بسمه تعالی

سردبیر محترم مجله مهندسی عمران مدرس

جناب آقای دکتر مسعود قدسیان

**با اهدای سلام**

احتراماً ضمن تشکر فراوان از دقت نظر جنابعالی و نظرات ارزشــمـند داوران مـحـتــرم در مطالعه مقاله کد MCEJ-78135، تحت عنوان **"تحلیل** اثر عمق مدفون مخازن بتني تحت بار انفجاري در خاک­های رسی لای­دار**"** اصلاحات مقاله براساس موارد خواسته شده توسط داوران گرانقدر به شرح ذیل انجام شد. همچنین تمام نظرات و سوالات داوران در مقاله اعمال و پاسخ سوالات به شرح ذیل ارائه شده است. در ضمن اصلاحات انجام شده در متن مقاله ارسالی نیز به صورت رنگ زرد برجسته شده است.

با تشکر

05/11/1403

**اصلاحات مربوط به داوران محترم:**

**پاسخ به داو ر محترم اول**

با تشکر از نظرات ارزشمند داور محترم، تلاش شد تا حد امکان تمام نکات مورد نظر داوران محترم در مقاله اعمال شود.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| اصلاحات انجام شده. | اصلاحات خواسته شده | شماره |
| نویسندگان محترم مقاله "تحلیل اثر عمق مدفون مخازن بتنی تحت بار انفجاری در خاکهای رسی لای­دار" به مطالعه عددی تاثیر انفجار بر روی مخازن بتنی حاوی سیال و با مقطع مستطیلی، مدفون در خاکهای رسی سیلت دار، تحت بار انفجار پرداخته اند. به منظور بهبود کیفیت مقاله و رفع برخی ابهامات، مواردی به شرح ذیل بیان می شود: | | |
| با سلام،  از توجه شما داوران گرامی سپاسگزاریم. از نظرات ارزنده شما سپاسگزاریم. هدف ما از این پژوهش، ارتقاء کیفیت و اطمینان از جوانب مختلف مقاله بوده و همواره در تلاش برای بهبودهای لازم هستیم. در پاسخ به ایرادات اشاره شده، نکات زیر قابل بیان است. | | |
| ضمن تشکر مجدد از داور محترم نوآوری تحقیق به شرح ذیل به متن اضافه شد.  در حالی که مطالعات متعددی در زمینه تحلیل رفتار مخازن بتنی تحت بار انفجاری وجود دارد، بیشتر آن‌ها به نوع خاک یا تأثیر عمق دفن در خاک‌های خاص توجه نکرده‌اند. به‌ویژه، خاک‌های رسی لای‌دار به دلیل ویژگی‌های خاص خود نظیر چگالی بالا، قابلیت تراکم‌پذیری و ویژگی‌های الاستیک غیرخطی، می‌توانند تأثیر متفاوتی بر رفتار سازه‌های بتنی در برابر بار انفجاری داشته باشند که در تحقیقات پیشین کمتر به آن پرداخته شده است.  این تحقیق با تمرکز بر خاک‌های رسی لای‌دار و بررسی دقیق اندرکنش خاک و سازه در برابر بار انفجاری، درک عمیق‌تری از رفتار این خاک‌ها و تأثیر آن‌ها بر کاهش جابجایی و تنش سازه‌های مدفون ارائه می‌دهد. مدل‌سازی عددی انجام‌شده با استفاده از نرم‌افزارهای پیشرفته FLAC 2D و AUTODYN نیز نوآوری دیگری است که امکان بررسی دقیق‌تر اثر عمق دفن و ویژگی‌های خاک را فراهم می‌کند. | نوآوری تحقیق به روشنی بیان شود. | 1 |
| با تشکر از پیشنهاد داور محترم، لازم به توضیح است:  انفجار سطحی در بسیاری از شرایط بحرانی و جنگی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا در بسیاری از حملات هوایی و نظامی، انفجارهایی که در سطح زمین یا نزدیک به سطح رخ می‌دهند، بیشترین تأثیر را بر زیرساخت‌ها دارند. دلیل انتخاب این نوع انفجار در تحقیق حاضر نیز بر همین مبنا استوار است. در شرایطی که خاک‌های اطراف مخازن مدفون، از جمله خاک‌های رسی لای‌دار، ویژگی‌های خاصی نظیر چگالی بالا و قابلیت تراکم‌پذیری دارند، درک رفتار سازه‌های مدفون در برابر چنین انفجارهایی از نظر علمی و عملیاتی بسیار ضروری است.  با این حال، با توجه به توصیه داور محترم، اذعان داریم که بررسی انفجارهای زیرسطحی می‌تواند جنبه‌های بیشتری از این موضوع را پوشش دهد. بنابراین، این موضوع به‌عنوان یکی از محورهای تحقیقاتی آینده در دستور کار قرار خواهد گرفت. این تحقیق آینده می‌تواند به مقایسه دقیق اثرات انفجارهای سطحی و زیرسطحی در محیط‌های مختلف، بر اساس آیین‌نامه ارتش آمریکا (TM-855)، بپردازد و اثرات انتشار در لایه‌های زیرسطحی را مورد بررسی قرار دهد.  در نهایت، به دلیل اهمیت عملیاتی و گسترده انفجارهای سطحی در شرایط بحرانی و نظامی، تحقیق حاضر تمرکز خود را بر این نوع انفجارها قرار داده است. امیدواریم این توضیحات دیدگاه روشنی از انتخاب رویکرد تحقیقاتی ما فراهم کرده باشد. | با توجه به اینکه، موضوع بحث مقاله انتشار زیرزمینی است، نیازی به بیان انتشار در هوای اتمسفر وجود ندارد. با توجه به تقسیم انفجار به سه نوع فضای باز، هوای آزاد بالای سطح زمین و زیر سطحی در آیین نامه ارتش آمریکا یعنی  TM-855، بهتر است در مورد انفجار زیر سطحی بحث شود. | 2 |
| یکی از دلایل اصلی برای انتخاب مدل دوبعدی در این مرحله از تحقیق، ساده‌سازی و کاهش پیچیدگی‌های محاسباتی بوده است. همان‌طور که داور محترم اشاره کردند، تنش‌ها و جابجایی‌های خارج از صفحه می‌توانند در شرایط بحرانی تأثیرگذار باشند و حتی منجر به گسیختگی شوند. با این حال، هدف اصلی این مطالعه، ارزیابی کلی اثرات انفجار بر مخازن بتنی مدفون در خاک‌های رسی لای‌دار و تحلیل روند تغییرات جابجایی سقف و کف مخزن در عمق‌های مختلف بوده است.  تحلیل دوبعدی، به‌ویژه در شرایطی که هندسه و ویژگی‌های مسئله پیچیده نیست، امکان شبیه‌سازی رفتار کلی سازه را با دقت مناسب و زمان کوتاه‌تری فراهم می‌کند. در این تحقیق، این روش به محققان کمک کرده است تا دیدگاه‌های اولیه‌ای از رفتار مخازن مدفون تحت بارهای انفجاری کسب کرده و روندهای کلی را شناسایی کنند.  با این حال، اذعان داریم که تحلیل سه‌بعدی می‌تواند درک دقیق‌تری از توزیع تنش‌ها و جابجایی‌ها، به‌ویژه در شرایط بحرانی، ارائه دهد. بنابراین، برنامه‌ریزی برای گسترش تحقیق به تحلیل‌های سه‌بعدی در آینده در دستور کار قرار گرفته است. این گسترش می‌تواند اطلاعات بیشتری در رابطه با تنش‌ها و جابجایی‌های خارج از صفحه و تأثیر آن‌ها بر پایداری سازه فراهم کند.  امیدواریم این توضیحات دلیل انتخاب روش دوبعدی را روشن کرده و نشان دهد که برنامه‌ریزی برای تکمیل و توسعه تحقیق در مراحل بعدی انجام خواهد شد. | دلیل انتخاب تحلیل دوبعدی برای این مسئله شرح داده شود، زیرا تنش ها و جابجایی های خارج از صفحه نیز قابل توجه بود و می تواند عامل گسیختگی شود. | 3 |
| در شبیه‌سازی‌های عددی که شامل تحلیل‌های دینامیکی و انتشار امواج (مانند امواج ناشی از انفجار) هستند، مدل‌سازی سیستم به‌صورت یک ناحیه محدود انجام می‌شود. این ناحیه محدود با مرزهایی تعریف می‌شود که ممکن است در صورت مدل‌سازی نادرست، تأثیرات نامطلوبی بر نتایج شبیه‌سازی داشته باشند.  اگر شرایط طبیعی سیستم در مرزها به درستی اعمال نشود، امواج برخوردی به این مرزها می‌توانند بازتاب یافته و به داخل ناحیه مدل بازگردند. این بازتاب‌ها ممکن است باعث ایجاد اختلالات، تداخل امواج، و تحلیل نادرستی از رفتار سیستم شوند. برای جلوگیری از این مشکلات، در شبیه‌سازی‌های عددی از مرزهای جاذب (Absorbing Boundaries) استفاده می‌شود.  مرزهای جاذب به گونه‌ای طراحی می‌شوند که انرژی امواج برخوردی را جذب کرده و از بازتاب آن‌ها به داخل مدل جلوگیری کنند. این امر به شبیه‌سازی دقیق‌تر رفتار امواج در محیط و افزایش دقت تحلیل‌های دینامیکی کمک می‌کند. به‌طور خاص، در تحلیل حاضر از مرزهای ویسکوز استفاده شده است که بر اساس میرایی مصنوعی تعریف‌شده در نرم‌افزار FLAC 2D عمل می‌کنند. این مرزها با شبیه‌سازی شرایط طبیعی محیط، انرژی امواج را جذب کرده و از ایجاد بازتاب‌های نامطلوب جلوگیری می‌کنند.  استفاده از این مرزها نه تنها دقت نتایج را بهبود می‌بخشد، بلکه تحلیل واقع‌گرایانه‌تری از انتشار امواج ناشی از انفجار فراهم می‌آورد. این روش به‌ویژه در شبیه‌سازی محیط‌های خاکی و اندرکنش سازه و خاک اهمیت بسیاری دارد. | در مورد مرزهای جاذب و در خصوص عملکرد مرزها و بازتابش امواج و تاثیر روی نتایج توضیح داده شود. | 4 |
| در این مقاله، مدل‌سازی انفجار در نرم‌افزار AUTODYN انجام شده و داده‌های مربوطه برای تحلیل به FLAC 2D منتقل شده است. منظور از نصب فشارسنج‌ها در مسیر شعاعی انتشار امواج، انتخاب نقاط مرجع برای ارزیابی تنش و فشار ناشی از انفجار در نواحی مشخصی از مدل است.  این نقاط مرجع یا "فشارسنج‌ها" در واقع به‌عنوان مکان‌هایی برای اندازه‌گیری و ثبت تاریخچه فشار ناشی از موج انفجار عمل می‌کنند. در تحلیل دوبعدی، این نقاط در مسیر گسترش امواج انتخاب می‌شوند تا بتوان رفتار موج و فشار اعمال شده به خاک و سازه مدفون را به‌درستی تحلیل و شبیه‌سازی کرد.  در واقع، نقش فشارسنج‌ها در این مدل‌سازی، فراهم کردن داده‌های دقیق درباره رفتار موج در نقاط کلیدی است که این داده‌ها به‌عنوان ورودی برای تحلیل‌های دینامیکی در نرم‌افزار FLAC 2D استفاده می‌شوند. هدف از این انتخاب، اطمینان از دقت داده‌های مربوط به فشار و تنش در نقاطی است که تأثیر موج انفجار بیشترین اهمیت را دارد. | منظور از نصب فشارسنج در مسیر شعاعی انتشار امواج (که در تحلیل دوبعدی معنی ندارد)، انتخاب نقطه تنشی می باشد؟ | 5 |
| رابطه (5)، یعنی D=0.8W1/3، یک رابطه تجربی است که عمدتاً برای تخمین قطر گودال انفجار بر اساس وزن ماده منفجره استفاده می‌شود. این رابطه در بسیاری از تحقیقات و همچنین MANUAL نرم‌افزار FLAC 2D به‌عنوان یک ابزار کلی و ساده برای مدل‌سازی انفجار به‌کار می‌رود. با این حال، باید توجه داشت که این رابطه به‌طور مستقیم تابع جنس خاک نیست و در اصل، برای شرایط عمومی و بدون توجه به ویژگی‌های خاص خاک توسعه یافته است.  در تحقیق حاضر، برای اطمینان از دقت و انطباق مدل‌سازی، این رابطه با در نظر گرفتن مشخصات مکانیکی خاک مورد مطالعه (که در جدول‌ (1) ارائه شده‌اند) مورد استفاده قرار گرفته است. داده‌های مربوط به خاک، شامل پارامترهایی نظیر زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی و چگالی، در تعیین نتایج شبیه‌سازی لحاظ شده‌اند. همچنین، گودال ایجادشده ناشی از انفجار بر اساس مشخصات خاک رسی لای‌دار و پارامترهای تعریف‌شده در مدل‌سازی منظور شده است.  بنابراین، اگرچه رابطه (5) به‌طور خاص تابع جنس خاک نیست، اما در این تحقیق تلاش شده است که اثرات مشخصات خاک با تنظیم مدل‌سازی و نتایج نهایی به درستی منعکس شوند. این نکته نیز پذیرفته می‌شود که رابطه‌ای دقیق‌تر که به‌طور مستقیم جنس خاک را در نظر بگیرد، می‌تواند نتایج را بهبود بخشد و به همین دلیل، توسعه چنین روابطی می‌تواند به‌عنوان بخشی از تحقیقات آینده در نظر گرفته شود. | آیا رابطه (۵) تابع جنس خاک نیست؟ این رابطه برای خاک موضوع مقاله معتبر است؟ | 6 |
| خاک‌های رسی لای‌دار به دلیل مقاومت برشی پایین خود، به‌طور کلی توانایی تحمل بارهای شدید، به‌ویژه بارهای دینامیکی مانند انفجار را کاهش می‌دهند. این مقاومت برشی پایین، در شرایطی که خاک تحت بار انفجاری قرار می‌گیرد، می‌تواند موجب کاهش ظرفیت باربری، افزایش تغییر شکل‌های دائمی و در نتیجه تشدید ناپایداری سازه شود.  با این حال، همان‌طور که داور محترم اشاره کردند، مقاومت برشی پایین خاک می‌تواند اثرات دیگری نیز داشته باشد. خاک‌های با مقاومت برشی پایین، به دلیل رفتار غیرخطی و خاصیت میرایی هیسترزیس، توانایی بالایی در جذب و مستهلک کردن انرژی موج انفجار دارند. این ویژگی می‌تواند به کاهش شدت موج انفجار که به سازه مدفون می‌رسد کمک کند. به عبارت دیگر، توانایی خاک در جذب انرژی انفجار وابسته به عواملی همچون نوع خاک، درجه اشباع، عمق دفن سازه و مشخصات بار انفجاری است.  در تحقیق حاضر، جمله "حساسیت بالا و مقاومت برشی کم خاک‌های رسی لای‌دار از جمله عواملی هستند که ناپایداری سازه تحت بار انفجاری را تشدید می‌کنند"، به‌طور خاص به شرایطی اشاره دارد که این خاک‌ها، به دلیل کاهش ظرفیت باربری و افزایش تغییر شکل‌ها، قادر به جذب کامل انرژی انفجار نیستند. این شرایط معمولاً در عمق دفن کم و تحت فشارهای شدید انفجاری رخ می‌دهد. بنابراین، جمله مذکور به تأثیر منفی این ویژگی‌ها در شرایط خاص بارگذاری انفجاری اشاره دارد.  در عین حال، اذعان می‌کنیم که مقاومت برشی پایین در برخی شرایط می‌تواند موجب جذب بیشتر انرژی انفجار و کاهش تأثیرات آن شود. این نکته مهم و کلیدی می‌تواند در تحقیقات آینده برای بررسی دقیق‌تر نقش ویژگی‌های خاک در جذب انرژی انفجار مورد مطالعه قرار گیرد. | جمله "اما حساسیت بالا و مقاومت برشی کم خاک های رسی لای دار از جمله عواملی هستند که ناپایداری سازه تحت بار انفجاری را تشدید می کنند." همیشه درست است؟ مقاومت برشی کم نمی تواند عامل میرا کردن بیشتر انفجار شود؟ | 7 |
| ضمن تشکر مجدد، توضیحات بیشتر در مورد **رفتار دینامیکی خاک** و تأثیر آن بر نتایج در مقاله گنجانده شد.  خاک تحت بار انفجاری به صورت غیر خطی و الاستیک-پلاستیک رفتار می­کند. به عبارتی دیگر، خاک در برابر بار انفجاری ابتدا ممکن است به صورت الاستیک رفتار کند، اما با افزایش شدت بار انفجاری، به حالت پلاستیک می‌رود و تغییر شکل‌های دائمی در آن ایجاد می‌شود. در خاک‌های رسی لای‌دار، رفتار ناپایدار و مقاومت برشی پایین این خاک‌ها در برابر بارهای دینامیکی، باعث می‌شود که خاک در برابر انفجارها بیشتر به همگرا شدن و تغییر شکل‌های قابل توجه تمایل داشته باشد، که می‌تواند اثرات مهمی بر عملکرد سازه داشته باشد.  در مورد خاک‌های رسی لای‌دار، این نوع خاک‌ها به دلیل مقاومت برشی پایین و رفتار ناپایدار، در برابر بارهای دینامیکی، تمایل بیشتری به تغییر شکل‌های غیرالاستیک نشان می‌دهند. به عبارت دیگر، فشار ناشی از موج انفجار می‌تواند منجر به همگرایی بیشتر ذرات خاک و تغییر شکل‌های قابل توجه شود که می‌تواند به صورت زیر بر نتایج تأثیر بگذارد:   1. کاهش ظرفیت باربری خاک: رفتار پلاستیک خاک باعث کاهش توانایی آن در تحمل بارهای بعدی می‌شود، که می‌تواند آسیب‌های وارد شده به سازه را افزایش دهد. 2. تأثیر بر اندرکنش خاک و سازه: تغییر شکل‌های پلاستیک خاک می‌تواند به کاهش مقاومت در برابر موج انفجار در نزدیکی سازه‌های مدفون منجر شود و پایداری کلی سازه را تحت تأثیر قرار دهد. 3. اثر استهلاک انرژی: با وجود رفتار پلاستیک، خاصیت میرایی خاک‌های رسی لای‌دار می‌تواند بخشی از انرژی موج انفجار را مستهلک کند و از شدت تأثیر موج بر سازه بکاهد. | رفتار دینامیکی خاک و تاثیر آن برنتایج بیان نشده است! | 8 |
| از داور محترم بابت طرح سوالات دقیق و ارزشمندشان تشکر می‌کنیم.  در تمام مدل‌سازی­ها ارتفاع سیال داخل مخزن برابر ارتفاع مخزن (3/4 متر) در نظر گرفته‌شده است.  نحوه توزیع نیروی هیدرودینامیکی برای مخزن بتنی مطابق شکل (2) است. با توجه به اینکه نرم­افزار FLAC 2D قادر به شبیه­سازی خصوصیات سیالات نیست، برای بررسی عملکرد المان فشار حاصل از سیال بر اساس آیین­نامه ACI با توجه به ارتفاع آب مخزن و همچنین چگالی آب (10) مطابق با رابطه (3) بر دیواره مخزن اعمال‌شده است. دیاگرام فشار سیال وارده به دیواره مخزن در شکل (3) ارائه‌شده است.   |  |  | | --- | --- | | (3) |  |   با توجه به اهمیت سازه­های مدفون و وجه تمایز آن­ها به خاطر اندرکنش خاک و سازه نسبت به حالت سطحی، در مطالعه حاضر سعی شد رفتار مخزن بتنی مدفون در عمق­های متفاوت (3، 6، 8 و 10 متری) تحت تأثیر بار انفجاری (50، 100 و 200 کیلوگرم TNT) بررسی شود.  شکل 2. نحوه توزیع بار هیدرودینامیکی  Figure 2. How to distribute the hydrodynamic load  شکل 3. دیاگرام فشار سیال وارده به دیواره مخزن  **اما به صورت ویژه در پاسخ داوران محترم، بر اساس نتایج مطالعه حاضر و دیگر مطالعات:**  ***کلانی و همکاران (2023):***  میزان افزایش تغییر مکان، با توجه به نوع بارگذاری و میزان حجم آب درون مخزن متفاوت بوده و کمترین افزایش تغییر مکان در حالت پر و نیمه­پر مخازن اتفاق افتاده است. این موضوع را می‌توان به اثرات امواج سطحی ایجادشده در حالت پر و نیمه­پر و فشارهای نوسانی ناشی از برخورد موج به دیواره مخزن نسبت داد. همچنین با افزایش حجم مخزن از 500 به 1000 مترمکعب نیز میزان افزایش تغییر مکان کم­تر خواهد شد که می‌تواند به دلیل وزن بیشتر مخازن بزرگ­تر در حالت پر و ایجاد مقاومت در برابر حرکت جانبی باشد.  علت کاهش میزان جابجایی در مخازن نیمه‌پر و پر را می‌توان به اثرات میرا کنندگی ناشی از حرکت جرم قابل‌ملاحظه آب در حالت پر و نیمه­پر در مقایسه باحالت خالی مخازن نسبت داد. با توجه به وجود جرم قابل‌ملاحظه آب درون مخزن در حالت پر و نیمه­پر، فرکانس طبیعی ارتعاش مجموعه سازه و سیال و به تبع آن میرایی کل سیستم متفاوت از حالت مخزن خالی خواهد بود. بنابراین در حالت مخزن خالی، به دلیل کاهش قابل‌توجه جرم، فرکانس ارتعاش افزایش‌یافته و به فرکانس غالب مؤلفه­های دورانی در برخی از بارگذاری­ها نزدیک می‌شود. این عامل می‌تواند سبب پررنگ شدن اثر مؤلفه دورانی بر پاسخ مخازن خالی در این حالت­ها گردد [6].  *Sarokolayi, L.K., L. Khanmohammadi, and B.N. Neya, Dynamic Analysis of Concrete Rectangular Ground Tanks equipped with Base Isolators due to Transitional and Rotational Components of Earthquakes. Ferdowsi Civil Engineering, 2023. 36.*  ***رضوی طوسی و همکاران (2021):***  سیال ذخیره‌شده در مخازن براثر رسیدن امواج انفجار به دیواره مخزن و اندرکنش دیواره نسبت به آن باعث مواج شدن سطح سیال می‌شود. بار هیدرواستاتیکی به‌صورت فشاری از داخل به دیواره مخزن وارد می‌شود.  با توجه به اینکه در هنگام انفجار، مخزن از طرف بیرون تحت موج فشاری ناشی از انفجار و از داخل تحت‌فشار ناشی از آب قرار می‌گیرد، به همین دلیل سیال درون مخزن طبق تئوری هاوسنر به دو بخش جرم سخت و مواج تقسیم­بندی می‌شود. عامل اصلی ایجاد تنش‌های حلقوی بخش مواج آب می‌باشد. با توجه به اینکه در حالت 100 درصد پر، بخش مواج درصد بیشتری از کل آب را شامل می‌شود درنتیجه تنش‌های حلقوی ناشی از آن بیشتر نمایان می‌شود و با کاهش درصد پرشدگی این تنش­ها کاهش می­یابند.  هنگامی‌که امواج انفجار به مخازن می­رسند، بر اساس مسافتی که تا دیواره طی می‌کنند از شدت آن‌ها کم می‌شود و این تأثیر مستقیمی بر فشار آب داخل مخزن دارد.  در اثر پدیده تلاطم آب، آب ضربه‌هایی به بدنه داخلی مخزن وارد می‌کند و امواجی در سطح آب تشکیل می‌شود. امواج به‌صورت افقی و قائم حرکت می‌کنند. علاوه بر این مشاهده می‌شود که برخورد آب به دیواره مخزن باعث ایجاد نیرویی در داخل مخزن می‌شود و مخزن در مقابل آن نیرویی متقابل اعمال می‌کند. امواجی که به‌صورت افقی به بدنه مخزن وارد می‌شوند با نیروی هیدرودینامیکی خود مانع تغییر مکان مخزن به داخل می‌شوند. به‌نوعی می‌توان گفت که با فشار انفجار به داخل مخزن، آب هم با نیروی هیدرودینامیکی در مقابل این فشار مقاومت می‌کند و مخزن را از آسیب­های احتمالی حفظ می‌کند.   * وجود سیال در مخزن به دلیل افزایش سختی و درنتیجه سختی مخزن، موجب فشارهایی در درون مخزن می‌شود و فشار انفجار را حدود 10 تا 20 مگاپاسکال کاهش می­دهد. * در مخازنی که نسبت ارتفاع به شعاع بیشتری دارند می‌توان حساسیت پایداری آن‌ها را احساس کرد. لازم است که در این مخازن درصد بیشتری از سیال قرار داد تا پایداری خود را با افزایش سختی کنترل کند. * بیشترین کرنش‌های ایجادشده در بالای سطح آب ظاهرشده، لذا مخازن دارای آب می­توانند با نیروهای هیدرودینامیکی مانع پیشروی بدنه به داخل شوند [5].   *Seyed Vahid Razavi Tosee, Majid Moghadam, and M. Shahrbanouzadeh, Investigation of hoop stresses of fluid storage RC tanks under explosion by consideration of liquid surface movements. Journal of civil and environmental engineering of Tabriz University, 2021: p. -.*  ***Wang و Zhou (2015):***  وجود آب در مخزن می‌تواند پاسخ مخزن تحت بارگذاری انفجاری را کاهش دهد. بررسی­ها نشان دادند که در یک مخزن آب، انرژی داخلی افزایش می‌یابد درحالی‌که کار خارجی کاهش می‌یابد.  نتایج عددی نشان داد که آب می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی پاسخ مخزن آب تحت بارگذاری انفجاری را از طریق کاهش کار خارجی کاهش دهد. وجود آب در مخزن به کاهش تغییر شکل و آسیب کمک کرده است [4].  *Wang, Y. and H. Zhou, Numerical study of water tank under blast loading. Thin-Walled Structures, 2015. 90: p. 42-48.*  ***Moghadam و همکاران (2022):***  فشار امواج انفجار دیواره مخزن را به سمت داخل تحریک می‌کند و فشار آب از داخل به بیرون مخالف این بار انفجاری است. نتایج نشان می‌دهد که ارتفاع بیشتر آب در داخل مخزن باعث جابجایی کمتر دیواره مخزن به سمت داخل می‌شود و مخزن خالی بیشترین جابجایی را نسبت به سایر مخازن آب دارد.  نتایج ارزیابی تنش‌های حلقه‌ای ایجادشده در بدنه مخزن آب پس از انفجار نشان داد که بدنه مخزن در معرض دو عامل است: موج فشار ناشی از انفجار از خارج و فشار ناشی از آب از داخل.  نتایج نشان می‌دهد که پارامترهای درصد آب، نسبت ارتفاع مخزن آب به شعاع، و فاصله از مرکز انفجار، همگی تأثیر قابل‌توجهی بر پاسخ دینامیکی ساختار مخزن آب دارند. درواقع، با کاهش درصد آب و افزایش ارتفاع مخازن، جابجایی­های افقی افزایش می‌یابد.  وجود مایع در مخزن آب منجر به تولید فشار در داخل مخزن آب می‌شود (به دلیل افزایش سختی مخزن آب) و فشار انفجار را کاهش می‌دهد.  اکثر کرنش‌های ایجادشده در بالای سطح آب ظاهر می­شوند به‌طوری‌که مخازن آب می­توانند از طریق نیروهای هیدرودینامیکی حرکت بدنه را به سمت داخل مسدود کنند [3].  *Moghadam, M., S. Razavitosee, and M. Sharbanozadeh, Dynamic analysis of reinforced concrete water tanks under blast considering fluid-structure interaction. Scientia Iranica, 2022.* ***29****(6): p. 2902-2918* | اثر فشار مایع مخزن روی نتایج چیست؟ در حالت مخزن خالی نتایج چه فرقی دارد؟ | 9 |
| محیط خاک کاملا خشک در نظر گرفته شد. | آیا محیط خاک خشک یا اشباع است؟ تحلیل ها زهکشی شده یا زهکشی نشده است؟ | 10 |
| 4- نتیجه‌گیری  با توجه به اهمیت سازه­های مدفون و وجه تمایز آن­ها به خاطر اندرکنش خاک و سازه نسبت به حالت سطحی، در این تحقیق رفتار مخزن مدفون در خاک رسی لای دار تحت تأثیر بار انفجاری با استفاده از نرم­افزار FLAC 2D مورد بررسی قرارگرفته است. برای این منظور مخزن بتنی نیمه پر مدفون در عمق­های متفاوت (3، 6، 8 و 10 متری) با هندسه مستطیلی مدل‌سازی شده است. برای بررسی تأثیر بار انفجار از 50، 100 و 200 کیلوگرم ماده منفجره TNT در این پژوهش استفاده‌شده است. در این مطالعه به بررسی تأثیر وزن‌های مختلف مواد منفجرهTNT و عمق قرارگیری سازه زیرزمینی بر جابجایی سقف و کف مخزن بتنی پرداخته شد. برخی از مهم­ترین نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش به شرح ذیل است:  1. تأثیر انفجار بر روی هر سازه­ای به وزن و اندازه ماده منفجره بستگی دارد. علاوه بر این، پارامترهای محیط اطراف بر پاسخ‌ها تأثیر دارند. عمق مدفون سازه زیرزمینی، اندرکنش خاک و سازه زیرزمینی، خواص فیزیکی و مکانیکی خاک، وزن ماده منفجره، مقدار میرایی انرژی در اعماق مختلف، ازجمله عوامل مؤثر بر فشار انفجاری برسازه زیرزمینی است.  2. با افزایش عمق دفن مخزن، میزان جابجایی سقف و کف به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، تحت بار انفجاری 50 کیلوگرم TNT، جابجایی سقف مخزن از 59/126 در عمق 3 متر به 86/26 میلی­متر در عمق 10 متر کاهش یافته است که نشان‌دهنده کاهش 78 درصدی جابجایی است.  3. میزان تنش ایجادشده در خاک در اعماق زیرین خاک کاهش‌یافته است که این نشان‌دهنده مستهلک شدن انرژی انفجار در خاک است. با توجه به اینکه در اعماق زیرین به دلیل فشار حاصل از وزن خاک بالاسری خاک ساختاری فشرده­تر و متراکم­تر دارد، می­تواند امواج حاصل از انفجار را با سرعت بیشتری از خود عبور دهد و همین امر باعث تسریع روند استهلاک امواج و درنتیجه آن کاهش خسارات وارده به سازه مدفون را به دنبال داشته باشد.  4. رفتار غیرخطی و الاستیک-پلاستیک خاک رسی لای‌دار نقش مهمی در کاهش دامنه جابجایی‌ها و استهلاک انرژی انفجار دارد. این خاک به دلیل چسبندگی و تراکم بالاتر، اثر قابل توجهی بر کاهش جابجایی و تنش‌های سازه مدفون در اعماق مختلف نشان داده است.  5. با افزایش بار دینامیکی، سیستم خاک-سازه تعبیه شده در خاک رسی لای­دار به صورت غیر خطی رفتار می کند که منجر به کاهش سختی و افزایش میرایی می شود. حداکثر دامنه جابجایی تحت بار دینامیکی کاهش می‌یابد که عمدتاً به دلیل میرایی هیسترتیک بالا ناشی از رفتار غیرخطی خاک­های رسی لای­دار است .  6. افزایش عمق دفن به عنوان یک راهکار مهندسی مؤثر باعث بهبود عملکرد سازه‌های مدفون در برابر انفجار می‌شود. این نتایج می‌توانند به طراحی ایمن‌تر سازه‌های زیرزمینی، نظیر مخازن، تونل‌ها و پناهگاه‌ها، در شرایط بارگذاری انفجاری کمک کنند و راهنمایی برای انتخاب عمق دفن بهینه در پروژه‌های مهندسی باشند. | نتایج بازنگری و به صورت کوتاه و کمی بیان شده و نتایج مهندسی این مطالعه نیز بیان شود. | 11 |

**پاسخ به داو ر محترم دوم**

با تشکر از نظرات ارزشمند داور محترم، تلاش شد تا حد امکان تمام نکات مورد نظر داوران محترم در مقاله اعمال شود.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| اصلاحات انجام شده. | اصلاحات خواسته شده | شماره |
| محدوده مطالعاتی تحقیق حاضر در استان هرمزگان واقع شده است. با این حال، به دلیل حساسیت موضوع و جلوگیری از افشای اطلاعات خاص پروژه، محل دقیق بررسی در مقاله ذکر نشده است. منطقه مورد مطالعه عمدتاً دارای خاک‌های رسی لای‌دار است که از ویژگی‌های مکانیکی و ژئوتکنیکی خاصی برخوردار هستند.  بخش 2-1:  محدوده مطالعاتی تحقیق حاضر در استان هرمزگان است. محل دقیق به صورت واضح در مقاله قابل بیان نیست. | در بخش ۲-۱ نیاز است تا منطقه جغرافیایی مورد مطالعه معرفی شود. همچنین لازم است تا نتایج بیشتری از مطالعات ژئوتکنیک انجام شده در منطقه ارائه شود. | 1 |
| با تشکر از دقت نظر شما، متاسفانه در ویرایش نهایی مقاله اعداد جدول صحیح ذکر نشده است. اعداد صحیح در جدول بیان شد  خاک منطقه مورد مطالعه بسیار متراکم و دانسیته خاک در حدود ***(***kN/m3***)*** 21.5 است. پارامترهای چسبندگی و زاویه تصطکاک داخلی خاک با آزمایش برش مستقیم حاصل شده است. برای تعیین مدول الاستیسیته خاک از آزمایش سه محوری و زمایش فشار تک‌محوری استفاده شده است.  جدول 1. برخی پارامترهای ژئوتکنیکی خاک منطقه موردمطالعه   |  |  |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | --- | --- | | **φ** | **C (kPa)** | **E (MPa)** | **υ** | **γ (kN/m3)** | **مصالح** | | 23 | 120 | 110 | 0.4 | 21.5 | **Alluvial Deposits**  **(ML-CL)** | | پارامترهای ارائه شده در جدول ۱ برای خاک رس با پلاستیسیته پایین زیاد به نظر می­رسد. بهتر است بیان شود که این نتایج از چه آزمایش هایی حاصل شده است و آیا مقادیر ذکر شده با هم همخوانی دارند؟ | 2 |
| کیفیت شکل تصحیح شد. | کیفیت برخی شکل ها نظیر شکل ۲ پایین است. لطفا اصلاح شود. | 3 |
| در تحقیق حاضر، به دلیل محدودیت نرم‌افزار FLAC 2D در شبیه‌سازی مستقیم خصوصیات سیالات، نیروهای هیدرودینامیکی ناشی از مایع داخل مخزن به‌صورت محاسباتی و بر اساس آیین‌نامه ACI اعمال شده‌اند. در نرم‌افزار FLAC 2D، نیروهای هیدرودینامیکی به‌عنوان یک بار استاتیکی توزیع‌شده به دیواره‌های داخلی مخزن اعمال شده‌اند. این روش شبیه‌سازی امکان ارزیابی تأثیر فشار داخلی مایع بر پایداری و تغییر شکل‌های مخزن تحت بار انفجاری را فراهم می‌کند.  همانطور که در متن مقاله ذکر شده است.  در تمام مدل‌سازی­ها ارتفاع سیال داخل مخزن برابر ارتفاع مخزن (3/4 متر) در نظر گرفته‌شده است.  نحوه توزیع نیروی هیدرودینامیکی برای مخزن بتنی مطابق شکل (2) است. با توجه به اینکه نرم­افزار FLAC 2D قادر به شبیه­سازی خصوصیات سیالات نیست، برای بررسی عملکرد المان فشار حاصل از سیال بر اساس آیین­نامه ACI با توجه به ارتفاع آب مخزن و همچنین چگالی آب (10) مطابق با رابطه (3) بر دیواره مخزن اعمال‌شده است. دیاگرام فشار سیال وارده به دیواره مخزن در شکل (3) ارائه‌شده است.   |  |  | | --- | --- | | (3) |  |   شکل 2. نحوه توزیع بار هیدرودینامیکی  Figure 2. How to distribute the hydrodynamic load  شکل 3. دیاگرام فشار سیال وارده به دیواره مخزن | نیروهای هیدرودینامیکی را چگونه در مدل لحاظ کرده اید؟ توضیح داده شود. | 4 |
| در مدل‌سازی عددی این تحقیق، از المان‌های چهارضلعی (Quad Elements) در نرم‌افزار FLAC 2D استفاده شده است. این نوع المان‌ها به دلیل سادگی در شبیه‌سازی هندسه‌های منظم و توانایی در تحلیل دقیق اندرکنش خاک و سازه، انتخاب شده‌اند. برای شبیه‌سازی رفتار غیرخطی خاک، از المان‌های مناسب برای مدل‌های الاستیک-پلاستیک استفاده شده است. برای افزایش دقت مدل‌سازی و کاهش خطای عددی، اندازه المان‌ها در نزدیکی سازه مدفون و در مناطقی که تغییرات تنش و جابجایی بیشتری وجود دارد، کوچک‌تر در نظر گرفته شده است. در مناطقی دورتر از سازه، اندازه المان‌ها بزرگ‌تر انتخاب شده تا از افزایش غیرضروری حجم محاسبات جلوگیری شود. در نزدیکی به سازه: اندازه المان‌ها 0.1 متر انتخاب شده است؛ در مناطق دورتر: اندازه المان‌ها به‌تدریج افزایش یافته و به 0.5 متر می‌رسد.  این تغییرات در اندازه المان‌ها، دقت محاسبات را در مناطقی که تنش و تغییر شکل بیشتری رخ می‌دهد، بهبود داده و همزمان زمان تحلیل را کاهش داده است.  برای اطمینان از دقت و پایداری نتایج، ارزیابی حساسیت مش انجام شده است. در این ارزیابی، مدل با اندازه‌های مختلف المان مش‌بندی شده و نتایج حاصل (جابجایی‌ها و تنش‌ها) مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. نتایج نشان دادند که کاهش اندازه المان‌ها در نزدیکی سازه، تأثیر قابل توجهی بر دقت محاسبات دارد، اما پس از رسیدن به اندازه المان حدود 0.1 متر، تغییرات نتایج ناچیز بوده و دقت کافی حاصل شده است. بنابراین، این اندازه به‌عنوان اندازه بهینه المان انتخاب شده است. | درباره نوع المانهای مورد استفاده، اندازه المانها و نحوه تغییرات آن در مقاله صحبتی نشده است. همچنین لازم است تا ارزیابی حساسیت مش هم بیان شود. | 5 |
| آزمایش‌های مربوط به بارگذاری مواد منفجره، به دلیل هزینه‌های بالا، زمان‌بر بودن، و چالش‌های امنیتی جدی، انجام آن‌ها در بسیاری از موارد محدودیت‌های عملیاتی و اجرایی ایجاد می‌کند. از این‌رو، در تحقیق حاضر از شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از نرم‌افزارهای پیشرفته FLAC 2D و AUTODYN بهره گرفته شده است که امکان بررسی شرایط مختلف بارگذاری انفجاری را با دقت بالا فراهم می‌کنند. این روش به‌ویژه در تحلیل پدیده‌های پیچیده مانند اندرکنش خاک و سازه، که نیازمند داده‌های گسترده و شرایط کنترلی دقیق است، بسیار موثر است و جایگزین قابل اعتمادی برای آزمایش‌های میدانی محسوب می‌شود.  مدل عددی مورد استفاده در این تحقیق بر اساس داده‌های معتبر آزمایشگاهی و تجربی طراحی شده است. پارامترهای ژئوتکنیکی خاک منطقه (مانند زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی، مدول الاستیسیته و دانسیته) از آزمایش‌های استاندارد نظیر برش مستقیم، سه‌محوری، و وزن مخصوص خاک استخراج شده‌اند. همچنین، روابط تحلیلی به‌کاررفته، از جمله نیروی هیدرودینامیکی و فشار ناشی از سیال، بر اساس آیین‌نامه‌های معتبر نظیر ACI و منابع علمی موثق اعمال شده‌اند. در عین حال، اذعان داریم که انجام آزمایش‌های میدانی یا مقایسه نتایج مدل با داده‌های واقعی می‌تواند دقت و اعتبار نتایج را افزایش دهد. این موضوع به‌عنوان بخشی از تحقیقات آینده در نظر گرفته خواهد شد تا بتوان شرایط واقعی را به‌طور دقیق‌تر در تحلیل‌ها لحاظ کرد. بار دیگر از داور محترم برای دقت نظر و پیشنهاد سازنده‌شان سپاسگزاریم. | لازم است تا قبل از انجام مطالعات پارارمتریک، مدل ساخته شده با استفاده از داده های میدانی یا آزمایشگاهی اعتبارسنجی (صحت سنجی) شود. | 6 |
| نتخاب مدل دوبعدی برای تحقیق حاضر با توجه به اهداف و محدودیت‌های موجود صورت گرفته است. هدف اصلی این تحقیق ارزیابی کلی رفتار مخازن بتنی مدفون تحت بار انفجاری و تحلیل روند تغییرات جابجایی سقف و کف مخزن در عمق‌های مختلف بوده است. تحلیل دوبعدی در این مرحله از تحقیق، با ساده‌سازی مسئله و کاهش پیچیدگی‌های محاسباتی، امکان شبیه‌سازی دقیق رفتار کلی سازه را فراهم کرده و نتایج قابل اعتمادی برای شناسایی روندهای کلی ارائه داده است.  البته اذعان داریم که ماهیت مسئله، به‌ویژه در شرایط بحرانی، سه‌بعدی است و در نظر گرفتن فقط دو بعد می‌تواند اثراتی بر نتایج داشته باشد. به‌عنوان مثال، تنش‌ها و جابجایی‌های خارج از صفحه که در مدل دوبعدی لحاظ نمی‌شوند، ممکن است در برخی شرایط خاص تأثیر قابل توجهی بر پاسخ سازه داشته باشند. با این حال، در این تحقیق، شرایط مرزی و مشخصات مخزن به‌گونه‌ای تنظیم شده‌اند که بتوانند اثرات کلی را به‌خوبی در مدل دوبعدی منعکس کنند.  برای تکمیل و توسعه این مطالعه، برنامه‌ریزی شده است که در آینده از مدل‌سازی سه‌بعدی استفاده شود. این رویکرد می‌تواند اطلاعات دقیق‌تری درباره توزیع تنش‌ها و جابجایی‌های خارج از صفحه ارائه داده و دقت نتایج را به‌ویژه در شرایط پیچیده‌تر افزایش دهد. امیدواریم این توضیحات، دلایل انتخاب تحلیل دوبعدی در این مرحله و تاثیرات آن بر نتایج را روشن کرده باشد. | مدل ساخته شده دو بعدی است. در حالیکه بعید به نظر می رسد که بعد دیگر مخزن زیاد باشد که بتوان محاسبات را در وارد طول انجام داد. لذا لازم است توضیح داده شود که دو بعدی در نظرگرفتن یک مسئله ای که ماهیت سه بعدی دارد چه تاثیری در نتایج دارد. | 7 |
| با تشکر از نظر داور محترم، انتخاب واحد Pa در مقاله به دلیل دقت بالا در نمایش مقادیر فشار بوده است. این انتخاب به دلیل رعایت دقیق­تر استانداردهای علمی در مقیاس‌های اندازه‌گیری است. از آنجایی که Pa واحد اصلی فشار است، استفاده از آن برای دقت علمی بیشتر و جلوگیری از هرگونه سردرگمی در مفاهیم فنی ضروری به نظر می‌رسد. با این حال، همانطور که اشاره کردید، در بسیاری از مقالات علمی و فنی، استفاده از واحدهایی مانند kPa یا MPa برای فشار رایج‌ است، زیرا این واحدها معمولاً برای مقادیر بزرگ‌تر فشار راحت‌تر قابل درک و استفاده هستند. | واحدها در مقاله با Pa بیان شده است که معمولا برای درک بهتر با kPa یا MPa بیان می شود. | 8 |
| با نهایت تشکر از دقت نظر جنابعالی بند 1 نتیجه گیری اصلاح شد.  تأثیر انفجار بر روی هر سازه­ای به وزن و اندازه ماده منفجره بستگی دارد. علاوه بر این، پارامترهای محیط اطراف بر پاسخ‌ها تأثیر دارند. عمق مدفون سازه زیرزمینی، اندرکنش خاک و سازه زیرزمینی، خواص فیزیکی و مکانیکی خاک، وزن ماده منفجره، مقدار میرایی انرژی در اعماق مختلف، ازجمله عوامل مؤثر بر فشار انفجاری برسازه زیرزمینی است. | در بند ۱ نتیجه گیری، حرف از محل اعمال انفجار زده شده است که به نظر می رسد در مطالعات پارامتریک بررسی نشده است. لذا چگونه این نتیجه گیری حاصل شده است؟ | 9 |
| با تشکر از دقت نظر شما، متن نتیجه گیری تصحیح شد.  در بند چهارم بخش نتیجه‌گیری، جمله مربوط به مقاومت برشی پایین خاک رس مورد بازبینی قرار گرفت و اصلاح شد. همان‌طور که در جدول 1 مقاله ارائه شده است، پارامترهای ژئوتکنیکی خاک منطقه مورد مطالعه، شامل زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی، نشان‌دهنده خاکی با ویژگی‌های نسبتاً مقاوم است. بنابراین، استفاده از عبارت "مقاومت برشی کم" در نتیجه‌گیری مقاله اشتباه بوده و این بخش بازنویسی شد تا بیانگر ویژگی‌های واقعی خاک مورد بررسی باشد.  علاوه بر این، در این مطالعه اثر مقاومت برشی خاک به‌صورت مستقیم در مطالعه پارامتریک بررسی نشده است. در نتیجه، نتیجه‌گیری در این خصوص بر اساس داده‌های موجود انجام نشده و این موضوع در نسخه اصلاح‌شده مقاله به‌وضوح ذکر شده است. . | در بند ۴ بخش نتیجه گیری حرف از مقاومت برشی کم خاک رسی زده شده که با پارامترهای جدول ۱ همخوانی ندارد. همچنین اثر مقدار مقاومت برشی خاک نیز در مطالعه پارامتریک بررسی نشده است که بتوان نتیجه ای از آن گرفت. | 10 |
| با توجه به اینکه مقدار حساسیت خاک رس (Sensitivity) در هیچ بخشی از مقاله ارائه یا بررسی نشده است، استفاده از این عبارت در نتیجه‌گیری نادرست بوده و حذف شد. | در بند ۴ نتیجه گیری از حساسیت رس حرف زده شده است که در هیچ جای مقاله مقدار حساسیت ذکر نشده و اثر آن نیز بررسی نشده است. | 11 |
| با تشکر از نظر دقیق و ارزشمند داور محترم، توضیحات بیشتری در خصوص انتخاب عمق دفن به‌عنوان پارامتر اصلی تحقیق ارائه می‌شود. انتخاب این پارامتر به دلیل اهمیت بالای آن در طراحی و ارزیابی سازه‌های مدفون در برابر انفجار صورت گرفته است. اگرچه ممکن است در نگاه اول کاهش جابجایی‌ها با افزایش عمق دفن بدیهی به نظر برسد، اما در تحقیق حاضر تلاش شده است تا با استفاده از مدل‌سازی عددی دقیق، ارتباطات پیچیده و غیرخطی بین عمق دفن و پاسخ سازه در خاک‌های رس‌دار لای‌دار بررسی شود.  خاک‌های رس‌دار لای‌دار رفتارهای مکانیکی متفاوتی نسبت به خاک‌های معمولی دارند و ویژگی‌های خاص آن‌ها مانند مقاومت برشی پایین‌تر و تراکم‌پذیری بیشتر، اثرات انفجار را تحت شرایط خاصی به‌طور قابل توجهی تغییر می‌دهند. این تحقیق با هدف تحلیل دقیق این رفتارها و ارائه اطلاعات کاربردی برای طراحی سازه‌های مقاوم‌تر انجام شده است.  نتایج نشان می‌دهند که رفتار خاک و سازه در برابر انفجار نه‌تنها تابعی از عمق دفن است، بلکه تحت تأثیر تعاملات پیچیده بین مشخصات خاک و موج انفجار قرار دارد. این بررسی‌های دقیق، فراتر از بدیهیات اولیه، دیدگاه‌های مفیدی را برای مهندسان در طراحی سازه‌های ایمن‌تر در شرایط خاص فراهم می‌کند. امیدواریم این توضیحات دیدگاه روشن‌تری نسبت به اهداف و یافته‌های این تحقیق ارائه دهد. | در کل فقط اثر عمق مدفون بررسی شده است که نتیجه حاصله هم تا حدی بدیهی به نظر می رسد. | 12 |

**تحلیل** اثر عمق مدفون مخازن بتني تحت بار انفجاري در خاک­های رسی لای­دار

**محمد امیری1\*؛ مختار دالوند2؛ حدیث کریمی3**

1. دانشیار؛ گروه مهندسی عمران، دانشگاه هرمزگان
2. کارشناس ارشد؛ مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بندرعباس
3. دانشجوی دکتری؛ مهندسی عمران، دانشگاه هرمزگان

[amirii@hormozgan.ac.ir](mailto:amirii@hormozgan.ac.ir)

تاريخ دريافت [--/--/--] تاريخ پذيرش [--/--/--]

**چکیده**

مخازن بتنی مدفون به عنوان زیرساخت‌های عمومی و نظامی با اهمیت ملی و استراتژیک، در صورت آسیب دیدن، می‌توانند منجر به بحران‌های اجتماعی، امنیتی و زیست‌محیطی شوند. از این‌رو، طراحی این سازه‌ها برای مقاومت در برابر بارهای ضربه‌ای ناشی از انفجار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. همچنین، رفتار خاک‌های رسی لای‌دار در مواجهه با این نوع بارگذاری نیازمند بررسی دقیق است. در این مقاله، به بررسی تأثیر عمق دفن مخازن بتنی تحت بار انفجاری در خاک‌های رسی لای‌دار پرداخته شده است. مدل‌سازی و تحلیل این پدیده با استفاده از نرم‌افزار AUTODYN و نرم‌افزار المان محدود FLAC 2D انجام شده است. در این تحقیق، رفتار مخزن بتنی مدفون در عمق‌های مختلف (۳، ۶، ۸ و ۱۰ متر) تحت بارهای انفجاری ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم TNT مورد بررسی قرار گرفته است. فرض بر این بوده که انفجار سطحی با فشار و فاصله مشخصی از ساختار مخزن رخ داده است و در تحلیل‌ها، ویژگی‌های خاک، سازه و فشار سیال داخل مخزن در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عمق مدفون مخزن بتنی، میزان جابجایی سقف و کف مخزن تحت بار انفجاری کاهش می‌یابد. این کاهش ناشی از استهلاک انرژی انفجار در خاک‌های اطراف مخزن است. به‌طور خاص، پس از اعمال بار انفجاری ۵۰ کیلوگرم TNT، با افزایش عمق مدفون مخزن بتنی از ۳ متر به ۶، ۸ و ۱۰ متر، جابجایی سقف مخزن به ترتیب ۵۴٪، ۷۰٪ و ۷۸٪ کاهش یافته است. این نتایج نشان می‌دهد که عمق دفن مخزن تأثیر قابل توجهی بر عملکرد آن در برابر بار انفجاری دارد و می‌تواند به‌طور چشمگیری از آسیب‌های وارد بر سازه جلوگیری کند.

واژگان کلیدی: بررسی عددی، مخزن بتنی، بار انفجاری، عمق مدفون، افزایش عمق، مواد منفجره TNT

1-مقدمه

سازه­های زیرزمینی با توجه به ماهیت حیاتی، همواره به‌عنوان اهداف کلیدی برای حملات تروریستی ظاهر می‌شوند. بتن مسلح (Reinforced Concrete یا به‌اختصار RC) به‌عنوان یک مصالح ساختمانی پرکاربرد در هر دو زمینه نظامی و غیرنظامی می­باشد، ویژگی‌های ذاتی بتن آرمه نظیر دوام بالا، مقاومت در برابر خوردگی و مقاومت در برابر آتش‌سوزی، آن را برای ساخت سازه‌های زیرزمینی مناسب می‌سازد [1-2].

پس از انفجار­های بزرگ، امواج فشاری ناشی از انفجار با سرعت مافوق صوت در هوای اتمسفر منتشر می‌شوند [3]. امواج انفجاری به‌سرعت ماده منفجره را به گازی بسیار داغ، متراکم و پرفشار تبدیل می‌کند. حجم گاز این ماده منفجره باعث ایجاد امواج انفجاری قوی در هوا می‌شود. تنها حدود یک‌سوم کل انرژی تولید شده در بیشتر مواد منفجره قوی در فرآیند انفجار آزاد می‌شود. دوسوم انرژی باقیمانده در هنگام انفجارها به‌آرامی در هوا آزاد می­‌شود زیرا مواد انفجاری با هوا مخلوط می‌شوند و می‌سوزند. یک انفجار به‌صورت امواج ضربه‌ای متشکل از شوک­ها با شدت بالا است که از سطح ماده منفجره به سمت خارج به هوای اطراف منبسط می­شود. همان‌طور که‌موج ناشی از انفجار در محیط گسترش می­یابد، به دلیل استهلاک انرژی، قدرت و سرعت آن­ها کاهش می‌یابد [4].

نیروی ایجادشده توسط بار­های انفجاری تا حد زیادی از بار طراحی موردنظر یک سازه فراتر می‌رود و اثرات خود را در یک بازه زمانی بسیار کوتاه ایجاد می‌کند. درنتیجه، هنگامی‌که سازه بتنی تحت بارهای انفجاری و بالستیک قرار می گیرد، پاسخ سازه به دلیل تأثیر متقابل عوامل بسیار پیچیده می­شود [1].

سازه­های زیرزمینی بسته به شکل هندسی، عمق دفن و پارامتر­های مختلف ژئوتکنیکی و وزن مواد منفجره رفتارمتفاوتی را از خود نشان می­دهند [5]. بار ایجاد شده در اثر انفجار می‌تواند پوشش سازه­های زیرزمینی را بی­ثبات کرده و منجر به تجمع تدریجی آسیب در سازه زیرزمینی و درنهایت شکست ناگهانی شود. این آسیب به اشکال مختلفی ازجمله ترک خوردگی، تغییر شکل و خستگی ظاهر می­شود [6-7].

به دلیل توانایی استهلاک خوب خاک و ایجاد یک پوشش ایمن، سازه­های زیرزمینی در مواجه با انفجار از امنیت قابل توجهی برخوردارند. این سازه­ها با هر کاربری که دارند به عنوان یک سازه­ی امن به حساب می­آیند. این مزیت منجر به توجه بیشتر حملات و تلاش برای تخریب این سازه­ها شده است [8]. از این رو بسیاری از محققان، تحقیقات متعددی برای درک و بررسی پاسخ سازه­های زیرزمینی تحت تاثیر بارهای انفجاری انجام داده اند.

هاتف و رحیمی (2002) با بررسی رفتار خاک رس لای­دار تحت بار متناوب بیان کردند طی بارگذاری دینامیکی رفتار تنش کرنشی خاک­های رسی و لای­ها به صورت غیرخطی و استهلاکی (Hysteretic) است [9].

گوی و چین (2006) به بررسی عددی تونلی واقع در زیر فرودگاه سونگشان تایپه در برابر انفجار سطحی پرداختند. محققان نشان دادند، پارامتر­هایی که سطح آسیب‌ سازه­های زیرزمینی را کنترل می‌کنند شامل شدت بارگذاری انفجار، مدول یانگ و نسبت میرایی خاک می­باشد و شدت انفجار از عوامل مؤثر بر میزان افزایش لنگر خمشی و تنش وارد بر تونل است [10].

قدس و شنائی (2014) به بررسی تأثیر بار دینامیکی زلزله بر مخزن بتنی مدفون پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد، نیروهای غالب در زمان زلزله نیروی هیدرودینامیکی آب بر دیواره­های مخزن است [11].

فراست و همکاران (2015) به بررسی تاثیر تغییرات مخازن مدفون نسبت به، عمـق مـدفون مخـزن، جـنس خاک اطراف مخزن و توزیع فشار دینامیکی سیال­های متفاوت پرداختند و نتایج این پژوهش حاکی از آن است که هرچه میزان عمـق مخـزن افـزایش پیـدا کنـد باعث افزایش تنش و جابجایی شده و با نرم­تر شدن خاک اطراف مخزن نتایج بحرانی­تری حاصل خواهد شـد. همچنـین توزیـع فشـار دینامیکی سیال، بشدت به وزن مخصوص سیال مرتبط می باشد [12].

تقوی پارسا و پیمان (2020) نیز به بررسی آثار انفجار سطحی روی ﺳﺎزه­های زﻳﺮزﻣﻴﻨﻲ در اﻋﻤﺎق ﻣﺘﻔﺎوت با شبیه سازی عددی پرداختند. بررسی نتایج نشان داد مرکز سطح سقف و دیوار­های کناری سازه زیرزمینی بیشترین مقدار بار را دریافت می­کند که افزایش عمق سازه زیرزمینی در کاهش آثار مخرب انفجار موثر است [13].

اسمی و همکاران (2023) به بررسی واکنش سازه های زیرزمینی در معرض انفجار خارجی پرداختند. نتایج نشان داد تونل در برابر انفجارهای سطحی که مستقیماً بالای مرکز تونل رخ می دهد آسیب پذیرتر از انفجارهایی است که دور از تونل رخ می دهد [14].

ژو و همکاران (2024) بر اساس یک مدل المان محدود، به بررسی ویژگی‌های دینامیکی و ارزیابی آسیب سازه­های تونلی تحت بارهای انفجار تماسی پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد، در اثر انفجار مواد منفجره TNT، تونل‌ها به‌طور جزئی تا متوسط آسیب می‌بیند [15].

فان و همکاران (2024) به منظور تجزیه و تحلیل رفتار دینامیکی و آسیب تونل مدفون کم عمق در اثر انفجارهای زیر آب، اثرات پوشش خاک اشباع، وزن انفجاری، عمق مدفون و عمق آب بر رفتار دینامیکی و آسیب تونل مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد، بار انفجار مستقیماً روی تونل تأثیر می گذارد که به راحتی می­تواند باعث آسیب ساختاری شود ولی پوشش خاک اشباع شده می­تواند به طور موثری تاثیر بار انفجار بر تونل را کاهش دهد. علاوه بر این افزایش عمق مدفون می‌تواند اثرات انفجار بر سازه را کاهش دهد [2].

با پیشرفت‌های مهندسی ژئوتکنیک و دانش ساخت سازه‌های مدفون در خاک، پژوهش‌ها پیرامون بارهای انفجاری و تأثیر آن‌ها بر سازه‌های مدفون گسترش یافته است. همچنین با توسعه تکنولوژی و فراهم شدن ابزارهای تجزیه‌وتحلیل عددی و شبیه‌سازی مدل‌های واقعی در نرم‌افزارهای مختلف، بررسی رفتار سازه‌های زیرزمینی تحت بارهای انفجاری با دقت و عمق بیشتری امکان‌پذیر شده است[16].

بررسی تعامل بین سازه‌های مدفون و خاک در مواجهه با انفجار و درک رفتار خاک، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بارگذاری‌های ناشی از انفجارهای عمدی یا تصادفی می‌توانند به طور جدی به یکپارچگی مخازن مدفون آسیب برسانند. در این میان، عمق دفن و نوع خاک اطراف سازه نیز از عوامل تاثیرگذار در رفتار سازه‌های مدفون به شمار می‌آیند.

در حالی که مطالعات متعددی در زمینه تحلیل رفتار مخازن بتنی تحت بار انفجاری وجود دارد، بیشتر آن‌ها به نوع خاک یا تأثیر عمق دفن در خاک‌های خاص توجه نکرده‌اند. به‌ویژه، خاک‌های رسی لای‌دار به دلیل ویژگی‌های خاص خود نظیر چگالی بالا، قابلیت تراکم‌پذیری و ویژگی‌های الاستیک غیرخطی، می‌توانند تأثیر متفاوتی بر رفتار سازه‌های بتنی در برابر بار انفجاری داشته باشند که در تحقیقات پیشین کمتر به آن پرداخته شده است. بر همین اساس، هدف مقاله حاضر مطالعه رفتار سازه مدفون بتنی تحت بارهای انفجاری، با در نظر گرفتن اندرکنش سیال و سازه، و استفاده از روش تفاضل محدود در نرم‌افزار FLAC 2D است.

2- روش تحقیق

2-1- زمین‌شناسی عمومی منطقه مورد مطالعه

طبق بررسی­های ژئوتکنیکی، در منطقه مورد مطالعه، نوع غالب لایه‌های خاک رسوبات آبرفتی است که در برخی نقاط رسوبات ریزدانه و در برخی نقاط درشت‌دانه است. مکان احداث سازه مدفون، عناصر غالب خاک سیلت و رس هستند.

بافت لایه­های خاک در نواحی احداث مخزن مورد مطالعه از جنس رسوبات ریزدانه رس و لای با خاصیت خمیری کم (ML-CL) باضخامت‌هایی بین 5 تا 50 متر است. برخی از پارامترهای ژئوتکنیکی خاک منطقه موردمطالعه در جدول (1) ارائه‌شده است.

زاویه اصطکاک داخلی (φ) و چسبندگی (C) خاک بر اســاس استاندارد ASTM,D3080 و دانسیته (γ) بر اساس استاندارد ASTM, D854 تعیین‌شده است [17-18].

جدول 1. برخی پارامترهای ژئوتکنیکی خاک منطقه موردمطالعه

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **φ** | **C (kPa)** | **E (MPa)** | **υ** | **γ (kN/m3)** | **مصالح** |
| 23 | 120 | 110 | 0.4 | 21.5 | **Alluvial Deposits**  **(ML-CL)** |

Table 1. Some geotechnical parameters of the soil of the studied area

2-2- مشخصات مصالح

مدل‌سازی سازه­های زیرزمینی با در نظر گرفتن پوشش بتنی با هندسه مستطیلی به ارتفاع 5/6 متر و طول 9 متر اجراشده است (شکل (1)). مدل رفتاری که برای پوشش بتنی تعریف‌شده است مدل رفتاری الاستیک است. خواص مصالح به‌کاررفته در ساخت مخزن بتنی در جدول (2) ارائه‌شده است.

شکل 1. نمای شماتیک مخزن بتنی موردمطالعه

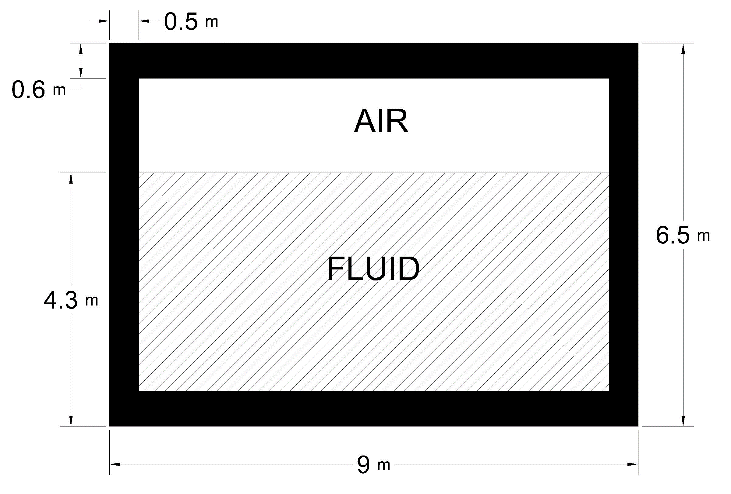


Figure 1. Schematic view of the studied concrete tank

جدول 2. خصوصیات مکانیکی پوشش بتنی مخزن

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Thickness of Tank Floor and Roof (mm) | Thickness of Tank Walls (mm) | γ (kN/m³) | υ | E (Pa) |
| 600 | 500 | 25 | 0.3 | 2.1\*1010 |

Table 2. Mechanical characteristics of the tank's concrete cover

مدول بالک (K) و مدول برشی (G) با استفاده از پارامترهای مدول الاستیسیته (E) و ضریب پواسون (υ) و با استفاده از روابط (1) و (2) محاسبه‌شده­اند [19].

|  |  |
| --- | --- |
| (1) | G = |
| (2) | K = |

در تمام مدل‌سازی­ها ارتفاع سیال داخل مخزن برابر ارتفاع مخزن (3/4 متر) در نظر گرفته‌شده است.

نحوه توزیع نیروی هیدرودینامیکی برای مخزن بتنی مطابق شکل (2) است. با توجه به اینکه نرم­افزار FLAC 2D قادر به شبیه­سازی خصوصیات سیالات نیست، برای بررسی عملکرد المان فشار حاصل از سیال بر اساس آیین­نامه ACI با توجه به ارتفاع آب مخزن و همچنین چگالی آب (10) مطابق با رابطه (3) بر دیواره مخزن اعمال‌شده است. دیاگرام فشار سیال وارده به دیواره مخزن در شکل (3) ارائه‌شده است.

|  |  |
| --- | --- |
| (3) |  |

با توجه به اهمیت سازه­های مدفون و وجه تمایز آن­ها به خاطر اندرکنش خاک و سازه نسبت به حالت سطحی، در مطالعه حاضر سعی شد رفتار مخزن بتنی مدفون در عمق­های متفاوت (3، 6، 8 و 10 متری) تحت تأثیر بار انفجاری (50، 100 و 200 کیلوگرم TNT) بررسی شود.

شکل 2. نحوه توزیع بار هیدرودینامیکی

Figure 2. How to distribute the hydrodynamic load

شکل 3. دیاگرام فشار سیال وارده به دیواره مخزن

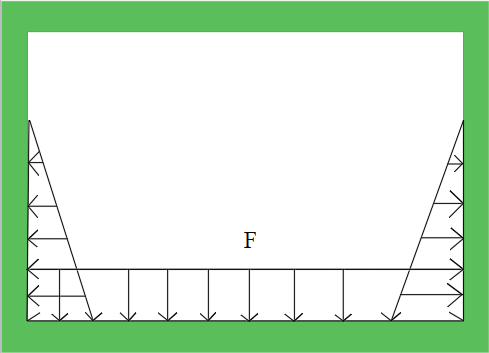


Figure 3. Fluid pressure diagram on the tank wall

2-3- مدل‌سازی هندسی

با توجه به اینکه یکی از اهداف پژوهش بررسی اثرات امواج ناشی از انفجار سطحی بر روی مخزن بتنی مدفون در خاک است، مدل‌سازی محیط و مخزن بتنی با استفاده از روش تفاضل محدود و به­وسیله نرم­افزار FLAC 2D و شبیه‌سازی انفجار به­وسیله نرم­افزار AUTODYN انجام‌شده است. برای بررسی اثر انفجار بر مخزن بتنی مراحل به شرح ذیل انجام‌شده است:

1- مدل‌سازی محیط پیرامونی و مخزن بتنی به‌صورت استاتیکی تا قبل از اعمال فشار انفجار، که مدل به تعادل استاتیکی رسانده شود.

2- تعریف شرایط مرزی و اعمال بارهای استاتیکی به مدل.

3- اعمال بار­های دینامیکی و همچنین اعمال سایر پارامترهای مورد نیاز تا بتوان تحلیل دینامیکی محیط خاک اطراف و مخزن بتنی را در اثر انفجار بررسی کرد.

مدل‌سازی به‌صورت یک سیستم کاملاً متقارن و در فضایی دوبعدی و با در نظر گرفتن اندركنش خاك و سازه، سیال و سازه و رفتار غيرخطي همه­ی مصالح انجام‌شده است. سیستم شبیه‌سازی‌شده به دو فاز خاک و سازه مدفون تقسیم می­شود. با توجه به اینکه موج حاصل از انفجار در خاک اتساع پیداکرده و سپس به سازه مدفون برخورد می‌کند، اندرکنش سازه و خاک دربردارنده سازه نیز در مدل‌سازی تعریف‌شده است.

**2-3-1- ساخت مدل در نرم­افزار FLAC 2D**

در ابتدا به مدل‌سازی شمای کلی محیط پروژه پرداخته‌شده است. هندسه مدل از دو قسمت خاک و سازه مدفون تشکیل‌شده است. مدل‌سازی در این مرحله به‌وسیله ابزارهای ترسیمی در فضای دوبعدی انجام‌شده است (در شکل (4) هندسه کلی مدل ارائه‌شده است). هنگام ترسیم هندسه مدل، تمام مرزهای فیزیکی که باید در مدل ایجاد شوند، قبل از تجزیه‌وتحلیل ترسیم شده­اند. پس از ترسیم هندسه مدل، اجزای مختلف مدل با استفاده از المان­های مختلف و تعریف مصالح از یکدیگر جدا می­شود.

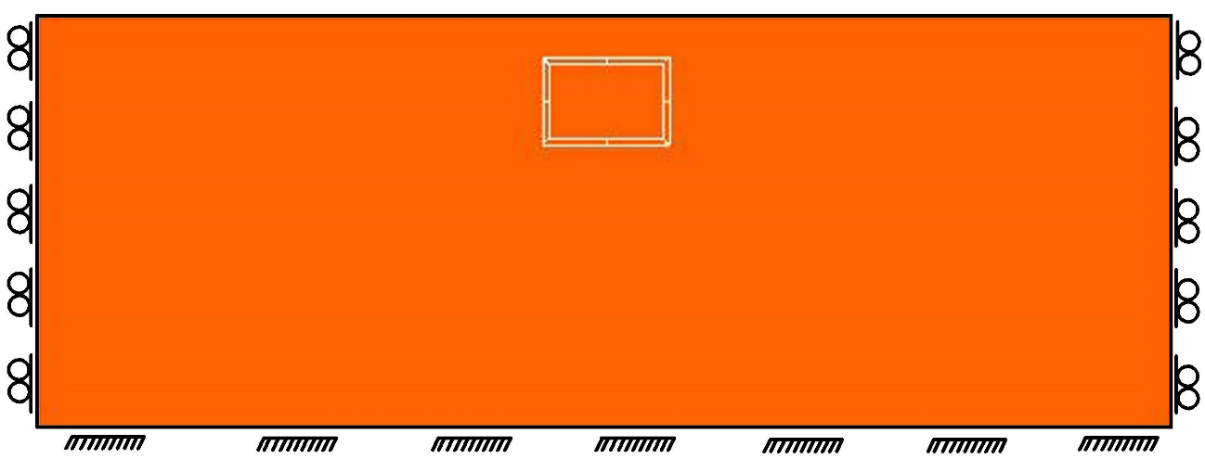
ازآنجاکه هدف این است که محیط نامحدود خاک به‌صورت محدود مدل شود، ابعاد مدل خاک طوری انتخاب‌شده که در عین محدودیت و کوچک بودن، کمترین تأثیر را بر نتایج داشته باشد. در واقع سعی شده است با مدل کوچک و زمان تحلیل کمتر، نتایج دقیقی حاصل شود.

برای بررسی رفتار اندرکنش خاک و سازه بر روی توزیع فشار روی دیواره مخزن بتنی تحت بار انفجار، مخزن با هندسه مکعبی مدل‌سازی شده است. مخزن در حالت نیمه‌پر ( مخزن) تحت بار انفجار قرارگرفته است و فشارهای ایجادشده بر روی دیواره مخزن ناشی از اندرکنش سازه و ساختار خاک کنترل می­شود. در این مقاله مخزن مدفون در خاک بر اساس ضوابط طراحی و محاسبه مخازن (نشریه شماره 123 سازمان برنامه‌وبودجه) طراحی‌شده است [20].

مدل‌سازی خاک در اطراف سازه بر اساس شرایط مرزی و حجم محاسبات به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که درحالی‌که تأثیر مرزها بر آنالیز بی‌تأثیر است، حجم مدل به حداقل ممکن کاهش ‌یابد، بنابراین با استفاده از آزمون‌وخطا ارتفاع مؤثر مدل 30 متر و طول مدل 80 متر در نظر گرفته‌شده است (شکل(4)).

بخش اول مدل‌سازی ایجاد تنش‌ها و جابجایی‌های استاتیکی در مدل است. این بخش به دو بخش ایجاد محدودیت‌های درجا و ساخت سازه زیرزمینی در مدل عددی تقسیم می­شود. در مرحله مدل‌سازی استاتیکی شرایط تکیه­گاهی به‌گونه‌ای باید تعریف شود که از حرکات افقی به سمت مرزهای جانبی جلوگیری شود و همچنین مرز انتهای مدل نیز باید به نحوی اعمال شود که جابجایی­های قائم را در مدل مقید کند و درجه آزادی خارج از صفحه مدل بسته شود (شکل (4)). بعد از به تعادل رسیدن مدل در حالت استاتیکی تمامی نیروهای نامتعادل به صفر میل می­کنند. در شکل (5) به تعادل رسیدن نیروهای نامتعادل کننده در مدل پس از تحلیل استاتیکی نشان داده‌شده است.

شکل 4. هندسه کلی، ابعاد و شرایط مرزی مدل



30 m

80 m

Figure 4. General geometry, dimensions and boundary conditions of the model

شکل 5. نحوه به تعادل رسیدن نیروهای نامتعادل کننده

Figure 5. How to balance unbalanced forces

در مرحله بعد سازه مخزن بتنی مدفون نیمه پر در مدل طراحی شد. به این صورت که المان­های پوششی برای سازه تعریف می­شود و مشخصه­های هر قسمت به آن اعمال و درنهایت مدل تحلیل می­شود. در این بخش از تحلیل، بار خاک اطراف به سازه مدفون نیمه‌پر وارد می­شود و تنش­ها و جابجایی­ها محاسبه‌شده است.

**2-3-2-تعیین پارامترهای انفجار و ساخت مدل در نرم­افزار** AUTODYN

با توجه به اینکه نرم­افزار FLAC 2D قادر به شبیه­سازی فرآیند انفجار نیست، شبیه­سازی انفجار در نرم­افزار AUTODYN انجام‌شده است. با استفاده از نرم­افزار AUTODYN انفجار مدل‌سازی شده و تاریخچه انفجار پس از استخراج به‌صورت کدهایی به نرم­افزار FLAC 2D اعمال‌شده است.

جهت شبیه­سازی انفجار در ابتدا اجزای تشکیل‌دهنده محیط تعریف شد که در این گام هوا و ماده منفجره در نظر گرفته شد. ازآنجاکه مدل‌سازی هوا و ماده منفجره مدنظر بود، از تحلیل اویلری استفاده‌شده است، زیرا تحلیل اویلری برای مصالحی انتخاب می­شود که کرنش­های بسیار زیادی دارند.

در نرم­افزار دو شعاع تعریف ‌شده است، اولی تحت عنوان کمترین شعاع است که به‌منظور ایجاد فاصله­ای بین مرکز گوه تا نقطه انتهای گوه که در زمان دوران به حجم کره­ای در مرکز انفجار بتواند ایجاد کند که عموماً مقدار 1 میلی­متر برای آن تعریف شد و شعاع بیشینه که بستگی دارد چه ابعادی از هوا هدف مدل‌سازی باشد. که بدین منظور ابتدا شعاع تأثیر ماده منفجره از رابطه (4) محاسبه ‌شده است.

|  |  |
| --- | --- |
| (4) |  |

ρ= چگالی ماده منفجره TNT برابر با می­باشد.

m= جرم ماده منفجره برحسب kg

V= حجم کره ()

درواقع برای 50 کیلوگرم TNT، شعاع تأثیر ماده منفجره برابر 193 میلی­متر و شعاع بیشینه 400 میلی­متر در نظر گرفته‌شده است. در گام بعدی به تعریف مش بندی مدل پرداخته‌شده که بسته به شعاع بیشینه تعداد مش­ها اعمال می­شود. برای شعاع بیشینه 400 میلی­متر، تعداد 200 مش در راستای R برای مدل در نظر گرفته‌شده است. در جدول (3) شعاع تأثیر محاسبه‌شده با استفاده از رابطه (4) برای مقادیر مختلف ماده منفجره ارائه‌شده است.

**جدول 3. شعاع تأثیر انفجار مقادیر مختلف ماده منفجره TNT (kg)**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **200** | **100** | **50** | **Weight of Explosive (kg)** |
| 308 | 243 | 193 | ***Effect Radius (mm)*** |

Table 3. The impact radius of the explosion of different amounts of explosive TNT (kg)

گام بعدی در ادامه مدل‌سازی در نرم­افزار AUTODYN، ابعاد محاسبه‌شده شعاع تأثیر مواد منفجره در مدل تعریف‌شده است (193 میلی­متر). چگالی ماده منفجره (ρ) TNT که مقدار آن برابر است و انرژی داخلی TNT نیز به‌طور پیش‌فرض برای ماده منفجره برابر(Pa) 106×68/3 در نظر گرفته‌شده است [21].

در گام بعد به تحلیل مدل پرداخته‌شده است. به مدل تا رسیدن جبهه موج به مخزن بتنی فشارسنجِ تعبیه‌شده و در مسیر انفجار اجازه تحلیل داده شد. در شکل (6) شمای کلی مدل‌سازی شده از محیط انفجار و همچنین نحوه اتساع فشار جبهه موج ایجادشده توسط ماده منفجره نشان داده‌شده است.

شکل 6. شمای کلی محیط انفجار و نحوه اتساع فشار جبهه موج حاصل از انفجار 502 کیلوگرم TNT

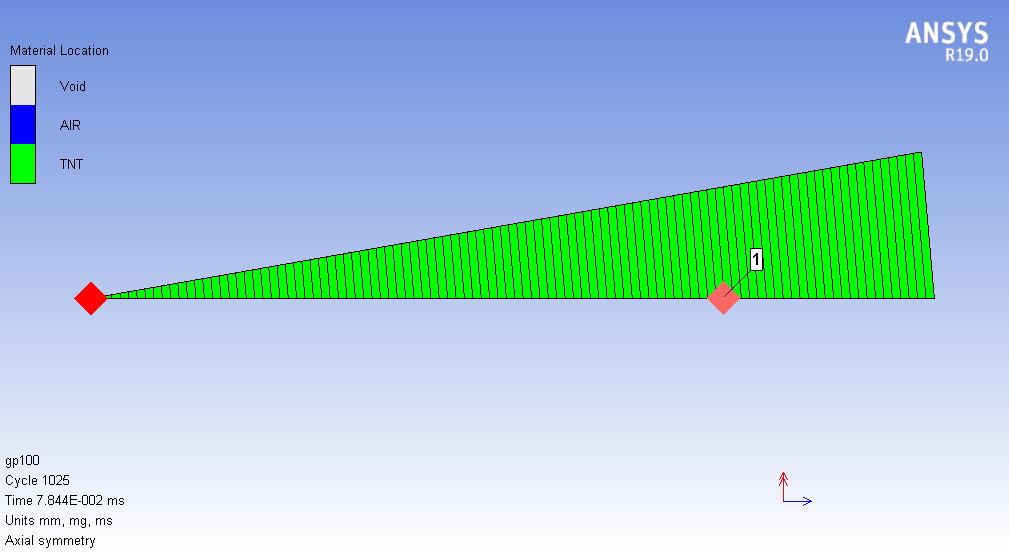


Figure 6. The general scheme of the explosion environment and the expansion of the pressure wave front resulting from the explosion of 502 kg of TNT

فشارسنج تعبیه‌شده در مسیر انتشار موج انفجار به فاصله شعاع تأثیر برای اندازه­گیری فشار حاصل از انفجار قرار داده‌شده است (شکل (6)). در این قسمت پس از اعمال فشار انفجار، اجازه داده شد تا موج حاصل از انفجار به فشارسنج برسد و سپس تحلیل را متوقف کرده چون حداکثر فشار در همین فاصله رخ می­دهد. به‌صورت موردی برای 50 کیلوگرم TNT کمتر از 84/7 میلی‌ثانیه زمان لازم بود که موج انفجار به فشارسنج تعبیه‌شده برسد.

در انتها کد­های استخراج‌شده از نرم­افزار AUTODYN، به‌صورت نموداری (شکل (7)) به‌عنوان خروجی به نرم­افزار FLAC 2D اعمال‌شده است.

شکل (7). تاریخچه انفجار 50 کیلوگرم TNT

Figure (7). History of 50 kg TNT explosion

در آخرین مرحله مدل مورد تحلیل دینامیکی قرار گرفته است، بدین منظور ابتدا شرایط مرزی برای تحلیل دینامیکی تغییر داده شد. به این صورت که در تمامی مدل­ها مرزهای چپ و راست مدل به مرزی آزاد و مرز تحتانی مدل در جهات x و y را برای جلوگیری از انعکاس امواج، به‌صورت ویسکوز در نظر گرفته‌شده تا رفتار محیط در مدل‌سازی تا حد امکان به شرایط طبیعی پروژه نزدیک شود. در این مرحله تمامی جابجایی­ها و سرعت­هایی که ناشی از بار استاتیکی بود صفر در نظر گرفته شد.

بر اساس MANUAL نرم‌افزار FLAC 2Dبهترین نوع میرایی برای انفجار و بارهای دینامیکی، میرایی مصنوعی است که an و al دو پارامتر ثابتی هستند که باید به نرم­افزار اعمال شوند و مقدارشان برای نیروی انفجار برابر یک در نظر گرفته می­شود. درواقع اساس تعریف میرایی مصنوعی توسط فون­نویمان (Von Neumann) و ریچتمایر (Richtmyer) به‌منظور شبیه­سازی عددی مسائل دینامیکی تحت امواج قوی مانند انفجار انجام شده است.

به دلیل انفجار حفره­ای ایجاد می­شود که به آن گودال انفجار گفته می­شود. مهم‌ترین متغیرهایی که در شکل­گیری گودال انفجار نقش دارند، وزن ماده منفجره، جنس خاک و عمق انفجار است. در کل فاصله انفجار از سطح و وزن ماده انفجاری به‌عنوان مهم­ترین پارامترها برای پیش­بینی عمق و شکل چاله می­باشند. در مورد انفجارهای سطحی که در این پروژه مورد بررسی قرارگرفته است، اطلاعات بسیار کمی در دسترس است. بر اساس رابطه (5) قطر گودال انفجار بر اساس وزن ماده منفجره محاسبه شد و خاک‌برداری گودال در مدل‌سازی منظور شده است [22].

|  |  |
| --- | --- |
| (5) |  |

D: قطر گودال ناشی از انفجار برحسب متر

W: وزن ماده منفجره برحسب کیلوگرم

در جدول (4) اندازه قطر گودال برای وزن­های مختلف TNT ارائه‌شده است.

**جدول (4). قطر گودال انفجار برای مقادیر مختلف ماده منفجره (kg)**

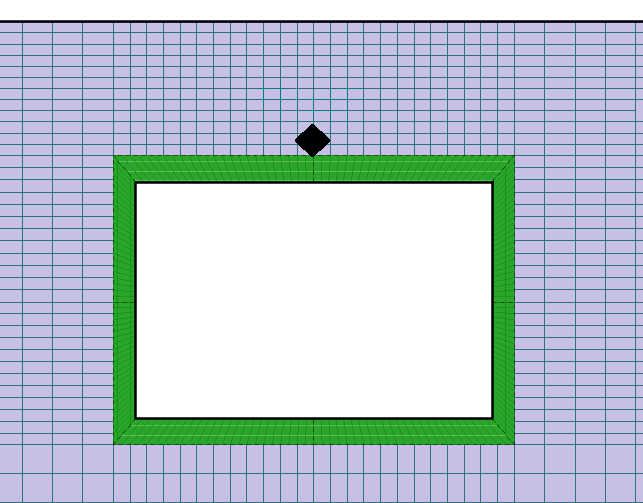
|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Weight of Explosive (kg) | 50 | 100 | 200 |
| Crater Diameter (m) | 2.95 | 3.71 | 4.68 |

Table (4). The diameter of the explosion pit for different amounts of explosive (kg)

زمانی که شرایط برای اعمال فشار انفجار به مدل مهیا شد، تاریخچه انفجار استخراج‌شده از نرم­افزار AUTODYN در نرم­افزار FLAC 2D فراخوان شده و به‌صورت پالس فشار به‌صورت شعاعی به سطح گودال وارد شد و از گودال به سمت سازه زیرزمینی منتشر شد. درواقع هنگامی‌که انفجار رخ می­دهد، امواج از یک نقطه شروع می­شوند و از این نقطه دور می­شوند و به‌تدریج در محیط پخش می­شوند.

تنش ایجادشده حاصل از انفجار 50، 100 و 200 کیلوگرم TNT در مرز قسمت مرکزی سقف مخزن و خاک بالاسری مخزن مدفون (شکل (8)) در عمق­های 3، 6، 8 و 10 متری مطابق جدول (5) است.

شکل (8). محل سنجش میزان تنش حاصل از انفجار



Gauge

Figure (8). The place to measure the amount of stress resulting from the explosion

*جدول (5). تنش­های حاصل از انفجار با توجه به عمق مدفون مخزن (Pa)*

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Depth of Buried Tank (m) | | | |
| ***10*** | ***8*** | ***6*** | ***3*** | Weight of Explosive (kg) |
| *69.3\*103* | *20.1\*105* | *28.3\*105* | *17.22\*106* | ***50*** |
| *15.66\*105* | *22.6\*105* | *40.72\*105* | *21.5\*106* | ***100*** |
| *21.04\*105* | *26.7\*105* | *12.9\*106* | *29\*106* | ***200*** |

Table (5). The stresses resulting from the explosion according to the buried depth of the tank (Pa)

2-4- حداکثر جابجایی مجاز پوشش بتنی

با توجه به نحوه و سرعت انتقال موج انفجار و همچنین مقدار تنشی که در محیط ایجاد می‌کند، امکان بروز خسارت موردبررسی قرارگرفته است. معیارهای متفاوتی برای محاسبه حد مجاز خسارت و جابجایی مخزن بتنی تحت بار دینامیکی توسط پژوهشگران مختلف ارائه‌شده است. در این مقاله به‌منظور به دست آوردن جابجایی مجاز از معیار ساکورایی استفاده‌شده است. ساکورایی برای این مهم کرنش بحرانی (رابطه (6)) را پیشنهاد کرده است [23]:

|  |  |
| --- | --- |
| (6) |  |

که در آن مقاومت فشاری تک‌محوری و E مدول یانگ برحسب kg⁄ است. باید توجه داشت که کرنش بحرانی همیشه کوچک‌تر از کرنش در لحظه شکست است. مقدار کرنش مجاز با استفاده از رابطه (7) در سه رده سطح هشدار توسط ساکورایی معرفی شد [23].

|  |  |
| --- | --- |
| (7) | log = -0.25logE- 0.85 |

پس از محاسبه مقدار کرنش مجاز، حداکثر جابجایی مجاز در مخزن بتنی با استفاده از رابطه (8) حاصل‌شده است:

|  |  |
| --- | --- |
| (8) |  |

جابجایی مجاز و پارامتر بزرگ­ترین بعد مخزن بتنی است. در مقاله حاضر با توجه به ضخامت 600 میلی­متری پوشش بتنی مخزن با عیار سیمان (kg⁄) 250 و با در نظر گرفتن مدول یانگ پوشش بتنی، کرنش بحرانی برابر 00656/0 و حداکثر میزان جابجایی مجاز پوشش بتنی 11/59 میلی­متر تعیین شد.

3- بحث و بررسی نتایج

هنگام وقوع انفجار، انرژی به‌طور ناگهانی آزاد می‌شود. تأثیر این آزادسازی انرژی به دو بخش تشعشع حرارتی و انتشار موج در زمین و هوا تقسیم می‌شود. امواج حاصل با سرعتی بالاتر از سرعت صوت حرکت کرده و به ساختارها برخورد می‌کنند. بررسی نتایج مدل‌سازی عددی انفجار نشان می‌دهد که عبور این امواج از هر نقطه‌ای، حالت تعادل آن نقطه را تغییر می‌دهد [24]. شکل (9) نحوه انتشار موج انفجار در محیط را نشان می­دهد.

عمق مدفون مخزن بتنی به دلیل برخورد امواج به هدف حائز اهمیت است و از طرف دیگر مسافت طی شده موج باعث استهلاک بخشی از انرژی و یا تمام انرژی حاصل از انفجار می­شود. ازاین‌رو پس از شبیه‌سازی بار­های انفجاری مختلف (50، 100 و 200 کیلوگرم)، مقادیر جابجایی سقف و کف مخزن مدفون در عمق­های مختلف (3، 6، 8 و 12متر) در خاک رسی لای­دار بررسی شد.

شکل(9). نحوه انتشار موج انفجار در محیط

|  |
| --- |
|  |

Figure (9). How the blast wave propagates in the environment

**3-1- تأثیر عمق مدفون بر میزان جابجایی­های ایجادشده در سقف مخزن مدفون**

در این مرحله جابجایی پوشش مخزن بتنی از ناحیه سقف تحت بارهای انفجاری 50، 100 و 200 کیلوگرمی TNT در عمق­های 3، 6، 8 و 10 متری بررسی‌شده است. درواقع در این مقایسه ضخامت خاک بالاسری در حدفاصل مرکز سقف و محل انفجار متغیر فرض شده است. مقادیر مختلف ماده منفجره درست در بالای محل قرارگیری تونل اعمال‌شده است. شکل (10) میزان جابجایی سقف مخزن بتنی مدفون در عمق­های مختلف را نشان می­دهد.

براثر وقوع انفجار موجی تولید می­شود که موجب ایجاد یک جبهه پرفشار از نقطه انفجار به سمت اطراف می­شود. این فشار با زیادشدن فاصله از مرکز انفجار مستهلک می­شود. درواقع ضربه­ای که خیلی سریع پس از انفجار تولید می­شود با سرعت بسیار زیادی در محیط گسترش می­یابد و فشار محیط را به حداکثر فشار انفجار می­رساند و در کسری از ثانیه تا فشار محیط کاهش می­یابد، به این مرحله اصطلاحاً فاز مثبت گفته می­شود. درنتیجه‌ی انتشار موج اندکی پس‌ازاینکه فاز مثبت طی می­شود، گازهای حاصل از انفجار سرد شده و باعث می­شود که فشار آن‌ها از فشار اتمسفر کمتر شود که این اتفاق باعث ایجاد مکش و به وجود آمدن تنش­های کششی در محیط خاک رسی لای­دار می­شود، به این مرحله فاز منفی گفته می­شود.

خاک تحت بار انفجاری به صورت غیر خطی و الاستیک-پلاستیک رفتار می­کند. به عبارتی دیگر، خاک در برابر بار انفجاری ابتدا ممکن است به صورت الاستیک رفتار کند، اما با افزایش شدت بار انفجاری، به حالت پلاستیک می‌رود و تغییر شکل‌های دائمی در آن ایجاد می‌شود. در خاک‌های رسی لای‌دار، رفتار ناپایدار و مقاومت برشی پایین این خاک‌ها در برابر بارهای دینامیکی، باعث می‌شود که خاک در برابر انفجارها بیشتر به همگرا شدن و تغییر شکل‌های قابل توجه تمایل داشته باشد، که می‌تواند اثرات مهمی بر عملکرد سازه داشته باشد.

نتایج نشان می­دهد هنگامی‌که مخزن مدفون در عمق 3 متری تحت بار 50 کیلوگرم TNT قرارگرفته است، نقطه مرکزی سقف مخزن مدفون، 59/126 میلی­متر به سمت پایین جابجا می­شود. مقدار جابجایی­ پس از اعمال بار انفجاری 100 کیلوگرم TNT، 248 میلی­متر و پس از اعمال بار انفجاری 200 کیلوگرم TNT نیز 298 میلی­متر به سمت پایین بوده است.

با توجه به مقدار مجاز کرنش و جابجایی پوشش بتنی مخزن، مخزن بتنی مدفون در عمق 3 متری از سطح خاک قادر به تحمل بارهای انفجاری 50، 100 و 200 کیلوگرمی TNT نبوده است. درواقع با توجه به فاصله انفجار تا عمق قرارگیری بتن، خواص مقاومتی خاک توان مستهلک کردن تنش­های حاصل از انفجار را ندارند و همین باعث تخریب در ناحیه سقف مخزن مدفون می­شود.

ارتعاشات ناشی از انفجار نقش مهمی در تخریب سازه‌های زیرزمینی دارند؛ اما حساسیت بالا و مقاومت برشی کم خاک‌های رسی لای‌دار از جمله عواملی هستند که ناپایداری سازه تحت بار انفجاری را تشدید می‌کنند. همچنین، تنش‌های دینامیکی ایجاد شده توسط بارگذاری انفجار ممکن است فشار منفذی در خاک‌های رسی لای‌دار را افزایش دهد، که این امر می‌تواند تا حدی توضیح‌دهنده مکانیسم خرابی در این شرایط باشد [25].

هنگامی که مخزن مدفون در عمق 6 متری تحت بار­های 50، 100 و 200 کیلوگرم TNT قرارگرفته است، مقدار جابجایی­ها به ترتیب 68/58، 05/91 و 56/142 میلی­متر به سمت پایین بوده است که از جابجایی مجاز بیشتر است و موجب تخریب در سازه می­شود. با افزایش عمق مدفون از 3 متر به 6 متر، میزان جابجایی سقف مخزن تحت بار­های 50، 100 و 200 کیلوگرم TNT به ترتیب حدود 53٪، 63٪ و 52٪ کاهش‌یافته است. در واقع با توجه به خاصیت میرایی خاک رسی لای­دار و تنش ایجاد شده حاصل از انفجار، هر چقدر عمق مدفون مخزن بیشتر می­شود، مقدار جابجایی­ها به شدت کاهش پیدا می­کند.

در حالتی که مخزن مدفون در عمق 8 متری تحت بار­های 50، 100 و 200 کیلوگرم TNT قرارگرفته است، مقدار جابجایی­ها در سقف مخزن به ترتیب 14/38، 67/49 و 38/99 میلی­متر به سمت پایین بوده است.

شکل(10). جابجایی وسط سقف مخزن مدفون در عمق­های متفاوت

Figure (10). Moving the middle of the roof of the buried tank at different depths

در حالتی که مخزن مدفون در عمق 10 متری تحت بار 50، 100 و 200 کیلوگرم TNT قرارگرفته­ است، مقدار جابجایی­ها به ترتیب 87/26، 95/47 و 8/75 میلی­متر به سمت پایین بوده است. نتایج نشان می­دهد با افزایش عمق مدفون از 3 متر به 10 متر، میزان جابجایی سقف مخزن تحت بار­های 50، 100 و 200 کیلوگرم TNT به ترتیب حدود 79٪، 81٪ و 74٪ کاهش‌یافته است. درواقع، زمانی که عمق مدفون سازه زیرزمینی افزایش می‌یابد، به دلیل میرایی محیط خاک رسی لای­دار مدت زمان رسیدن موج افزایش می‌یابد، شکل بار اعمال شده بر سازه زیرزمینی از بار نقطه‌ای به بار سطحی تغییر می‌کند و حالت شکست سازه از شکست برشی موضعی به شکست فشاری و خمشی تغییر می­یابد [26].

تجزیه و تحلیل عددی ارتعاشات انفجار نشان می‌دهد که تقویت ارتعاشات در نزدیکی مرز بین خاک و سازه مدفون رخ می‌دهد، که این امر می‌تواند منجر به افزایش کرنش در خاک‌های رسی لای‌دار شود. ارتعاشات انفجار غالباً باعث ایجاد شکست‌های موضعی در خاک‌های نزدیک به محل انفجار می‌شوند و این ارتعاشات ممکن است در امتداد صفحات بستر خاک رسی لای‌دار انتشار یابند. قابل‌توجه است که خاک رس می‌تواند نامطلوب‌ترین واکنش را به بارگذاری انفجار نشان دهد، زیرا در خاک‌های رسی بزرگ‌ترین دهانه‌های قابل مشاهده برای یک انفجار مشخص شکل می‌گیرد.

3-2- تأثیر عمق مدفون بر میزان جابجایی­های ایجادشده در کف مخزن مدفون

در این بخش به بررسی میزان جابجایی کف مخزن مدفون تحت بارهای انفجاری 50، 100 و 200 کیلوگرمی TNT در عمق­های 3، 6، 8 و 10 متری پرداخته‌شده است. شکل (11) میزان جابجایی کف مخزن بتنی مدفون در عمق­های مختلف را نشان می­دهد. در حالتی که مخزن مدفون در عمق 3 متری تحت بار 50 کیلوگرم TNT قرارگرفته است، مقدار جابجایی ایجاد شده در کف مخزن 48/2 میلی­متر است. مقدار جابجایی پس از اعمال بار انفجاری 100 کیلوگرم TNT، 23/3 میلی­متر و پس از اعمال بار انفجاری 200 کیلوگرم TNT نیز 61/5 میلی­متر است.

با افزایش عمق مدفون به 6 متر، تحت بار­های 50، 100 و 200 کیلوگرم TNT ، مقدار جابجایی­ها در کف مخزن به ترتیب 24/2، 89/2 و 38/4 میلی­متر است. نتایج نشان می­دهد با افزایش عمق مدفون از 3 متر به 6 متر، میزان جابجایی کف مخزن تحت بار­های 50، 100 و 200 کیلوگرم TNT به ترتیب حدود 10٪، 11٪ و 22٪ کاهش‌یافته است.

در حالتی که مخزن مدفون در عمق 8 متری تحت بار­های 50، 100 و 200 کیلوگرم TNT قرارگرفته است، مقدار جابجایی­ها در کف مخزن به ترتیب 57/1، 63/1 و 35/3 میلی­متر است.

در حالتی که مخزن مدفون در عمق 10 متری تحت بار 50، 100 و 200 کیلوگرم TNT قرارگرفته است، مقدار جابجایی­ها به ترتیب 28/1، 40/1 و 74/2 میلی­متر است. نتایج نشان می­دهد با افزایش عمق مدفون از 3 متر به 10 متر، میزان جابجایی کف مخزن تحت بار­های 50، 100 و 200 کیلوگرم TNT به ترتیب حدود 49٪، 57٪ و 51٪ کاهش‌یافته است.

شکل (11). جابجایی وسط کف مخزن مدفون در عمق­های متفاوت

Figure (11). Moving the middle of the bottom of the buried tank at different depths

بحرانی ترین و بیشترین رفتار سازه مدفون تحت بار انفجاری در حالتی است که خاک اطراف سازه مدفون از جنس رس و اشباع باشد. خاک رس نرم و شکننده است و تغییر شکل پلاستیک برای خاک رس نرم می تواند تحت بارهای ناشی از امواج انفجاری ایجاد شود. بسیاری از مشکلات مهندسی ژئوتکنیک و زمین شناسی در منطقه خاک­های رسی که در معرض بارهای ارتعاشی مکانیکی، امواج و سایر بارهای چرخه ای طولانی مدت قرار دارند، دخیل هستند [27].

هر چه خاک متراکم تر و چسبنده تر باشد، حجم و قطر گودال ایجادشده درون زمین ناشی از انفجار، کمتر است. وجود ریزدانه های رسی درون خاک که علت اصلی ایجاد چسبندگی در انواع خاک­ها است، یک نوع نیروی مقاوم در برابر از هم گسیختگی خاک محسوب می­شود و انسجام خاک را در حین انفجار حفظ می­کند. در انفجارهای شدید چسبندگی خاک، قطر گودال را کنترل می کند اما وجود چسبندگی در خاک، رفتار حوزه دور آن را دچار تغییر نمی کند. تراکم خاک که وابسته به مدول یانگ و چگالی آن است در رفتار حوزه دور خاک در برابر موج انفجار کاملاً تأثیرگذار است. در نظر گرفتن میرایی ذاتی خاک با مدل ویسکوالاستیک می­تواند سازوکار استهلاک انرژی در پدیده انفجار را که به دلیل وجود حفرات داخل خاک و تغییر شکل های ناشی از فاز هوای درون خاک است، به درستی مدل کند [28].

بر اساس نتایج حاصل‌شده هر چه عمق مدفون مخزن بتنی بیشتر شود، میزان جابجایی سقف و کف به‌شدت کاهش پیدا می‌کند. با توجه به خاصیت میرایی خاک­ موجود در منطقه، تنش ایجادشده حاصل از انفجار، هر چه مسافت بیشتری برای رسیدن به مخزن بتنی مدفون طی کند از شدت آن به‌طور چشمگیری کاسته می­شود.

**3-3-** تأثیر عمق مدفون بر میزان تنش­های ایجادشده در سقف مخزن مدفون

در این مرحله تأثیر عمق مدفون مخزن بر میزان تنش­های ایجاد شده در سقف مخزن مدفون بررسی شد. یکی دیگر از عوامل تعیین کننده تاثیر مدفون بودن مخزن علاوه بر حداکثر تغییرمکان، تنش های به وجود آمده در مخـزن مـی­باشـد [12]. همان‌طور که در شکل (12) نشان داده‌شده است، میزان فشار و تنش­های حاصل از بار انفجاری در اعماق زمین کاهش پیدا می‌کند که نشان‌دهنده روند استهلاک انرژی انفجار به‌وسیله خاک رسی لای­دار است. درواقع هرچقدر فاصله قائم محل انفجار نسبت به محور مرکزی مخزن مدفون بیشتر شود، مقدار تنش و در نتیجه جابجایی به میزان قابل‌توجهی کاهش می­یابد.

بر اساس نتایج حاصل شده میزان تنش ایجاد شده به دلیل انفجار 50 کیلوگرم TNT در عمق 3 متر برابر Pa 106×22/17 است، در حالی که با افزایش عمق به 6 متر این مقدار کاهش قابل توجهی داشته و به Pa 105×3/28 رسیده است. شایان ذکر است که با افزایش عمق به 8 و 10 متر روند کاهش تنش ناشی از انفجار 50 کیلوگرم TNT بسیار کند شده است. برای 200 کیلوگرم ماده منفجره TNT مقدار تنش برای عمق­های مدفون 3، 6، 8 و 10 متر به ترتیب Pa 106×29، Pa 106×9/12، Pa 105×7/26 و Pa 105×04/21 است، همانطور که مشاهده می­شود با افزایش عمق مدفون از 8 به 10 متر مقدار کاهش تنش قابل توجه نیست.

تنش حداکثری با افزایش عمق دفن از 3 متر به 6 متر به‌طور متوسط 73 درصد کاهش پیدا می‌کند. به همین ترتیب افزایش عمق مدفون از 6 متر به 8 متر باعث 50 درصد کاهش و افزایش عمق از 8 متر به 10 متر 39 درصد تنش حداکثری را کاهش می­دهد. همان‌طور که ملاحظه می­شود میزان درصد کاهش تنش با افزایش عمق کم می­شود با توجه به جنس رسی لای­دار و مشخصات مکانیکی خاک در عمق­های زیاد به دلیل افزایش فشار خاک حاصل از وزن خاک بالاسری و همچنین متراکم­تر بودن ذرات خاک، انتقال انرژی­های باقی­مانده حاصل از موج انفجار بهتر صورت می­گیرد. به‌بیان‌دیگر در عمق­های زیاد درصد اختلاف افت تنش­های حداکثری کمتر می­شود.

با افزایش قدرت انفجار، میزان تنش وارده بر سازه مدفون افزایش ناگهانی داشته که منجر به ایجاد لرزش در سازه مدفون می­شود. بیشترین تمرکز تنش در ناحیه­های نزدیک به محل انفجار بوده و کرنش­های خمیری که منجر به آسیب رسیدن به پوشش بدنه مخزن مدفون می­شود، در همین ناحیه رخ می­دهد [12-23].

شکل (12). تنش ناشی از انفجار در قسمت بالای سقف مخزن مدفون در عمق­های متفاوت

Figure (12). The stress caused by the explosion in the upper part of the roof of the buried tank at different depths

به طور کلی فشار وارد بر پوشش مخزن بتنی مدفون با افزایش وزن مواد منفجره افزایش می­یابد ولی با افزایش عمق مدفون به دلیل استهلاک انژری انفجار کاهش می­یابد. در اثر انفجار پوشش مخزن مدفون و خاک اطراف آن دچار تغییر شکل قابل توجهی می شوند. با افزایش عمق مدفون به دلیل کاهش تنش، تغییر شکل پوشش مخزن مدفون کاهش می یابد.

همان‌طور که در شکل (10) مشاهده می­شود جابجایی قائم وسط سقف مخزن با توجه به کاهش تنش­های حاصل از انفجار با افزایش عمق دفن کاهش‌یافته است. متعاقباً احتمال تخریب سازه هم با افزایش عمق دفن کاهش پیداکرده است. بر این اساس با افزایش عمق مدفون جهت احداث سازه­های زیرزمینی به نتایج بهتری از میزان جابجایی و تنش­های ایجادشده می­توان دست پیدا کرد.

4- نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت سازه­های مدفون و وجه تمایز آن­ها به خاطر اندرکنش خاک و سازه نسبت به حالت سطحی، در این تحقیق رفتار مخزن مدفون در خاک رسی لای دار تحت تأثیر بار انفجاری با استفاده از نرم­افزار FLAC 2D مورد بررسی قرارگرفته است. برای این منظور مخزن بتنی نیمه پر مدفون در عمق­های متفاوت (3، 6، 8 و 10 متری) با هندسه مستطیلی مدل‌سازی شده است. برای بررسی تأثیر بار انفجار از 50، 100 و 200 کیلوگرم ماده منفجره TNT در این پژوهش استفاده‌شده است. در این مطالعه به بررسی تأثیر وزن‌های مختلف مواد منفجرهTNT و عمق قرارگیری سازه زیرزمینی بر جابجایی سقف و کف مخزن بتنی پرداخته شد. برخی از مهم­ترین نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش به شرح ذیل است:

1. تأثیر انفجار بر روی هر سازه­ای به وزن و اندازه ماده منفجره بستگی دارد. علاوه بر این، پارامترهای محیط اطراف بر پاسخ‌ها تأثیر دارند. عمق مدفون سازه زیرزمینی، اندرکنش خاک و سازه زیرزمینی، خواص فیزیکی و مکانیکی خاک، وزن ماده منفجره، مقدار میرایی انرژی در اعماق مختلف، ازجمله عوامل مؤثر بر فشار انفجاری برسازه زیرزمینی است.

2. با افزایش عمق دفن مخزن، میزان جابجایی سقف و کف به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، تحت بار انفجاری 50 کیلوگرم TNT، جابجایی سقف مخزن از 59/126 در عمق 3 متر به 86/26 میلی­متر در عمق 10 متر کاهش یافته است که نشان‌دهنده کاهش 78 درصدی جابجایی است.

3. میزان تنش ایجادشده در خاک در اعماق زیرین خاک کاهش‌یافته است که این نشان‌دهنده مستهلک شدن انرژی انفجار در خاک است. با توجه به اینکه در اعماق زیرین به دلیل فشار حاصل از وزن خاک بالاسری خاک ساختاری فشرده­تر و متراکم­تر دارد، می­تواند امواج حاصل از انفجار را با سرعت بیشتری از خود عبور دهد و همین امر باعث تسریع روند استهلاک امواج و درنتیجه آن کاهش خسارات وارده به سازه مدفون را به دنبال داشته باشد.

4. رفتار غیرخطی و الاستیک-پلاستیک خاک رسی لای‌دار نقش مهمی در کاهش دامنه جابجایی‌ها و استهلاک انرژی انفجار دارد. این خاک به دلیل چسبندگی و تراکم بالاتر، اثر قابل توجهی بر کاهش جابجایی و تنش‌های سازه مدفون در اعماق مختلف نشان داده است.

5. با افزایش بار دینامیکی، سیستم خاک-سازه تعبیه شده در خاک رسی لای­دار به صورت غیر خطی رفتار می کند که منجر به کاهش سختی و افزایش میرایی می شود. حداکثر دامنه جابجایی تحت بار دینامیکی کاهش می‌یابد که عمدتاً به دلیل میرایی هیسترتیک بالا ناشی از رفتار غیرخطی خاک­های رسی لای­دار است .

6. افزایش عمق دفن به عنوان یک راهکار مهندسی مؤثر باعث بهبود عملکرد سازه‌های مدفون در برابر انفجار می‌شود. این نتایج می‌توانند به طراحی ایمن‌تر سازه‌های زیرزمینی، نظیر مخازن، تونل‌ها و پناهگاه‌ها، در شرایط بارگذاری انفجاری کمک کنند و راهنمایی برای انتخاب عمق دفن بهینه در پروژه‌های مهندسی باشند.

6- مراجع References

[1].Peyman, S. and A. Eskandari, *Analytical and numerical study of concrete slabs reinforced by steel rebars and perforated steel plates under blast loading.* Results in Engineering, 2023. **19**: p. 101319.

[2].Fan, Y., Z. Tan, G. Yang, X. Cui, K. Deng, and B. Tian, *Analysis of dynamic behavior and damage mode of shallow buried tunnel due to underwater explosions.* Ocean Engineering, 2024. **296**: p. 117015.

[3].Kostopoulos, V., G.D. Kalimeris, and E. Giannaros, *Blast protection of steel reinforced concrete structures using composite foam-core sacrificial cladding.* Composites Science and Technology, 2022. **230**: p. 109330.

[4].Olarewaju, A.J., R.N.S.V. Kameswara, and M.A. Mannan, *Response of Underground Pipes to Blast Loads*, in *Earthquake-Resistant Structures*, M. Abbas, Editor. 2012, IntechOpen: Rijeka. p. Ch. 20.

[5].Amiri, M., Ameri Siahouri, M., Ghasemi, S., Salehian, R. , *Investigation of the effect of tunnel excavation on the surrounding structures with a superior attitude on the heights and widths of the structures (Case study: Isfahan’s Metro Tunnel).* Journal of Tunneling and Underground Space Engineering. (In Persian), 2021. **10**(1): p. 57-69.

[6].Zheng, Q., Q. Xu, Z. Shu, D. Yang, W. Chen, N. Akkurt, H. Zhang, L. Lin, X. Zhang, and Y. Ding, *A review of advances in mechanical behaviors of the underground energy transmission pipeline network under loads.* Gas Science and Engineering, 2023. **117**: p. 205074.

[7].Ye, W., Z. Zhou, Y. Bai, Y. Wu, and Y. Chen, *Dynamic Response and Damage of Subway Tunnels Subjected to Explosion-Induced Loads.* Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2024: p. 1-7.

[8].Amiri, M., Dousti, H., *Evaluation of the effects of soil improvement using injection technique on the values of displacement and damages inflicted on the buried structure subjected to the propagation of explosion waves (A case study of Isfahan subway tunnel, Soffeh-Azadi route)* Tunneling & Underground Space Engineering‌ (TUSE(2021. **10**(4): p. 435-452.

[9].Hatef, N., Rahimi, Bahador., *Behavior of Shiraz layered clay under alternating simple shear load.* Madras technical and engineering, 2002. **8**: p. 11-23.

10. Gui, M. and M. Chien, *Blast-resistant analysis for a tunnel passing beneath Taipei Shongsan airport–a parametric study.* Geotechnical & Geological Engineering, 2006. **24**: p. 227-248.

[11].Nader, Q. and M. Shanai, *Reinforcement of concrete water tanks by FRP reinforced polymer fibers.* 8th National Congress of Civil Engineering, 2014.

[12].Frost, N., M. Taghipur Birgani, and A. Frost, *An overview of the studies done on buried storage tanks.*, in *International conference of new achievements in civil engineering, architecture, environment and urban management.* 2015.

13.Taghavi Parsa, M.H., *Analysis of explosive Loading on Underground Structures under Surface Explosions.* Modares Civil Engineering journal, 2020. **19**(6): p. 31-39.

[14].Osmi, S.K.C., M. Othman, H. Husen, J. Jelani, and S. Sojipto, *BLAST RESPONSE OF UNDERGROUND STRUCTURES SUBJECTED TO EXTERNAL EXPLOSION–A REVIEW.* Zulfaqar Journal of Defence Science, Engineering & Technology, 2023. **6**(1).

[15].Zhou, L., X. Li, Q. Yan, S. Li, S. Chang, and P. Ren, *Test and damage assessment of shallow buried RC tunnel under explosion.* Underground Space, 2024. **14**: p. 118-137.

[16].Amiri and D.H. Mohammad, *The effect of soil layering on the propagation of waves from surface explosions on buried tunnels (Case study of Isfahan metro tunnel, Sefeh-Azadi route).* Journal of Tunneling and Underground Space Engineering. (In Persian) 2022. **10**(3): p. 311-331.

[17].ASTM, D., *Standard test method for specific gravity of soils.* Test method A Procedure for Oven-Dried Specimens, 1999.

[18].ASTM, D., *Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions.* ASTM West Conshohocken, 2011.

[19].Landau, L. and E. Lifshitz, *Theory of Elasticity*, in *Course of Theoretical Physics*. 1970, Pergamon: Oxford. p. 13.

[20].*Publication No. 123, Rules and criteria for the design and calculation of underground water reservoirs.* Program and budget organization, 1992.

[21].Rashiddel, A., M. Kharghani, D. Dias, and M. Hajihassani, *Numerical study of the segmental tunnel lining behavior under a surface explosion–Impact of the longitudinal joints shape.* Computers and Geotechnics, 2020. **128**: p. 103822.

[22].Manual, F.D.U., *FLAC 2D User Manual. (2019) ITASCA Consulting Group, Inc. Version 8.10.‏477.*

[23].Sakurai, S., *Lessons learned from field measurements in tunnelling.* Tunnelling and underground space technology, 1997. **12**(4): p. 453-460.

[24].Olarewaju, A., M. Mannan, and R. Kameswara, *Response of Underground Pipes to Blast Loads*. 2012: INTECH Open Access Publisher.

[25].Bouchard, S., J.-S. L’Heureux, J. Johansson, S. Leroueil, and D. LeBoeuf, *Blasting induced landslides in sensitive clays*, in *Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice*. 2018, CRC Press. p. 497-504.

[26].Xin, B., L. Shutao, L. Jingbo, W. Fei, C. Yeqing, C. Longming, and Z. Qing, *Experimental study of deep-burial underground structures subjected to multiple 45° side–top far-field explosions.* International Journal of Impact Engineering, 2023. **173**: p. 104432.

[27].Deng, Q.-L. and X.-W. Ren, *An energy method for deformation behavior of soft clay under cyclic loads based on dynamic response analysis.* Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017. **94**: p. 75-82.

[28].Hosseini, S.A. and N. Hosseini, *Numerical Modeling of Underground Explosion and Response of Buried Structures using Coupled Eulerian-Lagrangian Method.* journal of Advanced Defense Science and Technology, 2018. **9**(3): p. 325-336.

**Investigating the effect of buried depth of concrete tanks under explosive load in layered clay soils**

**M. Amiri ⃰ 1, M. Dalvand2 , H. Karimi3**

*1. Associate Professor, University of Hormozgan, Faculty of Engineering.*

*2. Master Student, Islamic Azad University of Bandar Abbas, Faculty of Engineering.*

*3. Ph.D. Candidate, University of Hormozgan, Faculty of Engineering*.

1\*Email: [amirii@hormozgan.ac.ir](mailto:amirii@chmail.ir), Tel: 0917-729-2896

**Abstract:**

Buried concrete tanks serve as critical components of public and military infrastructure, where structural damage can trigger severe social, security, and environmental crises. Consequently, designing these tanks to withstand shock loads from explosions is of paramount importance. Additionally, the behavior of layered clay soils under such loading conditions requires detailed examination. This study investigates the influence of burial depth on the performance of concrete tanks subjected to explosive loads in layered clay soils. The analysis was conducted using AUTODYN and FLAC 2D finite element software. Concrete tanks buried at depths of 3, 6, 8, and 10 meters were analyzed under surface explosions generated by 50, 100, and 200 kg of TNT, with defined pressure and distance parameters. The soil properties, structural characteristics, and internal fluid pressure were incorporated into the model. Results indicate that increasing the burial depth significantly reduces the displacement of the tank roof and floor due to the dissipation of explosion energy in the surrounding soil. For instance, with a 50 kg TNT charge, increasing the burial depth from 3 meters to 6, 8, and 10 meters resulted in roof displacement reductions of 54%, 70%, and 78%, respectively. These findings demonstrate the critical role of burial depth in enhancing structural resilience against explosive loads and mitigating damage.

**Keywords**: *Numerical analysis, Concrete tanks, Explosive loads, Burial depth, TNT explosions*.

**Investigating the effect of buried depth of concrete tanks under explosive load in layered clay soils**

**Extended abstracts:**

Buried concrete tanks are critical components of national and strategic infrastructure, serving both public and military purposes. Damage to these structures can result in severe social, security, and environmental crises. Therefore, designing such structures to withstand the impact of explosive loads is of paramount importance. Additionally, understanding the behavior of silty clay soils under such loading conditions is essential for structural safety. This study examines the influence of burial depth on the performance of concrete tanks subjected to explosive loading in silty clay soils. The investigation utilized AUTODYN and FLAC 2D software for numerical modeling and analysis. The study modeled the behavior of a rectangular buried concrete tank with a height of 6.5 m and a length of 9 m at burial depths of 3 m, 6 m, 8 m, and 10 m, subjected to explosive loads equivalent to 50, 100, and 200 kg of TNT. The scenario assumes surface explosions at a defined distance and pressure from the tank structure. Soil, structural properties, and the pressure exerted by the fluid inside the tank were considered in the analysis. The results reveal that increasing the burial depth significantly reduces the displacement of the tank's roof and floor under explosive loading, primarily due to the attenuation of explosive energy by the surrounding soil. Specifically, for a 50 kg TNT explosion, increasing the burial depth from 3 m to 6 m, 8 m, and 10 m decreased the roof displacement by 54%, 70%, and 78%, respectively. Similarly, stress levels in the tank structure showed a notable reduction with increased burial depth. For instance, the stress caused by a 50 kg TNT explosion at a depth of 3 m was 17.22×106 Pa, which dropped to 2.83×106 Pa at a depth of 6 m. Beyond 8 m, however, further increases in burial depth yielded diminishing returns in stress reduction. Higher explosive loads, such as 200 kg TNT, induced significantly higher stress levels but followed a similar trend of stress reduction with burial depth. The maximum stress decreased by approximately 73% when burial depth increased from 3 m to 6 m, 50% from 6 m to 8 m, and 39% from 8 m to 10 m. The reduction in stress and displacement becomes less pronounced at greater depths due to soil compaction and the overburden pressure of the soil layers above the tank, which facilitate better transmission of the residual explosion energy. The findings indicate that burial depth is a critical factor in mitigating the effects of explosive loading on buried structures. Increased burial depth reduces displacement and stress on the tank, thereby enhancing structural resilience and reducing the likelihood of failure. This research highlights the importance of considering soil-structure interaction and burial depth in the design of underground concrete tanks subjected to explosive loads. The insights gained can guide the design and construction of resilient underground structures in silty clay soils to minimize damage from explosive threats.

**Keywords**: *Numerical analysis, Concrete tanks, Explosive loads, Burial depth, TNT explosions*.