

بررسی اثر پلیمر مسلح شده با الیاف و بتن فیبری بر سازه‌های بتنی مدفون در خاک تحت بار انفجار

سید علی موسوی داودی^۱

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد سازه، مرکز آموزش عالی طبری

آدرس پست الکترونیکی نویسنده رابط (Ali_mousavii@yahoo.com)

چکیده

در آستانه قرن بیست و یکم که جهان آکنده از منازعات ژئوپلیتیک بوده و نشانه‌ای از خاتمه‌ی قریب‌الوقوع درگیری‌های مسلحانه دیده نمی‌شود، انجام اقدامات پدافند غیرعامل توسط کشورهای مختلف استمرار داشته و جایگاه ویژه‌ی خود را در سیاست‌های دفاعی کشورهای مختلف به‌عنوان یک نیاز حیاتی حفظ نموده است و با روش‌های مختلف از قبیل ایجاد دیوارهای دفاعی الکترونیکی، قرارگاه‌های فرماندهی عمیق و نیمه عمیق زیرزمینی، پناهگاه‌های مقاوم در برابر سلاح‌های متعارف و نامتعارف، مقرهای هدایت و کنترل و فرماندهی عمیق و نیمه عمیق زیرزمینی، پناهگاه‌های مقاوم در برابر سلاح‌های متعارف و نامتعارف، مقرهای هدایت و کنترل و فرماندهی نظامی و سیاسی، متروهای عمیق زیرزمینی چندمنظوره، سیلوهای موشکی، تونل‌ها و سازه‌های امن دفاعی زیرزمینی، مراکز فرماندهی و کنترل متحرک ریلی، پراکندگی و تمرکززدایی مراکز ثقل، هنوز هم ادامه یافته است. با توجه به شرایط اقلیمی و جغرافیایی کشور و توسعه و گسترش شهرها و مراکز صنعتی، تونل و فضاهای زیرزمینی برای استفاده حمل‌ونقل داخل و خارج از شهر، انتقال آب و فاضلاب، لوله‌رانی بدون حفاری سطحی برای انتقال مواد سوختنی و انرژی از قبیل نفت و گاز، احداث فضاهای زیرزمینی استراتژیکی و دفاعی، تولید برق، ایستگاه‌های مترو و پارکینگ به‌طور فزاینده‌ای در حال مطالعه، ساخت و بهره‌برداری هستند نیاز به مطالعه و بررسی اثر این‌گونه سازه‌ها در مواقع بحران بیش‌ازپیش احساس می‌شود. با توجه به اهمیت این موضوع در این تحقیق سعی گردیده است، که با استفاده از نرم‌افزار تخصصی آباکوس، تونل‌های بتنی (نمونه موردی) که با استفاده از بتن الیافی فیبری (FRC) و الیاف پلی‌پروپیلین (FRP) تقویت‌شده را تحت بار انفجار قرار می‌دهیم. بررسی‌ها نشان می‌دهد الیاف FRP و بتن الیافی فیبری تأثیر مثبتی بر پاسخ سازه تحت بار انفجار دارد.

کلمات کلیدی: انفجار، الیاف FRP، بتن FRC، سازه بتنی مدفون

۱. مقدمه

امروزه بحث پدافند غیرعامل و افزایش انعطاف‌پذیری و مقاوم سازی سازه‌ها در برابر انفجار، برخورد و ضربه یکی از اصلی‌ترین دغدغه‌های سازمان‌های دولتی در سراسر دنیا از جمله ایران است. از جمله سازه‌های حیاتی که باید پدافند غیرعامل را در مورد آن‌ها رعایت کرد می‌توان به ساختمان‌های دولتی، بانک‌ها، پل‌ها، ساختمان‌های نظامی، تاسیسات شهری، سفارت‌خانه‌ها و ... اشاره کرد. علاوه بر انفجارهایی که عامل انسانی دارند، انفجارهایی که ناشی از وقوع حادثه در نیروگاه، پتروشیمی و ... نیز هستند، جای نگرانی فراوانی دارند. در چنین شرایطی باید اطمینان لازم را پیدا کرد که حداقل قسمت‌های حیاتی سازه همچون اتاق کنترل کماکان پس از وقوع حادثه نیز به فعالیت خود ادامه دهند؛ بنابراین سازه باید

انعطاف‌پذیری مناسبی در برابر انفجار و برخورد و ضربه داشته باشد. همچنین توجه به موضوع خرابی پیش‌رونده در سال‌های اخیر باعث پررنگ شدن اهمیت مقاومسازی سازه‌ها در برابر بارهای ناگهانی مانند انفجار شده است. این در حالی است که اکثر سازه‌های موجود مقاومت و شکل‌پذیری کافی در برابر انفجار و برخورد و ضربه را ندارند. در نظر گرفتن شرایط فوق، ایمن‌سازی اعضای سازه‌ای در مقابل اثرات ناشی از انفجار از اهمیت قابل‌توجهی برخوردار است، به ویژه چنانچه سازه مورد نظر به لحاظ اهمیت در موقعیت ویژه‌ای قرار داشته باشد. به همین علت در حال حاضر افزایش مقاومت انفجاری سازه‌های موجود که عموماً برای مقاومت در برابر این نوع بارها طراحی نشده‌اند یک خواسته ویژه است. به منظور افزایش مقاومت سازه‌ها در مقابل بارهای ناشی از انفجار، راه‌حلهایی موجود و متداول است که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به استفاده از تقویت موضعی نظیر ژاکت‌های فولادی و بتنی برای اعضا سازه‌ای و نیز اضافه کردن سامانه‌های سازه‌ای جدید نظیر دیوار برشی فولادی، بتنی و یا مرکب اشاره نمود. از جمله معایب چنین روش‌هایی آن است که اولاً بارهای ثقلی قابل‌توجهی را به مجموعه سازه و در نهایت فونداسیون تحمیل کرده و ثانیاً نیازمند زمان زیادی جهت اجرا می‌باشد و در آخر به لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نمی‌باشند. یک روش مؤثر و نسبتاً کم‌هزینه برای نیل به این هدف، استفاده از کامپوزیت‌های پلیمری مسلح شده با الیاف FRP است.

2- پلیمر مسلح شده با الیاف (FRP)

FRP مخفف کلمه انگلیسی "Fiber Reinforced Polymer" می‌باشد. پلیمر مسلح شده با الیاف یک محصول ترکیبی است که از دو بخش الیاف و ماتریس تشکیل شده است. از الیاف صنعتی معمول می‌توان الیاف کربن، شیشه، آرامید و بازالت را نام برد، ماتریس هم پلیمرهایی چون رزین اپوکسی، ونیل استر، پلی استر و ... می‌باشد. هر یک از مواد نامبرده به تنهایی خصوصیات منحصر بفردی دارند، که با قصد تولید محصولی برتر نسبت به هر یک از آن‌ها ترکیب می‌شوند. از ترکیب الیاف و پلیمر می‌توان محصولاتی چون لمینیت (FRP Laminate)، میلگرد (FRP BAR)، مقاطع (FRP Section) را در کارخانه تولید کرد، همچنین از طریق روش‌های در محل نیز می‌توان پلیمر را با الیاف ترکیب کرده تا یک محصول FRP بدست آید. محصولات FRP در موارد متنوعی مصرف شده اند که بارزترین آن‌ها استفاده در مقاومسازی سازه‌های بتنی می‌باشد. در شکل زیر ترکیب الیاف با رزین در یک محصول FRP نشان داده شده است. [۲]



شکل ۱- نمایی از ساختار ورق‌های FRP [۱]

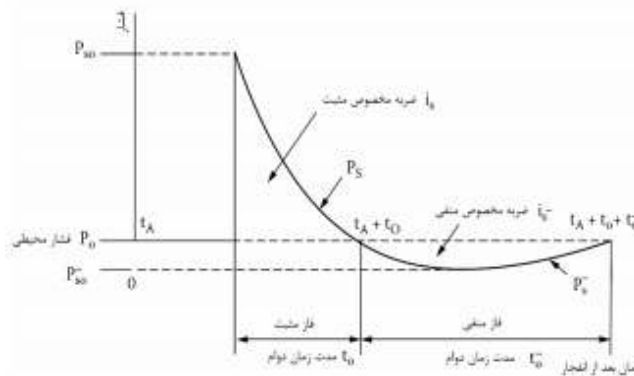
3- انفجار

انفجار عبارت است از آزاد شدن بسیار سریع انرژی به صورت نور، گرما، صدا و یک پالس در طول کوتاهی از زمان که بیان دیگری از یک ضربه سهمگین در علم دینامیک سازه‌ها می‌باشد. موج ضربه‌ای متشکل است از هوای بسیار فشرده که انتشار شعاعی موج را از سطح ماده منفجره به سمت محیط اطراف ایجاد کرده که با سرعت فراصوتی حرکت می‌کند. با انبساط موج ضربه‌ای، فشارهای ناشی از ضربه نیز کاهش می‌یابند. زمانی که موج به یک سطح یا مانع می‌رسد که در مسیر انفجار قرار دارد،

منعکس می‌گردد که در نتیجه آن فشار ناشی از انفجار چند برابر می‌شود. برخلاف امواج صوتی که دارای بزرگنمایی در حدود ۲ هستند، امواج ناشی از ضربه می‌توانند تا ۲۰ برابر نیز به علت سرعت فراصوتی موج در ضربه تقویت شوند. خرابی ناشی از موج ضربه‌ای می‌تواند به دو صورت اثرات مستقیم ناشی از انفجار و اثرات ناشی از خرابی پیش‌رونده باشد. آنالیزهای دینامیکی سازه‌ها تحت بار انفجاری، به علت تأثیرات نرخ کرنش بالا، رفتار غیرخطی مصالح، عدم قطعیت در محاسبات بار انفجار و تغییر شکل‌های وابسته به زمان بسیار پیچیده می‌باشند. [۲]

3-1 انفجار خارج از سازه

شکل عمومی تاریخچه فشار-زمان مربوط به موج شوک یک انفجار هوایی در هوای آزاد، در شکل ۲-۲ نشان داده شده است. جبهه موج به دلیل افزایش ناگهانی فشار ناشی از وقوع انفجار، عمودی است. فشار حداکثر ناشی از انفجار که با P_{00} نشان داده می‌شود، در انتهای این فاز (فاز افزایش فشار) ایجاد می‌شود. سرعت انتشار V با زمان و فاصله کاهش می‌یابد، ولی معمولاً از مقدار سرعت صوت در محیط بیشتر است. [5] جبهه شوک در زمان t_A به هدف می‌رسد. بعد از گذشت t_r از زمان رسیدن موج به هدف یعنی t_A ، فشار به میزان حداکثر خود یعنی P_{SO} خواهد رسید. از آنجایی که فاصله زمانی مابین رسیدن جبهه شوک به هدف و وقوع فشار حداکثر t_r بسیار کوتاه است، می‌توان فرض کرد که رسیدن به مقدار فشار حداکثر، به صورت آنی بعد از رسیدن جبهه شوک اتفاق می‌افتد. فشار حداکثر P_{SO} در مدت زمان t_0 افت نموده و برابر با فشار اولیه محیط می‌شود که این فاصله به عنوان فاز مثبت پالس فشار تعریف می‌گردد. در شکل (۳) جبهه شوک ناشی از انفجار نشان داده شده است. [۳]



شکل ۲- منحنی تاریخچه زمانی فشار - زمان ناشی از انفجار [۳]

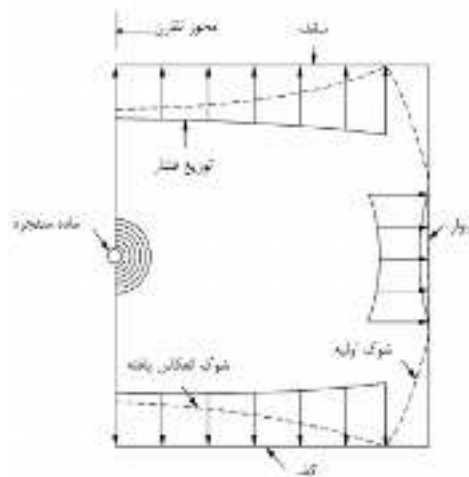


شکل ۳- جبهه شوک ناشی از انفجار [۳]

بعد از این مرحله، فاز منفی اتفاق می‌افتد که به مدت t_0^- ادامه خواهد داشت و در این فاصله، میزان فشار از فشار اولیه محیط کمتر خواهد بود. فاز منفی در طراحی سازه‌های معمول اهمیت چندانی ندارد (به جز در مورد سازه‌هایی که در کشش ضعیف هستند، مانند سازه‌های خاکی مسلح) و معمولاً از آن صرف‌نظر می‌شود. مقدار ضربه‌ای که در اثر موج انفجار به هدف وارد می‌گردد، برابر مساحت زیر منحنی در فاز مثبت منحنی فشار - زمان است و با I_s نمایش داده می‌شود. [۳]

2-3 انفجار داخل سازه

حالت پیچیده‌تری از شرایط انفجار وقتی به وجود می‌آید که انفجار در داخل یک فضای محدود شده اتفاق بیفتد. پدیده انفجار-زمان در این حالت در ابتدا بسیار شبیه شرایط کروی و نیم‌کروی است که مشخصه آن یک افزایش فشار ناگهانی است که به عنوان فاز فشار شوک تعریف می‌شود. موج شوک به سطوحی که فضای بسته را ایجاد نموده‌اند برخورد نموده و آنها را بارگذاری می‌کند و همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده، در نتیجه این برخورد امواج شوک انعکاسی تولید می‌شود. مدت زمان دوام فاز فشار شوک بسیار کوتاه است و می‌توان آن را از روی سرعت جبهه شوک و فاصله بین ماده منفجره و سطوح مختلف تخمین زد. بعد از فاز شوک، محیط انفجاری بسیار پیچیده می‌شود و تعریف آن بسیار دشوار خواهد بود. امواج شوک انعکاس یافته منتشر شده و با سطوح مختلف موجود در محیط اندرکنش انجام می‌دهد. هر کدام از این اندرکنش‌ها، امواج شوک انعکاسی جدیدی تولید می‌کند و این پروسه برای مدت زمان قابل توجهی ادامه خواهد داشت. در همین زمان، گازهای با فشار و دمای بالا که از انفجار تولید شده است در داخل فضای بسته انبساط پیدا می‌کند. این فاز محیط انفجار را، فاز فشار گاز^۱ می‌گویند که در اثر نشت گاز از فضای بسته و نیز سرد شدن دمای گازها، فشار به فشار محیط خواهد رسید. مدت زمان دوام فاز فشار گاز به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از مدت زمان فاز فشار شوک است. به دلیل این مدت دوام طولانی، این فاز را شبه استاتیک^۲ نیز می‌گویند. [۴]



شکل ۴- شوک ناشی از انفجار و شوک انعکاس یافته در محیط محصور [۴]

تاریخچه فشار-زمان در انفجار داخلی به میزان زیادی وابسته به عملکرد دیوارهای محصورکننده سازه بستگی دارد. در صورتی که این دیوارها تا پایان بارگذاری انفجار باقی بمانند، اثرات انعکاس فشار قابل توجه است و در صورتی که اتصال قوی بین دیوار و قاب وجود نداشته باشد، این اثرات قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد. با توجه به اینکه در ساخت و ساز معمول در

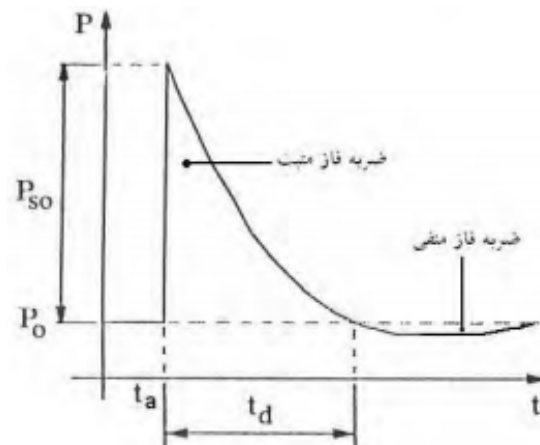
^۱ Gas Pressure Phase

^۲ Quasi-Static

کشور، اتصالی بین دیوار و ستون وجود ندارد و اتصال دیوار به تیر نیز تنها با استفاده از ملات تأمین می‌گردد. در این بخش فرض شده که دیوارهای آجری اطراف اتاق در ابتدای بارگذاری انفجار از بین می‌روند و از آنجایی که دیگر سطح قابل توجهی برای انعکاس موج فشار باقی نمی‌ماند، می‌توان از انعکاس‌های ثانویه صرف‌نظر نمود. [۴]

3-3 انفجار و بارهای ناشی از آن

انفجار واکنشی است که در آن نرخ سوختن مواد با سرعتی به مراتب بیشتر از سرعت صوت انجام می‌شود که در نتیجه دما و فشار بسیار بالایی ایجاد و موج انفجار بلافاصله تولید و با سرعت بسیار زیادی منتشر می‌شود. مدت زمان بارگذاری ضربه ناشی از انفجار مواد منفجره بسیار کوتاه بوده و در آن فشار گازهای شکل گرفته از انفجار، با انتشار از چشمه انفجار، گسترش و تا فشار مبنای P_{s0} افزایش و سپس تا فشار محیطی کاهش می‌یابد که به این مرحله فاز مثبت می‌گویند. در نتیجه انتشار موج، گازهای حاصل از انفجار سرد شده و فشار آن‌ها به مقدار ناچیزی کمتر از فشار اتمسفر می‌رسد که به آن فاز منفی می‌گویند، شکل ۲-۵ فشار فاز منفی نسبتاً کوچک و تدریجی بوده به طوری که در طراحی سازه‌های مقاوم در برابر انفجار در اکثر مواقع از آن‌ها صرف‌نظر می‌گردد. [۵]



شکل ۵- نمودار تغییرات فشار برحسب زمان ناشی از انفجار [۵]

برای تعیین فشار مبنای انفجار از حرکت موج انفجار، روابط مختلفی توسط محققین ارائه شده است. از جمله می‌توان به رابطه پیشنهادی ایزدی فرد و فروتن اشاره کرد: [۶]

$$\log_{10}[\log_{10} P_s] = -0.1319X^2 - 0.323X + 0.464 \quad (1)$$

که در آن

$$X = \log_{10} Z \quad (2)$$

در رابطه فوق Z فاصله مقیاس شده مطابق رابطه زیر است:

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

R : فاصله خرج انفجار تا محل مورد نظر (متر)

W : وزن معادل خرج انفجار بر حسب وزن TNT معادل (کیلوگرم)

استفاده از Z این امکان را می‌دهد که بیان خلاصه و موثری از موج انفجاری برای محدوده وسیعی از حالات وجود داشته باشد.

همچنین ایزدی فرد و فروتن رابطه زیر را برای بدست آوردن t_d ارائه داده‌اند: [۶]

$$\begin{aligned} \frac{t_d}{W\%} &= -64.86Z^4 + 52.32Z^3 - 15.68Z^2 + 1.794Z + 0.1034 && ; Z \leq 0.37 \\ \frac{t_d}{W\%} &= 4.64Z^2 - 3.86Z + 0.854 && ; 0.37 < Z < 0.82 \\ \frac{t_d}{W\%} &= -2.97X^2 + 6.27X + 0.358X + 0.763 && ; 0.82 < Z < 2.5 \\ \frac{t_d}{W\%} &= 0.608X^2 - 2.38X + 5.62X - 0.22 && ; Z > 2.5 \end{aligned} \quad (4)$$

اگر موج انفجار در مسیر خود به مانعی برخورد کند، پدیده انعکاس موج، پیش خواهد آمد که میزان این انعکاس، متناسب با زاویه برخورد موج، متفاوت خواهد بود. در صورتی که زاویه برخورد صفر باشد میزان انعکاس ایجاد شده از رابطه زیر قابل محاسبه است: [6]

$$P_r = 2P_s \left[\frac{\gamma P_s + 4P_s}{\gamma P_s + P_s} \right] \quad (5)$$

5- مقاومت سازی سازه در برابر انفجار با FRP

با در نظر گرفتن شرایط فوق، ایمن سازی اعضای سازه‌ای در مقابل اثرات ناشی از انفجار از اهمیت قابل توجهی برخوردار است، به ویژه چنانچه سازه مورد نظر به لحاظ اهمیت در موقعیت ویژه‌ای قرار داشته باشد. به همین علت در حال حاضر افزایش مقاومت انفجاری سازه‌های موجود که عموماً برای مقاومت در برابر این نوع بارها طراحی نشده‌اند یک خواسته ویژه است. به منظور افزایش مقاومت سازه‌ها در مقابل بارهای ناشی از انفجار، راه‌حلهایی موجود و متداول است که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به استفاده از تقویت موضعی نظیر ژاکت‌های فولادی و بتنی برای اعضا سازه‌ای و نیز اضافه کردن سامانه‌های سازه‌ای جدید نظیر دیوار برشی فولادی، بتنی و یا مرکب اشاره نمود. از جمله معایب چنین روش‌هایی آن است که اولاً بارهای ثقلی قابل توجهی را به مجموعه سازه و در نهایت فونداسیون تحمیل کرده و ثانیاً نیازمند زمان زیادی جهت اجرا می‌باشد و در آخر به لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نمی‌باشند. یک روش مؤثر و نسبتاً کم هزینه برای نیل به این هدف، استفاده از کامپوزیت‌های پلیمری مسلح شده با الیاف FRP است. [7]

کامپوزیت‌های FRP در حدود ۵۰ سال در مهندسی سازه در زمینه‌های ساخت مقاوم، تقویت، ترمیم و بهسازی لرزه‌ای سازه‌های موجود مورد استفاده قرار گرفته‌اند. طی دهه اخیر رشد چشمگیری در استفاده از مصالح FRP که نوع پیشرفته‌ای از کامپوزیت‌ها هستند، صورت پذیرفته است. الیاف در یک کامپوزیت FRP، عضو اصلی باربر بوده و مقاومت و سختی بسیار بالایی را تا زمانی که در کشش هستند، نشان می‌دهند. یکی از روش‌های بهسازی سازه‌های بتنی در برابر بارهای انفجاری استفاده از پوشش FRP در نواحی با پتانسیل مفصل شدن است. محصورسازی اجزا سازه با FRP باعث افزایش ظرفیت باربری و همچنین افزایش شکل پذیری سازه می‌گردد. [8]

کامپوزیت‌های FRP امروزه به علت مقاومت بالاتر، قدرت مقابله با خوردگی بیشتر و راحتی حمل و نصبشان به عنوان جایگزین مناسبی برای فولاد مطرح گردیده‌اند. بسیاری از کامپوزیت‌ها دارای مقاومت بسیار بالا در برابر خستگی هستند. برخلاف فولاد، کامپوزیت‌های FRP در مقابل بارهای رفت و برگشتی دچار نرم شدگی تدریجی یا همان کاهش در سختی پیش از هرگونه ترک خوردگی نمی‌گردند. به عنوان یک مزیت بسیار مهم و برخلاف فولاد کامپوزیت‌های FRP دارای مقاومت زیادی در برابر

خوردگی هستند. مصالح کامپوزیت به علت داشتن ضریب انبساط حرارتی متفاوت در دو راستای هم‌جهت بر الیاف و عمود بر الیاف، تحت بارگذاری حرارتی نیز به صورت اورتوتروپیک عمل می‌کنند و بنابراین در اثر کرنش‌های حرارتی دچار خرابی نمی‌گردند. اما در مصالحی نظیر فولاد به علت ایزوتروپیک بودن آن‌ها، در اثر تنش‌های حرارتی خرابی‌های شدیدی رخ می‌دهد این مصالح به راحتی می‌توانند خود را با شرایط محل وفق داده و عملکرد بهینه‌ای را از خود بروز دهند. همچنین استفاده از این مصالح می‌تواند با افزایش مقاومت سازه باعث افزایش قابل توجهی در توانایی سازه در مقابله با انفجار و کاهش اثرات ترکش‌زایی گردد. [۸]

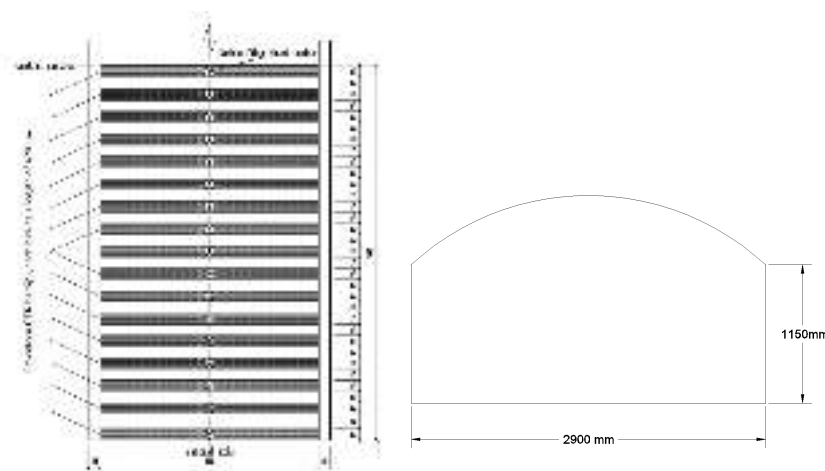
6- روش تحقیق

6-1 معرفی هندسه مدل A, B

در این پژوهش بمنظور مطالعه و بررسی اثر پلیمر مسلح شده با الیاف و بتن فیبری بر سازه‌های بتنی مدفون در خاک تحت بار انفجار از دو گروه مطالعاتی با نام‌های A و B استفاده گردید هر یک از این گروه‌های مطالعاتی دارای هشت زیر مجموعه مطالعاتی می‌باشد که در مجموع شانزده نمونه مطالعاتی را با نام‌های (A-1, A-2, A-3, A-4, A-5, A-6, A-7, A-8) و (B-1, B-2, B-3, B-4, B-5, B-6, B-7, B-8) را تشکیل می‌دهند، در شکل (۶) و جداول (۱) و (۲) مشخصات هندسی تمامی گروه‌های A و B که در نرم افزار آباکوس قرار است مورد مدلسازی شود مشخص شده است.

جدول ۱- مشخصات هندسی نمونه گروه A, B مدلسازی شده

ارتفاع مقطع	عرض مقطع هندسی نمونه‌ها	نوع شکل هندسی مقطع	نام مدل
1150	2900 mm	مربع	A



شکل ۶- مشخصات هندسی نمونه A, B

در جدول (۲) و (۳) مشخصات تمامی پارامترهای مدلسازی که برای جزءهای مختلف اجزاء به کار گرفته شده است، مشخص شده است.

جدول ۲: مشخصات مکانیکی ورق‌های FRP نمونه مدل A

ضخامت ورق FRP	E ^۱	جرم مخصوص	نام و نوع FRP
10 میلی‌متر	پاسکال 22E ⁹	۱۲۰۰ کیلوگرم بر متر مربع	نوع ۱

جدول ۳: مشخصات مکانیکی ورق های FRP نمونه مدل B

نام و نوع FRP	جرم مخصوص	E ^۱	ضخامت ورق FRP
نوع ۱	۱۲۰۰ گیلوگرم بر متر مربع	پاسکال 24E ⁹	20 میلیمتر

در جدول (۴) و (۵) مشخصات مکانیکی بتنی که قرار است در مدلسازی نمونه‌های گروه A و B مورد استفاده گردد مشخص شده است.

جدول ۴: مشخصات مکانیکی بتن نمونه A

نام و نوع بتن	جرم مخصوص	مقاومت فشاری بتن
نوع ۱	۲۵۰۰ گیلوگرم بر متر مربع	۲۵ مگاپاسکال

جدول ۵: مشخصات مکانیکی بتن نمونه B

نام و نوع بتن	جرم مخصوص	مقاومت فشاری بتن
نوع ۲	۲۵۰۰ گیلوگرم بر متر مربع	۴۵ مگاپاسکال

در جدول (۶) مشخصات مکانیکی میلگردی که قرار است در مدل سازی نمونه‌های گروه A و B استفاده گردد مشخص شده است.

جدول ۶: مشخصات مکانیکی میلگرد نمونه مدلسازی

نوع میلگرد	مدول الاستیسیته	جرم مخصوص	ضریب پواسون
S۴۰۰	2.05E10 ⁵	7850	0.3

2-6 معرفی کلی نمونه‌های مورد تحلیل

در جدول (۷) مشخصات تمامی شانزده نمونه مطالعاتی که در این پژوهش توسط نرم افزار آباکوس مورد مدلسازی قرار می‌گیرد مشخص شده است.

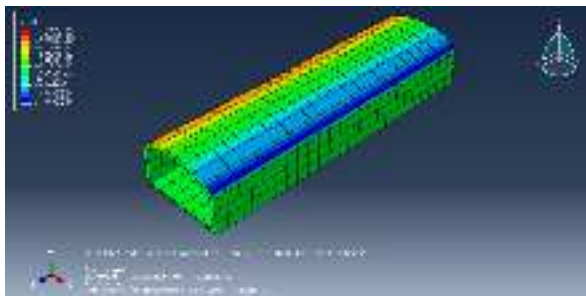
جدول ۷: مشخصات کلی نمونه های مورد تحلیل گروه نمونه های مورد مطالعه

نام گروه	نام مدل	نوع خاک	نوع بتن	ضخامت لایه cfrp	مقدار بار انفجاری
گروه A	A-۱	نوع خاک یک	بتن معمولی	ضخامت ۱ میلیمتر	10 KG
	A-۲				20 KG
	A-۳			ضخامت ۲ میلیمتر	10 KG
	A-۴				20 KG
	A-۵		بتن FRC	ضخامت ۱ میلیمتر	10 KG
	A-۶				20 KG
	A-۷			ضخامت ۲ میلیمتر	10 KG
	A-۸				20 KG
گروه B	B-۱	نوع خاک دو	بتن معمولی	ضخامت ۱ میلیمتر	10 KG
	B-۲				20 KG
	B-۳			ضخامت ۲ میلیمتر	10 KG
	B-۴				20 KG
	B-۵		بتن FRC	ضخامت ۱ میلیمتر	10 KG
	B-۶				20 KG
	B-۷			ضخامت ۲ میلیمتر	10 KG
	B-۸				20 KG

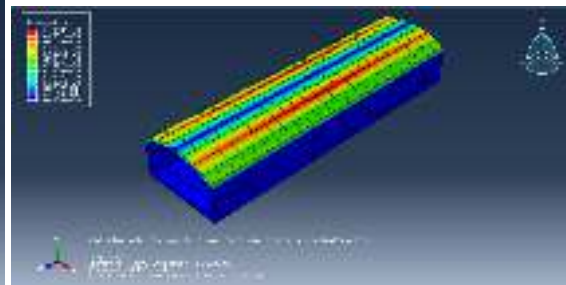
تکته: لازم به ذکر می باشد که در گروه A و B پارامترهای موثر نوع ورق های Cfrp و مشخصات هندسی مدلسازی نمونه ها و مشخصات میلگردهای مصرفی در دو گروه یکسان در نظر گرفته شد است.

۷- نتایج تحلیل نمونه ها مورد تحلیل

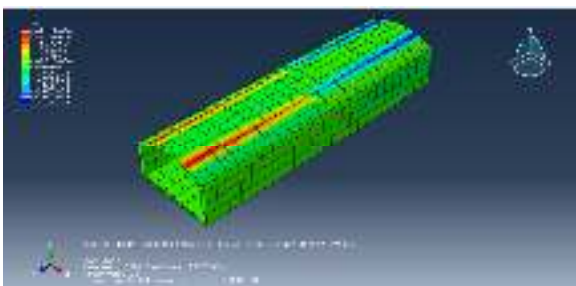
بعد از انجام تحلیل مدل‌های مطالعاتی در محیط دیداری (Visualization) از برنامه آباکوس می‌توان کانتورهای پارامترهای تحلیلی مختلف را مشاهده کرد، در شکل زیر کانتور تغییر مکان نمونه و تنش فون مایسز مدل‌های مطالعاتی را می‌توان مشاهده کرد.



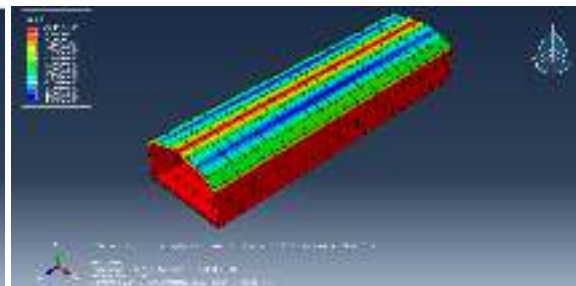
شکل ۸- توزیع تغییر مکان U-۱ در مدل A



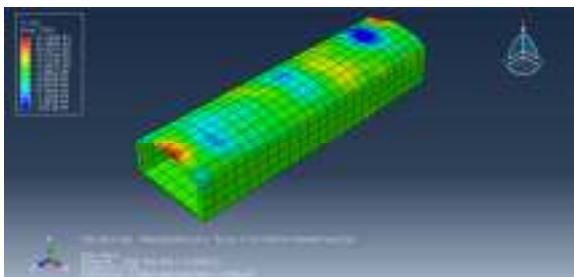
شکل ۷- توزیع تغییر مکان U-magnitude در مدل A



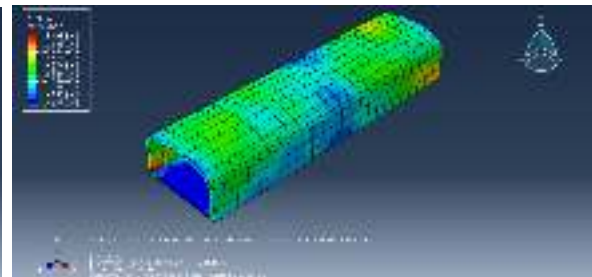
شکل ۱۰- توزیع تغییر مکان U-۳ در مدل A



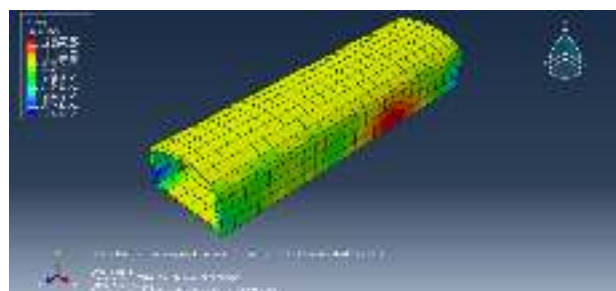
شکل ۹- توزیع تغییر مکان U-۲ در مدل A



شکل ۱۲- توزیع تنش فون مایسز S-S11



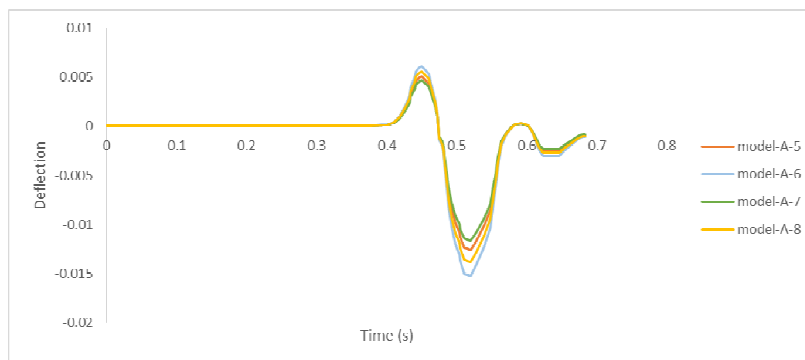
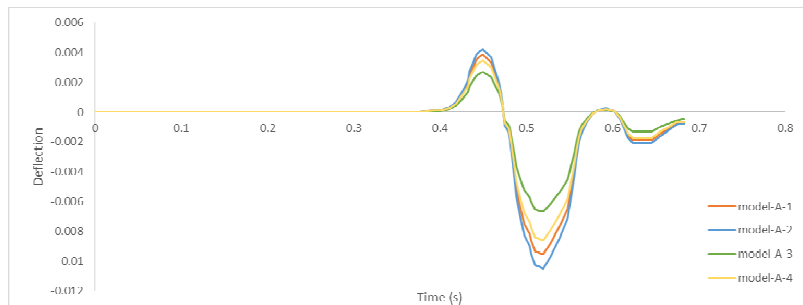
شکل ۱۱- توزیع تنش فون مایسز S-Miss



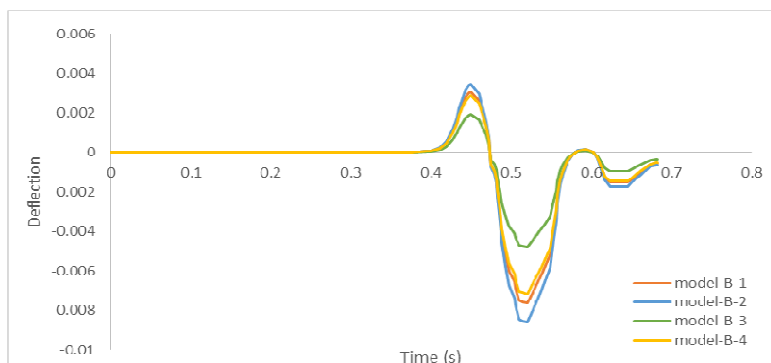
شکل ۱۳- توزیع تنش فون مایسز S-S22

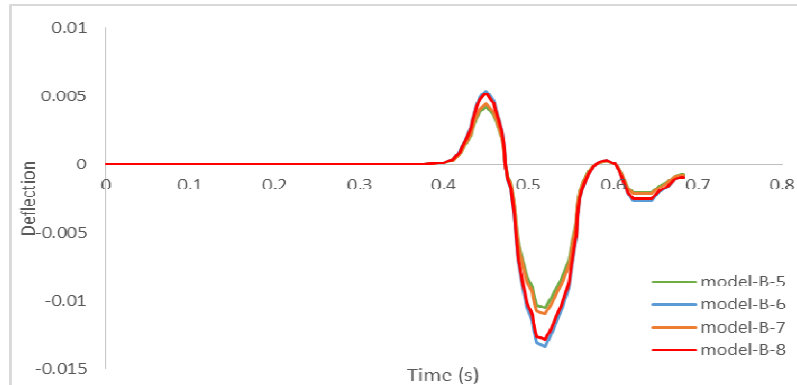
۱- نتایج خروجی تحلیل اجزاء محدود

بعد از انجام تحلیل مدل B,A در محیط Visualization می‌توان نمودار پارامترهای تحلیلی مختلف را مشاهده کرد، در شکل زیر نمودار خیز-زمان نمونه B,A را مشاهده می‌گردد. همانطوری که در شکل ۲۷ مشاهده می‌شود، می‌توان نمودار خیز-زمان ناشی از بار انفجاری که به نمونه‌های گروه A را مشاهده کرد.



شکل ۱۲: مقایسه کلی نمودار تغییر مکان-زمان گروه A تحت بارگذاری انفجاری





شکل ۱۲: مقایسه کلی نمودار تغییر مکان - زمان گروه B تحت بارگذاری انفجاری

۸. نتیجه گیری

- بعد از مدلسازی و انجام تحلیل های اجزاء محدود نتایج زیر در این پژوهش حاصل شد.
- با توجه به مقایسه نمودار تغییر شکل-زمان مدل A-۱ و مدل A-۲ مشاهده گردید، با ثابت بودن مقدار ضخامت ورق های FRP و ثابت بودن نوع بتن، با افزایش مقدار بار انفجاری TNT از مقدار بار انفجاری ۱۰ کیلوگرم به ۲۰ کیلوگرم سبب افزایش ۲۳/۴۱ درصدی تغییر شکل سازه مدفون بتنی شد.
 - با توجه به مقایسه نمودار تغییر شکل-زمان مدل A-۱ و مدل A-۳ مشاهده گردید، که با ثابت بودن پارامتر موثر بار انفجاری، و ثابت بودن نوع بتن سازه مطالعاتی، که با افزایش ضخامت ورق های FRP از ضخامت ۱ میلی متر به ۱/۵ میلی متر سبب کاهش ۱۴/۳ درصدی تغییر شکل سازه تحت یک بار انفجاری ثابت شد.
 - با توجه به مقایسه نمودار تغییر شکل-زمان مدل A-۲ و مدل A-۴ مشاهده گردید، که با ثابت بودن پارامتر موثر بار انفجاری، و ثابت بودن ضخامت ورق های FRP، با تغییر نوع بتن از بتن معمولی به بتن FRC سبب کاهش ۱۵/۶۳ درصدی تغییر شکل سازه تحت یک بار انفجاری ثابت شد.
 - با توجه به مقایسه نمودار تغییر شکل-زمان مدل A-۱ و مدل B-۱ مشاهده گردید، که با ثابت بودن پارامتر موثر بار انفجاری، نوع بتن، و ثابت بودن ضخامت ورق های FRP، با تغییر نوع خاک و چسبندگی شدن خاک، شاهد کاهش ۱۴/۲۳ درصدی تغییر شکل سازه تحت یک بار انفجاری ثابت شد.
 - توجه به مقایسه نمودار تغییر شکل-زمان مدل A-۵ و مدل A-۶ مشاهده گردید، با ثابت بودن مقدار ضخامت ورق های FRP و ثابت بودن نوع بتن، با افزایش مقدار بار انفجاری TNT از مقدار بار انفجاری ۱۰ کیلوگرم به ۲۰ کیلوگرم سبب افزایش ۱۴/۵۶ درصدی تغییر شکل سازه مدفون بتنی شد.
 - با توجه به مقایسه نمودار تغییر شکل-زمان مدل A-۵ و مدل A-۷ مشاهده گردید، با ثابت بودن پارامتر موثر بار انفجاری، و ثابت بودن نوع بتن سازه مطالعاتی، با افزایش ۵۰ درصدی ضخامت ورق های FRP از ضخامت ۱ میلی متر به ۱/۵ میلی متر شاهد کاهش ۸/۳ درصدی تغییر شکل سازه تحت یک بار انفجاری ثابت شد.
 - با توجه به مقایسه نمودار تغییر شکل-زمان مدل A-۶ و مدل A-۸ مشاهده گردید، با ثابت بودن پارامتر موثر بار انفجاری، و ثابت بودن ضخامت ورق های FRP مشاهده گردید، با تغییر نوع بتن از بتن معمولی به بتن FRC شاهد کاهش ۱۷/۸۴ درصدی تغییر شکل سازه تحت یک بار انفجاری ثابت شد.

- با توجه به مقایسه نمودار تغییرشکل-زمان مدل A-۵ و مدل B-۵ مشاهده گردید، با ثابت بودن پارامتر موثر بار انفجاری، نوع بتن، و ثابت بودن ضخامت ورق‌های FRP مشاهده گردید، با تغییر نوع خاک و چسبنده تر شدن خاک، شاهد کاهش ۱۰/۳۴ درصدی تغییرشکل سازه تحت یک بار انفجاری ثابت شد.
- توجه به مقایسه نمودار تغییرشکل-زمان مدل B-۱ و مدل B-۲ مشاهده گردید، با ثابت بودن مقدار ضخامت ورق های FRP و ثابت بودن نوع بتن، با افزایش ۳۸/۵۲ درصدی مقدار بار انفجاری TNT از مقدار بار انفجاری ۱۰ کیلوگرم به ۲۰ کیلوگرم سبب افزایش ۱۲/۷۴ درصدی تغییر شکل سازه مدفون بتنی شد.
- با توجه به مقایسه نمودار تغییرشکل-زمان مدل B-۱ و مدل B-۳ مشاهده گردید، با ثابت بودن پارامتر موثر بار انفجاری، و ثابت بودن نوع بتن سازه مطالعاتی، با افزایش ضخامت ورق‌های FRP از ضخامت ۱ میلی‌متر به ۲ میلی‌متر شاهد کاهش ۱۰/۱۲ درصدی تغییر شکل سازه تحت یک بار انفجاری ثابت شد.
- با توجه به مقایسه نمودار تغییرشکل-زمان مدل B-۲ و مدل B-۴ مشاهده گردید، با ثابت بودن پارامتر موثر بار انفجاری، و ثابت بودن ضخامت ورق‌های FRP، که با تغییر نوع بتن از بتن معمولی به بتن FRC شاهد کاهش ۱۴/۵۳ درصدی تغییر شکل سازه تحت یک بار انفجاری ثابت شد.
- توجه به مقایسه نمودار تغییرشکل-زمان مدل B-۵ و مدل B-۶ مشاهده گردید، با ثابت بودن مقدار ضخامت ورق های FRP و ثابت بودن نوع بتن، با افزایش مقدار بار انفجاری TNT از مقدار بار انفجاری ۱۰ کیلوگرم به ۲۰ کیلوگرم سبب افزایش ۱۳/۴۲ درصدی تغییرشکل سازه مدفون بتنی شد.
- با توجه به مقایسه نمودار تغییرشکل-زمان مدل B-۵ و مدل B-۷ مشاهده گردید، با ثابت بودن پارامتر موثر بار انفجاری، و ثابت بودن نوع بتن سازه مطالعاتی، با افزایش ضخامت ورق‌های FRP از ضخامت ۱ میلی‌متر به ۲ میلی‌متر سبب کاهش ۲۴/۶۵ درصدی تغییرشکل سازه تحت یک بار انفجاری ثابت شد.
- با توجه به مقایسه نمودار تغییرشکل-زمان مدل B-۶ و مدل B-۸ مشاهده گردید، با ثابت بودن پارامتر موثر بار انفجاری، و ثابت بودن ضخامت ورق‌های FRP، که با تغییر نوع بتن از بتن معمولی به بتن FRC سبب کاهش ۱۶/۸۵ درصدی تغییرشکل سازه تحت یک بار انفجاری ثابت شد.

۹. مراجع

- [۱] Zhengwen, Y., (۱۹۹۷), "Finite element simulation of response of buried shelters to blast loadings", Finite Elements in Analysis and Design, Vol. ۲۴, Issue ۳, pp. ۱۱۳-۱۳۲.
- [۲] Gui, M.W., Chien, M. C., (۲۰۰۴), "Blast-resistant analysis for a tunnel passing beneath Taipei Shongsan airport – a parametric study", Geotechnical and Geological Engineering, Vol. ۲۴: pp. ۲۲۷-۲۴۸.
- [۳] Lu, Y., Wang, Zh., Chong, K., (۲۰۰۵), "A comparative study of buried structure in soil subjected to blast load using ۲D and ۳D numerical simulations", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. ۲۵, pp. ۲۷۵-۲۸۸.
- [۴] حسین‌پور حامد، میرزینلی حسین. ارزیابی تأثیر تزریق دوغاب سیمان بر مقاومت فضاهای زیرزمینی در برابر بار انفجار. مجله علمی-پژوهشی. ۱۳۹۲؛ ۴ (۱): ۳۹-۴۹.
- [۵] Nagy, N.M., Eltehawy, E.A., Elhanafy, H.M., Eldesouky, A. (۲۰۰۹), Numerical modeling of geometrical analysis for underground structures, Aerospace sciences & aviation technology, Egypt.
- [۶] A. Ghani Razaqpur, Ahmed Tolba, Ettore Contestabile, Blast loading response of reinforced concrete panels reinforced with externally bonded GFRP laminates, McMaster University, Hamilton, Ont., Canada