادی ظرفیت تحمل بار انفجار در سازه قوسی شکل را افزایش می‌دهد.

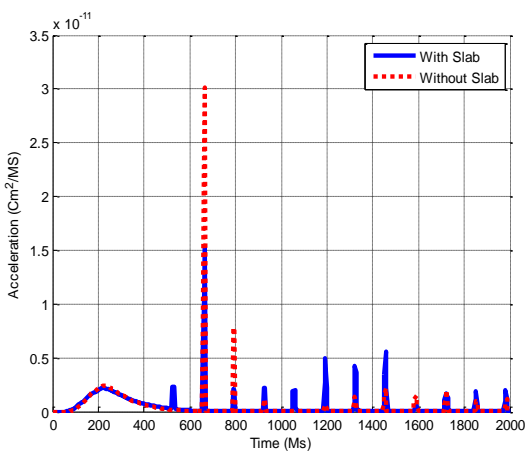
همانطور که از شکل ۸ مشخص است در میزان ۴۸۰۰ کیلوگرم TNT آرماتورهای فولادی درون دال بتنی آسیب دیده است در حالی که آسیبی به ساختار آرماتورهای سازه مورد مطالعه قوسی وارد نگردیده است. بنابراین ایجاد دال بتنی بر روی سازه قوسی شکل سازه مورد



شکل ۸- آرماتورهای فولادی سازه قوسی با دال بتنی در مقدار TNT=4800 kg



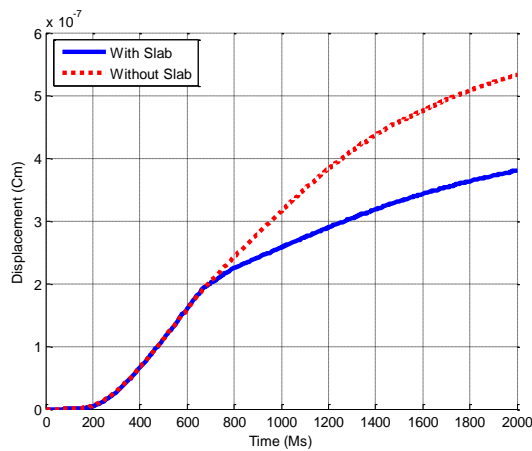
(ب)



(ج)

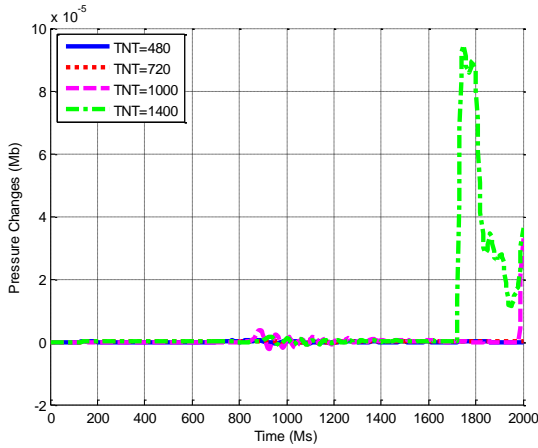
با مقایسه بین کانتور حاصل از حالت کرنش‌های بدست آمده نتیجه‌گیری می‌شود که در حالت بدون دال بتنی فدا شونده سازه کرنش معادل $5/1 \times 10^{-1}$ را تحمل می‌نماید ولی با وجود دال فداشونده کرنش به مقدار زیادی کاهش خواهد یافت و نزدیک به صفر خواهد بود.

در شکل ۹ میزان پارامترهای سرعت جابجایی شتاب با توجه به فاصله دال بتنی از مواد منفجره ناپایداری بیشتری از حالت قوسی شکل خواهد داشت و اندازه کل شتاب، سرعت و جابجایی نسبتاً نزدیک به هم بوده که تأثیر بسزایی از وزن ماده منفجره خواهد داشت. پس از کنترل المانهای روی تاج سازه قوسی شکل جابجایی نزدیک به صفر بوده و شیب نمودارهای شتاب و سرعت کند شده و اندازه آن به میزان زیادی کاهش خواهد یافت.



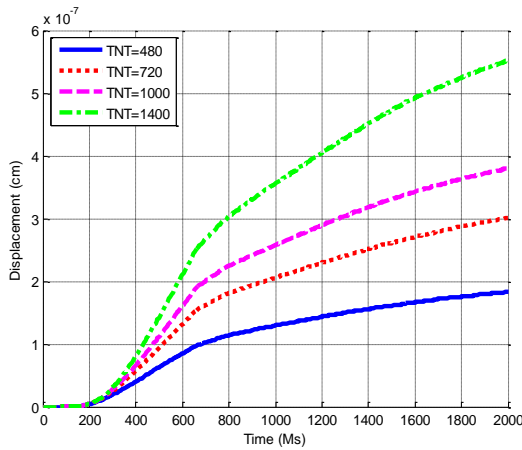
(الف)

شکل ۹- تأثیر مقدار ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT بر سازه قوسی شکل در حالت بدون دال و حالت با دال (الف) جابجایی (ب) سرعت (ج) شتاب

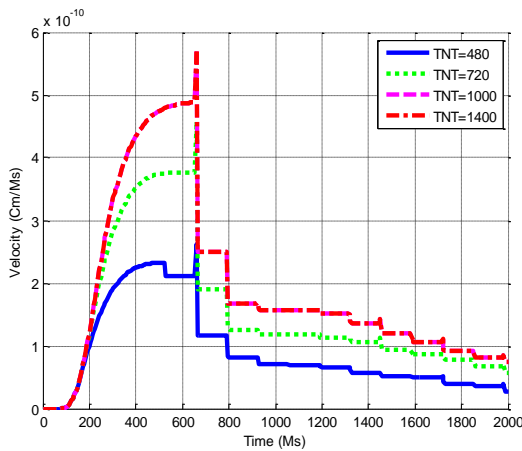


(ب)

شکل ۱۱- تأثیر مقدار ۴۸۰، ۷۲۰، ۱۰۰۰ و ۱۴۰۰ کیلوگرم TNT بر سازه قوسی شکل با دال فداشونده (الف) انرژی (ب) فشار

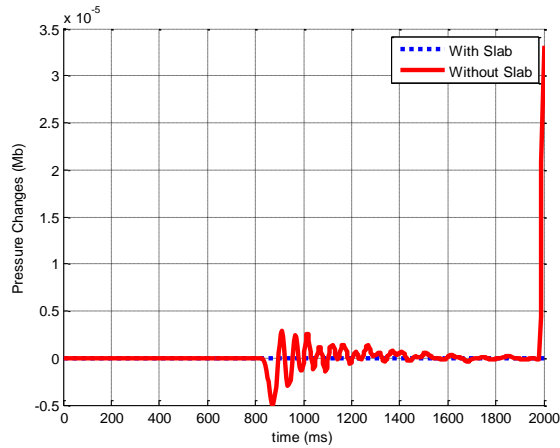


(الف)



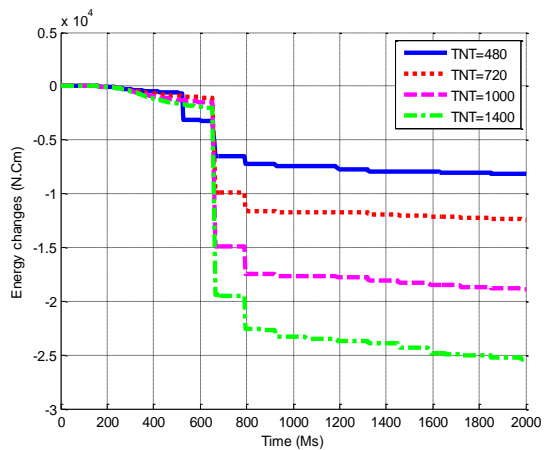
(ب)

در شکل ۱۰ همان طور که از مقایسه نمودارها مشخص است وجود دال باعث کاهش شدید فشار وارد به سازه شده است، به طوری تقریباً میزان فشار ۱۰^۶ برابر کمتر خواهد شد که این موضوع از دیدگاه حفاظت از نفرات و تجهیزاتی که در زیر محل سازه قوسی شکل قرار دارند بسیار حایز اهمیت خواهد بود.



شکل ۱۰- تأثیر مقدار ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT بر فشار سازه قوسی شکل در حالت بدون دال و حالت با دال

در نمودارهای شکل های ۱۱ و ۱۲ تأثیر مقدار ۴۸۰، ۷۲۰، ۱۰۰۰ و ۱۴۰۰ کیلوگرم TNT بر سازه قوسی شکل با دال فداشونده مورد مقایسه قرار گرفته است. همانطور که مشاهده می شود با توجه به خواص شیمیایی TNT نمودار منظمی را دارا می باشد و در نمودار کلی که برای مقادیر مختلف وزنی رسم شده است در زمان تقریبی ۷۰۰ میلی ثانیه افزایش قابل ملاحظه ای یافته و به مقدار حداکثر خود می رسد و با شیب ملایم تا پایان ۲۰۰۰ میلی ثانیه افزایش می یابد.

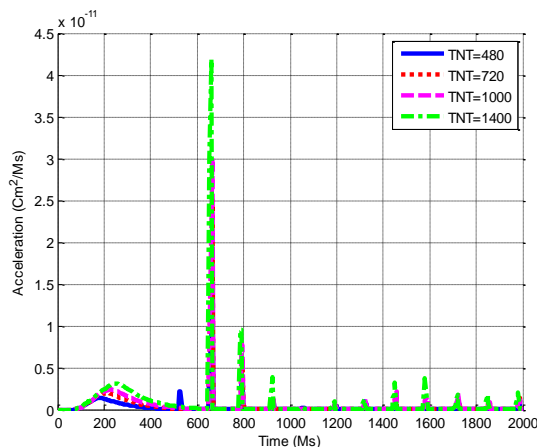


(الف)

- با استفاده از دال‌های بتنی متفاوت در فواصل منظم، توان سازه تا حد چشمگیری در میرا شدن سهم قابل توجهی از موج‌های انفجاری سنگین افزایش خواهد یافت. با وجود دال بتنی فدا شونده در سازه، میزان تنش و فشار اعمالی تا حد بسیار زیادی کاهش یافته و میزان جابجایی، شتاب و سرعت ذرات در تاج سازه بسیار کاهش زیادی می‌یابد.
- استفاده از دال بتنی از نظر اقتصادی، زمان اجرا و سادگی توجیه‌پذیر و منطقی به نظر رسیده و در مناطق دشتی که امکان ساخت تونل با سرباره سنگی به آسانی میسر نیست گزینه مناسبی خواهد بود.

۷. مراجع

- 1- Zhongxian, L., Hao, D., B.Chunxiao, B. (2006), "A review of current researches on blast load effects on building structures in China," Transactions of Tianjin University, 12, pp 35-41.
- 2- Zhifang, L. (2006), "Dynamic response and structure damage of the Yangtze River tunnel subjected to explosion loading," MS Thesis, Wuhan University of Technology, China.
- 3- Hendron, A.J. (1977), "Engineering of Rock Blasting on Civil Projects In: Hall, W. J. (Ed)," Structural and Geotechnical Mechanics, Prentice Hall, New Jersey.
- 4- Adushkin, V.V., Khristoforov, B.D. (2004), "Action of the coastal 1000-ton surface explosion on the environment," Combustion, Explosion, and Shock Waves, 40 (6), pp 686-693.
- 5- Shengbing, G., Mingyang, W., Yuetang, Zh. (2004), "Dynamic numerical analysis of underground structures under action of explosion seismic wave," World Earthquake Engineering, 20 (4), pp 137-142.
- 6- Chill, A., Sala, F. (1998), "Containment of Blast Phenomena in Underground Electrical Power Plants," Advances in Eng. Software, 29, pp 7-12.
- 7- Lu, Y., Wang, Z., Chong, K. (2005), "A Comparative Study of Buried Structure in Soil Subjected to Blast Load Using 2D and 3D Numerical Simulations," Soil Dyn. Earthquake Eng. 25, pp 275-288.
- 8- Luo, K.S., Wang, Y., Zhang, Y.T., Huang, L. K. (2007), "Numerical Simulation of Section Subway Tunnel Under Surface Explosion," J. PLA Univ. Sci. Tech., 8, pp 674- 679.
- 9- Choi, J., Wang, G., Munfakh, E. D. (2006), "3D Nonlinear Blast Model Analysis for Underground Structures," Proc. GeoCongress, Geotechnical Eng. Inf. Tech. Age, ASCE, Atlanta, Georgia, United States.
- 10- Junyu, F., Fang Qin, F., Jinchun, L. (2008), "Characteristics of Loads



(ج)

شکل ۱۲- تأثیر مقدار ۴۸۰، ۷۲۰، ۱۰۰۰ و ۱۴۰۰ کیلوگرم TNT بر سازه قوسی شکل با دال فداشونده (الف) جابجایی (ب) سرعت (ج) شتاب

۶- نتیجه‌گیری

- توزیع و مقدار تنش به تغییرات عمق و مقدار TNT بستگی دارد و با توجه به نتایج به دست آمده و معیار شکست وان میزب قسمت‌های بالایی سازه با محدوده ۰ تا ۲۲/۵ درجه در سطح مقطع به عنوان ناحیه ناپایدار و آسیب‌پذیر شناخته می‌شود.
- بر اساس مدل سازی برای سازه قوسی شکل با دهانه ۵ متر انجام شد مشخص شد سازه قوسی شکل مقاومت بسیار بالایی در برابر انفجار داشته و تغییر دهانه سازه در کاهش تنش‌ها و افزایش مقاومت آن تأثیر زیادی ندارد به این صورت که این تغییر به صورت میانگین کمتر از ۵ درصد بوده که نشان‌دهنده کاربرد نتایج بدست آمده به منظور طراحی سازه قوسی شکل برای دهانه‌های بالاتر می‌باشد.
- با توجه به تحلیل انجام گرفته بر روی سازه قوسی شکل با دال بتنی فداشونده و بدون آن، مشخص شد که با وجود دال بتنی تخریبی روی سنگر قوسی صورت نمی‌گیرد و فقط تخریب مربوط به دال بتنی خواهد بود که با افزایش میزان TNT نیز تخریب روی دال افزایش می‌یابد.
- مقاومت سازه قوسی شکل زیرزمینی در برابر انفجار با وجود دال بتنی بیش از ۳۰۰ درصد نسبت به سازه قوسی شکل بدون دال فداشونده افزایش خواهد یافت. در اصل وجود این دال باعث پخش قدرت انفجار در سطح بیشتری از خاک می‌گردد که این موجب کاهش انتقال نیرو به سازه قوسی اصلی می‌شود.

- on Shallow-Buried Structures under the Ground Explosions,” J. PLA Univ. Sci. Tech., 9, pp 676–680.
- 11- Nagy, N., Mohamed, M., Boot, J. C. (2010), “Nonlinear Numerical Modeling for the Effects of Surface Explosions on Buried Reinforced Concrete Structures,” Geomechanics Eng., 2, pp 1-18.
- ۱۲- فلاحزاده، پ. و باز یار، م. ح. (۱۳۸۷)، " بررسی اثر انفجار بر سازه‌های سطحی و زیرزمینی، " چهاردهمین کنفرانس دانشجو یان مهندسی عمران سراسر کشور، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.
- 13- Yongxiang, D., Changjing, X., Shunshan, F. and Zhiyu, Sh. (2009), “Numerical analysis on protecting performance of layered arch structures subjected to blast loading,” Defence Science Journal, 59 (2), pp 131-136.
- 14- Yang, Y., Xie, X. and Wang, R. (2010), “Numerical simulation of dynamic response of operating metro tunnel induced by ground explosion,” Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2 (4), pp 373–384.
- 15- Guyen, T.P.N. and Tran, M.T. (2011), “Response of vertical wall structures under blast loading by dynamic analysis,” Procedia Eng, 14, pp 3308-3316.
- ۱۶- مرتضایی، ع. (۱۳۹۲)، " مطالعه موردی یک ساختمان بتن آرمه مقاوم در برابر زلزله تحت اثر بارگذاری انفجار، " پژوهشنامه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، سال شانزدهم، شماره ۱ (پیاپی ۵۹)، تهران، ایران.
- ۱۷- م. اسماعیل نیاعمرا ن، م. گردان، " ارزیابی عددی اثر کامپوزیت‌های پلیمری (FRPS) در تقویت دال بتن آرمه در معرض انفجار، " مجله علمی پژوهشی مهندسی عمران مدرس، دوره ۱۵، ۱۳۹۴.
- 18- J.Chen, X.Liu, Q.Xu, "Numerical Simulation Analysis of Damage Mode of Concrete Gravity Dam under Close-in Explosion", KSCE Journal of Civil Engineering, pp.1-11, 2016.
- ۱۹- زمرشیدی، ح. (۱۳۷۳)، " طاق و قوس در معماری ایران، " انتشارات کیهان، تهران، ایران.
- ۲۰- کیومرثی، ک. (۱۳۸۳)، " بررسی شکل بهینه قوس‌های با مصالح بنائی تحت بار دینامیکی، " پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد، نجف‌آباد، ایران.
- ۲۱- ن. م. ساختمان. (۱۳۸۸)، " مبحث بیست و یکم مقررات ملی ساختمان، پدافند غیرعامل، " تهران، ایران.
- 22- Army TM 5-855-1 Cont. Dist. (1998), “Design & analysis of hardened structures to conventional weapons effects,” U.S. Army.
- 23- Xiaojiang, Sh. and Jianyu. S. (2006), “ANSYS/LS-DYNA dynamic analysis methods and projects,” Beijing: China Water Power Press.

Numerical Study of the Effect of Sacrificial RC Slab on the Performance of Underground Arc Shaped Structures under the Explosion Load

Seyed Safar Salehkootah

M.Sc., Department of Civil Engineering, Najafabad branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

Esmaeel Izadi Zaman Abadi

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Najafabad branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran
e.izadi@pci.iaun.ac.ir

Abstract:

With the increasing expansion of the technology for the production of high-tech military equipment, the need to build structures with acceptable resistance against explosion in vital centers increasingly felt. These structures as the facilities in times of peace and in times of war and natural disasters are contributing to saving lives. Due to the lack and limitation of experimental data for explosion problems, numerical modeling based on finite element method can help in designing and estimating the loads exerted on structures. In this research, the effects of sacrificial RC slab on the performance of underground arched shape RC structures with practical details under explosion load were studied. Ls-Dyna finite element software was used to solve the problem and optimized concrete arches under different levels of explosives were investigated. Results show that, if a sacrificial RC slab is placed on the crown of the study structure, no damage will occur in structure and structural damages will be concentrated in RC slab. However these damages will be increased with increasing of the explosives. On the other hand, sacrificial slab distributes the blast waves at a higher level of soil which in turn shield the structure against explosion. Consequently, the safety of the structure in terms of performance against blast loading will be increased significantly.

Keywords: Explosion Load, Underground Arc Shaped Structures, Sacrificial RC Slab, Finite Element Method