

بررسی اثر انفجار بر سازه های سطحی و زیرزمینی

پوران فلاح زاده^۱، محمدحسن بازاریار^۲

p.fallahzadeh@gmail.com

baziar@iust.ac.ir

چکیده.

با توجه به اهمیت انفجار بر سازه ها مخصوصا سازه های استراتژیک در سال های اخیر، در این تحقیق سعی شده است تا مطالعات انجام شده موجود در این زمینه به صورت جامع مورد بررسی قرار بگیرد. هرچند که مطالعات انجام شده بسیار محدود و اندک است با این وجود سعی شده تا تمام تحلیل های عددی و آزمایشگاهی انجام شده، که اثر انفجار را بر سازه ها سطحی و زیر زمینی بررسی کرده، ارائه شوند.

کلمات کلیدی

انفجار- سازه های سطحی و زیر زمینی -تحلیل عددی و آزمایشگاهی

مقدمه

با توجه به اهمیت استراتژیک ایران در منطقه خاورمیانه و گسترش حملات توسط پدافند های هوایی غیر عامل در سال های اخیر، بررسی پدیده انفجار و اثرات آن بر سازه های استراتژیک و حساس مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به این که آزمایش های مربوط به انفجار هزینه بر و همراه با ریسک فراوان بوده و با موانع محیط زیستی نیز مواجه است، اغلب تحقیقات به صورت مدلسازی عددی انجام شده است. هدف اصلی در این مقاله ارائه تمام مطالعات و تحقیقاتی است که به صورت عددی و آزمایشگاهی در زمینه انفجار و بررسی آن بر روی سازه های سطحی و زیر زمینی انجام شده است. انجام شده است. به طور کلی می توان کارهای انجام شده در این زمینه را به دو گروه عمده عددی و آزمایشگاهی تقسیم کرد.

مطالعات عددی

اغلب کارهای انجام شده در زمینه انفجار و بررسی پاسخ سازه ها به آن، به صورت عددی انجام شده است و بیشتر مقالات مورد مطالعه در این بخش با نرم افزار AUTODYN- ۲D و FLAC و ۳D مدل شده است. به دلیل هزینه و ریسک بالای انجام آزمایش های مربوط به انفجار، سعی شده است تا دقت نرم افزارها ی موجود در این زمینه را بررسی کرده و با نتایج و فرمول های تجربی مقایسه کنند.

^۱-دانشجوی کارشناسی ارشد عمران دانشگاه علم و صنعت ایران

^۲-عضو هیات علمی دانشکده عمران دانشگاه علم و صنعت ایران

بررسی پاسخ سازه های مدفون یا نیمه مدفون در اثر بار انفجار در مهندسی حفاظت بسیار مهم است، و باید توجه داشت که در مورد سازه های زیرزمینی، پاسخ سازه با سازه های روی سطح زمین متفاوت است زیرا سازه در تقابل با خاک است و قاعدتاً اثر خاک بسیار مهم خواهد بود.

مدل های رفتاری در مدلسازی

در مقالات مورد مطالعه، با توجه به نرم افزار مورد مطالعه، مدل های رفتاری متفاوتی در نظر گرفته شده است. در نرم افزار AUTODYNE که یکی از قویترین نرم افزار های موجود در زمینه انفجار می باشد، خاک سه فازی به عنوان مدل رفتاری خاک در نظر گرفته شده است. (خاک مخلوطی از چند فاز است که شامل مواد معدنی، آب و هوا می باشد) در طی فرایند انفجار و گسترش آن در خاک، با تغییرات فضایی وزمانی بسیار متفاوت روبه رو خواهیم شد. در جهت چیره شدن بر این تغییرات زیاد، باید مدل قوی در نظر گرفته شود. اخیراً محققین با فرموله کردن مدل عددی خاک سه فازی توانستند روند انفجار در خاک و گسترش موج انفجار را نیز تعمیم دهند. در این مدل ذرات جامد به عنوان ساختار آن فرض شده که فضاهای خالی با آب و هوا پر شده است و با اصلاحات لازم مدل دراکر-پراگر^۱ اصلاح شده به کار گرفته شده است که به صورت فرمول زیر بیان می شود.^[۱]

$$f = \sqrt{J_2} - \alpha I_1 - k = 0 \quad (1)$$

که α و k ثابت مصالح بوده و به ترتیب به مقاومت اصطکاکی و چسبندگی آن ها بستگی دارد و J_2 ، I_1 به ترتیب تنش اولیه انحرافی است. برای وارد کردن اثر کرنش معادله نهایی به صورت زیر در خواهد آمد:

$$f = \sqrt{J_2} - (\alpha I_1 - k) \left(1 + \beta \ln \frac{\varepsilon_{eff}}{\varepsilon_0} \right) = 0 \quad (2)$$

که ε_0 مربوط به نرخ کرنش موثر β ، شیب نمودار مقاومت برابر الگوریتم کرنش می باشد و ε_{eff} نرخ کرنش موثر است که به صورت زیر تعریف می شود.

$$\varepsilon_{eff} = \sqrt{\frac{2}{3} d\varepsilon_{ij} d\varepsilon_{ij}} \quad (3)$$

در نرم افزار FLAC_{2D} مدل رفتاری موهر کولمب برای خاک در نظر گرفته شده است.^[۲]

پاسخ بتن در برابر بارگذاری ضربه ای غیر خطی پیچیده و وابسته به زمان می باشد. مدل های زیادی برای پاسخ دینامیکی و استاتیکی بتن پیشنهاد شده است که در مطالعات مختلف بسته به نتایج مورد نظر و دقت مسئله از مدل های مختلفی استفاده شده است. مدل RHT^۳ که این مدل نیز به دو قسمت تقسیم می شود، معادله حالت و مقاومت که در قسمت مقاومت از سه سطح مقاومتی استفاده می شود و در نرم افزار AUTODYNE از این مدل استفاده شده است. مدل عمومی رفتار بتن یعنی مدل hardening/softening کرنش در FLAC انتخاب شده است.

^۱ Drucker-Prager

^۲ Riedel, Hiermaier, Thoma

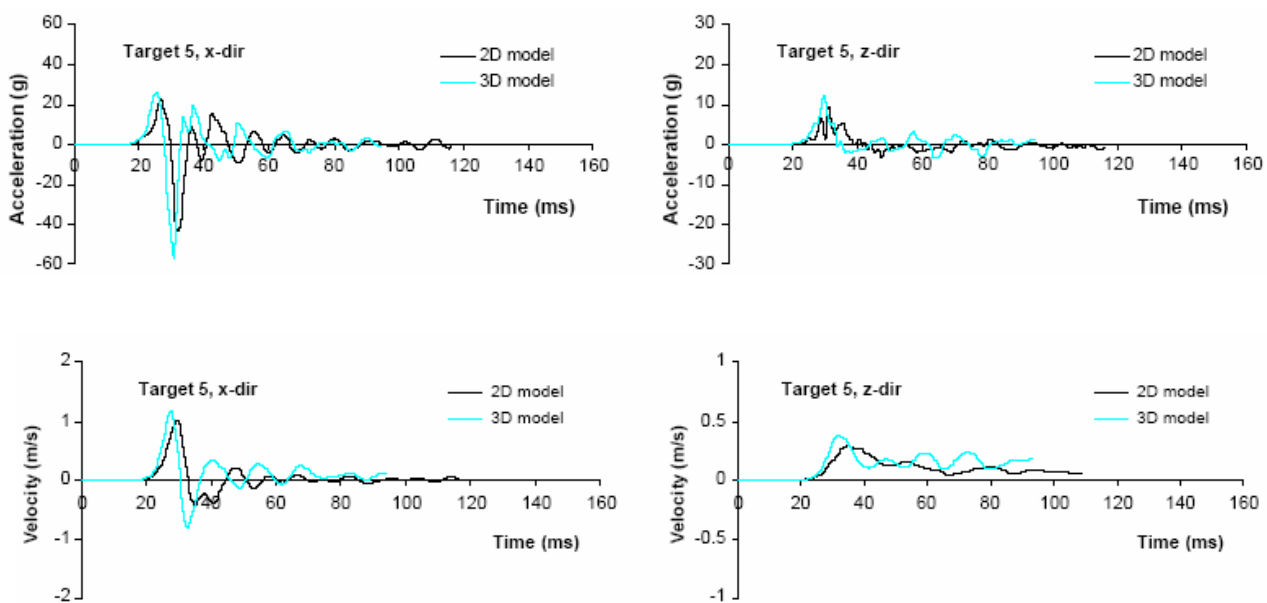
مدل الاستوپلاستیک سخت شونددگی پلاستیک برای فولاد به کار رفته که به صورت کابل سازه ای یک بعدی مدل شده است معادله حالت¹ JWL برای بار انفجاری در نظر گرفته شده است.^[۱۲]

$$P = C_1 \left(1 - \frac{\omega}{R_1 v} \right) \exp(-r_1 v) + C_2 \left(1 - \frac{\omega}{R_2 v} \right) \exp(-r_2 v) + \frac{\omega e}{v} \quad (۴)$$

که v حجم مخصوص، e انرژی مخصوص است و مقادیر C_1 ، C_2 ، R_1 ، R_2 و ω مقادیر ثابت برای اغلب انفجارها می باشد که از آزمایش های دینامیکی به دست می آید.

با توجه به تحقیقاتی که در این زمینه انجام شده نشان داده شده است که تحلیل نتایج در AUTODYN^{۲D} همخوانی بیشتر با معادلات تجربی داشته و از هزینه و زمان کمتری نیز استفاده شده است. (شکل ۱)

در مورد بررسی مقاومت ساختمان در برابر بار باد یا لرزه ای تنها مدل کردن سازه های مقاومتی کافی است اما در زمینه بار انفجار، قسمت های غیر سازه ای نیز مدل می شوند مخصوصاً دیوارها که نقش اساسی در گسترش موج انفجار دارند. همچنین هوا نیز به عنوان عامل مهم در انفجار که باعث انعکاس و انکسار امواج نیز، مدل می شود.^[۳]



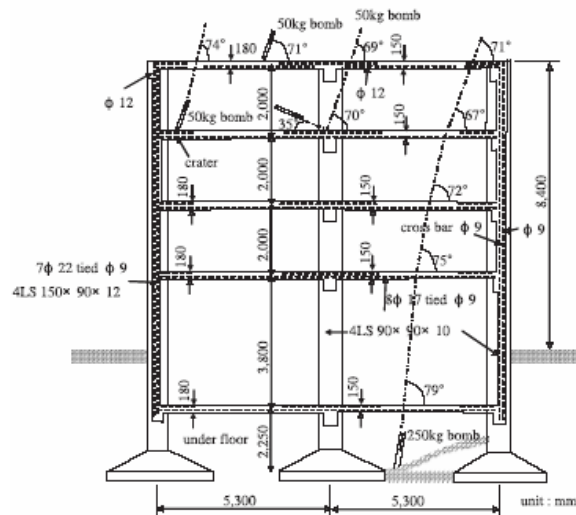
شکل ۱- مقایسه نتایج دو و سه بعدی در AUTODYN

مطالعات آزمایشگاهی و بزرگ مقیاس

در رابطه با بررسی انفجار بر روی سازه های سطحی و زیرزمینی، مطالعات آزمایشگاهی و بزرگ مقیاس به دلیل نیاز به امکانات پیشرفته و هزینه بر بودن و مشکلات زیست محیطی به صورت محدود انجام شده است.

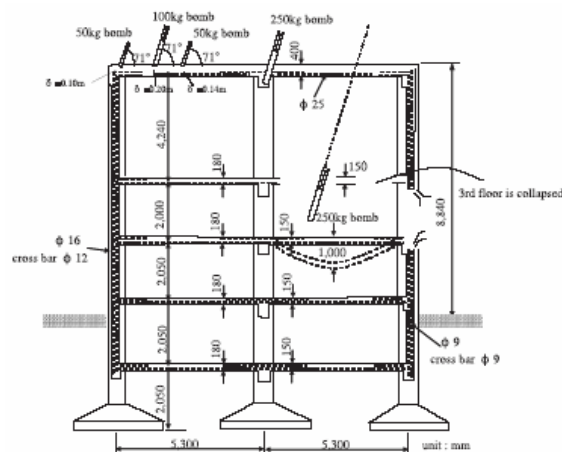
^۱ Jones-Wilkens-Lee

ژاپن و آمریکا از جمله کشورهایی هستند که توانستند آزمایش‌هایی را در این زمینه انجام داده و نتایج حاصل از آن را منتشر کنند. ژاپن با داشتن تجهیزات پیشرفته، آزمایش‌های بزرگ مقیاسی را در مورد سازه‌های سطحی و زیرزمینی انجام داده است. که در این آزمایش‌ها سعی شده به بررسی اثر وزن و شدت انفجار و عوامل پایداری سازه‌ها مانند سقف و دیوار بپردازد. در این آزمایش‌ها دیده می‌شود که افزایش پارامترهای مقاومتی سازه مانند ضخامت سقف و قطر آرماتورها، باعث افزایش مقاومت سازه در برابر بمب‌ها می‌شود. (شکل ۲ و ۳) [۴]



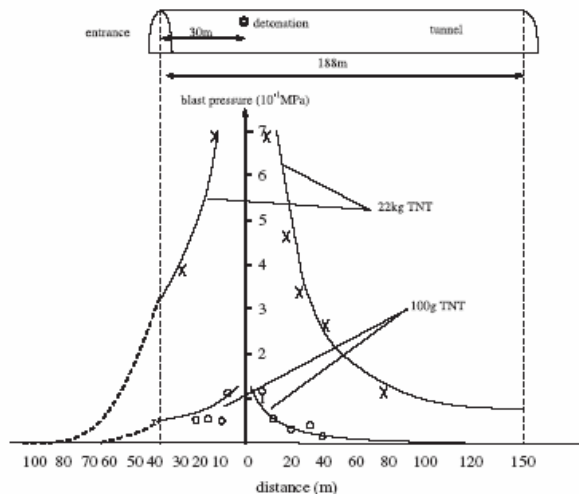
شکل ۲- سازه قبل از مقاوم سازی

همان‌طور که در شکل بالا دیده می‌شود بمب ۲۵۰ کیلوگرمی از تمام سقف‌ها عبور کرده است، که به دنبال افزایش مقاومت، ضخامت سقف از ۱۵ سانتی‌متر به ۴۰ سانتی‌متر و قطر آرماتورها نیز از ۱۲ به ۲۵ میلیمتر افزایش یافته است.



شکل ۳- سازه بعد از مقاوم سازی

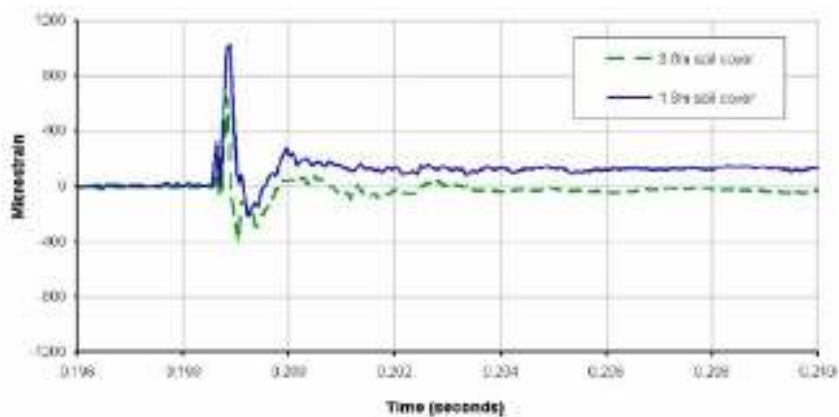
آزمایش هایی نیز بر روی سازه های زیرزمینی انجام شده است که عمدتاً فشار انفجار را نسبت به محل انفجار اندازه گیری کرده است ، و نتایج به دست آمده نشان می دهد که با افزایش فاصله نسبت به محل انفجار ، فشار به میزان زیادی کاهش می یابد که تطابق بسیار خوبی با روابط تجربی پیشنهاد شده ی پیشین دارد.(شکل ۴)



شکل ۴- تغییرات فشار ناشی از انفجار نسبت به کانون انفجار

مطالعات انجام شده در آزمایشگاه عمدتاً به وسیله ی سانتریفیوژ مدل شده است . سانتریفیوژ دارای سابقه ی شصت ساله برای مدل کردن سازه های ژئوتکنیکی می باشد. در این آزمایش ها سعی شده تا با مدل کردن سازه های زیرزمینی مانند تونل یا لوله های مدفون، اثر انفجار های سطحی و داخلی را بر آن ها بررسی کنند.

سانتریفیوژهایی که در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفتند قادر به چرخش تا شتاب ۳۰۰ g نیز هستند ولی به علت شرایط آیرودینامیکی تا شتاب ۱۰۰ g چرخیده و توانسته انفجار را مدل کرده و اثر آن را بر سازه زیرزمینی ،با بررسی پارامترهای مختلف ارائه دهند.[۵] در این آزمایش ها اثر خاک به عنوان یک پارامتر مهم در کاهش فشار و شدت انفجار نشان داده شده است . شکل ۵ نشان می دهد که افزایش ضخامت خاک روی تونل باعث کاهش کرنش های ناشی از آن می شود.[۶]



شکل ۵- اثر ضخامت خاک روی سطح تونل در کاهش کرنش ها

نتیجه گیری

با توجه به محیط های پیچیده ای که پدیده انفجار در آن بررسی شده ,مانند بتن و خاک ومحدودیت انجام مطالعات در این زمینه هنوز محققین به معادلات کامل و جامعی با دقت بالا نرسیده اند.

فقدان مطالعه جامع در زمینه مقایسه عددی و آزمایشگاهی در سازه های زیر زمینی و روی سطحی و استفاده از نتایج در طراحی ها و همچنین نیاز به گسترش مطالعه در زمینه انفجار مخصوصا در زمینه های محافظتی و سازه های مهم و حیاتی به خوبی حس می شود.

برتری و دقت نرم افزار هایی چون AUTODYNE وFLAC_{2D} نسبت به FLAC_{3D} در نتایج و طراحی سازه ها نیز مشهود است .و این به دلیل پیچیدگی رفتار محیط هایی است که انفجار در آن صورت گرفته و منتشر می شود .

از نتایج به دست آمده می توان استنباط کرد که خاک از جمله موادی است که باعث کاهش شدت و فشار انفجار می شود.

- [١]Lu.Y,Wang. Z And Chong.K.(٢٠٠٥) . “A Comparative study of buried structure in soil subjected to blast load using *2D* and *3D* numerical simulations”soil dynamics and earthquake engineering ,٢٧٥-٢٨٨
- [٢]M.W.GUI. ” Blast –resistant analysis for a tunnel passing beneath Taipei shongsan airport –a parametric study”.,Geotechnical and Geological eng ,٢٠٠٦,٢٢٧-٢٤٨.
- [٣]N.Iskakawa. ”Analysis of building collapse under blast load”.,International journal of impact engineering ,٢٠٠٦
- [٤]N.Iskakawa. ”lessons from past explosive tests on protective structures in Japan”.,International journal of impact engineering ,٢٠٠٦
- [٥]T.K.Blanchat. ”Development of explosive event scale model testing capability at sandia’s large scale centrifuge facility”.,Sandia national laboratoeies,١٩٩٨
- [٦]Anirban De. ” Modeling of surface blast effects on underground structures”.,Geotechnical eng ASCE,٢٠٠٥