

تحلیل عددی نفوذ بمب‌های سنگرشکن با انرژی جنبشی غیرهسته‌ای (GBU) در سازه‌های زیرزمینی

صالحی حسن^{1*}، حشمتی‌راد مهدی²، اصلی‌خباز محمود³

1- هیئت علمی دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء (ص)

2- هیئت علمی دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء (ص)

3- مدرس دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری

(دریافت مقاله: 1393/11/08 تاریخ پذیرش: 1394/09/10)

چکیده

ساخت سازه‌های امن و پناهگاه‌ها در زیر زمین که با لایه‌هایی از خاک و بتن پوشیده شده‌اند، یکی از روش‌های معمول و بسیار موثر برای حفاظت از فعالیت‌های نظامی است. یکی از مهم‌ترین تهدیدهای موجود برای امنیت سازه‌های زیرزمینی، بمب‌های سنگرشکن هدایت‌شونده هستند. در این مقاله هدف نخست شناخت عملکرد نفوذی این بمب‌ها در خاک و بتن و بررسی میزان نفوذ آنها در این دو محیط می‌باشد. سپس به ارائه راه‌کاری جهت کاهش میزان نفوذ این بمب‌ها در این دو محیط پرداخته می‌شود. در این تحقیق از طریق مدل‌سازی و تحلیل عددی با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS میزان تخریب ایجاد شده در توده بتن و خاک تحت اثر نفوذ کلاهک جنگی BLU-113 که روی بمب‌های هدایت‌شونده لیزری GBU28 نصب می‌شود، بررسی شده و نحوه تغییر انرژی پرتابه در داخل هر یک از این محیط‌ها محاسبه شده است. تحلیل عددی، مقدار نفوذ این پرتابه را در خاک معمولی بیش از 30 متر و مقدار نفوذ آن را در بتن معمول ساختمانی بیش از 6 متر نشان می‌دهد. در انتها با پیشنهاد یک روش، لایه‌بندی خاک بوسیله لایه‌های بتنی نشان داده شده‌است که می‌توان نفوذ این کلاهک جنگی را به نصف کاهش داد. در نهایت نیز دستاوردهای طرح جمع‌بندی و نتیجه‌گیری می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بمب‌های سنگرشکن، نفوذ در خاک و بتن، اتلاف انرژی جنبشی، سازه‌های زیرزمینی.

Abstract

To build the safe underground shelters which are covered by the layers of soil and concrete is one of the common ways to protect military activities. The bunker buster bombs are the main threat for underground shelters. The main aim of this research is to evaluate the piercing action of these bombs in soil and concrete and to provide a base line for further research on this area. In this study ABAQUS software is used to numerically simulate the penetration process. In the current paper, a method to minimize the penetrability of BLU-113 warhead in only soil and concrete and then in a given underground construction is evaluated. The results of analytical and numerical analyses represented that putting the interlaced of concrete and soil layers minimize probing of BLU-113 can be observed.

Keywords: *Bunker buster bombs, Penetration in soil and concrete, dissipating the kinetic energy, Underground constructions*

مقدمه و پدیدارشناسختی نفوذ پرتابه‌ها

پناهگاه‌ها و سازه‌های زیرزمینی از نظر دفاعی نقش بسیار موثری دارند. این سازه‌ها به منظور حفاظت از افراد و تجهیزات، و نیز به عنوان قرارگاه فرماندهی و هدایت نیروها در عملیات نظامی مورد استفاده قرار خواهند گرفت. بمب‌های سنگرشکن به عنوان تهدید درجه اول برای این سازه‌ها مطرح هستند. برای بررسی میزان دقیق تاثیر این بمب‌ها بر استحکامات دفاعی مدفون، شناخت میزان نفوذ آن‌ها و مسیر پایدار حرکت آن‌ها در عمق خاک و بتن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با شناخت این پارامترها می‌توان به راهکارهایی جهت کاهش عمق نفوذ این بمب‌ها دست یافت. با توجه به کمبود اطلاعات در زمینه عملکرد این بمب‌ها، ضرورت انجام این پژوهش بیش از پیش احساس می‌شود تا با ارائه تحلیل‌های عددی و شبیه‌سازی نرم‌افزاری به شناخت رفتار این بمب‌ها پرداخته شود.

یکی از مهمترین جنبه‌های نوآوری پروژه حاضر، شبیه‌سازی نفوذ بمب‌های سنگرشکن در خاک و بتن و محیط ترکیبی آنها است. در این تحقیق میزان تخریب ایجاد شده در توده بتنی و خاکی تحت اثر نفوذ این بمب‌ها بررسی شده و نحوه تغییر انرژی پرتابه در داخل هر یک از این محیط‌ها مورد مطالعه قرار می‌گیرد. هرچند مدل‌سازی عددی نفوذ گلوله‌های متعارف سبک و سنگین در بتن پیش از این به صورت متعدد در قالب پروژه‌های گوناگون انجام شده است، اما تاکنون پژوهشی در راستای بررسی نفوذ بمب‌ها صورت نگرفته است. در بررسی منابع داخلی و خارجی نیز مطالعه مشابهی در محدوده منابع قابل دسترس مشاهده نگردید. همچنین این پژوهش در نهایت به ارائه راه‌کارهای مناسب برای کاهش نفوذ این جنگ‌افزارها خواهد پرداخت که از این دیدگاه نیز نوآورانه خواهد بود.

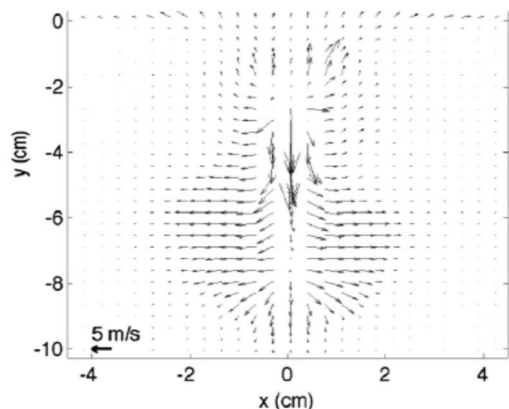
در پژوهش حاضر سعی می‌شود تحقیقات جامعی در خصوص مدل‌سازی عددی نفوذ بمب‌های سنگرشکن در خاک و بتن ارائه شود. چند نمونه از دستاوردهای این تحقیق را می‌توان به این صورت بیان نمود: ارائه مدل عددی برای نفوذ بمب‌های سنگرشکن در خاک، ارائه مدل عددی برای نفوذ بمب‌های سنگرشکن در بتن، تحلیل عددی نفوذ بمب‌های سنگرشکن در محیط ترکیبی خاک و بتن و نحوه کاهش انرژی جنبشی آن در هنگام نفوذ و بررسی راهکارهای پیشنهادی برای کاهش میزان نفوذ بمب‌های سنگرشکن.

در جنگ جهانی دوم بارنز والیس¹ طراح معروف سلاح‌های انگلستان، بمب پنج تنی تال بوی² و بمب ده تنی گرند اسلم³ را طراحی کرد، که به عنوان اجداد بمب‌های سنگرشکن امروزی شناخته می‌شوند. این بمب‌ها از خاصیت آیرودینامیکی بسیار خوبی برخوردار بودند و با سقوط از ارتفاع 6500 متری از سطح زمین می‌توانستند به سرعتی بیش از سرعت صوت در هنگام برخورد با هدف دست یابند. همچنین این بمب‌ها از فولادی با مقاومت بسیار بیشتر از فولادهای بکار رفته در بمب‌های موجود آن زمان ساخته شده بودند، به طوری که پس از برخورد با مانع متلاشی نشده و می‌توانستند به عمق آن نفوذ کنند.

در جنگ جهانی دوم ایالات متحده آمریکا نیز بمب 2 تنی دیزنی⁴ را به کار گرفت. این بمب دارای نسبت طول به قطر بیشتری بود و بدنه آن کاملاً برای نفوذ در لایه‌های ضخیم بتن-آرمه طراحی شده بود. این بمب سنگرشکن در چند عملیات موفق بر ضد پناهگاه‌های زیر دریایی آلمان مورد استفاده قرار گرفت و ضمن عبور از یک لایه 4/5 متری بتن آرمه در داخل این پناهگاه‌ها منفجر شد. پس از آن نیز تحقیقات زیادی برای ساخت انواع بمب‌های سنگرشکن صورت گرفته و محصولات جدیدی تولید گردید. با توجه به اینکه تشریح کامل این فرآیندها در این مقاله نمی‌گنجد فقط به اختصار بمب سنگرشکن هدایت‌شونده لیزری GBU28 که موضوع این مقاله است توضیح داده می‌شود.

بمب GBU28 دارای 2500 کیلوگرم جرم بوده و برای استفاده در عملیات طوفان صحرا در سال 1991 طراحی و در مدت سه هفته ساخته شد. هدف از ساخت این بمب هدف قرار دادن مراکز فرماندهی ارتش عراق بود که در عمق زمین واقع بودند. در عمل تنها دو بمب از این نوع در عملیات طوفان صحرا مورد استفاده قرار گرفت که از هواپیمای جنگنده F-111 پرتاب شدند. پس از این عملیات انواع جدیدی از این بمب ساخته شدند که دارای سیستم هدایت اینرسی و GPS هستند. اولین نوع از کلاهک‌های GBU-28 متشکل از لوله‌های توپ خود کشی M110 با کالیبر 8 اینچ (203 میلیمتر) بود. اما نمونه‌های تکمیل شده نهایی این بمب دارای کلاهک جنگی 2000 کیلوگرمی (BLU-122) مطابق شکل 1 هستند که دارای 430 کیلوگرم ماده منفجره AFX-757 است و غلاف فلزی آن که از فولاد اگلین تراشیده شده می‌باشد 1570 کیلوگرم جرم دارد. قدرت نفوذ آن بیش از 30 متر در خاک

پرتابه حرکت می‌کنند. حرکت ذرات خاک در جهت عمود بر مسیر پرتابه پس از عبور پرتابه از یک نقطه کاهش می‌یابد [2].



شکل 2- بردارهای سرعت ذرات خاک در هنگام نفوذ پرتابه [2]

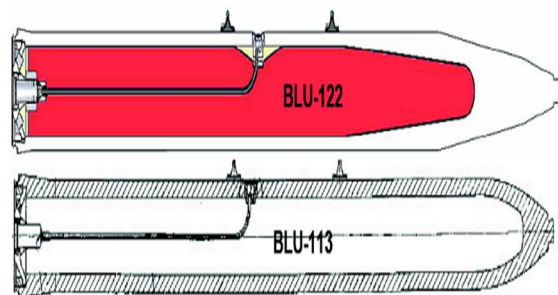
همچنان که سرعت پرتابه در حین فرآیند نفوذ کاهش می‌یابد، ذرات ماسه که به وسیله نوک پرتابه به طرفین رانده شده بودند، فرصت کافی پیدا می‌کنند که بازگشته و با بدنه پرتابه در تماس قرار بگیرند و این موضوع باعث افزایش اصطکاک بدنه‌ای پرتابه می‌شود.

با ترکیب نمودن مشاهدات آزمایشگاهی در حالت‌های بزرگ-مقیاس و ریز-مقیاس، می‌توان به تصویری واضح‌تر از فرآیند نفوذ دست یافت. در سرعت‌های نفوذ زیاد ذرات خاک به جای اینکه حرکت کنند، در هم قفل می‌شوند به همین دلیل حجم بیشتری از خاک برای نفوذ پرتابه باید جابه‌جا شود و بنابراین باعث افزایش مقاومت در برابر نفوذ پرتابه خواهد شد. هنگامی که مقاومت در مقابل نفوذ از مقاومت شکست ذرات خاک فراتر رود، انتقال انرژی پرتابه به ذرات خاک باعث خرد شدن ذرات می‌شود.

حد رسیدن به چنین حالتی با میانگین تنش در محیط دانه‌ای در جبهه پیش روی پرتابه در ارتباط است و در نتیجه تابعی از ضربه و سرعت نفوذ پرتابه خواهد بود، زیرا تنش فشاری در جبهه پیش روی پرتابه با مربع سرعت آن متناسب است.

تخلخل خاک بر چگونگی مقاومت آن در مقابل نفوذ موثر است. همچنین از آنجا که قفل شدن ذرات درهم باعث افزایش چگالی محیط دانه‌ای می‌شود، افزایش مقاومت در برابر نفوذ را نیز به همراه خواهد داشت [3]. کوپر⁵ و براکس⁶ [4] گزارش

معمولی و بیش از 6 متر در بتن مورد تایید قرار گرفت. یک کلاهک جنگی از بمب GBU-28 که به یک راکت بسته شده بود به چند لایه بتنی مجموعاً به ضخامت 6/7 متر برخورد و از آنها عبور کرد و در نهایت در فاصله یک مایلی این هدف متوقف شد.



شکل 1- کلاهک‌های جنگی BLU-122 و BLU-113

ضربه و نفوذ پرتابه‌ها در محیط‌های دانه‌ای، مهندسی و فیزیکدان‌ها را از اواسط قرن هجدهم میلادی به خود مشغول داشته است [1].

مطالعه رفتار پرتابه‌ها به دو بخش تقسیم می‌گردد. بخش اول مطالعه بالستیک خارجی است که به بررسی رفتار پرتابه تا قبل از برخورد به هدف می‌پردازد و بخش دوم مطالعه بالستیک هدف است که به بررسی مسیر و تغییر سرعت و نفوذ پرتابه در هدف می‌پردازد. در این بخش به مرور مطالعات انجام شده در مورد بالستیک هدف در خاک‌های دانه‌ای به خصوص ماسه پرداخته می‌شود.

نفوذ پرتابه در خاک را می‌توان بر اساس این اصل کلی مورد بررسی قرار داد که نیروی وارد شده از طرف پرتابه بر هدف با نیروی وارده از طرف هدف به پرتابه برابر است. مقاومت در مقابل نفوذ هم از نظر کیفی و هم از نظر کمی در مواد مختلف متفاوت است. در فلزات مقاومت در برابر نفوذ به صورت ناگهانی رخ می‌دهد در صورتی که در خاک این مقاومت کمتر است و فرآیند نفوذ مدت زمان بیشتری به طول می‌انجامد. در این بخش به بررسی مقاومت مواد در برابر نفوذ پرتابه‌ها در حالت بزرگ مقیاس و ریز مقیاس پرداخته می‌شود.

ذرات خاک که روبروی نوک پرتابه قرار دارند همراستا با مسیر حرکت پرتابه، حرکت می‌کنند، اما ذرات خاک که جلوتر از نوک پرتابه هستند و فاصله آنها تا نوک پرتابه به چند برابر قطر پرتابه می‌رسد، مطابق شکل 2 در جهت عمود بر مسیر

روش‌های عددی مدت زمان زیادی است که برای بررسی پدیده نفوذ پرتابه‌ها در خاک مورد استفاده قرار گرفته‌اند و از این طریق می‌توان مواردی را مورد مطالعه قرار داد که توسط روابط تجربی و شناخت پدیده نمی‌تواند بررسی شود. این موارد شامل:

1- نقش اصطکاک در نفوذ پرتابه‌ها [5,6]

2- توزیع نیروها و اندرکنش نیرویی بین پرتابه و خاک در هنگام نفوذ به ویژه توزیع تنش روی بدنه پرتابه در حین نفوذ [5,7]

3- نقش خاک در پایداری مسیر پرتابه [7,2]

4- تغییر شکل پرتابه و ساییده شدن بدنه آن در حین نفوذ به ویژه در سرعت‌های برخورد که زیاد است.

با استفاده از روش‌های عددی می‌توان معادلات رفتاری پیچیده‌تری را برای خاک استفاده کرد در صورتی که روش‌های تحلیلی امکان استفاده از معادلات رفتاری پیچیده را نمی‌دهد. روش‌های عددی برای مدل‌سازی نفوذ پرتابه‌ها در خاک را می‌توان به دو دسته محیط پیوسته و محیط گسسته طبقه‌بندی کرد. روش‌های محیط پیوسته با تقسیم محیط به المان‌های کوچکتر فرآیندهای نفوذ را مدل‌سازی می‌کنند. از روش‌هایی که در این طبقه قرار می‌گیرند می‌توان به روش اجزاء محدود (FEM) و روش تفاضل‌های محدود (FDM) اشاره نمود. معادلات رفتاری و معادلات حالت در این روش برای شبیه‌سازی پاسخ محیط خاک به نفوذ مورد استفاده قرار می‌گیرند. اصلی‌ترین نکات در به کار بردن روش محیط پیوسته برای مدل‌سازی مسئله شامل موارد زیر است:

1- روش مش‌بندی مناسب و حل مشکلات ناشی از

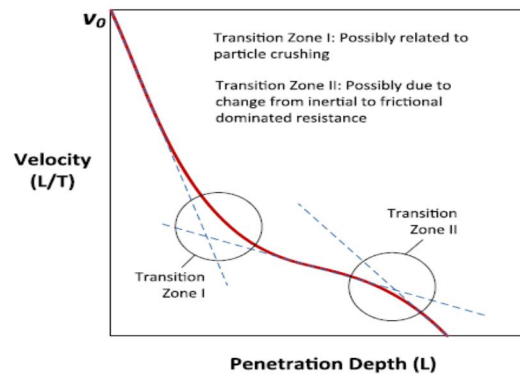
ناپایداری‌های عددی

2- انتخاب مدل رفتاری مناسب

انتخاب مدل رفتاری مناسب بسیار مورد تحقیق توسط پژوهش‌گران قرار گرفته است [8,9]. اما تاکنون مطالعه جامعی در مورد مدل رفتاری خاک با در نظر گرفتن اثرات نرخ کرنش انجام نشده است.

در روش اجزاء مجزا (DEM) محیط خاک به صورت اجزاء جداگانه‌ای مدل‌سازی می‌شود که با یکدیگر در ارتباط هستند [10]. مدل رفتاری به هر یک از این اجزاء نسبت داده می‌شود و سپس قوانین مناسبی برای نحوه انتقال نیرو بین این اجزاء تعریف می‌گردد. از این رو دیگر نیازی به تعریف مدل

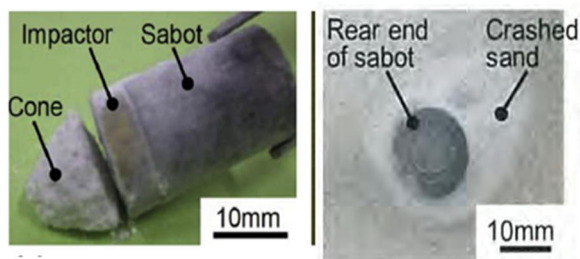
کردند که با افزایش 10 درصد در چگالی محیط دانه‌ای برای پرتابه‌هایی با سرعت‌های بین 600 تا 1200 متر بر ثانیه، کاهش انرژی جنبشی محیط تا 4 برابر افزایش داشته است. همچنان که پرتابه سرعت خود را در فرآیند نفوذ از دست می‌دهد، انرژی انتقال یافته توسط پرتابه به محیط دانه‌ای به کمتر از حد خرد شدن دانه‌ها کاهش می‌یابد در نتیجه برای نفوذ بیشتر پرتابه لازم است ذرات جریان پیدا کنند تا مسیر برای عبور آن باز شود. اولین منطقه تغییر وضعیت در نمودار سرعت-نفوذ که در شکل 3 نشان داده شده است مرتبط با این مکانیسم می‌باشد. هرچه به انتهای فرآیند نفوذ نزدیک گردد مقاومت شبه‌استاتیکی خاک در مقابل نفوذ افزایش می‌یابد. در عمق مشخصی از نفوذ بسته به میزان تخلخل خاک مقاومت شبه‌استاتیکی و دینامیکی در مقابل نفوذ با یکدیگر برابر می‌شوند. پس از این عمق مقاومت اصطکاکی در برابر نفوذ از مقاومت هیدرو دینامیکی بیشتر می‌شود. این تغییر وضعیت که در نمودار سرعت-نفوذ در شکل 3 نشان داده شده است، با افزایش مقاومت در برابر نفوذ همراه است و در نهایت به توقف کامل پرتابه می‌انجامد.



شکل 3- فازهای مختلف نفوذ در نمودار سرعت - جابجایی [4]

روش عددی مدل‌سازی نفوذ پرتابه

مدل‌سازی برخورد و نفوذ پرتابه‌ها در محیط دانه‌ای معمولاً به عنوان یک ابزار پیش‌بینی در کاربردهای عملی مهندسی به کار می‌رود. یکی از مهمترین پارامترهایی که در مرکز توجه کارهای عملی مهندسی قرار دارد عمق نهایی نفوذ پرتابه در خاک است. در این بخش روش‌های عددی مدل‌سازی برای محاسبه عمق نفوذ پرتابه را به صورت اجمالی مرور می‌کنیم:



شکل 4- خرد شدن دانه‌های خاک در هنگام نفوذ پرتابه سرتخت [20]

در هنگام نفوذ پرتابه‌های سرتخت یک مقدار دانه خاک خرد شده به شکل یک مخروط در نوک پرتابه شکل می‌گیرد [20,21]. خرد شدن دانه‌ها به متراکم شدن خاک کمک می‌کند و باعث استهلاک امواج تنش در خاک می‌گردد. اگرچه دانه‌های درشت خاک به دلیل تیز گوشه بودن تمایل بیشتری به شکست دارند اما به دلیل محصور بودن در میان دانه‌های ریزتر تنش‌های کششی کمتری در آن‌ها ایجاد می‌شود و امکان شکست در آنها کاهش می‌یابد. این مساله باعث می‌شود که در مشاهدات آزمایشگاهی دانه‌های ریز خاک بیشتر خرد شده باشند.

خواص مکانیکی خاک به دانه‌بندی و جنس دانه‌های آن وابسته است. به عنوان مثال تیز گوشه بودن دانه‌ها باعث افزایش مقاومت و تمایل خاک به اتساع می‌شود. مقاومت برشی خاک تا رسیدن به مقدار مشخصی از برش توسط حرکت نسبی دانه‌ها و اتساع خاک کنترل می‌شود و بعد از آن خرد شدن دانه‌ها رخ خواهد داد. در مرحله خرد شدن دانه‌ها جنس آنها مهم خواهد شد و بر مقاومت برشی خاک تاثیرگذار خواهد بود. به عنوان مثال دانه‌های آهکی ضعیف تر از دانه‌های سیلیکاتی هستند.

آزمایش‌های انجام شده روی نفوذ میله‌های بلند به صورت شبه استاتیکی در خاک نشان داده اند که مقاومت خاک‌های خوب دانه‌بندی شده در مقابل نفوذ بسیار بیشتر از مقاومت خاک‌های با دانه‌بندی یکنواخت و نامناسب است. هرچه سرعت نفوذ بیشتر شود از آنجا که فرآیند خرد شدن دانه‌ها زمان بر است پیش از خرد شدن دانه‌ها و متراکم تر شدن محیط خاک پرتابه از ناحیه مورد نظر عبور می‌کند، لذا در این سرعت‌ها اثرات خرد شدن دانه‌ها کمتر است. هرچه سرعت پرتابه زیادتر می‌شود فشار در اطراف پرتابه نیز افزایش می‌یابد. علاوه بر این جبهه متراکم کننده خاک که پیش از این در مورد آن صحبت شد و در پیش روی پرتابه شکل می‌گیرد ذرات خاک را بسیار

رفتاری برای کل خاک نیست و فقط مدل رفتاری به دانه‌ها اختصاص می‌یابد. مثلاً در یک خاک ماسه‌ای کافی است مدل رفتاری به دانه‌های ماسه اختصاص داده شود. روش اجزاء مجزا می‌تواند برای بررسی تاثیر پدیده‌هایی نظیر شکل دانه‌های خاک و خرد شدن دانه‌ها در نفوذ پرتابه مورد استفاده قرار گیرد.

اخیراً در بعضی از مطالعات عددی روش‌های اجزاء محدود و اجزاء مجزا برای بررسی پدیده نفوذ پرتابه در خاک‌های دانه‌ای با یکدیگر ترکیب شده اند. در این مطالعات پرتابه‌ها با روش اجزاء محدود و محیط خاک با روش اجزاء مجزا مدل‌سازی می‌شوند [11]. روش دیگری برای مدل‌سازی این است که مجموعه‌ای از دانه‌ها را با روش اجزاء محدود مدل‌سازی کرده و ارتباط این مجموعه‌ها با یکدیگر را با روش اجزاء مجزا برقرار کرد [7].

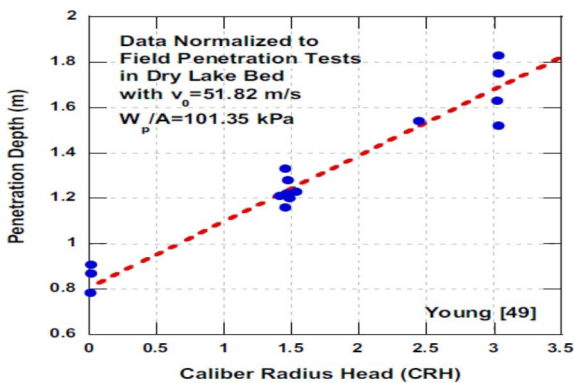
علیرغم پیشرفت‌هایی که در مدل‌سازی عددی نفوذ پرتابه‌ها رخ داده است هنوز این روش‌ها در بررسی پدیده‌هایی چون خرد شدن دانه‌ها در حین نفوذ پرتابه و اثراتی که این پدیده بر کاهش انرژی پرتابه دارد، ضعف دارند.

نقش خصوصیات خاک و پرتابه در نفوذ درون خاک

هنگام بررسی نقش خواص خاک در نفوذ پرتابه‌ها باید توجه داشت که پاسخ خاک در بارگذاری با نرخ کرنش زیاد با حالتی که به صورت شبه استاتیکی بارگذاری شود متفاوت است [12]. با یک مرور کلی بر اثرات نرخ کرنش می‌توان دریافت که هم رفتار محوری و هم رفتار برشی خاک از نرخ بارگذاری آن تاثیر می‌پذیرند [3,13,14].

نقش ابعاد دانه‌ها، شکل و جنس مواد معدنی آن‌ها در فرآیند نفوذ

هنگامی که دانه‌های خاک خرد می‌شوند، انرژی کرنشی از طریق ایجاد صفحات جدی، اصطکاک، ایجاد صدا و آزاد شدن انرژی الاستیک مستهلک می‌شود. متناظر با این پدیده‌ها یک زمان رها سازی وجود دارد [15,16]. تعداد زیادی از مشاهدات آزمایشگاهی خرد شدن دانه‌ها را در حین نفوذ پرتابه‌ها در خاک گزارش نموده‌اند [17,18,19]. این مساله در شکل 4 نشان داده شده است.



شکل 5- تاثیر شکل دماغه پرتابه بر میزان نفوذ در خاک [22]

جنس ماده سازنده پرتابه

مقاومت پرتابه با تنش جاری شدن آن (در صورتی که ماده سازنده شکل‌پذیر باشد) و یا تحمل شکست آن (در صورتی که ماده سازنده ترد باشد) بیان می‌شود. برای انواع پرتابه‌ها و خاک‌های مختلف سرعتی تحت عنوان سرعت ایجاد خرابی تعریف می‌شود که اگر پرتابه با این سرعت به خاک مورد نظر برخورد کند تنش‌های ایجاد شده در بدنه پرتابه باعث به وجود آمدن خرابی در بدنه پرتابه می‌شوند که می‌تواند شکل‌پذیر و یا ترد باشد.

خرابی‌های ترد باعث تکه‌تکه شدن و متلاشی شدن پرتابه می‌شوند، در صورتی که خرابی‌های شکل‌پذیر باعث تغییرشکل بسیار زیاد پرتابه می‌گردند. برای پرتابه‌های فولادی که در ماسه نفوذ می‌کنند، سرعت ایجاد خرابی معمولاً بین 500 تا 1300 متر بر ثانیه است. تغییرشکل پرتابه معمولاً باعث ایجاد پیچ و تاب خوردن پرتابه در حین نفوذ می‌شود که خود باعث افزایش بیشتر تغییرشکل در پرتابه می‌شود. در لحظه برخورد همچنین تخت شدن نوک پرتابه نیز به علت تغییرشکل غیرالاستیک دماغه پرتابه رخ می‌دهد. این اتفاق باعث افزایش مقاومت در برابر نفوذ پرتابه خواهد شد.

از دیگر خواصی که در سرعت‌های برخورد کمتر از سرعت صوت از درجه دوم اهمیت برخوردارند دمای ذوب پرتابه و خواص حرارتی دیگر آن هستند. همچنین زبری بدنه و شکل آن نیز در اصطکاک بدنه با خاک موثر است.

متراکم می‌کند و آنها را بیشتر مستعد شکستن و خرد شدن می‌کند. همچنین در نفوذ پرتابه‌ها با سرعت‌های مافوق صوت فشارهای بسیار زیادی در نوک پرتابه شکل می‌گیرد و باعث می‌شود که اثر محصورکنندگی دانه‌ها نسبت به حالت شبه استاتیکی کاهش یابد. این مساله باعث می‌شود که دانه‌های بزرگ‌تر خاک نیز تحت نفوذ با سرعت بسیار زیاد خرد شوند.

نقش خواص پرتابه

مهم‌ترین خواص پرتابه که در نفوذ آن به درون خاک موثر هستند علاوه بر سرعت در لحظه برخورد، شامل: مقاومت پرتابه، جرم و شکل آن است. جرم و شکل پرتابه معمولاً با یکدیگر ترکیب می‌شوند و یکی از خواص مهم پرتابه را شکل می‌دهند که همان جرم بر واحد سطح دماغه پرتابه است. نقش عوامل فوق به صورت خلاصه در زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

شکل دماغه پرتابه

با فرض اینکه جرم پرتابه ثابت بماند افزایش قطر پرتابه باعث کاهش عمق نفوذ آن می‌شود. نتایج آزمایش انجام شده توسط یانگ در شکل 5 نشان داده شده است، پرتابه‌های مورد استفاده در این آزمایش دارای نوک تیز منحنی شکل بودند. در برخورد این پرتابه‌ها به هدف هرچه نوک پرتابه تیزتر باشد عمق نفوذ افزایش می‌یابد. مقاومت خاک در مقابل نفوذ پرتابه‌های سرتخت بسیار بیشتر از مقاومت در برابر پرتابه‌های نوک تیز منحنی شکل است. و هرچه نوک پرتابه تیزتر باشد مقاومت خاک کاهش بیشتری خواهد یافت.

پرتابه‌های دارای سرتخت باعث ایجاد جبهه شوک منحنی شکلی می‌شوند که جدا از پرتابه است و در جلوی آن حرکت می‌کند. بورگ و همکارانش [23] دریافتند که نفوذ پرتابه‌های سرتخت درون ماسه، باعث ایجاد کرنش شکننده در دانه‌ها می‌شود در صورتی که با نفوذ پرتابه‌های نوک تیز، پرتابه خاک را کنار می‌زند و تمایل به خرد شدن دانه‌ها کاهش می‌یابد.

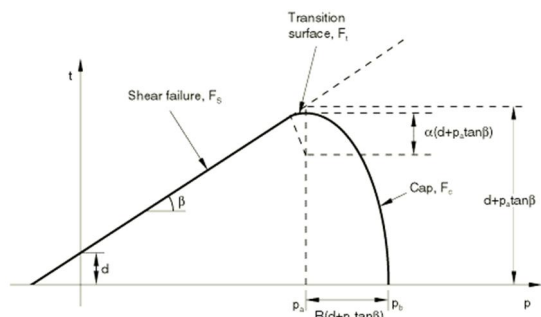
نسبت جرم به سطح مقطع پرتابه

نسبت جرم به سطح مقطع پرتابه با طول آن متناسب است که خود اصلی‌ترین خاصیت بالستیک پرتابه‌های دارای طول است. نرمالیزه کردن عمق نفوذ پرتابه با طول آن در تمام تحقیقات موجود انجام می‌شود.

مختلفی همچون تاریخچه تنش، مسیر تنش، اتساع⁷ و اثر تنش اصلی میانی را در نظر می‌گیرد.

مدل دراگرپراگر اصلاح‌شده به منظور مدل‌سازی مصالح چسبنده به کار می‌رود که یک حالت جاری‌شدن وابسته به فشار را مانند مصالح خاکی و سنگی ارائه می‌دهد. این مدل بر پایه افزایش یک سطح جاری‌شدن بر مدل پلاستیسیته دراگر-پراگر می‌باشد که یک مکانیسم سخت‌شوندگی غیرارتجاعی را جهت منظور نمودن حالت بهم‌فشرده‌گی خمیری تامین می‌کند تا اتساع حجم را در ماده، هنگامی که تحت برش جاری می‌گردد، کنترل نماید.

سطح جاری‌شدن دارای دو قسمت اصلی است. یک قسمت گسیختگی برشی دراگر-پراگر وابسته به فشار و یک قسمت کلاهدک فشاری به صورتی که در شکل 6 نشان داده شده است. قسمت گسیختگی دراگر-پراگر یک سطح جاری‌شدن کاملاً خمیری (بدون سخت‌شوندگی) می‌باشد. جریان خمیری در این قسمت موجب افزایش حجم غیرارتجاعی می‌شود که باعث نرم‌شدگی کلاهدک می‌گردد. در صفحه کلاهدکی، جریان خمیری موجب بهم‌فشرده‌شدن ماده خواهد شد [24].



شکل 6- مدل دراگر-پراگر اصلاح‌شده با کلاهدک فشاری [24]

توصیف مادی و فضایی از تغییرشکل در محیط پیوسته

در تحلیل تغییرشکل‌های یک محیط مادی دو رویکرد وجود دارد: رویکرد مادی (لاگرانژی) و رویکرد فضایی (اویلری). در رویکرد لاگرانژی تغییرشکل محیط نسبت به موقعیت اولیه ذرات بیان می‌شود و در رویکرد اویلری تغییرشکل محیط نسبت به موقعیت تغییرشکل یافته بیان می‌شود.

اگر چه شکل معادلات مومنتم و نحوه بیان تانسور تنش و کرنش در این دو دیدگاه با یکدیگر متفاوت است، اما باید دقت

معرفی مدل‌های رفتاری خاک و بتن در نرم‌افزار ABAQUS

مدل پلاستیک آسیب دیده بتن، مدل توانمندی است که برای بارگذاری‌های مختلف کاربرد داشته و با بیان رفتار مجزای بتن در فشار و کشش رفتار این ماده را به صورت واقعی‌تر بیان می‌کند. در این بخش ابتدا به شرح مفاهیم مورد استفاده در این مدل می‌پردازیم. سپس به معرفی مدل دراگر-پراگر با کلاهدک فشاری برای مصالح خاک خواهیم پرداخت.

مدل پلاستیک آسیب‌دیده بتن

در این مدل با استفاده از مفاهیم الاستیک آسیب‌دیده ایزوتروپیک و پلاستیک کششی و فشاری، رفتار غیرخطی بتن بیان می‌شود. این مدل قابلیت استفاده در محاسبات استاتیکی و دینامیکی را داراست و شامل فرضیات زیر می‌باشد:

1- قابلیت مدل‌سازی بتن در انواع مختلف سیستم‌های سازه‌ای مانند المان تیر، المان خرابایی، المان پوسته و المان سه بعدی
2- قابلیت کاربرد در بتن مسلح و غیر مسلح
3- قابلیت استفاده تحت بارگذاری‌های یکنواخت، نوسانی و دینامیکی

4- در نظر گرفتن حساسیت نمونه به نرخ کرنش

5- در نظر گرفتن تاثیرات بازیابی سختی الاستیک در

بارگذاری‌های دوره‌ای

6- قابلیت استفاده از ویسکوالاستیسیته در معادلات اساسی

برای رسیدن به همگرایی بهتر در بخش نرم‌شوندگی

در این مدل دو مکانیسم اصلی شکست عبارتند از: ترک‌های کششی و خردشدن فشاری بتن

مدل دراگر-پراگر اصلاح‌شده با کلاهدک فشاری

همانند فولاد، مدل مصالح استفاده شده برای خاک نیز، از دو بخش ارتجاعی و خمیری تشکیل می‌شود، که بخش اول ارتجاعی خطی می‌باشد. اما شبیه‌سازی بخش غیرخطی رفتار خاک با استفاده از مدل خمیری دراگر پراگر اصلاح‌شده (کلاهدکی) انجام شده است، که برای آن نیز می‌بایست سطح تسلیم، قانون جریان و قانون سخت‌شدگی را مشخص نماییم.

مدل پلاستیسیته دراگر-پراگر اصلاح‌شده دارای کاربرد وسیعی در نرم‌افزارهای آنالیز اجزاء محدود برای کاربردهای گوناگون در مهندسی ژئوتکنیک است. این مدل دارای قابلیت‌های بالایی در مدل‌سازی رفتار خاک می‌باشد و موارد

تحلیل عددی نفوذ پرتابه BLU-113 با نرم‌افزار ABAQUS

با توجه به هزینه‌های سنگین انجام آزمایشات تجربی و همچنین سختی و زمان‌بر بودن آنها، امروزه استفاده از روش‌های عددی به طور جدی مورد توجه قرار گرفته است، به طوری که طراحی و توسعه تجهیزات نظامی و مطالعات مربوط به محاسبه قدرت تخریب و عمق نفوذ آنها در هدف به صورت عمده با کمک روش‌های عددی صورت می‌پذیرد. بمب GBU28 امروزه به عنوان یکی از مهم‌ترین انواع سلاح‌های سنگرشکن متعارف شناخته می‌شود. مدل‌سازی عددی فرایند نفوذ این بمب در استحکامات دفاعی می‌تواند شناخت مناسبی از تاثیر سلاح‌های سنگرشکن بر سازه‌های دفاعی فراهم آورد و راه را برای بررسی سلاح‌های قدرتمند آینده هموار سازد. در این بخش به بیان نحوه مدل‌سازی فرایند نفوذ کلاهک جنگی BLU-113 تا پیش از انفجار آن در داخل مصالح خاک و بتن و ترکیب این دو پرداخته می‌شود. همانطور که در پیش‌تر بیان شد کلاهک جنگی BLU-113 در بمب سنگرشکن هدایت لیزری GBU28 به کار می‌رود و آن قسمت از بمب است که در عمل به داخل محیط هدف نفوذ می‌کند.

مدل‌سازی بدنه کلاهک جنگی BLU-113

کلاهک جنگی BLU-113 از جنس فولاد آلیاژی مخصوصی با نام صنعتی فولاد اگلین ساخته شده است. ترکیب مواد به کار رفته در این نوع از فولاد و مشخصات هندسی این کلاهک جنگی در جداول 1 و 2 ذکر شده است.

جدول 1- ترکیبات به کار رفته در فولاد اگلین [25]

نوع ماده	c	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	W	v
درصد به کار	0/26	0/65	1	1	2/6	0/42	0/1	0/70

جدول 2- مشخصات کلاهک جنگی BLU-113

طول	3/92 متر
قطر	35/6 سانتی‌متر
وزن	2130 کیلوگرم

در شکل 7 هندسه کلاهک جنگی که در نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی شده، نشان داده شده است. همانطور که در شکل 7 مشاهده می‌شود، به منظور تحلیل اجزاء محدود، پرتابه با تعداد 2028 المان هشت وجهی از نوع C3D8R به

داشت که هر دو دیدگاه قابلیت حل مساله را دارا می‌باشند و جواب نهایی مسائل مکانیک محیط‌های پیوسته در هر دو نگرش یکسان خواهد بود. آنچه باعث می‌شود در تحلیل مسائل با روش‌های عددی یکی از این دو دیدگاه مورد استفاده قرار گیرند، سادگی بیان مساله و قابلیت‌های عددی آنها می‌باشند. این قابلیت‌ها ناشی از نحوه ایجاد شبکه‌بندی اجزاء محدود و چگونگی دنبال کردن تغییرشکل محیط پیوسته توسط هر یک از روش‌ها می‌باشند.

با توجه به توانایی‌ها و نقایص موجود در هر یک از این دو دیدگاه، مشاهده می‌شود که برای تحلیل مسائل مکانیک جامدات با تغییرشکل‌های محدود، دیدگاه لاگرانژی مناسب است. اما تحلیل مسائل مکانیک سیالات با این دیدگاه امکان‌پذیر نخواهد بود. زیرا سیالات در حال جریان تغییرشکل‌های بسیار شدیدی را تجربه می‌کنند، که اگر قرار باشد شبکه‌بندی نیز منطبق با سیال تغییرشکل دهد خیلی زود باعث ایجاد مشکلات عددی در تحلیل خواهد شد. از این روی در دینامیک سیالات محاسباتی همواره دیدگاه اویلری مورد توجه می‌باشد.

به منظور ایجاد قابلیت تحلیل عددی فرآیندهای فوق نرم‌افزارهای پیشرفته تحلیل عددی نظیر ABAQUS، LS-DYNA و AUTODYN امکان تحلیل عددی جامدات را با دیدگاه اویلری فراهم آورده‌اند. نرم‌افزارهای فوق با ایجاد الگوریتم‌های پیشرفته عددی این امکان را به کاربر می‌دهند که با ایجاد تنظیمات بسیار پیشرفته بتواند بخشی از اجسام موجود در تحلیل را با دیدگاه لاگرانژی و بخشی دیگر از آنها را با دیدگاه اویلری شبکه‌بندی نماید. این روش تحلیل به کاربر امکان می‌دهد، اجسامی را که در حین تحلیل دچار تغییرشکل زیاد می‌شوند با دیدگاه اویلری شبکه‌بندی نمایند. در تحلیل فرآیند برخورد بین دو جسم جامد آن جسمی را که انتظار تخریب و تغییرشکل زیاد در آن می‌رود، معمولاً با دیدگاه اویلری شبکه‌بندی می‌کنند.

در نرم‌افزار ABAQUS این قابلیت از طریق تحلیل همزمان اویلر - لاگرانژ فراهم شده است. به اختصار به این نوع تحلیل، مدل‌سازی (CEL) گفته می‌شود. در مدل‌سازی نفوذ بمب کلاهک جنگی BLU-113 در داخل محیط خاک و بتن، که در این بخش ارائه می‌شود، از این نوع مدل‌سازی استفاده شده است.

گمانه‌های برداشت نمونه در محدوده اجرای پروژه و برداشت نمونه‌های دست‌نخورده از عمق‌های مختلف گمانه است، خصوصیات فیزیکی و دانه‌بندی خاک و چگونگی لایه‌بندی آن در عمق محل اجرای پروژه مشخص گردد. سپس با انجام آزمایش‌های برش مستقیم و سه محوری خصوصیات مقاومتی خاک نیز تعیین می‌شود.

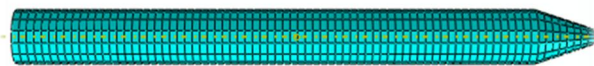
در پروژه‌های تحقیقاتی ژئوتکنیکی مانند پروژه حاضر از آنجا که محل اجرای مشخصی برای سازه مشخص نشده است، لازم است با یک فرض منطقی پارامترهای مقاومتی خاک تعیین شود. این کار با وجود تنوع خاک‌های موجود بسیار مشکل است. با فرض اینکه محل اجرای پروژه دفاعی دامنه‌های جنوبی البرز و به صورت ویژه شهر تهران و منطقه جنوبی این شهر باشد، لازم به ذکر است که خاک این ناحیه ترکیبی از رس و سیلت به همراه مصالح آبرفتی است که در طبقه‌بندی ژئوتکنیکی خاک‌ها از نوع CL خواهد بود. در پروژه حاضر خاک مورد نظر برای شبیه‌سازی نفوذ پرتابه، از نوع CL در نظر گرفته شده است که غلتک خورده و به تراکم حداکثر خود رسیده است. بنابراین با توجه به اینکه خاک مورد نظر عادی تحکیم یافته نیست، خصوصیات رفتاری این خاک از سطح به عمق ثابت فرض می‌شود. از نظر میزان رطوبت نیز خاک فوق خشک فرض می‌شود.

بررسی صحت استفاده از نرم‌افزار ABAQUS در مدلسازی و تحلیل نفوذ بمب‌های سنگرشکن

در این پژوهش برای بررسی دقت و توانایی نرم‌افزار ABAQUS در انجام مدلسازی و تحلیل نفوذ بمب‌های سنگرشکن، نتیجه حاصل از این شبیه‌سازی با نتایج حاصل از مقاله سال 2011 آقای لی تحت عنوان "نفوذ پرتابه سخت و پایداری مسیر" مقایسه گردیده است [26]. همان‌طور که در شکل 34 مشاهده خواهد شد، نمودار تغییرات سرعت پرتابه در مقابل افزایش نفوذ آن ترسیم شده است. در این بخش برای اطمینان از صحت روش شبیه‌سازی به کار رفته، مطابق شکل 8 نمودار نفوذ-سرعت حاصل از این مطالعه و مقاله آقای لی و همکاران در کنار هم درج شده است.

همانگونه که در شکل فوق مشاهده می‌شود، اطلاعات مربوط تغییرات سرعت پرتابه در مقابل افزایش نفوذ آن حاصل از این تحقیق با اطلاعات مرجع مورد اشاره [26] همخوانی

اجزاء کوچک تقسیم شده است. با توجه به اینکه انتظار می‌رود پرتابه بدون بروز تغییر شکل شدید در آن به درون خاک و بتن نفوذ کند شبکه‌بندی فوق با دیدگاه لاگرانژی می‌باشد.



شکل 7- کلاهک جنگی BLU-113 مدل شده در نرم‌افزار ABAQUS

برای شبیه‌سازی رفتار فولاد بدنه پرتابه از مدل رفتاری جانسون-کوک استفاده شده است. رابطه زیر این مدل رفتاری را توصیف می‌کند:

$$\bar{\sigma} = [A + B(\bar{\epsilon}^{pl})^n] \left[1 + C \ln\left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0}\right) \right] (1 - \bar{\theta}^m) \quad (1)$$

در این رابطه $\bar{\sigma}$ ، تنش جاری شدن استاتیکی است. A، m، n، C، B، $\dot{\epsilon}_0$ پارامترهای ماده هستند که بوسیله آزمایش بدست می‌آیند. همچنین $\bar{\epsilon}^{pl}$ و $\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}$ به ترتیب کرنش پلاستیک معادل و نرخ تغییر کرنش پلاستیک معادل با زمان هستند.

$$\bar{\theta} = \begin{cases} 0 & \text{for } \theta < \theta_{transition} \\ \frac{\theta - \theta_{transition}}{\theta_{melt} - \theta_{transition}} & \text{for } \theta_{transition} \leq \theta \leq \theta_{melt} \\ 1 & \text{for } \theta > \theta_{melt} \end{cases} \quad (2)$$

θ_{melt} دمای ذوب ماده و $\theta_{transition}$ دمای موجود در ماده در لحظه تحلیل است.

پارامترهای مدل جانسون-کوک برای فولاد اگلین در جدول 3 ذکر شده است.

جدول 3- پارامترهای مدل جانسون-کوک برای فولاد اگلین [25]

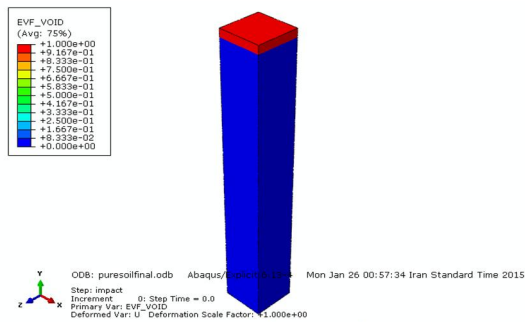
پارامتر مدل	A(MPa)	B(MPa)	C	m	n	θ_{melt} (°C)	$\dot{\epsilon}_0$
مقدار حاصل از آزمایش	1379	1034/2	0/2	1/5	0/33	1720	1

شبیه‌سازی نفوذ کلاهک جنگی BLU-113 در خاک

از آنجا که خاک هر منطقه دارای خصوصیات منحصر به فرد است، شبیه‌سازی‌های عددی آن یکی از چالش‌های اساسی در مهندسی ژئوتکنیک محسوب می‌شود. به منظور شبیه‌سازی عددی مناسب برای خاک لازم است ابتدا محل ساخت سازه مشخص گردد و با انجام آزمایش‌های ژئوتکنیکی که شامل حفر

از آنجا که لازم است جابه‌جایی مواد روی سطح خاک پس از برخورد نشان داده شود، محدوده اوپلری شبیه‌سازی شده 1 متر بالاتر از سطح خاک را هم در بر می‌گیرد. ناحیه قرمز رنگ در شکل 9 این فضای خالی را نشان می‌دهد

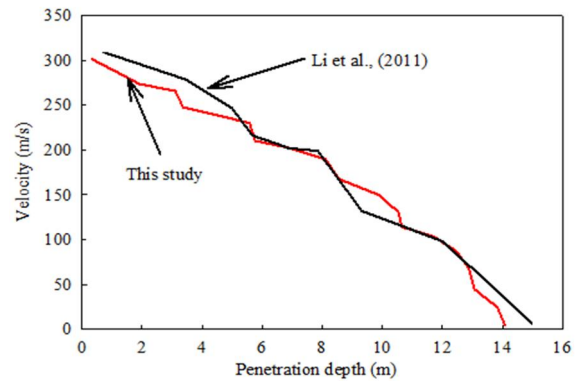
از آنجا که دقت تحلیل اجزاء محدود وابسته به ابعاد شبکه‌بندی است. به منظور ایجاد دقت مناسب در تحلیل لازم است ناحیه ورود پرتابه به خاک با المان‌های ریزتر مدل‌سازی شود. به این منظور در ناحیه‌ای مربع شکل به ابعاد 1 متر در محل ورود پرتابه به خاک از المان‌های مکعبی منتظم با ابعاد 5 سانتی‌متر استفاده شده است. در خارج از این ناحیه المان‌های مورد استفاده درشت‌تر هستند و طول ضلع آنها 25 سانتی‌متر می‌باشد. در راستای عمق خاک ابعاد المان‌ها ثابت و برابر 5 سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. جزئیات المان‌بندی در سطح خاک، در شکل 9 نشان داده شده است.



شکل 9- شکل‌های بالا و پایین به ترتیب محدوده خاک مدل‌سازی شده با دیدگاه اوپلری و نحوه المان‌بندی خاک در سطح فوقانی

در مورد یک محیط نیمه بی‌نهایت خاک، لازم است مرزهای محیط از نوع غیرانعکاسی تعریف شوند. در این حالت نرم‌افزار با قراردادن المان‌های نیمه بی‌نهایت در اطراف مدل، امواج تنش را به شکل مناسبی به سمت بی‌نهایت دور از مدل هدایت کرده و از بازتاب آنها به داخل مدل جلوگیری می‌کند.

کامل دارد، بنابراین مدل‌سازی انجام شده در این مقاله و تحلیل حاصل از نرم‌افزار کاملاً درست بوده و از صحت لازم برخوردار می‌باشد.



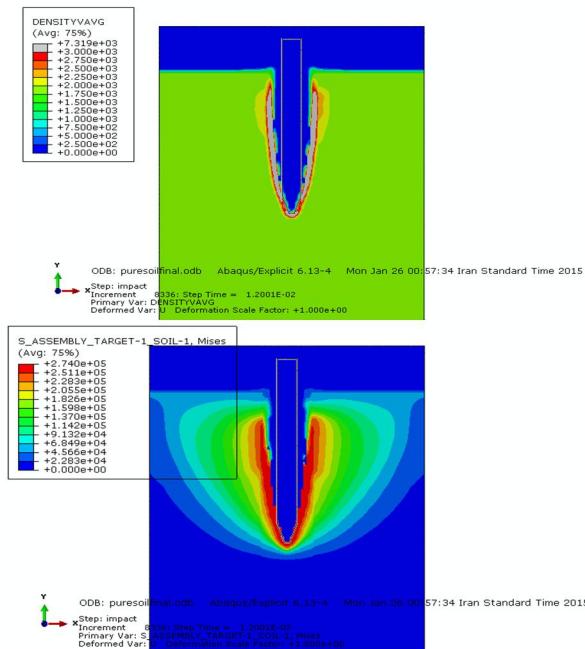
شکل 8- نمودار تغییرات سرعت پرتابه در هنگام نفوذ حاصل از این مطالعه و مطالعه لی و همکاران

مدل‌سازی و اعمال شرایط مرزی

برای مدل‌سازی رفتار خاک در نرم‌افزار ABAQUS از مدل دراگر-پراگر اصلاح‌شده با کلا‌هک فشاری استفاده شده است. جزئیات مدل رفتاری مذکور مورد اشاره قرار گرفته است. از آنجا که در هنگام برخورد پرتابه به خاک تغییرشکل‌های شدیدی در محل برخورد اتفاق می‌افتد، لازم است بدنه خاک طوری مدل‌سازی شود که قابلیت ایجاد تغییرشکل‌های بزرگ در آن موجود باشد، بنابراین استفاده از دیدگاه اوپلری برای این شبیه‌سازی مناسب خواهد بود. با توجه به اینکه بدنه کلا‌هک جنگی با دیدگاه لاگرانژی مدل‌سازی شده است، برای شبیه‌سازی عددی فرآیند نفوذ این کلا‌هک در خاک که با دیدگاه اوپلری مدل‌سازی می‌شود، باید از قابلیت تحلیل همزمان اوپلر- لاگرانژ در نرم‌افزار ABAQUS استفاده گردد.

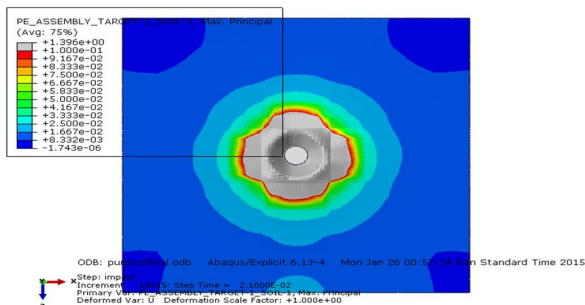
برای مدل‌سازی، خاک بخشی از یک محیط نیمه بی‌نهایت در نظر گرفته شده است. هندسه این ناحیه در سطح شامل یک مربع به اضلاع 5 متر است که تا عمق 35 متری از سطح خاک امتداد یافته است. بنابراین یک حجم مکعب شکل حاصل خواهد شد. این محدوده با تعداد 930 هزار المان حجمی هشت‌گانه‌ای با دیدگاه اوپلری از نوع EC3D8R شبکه‌بندی شده است.

ورود پرتابه به خاک باعث فشردن آن در اطراف محل نفوذ می‌شود. نحوه توزیع تنش در خاک و تغییرات چگالی در اطراف محل نفوذ در شکل 11 مشاهده می‌شود.



شکل 11- شکل‌های بالا و پایین به ترتیب تغییرات چگالی محیط خاک و توزیع تنش در محیط خاک در لحظه ورود پرتابه

پس از ورود پرتابه به خاک در سطح خاک تخریب گسترده‌ای اتفاق می‌افتد. در شکل 12 نواحی دارای کرنش پلاستیک بیش از 10 درصد دارای تخریب زیاد تلقی می‌شوند و در واقع حفره ورودی پرتابه را مشخص می‌کنند.



شکل 12- توزیع کرنش پلاستیک در محیط خاک پس از ورود پرتابه

در شکل 13 تغییرات چگالی محیط خاک در هنگام نفوذ پرتابه در عمق‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که

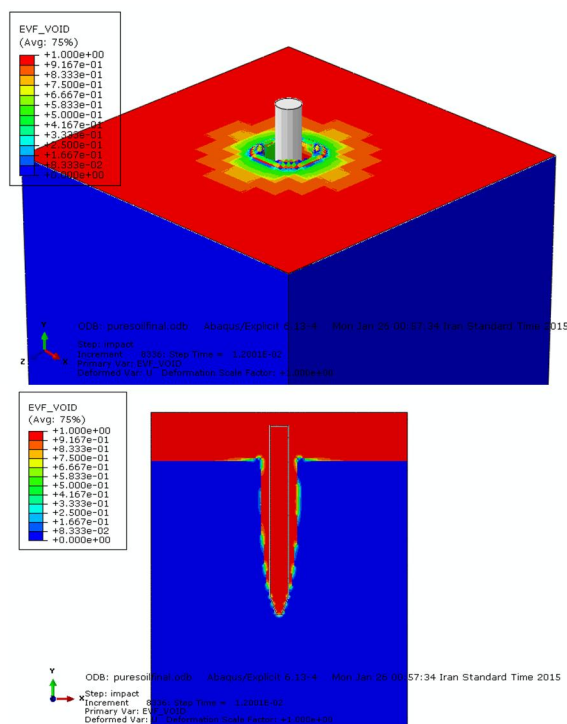
این مساله باعث می‌شود که خاک مدل‌سازی شده، به درستی بخشی از یک محیط نیمه بی‌نهایت را نشان دهد.

در مورد پرتابه نیز لازم است شرایط مرزی طوری اعمال شود که در لحظه ورود آن به خاک سرعتی معادل 305 متر بر ثانیه داشته باشد. این سرعت برابر سرعت واقعی ورود بمب GBU28 به هدف است.

نتایج شبیه‌سازی عددی نفوذ پرتابه در خاک

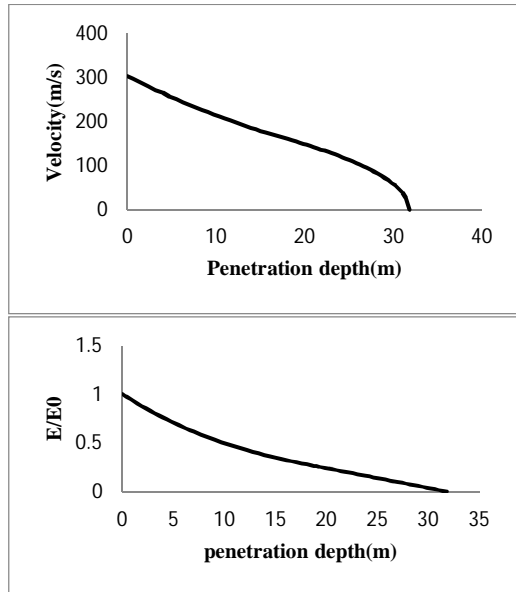
پس از انجام تحلیل به روش دینامیکی صریح، نتایج حاصل از نفوذ پرتابه در خاک حاصل گردید که در این بخش به آن اشاره می‌شود.

در شکل 10 پرتابه در لحظه ورود به خاک نشان داده شده است. جابه‌جایی خاک در سطح آن پس از نفوذ پرتابه به میزان 3/1 متر در خاک در شکل ملاحظه می‌شود. مقطع خاک در لحظه ورود پرتابه در شکل 10 نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌شود ورود پرتابه به خاک باعث جابه‌جایی خاک در فضای اطراف منطقه نفوذ می‌شود.



شکل 10- شکل‌های بالا و پایین به ترتیب لحظه ورود پرتابه به خاک و مقطع نفوذ پرتابه در لحظه ورود به خاک

منحنی سرعت-نفوذ پرتابه و منحنی تغییرات انرژی جنبشی پرتابه در حین نفوذ در شکل 15 نشان داده شده است.

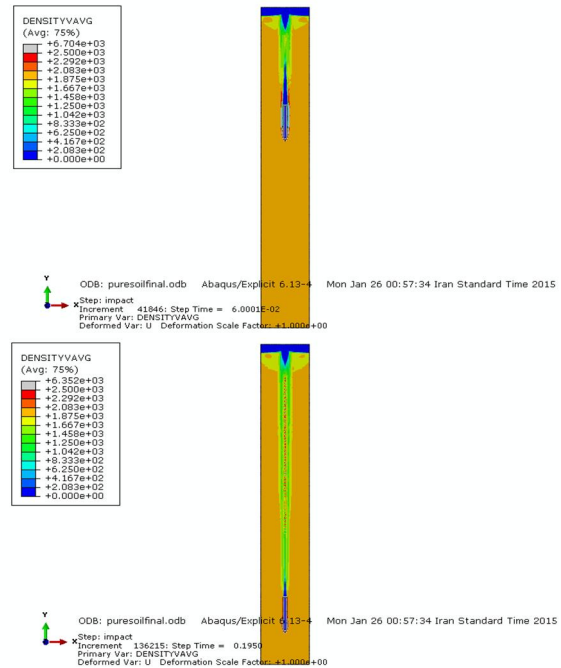


شکل 15- شکل‌های بالا و پایین به ترتیب منحنی تغییرات سرعت و انرژی جنبشی پرتابه نسبت به عمق نفوذ

شبیه‌سازی نفوذ کلاهک جنگی BLU-113 در بتن

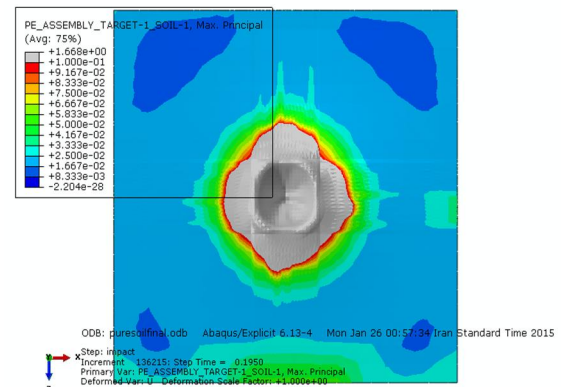
بتن یکی از مصالح مناسب برای ساخت استحکامات دفاعی است و به شکل مناسبی می‌تواند در مقابل نفوذ پرتابه‌ها و ترکش مقاومت نماید. همچنین این مصالح ساختمانی برای مقابله با امواج فشاری حاصل از انفجار نیز گزینه مناسبی محسوب می‌شود. لذا به منظور شناخت و سنجش اثرات تخریبی یک سلاح لازم است اثر تخریبی حاصل از آن روی بتن نیز مورد ارزیابی قرار گیرد. در این بخش شبیه‌سازی نفوذ کلاهک BLU-113 در بتن مورد اشاره قرار می‌گیرد. از آنجا که اثر تخریبی سلاح مورد اشاره بر رده‌های مختلف مقاومتی بتن متفاوت است، با در نظر گرفتن امکانات اجرایی، رده مقاومتی C30 برای سنجش نفوذ سلاح انتخاب شده است. مقاومت فشاری بتن برای این رده مقاومتی 30 مگا پاسکال است. از آنجا که نفوذ سلاح در هدف از طریق سوراخ کردن آن صورت می‌گیرد، وجود آرماتورها اثر چندانی بر جلوگیری از نفوذ سلاح ندارد. آرماتورها در دال‌های بتنی به منظور ایجاد مقاومت خمشی تعبیه می‌شوند، اما مکانیسم نفوذ سلاح مورد نظر، پانچ نمودن بتن است که در عمل کاملاً با مقاومت برشی آن در ارتباط است. لذا به نظر می‌رسد جلوگیری از نفوذ این

مشاهده می‌شود پس از عبور پرتابه خاک به حفره نفوذ باز می‌گردد.



شکل 13- شکل‌های بالا و پایین به ترتیب تغییرات چگالی محیط خاک پس از 15 متر نفوذ پرتابه در آن و تغییرات چگالی محیط خاک پس از 31/8 متر نفوذ و توقف پرتابه

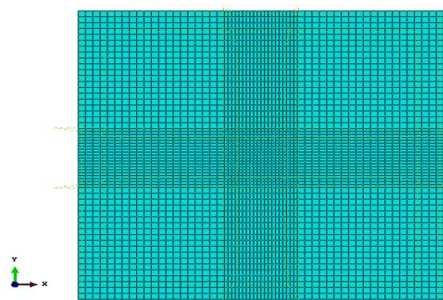
در شکل 14 می‌توان مشاهده نمود که پس از اتمام نفوذ پرتابه در خاک و توقف آن در عمق 31/8 متری، در سطح خاک حفره‌ای به عمق 1/5 متر باقی می‌ماند. همچنین می‌توانید ابعاد خرابی ایجاد شده در سطح خاک در انتهای فرآیند نفوذ را مشاهده نمایید.



شکل 14- توزیع کرنش پلاستیک در سطح خاک پس از پایان فرآیند نفوذ

همچنین از نظر تئوری لازم نیست پارامتر خسارت بتن در فشار بیش از 0/67 تعریف شود.

با توجه به اینکه پس از برخورد پرتابه تغییر شکل‌های شدیدی در هدف بتنی رخ می‌دهد. برای مدل‌سازی ناحیه بتنی از دیدگاه اویلری استفاده شده است. برای شبکه‌بندی مناسب که به طور همزمان دقت تحلیل و حجم محاسبات در آن رعایت شده باشد، ناحیه ورود پرتابه به ابعاد 1 متر با مربع‌هایی به ضلع 5 سانتی‌متر و بقیه رویه بتن با مربع‌هایی به ضلع 10 سانتی‌متر شبکه‌بندی شده است. در راستای عمق بتن ابعاد المان‌ها 5 سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. جزئیات المان‌بندی در شکل 17 نشان داده شده است. همچنین برای جلوگیری از خروج ماده از شبکه‌بندی اویلری بخشی از رو و زیر ناحیه بتنی نیز شبکه‌بندی شده است.



شکل 17- نحوه المان‌بندی بتن در سطح فوقانی

در چهار طرف جانبی قطعه بتنی مرزهایی از نوع غیرانعکاسی تعریف شده است. این مساله باعث می‌شود که قطعه مورد نظر بخشی از یک لایه پیوسته از چهار طرف به حساب آید.

طی آزمایش‌های انجام شده روی نفوذ کلاهک جنگ BLU-113 در اهداف بتنی مشاهده شده است که این کلاهک در اهدافی با ضخامت 6/7 متر نفوذ می‌کنند. برای سنجش صحت این ادعا در این بخش قطعات بتنی با ضخامت‌های 4، 5، 6 و 7 متر مدل‌سازی شده‌اند و مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. نتایج این مدل‌سازی‌های عددی در ادامه ذکر می‌شوند.

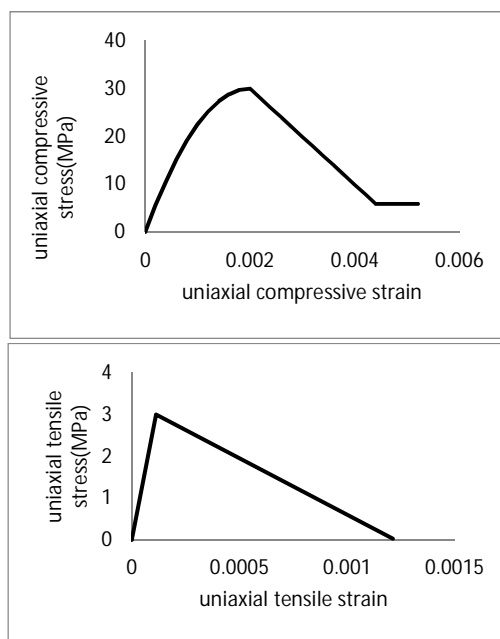
نتایج شبیه‌سازی عددی نفوذ پرتابه در لایه بتنی به ضخامت 4 متر

لایه بتنی به ضخامت 4 متر مدل‌سازی شده است. هندسه این ناحیه در سطح شامل یک مربع به اضلاع 5 متر است که تا

سلاح در بتن فقط از طریق افزایش ضخامت دال بتنی ممکن خواهد بود و تعبیه میلگرد در دال بدون اثر است.

مدل‌سازی و اعمال شرایط مرزی

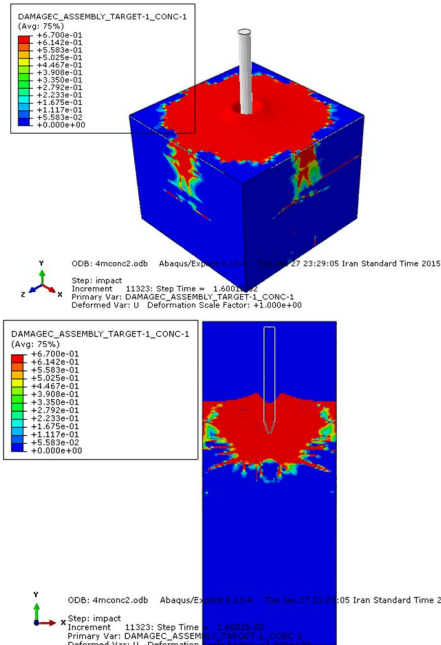
برای مدل‌سازی رفتار بتن در نرم‌افزار ABAQUS از مدل پلاستیک آسیب‌دیده بتن استفاده می‌شود. همچنین برای تعریف رفتار بتن در نرم‌افزار نیاز است که رفتار تنش-کرنش تک محوری آن در حالت فشاری و کششی بطور جداگانه تعریف شود. از این رو در شکل 16 نمودار تنش-کرنش فشاری و نیز نمودار تنش-کرنش کششی تک محوره برای بتن نشان داده شده است. تنش حداکثر کششی تک محوره بتن را می‌توان در حدود 10 درصد تنش حداکثر فشاری تک محوره آن در نظر گرفت. همچنین برای جلوگیری از مشکلات عددی در هنگام شبیه‌سازی فرآیند نفوذ، 1 درصد مقاومت کششی تک محوره بتن به صورت ماندگار فرض شده است.



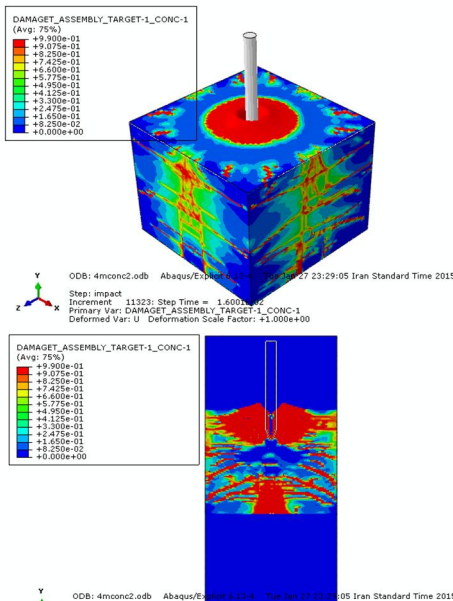
شکل 16- شکل‌های بالا و پایین به ترتیب نمودار تنش-کرنش تک محوره فشاری و کششی بتن

برای کامل‌شدن تعریف رفتار بتن لازم است پارامترهای آسیب نیز در حالت فشاری و کششی به صورت جداگانه برای نرم‌افزار تعریف شود. لازم است به این نکته توجه شود که پارامتر خسارت برای بتن در کشش نباید بیشتر از 0/99 باشد زیرا در هنگام تحلیل باعث بروز پیام خطا خواهد شد.

شکل 20 نیز وضعیت آسیب‌دیده قطعه را تحت اثر کشش در لحظه ایجاد ناپایداری نشان می‌دهند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با تشکیل گوه‌های گسیختگی، قطعه به صورت کامل متلاشی شده است.



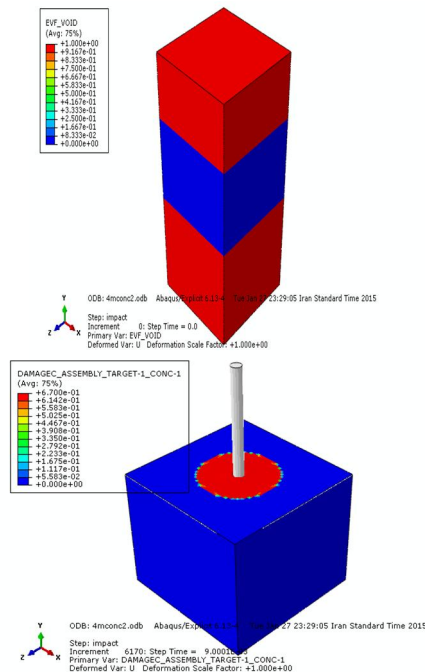
شکل 19- شکل‌های بالا و پایین به ترتیب میزان و مقطع تخریب فشاری در لحظه ناپایداری کلی قطعه 4 متری



شکل 20- شکل‌های بالا و پایین به ترتیب میزان و مقطع تخریب کششی در لحظه ناپایداری کلی قطعه 4 متری

عمق 4 متری در عمق امتداد یافته است. بنابراین یک مکعب شکل حاصل خواهد شد. این ناحیه از چهار وجه جانبی خود تا بی‌نهایت ادامه دارد. به منظور جلوگیری از خروج ماده از شبکه‌بندی اوپلری پایین و بالای قطعه بتنی فضای خالی در نظر گرفته شده است. این محدوده با تعداد 866 هزار المان حجمی هشت گره‌ای با دیدگاه اوپلری از نوع EC3D8R شبکه‌بندی شده است. در شکل 18 ناحیه آبی رنگ قطعه بتنی و نواحی قرمز رنگ در بالا و پایین قطعه بتنی فضای خالی هستند.

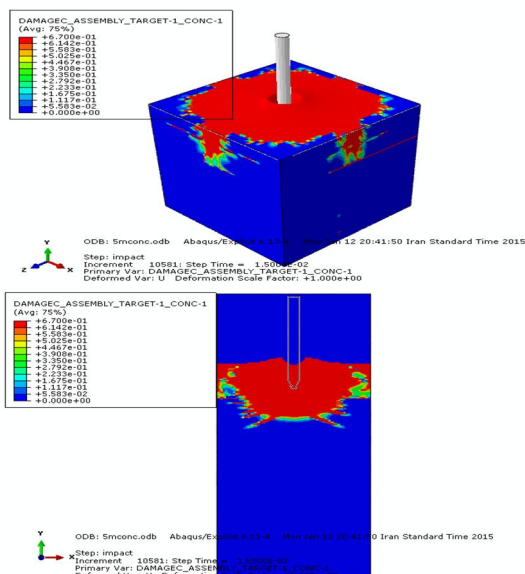
پس از برخورد پرتابه به لایه بتنی تحلیل اجزاء محدود تا رسیدن پرتابه به عمق 1/13 متری از سطح بتن ادامه پیدا می‌کند. پس از این مرحله به علت تخریب بیش از اندازه قطعه بتنی تحلیل متوقف می‌شود. شکل 18 ناحیه تخریب شده تحت اثر فشار را در لحظه برخورد پرتابه به هدف را نشان می‌دهد.



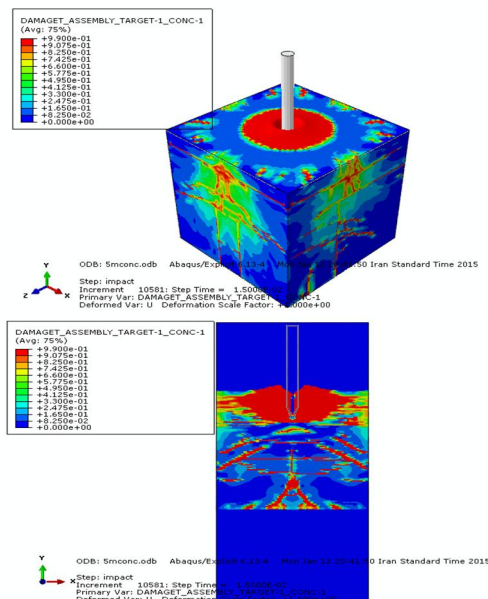
شکل 18- شکل‌های بالا و پایین به ترتیب محدوده بتنی به ضخامت 4 متر، مدل‌سازی شده با دیدگاه اوپلری و میزان تخریب فشاری قطعه 4 متری بلافاصله پس از برخورد پرتابه به سطح آن

پس از نفوذ پرتابه به میزان 1/13 متر در قطعه بتنی، کل قطعه دچار آسیب شدید کششی و فشاری می‌شود به طوری که پایداری آن کاملاً از بین می‌رود. شکل 19 میزان تخریب فشاری قطعه بتنی و مقطع قطعه را در وضعیت آسیب‌دیده فشاری در لحظه ناپایداری فشاری نشان می‌دهد.

پس از نفوذ پرتابه به میزان 1/04 متر در قطعه بتنی، کل قطعه دچار آسیب شدید کششی و فشاری می‌شود به طوری که پایداری آن کاملاً از بین می‌رود. شکل 22 میزان تخریب فشاری قطعه بتنی و همچنین مقطع قطعه را در وضعیت آسیب‌دیده فشاری در لحظه ناپایداری فشاری نشان می‌دهد. شکل 23 نیز وضعی آسیب‌دیده قطعه را تحت اثر کشش در لحظه ایجاد ناپایداری نشان می‌دهند.



شکل 22- شکل‌های بالا و پایین به ترتیب میزان و مقطع تخریب فشاری در لحظه ناپایداری کلی قطعه 5 متری

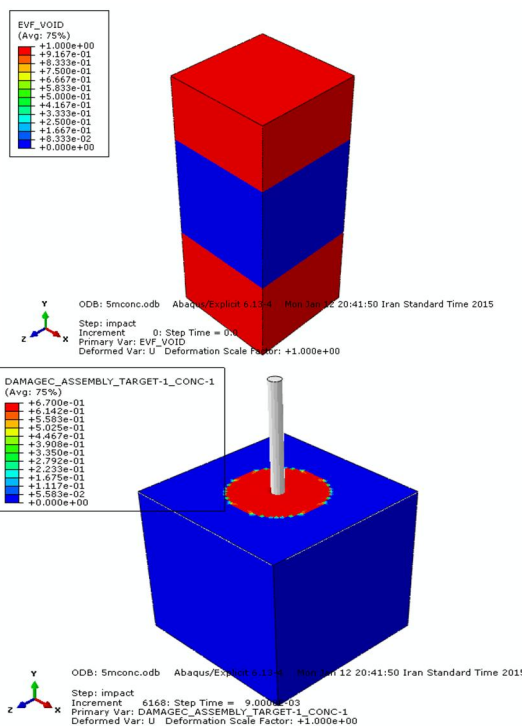


شکل 23- شکل‌های بالا و پایین به ترتیب میزان و مقطع تخریب کششی در لحظه ناپایداری کلی قطعه 5 متری

نتایج شبیه‌سازی عددی نفوذ پرتابه در لایه بتنی به ضخامت 5 متر

لایه بتنی به ضخامت 5 متر مطابق شکل 21 مدل‌سازی شده است. هندسه این ناحیه در سطح شامل یک مربع به اضلاع 5 متر است که تا عمق 5 متری در عمق امتداد یافته است. بنابراین یک حجم مکعب شکل حاصل خواهد شد. این ناحیه از چهار وجه جانبی خود تا بی‌نهایت ادامه دارد. به منظور جلوگیری از خروج ماده از شبکه‌بندی اولیه پایین و بالای قطعه بتنی فضای خالی در نظر گرفته شده است. این محدوده با تعداد 866 هزار المان حجمی هشت گره‌ای با دیدگاه اولیه از نوع EC3D8R شبکه‌بندی شده است. در شکل ناحیه آبی رنگ قطعه بتنی و نواحی قرمز رنگ در بالا و پایین قطعه بتنی فضای خالی هستند.

پس از برخورد پرتابه به لایه بتنی تحلیل اجزاء محدود تا رسیدن پرتابه به عمق 1/04 متری از سطح بتن ادامه پیدا می‌کند. پس از این مرحله به علت تخریب بیش از اندازه قطعه بتنی تحلیل متوقف می‌شود. شکل 21 ناحیه تخریب‌شده تحت اثر فشار را در لحظه برخورد پرتابه به هدف را نشان می‌دهد.



شکل 21- شکل‌های بالا و پایین به ترتیب محدوده بتنی به ضخامت 5 متر، مدل‌سازی شده با دیدگاه اولیه و میزان تخریب فشاری قطعه 5 متری بلافاصله پس از برخورد پرتابه به سطح آن

همان‌طور که ملاحظه می‌شود با تشکیل گوه‌های گسیختگی، قطعه به صورت کامل متلاشی شده است.

نتایج شبیه‌سازی عددی نفوذ پرتابه در لایه بتنی به ضخامت 6 متر

لایه بتنی به ضخامت 6 متر مطابق شکل 24 مدل‌سازی شده است. هندسه این ناحیه در سطح شامل یک مربع به اضلاع 5 متر است که تا عمق 6 متری در عمق امتداد یافته است. بنابراین یک حجم مکعب شکل حاصل خواهد شد. این ناحیه از چهار وجه جانبی خود تا بی‌نهایت ادامه دارد. به منظور جلوگیری از خروج ماده از شبکه‌بندی اولیه پایین و بالای قطعه بتنی فضای خالی در نظر گرفته شده است. این محدوده با تعداد 866 هزار المان حجمی هشت گره‌ای با دیدگاه اولیه از نوع EC3D8R شبکه‌بندی شده است. در شکل ناحیه آبی رنگ قطعه بتنی و نواحی قرمز رنگ در بالا و پایین قطعه بتنی فضای خالی هستند.

پس از برخورد پرتابه به لایه بتنی تحلیل اجزاء محدود تا رسیدن پرتابه به عمق 1/28 متری از سطح بتن ادامه پیدا می‌کند. پس از این مرحله به علت تخریب بیش از اندازه قطعه بتنی تحلیل متوقف می‌شود. شکل 24 ناحیه تخریب شده تحت اثر فشار را در لحظه برخورد پرتابه به هدف را نشان می‌دهد.

پس از نفوذ پرتابه به میزان 1/28 متر در قطعه بتنی، کل قطعه دچار آسیب شدید کششی و فشاری می‌شود به طوری که پایداری آن کاملاً از بین می‌رود. شکل 25 میزان تخریب فشاری قطعه بتنی و همچنین مقطع قطعه را در وضعیت آسیب دیده فشاری در لحظه ناپایداری فشاری نشان می‌دهد.

شکل 26 نیز وضعیت آسیب‌دیده قطعه را تحت اثر کشش در لحظه ایجاد ناپایداری نشان می‌دهند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با تشکیل گوه‌های گسیختگی، قطعه به صورت کامل متلاشی شده است.

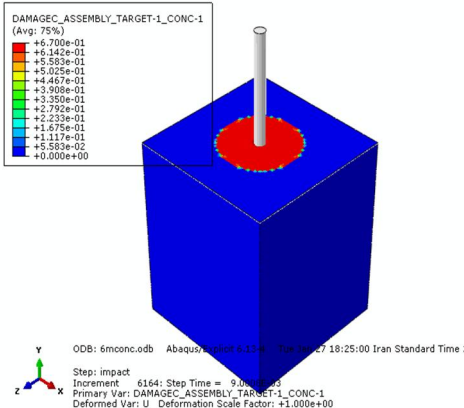
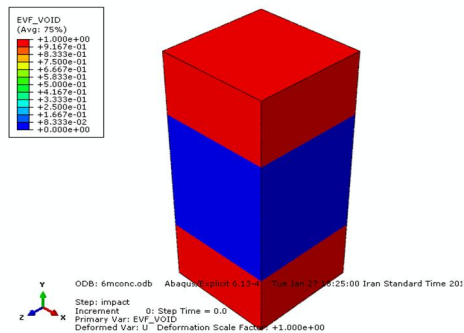
نتایج شبیه‌سازی عددی نفوذ پرتابه در لایه بتنی به ضخامت 7 متر

لایه بتنی به ضخامت 7 متر مطابق شکل 27 مدل‌سازی شده است. هندسه این ناحیه در سطح شامل یک مربع به اضلاع 5 متر است که تا عمق 7 متری در عمق امتداد یافته است. بنابراین یک حجم مکعب شکل حاصل خواهد شد. این

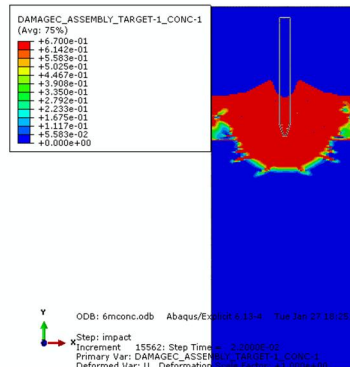
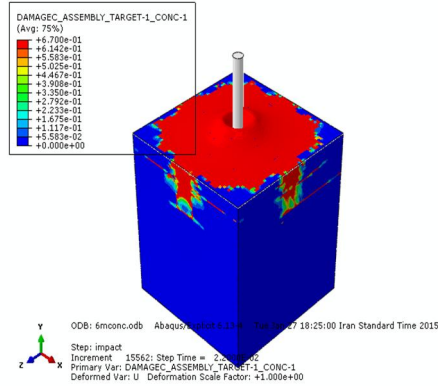
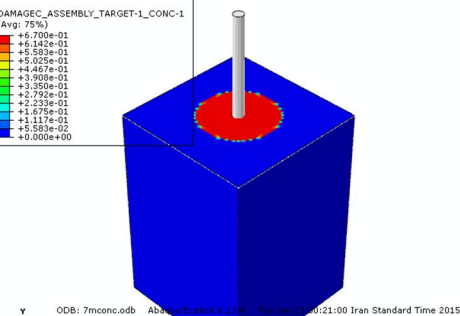
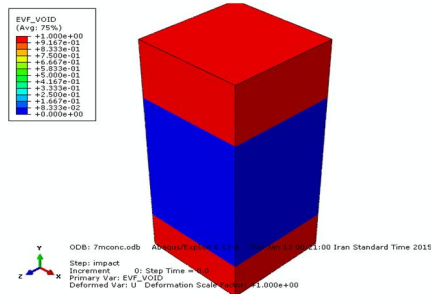
ناحیه از چهار وجه جانبی خود تا بی‌نهایت ادامه دارد. به منظور جلوگیری از خروج ماده از شبکه‌بندی اولیه پایین و بالای قطعه بتنی فضای خالی در نظر گرفته شده است. این محدوده با تعداد 866 هزار المان حجمی هشت گره‌ای با دیدگاه اولیه از نوع EC3D8R شبکه‌بندی شده است. در شکل ناحیه آبی-رنگ قطعه بتنی و نواحی قرمز رنگ در بالا و پایین قطعه بتنی فضای خالی هستند.

پس از برخورد پرتابه به لایه بتنی تحلیل اجزاء محدود تا رسیدن پرتابه به عمق 1/29 متری از سطح بتن ادامه پیدا می‌کند و سرعت پرتابه به صفر رسیده و متوقف می‌شود. شکل 27 ناحیه تخریب شده تحت اثر فشار را در لحظه برخورد پرتابه به هدف را نشان می‌دهد.

پس از نفوذ پرتابه به میزان 1/29 متر در قطعه بتنی، ناحیه‌ای به عمق تقریبی 3 متر از سطح فوقانی قطعه دچار آسیب فراوان می‌شود، اما ناحیه زیرین قطعه تقریباً بدون آسیب باقی می‌ماند. شکل 28 میزان تخریب فشاری قطعه بتنی و مقطع قطعه را در وضعیت آسیب‌دیده فشاری در هنگام توقف پرتابه نشان می‌دهد.

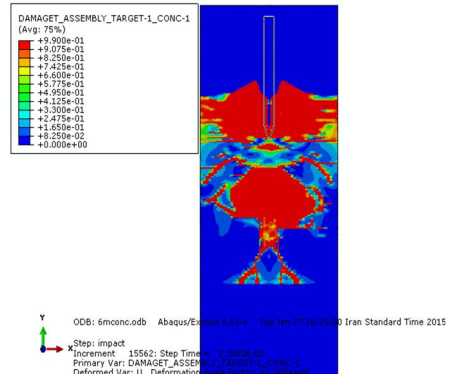
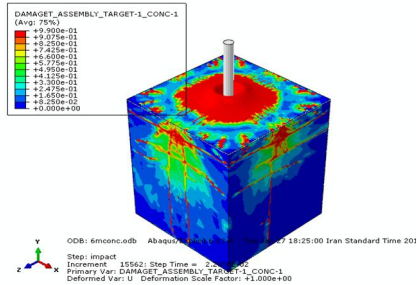
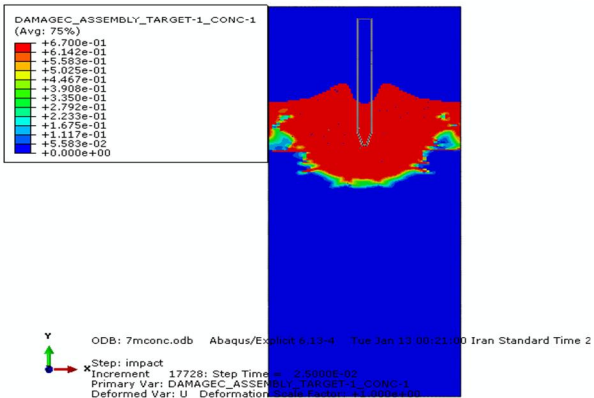
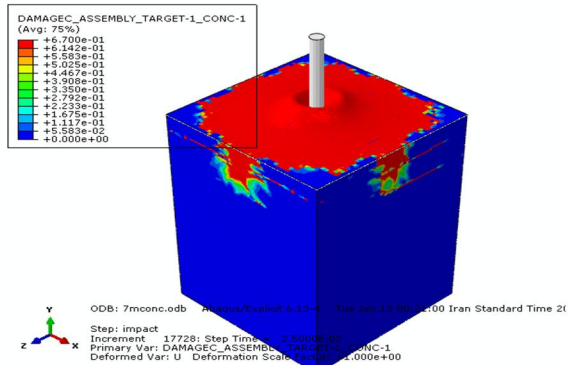


شکل 24- شکل‌های بالا و پایین به ترتیب محدوده بتنی به ضخامت 6 متر، مدل‌سازی شده با دیدگاه اولیه و میزان تخریب فشاری قطعه 6 متری بلافاصله پس از برخورد پرتابه به سطح آن



شکل 27- شکل‌های بالا و پایین به ترتیب محدوده بتنی به ضخامت 7 متر، مدل‌سازی شده با دیدگاه اولری و میزان تخریب فشاری قطعه 7 متری بلافاصله پس از برخورد پرتابه به سطح آن

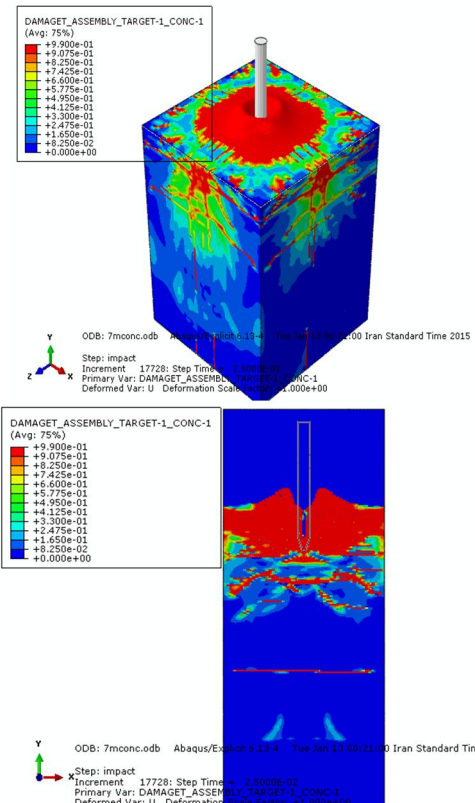
شکل 25- شکل‌های بالا و پایین به ترتیب میزان تخریب و مقطع تخریب فشاری در لحظه ناپایداری کلی قطعه 6 متری



شکل 28- شکل‌های بالا و پایین به ترتیب میزان و مقطع تخریب فشاری در لحظه ناپایداری کلی قطعه 7 متری

شکل 26- شکل‌های بالا و پایین به ترتیب میزان تخریب کششی و مقطع تخریب کششی در لحظه ناپایداری کلی قطعه 6 متری

شکل 29 نیز وضعیت آسیب‌دیده قطعه را تحت اثر کشش در هنگام توقف پرتابه نشان می‌دهند. چنان‌که در شکل می‌توان مشاهده نمود ناحیه زیرین قطعه تقریباً بدون آسیب است. مانند قطعات 4، 5 و 6 متری آسیب‌دیدگی فشاری در این قطعه نیز شدید است اما آسیب‌دیدگی کششی قابل ملاحظه‌ای وجود ندارد.



شکل 29- شکل‌های بالا و پایین به ترتیب میزان و مقطع تخریب کششی در لحظه ناپایداری کلی قطعه 7 متری

با مرور نتایج شبیه‌سازی عددی نفوذ پرتابه در خاک می‌توان مشاهده نمود که میزان جذب انرژی توسط خاک به ازاء هر متر پیشروی پرتابه در آن ناچیز است. از این رو قرار دادن لایه‌های ضخیم خاک بین لایه‌های بتنی از نظر جذب انرژی به صرفه نمی‌باشد. از سوی دیگر ساخت لایه‌های بتنی با ضخامت بین 50 تا 70 سانتی‌متر از نظر اجرایی قابل قبول می‌باشد. بنابراین در این بخش به منظور رعایت محدودیتهای اجرایی لایه‌های خاک به ضخامت 2 متر و لایه‌های بتن به ضخامت 50 سانتی‌متر مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

مدل‌سازی و اعمال شرایط مرزی

برای مدل‌سازی رفتار خاک در نرم‌افزار ABAQUS مدل دراکر-پراگر اصلاح‌شده با کلاهدک فشاری استفاده شده است. جزئیات مدل رفتاری مذکور تفصیل مورد اشاره قرار گرفته است. همچنین برای مدل‌سازی رفتار بتن نیز از مدل پلاستیک آسیب‌دیده بتن استفاده می‌شود.

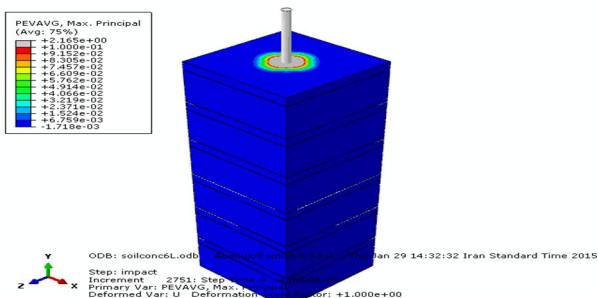
از آنجا که در هنگام برخورد پرتابه به لایه‌های خاک و بتن تغییرشکل‌های شدیدی در محل برخورد اتفاق می‌افتد، لازم است هدف طوری مدل‌سازی شود که قابلیت ایجاد تغییرشکل‌های بزرگ در آن موجود باشد. با توجه به نکاتی که ذکر گردید، استفاده از دیدگاه اوپلری برای این شبیه‌سازی مناسب خواهد بود با توجه به اینکه بدنه کلاهدک جنگی با دیدگاه لاگرانژی مدل‌سازی شده است، برای شبیه‌سازی عددی فرآیند نفوذ این کلاهدک در خاک که با دیدگاه اوپلری مدل‌سازی می‌شود، باید از قابلیت تحلیل همزمان اوپلر- لاگرانژ در نرم‌افزار ABAQUS استفاده گردد.

برای مدل‌سازی لایه‌های خاک و بتن این لایه‌ها به عنوان بخشی از یک محیط نیمه بی‌نهایت لایه‌بندی شده در نظر گرفته شده است. بنابراین مرزهای این مدل از نوع غیرانعکاسی در 5 وجه تعریف شده است. هندسه این ناحیه در سطح شامل یک مربع به اضلاع 5 متر است که تا عمق 15 متری از سطح امتداد یافته است. بنابراین یک حجم مکعب شکل حاصل خواهد شد. این محدوده با تعداد 480 هزار المان حجمی هشت گره‌ای با دیدگاه اوپلری از نوع EC3D8R شبکه‌بندی شده است. نحوه شبکه‌بندی هدف در سطح برخورد پرتابه در شکل 30 مشاهده می‌شود. در محل برخورد پرتابه المان‌های مربع‌شکل به اضلاع 5 سانتی‌متر و در بقیه شبکه، المان‌های مربع‌شکل به ابعاد 20

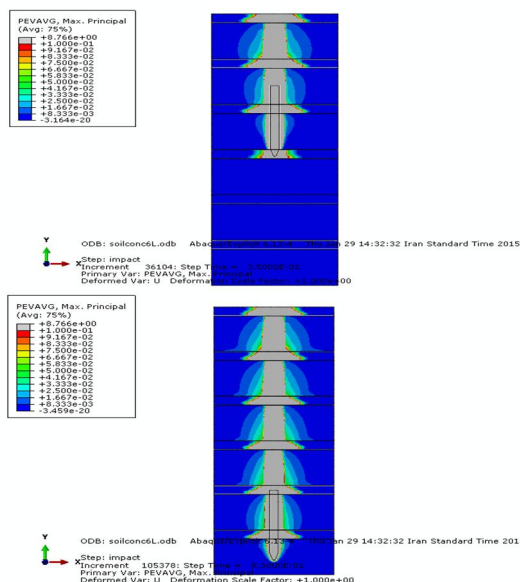
جلوگیری از نفوذ پرتابه به وسیله تقویت خاک با لایه‌های بتن

توان‌مندی بتن برای جلوگیری از نفوذ پرتابه مورد بررسی قرار گرفت. همچنین نفوذ کلاهدک جنگی BLU-113 در خاک رسی خشک از جنس CL به میزان 31/8 متر محاسبه گردید. در این بخش با قرار دادن لایه‌های بتنی در پروفیل خاک به بررسی امکان مقاوم نمودن آن با لایه‌های بتنی، مورد بررسی قرار می‌گیرد. مقاوم‌سازی خاک در برابر نفوذ پرتابه راه را برای ساخت استحکامات دفاعی در عمق کمتر هموار می‌سازد.

همانطور که می‌توان ملاحظه نمود تخریب ایجاد شده در لایه‌های بتنی از نوع تخریب پانچ و برشی است.



شکل 31- تخریب بتن لایه اول هنگام ورود پرتابه به مجموعه خاک- بتن

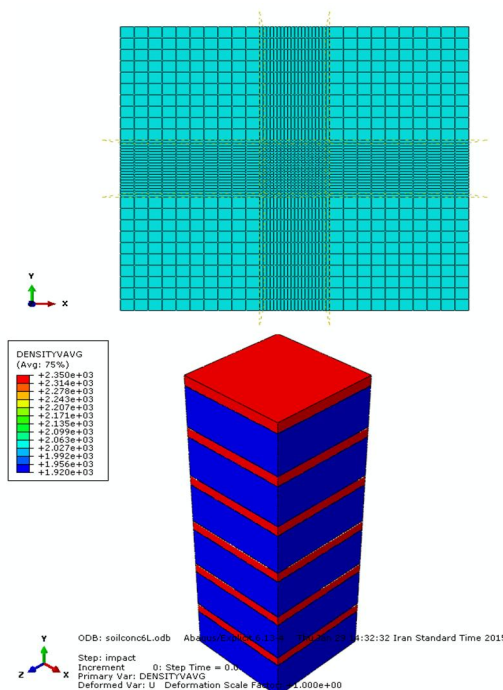


شکل 32- شکل‌های بالا و پایین به ترتیب تخریب مجموعه خاک- بتن پس از عبور پرتابه و رسیدن به عمق 7 متری سطح و رسیدن به عمق 14/18 متری سطح

نحوه حذف و جابه‌جایی مواد در مسیر پرتابه را می‌توان در شکل 33 مشاهده نمود. با عبور پرتابه از درون خاک و حرکت آن به اطراف، در ناحیه‌ای اطراف محل عبور پرتابه خاک فشرده می‌شود و چگالی آن به طور موضعی افزایش می‌یابد.

به منظور روشن‌تر شدن تاثیر لایه‌های بتن بر جذب انرژی پرتابه در شکل 34 نمودار تغییرات انرژی جنبشی پرتابه و نمودار تغییرات سرعت پرتابه با افزایش نفوذ آن ترسیم شده است. در هر دو شکل به منظور مقایسه نمودارهای نفوذ در خاک خالص هم ارائه شده است.

سانتی‌متر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. ابعاد المان‌ها در عمق 5 سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. همچنین شکل 29 لایه-بندی هدف در عمق و توزیع چگالی در محیط را قبل از برخورد پرتابه نشان می‌دهد. نواحی قرمز رنگ شامل قطعات بتنی و نواحی آبی‌رنگ شامل قطعات خاک است.



شکل 30- شکل‌های بالا و پایین به ترتیب نحوه شبکه‌بندی هدف خاک-بتن در سطح برخورد پرتابه و نحوه لایه‌بندی هدف خاک-بتن

نتایج شبیه‌سازی عددی نفوذ پرتابه در لایه‌های خاک و بتن

پس از انجام تحلیل دینامیکی صریح نتایج حاصل از نفوذ پرتابه در مدل لایه‌ای خاک-بتن به دست آمد. این نتایج نشان می‌دهند که پرتابه با عبور از 6 لایه 50 سانتی‌متری بتن و 5 لایه 2 متری خاک در میانه لایه ششم خاک متوقف می‌شود. عمق کل نفوذ پرتابه در این تحلیل 14/18 متر برآورد شده است. شکل 31 تغییرات چگالی و تخریب بتن اولین لایه را در هنگام ورود پرتابه نشان می‌دهد.

با عبور پرتابه از لایه‌های خاک و بتن می‌توان میزان تخریب مجموعه را مشاهده نمود. به منظور پیگیری نحوه ایجاد خرابی در مدل لایه‌بندی شده، میزان تخریب در دو عمق 7 متری و 14/18 متری در شکل 32 نشان داده شده است.

خاک در دو حالت عادی تحکیم‌یافته و پیش‌تحکیم‌یافته و کوبیده شده را دارا می‌باشد.

فرآیند نفوذ پرتابه در خاک را می‌توان به سه فاز مختلف تقسیم نمود: (1) برخورد و نفوذ اولیه (2) منطقه نفوذ پایدار (3) منطقه عمل اصطکاک و توقف پرتابه. هر سه فاز ذکر شده در شبیه‌سازی نفوذ کلاهک جنگی در خاک رسی بیش تحکیم یافته مشاهده گردید.

در پژوهش حاضر و با استفاده از شبیه‌سازی عددی، میزان نفوذ کلاهک جنگی BLU-113 در خاک پیش‌تحکیم‌یافته رسی، به میزان 31/8 متر محاسبه گردید. این مقدار نفوذ با آزمایش‌های انجام شده روی میزان نفوذ این سلاح در خاک مطابقت دارد.

پس از اتمام فرآیند نفوذ کلاهک جنگی در خاک، در سطح خاک و محل ورود پرتابه حفره‌ای به عمق تقریبی 1/5 متر و در یک ناحیه دایروی شکل به قطر تقریبی 4 متر ایجاد می‌شود و این ناحیه کاملاً تخریب می‌گردد.

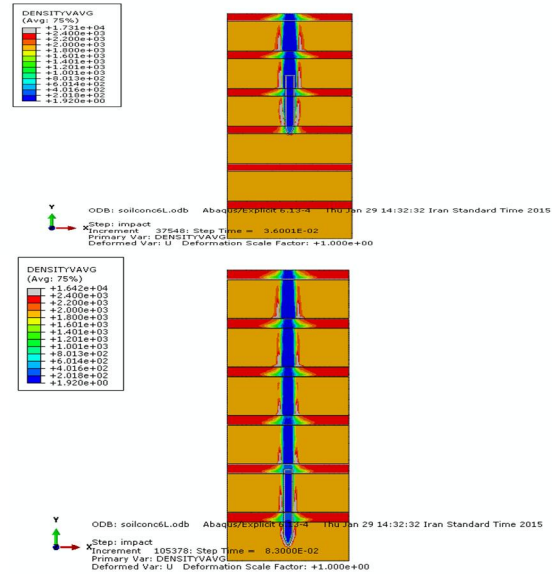
کلاهک جنگی BLU-113 اهداف بتنی با ضخامت‌های 4، 5 و 6 متر را به طول کامل تخریب و از آنها عبور می‌کند. در محل ورود پرتابه به این اهداف بیرون ریختگی مواد از روبرو کاملاً مشهود است. ناحیه ورود پرتابه دچار کرنش‌های شدید پلاستیک می‌شود. همچنین در پشت هدف و در ناحیه خروجی تشکیل گوه‌های گسیختگی و ایجاد خسارت کششی در شبیه‌سازی عددی مشاهده می‌گردد.

در شبیه‌سازی عددی هدف بتنی با ضخامت 7 متر، می‌تواند پرتابه را متوقف نماید. با توجه به اینکه در آزمایش‌های انجام شده روی این سلاح عبور آن از لایه بتنی به ضخامت 6/7 متر ثبت شده است، تطابق مناسبی بین نتایج آزمایش و شبیه‌سازی عددی وجود دارد.

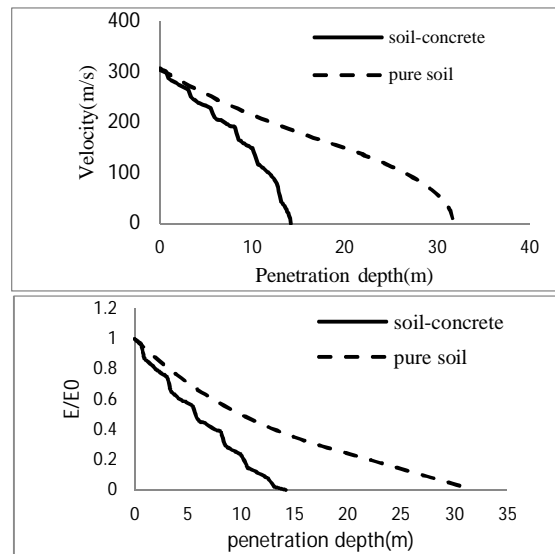
لایه‌بندی خاک با قطعات بتنی به طور موثری می‌تواند در نفوذ کلاهک جنگی مانع ایجاد کند. در این پژوهش با انجام یک نمونه لایه‌بندی از لایه‌های 50 سانتی‌متری بتن و لایه‌های 2 متری خاک استفاده شد. نفوذ کلاهک جنگی BLU-113 در این مجموعه به میزان 14/18 متر برآورد گردید که کاهش 50 درصدی در عمق نفوذ را به همراه دارد.

پی‌نوشت

- 1- Barnes Wallis
- 2- Tall Boy



شکل 33- شکل‌های بالا و پایین به ترتیب تغییرات چگالی مجموعه خاک-بتن پس از عبور پرتابه و رسیدن به عمق 7 متری سطح و رسیدن به عمق 14/18 متری سطح



شکل 34- شکل‌های بالا و پایین به ترتیب نمودار تغییرات انرژی و سرعت پرتابه در هنگام نفوذ

نتیجه‌گیری

با بررسی نتایج شبیه‌سازی عددی نفوذ کلاهک جنگی BLU-113 در خاک و بتن نتایج زیر حاصل شده است: مدل رفتاری دراکر- پراگر اصلاح شده با کلاهک فشاری، می‌تواند به عنوان یک مدل رفتاری توانمند در شبیه‌سازی رفتار محیط خاک‌های رسی و دانه‌ای عمل کند. این مدل رفتاری با در نظر گرفتن یک کلاهک فشاری قابلیت شبیه‌سازی رفتار

- [14] Veyera GE, Charlie WA, Hubert ME. *One-dimensional shock-induced pore pressure response in saturated carbonate sand*. Geotech Test J 2002;25(3): 277e88.
- [15] Zhang C, Nguyen GD, Einav I. *The end-bearing capacity of piles into crushable soils*. Geotechnique 2012; 63(5):341e54.
- [16] Ben-Nun O, Einav I. *The role of self-organization during confined comminution of granular materials*. Philos Trans R Soc A 2010;368:231e47.
- [17] Parkin AK, Lunne T. *Boundary effects in the laboratory calibration of a cone penetrometer in sand*. In: Verruijt A, Beringen FL, Leeyn EH, editors. Proceedings of the 2nd European symposium on penetration testing, vol. 2. Amsterdam, Netherlands: AA Balkema; 1982. pp. 761e8.
- [18] Bless SJ, Berry DT, Pederson B, Lawhorn W. *Sand penetration by high speed projectiles*. In: Elert ML, Furnish MD, Anderson WW, Proud WG, Butler WT, editors. Proceedings of shock compression of condensed matter. Nashville, TN: American Institute of Physics; 2009. pp. 1361e4.
- [19] Allen WA, Mayfield EB, Morrison HL. *Dynamics of a projectile penetrating sand: part II*. J Appl Phys 1957;28(11):1331e5.
- [20] Tanaka K. *Phenomenological studies of the response of granular and geological media to high-speed projectiles*. Report no. AOARD-104115. Asian Office of Aerospace Research and Development; 2011. p. 14.
- [21] Collins JA, Sierakowski RL. *Studies on the penetration mechanics of Eglin sand*. Report AFATL-TR-76-122. Eglin Air Force Base, FL: Air Force Armament Laboratory; 1976. p. 23.
- [22] Allen WA, Mayfield EB, Morrison HL. *Dynamics of a projectile penetration sand*. J Appl Phys 1957;28(3):370e6
- [23] Borg JP, Morrissey M, Perich C, Vogler T, Chhabildas L. *In situ velocity and stress characterization of a projectile penetrating a sand target: experimental measurements and continuum simulations*. Int J Impact Eng 2013;51: 23-35.
- [24] Ho I-Hsuan and Hsieh Chung-Ching. *Numerical modeling for undrained shear strength of clays subjected to different plasticity indexes*. Journal of GeoEngineering, Vol. 8, No. 3, pp. 91-100, December 2013
- [25] Leister Brett. *Mechanical properties and microstructural Evolution of welded Eglin Steel*. Theses and Dissertation Lehigh University Lehigh Preserve.
- [26] Li Q.M, E.A. Flores-Johnson. *Hard projectile penetration and trajectory stability*. International Journal of Impact Engineering 38 (2011) 815-823.

- 3- Grand Slam
4- Disney
5- Cooper
6- Breaux
7- Dilation

منابع و مراجع

- [1] Robins B. "New Principles of Gunnery" (Originally published in 1742). In: James Wilson, editor. Mathematical tracts of the Late Benjamin Ribins, vol. 1; 1761. p. 341; London.
- [2] Borg JP, Volger TJ. *Mesoscale simulations of a dart penetrating sand*. Int J Impact Eng 2008;35:1435e40.
- [3] Cooper WL, Breaux BA. *Grain fracture in rapid particulate media deformation and a particulate media research roadmap from the PMEE workshops*, Int J Fract 2010;162:137e50.
- [4] Kondic L, Fang X, Losert W, O'Hern CS, Behringer RP., *Microstructure evolution during impact on granular matter.*, Phys Rev E 2012;85. 011305-1e 011305-17.
- [5] Seguin A, Bertho Y, Gondret P, Crassous J. *Sphere penetration by impact in a granular medium: a collisional process*. Europhys Lett 2009;88(44002):1e6.
- [6] Dwivedi SK, Teeter RD, Felice CW, Gupta YM. *Two dimensional mesoscale simulations of projectile instability during penetration in dry sand*, J Appl Phys 2008;104:083502.
- [7] Omidvar M, Iskander M, Bless S. *Stress-strain behavior of sand at high strain rates*. Int J Impact Eng 2012;49:192e213.
- [8] Zukas JA, Scheffler DR. *Practical aspects of numerical simulation of dynamic events: effects of meshing*. Int J Impact Eng 2000;24:925e45.
- [9] Scheffler DR, Zukas JA. *Practical aspects of numerical simulation of dynamic events: material interfaces*. Int J Impact Eng 2000;24:821e42.
- [10] Cundall PA, Strack ODL. *A discrete numerical model for granular assemblies*. Geotechnique 1979;29:47e65.
- [11] Onate E, Rojek J. *Combination of discrete element and finite element methods for dynamic analysis of geomechanics problems*. Comput Methods Appl Mech Eng 2004;193:3087e128.
- [12] Schreyer HL, Chiu CP. *The effects on penetrator deceleration of material features exhibited in soils*. Int J Solids Struct 1991;27(27):1327e46.
- [13] Lee KL, Seed HB, Dunlop P. *Effect of transient loading on the strength of sand*. In: Proceedings of the 7th international conference on soil mechanics and foundation engineering, vol. 1; 1969. pp. 239e47. Mexico City, Mexico.