

تعیین فاصله ایمن محل کوبش در عملیات تراکم دینامیکی در مجاورت تونل ها با استفاده از مدل سازی عددی سه بعدی

یادداشت فنی

علیرضا جهانگیر^۱؛ امیر حمیدی^{۲*}

۱- کارشناس ارشد ژئوتکنیک؛ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی تهران

۲- استاد مهندسی ژئوتکنیک؛ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی تهران

دریافت دست نوشته: ۱۳۹۵/۰۸/۰۷؛ پذیرش دست نوشته: ۱۳۹۷/۰۳/۱۳

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2018.5091.1291

واژگان کلیدی	چکیده
تراکم دینامیکی	یکی از بهترین روش های بهسازی عمیق خاک های ماسه ای خشک و اشباع، تراکم دینامیکی است.
مدلسازی عددی	اجرای عملیات تراکم دینامیکی به علت ارتعاشات زیادی که ایجاد می کند، همواره دارای شرایط ویژه ای
فاصله ایمن	جهت ایمنی و پایداری سازه های مجاور یا زیرزمینی است. بدین ترتیب عملیات تراکم دینامیکی باید به
تونل	نحوی طراحی و اجرا شود که سازه های زیرزمینی مجاور، در اثر ارتعاشات تولید شده پایدار مانده و بهسازی
بیشینه سرعت ذرات	مورد نیاز نیز صورت گیرد. در این مطالعه با مدلسازی عددی سه بعدی بوسیله نرم افزار المان محدود
نرم افزار آباکوس	<i>ABAQUS</i> ، حداقل فواصل ایمن در اثر عملیات تراکم دینامیکی برای تونل با قطر ثابت در چهار عمق و
	سه تراز انرژی کوبش مختلف با استفاده از معیار بیشینه سرعت ذرات (<i>PPV</i>) که توسط آیین نامه های معتبر بیان شده تعیین گردیده است.
	مطالعات نشان داد ربع اول تونل که در سمت کوبش قرار دارد، ناحیه بحرانی آن است. با افزایش عمق تونل و یا کاهش انرژی کوبش، میزان
	فاصله های ایمن از محور آن کاهش می یابد. همچنین موقعیت نقطه نظیر بیشینه <i>PPV</i> در جداره تونل، در انرژی و فاصله کوبش ثابت، با افزایش
	عمق، از انتهای ناحیه بحرانی به سمت تاج آن جابجا و برای تونل در عمق و فاصله کوبش ثابت، با کاهش انرژی کوبش، محل وقوع <i>PPV</i> در
	ناحیه بحرانی ثابت ولی مقدار آن کاهش می یابد.

۱- مقدمه

تراکم دینامیکی شامل ارتعاشات بسیار زیادی است که ممکن است برای سازه های اطراف خطر ساز شده و موجب تخریب و ناپایداری سازه های مجاور گردد. در اثر برخورد کوبه با خاک، ارتعاشات تولید شده به صورت امواج حجمی (امواج فشاری و برشی) در داخل خاک و امواج سطحی (امواج ریلی) روی سطح خاک منتشر می گردد و دامنه ارتعاشات نیز با افزایش فاصله از نقاط کوبش کاهش خواهد یافت (*Hwang & Tu, 2006*). برای این منظور باید هنگام طراحی عملیات تراکم دینامیکی، موقعیت و شرایط سازه های مجاور قرار

تراکم دینامیکی به عنوان یکی از روش های پرکاربرد در بهسازی عمیق خاک های ماسه ای خشک و اشباع استفاده می شود. روش تراکم دینامیکی برای اولین بار توسط منارد ارائه شد. این روش شامل پرتاب متوالی کوبه های سنگین از ارتفاع های مختلف در یک الگوی از پیش طراحی شده است که موجب متراکم شدن عمیق خاک می گردد. جنس کوبه معمولاً از فولاد یا بتن است که وزنی بین ۵ تا ۴۰ تن داشته و ارتفاع سقوط آن بین ۱۰ تا ۳۰ متر است (*Lukas, 1995*).

ثابت که با پوشش بتنی پایدار گردیده، بوسیله نرم افزار المان محدود *ABAQUS* به صورت سه بعدی مدل سازی شده است. با مدل سازی عددی عملیات تراکم دینامیکی در مجاورت تونل، ابتدا ناحیه بحرانی تونل در اثر اجرای تراکم دینامیکی تعیین و سپس برای عمق های مختلف تونل و تراز های متفاوت انرژی کوبش، موقعیت و مقدار نقطه بیشترین *PPV* در ناحیه بحرانی تونل برای فاصله کوبش های مختلف از محور تونل بدست آمده است. سپس با استفاده از مقادیر مجاز *PPV* در جداره تونل که توسط آیین نامه های معتبر استانداردهای آلمان، انگلستان و سوئیس ارائه شده، مقدار فاصله های ایمن برای پایداری تونل در عمق های مختلف و انرژی کوبش های متفاوت تعیین گردیده است.

۲- روش مدل سازی عددی

برای مدل سازی عددی عملیات تراکم دینامیکی تعیین مرزهای مدل بسیار مهم است. به منظور تعیین ابعاد مدل از آنالیز محاسبه سرعت در مرزها استفاده شده است. به این ترتیب که مرزهای مدل در فاصله ای در نظر گرفته شده که سرعت ذرات ناشی از ضربه به طور کامل هم روی سطح خاک و هم در عمق خاک میرا شده و هیچگونه بازگشت موج به داخل محیط صورت نگیرد. تکیه گاه ها در اطراف مدل به صورت مفصلی بوده و در کف آن به صورت گیردار در نظر گرفته شده است. مدل سازی عددی تراکم دینامیکی در مجاورت تونل در سه گام انجام شده است. در گام اول، آنالیز گرانشی با اعمال تنش های گرانشی برجا به محیط خاک صورت گرفته است. در گام دوم، حفاری تونل و نصب پوشش بتنی بر دیواره تونل انجام شده است.

در گام سوم، آنالیز دینامیکی غیر صریح نیومارک به صورت پرتاب کوبه بر سطح خاک برای ۱۰ ضربه در نظر گرفته شده است. پرتاب کوبه به صورت یک جسم الاستیک که از ارتفاع مورد نظر تحت وزن خود با سرعت صفر روی خاک رها شده مدل سازی شده است. برای هر فاصله کوبش از محور تونل، تعداد ۱۰ پرتاب با فاصله زمانی ۶۰ ثانیه انجام شده است. همچنین برای مدل سازی اندرکنش برخورد کوبه و خاک از مدل تماسی سطح به سطح استفاده شده که برای مدل سازی نیروهای برشی از روش پنالتی و برای مدل سازی نیروهای عمودی در سطح تماس، روش برخورد سخت لحاظ

گرفته در سطح زمین و یا زیر سطح زمین به دقت بررسی شود. بنابراین عملیات تراکم دینامیکی با در نظر گیری فاصله ایمن برای سازه های مجاور طراحی و اجرا شود تا ضمن بهسازی ناحیه مورد نظر، پایداری و ایمنی سازه های مجاور نیز حفظ گردد. عملیات تراکم دینامیکی در مجاورت سازه های زیر زمینی به دلیل مسئله پایداری و جلوگیری از تخریب سازه انجام نگرفته است. به دلیل اینکه انجام آزمایشی آن به صورت عملی هزینه و زمان زیادی صرف می کند، با استفاده از مدل سازی عددی می توان نتایج حاصل را به عنوان معیاری جهت طراحی تراکم دینامیکی در مجاورت سازه های زیر زمینی مورد استفاده قرار داد. مطالعات بسیاری در مورد عملیات تراکم دینامیکی به صورت مدل سازی عددی، بررسی های آزمایشگاهی و صحرایی انجام گرفته است. محققین متعددی عملیات تراکم دینامیکی را با استفاده از روش های عددی نظیر المان محدود مدل سازی کردند. پن و سلی (*Pan & Selby, 2002*) با استفاده از نرم افزار المان محدود *ABAQUS* پاسخ خاک به ضربه جسم صلب را مورد بررسی قرار دادند. قاسمی و همکاران با استفاده از نرم افزار المان محدود *PISA* عملیات تراکم دینامیکی را برای دو مدل رفتاری پلاستیسیته کلاسیک دار و *Cam-Clay* به ترتیب برای خاک های دانه ای خشک و اشباع بررسی کردند (*Ghasemi, et al., 2010*). جهانگیری و همکاران با استفاده از نرم افزار المان محدود *ABAQUS* فاصله موثر کوبش در عملیات تراکم دینامیکی را تعیین کردند (*Jahangiri, et al., 2011*).

پورجنابی و حمیدی با مدل سازی عددی به وسیله نرم افزار المان محدود *ABAQUS* میزان فاصله ایمن برای پایداری سازه های مجاور عملیات تراکم دینامیکی را به دست آوردند (*Pourjenabi & Hamidi, 2015*). قنبری و حمیدی پارامترهای بهسازی و عمق فروچاله را در مجاورت شیب با مدل سازی عددی بوسیله نرم افزار المان محدود *ABAQUS* تعیین کردند (*Ghanbari & Hamidi, 2015*). قنبری و حمیدی در ادامه مطالعات قبلی خود در خصوص مدل سازی عددی تراکم دینامیکی، روابطی را نیز برای محاسبه دامنه ارتعاشات ناشی از عملیات تراکم دینامیکی در زمین های تخت و یا مجاور شیب ها را ارائه نمودند (*Ghanbari & Hamidi, 2017*). در مطالعه کنونی، اثر عملیات تراکم دینامیکی در مجاورت تونل سطحی با قطر

همان کلاهدک مدل که به منظور بیان امکان تسلیم تحت تنش موثر ایزوتروپ است بر اساس روابط ۲ و ۳ تعریف شده است.

$$f_1 = \sqrt{J_{2D}} - \alpha j_1 - \kappa = 0 \quad (1)$$

$$f_2 = (J_1 - 1)^2 + R^2 J_{2D} - (X - l)^2 = 0 \quad (2)$$

$$l = \frac{X - R\kappa}{1 + \alpha R} \quad (3)$$

در این روابط، α و κ ثابت‌های پوش گسیختگی دراگر-پراگر هستند. R ثابت ماده و l مقدار نامتغیر اول تنش در محل برخورد دو سطح تسلیم است. X پارامتر سخت شونده‌ی خاک بوده که وابسته به کرنش حجمی پلاستیک بوده و از رابطه ۴ به دست می‌آید. در این رابطه W و D پارامترهای خاک هستند و X_0 میزان تنش موثر میانگین است که در هر عمق از خاک متفاوت و از تحلیل گرانشی تعیین شده است.

$$X = -\frac{1}{D} \ln \left(1 - \frac{\varepsilon_v^p}{W} \right) + X_0 \quad (4)$$

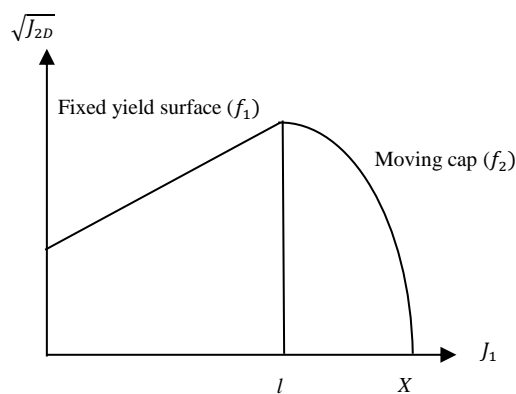
۴- صحت سنجی روش مدل‌سازی عددی

در این مطالعه، محاسبه سرعت ناشی از ضربه در ذرات خاک نقش اساسی دارد. بنابراین لازم است صحت سنجی سرعت در نرم افزار نسبت به مدل صحرایی کنترل گردد. به همین جهت برای صحت سنجی میزان سرعت ذرات از مطالعه هوانگ و تو استفاده شده است. این محققین از تراکم دینامیکی جهت متراکم ساختن یک سایت صنعتی استفاده نموده و با قرار دادن سنسور تعیین سرعت در فواصل مختلف از نقطه کوبش، سرعت را در سه جهت عمودی، شعاعی و مماسی ثبت کرده‌اند. مدل‌سازی کوبش به صورت سه بعدی، با استفاده از وزنه ۲۰ تنی با سطح مقطع ۴٫۵ متر مربع و ارتفاع پرتاب ۲۰ متر انجام شده است (Hwang & Tu, 2006). در جدول ۱ پارامترهای فیزیکی و سخت شونده‌ی مدل پلاستیسیته کلاهدک دار که از مطالعات پورجنابی و حمیدی به دست آمده ارائه شده است (Pourjenabi & Hamidi, 2015). شکل ۲ نمای سه بعدی مدل‌سازی عددی در نرم افزار را نشان می‌دهد. مقادیر سرعت در سه جهت مختلف برای فواصل ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۶۰، ۱۰۰ و ۱۶۵ متر از محل کوبش با نتایج به دست آمده از مطالعه هوانگ و تو مقایسه شده است (Hwang & Tu, 2006).

شده است. ضریب اصطکاک بین خاک و کوبه مقدار ۰٫۵ در نظر گرفته شده است. میزان میرایی خاک ۵ درصد میرایی بحرانی و فرکانس اولیه ارتعاشات عمودی ناشی از تراکم دینامیکی طبق توصیه پن و سلبی (۲۰۰۲)، ۱۰ هرتز فرض گردید. همچنین ضرایب میرایی رایلی نیز به ترتیب ۰ و ۰٫۰۱ در نظر گرفته شدند (Pourjenabi & Hamidi, 2014). همچنین رفتار اصطکاک بین خاک و تونل به صورت نیروی‌های نرمال و برشی تعریف شده و مقدار ضریب اصطکاک بین خاک و تونل برابر $0.6 \tan \phi$ در نظر گرفته شده است (Asheghabadi & Matinmanesh, 2011).

۳- مدل رفتاری مورد استفاده در مدل‌سازی عددی

مدل رفتاری استفاده شده در مدل‌سازی عددی تراکم دینامیکی خاک‌های ماسه‌ای، مدل پلاستیسیته کلاهدک دار است. این مدل برای نشان دادن رفتار سخت شونده‌ی خاک تحت اثر بارهای ضربه نظیر عملیات تراکم دینامیکی مناسب است (Ghasemi, et al., 2010). در شکل ۱ سطح تسلیم مدل پلاستیسیته کلاهدک دار در فضای نامتغیر اول تنش و نامتغیر دوم تنش انحرافی نشان داده شده است.

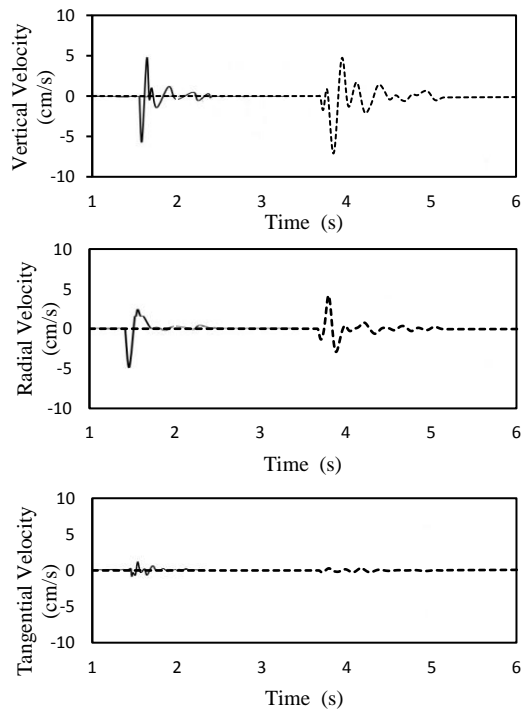


شکل ۱- سطح تسلیم مدل پلاستیسیته کلاهدک دار در فضای تنش

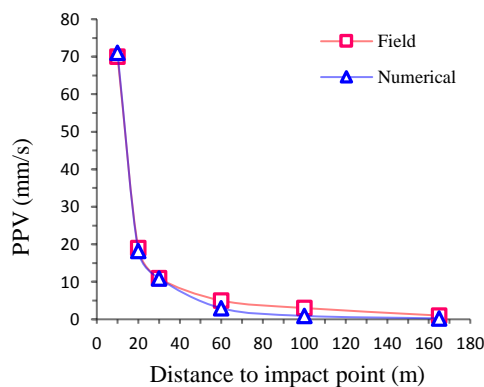
مدل پلاستیسیته کلاهدک دار از دو قسمت، سطح تسلیم ثابت و متغیر تشکیل شده است. سطح تسلیم ثابت که به عنوان سطح تسلیم نهایی معرفی شده، بر اساس معیار گسیختگی دراگر-پراگر از رابطه ۱ و سطح تسلیم متغیر یا

تعیین فاصله ایمن محل کوبش در عملیات تراکم دینامیکی در مجاورت تونل ها با استفاده از مدل سازی عددی ... : ص ۱۹-۳۱

بنابراین با توجه به نتایج و نمودارهای به دست آمده، نرم افزار *ABAQUS* قابلیت مدل سازی عملیات تراکم دینامیکی و محاسبه سرعت در جهات مختلف را داشته است.



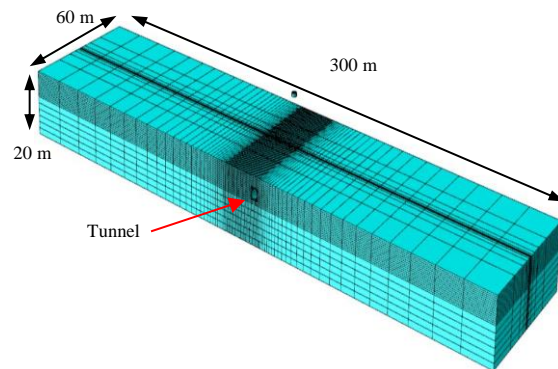
شکل ۳- مقایسه بین سرعت سه جهت در فاصله ۱۰ متری از نقطه کوبش برای مدل سازی عددی و کوبش در سایت



شکل ۴- مقایسه بیشترین سرعت ذرات با فاصله از مرکز کوبش برای مدل سازی عددی و کوبش در سایت

جدول ۱- پارامترهای فیزیکی و سخت شوندگی مدل پلاستیسیته کلاسیک دار (Pourjenabi & Hamidi, 2014)

پارامتر	واحد	مقدار
دانسیتته	(kg/m^3)	۱۵۸۰
چسبندگی	(kPa)	۰٫۹۸
زاویه اصطکاک داخلی	درجه	۲۸
مدول الاستیسیته	(MPa)	۱۰٫۸
نسبت پواسون	-	۰٫۳
R	-	۱٫۱۵
W	-	۰٫۵
D	(m^2/kN)	۰٫۱۰۰۰۵



شکل ۲- مدل سه بعدی تونل و محیط خاکی

شکل ۳ مقایسه بین سرعت ثبت شده در سایت و سرعت به دست آمده از آنالیز عددی برای هر سه جهت در فاصله ۱۰ متر از نقطه کوبش را نشان می دهد. همان طور که مشاهده گردید، بیشترین مقدار سرعت عمودی، شعاعی و مماسی در سایت با مقدار بدست آمده از نرم افزار تطابق بسیار خوبی داشته است. در مدل سازی عددی و سایت، سرعت در راستای عمودی و شعاعی بسیار بیشتر از سرعت در راستای مماسی است. همچنین بیشترین مقدار سرعت در سایت و مدل سازی عددی در جهت عمودی ثبت شده است.

شکل ۴ کاهش *PPV* با فاصله از محل کوبش، برای مدل سازی عددی و کوبش واقعی نشان داده است. با توجه به شکل ۴، تطابق قابل قبولی بین نتایج مدل سازی عددی و کوبش واقعی مشاهده شده است.

زمانی ۶۰ ثانیه به منظور میرایی کامل سرعت در محیط خاک انجام شده است. مش بندی مدل به این صورت در نظر گرفته شده که در جداره تونل، پوشش بتنی آن و فاصله ۵۰ متری از محور تونل که کوبش‌ها در آن انجام شده، به صورت خیلی ریز و یکنواخت بوده و در سمت چپ تونل به اندازه ۱۵۰ متر که کوبش نداشته و همچنین از فاصله ۱۰۰ متری تا انتهای سمت راست تونل که کوبش داشته بصورت لگاریتمی در نظر گرفته شده است. پارامترهای فیزیکی و سخت شوندگی مدل پلاستیسیته کلاسیک دار در جدول ۱ و پارامترهای پوشش تونل و کوبه فولادی که به صورت الاستیک مدلسازی شده در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- پارامترهای پوشش بتنی تونل و کوبه فولادی

مشخصه مکانیکی	واحد	پوشش بتنی تونل	کوبه فولادی
دانسیتته	(kg/m^3)	۲۴۰۰	۴۲۴۶
مدول الاستیسیته	(GPa)	۲۵	۲۱۰
نسبت پواسون	-	۰٫۲	۰٫۳

ارتفاعات ناشی از برخورد کوبه به سطح خاک در سه جهت عمودی، شعاعی و مماسی منتشر شده است. برای سنجش آغاز خرابی و ناپایداری سازه در اکثر استانداردها و مطالعات محققان، از معیار بیشینه سرعت ذرات (PPV) استفاده شده است. این معیار مطابقت و دقت بسیار بهتری نسبت به شتاب و تغییر مکان داشته است. بنابراین برای محاسبه بیشترین مقدار سرعت ذرات در جداره تونل (PPV) از رابطه (۵) استفاده شده است.

$$PPV = \max \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} \quad (5)$$

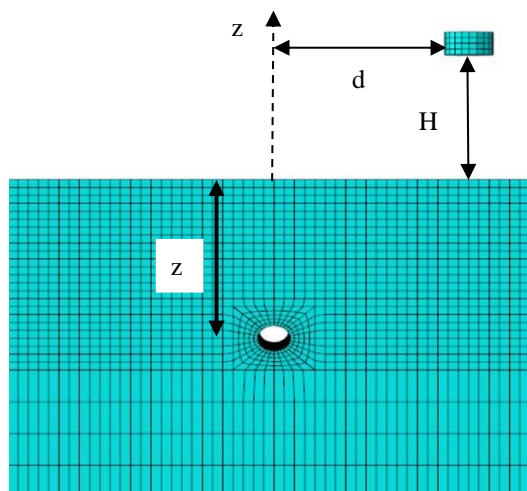
در این رابطه V_x ، V_y و V_z به ترتیب سرعت در جهت شعاعی، مماسی و عمودی هستند.

۶- بررسی نتایج مدلسازی عددی

برای تعیین ناحیه بحرانی تونل در هنگام اجرای عملیات تراکم دینامیکی، ابتدا ۸ نقطه از جداره تونل در فواصل زاویه ای ثابت ۴۵ درجه در نظر گرفته شده و سپس میزان تغییرات PPV در این نقاط بررسی گردیده است. نقاط تعیین شده در جداره تونل در شکل ۷ نشان داده شده است.

۵- متغیرهای در نظر گرفته شده در تحلیل‌ها

در این مطالعه با استفاده از نرم افزار المان محدود *ABAQUS* محیط خاکی به طول ۳۰۰ متر، عرض ۶۰ متر و عمق ۲۰ متر به همراه تونلی به قطر ۴ متر که بوسیله پوشش بتنی با ضخامت ۲۰ سانتی متر در حالت استاتیکی پایدار شده، مطابق شکل ۲ به صورت سه بعدی مدلسازی شده است. تونل در چهار عمق مختلف از سطح زمین قرار گرفته و عملیات تراکم دینامیکی برای سه تراز متفاوت از انرژی کوبش، در مجاورت تونل انجام گردیده است. شکل ۵ نمایی از مدل هندسی تونل و نحوه کوبش را نشان می دهد. همچنین متغیرهای مدلسازی عملیات تراکم دینامیکی و تونل در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۵- نمایی از مدل هندسی تونل و موقعیت محل کوبش

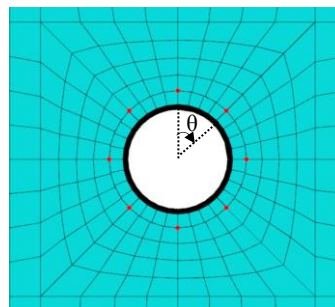
جدول ۲- متغیرهای هندسی تونل و نحوه کوبش

نماد	واحد	نماد	شرح
عمق تونل	(m)	z	۱۰، ۸، ۶، ۴
انرژی کوبش کل	($kN.m$)	E	۲۰۰۰۰، ۳۰۰۰۰، ۴۰۰۰۰
ارتفاع پرتاب کوبه	(m)	H	۲۰، ۱۵، ۱۰
فاصله کوبش از محور تونل	(m)	d	۲۴، ۲۰، ۱۶، ۱۲، ۸، ۴

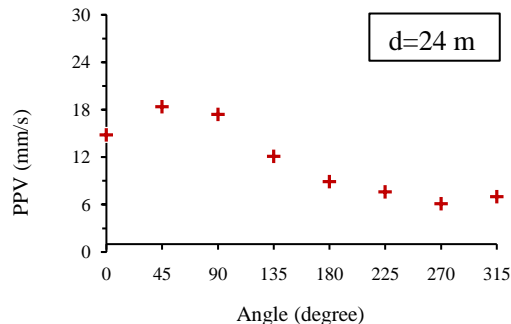
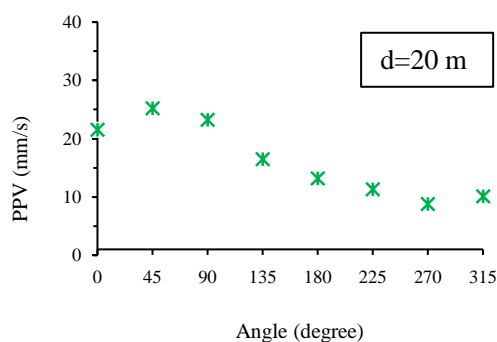
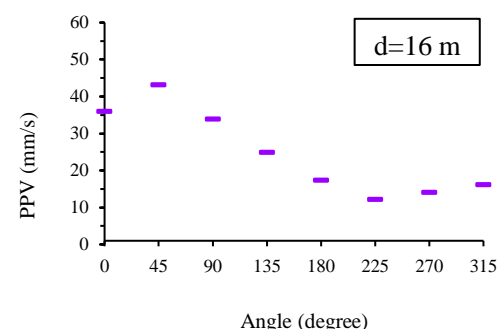
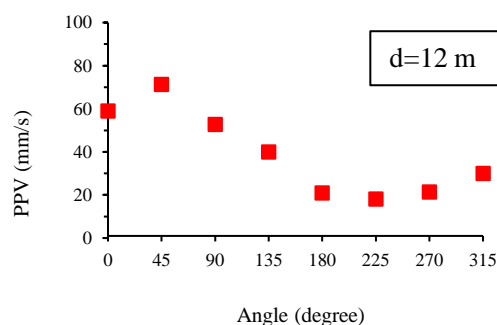
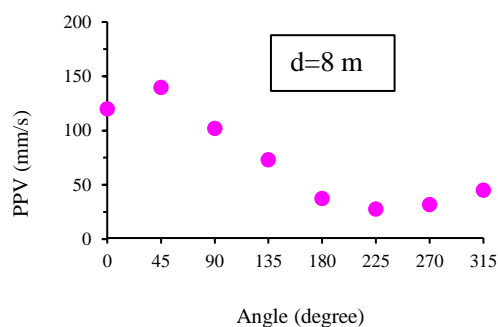
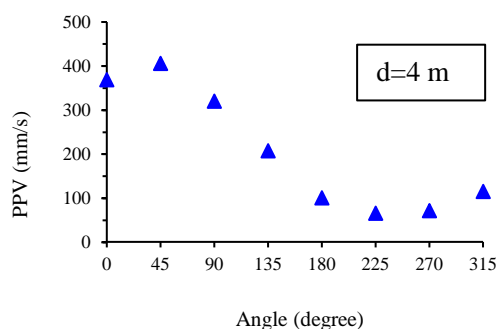
کوبش‌ها به صورت ۱۰ ضرب با انرژی های متفاوت ولی مومنتم های یکسان در فواصل ۴ تا ۲۴ متری از محور تونل با اختلاف ۴ متر انجام شده است. کوبش‌ها با فاصله

تعیین فاصله ایمن محل کوبش در عملیات تراکم دینامیکی در مجاورت تونل ها با استفاده از مدلسازی عددی ... : ص ۱۹-۳۱

با توجه به بیشترین مقدار PPV ، نقاط قرار گرفته در زوایای صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه واقع در ربع اول تونل که در سمت محل کوبش قرار گرفته، در شکل ۸، به عنوان ناحیه بحرانی تونل در نظر گرفته شده است. بنابراین مطابق شکل ۹، ربع اول تونل (ناحیه بحرانی) را به ۹ بخش تقسیم و میزان تغییرات PPV برای ناحیه بحرانی تونل در عمق، انرژی کوبش و فاصله کوبش های متفاوت بررسی شده است.

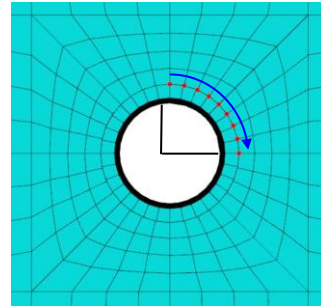


شکل ۷- نقاط تعیین شده در جداره تونل (۸ نقطه)

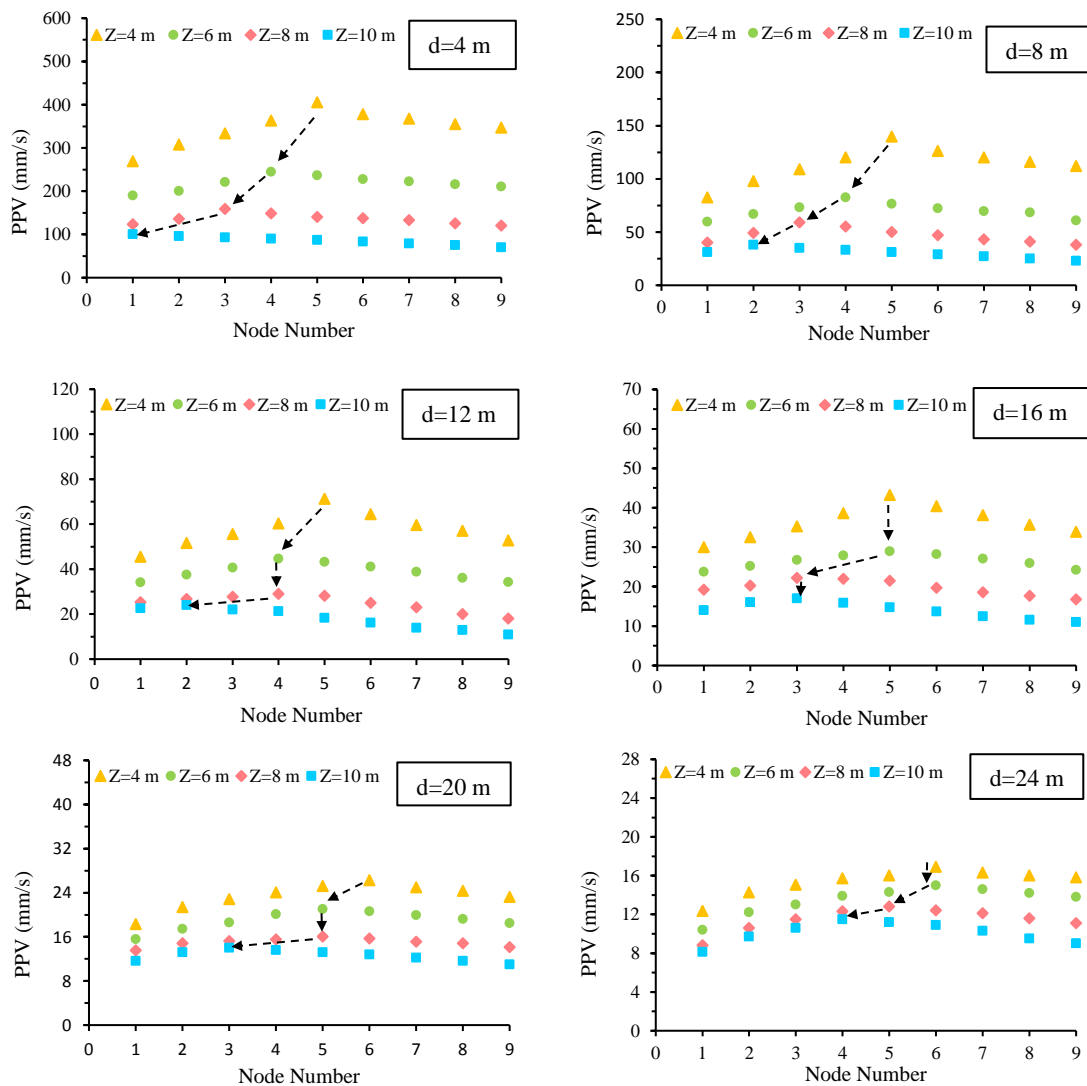


شکل ۸- تغییرات PPV برای ۸ نقطه از جدار تونل در عمق ۴ متر با انرژی کوبش کل ۴۰۰۰۰ کیلو نیوتن متر در فواصل کوبش مختلف از محور تونل

همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، موقعیت بیشترین مقدار PPV در جداره تونل برای هر فاصله کوبش از محور تونل با تغییر عمق تونل تغییر کرده است. بنابراین در انرژی و فاصله کوبش ثابت، با افزایش عمق تونل، موقعیت نقطه بیشترین مقدار PPV در جداره تونل، از انتهای ناحیه بحرانی به سمت تاج تونل تغییر کرده و مقدار آن نیز کاهش یافته که این جابجایی به دلیل میرایی سرعت با افزایش عمق تونل است.



شکل ۹- نقاط تعیین شده در ناحیه بحرانی تونل (نقطه ۹)

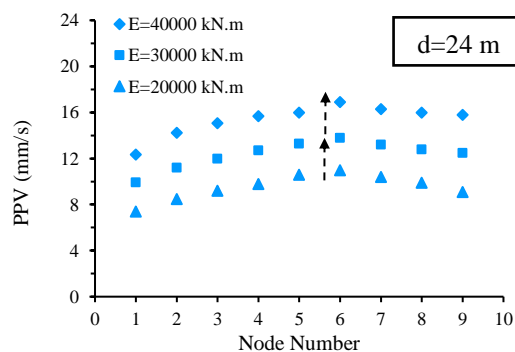
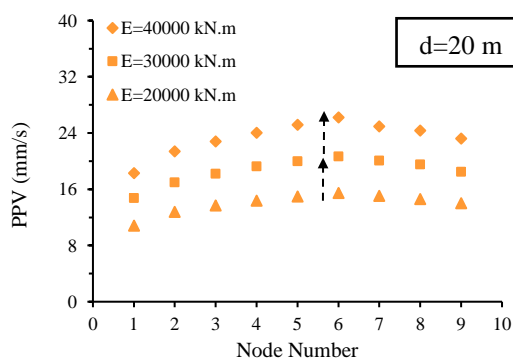
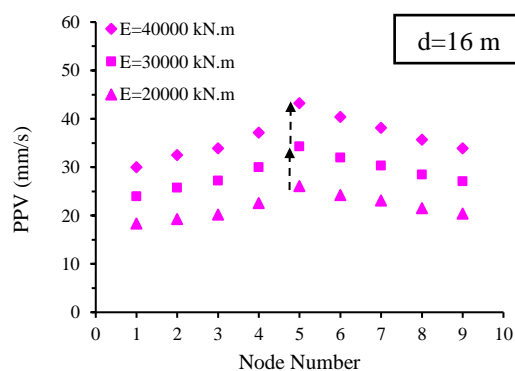
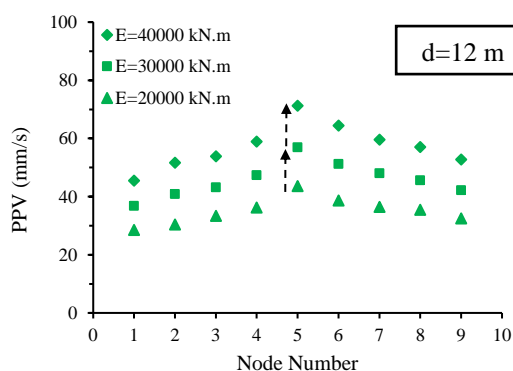
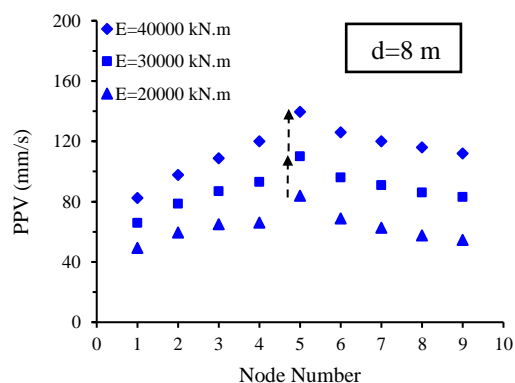
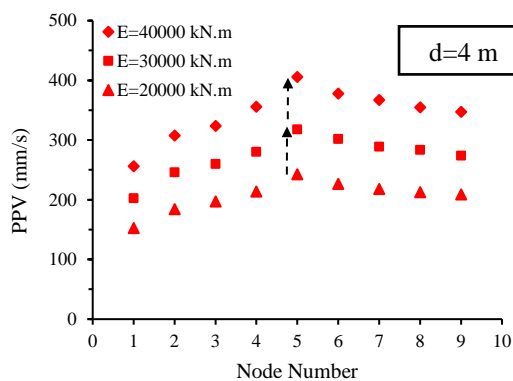


شکل ۱۰- تغییرات PPV با شماره نقاط در ناحیه بحرانی تونل برای هر فاصله کوبش در انرژی کوبش کل ثابت ۴۰۰۰۰ کیلو نیوتن متر و اعماق مختلف قرار گیری تونل

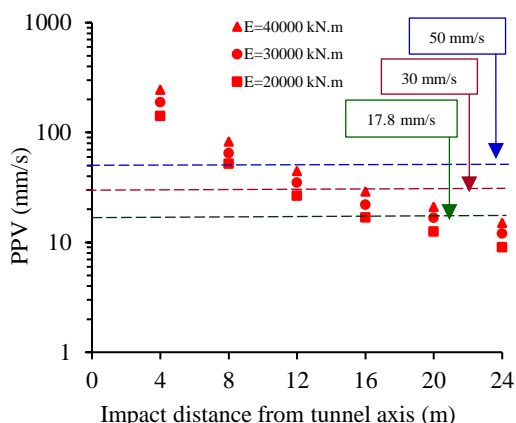
تعیین فاصله ایمن محل کوبش در عملیات تراکم دینامیکی در مجاورت تونل ها با استفاده از مدلسازی عددی ... : ص ۱۹-۳۱

و انرژی کوبش ثابت، موقعیت نظیر بیش ترین مقدار PPV در جداره تونل، با افزایش فاصله کوبش از محور تونل، از تاج به سمت انتهای ناحیه بحرانی آن تغییر کرده که به علت میرایی سرعت با افزایش فاصله کوبش از محور تونل است.

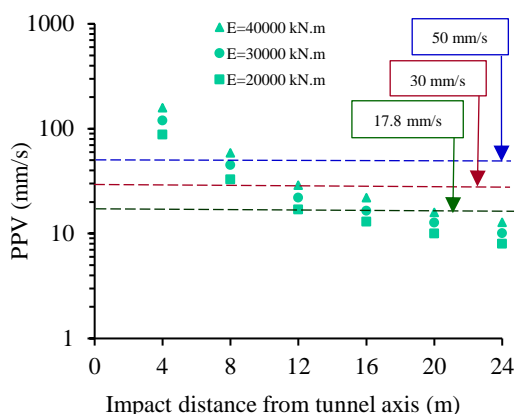
با توجه به شکل ۱۱، برای یک تونل در عمق و فاصله کوبش ثابت، با کاهش انرژی کوبش، موقعیت نقطه بیش ترین مقدار PPV در جداره تونل، در محل خود در ناحیه بحرانی ثابت مانده و فقط مقدار آن کاهش یافته است. همچنین در هر دو شکل ۱۰ و ۱۱، برای تونل در عمق



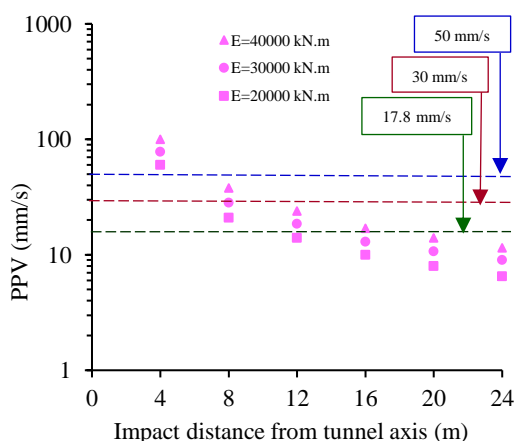
شکل ۱۱- تغییرات PPV با شماره نقاط ناحیه بحرانی تونل برای هر فاصله کوبش در عمق ثابت ۴ متر و سطوح انرژی کوبش مختلف



شکل ۱۳- حداقل فاصله ایمن کوبش از محور تونل در عمق ثابت استقرار ۶ متر در سطوح مختلف انرژی کوبش



شکل ۱۴- حداقل فاصله ایمن کوبش از محور تونل در عمق ثابت استقرار ۸ متر در سطوح مختلف انرژی کوبش

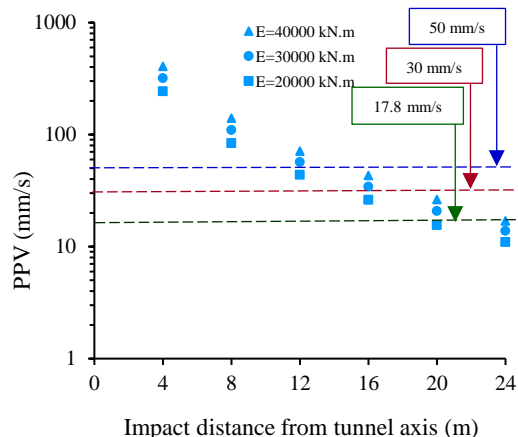


شکل ۱۵- حداقل فاصله ایمن کوبش از محور تونل در عمق ثابت استقرار ۱۰ متر در سطوح مختلف انرژی کوبش

تغییرات موقعیت بیشترین مقدار PPV در ناحیه بحرانی تونل در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ با پیکان‌های خط چین نشان داده شده است. بنابراین با توجه به شکل‌های ۱۰ و ۱۱، بیشترین مقدار PPV در جداره تونل در اعماق مختلف، برای هر فاصله کوبش مشخص گردیده و به عنوان PPV در جداره تونل برای هر عمق استقرار تونل و فاصله کوبش در انرژی کوبش‌های مشخص انتخاب شده است که مقادیر آن در شکل‌های ۱۲ تا ۱۵ به منظور تعیین فاصله ایمن کوبش از محور تونل استفاده شده است.

جهت تعیین حداقل فاصله ایمن ناشی از عملیات تراکم دینامیکی در مجاورت تونل، از مقادیر مجاز PPV که توسط آیین‌نامه‌های استاندارد آلمان، انگلستان و سوئیس به ترتیب ۵۰، ۳۰ و ۱۷٫۸ میلی‌متر بر ثانیه ارائه شده استفاده شده است (German Standard, 1999), (British Standard, 2009), (Swiss Standard, 2007).

این سه آیین‌نامه به عنوان معتبرترین استانداردهای جهان در بسیاری از کشورهای اروپایی و حتی آمریکا مورد استفاده قرار گرفته است. حداقل فاصله ایمن کوبش از محور تونل برای تونل در عمق ثابت با انرژی‌های کوبش مختلف بر اساس مقادیر مجاز PPV توسط آیین‌نامه‌های معتبر، در شکل‌های ۱۲ تا ۱۵ نشان داده شده است. بنابراین با کاهش انرژی کوبش، دامنه سرعت ذرات کم و موجب کاهش بیشینه PPV در جداره تونل گردیده که در نتیجه میزان حداقل فاصله ایمن جهت پایداری تونل در حین عملیات تراکم دینامیکی کاهش یافته است.



شکل ۱۲- حداقل فاصله ایمن کوبش از محور تونل در عمق ثابت استقرار ۴ متر در سطوح مختلف انرژی کوبش

تعیین فاصله ایمن محل کوبش در عملیات تراکم دینامیکی در مجاورت تونل ها با استفاده از مدلسازی عددی ... : ص ۱۹-۳۱

جدول ۶- فاصله ایمن کوبش بر اساس آیین نامه ها برای تونل در اعماق متفاوت و انرژی کوبش کل ثابت ۴۰۰۰۰ کیلو نیوتن متر

عمق تونل (متر)	استاندارد <i>DIN</i> (متر)	استاندارد <i>BS</i> (متر)	استاندارد <i>SN</i> (متر)
۴	۱۶	۲۰	۲۴
۶	۱۲	۲۰	۲۴
۸	۱۲	۱۶	۲۰
۱۰	۸	۱۲	۲۰

۷- نتیجه گیری

در این مطالعه مدلسازی عددی سه بعدی عملیات تراکم دینامیکی در مجاورت فضای زیر زمینی، به وسیله نرم افزار المان محدود *ABAQUS* عملیات تراکم دینامیکی در مجاورت فضای زیر زمینی مورد بررسی قرار گرفت. عملیات تراکم دینامیکی با ۱۰ ضرب کوبش کوبه الاستیک بر سطح خاک دانه ای در مجاورت تونل به قطر ثابت مدلسازی شد. آنالیزها به منظور تعیین حداقل فاصله های ایمن کوبش برای پایداری تونل در چهار عمق و سه تراز متفاوت انرژی کوبش، با مقادیر مجاز *PPV* توسط استاندارد های آلمان، انگلستان و سوئیس مقایسه شدند. اهم نتایج به دست آمده از این مطالعه به قرار ذیل می باشند:

- ۱- ربع اول از تونل که در سمت کوبش قرار گرفته به عنوان ناحیه بحرانی تونل در حین اجرای عملیات تراکم دینامیکی معرفی شده است.
- ۲- در انرژی و فاصله کوبش ثابت، با افزایش عمق تونل، موقعیت نقطه نظیر بیشینه *PPV* در جداره تونل، از انتهای ناحیه بحرانی به سمت تاج تونل تغییر و مقدار آن کاهش یافته، که این جابجایی به دلیل میرایی سرعت با افزایش عمق تونل است.
- ۳- برای تونل در عمق و فاصله کوبش ثابت، با کاهش انرژی کوبش، موقعیت نقطه نظیر بیشینه *PPV* در جداره تونل در محل خود در ناحیه بحرانی ثابت مانده و فقط مقدار آن کاهش یافته است.
- ۴- برای تونل در عمق و انرژی کوبش ثابت، موقعیت نقطه نظیر بیشینه *PPV* در جداره تونل، با افزایش فاصله کوبش از محور تونل، از تاج به سمت

همچنین مشاهده شد که با افزایش عمق قرارگیری تونل، سرعت در عمق خاک میرا شده و بیشینه *PPV* در جداره تونل کاسته شده و در نتیجه میزان حداقل فاصله ایمن جهت پایداری تونل در حین عملیات تراکم دینامیکی نیز کاهش یافته است. بنابراین با توجه به شکل های ارائه شده، حداقل فاصله ایمن از محور تونل به منظور پایداری آن هنگام اجرای عملیات تراکم دینامیکی با توجه به مقادیر مجاز *PPV* بیان شده توسط آیین نامه های معتبر، در جدول های ۴ تا ۶ برای عمق های مختلف تونل و انرژی کوبش های مختلف بیان شده است. با توجه به جدول های ۴ تا ۶ می توان بر اساس عمق قرارگیری تونل، میزان انرژی و فاصله کوبش مناسب برای بهسازی خاک با در نظرگیری پایداری تونل مجاور را مشخص کرد.

جدول ۴- فاصله ایمن کوبش بر اساس آیین نامه ها برای تونل در اعماق متفاوت و انرژی کوبش کل ثابت ۲۰۰۰۰ کیلو نیوتن متر

عمق تونل (متر)	استاندارد <i>DIN</i> (متر)	استاندارد <i>BS</i> (متر)	استاندارد <i>SN</i> (متر)
۴	۱۲	۱۶	۲۰
۶	۱۲	۱۲	۲۰
۸	۸	۱۲	۱۶
۱۰	۸	۸	۱۲

جدول ۵- فاصله ایمن کوبش بر اساس آیین نامه ها برای تونل در اعماق متفاوت و انرژی کوبش کل ثابت ۳۰۰۰۰ کیلو نیوتن متر

عمق تونل (متر)	استاندارد <i>DIN</i> (متر)	استاندارد <i>BS</i> (متر)	استاندارد <i>SN</i> (متر)
۴	۱۶	۲۰	۲۴
۶	۱۲	۱۶	۲۴
۸	۸	۱۲	۲۰
۱۰	۸	۱۲	۱۶

حداقل فاصله ایمن جهت پایداری تونل حین عملیات تراکم دینامیکی می شود.

انتهای ناحیه بحرانی تغییر کرده که به علت میرایی سرعت با افزایش فاصله کوبش از محور تونل است.

۸- فهرست نمادها

فهرست نمادها در جدول ۷ نشان داده شده است

۵- با افزایش عمق تونل در خاک و یا با کاهش انرژی کوبش، میرایی سرعت ذرات در جداره تونل افزایش و از دامنه آن کاسته می گردد. این موضوع موجب کم شدن *PPV* در جداره تونل و کاهش

جدول ۷- فهرست نمادها

شرح	واحد	نماد
تابع گسیختگی برشی	<i>kPa</i>	f_1
تابع مکان هندسی کلاهدک	<i>kPa</i>	f_2
نامتغیر اول تانسور تنش انحرافی	<i>kPa</i>	J_1
نامتغیر دوم تانسور تنش انحرافی	<i>kPa</i>	J_{2D}
پارامتر خاک در معادله (۱)	-	α
پارامتر خاک در معادله (۱)	-	κ
نامتغیر اول تانسور تنش	<i>kPa</i>	l
پارامتر سخت شوندگی خاک در مدل کلاهدک دار	<i>kPa</i>	X
پارامتر خاک در معادله (۴)	-	R
پارامتر خاک در معادله (۴)	-	W
پارامتر خاک در معادله (۴)	<i>m/kN</i>	D
تنش اولیه ناشی از آنالیز گرانشی	<i>kPa</i>	X_0
کرنش حجمی پلاستیک	-	ϵ_V^P
نسبت پواسون	-	ν
زاویه اصطکاک داخلی خاک	درجه	ϕ
انرژی کوبش کل	<i>kN.m</i>	E
عمق قرارگیری تونل از سطح زمین	<i>m</i>	Z
ارتفاع پرتاب کوبه	<i>m</i>	H
فاصله کوبش از محور تونل	<i>m</i>	d
سرعت در راستای شعاعی	<i>mm/s</i>	V_x
سرعت در راستای مماسی	<i>mm/s</i>	V_y
سرعت در راستای عمودی	<i>mm/s</i>	V_z
بیشینه سرعت ذرات	<i>mm/s</i>	PPV

۹- مراجع

Asheghabadi, M. S., & Matinmanesh, H. (2011). Finite Element Seismic Analysis of Cylindrical Tunnel in Sandy Soils with Consideration of Soil- Tunnel Interaction. The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, (pp. 3162-3169).

British Standards Institution. (2009). Code of practice for noise and vibration control on construction and

تعیین فاصله ایمن محل کوبش در عملیات تراکم دینامیکی در مجاورت تونل ها با استفاده از مدلسازی عددی ... : ص ۱۹-۳۱

open sites – part 2: vibration. BS, 5228-2.

German Institute of Standards. (1999). Structural vibration part 3: effects of vibration on structures. DIN 4150-3.

Ghanbari, E. and Hamidi, A. (2015). Improvement parameters in dynamic compaction adjacent to the. Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 223-226.

Ghassemi, A., Pak, A. and Shahir, H. (2010). Numerical study of the coupled hydromechanical effects in dynamic compaction of saturated granular soils. Computers and Geotechnics, 10–24.

Hwang, J.H. and Tu, T.Y. (2006). Soil Dynamics and Earthquake Engineering. Ground vibration due to dynamic compaction, 337–346.

Jahangiri, Gh., Pak, A. and Ghassemi. (2011). Numerical modelling of dynamic compaction in dry sandy soils for determination of effective print spacing. structural engineering and geo-techniques.

Lukas R.G. (1995). Geotechnical engineering circular No. 1- Dynamic compaction. FHWA-SA-95-037.

Menard L. and Broise Y. (1975). Theoretical and practical aspects of dynamic consolidation. Geotechnique, 3-16.

Pan, J.L. and Selby, A.R. (2002). Simulation of dynamic compaction of loose granular soils. Advances in Engineering Software, 631–640.

Purjenabi, M. and Hamidi, A. (2015). Numerical modelling of dynamic compaction in dry sands considering critical distance from adjacent structures. Structural Engineering and Mechanics, 56(1): 97-106.

Swiss Standard. (1992). Effects of vibration on construction: Swiss Consultants for Road Construction Association. VSS-SN640-312a.

Stability of Tunnels Adjacent to Dynamic Compaction Operation using Three-Dimensional Modeling

Technical Note

A. Jahangir¹; A. Hamidi²

1- M.Sc. Student, School of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran

2- Professor, School of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran

Received: 27 Nov 2016; Accepted: 03 Jun 2018

DOI: 10.22044/tuse.2018.5091.1291

Keywords

Dynamic Compaction
Numerical Modeling
Safe Distance
Tunnel
Peak Particle Velocity (PPV)
ABAQUS

Extended Abstract

Summary

Dynamic Compaction is one of the best methods of deep soil improvement. Dynamic compaction operations generate large vibrations, therefore, they should be designed and implemented in a way that do not damage adjacent underground spaces. In this research, for a tunnel with constant diameter, four different

locating depths and three different impact energies are modeled numerically using ABAQUS software that is based on finite element modeling method. In this way, six impact distances from the tunnel axis are considered. In order to determine the safe distances of dynamic compaction from the tunnel axis, the peak particle velocity (PPV) values in the tunnel is defined by reliable standards.

Introduction

The proposed method for dynamic Compaction consists of repeated dropping of a heavy weight tamper in a predetermined pattern on the weak ground to be compacted. Ground vibrations caused by dynamic compaction can damage adjacent underground spaces such as tunnels and buried structures. For this, first, by numerical modeling of dynamic compaction, critical zone of the tunnel should be determined, and then, variations of maximum PPV location for different depths of tunnel and different impact energies should also be determined. Finally, safe impact distances from the tunnel axis for different depths of tunnel with different impact energies in critical zone have to be determined by considering the allowable PPV that is defined by reliable German, British and Swiss standards.

Methodology and Approaches

Dynamic compaction has been modeled by many researches using different numerical methods such as finite element method. In this research, the ABAQUS finite element code in three dimensional space was applied in three steps. In the first step, gravity analysis was performed to exert the initial stresses. In the second step, excavation of the tunnel and installation of the tunnel lining were performed, and in third step, dynamic implicit analysis for drop of tamper on soil in ten number of blows with time duration 60 s for each impact was made.

Results and Conclusions

This research shows that the critical zone of a tunnel is located at the first quarter of the tunnel in side of dynamic compaction. Increasing the depth of the tunnel causes safe impact distances from the tunnel axis to be reduced. Considering constant impact energy and impact distance, we observe that maximum PPV location at the end of critical zone is moved up by increasing the depth of the tunnel. Moreover, assuming constant depth of the tunnel and impact distance, we notice that maximum PPV point location is fixed by decreasing the impact energy.
