



## طراحی و مدل سازی عددی دستگاه ضربه زن سبک برای تراکم دینامیکی با انرژی کم به روش اجزاء محدود

محسن زاهدآقایی<sup>۱</sup>، منصور پرویزی<sup>۲\*</sup>، سمیه سیروس پور<sup>۳</sup>

۱- دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، دزفول، ایران

۲- دانشکده مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

۳- باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد رامهرمز، دانشگاه آزاد اسلامی، رامهرمز، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۱۱

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۴/۰۹

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۳

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۶/۱۳

### کلمات کلیدی:

تراکم خاک

دستگاه ضربه زن

روش سختی موج فعال شده

فاصله غیر ایمن

عمق بهبود

**خلاصه:** هدف این پژوهش، به دست آوردن روشی است که تمام پارامترهای دینامیکی به راحتی و با روش‌های عددی به دست آورد و همچنین بتوان پس از اعمال هر ضربه، پارامترهای دینامیکی خاک را پیش‌بینی و با رسیدن به تعداد ضربه پیش‌بینی شده عملیات تراکم پایان پذیرد و مقدار مطلوب پارامتر دینامیکی مورد نظر هم تأمین شده باشد. در پژوهش حاضر، ۴ نوع دستگاه ضربه زن با ابعاد متفاوت روی خاک ماسه‌ای با استفاده از نرم‌افزار آباکوس مدل سازی و با استفاده از روش سختی موج فعال شده پارامترهای دینامیکی مربوط به هر دستگاه برای ماسه سست استخراج شده و معلوم می‌گردد کدام دستگاه در چه موقعیتی دارای بیشترین بازده می‌باشد. با به دست آوردن حداکثر سرعت ذره با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود در هر یک از دستگاه‌های ضربه زن، فاصله ایمن برای هر دستگاه به ازای هر ضربه به دست آمد. نتایج حاکی از آن است که فاصله غیر ایمن دستگاه ضربه زن از محل اصابت ضربه با افزایش وزن ضربه زن افزایش یافته است. در این تحقیق دستگاه ضربه زن سبک با مشخصات وزن کوبه ۸۷۵ کیلوگرم، ارتفاع سقوط ۱ متر، فاصله غیر ایمن افقی ۳/۸۰ متر، فاصله غیر ایمن عمودی ۲/۳۰ متر، تعداد ضربه مورد نیاز برای رسیدن به بیشینه‌ی سختی ۵ ضربه و عمق بهبود یافته زیر پی ۰/۹ الی ۱/۲ متر بر روی خاک سست طراحی و مقدار خطای نسبی ۵ درصد محاسبه شده است. عمق بهبود به دست آمده با استفاده از روش عددی با نتایج سانتیفریوژ در شتاب‌های ۱g، ۱۰g، ۲۰g، ۳۰g و نتایج صحرایی پرویزی و مریفادی، آلن، ماکسول و بریاد همخوانی دارد.

### ۱- مقدمه

می‌شد استفاده می‌کردند. در پایان سال ۱۹۶۰ لوئیس منارد<sup>۱</sup> [۳] که مدیر یک دفتر طراحی در فرانسه بود با استفاده از این ایده برای متراکم کردن خاک در اعماق بیشتر با استفاده از امواج با انرژی بالاتر پا به عرصه تحقیقات گذاشت. پس از آقای منارد محققین زیادی در زمینه تراکم دینامیکی خاک به صورت آزمایشگاهی کار انجام داده‌اند از جمله کهلیمیر و لایسمر<sup>۲</sup> [۴] در سال ۱۹۷۴، وست و همکاران<sup>۳</sup> [۵] در سال ۱۹۷۵، لئونارد و همکاران<sup>۴</sup> [۶] در سال ۱۹۸۱، چارلز و همکاران<sup>۵</sup> [۷] در سال ۱۹۹۳، اسکولمب<sup>۶</sup> [۸] در سال ۱۹۹۳، لوکاس<sup>۷</sup> [۹] در سال ۱۹۹۵. در سال ۱۹۹۴ تحقیقاتی تحت عنوان تراکم دینامیکی با انرژی کم به دانشگاه‌های کاردیف و منچستر انگلستان

توسعه جوامع مختلف باعث شده است که دسترسی به زمین مناسب که یکی از اصلی‌ترین عوامل در فعالیت‌های عمرانی بخصوص احداث سازه‌های مختلف ساحلی و دریایی به شمار می‌رود در بعضی موارد امکان پذیر نباشد و در نتیجه زمین‌های نامناسب با خصوصیات ژئوتکنیکی ضعیف مورد استفاده قرار گیرند [۱]. با توجه به هزینه زیاد احداث پی‌های عمیق، جابجایی و جایگزینی مصالح مرغوب، روش بهسازی مختلفی در جهت افزایش مقاومت و کیفیت مهندسی خاک‌ها وجود دارد که تراکم دینامیکی یکی از محبوب‌ترین روش‌ها برای بهسازی زمین است [۲].

از زمان‌های قدیم تا سال ۱۹۳۰ روس‌ها با استفاده از فرآیند سقوط وزنه از ارتفاع مشخص برای کوبیدن شمع استفاده می‌کردند. به عنوان مثال برای کوبیدن شمع مورد نظر از وزنه ۱ یا ۲ تنی که از ارتفاع ۵ یا ۶ متری رها

- 1 L. Ménard
- 2 R. L. Kuhlemeyer & J. Lysmer
- 3 J.M. West, et al
- 4 A. Leonards, et al
- 5 J. A. Charles, et al
- 6 B.C. Scolombe
- 7 R.G. Lukas

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Parvizi@yu.ac.ir



نیروی انسانی و زمان بر بودن مقرون به صرفه نمی‌باشد. در نتیجه می‌توان با مدل‌سازی عددی این عملیات، کارایی و دقت این روش را بالا برد و هزینه‌ها را کاهش داد [۱۸]. در تحقیقی که توسط بختیاری و همکاران در سال ۱۳۹۷ انجام شد، به منظور انجام مدل‌سازی از نرم‌افزار FLAC استفاده گردید. به منظور دستیابی به اهداف تحقیق ابتدا منطقه آبادان به عنوان محدوده مورد مطالعه انتخاب و پس از آزمایش‌های میدانی مشخصات مکانیکی خاک استخراج و سپس با تعریف الگوهای آزمایش اقدام به مدل‌سازی گردید. نتایج حاصل از تحقیق حاضر نشان داد که برای کلیه شرایط مدل‌سازی با افزایش ارتفاع سقوط و همچنین افزایش وزن کوبه عمق تأثیر افزایش یافته است و همچنین حداکثر تنش تماسی در سطح خاک در محل تماس با کوبه رخ داد و این پارامتر با عمق خاک به شدت کاهش یافته است [۱۹].

نظر به اینکه در اغلب تحقیقات گذشته [۲۰ و ۱] از روش‌ها و نرم‌افزارهای مختلفی جهت بررسی تأثیر پارامترهای مختلف تراکم خاک بر روی مشخصات مکانیکی خاک انجام شده است لذا در تحقیق حاضر از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS به منظور مدل‌سازی عددی استفاده شده است. هدف اصلی این پژوهش، به دست آوردن روشی است که تمام پارامترهای دینامیکی به راحتی و با روش‌های عددی به دست آورد و همچنین بتوان پس از اعمال هر ضربه، پارامترهای دینامیکی خاک را پیش‌بینی و با رسیدن به تعداد ضربه پیش‌بینی شده عملیات تراکم پایان پذیرد و مقدار مطلوب پارامتر دینامیکی مورد نظر هم تأمین شده باشد.

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- پیش‌بینی پارامترهای دینامیکی خاک

در این پژوهش حاضر، ۴ نوع دستگاه ضربه‌زن با ابعاد متفاوت روی خاک ماسه‌ای مدل‌سازی می‌گردد و با استفاده از روش سختی موج فعال شده پارامترهای دینامیکی مربوط به هر دستگاه برای ماسه سست استخراج شده و معلوم می‌گردد کدام دستگاه در چه موقعیتی دارای بیشترین بازده است؛ به دلیل محدودیت در تعداد صفحات مقاله از آوردن نتایج ۳ دستگاه دیگر صرف نظر شده و نتایج دستگاه با بیشترین بازده در مقاله آمده است. در مکان‌هایی که سازه‌های مدفون از قبیل لوله آب، برق یا تونل از زیر خاک عبور می‌کنند باید از دستگاهی استفاده کرد که عمق موثر آن به سازه‌های مدفون آسیب نرساند و از طرف دیگر بیشینه‌ی سختی دینامیکی حاصل گردد. در مجاورت سازه‌ها باید از دستگاهی استفاده کرد که به سازه‌های مجاور خسارت وارد نشود و با توجه به فاصله از سازه مجاور از دستگاه مناسب استفاده می‌شود (طراحی). در استفاده از روش وک فقط نیاز به یک عدد رایانه و یک نفر

واگذار گردید که دانشگاه کاردیف کار صحرایی و دانشگاه منچستر مدل آزمایشگاهی را بر عهده داشت. از کسانی که به صورت آزمایشگاهی در زمینه تراکم دینامیکی کار کردند: اورج [۱۰] در سال ۱۹۹۶، مریفاید و همکاران [۱۱] در سال ۱۹۹۸، جی یو و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۰۲ بودند. این تکنیک از راه تجربی توسط اسکات [۱۳] در سال ۱۹۷۵، روزت [۱۴] در سال ۱۹۹۳ و دیک و همکاران [۱۵] در سال ۱۹۹۵ مورد مطالعه قرار گرفته است.

پرویزی و مریفاید [۶] در سال ۲۰۰۰ در تحقیقی از مدل سانتریفیوژ برای تعیین سختی خاک با سه روش آزمایش بارگذاری صفحه، آزمایش وک [۸] و آزمایش اندازه‌گیری امواج فشاری در خاک استفاده کرده‌اند [۱۶]. در پژوهشی که توسط ژو و همکاران [۹] در سال ۲۰۲۱ انجام گرفت برای حل مسائل مربوط به ضرایب تأثیرگذار بر بهسازی خاک ماسه‌ای و تخمین دامنه خاک بهبود یافته در تراکم دینامیکی شاخص‌های تعداد ضربات، انرژی ضربات، فاصله محل اصابت ضربه و شعاع ضربه مورد بررسی قرار گرفت. در این مقاله نشان داده شده که در ضربات بیشتر، عمق بهبود در منطقه ضعیف با انرژی و شعاع ضربه مرتبط می‌باشد؛ در حالیکه تأثیر تعداد ضربات کمتر است و همچنین بهبود منطقه ضعیف و عمق بهبود با افزایش فاصله از محل اصابت ضربه کاهش پیدا می‌کند و منطقه بهبود با فاصله ضربه افزایش می‌یابد. بهبود خاک در اصابت ضربات با کاهش فاصله بین ضربات بهتر می‌شود؛ همچنین در این مقاله اشاره شده است که افزایش انرژی ضربه باعث بهبود خاک‌های اشباع نمی‌شود [۱۷].

با توجه به این که اساس طراحی تراکم دینامیکی هنوز تجربی است و تعداد پارامترهای متغیر در این روش زیاد است، برای رسیدن به یک الگوی بهینه کوبش در چند ناحیه، تراکم دینامیکی همراه تعدادی آزمایش قبل و بعد از کوبش انجام می‌شود. در بیشتر موارد خاک ممکن است بیشتر از حد تعیین شده متراکم گردد که بعد از عبور از بیشینه‌ی سختی، باعث شروع روند نزولی سختی خاک می‌گردد. لذا باید به ازای هر ضربه آزمایش‌های نفوذ مخروطی یا نفوذ استاندارد انجام گیرد که با توجه به هزینه زیاد آزمایش‌ها و

- 1 O. Orrje
- 2 CM. Merrifield, et al
- 3 Q. GU, et al
- 4 R.A. Scott
- 5 J.H. Roesset, et al
- 6 A.J. Deeks, et al
- 7 M.Parvizi & C.M.Merrifield
- 8 WAK Tes
- 9 C. Zhou, et al

### ۳-۱- ایجاد هندسه مدل

در این پژوهش، مطابق شکل ۱ مدل از سه قطعه شامل قطعه خاک، قطعه پی دایره‌ای روی خاک و ضربه‌زن تشکیل شده است. خاک از نوع ماسه و پی از جنس آلومینیوم است. سه قطعه خاک، پی و ضربه‌زن را در محیط نرم‌افزار آباکوس با انتخاب گزینه‌های تغییر شکل پذیر<sup>۱</sup> و سه بعدی رسم شده است.

### ۳-۲- تعریف خواص مواد

در این مرحله خواص یک یا چند ماده تعریف می‌شود. سپس برای هر یک از مواد یک مقطع<sup>۲</sup> ایجاد شده که دارای خواص مورد نظر است. در پایان با توجه به نوع ماده، هر مقطع به یک یا چند قطعه اختصاص داده می‌شود. برای خاک ویژگی‌های الاستیک مانند مدول یانگ و نسبت پواسون، چگالی و ویژگی‌های پلاستیک مطابق با مدل توسعه یافته‌ی دراگر-پراگر تعریف شد. جدول ۱ مشخصات محیط خاکی، جدول ۲ مشخصات پی دایره‌ای و جدول ۳ مشخصات ضربه‌زن در مدل را نشان می‌دهد. شکل هندسی ضربه‌زن به شکل استوانه و از جنس فولاد می‌باشد. شکل هندسی ضربه‌زن و حجم آن با توجه به جرم مخصوص فولاد و فرمول حجم مخروط ناقص تعیین می‌شود [۲۱].

بعد از تعریف مشخصات مصالح، مقطعی از جنس همگن با نام خاک و مقطعی دیگر با نام پی تعریف و مشخصات خاک، پی و ضربه‌زن تعریف شده به آن‌ها اختصاص داده شد. علاوه بر خواص فوق، میرایی رایله به خاک نسبت داده شده است.

### ۳-۳- برهم نهی قطعات

در این مرحله این قطعات وارد صفحه شده و سپس با اعمال قیدهایی در موقعیت مناسب نسبت به یکدیگر قرار می‌گیرند. برهم نهی قطعات مطابق شکل ۲ به دو صورت روش نمونه وابسته<sup>۳</sup> و روش نمونه مستقل<sup>۴</sup> انجام می‌پذیرد.

اگر برای برهم نهی قطعات از روش نمونه وابسته استفاده شود، امکان ایجاد تغییراتی در هندسه مدل در محیط برهم نهی وجود ندارد. علاوه بر این مش‌بندی مدل در محیط Part انجام می‌گیرد. اما اگر از روش نمونه مستقل استفاده شود، می‌توان در محیط برهم نهی قطعات تغییراتی در هندسه مدل

کاربر داریم. برای صحت‌سنجی نتایج به دست آمده می‌توان نتایج عددی به دست آمده را با نتایج آزمایشگاهی که با آزمایش سانتریفیوژ ارائه شده است، مقایسه نمود. در این پژوهش از داده‌های آزمایشگاهی استفاده شده است که روند زیر بر روی آن صورت گرفته است. در آزمایشگاه سیگنال‌های نیرو و شتاب برای هر ضربه گرفته شده و داده‌ها به نرم‌افزار متلب برده شده و توسط برنامه نوشته شده پارامترهای دینامیکی خاک حاصل شد. در محدوده‌ای که پیش‌بینی می‌شد ضربه اثر دارد، در دو جهت قائم و افقی دستگاه‌های اندازه‌گیری تنش که توسط پروب‌های طراحی شده‌اند قرار گرفته و سیگنال‌های ایجاد شده در اثر هر ضربه گرفته شد. این سیگنال‌ها احتیاج به یک‌دست شدن داشتند که توسط برنامه نوشته شده به منحنی‌های مورد نظر تبدیل شوند. پس از اعمال ضرایب کالیبراسیون، پیک هر سیگنال در دو جهت قائم و افقی در اعماق مختلف تعیین گردید. در واقع برای هر آزمایش تراکم دینامیکی با انرژی کم در خاک، تعداد زیادی داده توسط سیستم ثبت داده گرفته شده است؛ که برای دستگاه‌های مختلف تعداد ۱۰۲۴ داده می‌باشد البته این داده‌ها برای اهداف مختلفی به کار رفته‌اند و داده‌ها به صورت  $2^N$  می‌باشند که برای بعضی سیگنال‌ها قابل استفاده در تبدیل فوریه سریع هستند و از حوزه زمان به حوزه فرکانس تبدیل شده‌اند. در نمونه مدل شده در نرم‌افزار آباکوس، تراکم نسبی  $3/37$  درصد تحلیل شده است. که این نوع خاک از نوع سست بوده و هدف از تحقیق حاضر بهبود رفتار خاک در مقابل ضربه می‌باشد. در این تحقیق با بررسی تغییرات ایجاد شده در خاک در اثر هر ضربه از داده‌های آزمایشگاهی در آزمایشگاه سانتریفیوژ نیز استفاده شده است.

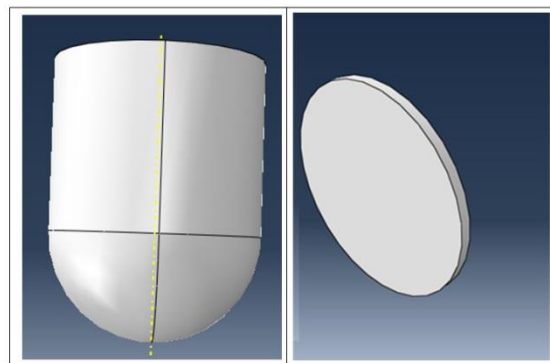
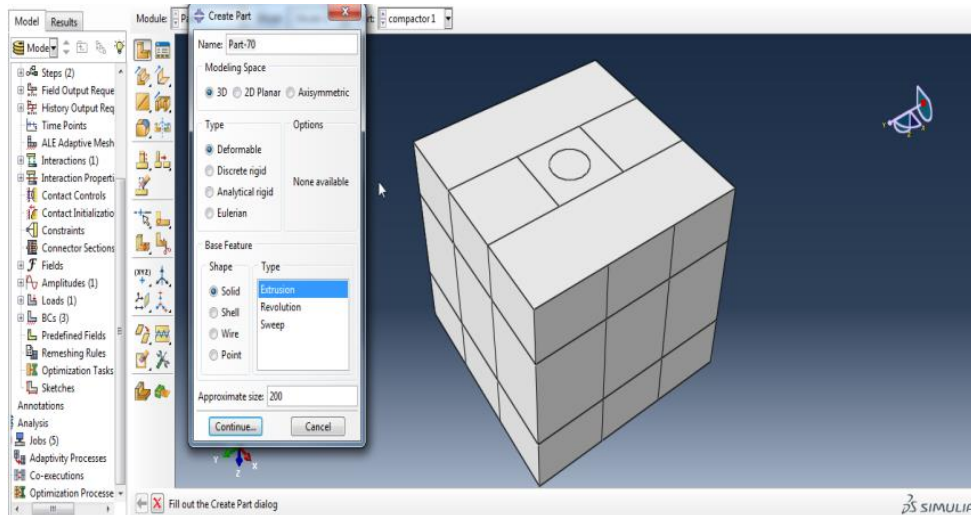
### ۲-۲- فاصله ایمن

در گام اول با استفاده از نرم‌افزار اجزا محدود بیشینه‌ی سرعت را برای نقاطی که در حد فاصل محل اصابت ضربه تا سازه مورد نظر هستند به دست آورده و نمودار بیشینه‌ی سرعت ذره برحسب فاصله رسم می‌شود. در گام دوم بیشینه‌ی سرعت مجاز (یکی از معیارهای ذکر شده در بالا) را روی نمودار مشخص کرده و محل برخورد خط و منحنی تعیین می‌شود. در گام سوم با توجه به این که سرعت در نزدیک سازه باید کمتر از سرعت مجاز باشد در نتیجه فاصله ایمن با توجه به محل اصابت ضربه و مقدار سرعت مجاز تعیین می‌شود.

### ۳- مدل‌سازی

فرآیند مدل‌سازی این تحقیق در نرم‌افزار آباکوس شامل ۸ مرحله زیر است.

- 1 Deformable
- 2 Section
- 3 Dependent
- 4 Independent



شکل ۱. مدل سازی محیط خاکی، پی دایره ای و ضربه زن در مرحله اول

Fig. 1. Modeling of soil environment, circular foundation and percussion in the first stage.

جدول ۱. مشخصات محیط خاکی

Table 1. Specifications of the soil environment.

مدول الاستیسیته (پاسکال)	ضریب پواسون	جرم واحد حجم	مدل دراگر- پراگر		
			زاویه اتساع	نسبت شار تنش	زاویه اصطکاک
$15 \times 10^6$	۰/۳۵	۱۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب	۲	۰/۹۵	۵۰/۲ درجه

جدول ۲. مشخصات پی دایره ای

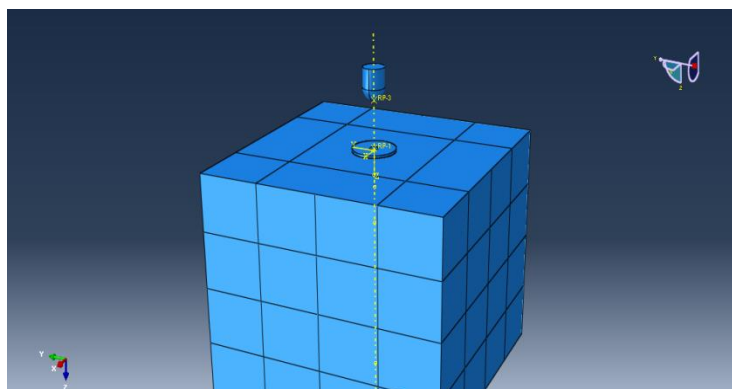
Table 2. Specifications of the circular foundation.

مدول الاستیسیته (پاسکال)	ضریب پواسون	جرم واحد حجم
$69 \times 10^9$	۰/۳۳	۲۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب

جدول ۳. مشخصات ضربه‌زن در مدل

Table 3. Specifications of the compactor in the model.

جرم واحد حجم	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (پاسکال)
۷۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب	۰/۳۳	$۲۰۰ \times ۱۰^۹$



شکل ۲. برهم نهی قطعات تعریف شده

Fig. 2. Assemble of defined components.

تعریف و اعمال شوند. در این پروژه ابتدا رفتار مماسی تعریف می‌شود. برای این محیط دو ویژگی تعریف می‌شود:

۱- رفتار معمولی<sup>۲</sup>

۲- رفتار اصطکاکی (مماسی)<sup>۳</sup>

بعد از تعریف رفتار مماسی باید رفتار تعریف شده به سطوح در تماس اختصاص داده شود. سطوح در تماس در این پروژه سطح بالایی خاک با سطح پایینی پی دایره‌ای و سطح ضربه‌زن با سطح بالایی پی دایره‌ای می‌باشد. لذا با انتخاب این سطوح رفتار مماسی و معمولی تعریف شده به آن‌ها اختصاص داده شد. برای اعمال شرایط مرزی پیرامون مدل، باید به بی‌نهایت یا نیمه بی‌نهایت بودن مدل واقعی دقت کرد. به طوری که انرژی وارد شده به مرزها باید توسط میراگر از مرزها خارج شود. با توجه به این موضوع، مبحث اعمال مرز جاذب انرژی مطرح می‌شود. روش‌های مختلفی برای مرز جاذب انرژی وجود دارد. یکی از این روش‌ها مرز ویسکوز می‌باشد. در این روش المان‌های میراگر در مرزها قرار می‌گیرند و ضریب این المان از طریق رابطه (۲) تعیین می‌شود. دو نوع میراگر وجود دارد. در تحلیل ضمنی فقط المان یک گرهی

ایجاد کرد. همچنین مش‌بندی قطعه بر روی نمونه انجام می‌گیرد. مزیت روش اول این است که حجم کمتری از حافظه را اشغال می‌کند. در این مرحله همچنین نقاطی برای تعریف المان‌های میراگر دور تا دور محیط خاکی که در محیط Part تعریف شده‌اند، وارد محیط بر هم نهی می‌شود و با مدل جمع می‌کنیم تا شرایط برای اعمال شرایط مرزی فراهم شود.

### ۳-۴- تعریف مراحل حل

در این بخش با توجه به نوع مسئله، مراحل لازم برای تحلیل آن تعریف می‌شود. علاوه بر آن می‌توان نوع و چگونگی نتایج خروجی حاصل از تحلیل را نیز تعیین کرد.

در این پروژه با توجه به این که مسئله از نوع ضربه<sup>۱</sup> و دینامیکی گذرا می‌باشد لذا نوع تحلیل از نوع صریح انتخاب می‌شود.

### ۳-۵- تعریف تماس

در این بخش رفتارهای تماسی مکانیکی (اصطکاک) و حرارتی (انتقال حرارت) بین قطعات تعریف و اعمال می‌شود. قیود و اتصالات مدل نیز باید

2 Normal Behavior  
3 Tangential Behavior

1 Impact

سرعت ( $\alpha$ ) برابر یک باشد، نیروی میرایی دارای تابع خطی و در غیر این صورت دارای تابع غیرخطی است و به اصطلاح این دو حالت را میرایی خطی و میرایی غیرخطی می‌نامند. توان سرعت در میرایی غیرخطی معمولاً بین ۰/۱ تا ۰/۲ می‌باشد. مقدار انتخابی این عدد وابسته به کاربرد آن می‌باشد. برای کاربرد لرزه‌ای عددی کمتر از یک مناسب می‌باشد. ضریب المان‌های میراگر برای یک سطح به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$C = \rho V_s A \quad (2)$$

در این رابطه  $\rho$  جرم مخصوص خاک،  $V_s$  سرعت موج برشی و  $A$  سطح تحت پوشش هر یک از المان‌ها است.

با توجه به این که در این تحقیق تراکم دینامیکی با انرژی کم می‌باشد، لذا مقدار تنش در جداره‌ها بسیار ناچیز و صفر می‌باشد و با توجه به نتایج تحلیل‌ها، حباب تنش در محدوده زیر پی می‌باشد؛ بنابراین لزومی به در نظر گرفتن المان‌های میراگر نمی‌باشد.

### ۳-۶- اعمال شرایط مرزی و بارگذاری

در این پروژه بارگذاری از نوع ضربه می‌باشد که در زمان‌های مشخص با دوره تناوب یکسان وارد می‌شود. با توجه به این که ضربه‌زن بعد از اصابت ضربه اول دوباره باید در ارتفاع یک متری قرار گیرد و ضربه دوم شروع شود، لذا دو نوع بارگذاری تحت عنوان بارگذاری با اعمال سرعت اولیه و بارگذاری تحت شتاب ثقل اعمال می‌شود.

مطابق شکل ۳ در بارگذاری با سرعت اولیه ضربه‌زن را به صورت مماس

وجود دارد. به طوری که یک نقطه از مدل را مستقیم به زمین وصل می‌کند. اما در تحلیل صریح فقط از نوع دو گرهی می‌توان استفاده کرد. به این معنی که ابتدا باید مدل را به چند قطعه تقسیم کرد. ابتدا برای یک ضلع نقاطی که در اثر قطعه‌بندی به وجود آمده‌اند، در نظر گرفته و در راستای همان نقاط و به سمت بیرون مدل، نقاط جدیدی در محیط ایجاد هندسه مدل تعریف می‌شود. برای سایر ضلع‌های پیرامونی مدل نیز همین کار انجام شده است. در این محیط با استفاده از گزینه المان میراگر، میراگرهای دو گرهی انتخاب شده و هر نقطه تعریف شده پیرامون مدل به نقطه متناظرش در روی مدل وصل شده است.

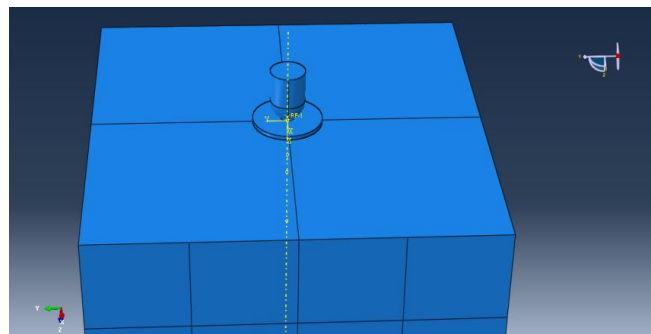
یکی دیگر از کارهایی که در این مرحله انجام می‌گیرد، صلب نمودن پی و ضربه‌زن روی آن است و با معرفی یک گره روی هر کدام از قطعات انجام می‌گیرد.

### ۳-۵-۱- تعریف و اعمال مرز جاذب انرژی

با توجه به نیمه بی‌نهایت بودن مدل واقعی، انرژی وارد شده به مدل بایستی از طریق مرزها خارج شود. روش‌های مختلفی برای اعمال مرز جاذب انرژی وجود دارد. یکی از این روش‌ها، مرز ویسکوز است. در این روش المان‌های میراگر در مرزها قرار داده شده که نیروی میرایی حاصل از میراگر را برابر توانی از سرعت ضربدر ضریب میرایی در نظر می‌گیرند.

$$F_d = C u^a \quad (1)$$

در رابطه (۱)  $F_d$  نیروی میراگر تحت اثر سرعت ذره می‌باشد و  $C$  ضریب میراگر و  $u$  سرعت در ذره متصل به میراگر می‌باشد. در رابطه بالا اگر توان



شکل ۳. نحوه اعمال بارگذاری ضربه

Fig. 3. How to apply impact loading.



### ۳-۷- نحوه مش‌بندی در تحقیق حاضر

برای مش‌بندی باید دو معیار مدنظر قرار گیرد: اولاً مش‌بندی آن قدر ریز باشد تا جواب تحلیل به واقعیت نزدیک باشد و دوماً در هنگام انجام تحلیل خطای ناشی از مش‌بندی نداشته باشیم.

بعد از تحقیق‌های زیاد از شرکت تحقیقاتی ایران خودرو و ایپکو<sup>۱</sup>، نتیجه آن شد که بهترین حالت مش‌بندی استفاده از مش جهت‌دار می‌باشد. بدین صورت ابعاد مش در زیر پی و روی خاک به اندازه ۰/۰۵ متر و در لبه‌های سطح خاک از ابعاد ۰/۳۵ متر به صورت یک طرفه مش‌بندی شد. بدنه مدل خاک به علت وجود میراگرها بسیار حساس هست، لذا از مش‌بندی دو طرفه مطابق شکل ۴ استفاده شد. ابعاد مش‌بندی دو طرفه از ۰/۱۲ متر الی ۰/۳ متر متغیر است. با تغییر وزن ضربه‌زن و ابعاد مدل، مش‌بندی تغییر می‌کند و با توجه به این که ممکن است وزن ضربه‌زن افزایش یابد، ابعاد مش‌بندی هم تغییر می‌کنند و بزرگ‌تر می‌شوند. یکی دیگر از معیارهای تایید مش‌بندی این است که ابتدا ابعاد مش به اندازه دلخواه انتخاب شده و در تحلیل‌های متناوب ابعاد مش‌بندی کوچک‌تر می‌شوند. تا جایی که جواب به دست آمده با جواب تحلیل قبل اختلاف بسیار ناچیزی داشته باشد. در این صورت ابعاد مش تا حدودی قابل قبول است. مطابق شکل ۵ در شرایطی که میراگر اطراف مدل خاک وجود نداشته باشد، می‌توان ابعاد مش‌بندی را تغییر داد.

### ۳-۸- مشاهده نتایج خروجی

نتایج تنش و ن مایسنز<sup>۲</sup> و سرعت در جهت Z و در محیط گرافیکی مطابق شکل‌های ۶ و ۷ قابل مشاهده هستند.

### ۴- نتایج مدل‌سازی

نتایج تحقیق حاضر در چهار مرحله بیان می‌گردد:

مرحله اول: تعیین فاصله ایمن افقی از محل اصابت ضربه در خاک سست و مقاوم و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی

مرحله دوم: تعیین فاصله ایمن عمودی از محل اصابت ضربه در خاک سست و مقاوم و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی

مرحله سوم: تعیین پارامترهای دینامیکی با استفاده از روش وک.

مرحله چهارم: تعیین عمق بهبود یافته به روش‌های مختلف و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی.

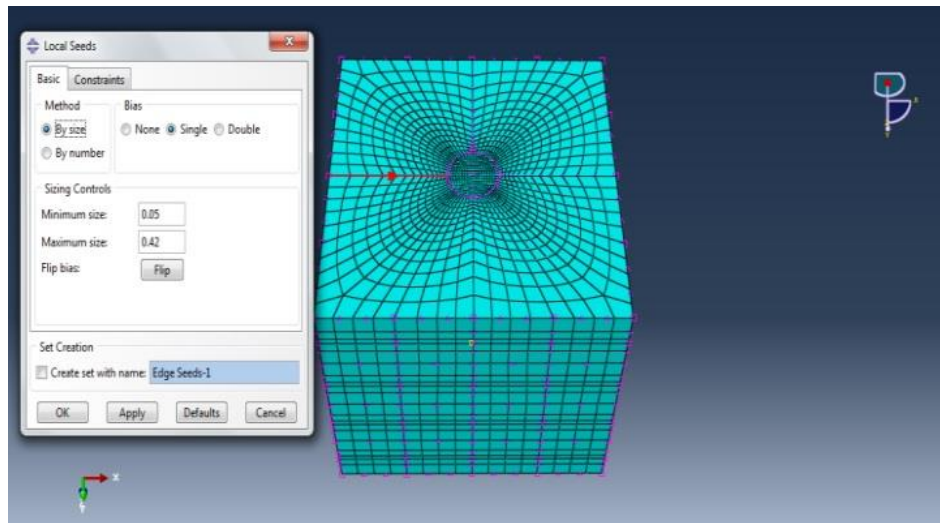
بر روی پی قرار داده و به آن سرعت اولیه معادل سرعت سقوط آزاد از ارتفاع ۱ متری اعمال می‌شود.

با این کار زمان تحلیل تا حد زیادی کاهش می‌یابد و مشکلات برگشت ضربه‌زن به ارتفاع ۱ متری و سقوط دوباره آن برطرف می‌شود. نحوه اعمال بارگذاری به این صورت است که ابتدا در مرحله تعریف مراحل حل و در مرحله اول زمان دلخواهی در حدود ۰/۵ تا ۱ ثانیه وارد و در مرحله دوم جهت بازگشت ضربه‌زن به حالت اولیه زمان ۲ ثانیه اختصاص داده می‌شود. در مرحله بارگذاری، سرعت اولیه‌ای معادل سرعت سقوط از ارتفاع ۱ متری که از رابطه (۳) محاسبه می‌شود به ضربه‌زن اعمال می‌شود. پس از انجام تحلیل توسط نرم‌افزار نمودارهای انرژی جنبشی و انرژی درونی خاک ترسیم شده است. از روی این نمودارها می‌توان زمانی که انرژی درونی و انرژی جنبشی ثابت می‌شوند را به دست آورد. زمان به دست آمده، زمانی است که ضربه‌زن بعد از برخورد به پی به داخل خاک فرو رفته و بعد از اعمال نیرو در آستانه بازگشت به طرف بالا و جدا شدن از سطح پی می‌باشد. لذا می‌توان گفت زمان به دست آمده زمان مساوی شدن نیروی ضربه‌زن با نیروی مقاوم خاک می‌باشد. زمان به دست آمده دوباره در مرحله تعریف مراحل حل به مرحله اول اختصاص داده شده و دوباره تحلیل انجام گرفته است.

$$V = \sqrt{(2gh)} \quad (3)$$

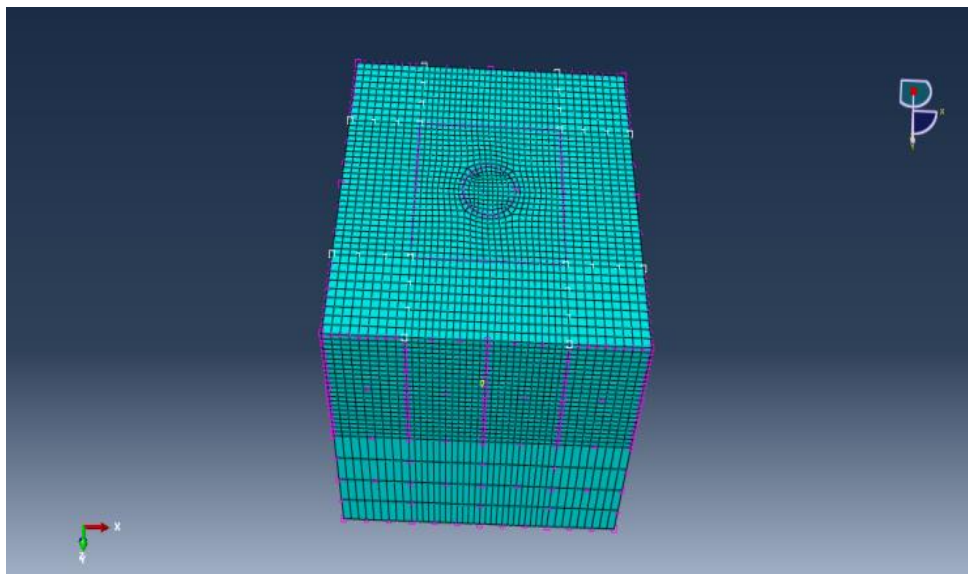
در این رابطه V سرعت برخورد، h ارتفاع سقوط و g شتاب ثقل می‌باشد. بعد از تعیین میزان پایین آمدن ضربه‌زن در زمان اختصاص داده شده، جابجایی به دست آمده در مرحله بارگذاری و اعمال شرایط مرزی به صورت خلاف محور Z به ضربه‌زن و به عنوان ورودی مرحله دوم اختصاص داده و دوباره تحلیل انجام گرفته است. برای ضربات دوم و سوم الی آخر همین روند تکرار شده است؛ با این تفاوت که در مرحله بارگذاری علاوه بر سرعت اختصاص داده شده نتایج ضربه از قبل وارد شده است. در بارگذاری با شتاب ثقل به ضربه‌زن شتاب گرانشی در راستای عمق خاک اعمال و ضربه‌زن تحت شتاب ثقل سقوط می‌کند. بعد از اعمال بارگذاری باید شرایط مرزی تعریف شود. با توجه به این که فرض شده است کف مدل بر روی زمین سخت قرار گرفته است، بنابراین کف مدل گیردار شده است. علاوه بر کف مدل باید نقاطی که در محیط تعریف هندسه مدل، برای اختصاص دادن المان‌های میراگر در قسمت قبل ایجاد شده را نیز گیردار کرد.

1 Ipco  
2 Von Mises



شکل ۴. مش‌بندی یک طرفه سطح خاک و دو طرفه مدل خاک در شرایط وجود میراگر

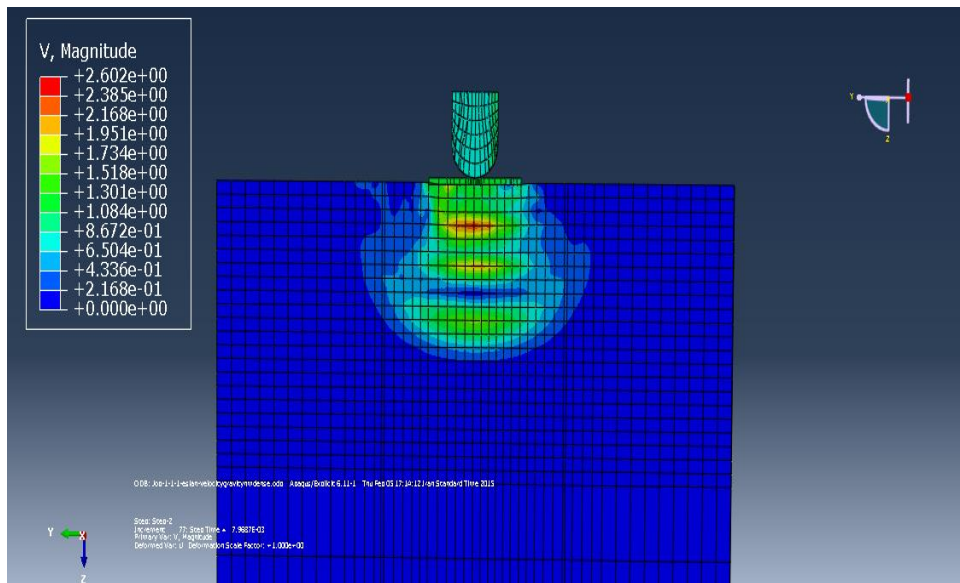
Fig. 4. One-sided meshing of soil surface and two-sided soil model in the presence of dampers.



شکل ۵. مش‌بندی مدل خاک در شرایط بدون میراگر

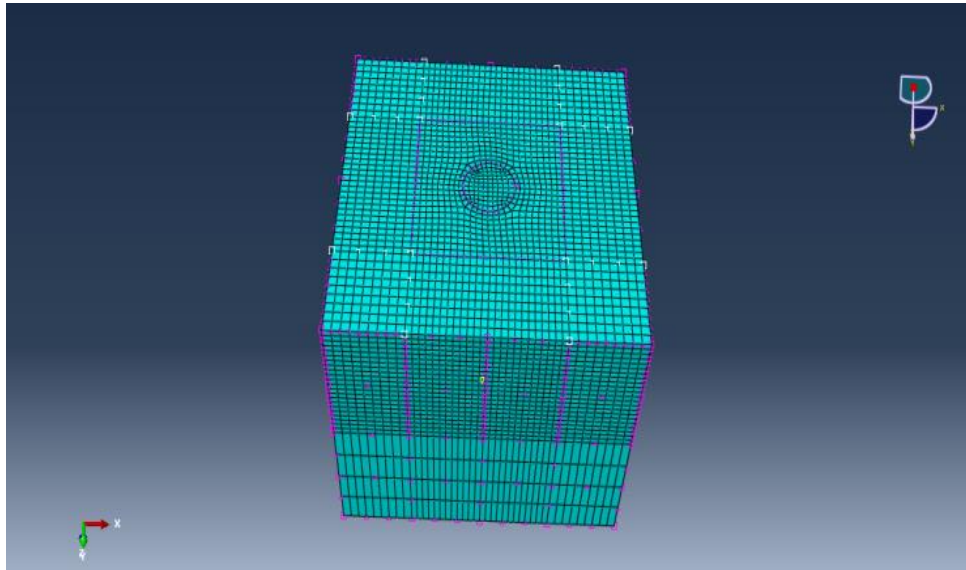
Fig. 5. Mesh modeling of soil model in conditions without damper.





شکل ۶. نمایش نتایج سرعت در جهت  $Z$  در محیط گرافیکی

Fig. 6. Display speed results in  $Z$  direction in graphical environment.



شکل ۷. نمایش نتایج تنش ون مایسز در جهت  $Z$  در محیط گرافیکی

Fig. 7. Display the results of Von Mises stress in the  $Z$  direction in a graphical environment.

جدول ۴. مشخصات دستگاه ضربه‌زن

Table 4. Specifications of the compactor.

دستگاه ضربه‌زن	تعداد ضربات	وزن ضربه‌زن (kg)	ارتفاع سقوط (m)	قطر پی دایره‌ای (m)
۱	۱۰	۴۴۸	۰/۸	۰/۸
۲	۱۰	۸۷۵	۱	۱
۳	۱۰	۱۵۱۲	۱/۲	۱/۲
۴	۱۰	۲۹۵۰	۱/۵	۱/۵

جدول ۵. مشخصات خاک مورد استفاده

Table 5. Specifications of soil used.

نوع خاک	درصد تراکم نسبی	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	مدول الاستیسیته خاک (pa)
سست	۳۷/۳	۱۵۰۵/۵	۱۵×۱۰ <sup>۶</sup>
متراکم	۷۱/۸	۱۶۷۱/۲	۶۰×۱۰ <sup>۶</sup>

برای خطوط فشار قوی نیز بیشینه‌ی سرعت ذره بین ۲۵۴ تا ۵۰۸ میلی‌متر بر ثانیه به دست آمد. برای نقاط داخل خاک و دقیقاً زیر ضربه باید سرعت در راستای محور عمق خاک (محور Z) و برای سرعت بر روی سطح خاک سرعت در راستای محور Y مدنظر قرار گیرد. جهت تعیین بیشینه‌ی سرعت برای ساختمان‌های مجاور بیشینه‌ی سرعت در راستای مورد نظر (X یا Y) و جهت تعیین بیشینه‌ی سرعت برای سازه‌ها و خطوط مدفون زیر ضربه سرعت در راستای محور Z ملاک قرار گرفته می‌شود. نحوه تعیین فاصله ایمن یکی از دستگاه‌های ضربه‌زن به طور نمونه در اینجا ذکر می‌گردد. مشخصات دستگاه ضربه‌زن و مشخصات خاک مورد استفاده مطابق جداول ۴ و ۵ می‌باشد.

با توجه به این که تعیین فاصله ایمن یکی از نیازهای تراکم دینامیکی می‌باشد، لذا می‌توان با استفاده از نرم‌افزار آباکوس سرعت در عمق‌های مختلف در زیر پی را به دست آورد و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمود و فاصله ایمن و غیر ایمن را به دست آورد. نمودارهای شکل ۸ مقدار سرعت در عمق ۰، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متری را برای کوبه به وزن ۸۷۵ کیلوگرم که از ارتفاع ۱ متری بر روی خاک سست رها شده است را نشان می‌دهد.

۴-۱- تعیین فاصله ایمن از محل اصابت ضربه

یکی از مواردی که در این تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد، تعیین فاصله ایمن دستگاه ضربه‌زن سبک تا سازه‌های مجاور، سازه‌های مدفون و خطوط برق زیر خاک می‌باشد. تعیین فاصله ایمن محل اصابت ضربه با داشتن بیشینه‌ی سرعت ذره در هر عمق که با روش‌های اجزاء محدود به دست می‌آید و رسم نمودار بیشینه‌ی سرعت ذره - فاصله حاصل می‌گردد. ویس در سال ۱۹۸۱ [۲۲]، لوکاس در سال‌های ۱۹۸۰ و ۱۹۸۶ [۲۴ و ۲۳]، لئونارد در سال ۱۹۸۱ [۶] و رولین و کیم در سال ۱۹۹۴ [۲۵] طبق آزمایش‌ها و مشاهدات تجربی به این نتیجه رسیدند که بیشینه‌ی سرعت ذره برای این که به ساختمان مجاور خسارت وارد نکند باید کمتر از ۲ اینچ بر ثانیه (۵۰ میلی‌متر بر ثانیه) باشد. در نتیجه برای فاصله‌هایی که بیشینه سرعت ذره کمتر از  $2 \frac{\text{in}}{\text{sec}}$  می‌باشد خسارتی وارد نخواهد شد. ویس در سال ۱۹۸۱ و ماین در سال ۱۹۷۱ [۲۶] برای ساختمان‌های قدیمی بیشینه‌ی سرعت ذره را ۱۲/۷ میلی‌متر بر ثانیه به دست آوردند. در سازه‌های مدفون در زیر خاک معیاری توسط لوکاس در سال ۱۹۸۶ ارائه شد. برای لوله‌ها و خطوط برق زیر خاک بیشینه‌ی سرعت ذره باید ۳ اینچ بر ثانیه (۷۵ میلی‌متر بر ثانیه) باشد.

جدول ۶. فاصله غیر ایمن افقی از محل اصابت ضربه در خاک سست

Table 6. Unsafe horizontal distance from the impact location in loose soil.

ضربه	نتایج آزمایشگاهی (متر)	نتایج عددی (متر)
۱	۲/۷	۲/۹
۲	۳/۳	۳/۶
۳	۳/۳	۳/۵
۴	۳/۲	۳/۲
۵	۳/۳	۳/۳
۶	۳/۶	۳/۶
۷	۳/۵	۳/۶
۸	۳/۵	۳/۵
۹	۳/۳	۳/۳
۱۰	۲/۹	۲/۹

فاصله‌ای بیشتر از ۳/۸۰ متر و به ازای خاک متراکم، ساختمان‌های مجاور باید در فاصله‌ای بیشتر از ۳/۳۰ متر قرار گیرند. رعایت این فاصله در جهت حاشیه اطمینان کافی برای تراکم دینامیکی می‌باشد.

۴-۲- مرحله دوم: تعیین فاصله ایمن عمودی از محل اصابت ضربه در خاک سست و مقاوم و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی

**الف) تعیین فاصله ایمن عمودی در خاک سست**

با توجه به این که بیشینه‌ی سرعت ذره برای سازه‌های مدفون ۵۰۸ میلی‌متر بر ثانیه می‌باشد، بنابراین فاصله غیر ایمن عمودی از محل اصابت ضربه در خاک سست برای نتایج آزمایشگاهی و عددی در جدول ۸ آمده است.

**ب) تعیین فاصله ایمن عمودی در خاک متراکم**

با توجه به این که بیشینه‌ی سرعت ذره برای سازه‌های مدفون ۵۰۸ میلی‌متر بر ثانیه می‌باشد، بنابراین فاصله غیر ایمن عمودی از محل اصابت ضربه در خاک متراکم برای نتایج آزمایشگاهی و عددی در جدول ۹ آمده است.

با توجه به این که فاصله ایمن عمودی برای دو نوع خاک متراکم و سست برای سازه‌های مدفون از جمله تونل‌ها، خطوط برق و قنات‌ها دارای اهمیت است، لذا نتایج حاصل از دو نوع خاک درباره فاصله غیر ایمن در نمودار بالا نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۳، به ازای خاک سست، سازه‌های مدفون باید در فاصله‌ای بیشتر از ۲/۳۰ متر و به ازای خاک متراکم،

در این نمودارها سرعت به دست آمده از آزمایشگاه سانتریفیوژ با سرعت به دست آمده از نرم‌افزار آباکوس مقایسه شده است و تطابق خوبی با هم دارند. در اینجا فاصله ایمن عمودی و افقی برای انواع خاک ماسه‌ای برای دستگاه ضربه‌زن شماره ۲ آمده است و با نتایج آزمایشگاه سانتریفیوژ مقایسه شده است.

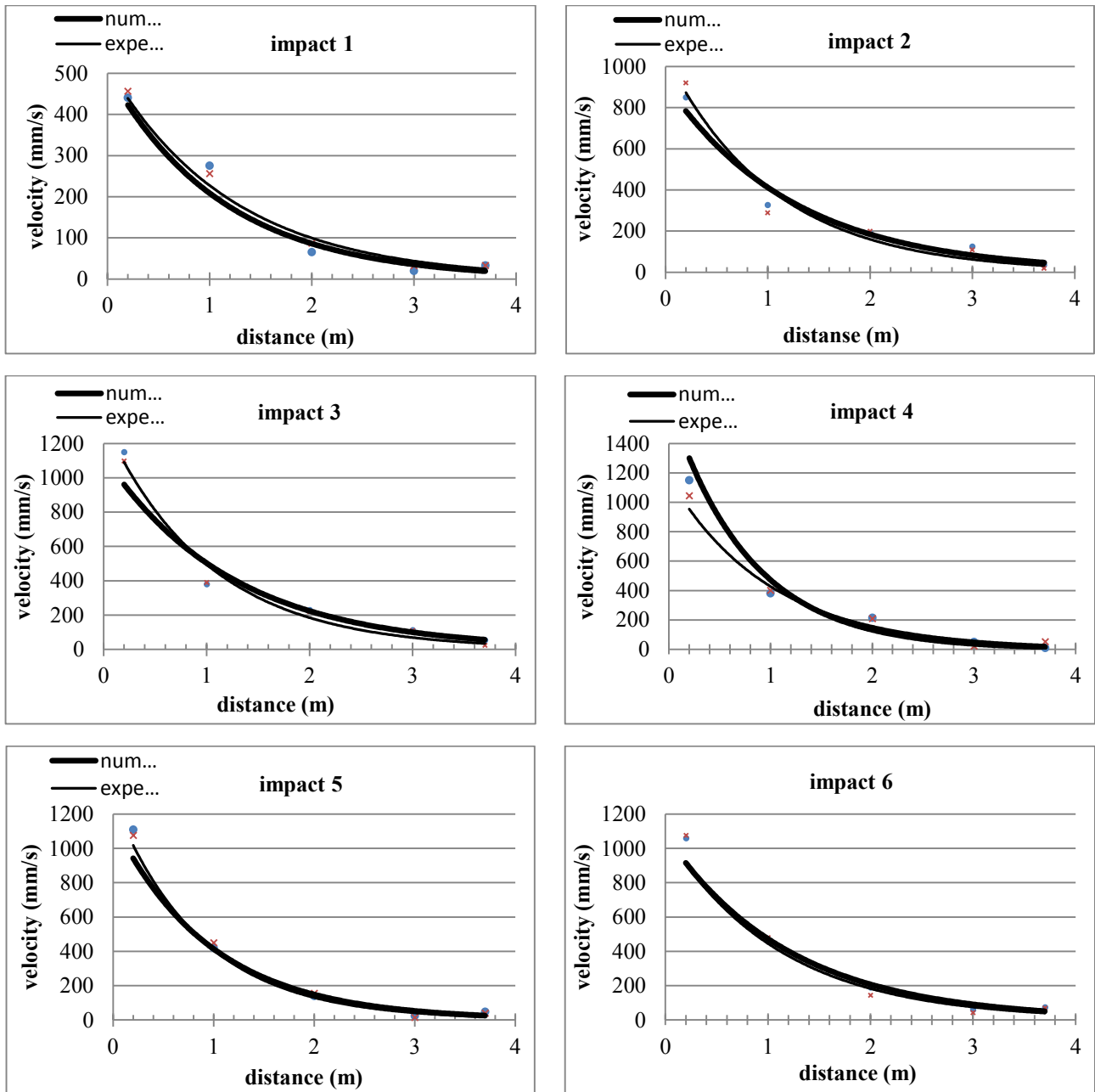
۴-۱-۱- مرحله اول: تعیین فاصله ایمن افقی از محل اصابت ضربه در خاک سست و مقاوم و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی

**الف) تعیین فاصله ایمن افقی در خاک سست**

با توجه به این که بیشینه‌ی سرعت ذره برای سازه‌های مجاور ۵۰ میلی‌متر بر ثانیه می‌باشد، بنابراین فاصله غیر ایمن افقی از محل اصابت ضربه برای نتایج آزمایشگاهی و عددی در جدول ۶ آمده است:

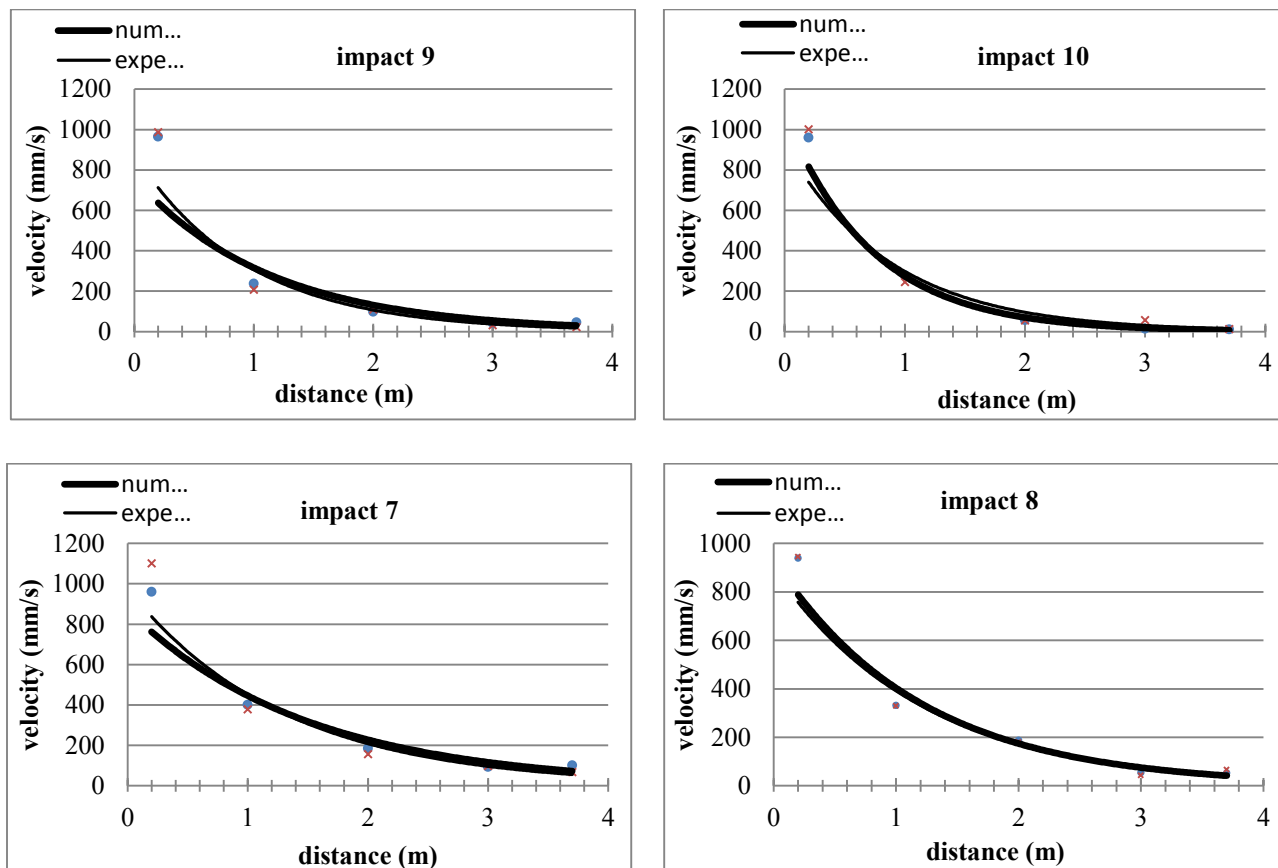
**ب) تعیین فاصله ایمن افقی در خاک متراکم**

با توجه به این که بیشینه‌ی سرعت ذره برای سازه‌های مجاور ۵۰ میلی‌متر بر ثانیه می‌باشد، بنابراین فاصله غیر ایمن افقی از محل اصابت ضربه برای نتایج آزمایشگاهی و عددی در جدول ۷ آمده است. با توجه به این که فاصله ایمن افقی برای دو نوع خاک متراکم و سست برای ما دارای اهمیت است لذا نتایج حاصل از دو نوع خاک درباره فاصله غیر ایمن در نمودار بالا نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۰، به ازای خاک سست، ساختمان‌های مجاور باید در



شکل ۸. دیاگرام‌های بیشینه سرعت ذره-فاصله جهت تعیین فاصله ایمن افقی برای سازه‌های مجاور- خاک سست (ادامه دارد)

Fig. 8. Maximum particle velocity diagrams - distance to determine the safe horizontal distance for adjacent structures - loose soil. (Continue)



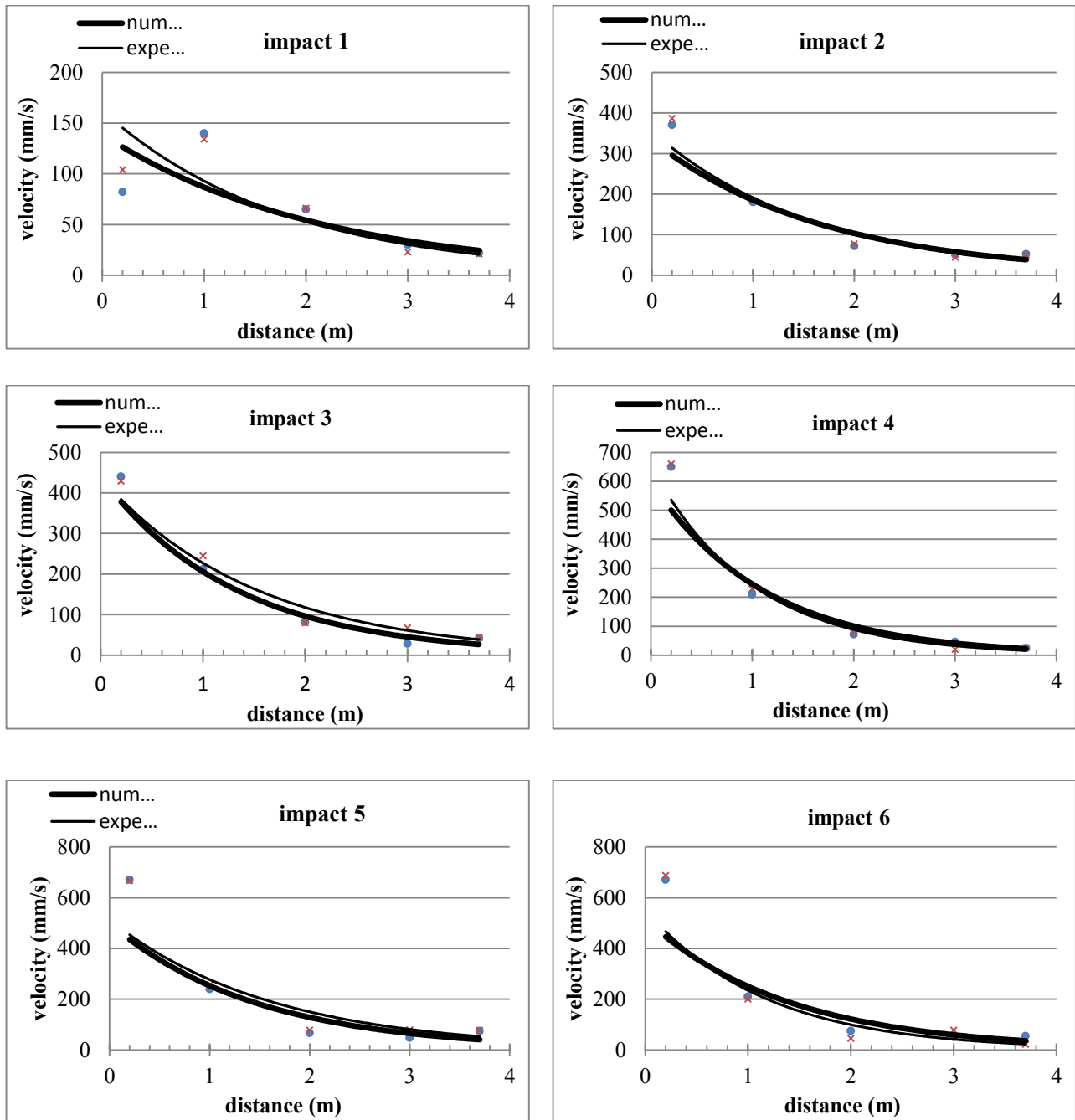
شکل ۸. دیاگرام‌های بیشینه سرعت ذره-فاصله جهت تعیین فاصله ایمن افقی برای سازه‌های مجاور- خاک سست

Fig. 8. Maximum particle velocity diagrams - distance to determine the safe horizontal distance for adjacent structures - loose soil.

جدول ۷. فاصله غیر ایمن افقی از محل اصابت ضربه در خاک متراکم

Table 7. Unsafe horizontal distance from the impact location in dense soil.

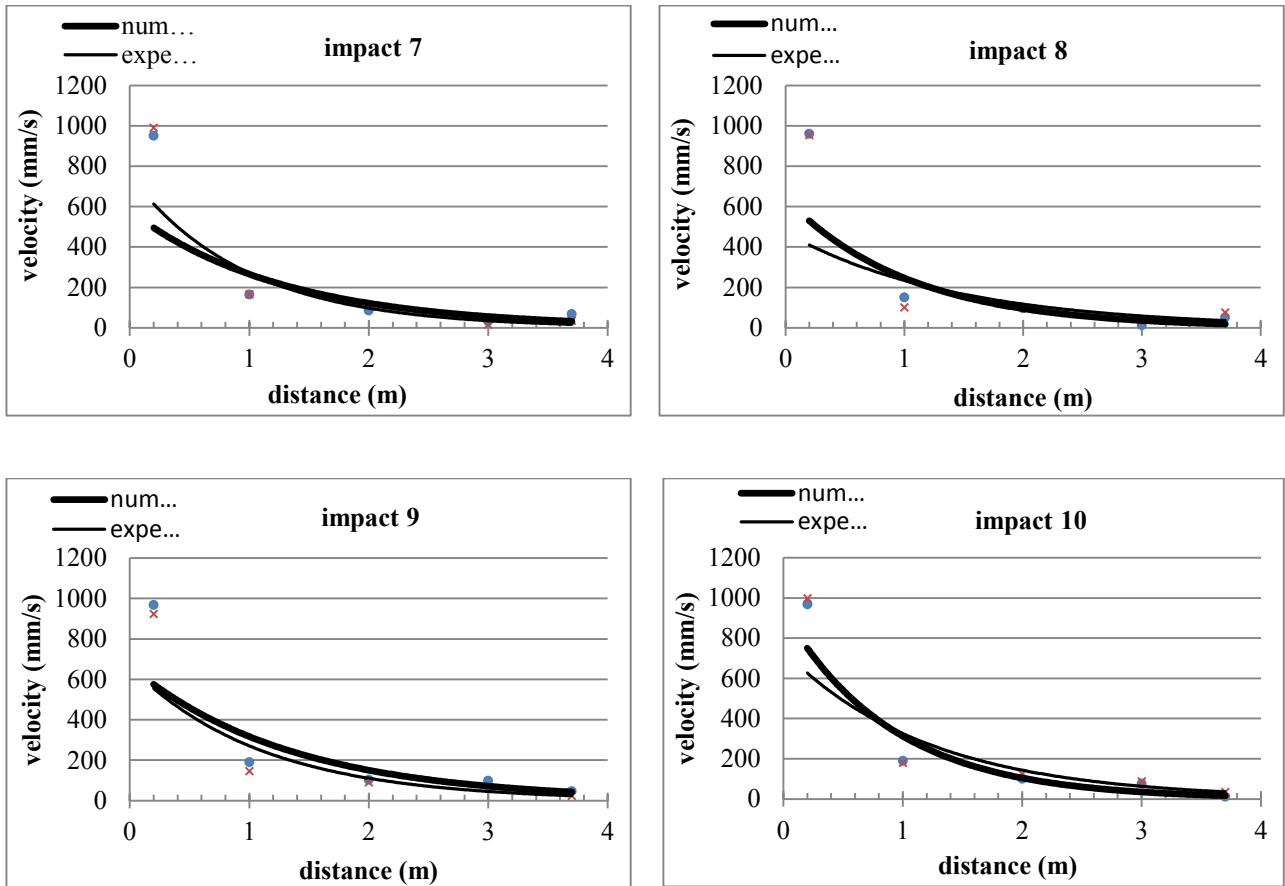
ضربه	نتایج آزمایشگاهی (متر)	نتایج عددی (متر)
۱	۲/۲	۲/۱
۲	۳/۱	۳/۱
۳	۳/۳	۲/۸
۴	۳	۳/۱
۵	۳/۳	۳/۲
۶	۲/۹	۳
۷	۲/۸	۳
۸	۳	۲/۹
۹	۳	۳/۱
۱۰	۳/۲	۳



شکل ۹. دیاگرام‌های بیشینه سرعت ذره- فاصله جهت تعیین فاصله ایمن افقی برای سازه‌های مجاور- خاک متراکم (ادامه دارد)

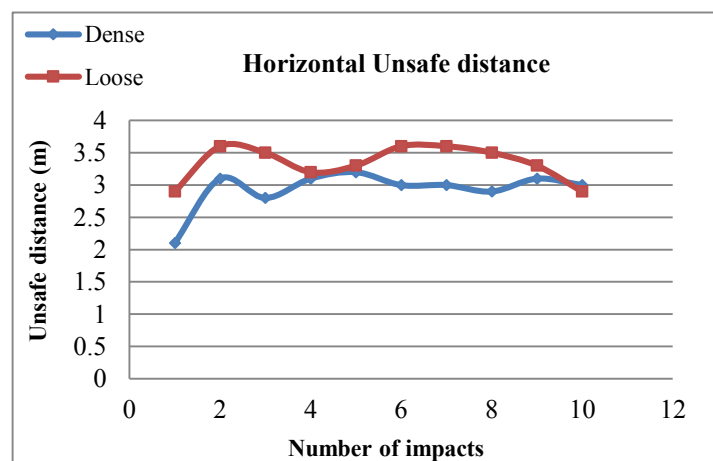
Fig. 9. Maximum particle velocity diagrams - distance to determine the safe horizontal distance for adjacent structures - dense soil. (Continude)





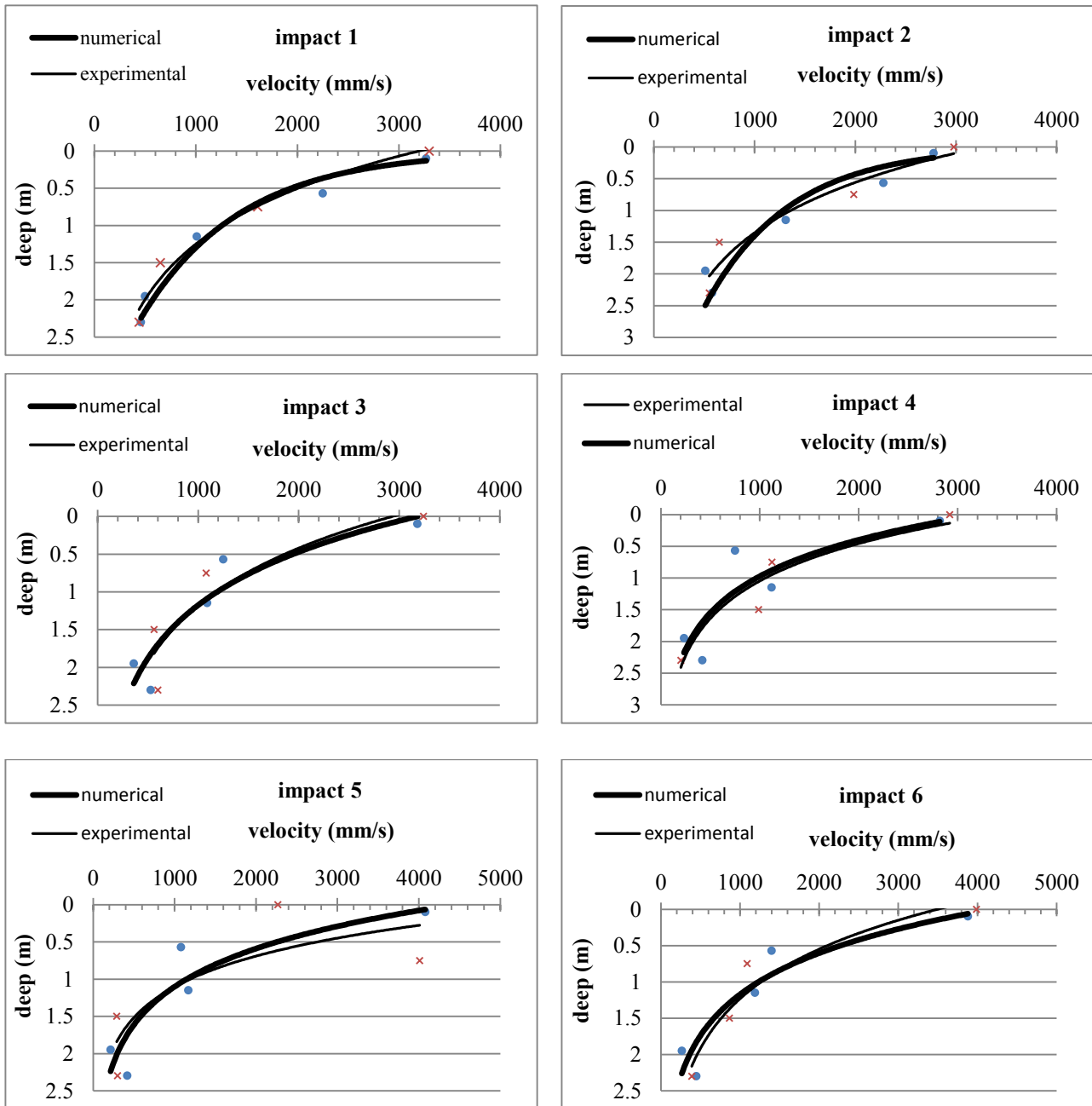
شکل ۹. دیاگرام‌های بیشینه سرعت ذره- فاصله جهت تعیین فاصله ایمن افقی برای سازه‌های مجاور- خاک متراکم

Fig. 9. Maximum particle velocity diagrams - distance to determine the safe horizontal distance for adjacent structures - dense soil.



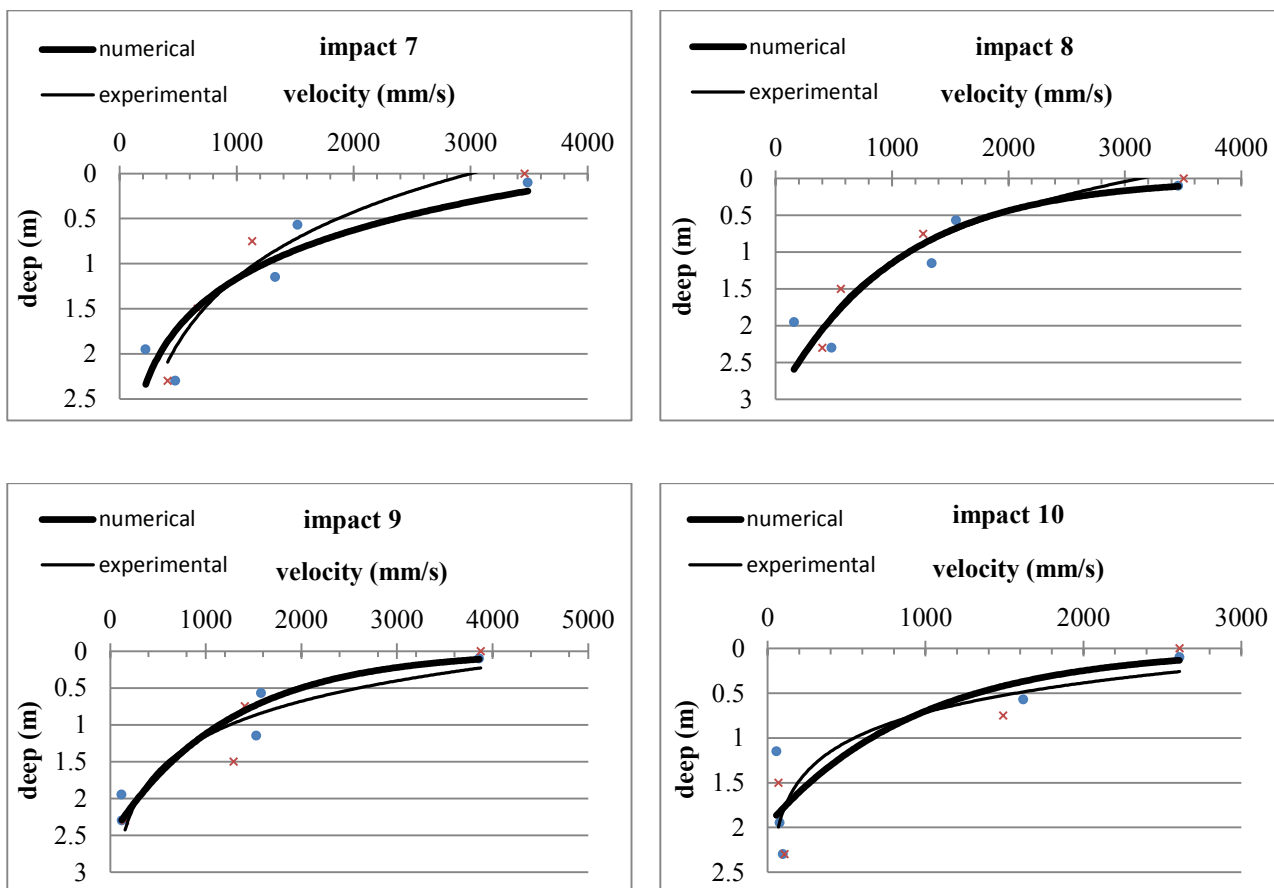
شکل ۱۰. مقایسه فاصله غیر ایمن افقی در خاک متراکم و سست (نتایج عددی)

Fig. 10. Comparison of horizontal unsafe distance in dense and loose soil (numerical results).



شکل ۱۱. دیاگرام‌های بیشینه سرعت ذره- عمق مدفون جهت تعیین فاصله ایمن عمودی برای سازه‌های مدفون- خاک سست (ادامه دارد)

Fig. 11. Maximum particle velocity-buried depth diagrams to determine vertical safe distance for buried structures - loose soil. (Continue)



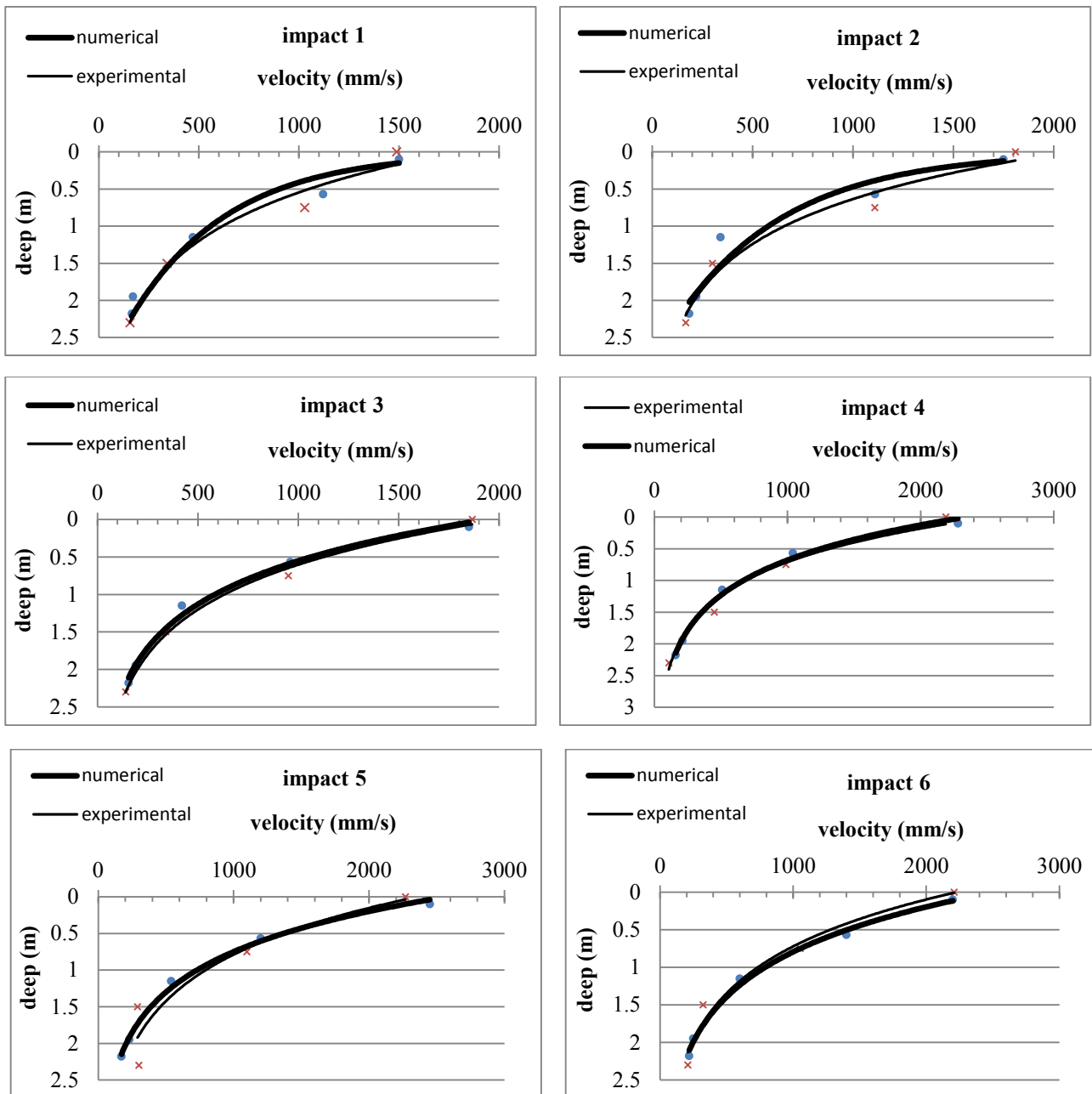
شکل ۱۱. دیاگرام‌های بیشینه سرعت ذره- عمق مدفون جهت تعیین فاصله ایمن عمودی برای سازه‌های مدفون- خاک سست.

Fig. 11. Maximum particle velocity-buried depth diagrams to determine vertical safe distance for buried structures - loose soil.

جدول ۸. فاصله غیر ایمن عمودی از محل اصابت ضربه در خاک سست

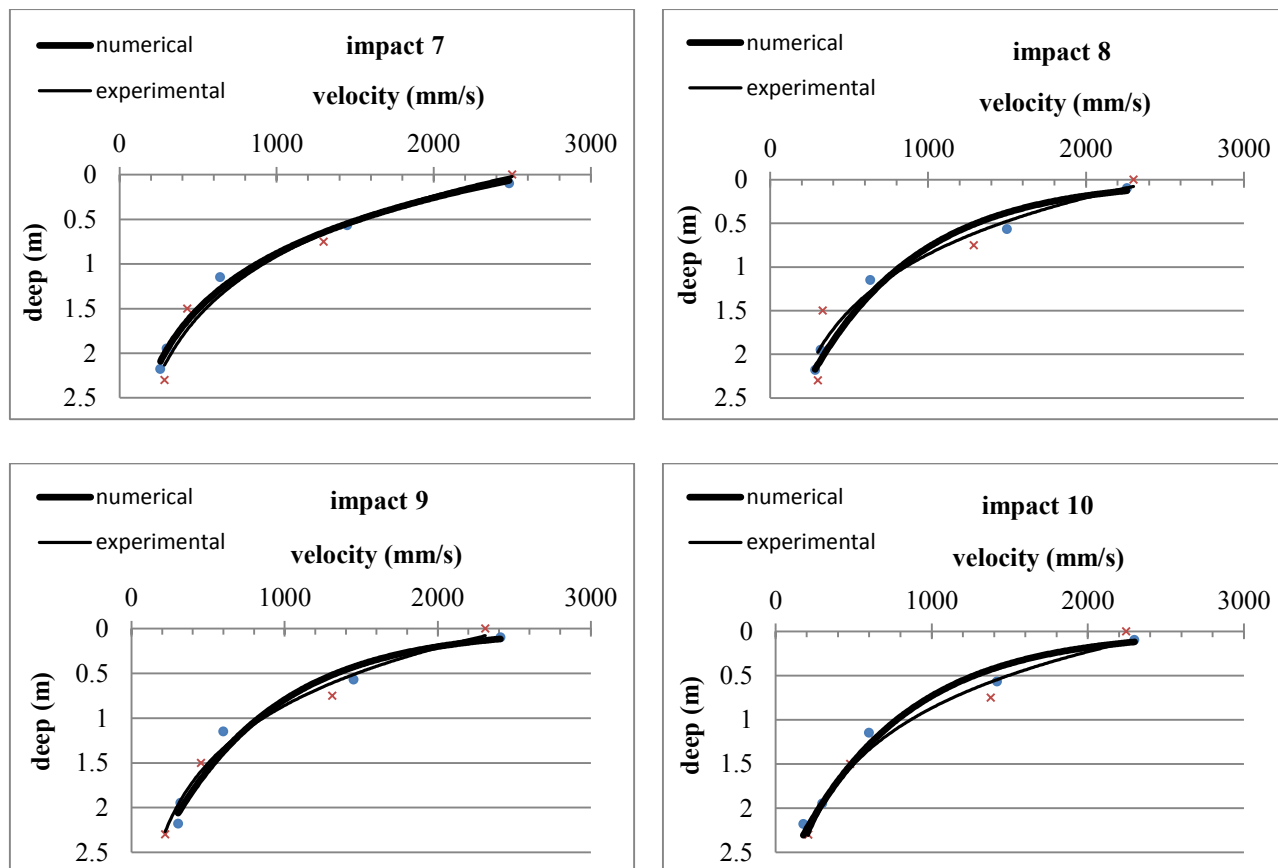
Table 8. Vertical unsafe distance from the impact location in loose soil.

ضربه	نتایج آزمایشگاهی (متر)	نتایج عددی (متر)
۱	۱/۹	۲/۱
۲	۲	۲/۲
۳	۱/۷۵	۱/۷۵
۴	۱/۷	۱/۶
۵	۱/۵	۱/۷
۶	۱/۸	۱/۷
۷	۱/۸۵	۱/۷
۸	۱/۸	۱/۸
۹	۱/۷۵	۱/۷۵
۱۰	۱/۲	۱/۲۵



شکل ۱۲. دیاگرام‌های بیشینه سرعت ذره- عمق مدفون جهت تعیین فاصله ایمن عمودی برای سازه‌های مدفون- خاک متراکم. (ادامه دارد)

Fig. 12. Maximum particle velocity-buried depth diagrams to determine vertical safe distance for buried structures-dense soil. (Continue)



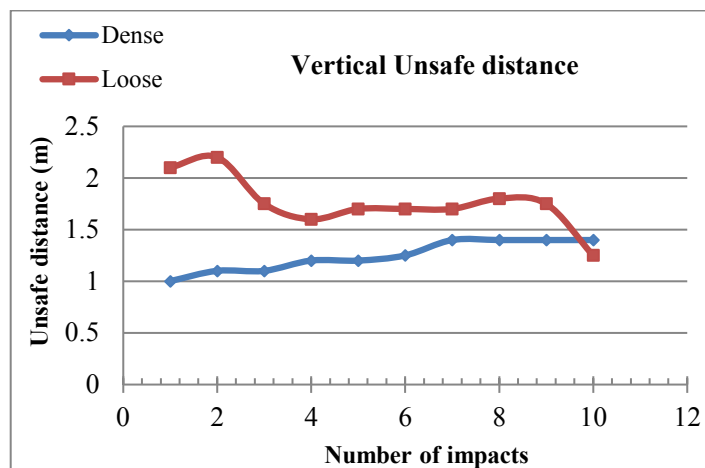
شکل ۱۲. دیاگرام‌های بیشینه سرعت ذره- عمق مدفون جهت تعیین فاصله ایمن عمودی برای سازه‌های مدفون- خاک متراکم.

Fig. 12. Maximum particle velocity-buried depth diagrams to determine vertical safe distance for buried structures-dense soil.

جدول ۹. فاصله غیر ایمن عمودی از محل اصابت ضربه در خاک متراکم

Table 9. Unsafe vertical distance from the impact location in dense soil.

ضربه	نتایج آزمایشگاهی (متر)	نتایج عددی (متر)
۱	۱/۱	۱
۲	۱/۲	۱/۱
۳	۱/۲	۱/۱
۴	۱/۲	۱/۲
۵	۱/۳	۱/۲
۶	۱/۲۵	۱/۲۵
۷	۱/۴۵	۱/۴
۸	۱/۴۵	۱/۴
۹	۱/۴	۱/۴
۱۰	۱/۴	۱/۴



شکل ۱۳. مقایسه فاصله غیر ایمن عمودی در خاک سست و متراکم (نتایج عددی)

Fig. 13. Comparison of vertical unsafe distance in dense and loose soil (numerical results).

جدول ۱۰. مشخصات مصالح

Table 10. Material specifications.

نوع خاک	درصد تراکم نسبی	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	مدول الاستیسیته خاک (pa)
سست	۳۷/۳	۱۵۰۵/۵	$۱۵ \times ۱۰^۶$
متراکم	۷۱/۸	۱۶۷۱/۲	$۶۰ \times ۱۰^۶$

و نیرو به دست آمده از نرم افزار آباکوس به عنوان داده‌های ورودی نرم افزار متلب تحت فایل متنی به نرم افزار داده شده و مورد آنالیز قرار می‌گیرند. پس از آنالیز، خروجی‌های برنامه شامل نمودار سرعت در حوزه زمان، نیرو در حوزه زمان، تابع انتقال در حوزه فرکانس و مقادیر پارامترهای دینامیکی به دست آمده می‌باشند که مقایسه آن‌ها با مدل آزمایشگاهی در نمودارهای زیر نشان داده شده است.

۴-۴ - مرحله چهارم: تعیین عمق بهبود به وسیله نمودار تنش - عمق در این روش ابتدا مقادیر تنش در روی سطح خاک و زیر پی توسط نرم افزار آباکوس استخراج شده و به وسیله توزیع تنش بوزینسک رابطه (۴) مقادیر تنش در عمق‌های مختلف به دست می‌آید. سپس مقادیر تنش در عمق‌های زیر پی با استفاده از نرم افزار آباکوس و توزیع تنش بوزینسک در یک نمودار رسم شده و با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه می‌گردد. در اینجا نمودارهای تنش - عمق برای دستگاه ضربه‌زن شماره ۲ آمده است [۲۷].

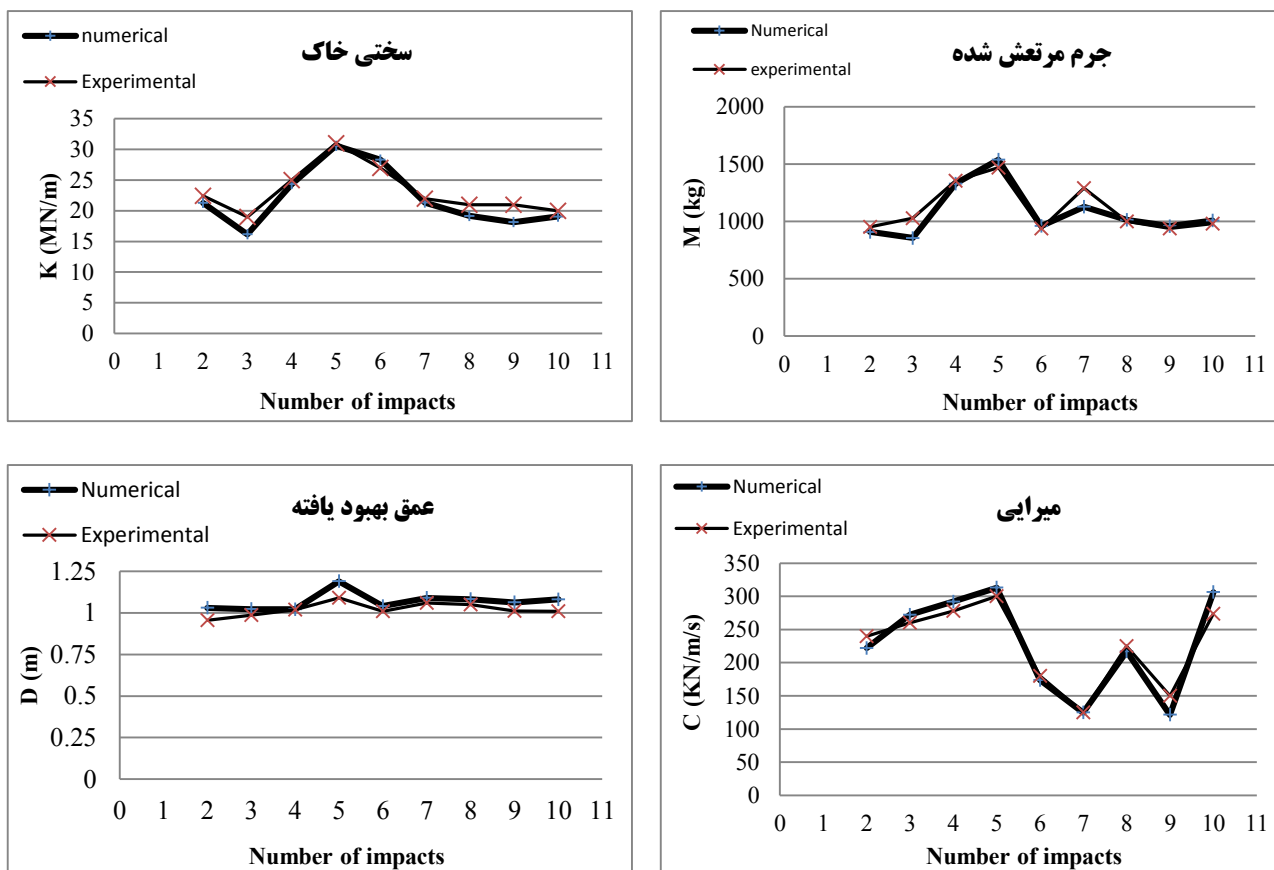
سازه‌های مدفون باید در فاصله‌ای بیشتر از  $۱/۶۰$  متر قرار گیرند. رعایت این فاصله در جهت حاشیه اطمینان کافی برای تراکم دینامیکی می‌باشد.

۴-۳ - مرحله سوم: تعیین پارامترهای دینامیکی خاک

در این مرحله نتایج خروجی از نرم افزار آباکوس توسط نرم افزار متلب و روش وک مورد آنالیز قرار گرفته و پارامترهای دینامیکی خاک استخراج می‌شوند. نتایج شامل ۴ دستگاه ضربه‌زن سبک می‌باشد که هر دستگاه بر روی دو نوع خاک ضربه وارد می‌کند. مشخصات خاک‌ها در جدول ۱۰ آمده است.

از جمله پارامترهایی که توسط روش وک و با استفاده از برنامه متلب به دست می‌آیند عبارتند از ضریب سختی خاک (K)، ضریب میرایی خاک (C)، جرم خاک مرتعش شده (M) و عمق بهبود یافته (D). نمودارهای سرعت





شکل ۱۴. مقایسه نتایج به دست آمده از نرم‌افزار آباکوس با نتایج مدل آزمایشگاهی

Fig. 14. Comparison of the results obtained from Abacus software with the results of the laboratory model.

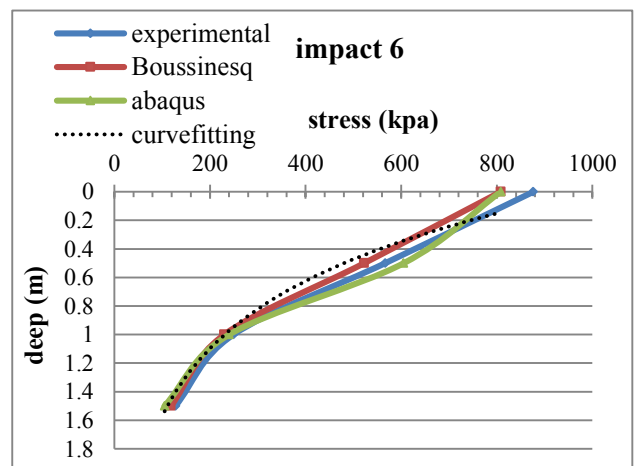
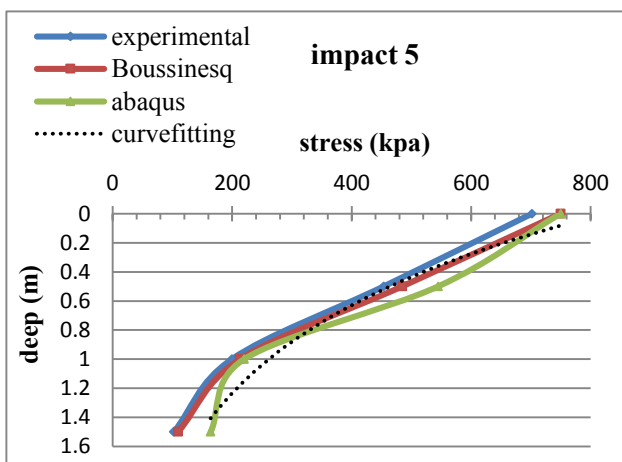
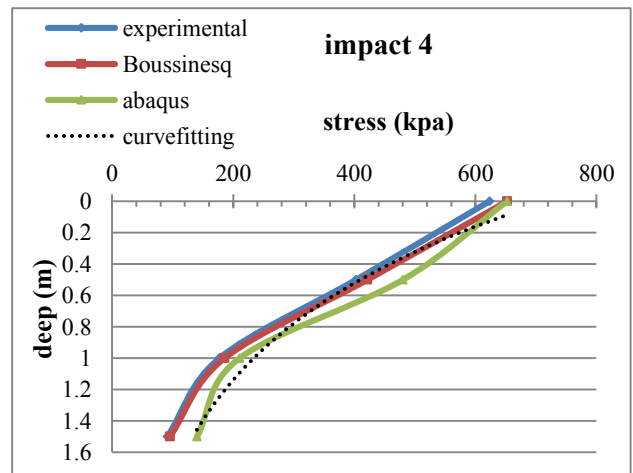
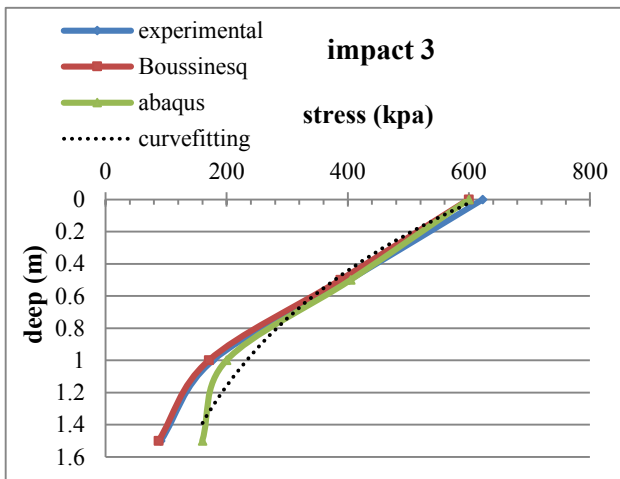
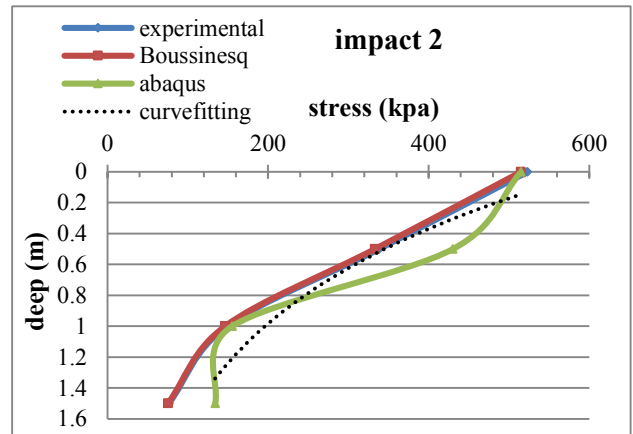
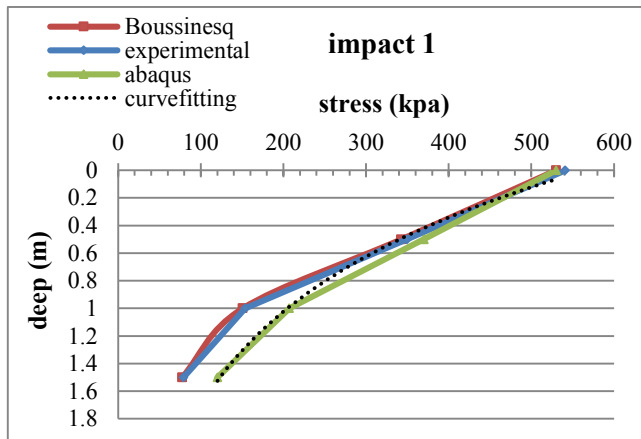
که عمق بهبود در ضربات یک تا ده تقریباً در حدود ۰/۹ تا ۱/۲ متر می‌باشد که با نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی دارد. برای مقایسه بهتر نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی بهترین منحنی از نقاط استخراج شده از نرم‌افزار عبور داده شده، تا عمق بهبود یافته تشخیص داده شود. پس از رسم نمودارهای مورد نظر در مدل‌سازی عددی و مقایسه آن با نمودارهای آزمایشگاهی نتایج زیر حاصل شد. تطابق بالای نمودارهای آزمایشگاهی و نمودارهای عددی نشان دهنده صحت نتایج پروژه حاضر می‌باشد. به عبارت دیگر نتایج کار آزمایشگاهی، نتایج کار نرم‌افزاری را به خوبی تأیید می‌کند و به ازای یک ضربه مشخص تنش در عمق رو به کاهش است و مقدار تنش در عمق‌های بیشتر رو به کاهش است؛ به عنوان مثال در ضربه ۲، تنش در عمق ۰/۵ متر، ۳۴۰ کیلوپاسکال، در عمق ۱ متر ۲۰۰ کیلوپاسکال و در عمق ۱/۵

$$\Delta p = q \left\{ 1 - \frac{1}{\left[ \left( \frac{r}{z} \right)^2 + 1 \right]^{1.5}} \right\} \quad (4)$$

که در این معادله  $q$  تنش بر روی سطح زمین (کیلوپاسکال)،  $r$  شعاع پی از مرکز (متر) و  $z$  عمق خاک (متر) می‌باشد.

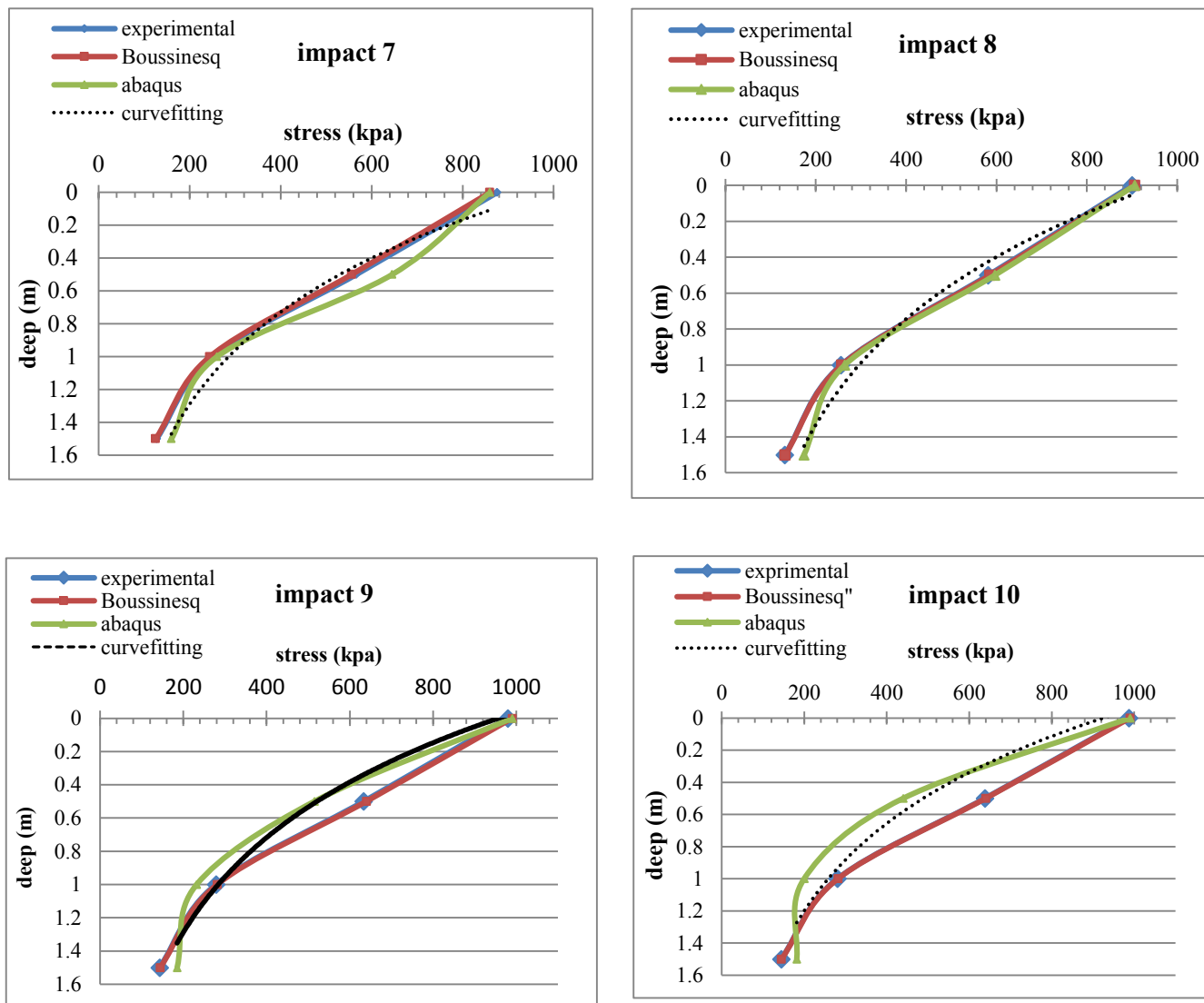
#### الف) نمودارهای تنش - عمق برای خاک‌های متراکم

با توجه به محدودیت در تعداد صفحات مقاله از آوردن نمودارهای تنش - عمق برای خاک سست صرف نظر و به گفتن نتایج بسنده شده است. با توجه به این که عمق بهبود یافته در محل تغییر شیب نمودار تنش - عمق می‌باشد، در نتیجه از نمودارهای رسم شده (شکل ۱۵) می‌توان نتیجه گرفت



شکل ۱۵. مقایسه توزیع تنش نرم افزار آباکوس، توزیع تنش بوزینسک و نتایج آزمایشگاهی در خاک متراکم. (ادامه دارد)

Fig. 15. Comparison of Abacus software stress distribution, Bozinsk stress distribution and laboratory results in. (Continue)



شکل ۱۵. مقایسه توزیع تنش نرم افزار آباکوس، توزیع تنش بوزینسک و نتایج آزمایشگاهی در خاک تراکم.

Fig. 15. Comparison of Abacus software stress distribution, Bozinsk stress distribution and laboratory results in.

متر ۱۲۰ کیلوپاسکال می باشد و در ضربه ۶ این مقادیر در عمق ۰/۵ متر ۳۸۰ کیلوپاسکال، در عمق ۱ متر ۲۲۰ کیلوپاسکال و در عمق ۱/۵ متر ۱۲۰ کیلوپاسکال می باشد. با این توضیحات، تفاوت مقدار تنش بین ضربه ۵ و ۶ در عمق ۰/۵ متر ۱۰ کیلوپاسکال، در عمق ۱ متر ۱۰- کیلوپاسکال و در عمق ۱/۵ متر ۰ کیلوپاسکال است که بر این اساس می توان گفت تا ضربه ۵ نرخ رشد تنش دارای نوسانات زیادی هست، اما از ضربه ۵ به بعد نرخ رشد تنش در خاک تقریباً ثابت می شود. از روی ثابت شدن نرخ رشد می توان نتیجه گیری کرد که در ضربه ۵ در منطقه مورد تأثیر، خاک به تراکم مطلوب رسیده است. نتایج اختلاف مقادیری بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج عددی

متر ۱۲۰ کیلوپاسکال می باشد، اما در ضربه ۳ این مقادیر در عمق ۰/۵ متر ۳۶۵ کیلوپاسکال، در عمق ۱ متر ۲۴۵ کیلوپاسکال و در عمق ۱/۵ متر ۱۶۰ کیلوپاسکال می باشد؛ که در ضربات بعدی نیز مقدار تنش افزایش پیدا می کند.

تفاوت مقدار تنش بین ضربه ۲ و ۳ در عمق ۰/۵ متر (ناحیه ای که تغییرات تنش کم است) ۲۵ کیلوپاسکال، در عمق ۱ متر (ناحیه ای که تغییرات تنش متوسط است) ۴۵ کیلوپاسکال و در عمق ۱/۵ متر (ناحیه ای که تغییرات تنش زیاد است) ۶۰ کیلوپاسکال است. در حالی که در ضربه ۵ تنش در عمق ۰/۵ متر ۳۷۰ کیلوپاسکال، در عمق ۱ متر ۲۳۰ کیلوپاسکال و در عمق ۱/۵

جدول ۱۱. تعیین محدوده عمق بهبود در خاک متراکم

Table 11. Determining the improved depth range of in dense soil.

ضربه	محدود عمق بهبود (متر) (آزمایشگاهی)	محدوده عمق بهبود (متر) (نرم افزار)
۱	۱-۱/۲	۰/۱-۹/۲
۲	۱-۱/۲	۰/۱-۹/۲
۳	۱-۱/۲	۰/۱-۸/۲
۴	۰/۱-۹/۲	۰/۱-۸/۲
۵	۰/۱-۹/۲	۰/۱-۸/۲
۶	۱-۱/۲	۱-۱/۲
۷	۱-۱/۲	۰/۱-۹/۲
۸	۱-۱/۲	۰/۱-۸/۲
۹	۱-۱/۲	۰/۱-۹/۲
۱۰	۱-۱/۲	۰/۱-۹/۲

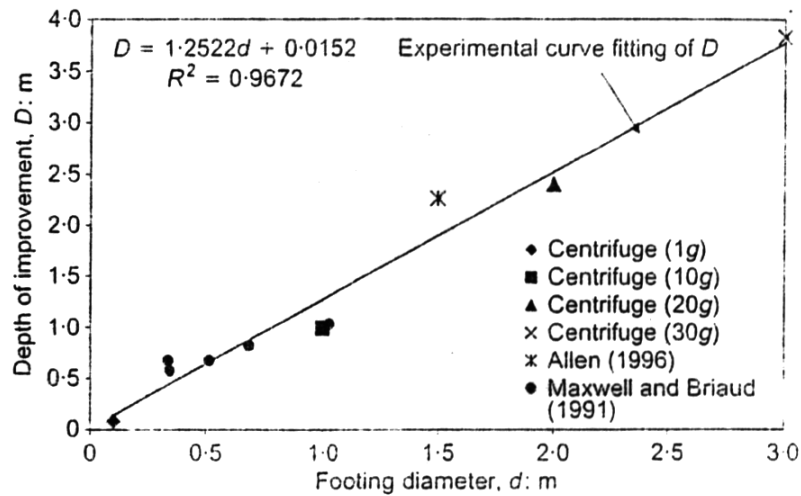
جدول ۱۲. تعیین محدوده عمق بهبود در خاک سست

Table 12. Determining the improved depth range of in loose soil.

ضربه	محدود عمق بهبود (متر) (آزمایشگاهی)	محدوده عمق بهبود (متر) (نرم افزار)
۱	۱-۱/۲	۰/۱-۹/۲
۲	۱-۱/۲	۰/۱-۹/۲
۳	۱-۱/۲	۰/۱-۸/۲
۴	۱-۱/۲	۰/۱-۹/۲
۵	۱-۱/۲	۰/۱-۷/۲
۶	۱-۱/۲	۰/۱-۹/۲
۷	۱-۱/۲	۰/۱-۹/۲
۸	۱-۱/۲	۰/۱-۹/۲
۹	۱-۱/۲	۰/۱-۹/۲
۱۰	۱-۱/۲	۰/۱-۹/۲

زیاد است لذا انتظار می‌رفت در عمق‌های پایین‌تر نتایج تنش با نتایج تنش آزمایشگاهی کمی اختلاف داشته باشند که این موضوع به دلیل این که در عمق‌های بیشتر، نتایج برای ما اهمیت ندارد چندان حائز اهمیت نمی‌باشد. نتایج مربوط به تعیین محدوده عمق بهبود در جداول ۱۱ و ۱۲ آمده است که به صورت نتایج حاصل از آزمایشگاه و نتایج به دست آمده از نرم‌افزار می‌باشند.

وجود دارد علت آن ناشی از موارد زیر می‌باشد.  
 ۱- تعداد خروجی‌های نتایج در آزمایش سانتریفیوژ ۱۰۲۴ عدد می‌باشد که در نتایج عددی این مقدار ۵۲۵ عدد می‌باشد.  
 ۲- بازه زمانی بین نتایج آزمایش سانتریفیوژ ۶-۲۵ می‌باشد که در نتایج عددی بازه زمانی ۴-۲۵ می‌باشد.  
 به علت این که در عمق‌های بیشتر نمونه خاک، اندازه مش‌ها تقریباً



شکل ۱۶. نتایج آزمایش سانتریفیوژ در شتاب‌های ۱g، ۱۰g، ۲۰g، ۳۰g و نتایج صحرایی پرویزی و مریفاید، آلن، ماکسول و بریاد نسبت به قطر پی

Fig. 16. Centrifuge test results at accelerations of 1 g, 10 g, 20 g, 30 g and Parvizi and Merrifield, Allen, Maxwell and Briaud accuracy results relative to the diameter.

$$D=1.2522d+0.0152$$

(۵)

در این معادله  $d$  قطر پی (متر) و  $D$  عمق بهبود یافته (متر) می‌باشد. معادله خط به دست آمده سریع‌ترین روش برای تخمین عمق بهبود یافته در دستگاه ضربه‌زن سبک به ازای قطرهای مختلف پی می‌باشد. با توجه به نمودار مشخص است که به ازای قطر ۱ متر عمق بهبود یافته تقریباً ۱/۲۶ متر می‌باشد که با نتایج به دست آمده از نرم‌افزار نزدیک است.

#### ۶- نتیجه‌گیری

۱- این تحقیق منجر به توسعه سیستم ضربه با انرژی ثابت (ارتفاع سقوط و وزن ثابت) شده است؛ این پژوهش بر روی دستگاه ضربه‌زن با انرژی کم (وزن ضربه و ارتفاع سقوط کم) انجام گرفته است، لذا نتایج این تحقیق را می‌توان در دستگاه‌های ضربه‌زن با انرژی زیاد (ارتفاع و وزن ضربه بیشتر) توسعه داد.

۲- بررسی تراکم دینامیکی با استفاده از نرم‌افزار این امکان را به کاربر می‌دهد که در پایان هر ضربه پارامترهای دینامیکی را در اختیار داشته باشد. به عنوان مثال در دستگاه ضربه‌زن شماره ۲ (۸۷۵ کیلوگرم) به این نتیجه

#### ۵- صحت‌سنجی عمق بهبود یافته به دست آمده از تئوری وک با سایر نتایج آزمایشگاهی

تعدادی آزمایش توسط دستگاه سانتریفیوژ روی خاک ماسه‌ای کنترل شده با تراکم نسبی کم برای وزنه ۸۷۵ کیلوگرم که از ارتفاع ۱ متر رها شده انجام گرفته است (شکل ۱۶). این آزمایش‌ها توسط پرویزی و مریفاید [۲۷] (۲۰۰۴) در دستگاه سانتریفیوژ در شتاب‌های مختلف و آلن<sup>۱</sup> (۱۹۹۶)، ماکسول<sup>۲</sup> و بریاد<sup>۳</sup> (۱۹۹۱) [۲۸] در مدل صحرا انجام گرفته است. با استفاده از این نمودار می‌توان عمق بهبود یافته دستگاه ضربه‌زن را با تغییر قطر پی تخمین زد. لازم به ذکر است نمودارهای ضربه سختی بستر و ضربه میرایی به ازای قطر پی‌های مختلف توسط این افراد تخمین زده شده است. که با مراجعه به مرجع مربوطه می‌توان از این نمودارها برای سایر موارد استفاده نمود.

در نمودار فوق نتایج آزمایش سانتریفیوژ در شتاب‌های ۱g، ۱۰g، ۲۰g، ۳۰g و نتایج صحرایی آلن، ماکسول و بریاد نسبت به قطر پی نشان داده شده است. برای استفاده، بهترین خط از بین نتایج عبور داده شده است که معادله خط گذرنده در روی نمودار نشان داده شده است.

- 1 Allen
- 2 Maxwell
- 3 Briaud

- ارتفاع سقوط: ۱ متر
- فاصله غیر ایمن افقی: ۳/۸۰ متر
- فاصله غیر ایمن عمودی: ۲/۳۰ متر
- تعداد ضربه مورد نیاز برای رسیدن به بیشینه‌ی سختی: ۵ ضربه
- عمق بهبود یافته زیر پی: ۰/۹ الی ۱/۲ متر

## ۷- فهرست علائم

### علائم انگلیسی

$A$	سطح تحت پوشش، $m^2$
$C$	ضریب میرایی خاک، $KN/m/s$
$D$	عمق بهبود یافته
$E$	مدول الاستیسیته، $N/m^2$
$F_d$	نیروی میراگر، $KN$
$g$	شتاب ثقل، $m/s^2$
$h$	ارتفاع سقوط، $m$
$k$	ضریب سختی، $N/m$
$M$	جرم، $kg$
$q$	تنش، $KPas$
$r$	شعاع، $m$
$u$	سرعت ذره، $m/s$
$V$	سرعت برخورد، $m/s$
$V_s$	سرعت موج برشی، $m/s$
$Z$	عمق، $m$
$r$	شعاع، $m$

### علائم یونانی

$\alpha$	توان سرعت
$v$	ضریب پواسون
$\rho$	چگالی، $kg/m^3$

### زیرنویس

$d$	میراگر
$s$	موج برشی

رسیدیم که به ازای ضربه ۵ در خاک سست به بیشینه‌ی سختی می‌رسیم و ضربات بیشتر باعث کاهش سختی می‌شوند. بنابراین به کاربر دستور داده می‌شود که برای خاک سست تا ۵ ضربه کوبیده شود.

۳- بیشینه‌ی سرعت ذره در خاک متراکم کمتر از بیشینه‌ی سرعت ذره در خاک سست می‌باشد؛ اما در ضربه پنجم بیشینه سرعت ذره در ۲ نمونه متراکم و سست با هم برابر شده و در نتیجه فاصله غیرایمن افقی در دو نمونه خاک یکسان می‌شود که نشان دهنده این است خاک در ضربه پنجم به بیشترین سختی خود رسیده است.

۴- حداقل فاصله افقی سازه‌های مجاور از محل اصابت کوبه باید بیشتر از ۲/۳۰ متر در خاک متراکم و ۳/۸۰ متر در خاک سست باشد.

۵- حداقل عمق سازه‌های مدفون در زیر خاک از محل اصابت کوبه باید بیشتر از ۱/۶۰ متر در خاک متراکم و ۲/۳ متر در خاک سست باشد.

۶- عمق بهبود یافته با استفاده از روش وک و نمودار تنش- عمق به دست آمد. عمق بهبود یافته با استفاده از نرم‌افزار آباکوس و توزیع تنش بوزینسک و نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید و مطابقت خوبی با هم دارند.

به علت این که تعیین دقیق عمق بهبود یافته با استفاده از نمودار تنش کمی مشکل می‌باشد، لذا از محدوده عمق بهبود یافته استفاده شده است؛ به عنوان مثال در خاک متراکم و در ضربه ۲ میزان عمق بهبود یافته با استفاده از روش وک حدود ۱ متر می‌باشد و با استفاده از نمودار تنش- عمق میزان عمق بهبود یافته حدود ۱/۰۵ می‌باشد که مقدار خطای نسبی ۵ درصد محاسبه شد.

۷- عمق بهبود به دست آمده در این دستگاه ضربه‌زن (دستگاه ضربه‌زن با وزن ۸۷۵ کیلوگرم و ارتفاع سقوط ۱ متر) به ازای قطر پی ۱ متر حدود ۱/۲ متر (مطابق با جداول ۱۱ و ۱۲) شده است که با نتایج سانتریفیوژ در شتاب‌های ۱g، ۱۰g، ۲۰g، ۳۰g و نتایج صحرایی پرویزی و مریفاید، آلن، ماکسول و بریاد همخوانی دارد.

۸- با رسم نمودارهای سختی خاک، میرایی، عمق بهبود یافته و جرم مرتعش شده به ازای تعداد ضربات، می‌توان نتیجه گرفت به ازای ضربه ۵ علاوه بر سختی خاک، عمق بهبود یافته و جرم مرتعش شده به بیشینه خود می‌رسد و بعد از ضربه ۵ سیر نزولی دارند.

۹- در این تحقیق دستگاه ضربه‌زن سبک با مشخصات زیر بر روی خاک سست طراحی شد:

- وزن کوبه: ۸۷۵ کیلوگرم



- of low energy dynamic compaction, International Conference on Geotechnical Centrifuge Modelling, (1998) 819-824.
- [12] Q. GU, F.H. Lee, ground response to dynamic compaction of dry sand, *Journal of Geotechnique*, 52.7 (2002) 481-493.
- [13] R.A. Scott, R.W. Pearce, Soil compaction by impact, *Journal of Geotechnique*, 25.1 (1975) 19-30.
- [14] J.H. Roesset, E. Kausel, V. Cuellar, J.L. Monte, J. Valerio, Impact of weight falling onto the ground, *Journal of Geotechnical Engineering*, 120.8 (1993) 1394-412.
- [15] A.J. Deeks, M.F. Randolph, A Simple model for inelastic footing response to transient loading, *International Journal Numer Meth Engineering*, 19 (1995) 307-29.
- [16] M.Parvizi, C.M.Merrifield, Centrifuge modelling of soil improvement by low energy dynamic compaction (LEDC), *soil mechanics and foundation Engineering Canada original*, 48.6 (2000).
- [17] C. Zhou, et al. Evaluation on Improvement Zone of Foundation after Dynamic Compaction, *Journal of Applied Sciences*, 11.5 (2021) 2156.
- [18] S. Brazvan, M. Fakhri, Correlation study of DCP, CBR and three-axis cycle test results (in Qom-Semnan axis), *Journal of Transportation Engineering*, 4.1 (2012) 11-21. (In Persian)
- [19] M. Bakhtiari, E. Kemalpour asl, J. Ahadian, Numerical modeling of soil dynamic density using finite difference method, *Journal of Advanced Applied Geology, Shahid Chamran University of Ahvaz*, 8.1 (2018) 60-68.
- [20] M. Pognaby, A. Hamidi, Modeling of ground vibrations in dynamic compaction operations on dry sandy soils, *Journal of Modeling in Engineering*, 32 (2013) 1-9. (In Persian)
- [21] A. Ghanbari, Study of soil modulus of elasticity in alluvium south of Tehran, *Journal of Earth Sciences*, 18.17 (2009) 3-8. (In Persian)
- [22] J. Wiss, *Construction Vibrations: State of the Art*, ASCE Special Geotechnical Publication, 107.GT2 (1981) 167-181.
- [1] E. Kamalpour, M. Bakhtiari, J. Ahadiyan, Investigation of the effect of Hammer radius parameters and number of impact on soil improvement by dynamic density method In line with the construction of offshore structures, *Journal of Marine Science and Technology*, 18.4 (2019) 75-90. (In Persian)
- [2] B. Scott, M. Jaksa, P. Mitchell, Depth of influence of rolling dynamic compaction, *Journal of Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, (2021) 1-10.
- [3] L. Ménard, Y. Broise, Theoretical and practical aspects of dynamic consolidation, *Journal of Geotechnique*, 25.1 (1975) 3-16.
- [4] R. L. Kuhlemeyer, J. Lysmer, Finite element method accuracy for wave propagation problems, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 99.5 (1973) 421-427.
- [5] J.M. West, B.C. Scolombe, Dynamic consolidation as an alternative foundation, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 11.6 (1975) 4-52.
- [6] A. Leonards, A. Cutter, D. Holtz, Dynamic compaction of granular soils, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 106.1 (1981) 35-44.
- [7] J. A. Charles, D. Burford, K. S. Watts, Field studies of the effectiveness of dynamic consolidation, 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, (1993) 399-412.
- [8] B.C. Scolombe, *Dynamic compaction Ground improvement*, Moseley. M.p.ED, (2004) 93-118.
- [9] R.G. Lukas, *Geotechnical engineering circular, Dynamic Compaction Federal Highway Report*, FHWA-SA-95-037, 1995.
- [10] O. Orrje, The use of dynamic plate load tests in determining deformation properties of soil, *Royal Institute Technology (KTH), Stockholm Sweden*, 56 (1996).
- [11] CM. Merrifield, Cruickshank, M. Parvizi, *Modelling*

- [26] P.W. Mayne, J.S. Jones, J.C. Dumas, Ground response to dynamic compaction, ASCE Special Geotechnical Publication, 6 (1984) 757-774.
- [27] M. Parvizi, C.M. Merrifield, Centrifuge validation of soil improvement prediction using the WAK test analysis, Manchester School of Engineering, University of Manchester, UK, 1 (2004) 33-37.
- [28] J. Maxwell, J.I. Briaud, Wak Tests on 53 footings, Texas A and M University Report, (1991).
- [23] R. G. Lukas, Dynamic Compaction for Highway Construction, Design and Construction Guidelines, 1986 Federal Highway Admin, U.S. Dept. of Transport, Washington Report, FHWA/RD, 1 (1986) 86-133.
- [24] R.G. Lukas, Densification of loose deposits by pounding, ASCE Special Geotechnical Publication, 106. GT4 (1980) 435-446.
- [25] K.M. Rollins, J.H. Kim, U.S. Experience with dynamic compaction of collapsible soils, ASCE Special Geotechnical Publication, New York, 45 (1994) 26-43.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*M. Zahedaqae, M. Parvizi, S. Sirouspour, Design and Numerical Modeling of Light Compactor for Very Low Energy Dynamic Compaction by Finite Element Method , Amirkabir J. Civil Eng., 54(5) (2022) 1857-1884.*

DOI: 10.22060/ceej.2021.19978.7305

