



## کاهش جابجایی تونل و سطح زمین، ناشی از اثر روانگرایی به کمک ستون های سنگی

ابراهیم کریمی، احسان طاهری، محمد آزادی<sup>3</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد

۲- استادیار دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس

۳- استادیار دانشکده عمران و نقشه برداری دانشگاه آزاد قزوین

ebrahim.karimi@modares.ac.ir

### خلاصه

در بسیاری از زلزله های اخیر، تونل های شهری به علت بلند شدگی کف و نشست سطح زمین، به خاطر پدیده روانگرایی، باعث خرابی های گسترده ای شده اند. روانگرایی باعث کاهش تنش موثر و در نتیجه کاهش مقاومت برشی می شود. از این رو فشار آب منفذی در زیر سازه مدفون افزایش پیدا کرده و باعث تغییر شکل های بزرگی بر سازه خواهد شد. در این تحقیق یک مدل مینا که از یک لایه ماسه روانگرا تشکیل شده و مدل های رفتاری اختصاص داده شده به آن در حالت استاتیکی، موهر کلمب و در حالت دینامیکی، فین مارتین می باشد و تونلی با روش حفر تمام مقطع که سطح آب بر سطح زمین لحاظ شده، و از نرم افزار FLAC2D که یک نرم افزار تفاضل محدود در کارهای ژئوتکنیکی می باشد، برای مدل سازی استفاده شده است. ابتدا برای اعتبارسنجی از نمودار های مقاله مورد نظر استفاده شده، سپس برای جلوگیری از بلندشدگی تونل و سطح زمین از روش ستون های سنگی استفاده شده است. ستون های سنگی در نسبت های مختلف فاصله بندی به قطرشان مدل سازی شده و اثر هر یک تحت دامنه های مختلف بررسی می شود.

کلمات کلیدی: FLAC2D، فین مارتین، بلندشدگی، ستون سنگی، تونل.

### ۱. مقدمه

مطالعات انجام شده نشان می دهند که سازه های زیرزمینی در برابر زلزله مقاومت خوبی دارند. علی رغم این مطالعات، گزارش های متعددی از خرابی سازه های زیرزمینی بر اثر وقوع زلزله بدست آمده که می توان به خرابی سازه ها ناشی از زلزله های Nigata و Kobe و Luzon و Northridge و Chi-Chi اشاره کرد [1] و [2].

یکی از پدیده هایی که ممکن است در اثر زلزله اتفاق بیفتد، روانگرایی است که خرابی های بزرگی را ممکن است به همراه داشته باشد. خرابی های ناشی از روانگرایی خاک ها به سه دسته عمده خرابی های روسازه ای، نشست و خرابی های سازه های زیرزمینی تقسیم می شوند. عموماً دو مورد اول زمانی که رخ می دهند، به راحتی قابل رویت هستند. به این خاطر مطالعات وسیعی در ارتباط با آن ها انجام شده است. اما خرابی های سازه های زیرزمینی بر اثر روانگرایی به علت کمبود این اتفاقات و مشکلات برآورد آن کمتر مورد ارزیابی قرار گرفته است.

مصلح دانه ای تحت بارهای لرزه ای تمایل به فشردگی دارند، در توده های اشباع به علت وجود سیال حفره ای، عدم زهکشی خاک و کوتاه بودن زمان بارگذاری، از تمایل کاهش حجم توده های خاک دانه ای جلوگیری می شود و در نتیجه فشار سیال حفره ای افزایش می یابد که این افزایش فشار سیال حفره ای به کاهش تنش موثر و خصوصاً در در خاک های بدون چسبندگی به کاهش مقاومت برشی منجر می شود [3].

<sup>1</sup>- دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی دانشگاه تربیت مدرس

<sup>2</sup>- استادیار دانشکده فنی و مهندسی گروه مهندسی معدن دانشگاه تربیت مدرس

<sup>3</sup>- استادیار دانشکده عمران و نقشه برداری گروه ژئوتکنیک دانشگاه آزاد قزوین

یانگ و همکاران [۴] با استفاده از آزمایش سانتریفیوژ به بررسی طرح لرزه ای تونل تونل جورج ماسی پرداختند؛ آن ها در قسمت مدل سازی با نرم افزار هم از رویکرد تنش موثر و هم تنش کل استفاده کردند که مدل رفتاری ubcsand تطابق خوبی را با نتایج آزمایشگاهی داشته و در صورتی که پارامترهای مدل رفتاری با خاک محل کالیبره شود، این انطباق بهتر خواهد شد و در انتهای مقاله تاثر خاک پرچگال نسبت خاک گراول دار را نشان می دهد. در سال ۲۰۰۳ لینگ و همکاران [۵] بالازدگی خطوط لوله در خاک مستعد به روانگرایی را بررسی کردند؛ بدین صورت که بوسیله سانتریفیوژ، لوله با قطر بالا مدل سازی کرده و تاثر جابجایی ناشی از لرزه به بررسی آن پرداختند. مادابوشی [۶] تاثرات عمق، قطر، نوع خاک را در بالازدگی سازه مدفون با استفاده از آزمایش سانتریفیوژ بررسی کردند. لیو و سانگ [۷] با استفاده از روش اجزای محدود به تحلیل طرح لرزه ای ایستگاه مترو در خاک اشباع پرداختند. آن ها برای مدل سازی خاک اشباع از نرم افزار DYANA-Swandyne-III که یک مدل پلاستیسیته (PZ-MARK III) که توانایی شبیه سازی روانگرایی را دارد، استفاده کردند. آن ها علاوه بر اعتبار سنجی نرم افزار با مدل آزمایشگاهی به یک مطالعه پارامتریک بر انواع نفوذپذیری خاک در بلندشدگی تونل و سطح زمین پرداختند.

آزادی و میرمحمد حسینی [۹۰۸] با استفاده از آنالیز عددی رفتار لرزه ای تونل در عمق کم در خاک های روانگرا را بررسی کردند و مشاهده نمودند که نیروی محوری، نیروی برشی، لنگر خمشی و فشار آب حفره ای با کاهش فرکانس، افزایش می یابد. همچنین افزایش دامنه بار باعث بالا آمدگی سازه در خاک می شود. در این بررسی مشخص گردید ضخامت تونل روی فشار حفره ای تاثر ندارد و افزایش آن میزان بالا آمدگی را کاهش می دهد. رضایا و فرامرزی [۱۰] با استفاده از مدل EPR و شبکه عصبی، پیش بینی وقوع روانگرایی بر اساس داده ها را مورد ارزیابی قرار دادند. بر این اساس روانگرایی ماسه اشباع وقتی اتفاق می افتد که فشار منفذی با فشار محصور (تنش موثر) برابر باشد. (Unutmaz, B. 2014) [۱۱] با یک تحلیل سه بعدی به بررسی اثرات روانگرایی خاک اطراف تونل پرداخت و مشخص گردید تونل های عمیق تر، در مقایسه با تونل های سطحی در برابر روانگرایی کمتر آسیب پذیرند و پارامترهای ضخامت پوشش تونل و قطر تونل در خاک های مستعد روانگرا بر نیروهای داخلی تونل تاثر ندارند.

واتانابه و همکاران [۱۲] به بررسی تونل های مستطیلی به روش کندوپوش در خاک روانگرا بوسیله میز لرزه تحت یک موج سینوسی با شتاب افزایش یافته پرداختند. آن ها به یک سری آزمایش پیرامون تراکم خاک و انواع روش های مقابله با بلندشدگی تونل (نظیر قرار دادن شیت پایل در دو طرف تونل، بهبود خاک در بالا و زیر تونل با ضخامت های مختلف) دست زدند؛ به این نتیجه رسیدند قرار گرفتن خاک با چگالی کمتر نسبت به خاک روانگرا در زیر تونل کمترین تاثر و قرار گرفتن خاک با چگالی بیشتری تاثر را بر بلندشدگی تونل خواهد داشت. همچنین آن ها روش جدیدی را برای ارزیابی شاخص روانگرایی در جاهایی که سازه مدفون قرار دارد، ارائه دادند که تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی نسبت به روش قبلی دارد.

فتاح و نعیمی [۱۳] در یک مطالعه پارامتریک از جمله اثر دامنه و فرکانس بار هارمونیک با روش المان محدود و مدل الاستیک خطی بر پتانسیل روانگرایی و فشار منفذی شن و ماسه شل، متوسط و متراکم مورد بررسی قرار دادند و مشخص گردید در مناطق مستعد روانگرایی با افزایش دامنه و فرکانس بار، فشار آب حفره ای (در شن و ماسه اشباع) و تغییر شکل تجمعی افزایش می یابد و شروع روانگرایی در نزدیکی انتهای بار وارد بوده و سپس گسترش می یابد و با افزایش عمق استقرار، مقدار سربار بیشتر بوده و مقاومت روانگرایی افزایش می یابد.

سعیدزاده و هاتف [۱۴] با استفاده از نرم افزار Plaxis نشان دادند که افزایش دانسیته ماسه و وجود رفتار اتساعی، بالازدگی را کاهش می دهد و نیز لوله های با قطر بالا دچار بالازدگی بیشتری می شوند. مرندی و راستی [۱۵] ضمن مدل سازی تونل مدفون در خاک تاثر مدول بالک آب، تحلیل خاک، ضریب نسبت تنش افقی به قائم خاک، اختلاف تراز آب نیت به سطح زمین بر نیروهای محوری و برشی و لنگر خمشی و فشار آب منفذی و تنش موثر در نقاط مختلف و جابجایی سطح زمین و کف تونل پرداختند. باقریه و لولویی [۱۶] به بررسی مدل رفتاری ubcsand و تفاوت آن با نتایج آزمایشگاهی برای لوله های مدفون پرداختند و نشان داده شد وابستگی تراکم نسبی خاک به تنش محدود کننده و نیز مدول حجمی آب به فشار آب حفره ای بر نتایج مدل سازی تاثر قابل توجهی دارند. حکیم پور و اسماعیلی [۱۷] به بررسی فاصله بندی و قطرهای مختلف ستون سنگی بوسیله نرم افزار FLAC3D پرداختند و تاثر ستون سنگی را بر اضافه فشار آب منفذی و تنش موثر در نقاط مختلف مدل نشان دادند. در این پژوهش به بررسی کاهش بلندشدگی سطح زمین و تونل در نسبت های مختلف فاصله بندی و قطر ستون های سنگی پرداخته خواهد شد.

## ۲. نحوه مدل سازی

مدل سازی با نرم افزار تفاضل محدود FLAC2D که قابلیت مدل کردن پدیده روانگرایی را دارد، انجام شده است. برای مدل سازی ابتدا تونل در محیط مدل شده و تعادل استاتیکی برقرار می شود. به این صورت که ابتدا قبل از حفاری تونل، مدل پایه ساخته شده و مدل موهر کولمب به خاک ماسه اشباع طبق جدول ۱ به آن اختصاص داده شده و سطح آب زیرزمینی مطابق با مطالعات آزادی بر روی سطح زمین قرار گرفته و مدل آماده تعادل اولیه می

شود؛ توجه شود که برای دقیق شدن جواب ها ابتدا برای اعتبارسنجی از زون ۱ متری استفاده شده و برای ستون های سنگی ابعاد ۰٫۵ متری استفاده می شود.

برای شرایط مرزی در حالت استاتیکی برای مرزهای جانبی در جهت افق گیردار و برای مرز تحتانی در دو جهت افق و قائم فیکس می شود. سپس تونل با مشخصات جدول ۲ مدل می شود. رفتار پوشش تونل به صورت کشسان خطی و با استفاده از المان Linear مدلسازی شده است. این المان های دوگره ای با سه درجه آزادی در هر گره هستند و علاوه بر تحمل نیروی محوری و برشی، قابلیت تحمل لنگر خمشی را نیز دارا می باشند. میرایی خاک از نوع Rayleigh بوده و درصد میرایی خاک (به خاطر استفاده کردن از مدل رفتاری الاستوپلاستیک) ۰٫۵٪ در نظر گرفته می شود [۱۸].

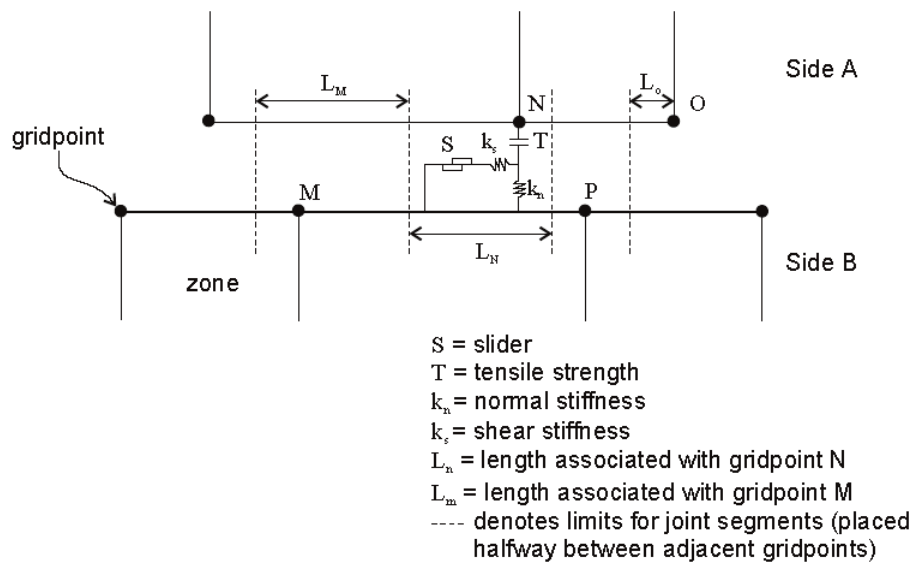
از المان های واسطه بین خاک و پوشش تونل استفاده شده است (شکل ۱). المان های واسطه در مدل مینا دارای سختی قائم و برشی (۶۳MPa) و زادیه اصطکاک (۱۵ درجه) هستند. در شرایط دینامیکی به علت بازگشت موج در زمان برخورد به مرزها، شرایط میدان آزاد (FF) استفاده شده است. بعد از تعادل استاتیکی، بار سیکلی با ۱۰ سیکل رفت و برگشت سینوسی به صورت تنش برشی از کف مدل به آن اعمال شده است. بدیهی است که شرایط کف مدل به صورت میدان آرام می باشد.

جدول ۲- مشخصات تونل مینا

مقدار	واحد	پارامتر
۲۴	KN/m <sup>3</sup>	وزن مخصوص
۲٫۲۳۶×۱۰ <sup>۷</sup>	KN/m <sup>2</sup>	مدول ارتجاعی
۰٫۳	m	ضخامت پوشش تونل
۵٫۴	m	قطر داخلی تونل
۶	m	قطر حفاری

جدول ۱- مشخصات مصالح خاک مدل مینا

مقدار	واحد	پارامتر
۰	KPa	چسبندگی
۲۵	درجه	زاویه اصطکاک داخلی
۱۰	m/sec	نفوذپذیری
۱۵۰۰	Kg/m <sup>3</sup>	دانسیته
۳۰	MPa	مدول بالک
۲۰	MPa	مدول برشی
۰٫۷۶	....	مدل f <sub>inn</sub> (c1)
۰٫۵۲	....	مدل f <sub>inn</sub> (c2)
۰٫۲	....	مدل f <sub>inn</sub> (c3)
۰٫۵	....	مدل f <sub>inn</sub> (c4)



شکل ۱- مشخصات المان واسطه بین خاک و پوشش

نمودار جایجایی عمودی یک نقطه تصادفی به زمان به وسیله یک بار حل کردن دینامیکی مدل تحت زمان ۱ ثانیه تحت وزن خود بصورت کسینوسی بدست می آید که فرکانس مدل در حدود ۱٫۷ در نظر گرفته شده و مدول بالک آب بوسیله آزمون و خطا در مدل به مقدار  $1 \times 10^7 \text{ N/m}^2$  بدست می آید.

توجه شود که برای مدل کردن ستون سنگی باید تاثیر ویراتور بر خاک اطراف را نیز بررسی کرد. عمده تاثیر ستون سنگی (بر خاک اطراف را) بر زاویه اصطکاک و مدول یانگ می باشد که بر طبق رابطه ۱ و ۲ محاسبه می شود [۱۸]

$$E_s = 500 * ((N_1)_{60} + 15) \quad 1.$$

$$\phi = 0.36(N_1)_{60} + 15 \quad 2.$$

در روابط بالا  $E_s$  و  $\phi$  و  $(N_1)_{60}$  به ترتیب مدول الاستیسیته و زاویه اصطکاک و عدد SPT سلول واحد، بعد از بهسازی خاک می باشند. عدد SPT بعد از بهسازی از روی نمودار زیر پیدا می شود.

در شکل ۲،  $A_r$ ، برابر نسبت مساحت ستون سنگی به سلول واحد آن می باشد که قطر سلول واحد از رابطه ۳ محاسبه می شود (مطابق آیین نامه FHWA [۱۹]). (ستون های سنگی به صورت مربعی در کنار هم قرار گرفته اند)

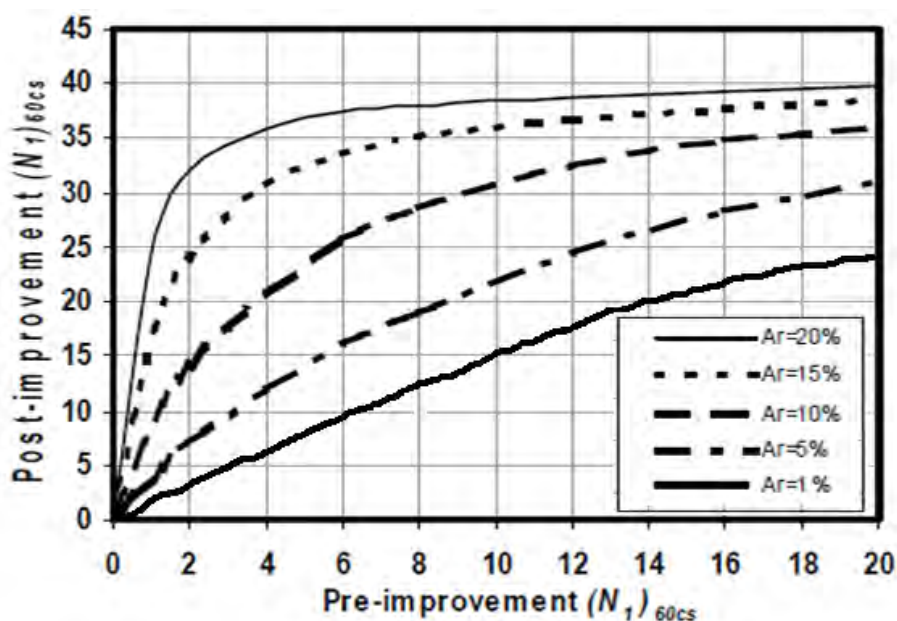
$$D_e = 1.13s \quad 3.$$

در این تحقیق به این خاطر که ستون های سنگی ابتدا حفر و سپس برداشته می شود باید از المان های واسطه مطابق رابطه ۴ و ۵ استفاده شود.

$$K_n = K_s = 10 \times \max[(K + ((4/3) \times G)) / \Delta z_{\min}] \quad 4.$$

$$\phi = \text{tg}^{-1}((2/3)\text{tg}(\phi)) \quad 5.$$

که برای متفاوت نبودن مدلسازی برای ستون های سنگی با قطرها و فاصله بندی مختلف مقدار سختی نرمال و برشی ستون های سنگی برابر  $1.1 \times 10^9 \text{ Pa}$  در نظر گرفته شده و زاویه اصطکاک المان های واسطه ستون سنگی برابر ۱۷ درجه می باشد.



شکل ۲- تغییرات عدد SPT خاک ماسه ای سست و تمیز و لای دار با نسبت جایگزینی سطح

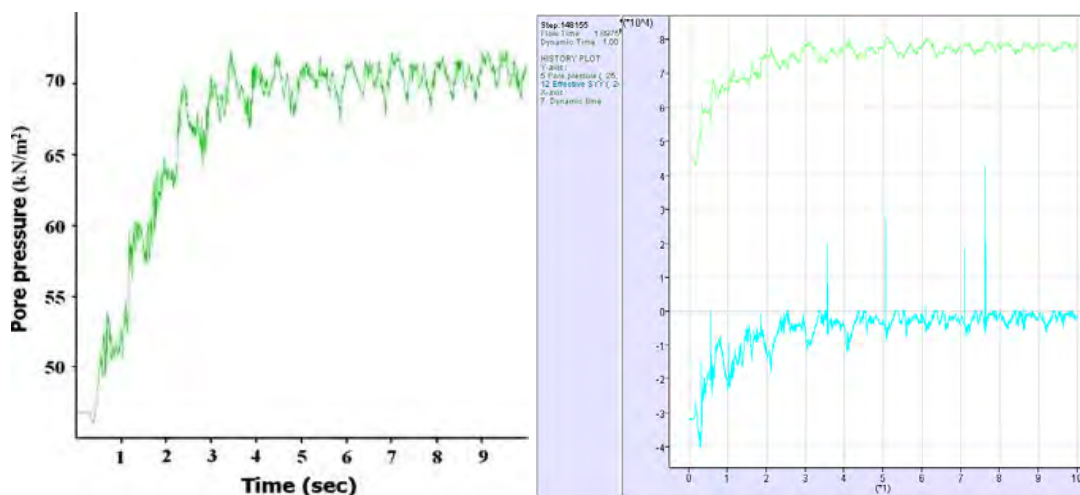
### ۳. اعتبارسنجی مدل و نتایج

حال نمودارهایی که از مدل مینا بدست آمده در شکل های ۳ و ۴ و ۵ و ۶ که در زیر آمده با هم مقایسه می گردند؛ ملاحظه می شود که نمودار انطباق خوبی را برهم دارند. در قسمت بعد ستون های سنگی تا فاصله تقریباً ۱۰ متری با خطای مثبت منفی ۱ متری ترسیم می شوند؛ بدین شکل که ستون های سنگی بالای تونل تا عمق ۶ متری (۱ متر اختلاف تا تاج تونل) و ستون های کناری تا عمق ۱۰ متری در دو نوع قطر مختلف (۰٫۵ و ۱ متر) با فاصله بندی

در مجموع ۶ مدل‌سازی ستون سنگی با دامنه های مختلف موج (از 0.1g تا 0.4g) شبی سازی شده که در مجموع ۳۰ دفعه با شتاب های مختلف مدل‌سازی می شود.

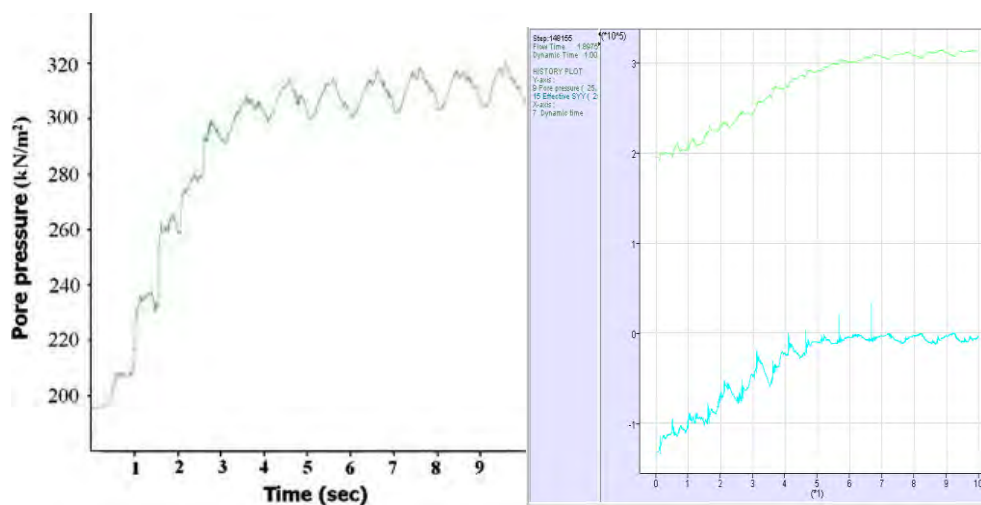
شکل ۲ تنش موثر و فشار آب را در ۴ متری نشان می دهد که از نرم افزار بدست آمده و شکل ۳ نمودار فشار آب در ۴ متری مقاله آزادی است؛ همان طور که مشخص است در عمق ۴ متری هر دو نمودار تقریباً از فشار آب  $45.5 \text{ KN/m}^2$  شروع شده و به  $70 \text{ KN/m}^2$  ختم می شود. شکل ۴ نیز تنش موثر و فشار آب را در ۱۹ متری نشان می دهد که از نرم افزار مستخرج شده و شکل ۵ نمودار فشار آب در ۱۹ متری مقاله آزادی است، که هر دو نمودار فشار آب از  $200 \text{ KN/m}^2$  شروع شده و به  $310 \text{ KN/m}^2$  ختم می شود.

اختلاف کمی که در نمودارها وجود دارد به چند دلیل می تواند باشد از جمله: ۱- میرایی مورد استفاده در این تحقیق از نوع رایلی می باشد ولی در مقاله میر محمد حسینی از نوع local انتخاب شده؛ به این دلیل که در شتاب های بالا فشار آب منفذی رفتار درستی را نشان نمی دهد و میرایی رایلی به غیر از درصد میرایی، فرکانس طبیعی خاک را نیز می گیرد. ۲- برای مدل‌سازی پوشش تونل از المان Linear استفاده شده در صورتیکه طبق منوال فلک فرمول سازی المان Beam برای تحلیل در حالت تنش صفحه ای انجام می گیرد. ۳- در این پژوهش از فلک ۷ استفاده شده، در صورتیکه مقاله آزادی از فلک ۴ استفاده شده است.



شکل ۳- تنش موثر و فشار آب در نقطه ۴ متری [۹۰۸]

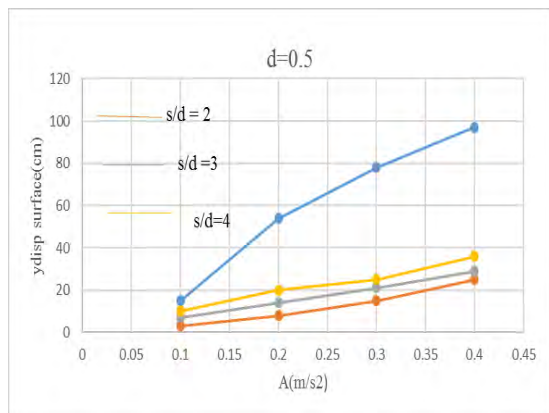
شکل ۴- فشار آب منفذی در ۴ متری [۹۰۸]



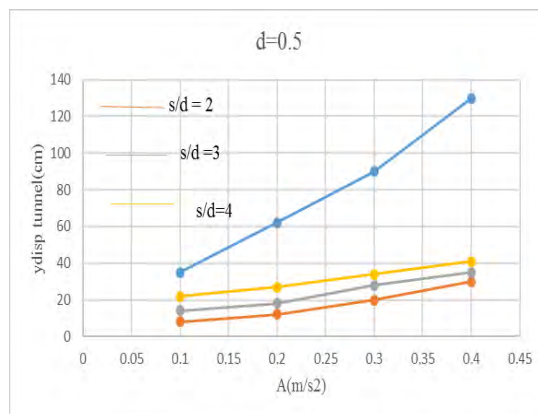
شکل ۵- تنش موثر و فشار آب در نقطه ۱۹ متری [۹۰۸]

شکل ۶- فشار آب در نقطه ۱۹ متری [۹۰۸]

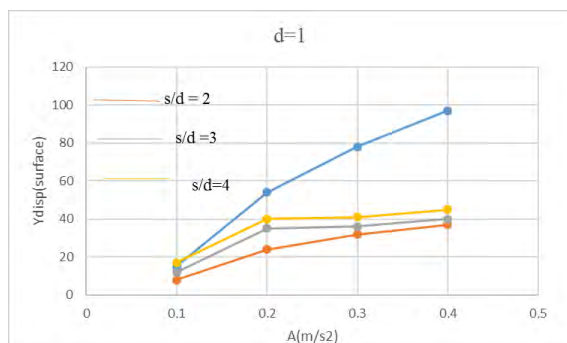
در قسمت بعد نمودارهای ۷ و ۸ و ۹ و ۱۰ ستون‌های سنگی با قطرهای و نسبت فاصله بندی‌های مختلف از شتاب 0.1g تا 0.4g را برای بلند شدگی در سطح زمین و کف تونل نشان می‌دهد.



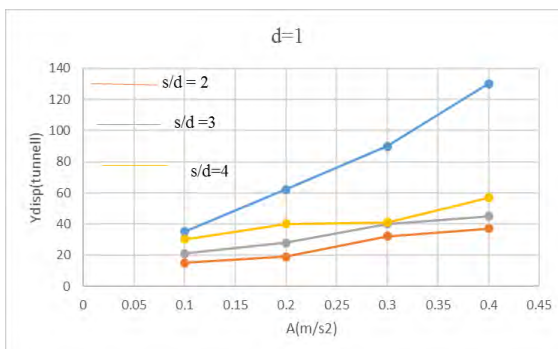
شکل ۷- نمودار دامنه شتاب به جابجایی سطح زمین (قطر ستون ها=۰.۵ متر)



شکل ۸- نمودار دامنه شتاب به بلندشدگی کف تونل (قطر ستون ها=۰.۵ متر)



شکل ۹- نمودار دامنه شتاب به جابجایی کف زمین (قطر ستون ها=۱ متر)



شکل ۱۰- نمودار دامنه شتاب به جابجایی بلندشدگی تونل (قطر ستون ها=۱ متر)

در همه نمودارهای بالا، نشان داده شده که با قرار دادن ستون سنگی، بلندشدگی سطح زمین و کف تونل کاهش پیدا کرده است. حال به صورت جزئی تر در نمودارها متمرکز شویم: در نمودار ۷، تاثیر  $s/d$  های مختلف را تحت قطر ۰.۵ متر برای سطح زمین نشان می‌دهد که به صورت میانگین در تمامی شتاب‌ها در  $s/d=2,3,4$  به ترتیب، تقریباً، ۸۰، ۶۵ و ۶۰ درصد کاهش داشته‌اند. نمودار ۸ تاثیر  $s/d$  ها را تحت قطر ۱ متر برای کف تونل نشان می‌دهد که درصد کاهش آن‌ها به ترتیب ۷۵، ۷۰ و ۶۰ هست که نشانگر آن است که در شرایط قطر برابر، درصد کاهش بلندشدگی (اعم سطح زمین و یا کف تونل) تقریباً در تمامی شتاب‌ها یکسان می‌باشند.

نمودار ۹ تاثیر  $s/d$  را تحت قطر ۱ متر برای کف تونل نشان می‌دهد که درصد کاهش‌ها به ترتیب ۶۰، ۵۵ و ۵۰ می‌باشد و برای نمودار ۱۰ (سطح زمین) نیز ۵۵، ۵۰ و ۴۵ می‌باشد. از نمودارهای ۷ و ۱۰ (مربوط به سطح زمین هستند) می‌توان نتیجه گرفت که افزایش فاصله بندی ستون‌ها، درصد کاهش جابجایی را تا حدود ۲۰ درصد کمتر کرده و برای نمودارهای ۸ و ۹ (مربوط به کف تونل هستند) درصد کاهش‌ها تا ۳۰ درصد کمتر می‌شود.

#### ۴. نتیجه گیری

در این تحقیق، شبیه سازی با نرم افزار تفاضل محدود FLAC2D انجام گردید به این طریق که ابتدا اعتبارسنجی چند نمودار مدل با مقاله آزادی و میرمحمد حسینی انجام گردید که از صحت مدل سازی اطمینان حاصل شود. سپس در بالا و در کناره های تونل تا فاصله حدود ۱۰ متر ستون های سنگی با مشخصات تغییر یافته اطراف آن (سلول واحد) با قطر ها و فاصله بندی های مختلف انجام شد و ستون های سنگی در شتاب های مختلف مدل سازی گردیدند و نتیجه گیری شد که کمترین جابجایی سطح زمین و کف تونل در حالت کمترین قطر و کمترین فاصله بندی اتفاق می افتد و افزایش فاصله بندی ها تاثیر شدیدتری را نسبت به افزایش قطر دارد. افزایش قطر در فاصله بندی ثابت در شتاب های بالا، باعث تاثیر بیشتری نسبت به شتاب های پایین است.

#### ۵. مراجع

1. Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tohoku Branch, Report on the Damage Investigation of the 1983 Nihonkai-Chubu Earthquake (1986) (in Japanese).
2. Japan Society of Civil Engineers, Reconnaissance Report on the July 16, 1990 Luzon Earthquake, the Philippines (1993) (in Japanese).
3. Jefferies, M, Been, K., "Soil Liquefaction: A Critical State Approach", Second Edition, CRC Press, (2015).
4. Adalier, K., Abdoun, T., Dobry, R., Phillips, R., Yang, D., and Naesgaard, E. "Centrifuge Modelling for Seismic Retrofit Design of an Immersed Tube Tunnel." International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 23-35(2003).
5. Ling, H.I., Mohri, Y., Kawabata, T., Liu, H., Burke, C. and Sun, L.. "Centrifugal modeling of seismic behavior of large-diameter pipeline in liquefiable soil," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE vol. 129, No. 12, pp. 1092–1101, (2003).
6. S.C. Chian, S.P.G. Madabhushi. "Effect of buried depth and diameter on uplift of underground structures in liquefied soils" *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 41, pp 181–190,(2012)
7. Liu, H.B. & Song, E.X., "Seismic response of large underground structures in liquefiable soils subjected to horizontal and vertical earthquake excitations", *Computers and Geotechnics*, vol. 32, No. 4, pp. 223–244, (2005).
8. Azadi, M., & Hosseini, S. M. M. (2010). Analyses of the effect of seismic behavior of shallow tunnels in liquefiable grounds. *Tunnelling and underground space technology*, 25(5), 543-552.
9. Azadi, M., & Hosseini, S. M. M. (2010). The uplifting behavior of shallow tunnels within the liquefiable soils under cyclic loadings. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(2), 158-167.
10. Rezania, M., Faramarzi, A., & Javadi, A. A. (2011), "An evolutionary based approach for assessment of earthquake-induced soil liquefaction and lateral displacement". *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 24(1), pp.142-153.
11. Unutmaz, B. (2014), "3D liquefaction assessment of soils surrounding circular tunnels. *Tunneling and Underground Space Technology*, 40, 85-94.
12. Watanabe, K., Sawada, R., & Koseki, J. (2016). Uplift mechanism of open-cut tunnel in liquefied ground and simplified method to evaluate the stability against uplifting. *Soils and Foundations*, 56(3), 412-426.
13. Fattah, M. Y., Al-Neami, M. A., & Jajjawi, N. H. (2014). Prediction of liquefaction potential and pore water pressure beneath machine foundations. *Central European Journal of Engineering*, 4(3), pp.226-249.
14. Saeedzadeh, Hataf. "Uplift response of buried pipelines in saturated sand deposit under earthquake loading", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 31, No. 10, pp. 1378-1384, (2011).
15. Marandi, S.M. and Rasti, A.R., "Parameters Analysis of the Covering Soil of Tunnels Constructed In Liquefiable Soils, " *International Journal of Engineering*, Vol. 25, No. 4, Transactions A pp. 333-

346, (2012).

۱۶. باقریه ع، لولویی ا، & باقریه ا. (۲۰۱۶). مدل سازی بالازدگی تونل و شریان های حیاتی در زمین های مستعد روانگرایی تحت بار لرزه ای. فصلنامه مهندسی عمران فردوسی، ۲۷(۲)، ۱۴۴-۱۲۷.

17. Esmaeili, M., & Hakimpour, S. M. (2015). Three dimensional numerical modelling of stone column to mitigate liquefaction potential of sands. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 17(2), 127-140.

18. Arulmoli, K., Muraleetharan, K.K., Hossain, M.M. and Fruth, L.S, "VELACS laboratory testing program, soil data report", The Earth Technology Corporation, (1992), Project NO. 90-0562, Irvine, California.

19. FHWA , "Design and construction of stone column", Volume I. Report No. FHWA/RD- 83/026, (1983).