

## یادداشت فنی

## بررسی تأثیر بارهای دینامیکی ناشی از زلزله بر توزیع فشار منفذی، مطالعه موردی:

## خط ۱ مترو تبریز

لیلا نیک‌اختر<sup>۱</sup>، محمدباقر فتحی<sup>۲\*</sup>، کریم عابدی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی معدن، دانشکده مهندسی نفت، ژئوفیزیک و معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- عضو هیات علمی گروه مهندسی معدن، مرکز آموزش عالی شهید باکری میاندواب، دانشگاه ارومیه

۳- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند

(دریافت: شهریور ۱۳۹۴، پذیرش: آذر ۱۳۹۶)

## چکیده

سازه‌های ژئوتکنیکی با انواع گوناگونی از فرایندهای طبیعی (زلزله، روانگرایی و غیره) مواجه هستند که این سبب پیچیدگی رفتار و شرایط طراحی آنها خواهد شد. این سازه‌ها در طول عمر خود، به دلیل برخورد با این پدیده‌ها از جمله زلزله، خصوصیات و رفتار ثابتی نخواهد داشت. رفتار مکانیکی خاک‌ها تحت بارهای استاتیکی پیچیده است و لذا در جین بارگذاری لرزه‌ای بسیار پیچیده‌تر خواهد بود. مهم‌ترین مساله‌ای که در سال‌های اخیر نظر پژوهشگران را به خود جلب کرده است، گسترش مدل رفتاری مناسب برای مدلسازی رفتار تناوبی واقعی خاک اشباع مخصوصاً در ناحیه اندرکنش خاک-سازه است. دلیل این امر آن است که تخمین پاسخ سازه ساخته شده بر روی خاک مستعد روانگرایی در حین زلزله به طور قوی به لحاظ کردن تأثیر گسترش فشار آب حفره‌ای و کاهش مقاومت خاک بر روی رفتار سیستم بستگی دارد. برای بررسی دقیق لازم است تا یک تحلیل دینامیکی غیرخطی تنش مؤثر انجام پذیرد. این تحلیل می‌تواند به صورت کویل کامل یا شبه کویل انجام شود. از روش‌های شبه کویل، مدل فین و مارتین و مدل بایرن است. از میان این مدل‌ها مدل بایرن به عنوان مدل رفتاری، برای خاک محدوده در نظر گرفته شده است و ضرایب مربوطه محاسبه شده است که در مدلسازی عددی (*FLAC2D*) از آنها استفاده می‌شود. همچنین احتمال روانگرایی با استفاده از نتایج آزمون محلی و با روش تنش مؤثر بررسی شد که با ضریب اطمینان ۱/۲۸ برای زلزله بم با بزرگای گشتاوری ۶/۵ روانگرایی اتفاق نخواهد افتاد. برای مدلسازی عددی از میان شتاب‌نگاشت‌های موجود، شتاب‌نگاشت بم در سطح *DBE* انتخاب شده و تأثیر بارهای دینامیکی زلزله بر فشار منفذی بررسی شد. نتایج تحلیل عددی دلالت بر افزایش فشار منفذی در اثر اعمال بارهای دینامیکی ناشی از زلزله را دارند که در نتیجه مقادیر بار بیشتری به ساختگاه مورد نظر (تونل مترو) وارد می‌شود و در نهایت امکان برآورد سیستم نگهداری مناسب‌تری برای تونل وجود خواهد داشت.

## کلید واژه‌ها

روانگرایی، تنش مؤثر، مدل بایرن، نرم‌افزار *FLAC2D*، سطح *DBE*\* عهده دار مکاتبات: [fathi.bagher@gmail.com](mailto:fathi.bagher@gmail.com)

## ۱- مقدمه

روش تنش سیکلی از نظر مفهومی بسیار ساده است. بارگذاری ناشی از زلزله که برحسب تنش های برشی سیکلی بیان می شود با مقاومت روانگرایی خاک که آن نیز برحسب تنش های برشی بیان می شود مقایسه می گردد. در مکان هایی که بارهای ناشی از زلزله بیش از مقاومت است روانگرایی رخ خواهد داد. اما کاربرد روش تنش سیکلی نیازمند توجه دقیق به نحوه مشخص کردن شرایط بارگذاری و مقاومت روانگرایی است [۲].

## ۱-۳- مروری بر مطالعات گذشته

فین<sup>۲</sup> (۱۹۹۱ و ۱۹۹۸) تطابق خوب تخمین های نرم افزار TARA-3 را با نتایج مطالعات سانتریفوژ گزارش کرده است [۳، ۴]. در این مدل عددی از مدل تنش- کرنش هذلولوی به همراه مدل افزایش فشار آب حفره ای فین و مارتین استفاده شده است.

استفاده موفق از حل شبه کوپل در نرم افزار FLAC برای تخمین رفتار اسکله صندوقه ای در خاک مستعد روانگرایی توسط یانگ و دیکنسون<sup>۳</sup> گزارش شد [۷]. در تحقیق ایشان آنالیز غیرخطی تنش مؤثر با استفاده از مدل رفتاری ساده موهر-کلمب و مدل افزایش فشار آب حفره ای فین و مارتین انجام یافته است. نتایج این تحقیق در آئین نامه<sup>۴</sup> PIANC منعکس شده است. فرض مهم این تحقیق عدم وجود امکان افزایش فشار آب حفره ای در خاک فونداسیون است.

کوک و همکاران با استفاده از نرم افزار FLAC2D و با انتخاب مدل تنش- کرنش هذلولوی Pyke و مدل افزایش فشار آب حفره ای بایرن به بررسی رفتار انواع سازه های خاکی پرداخت [۸].

تحقیقی که در سه محیط سازه، آب دریا و خاک پشت و زیر دیوار توسط روش عددی المان محدود در نرم افزار ADINA-system انجام شده در آنالیز دینامیکی غیرخطی تنش مؤثر (کوپل کامل)، مدل افزایش فشار آب حفره ای انتخاب شده مدل بایرن است. بدین منظور ۴ مورد از آزمایش های میز لرزه انجام یافته بر روی اسکله وزنی در دانشگاه توکیو توسط روش عددی تفاضل محدود و با استفاده از نرم افزار FLAC2D مدلسازی و آنالیز شده است. در این مرحله آب دریا مدلسازی نمی شود و توجه ویژه بر روی توانایی مدل رفتاری است [۹].

رفتار مقاومتی خاک به مناسب ترین شکل برحسب خاک های درشت دانه غیرچسبیده و خاک های ریزدانه چسبیده تحت شرایط زهکشی شده و زهکشی نشده بحث می شود. بارگذاری زلزله عموماً چنان سریع اعمال می شود که تمامی بخش های خاک به جز نفوذپذیرترین قسمت آن تحت شرایط زهکشی نشده بارگذاری می شود. مقاومت خاک های غیرچسبیده به میزان بسیار زیادی وابسته به پدیده روانگرایی است. مقاومت سیکلی مبتنی بر مقدار محدود کرنش سیکلی یا کرنش متوسط در خلال بارگذاری سیکلی است (گرچه ممکن است خاک چنانکه به وسیله شرایط تنش مؤثر تعریف شود، در حالت شکست نباشد) [۱].

## ۱-۱- روانگرایی

روانگرایی عبارتی کلی است که به رفتار ناپایدار ماسه های اشباع و در نتیجه افزایش فشار آب حفره ای اطلاق می گردد. نمود خارجی چنین رفتاری کاهش مقاومت برشی و بروز تغییر شکل های قابل ملاحظه در لایه ماسه خواهد بود. ایوازاکی<sup>۱</sup> (۱۹۸۶) مکانیزم های مربوط به روانگرایی ماسه اشباع شده ناشی از زمین لرزه را به شرح زیر برمی شمرد:

- ارتعاشات زمین در اثر زلزله، موجب اعمال تنش های برشی سیکلی در ماسه های اشباع می گردد؛
- تنش های برشی موجب بروز تمایل به انقباض شده ولی شرایط زهکشی نشده درون ماسه مانع تغییر حجم می گردد.
- متعاقباً فشار آب حفره ای اضافی در ماسه ایجاد شده و رو به افزایش می گذارد.
- تنش های مؤثر کاهش یافته، لذا مقاومت برشی کاهش می یابد.
- نهایتاً اگر فشار آب حفره ای به مقدار قابل ملاحظه ای افزایش یابد مقاومت برشی به میزان بسیار کمی رسیده و به موجب رابطه (۱) ماسه روانگونه می شود:

$$\tau = (\sigma_n - U) \operatorname{tg} \varphi \quad (1)$$

که در آن  $\tau$  مقاومت برشی،  $\sigma_n$  تنش کل،  $U$  فشار آب حفره ای،  $\varphi$  زاویه اصطکاک داخلی است [۲].

## ۱-۲- ارزیابی شروع روانگرایی (روش تنش سیکلی)

## ۱-۴- معرفی ساختگاه پروژه

مسیر خط یک قطار شهری تبریز از شرق به غرب خواهد بود. بخش تونل عمیق از زیر مرکز شهر عبور می‌نماید و تعداد یازده ایستگاه در این قسمت در شفت‌های باز اجرا خواهند شد. این بخش از سمت شرق از ایستگاه شماره ۷ از کیلومتر ۸۵+۰/۲ شروع شده و از ایستگاه شماره ۱۷ در کیلومتر ۸۵+۸/۳ به پایان خواهد رسید. اجرای دو تونل از محل ایستگاه شماره ۷ به وسیله‌ی دو دستگاه ماشین حفار تونل TBM به روش سپر متعادل کننده فشار زمین انجام خواهد شد. به دلیل این که عمده مسیر تونل خط یک متروی تبریز در مصالح شن و ماسه و لای بوده و عمدتاً در زیر سطح آب‌های زیرزمینی واقع است، جبهه کار باید به طریقی حفاظت گردد. با توجه به ملاحظات اقتصادی و محدودیت طرح بهترین گزینه، استفاده از دستگاه سپر تعادل فشار خاک (E.P.B.S) تشخیص داده شده است. طول هر یک از تونل‌های دوقلو که به طریق بالا احداث خواهند شد با در نظر گرفتن ایستگاه‌ها ۸/۰۷ کیلومتر است. قطر حفاری شده‌ی تونل‌ها ۶/۸۸ متر بوده و قطر داخلی تونل‌ها پس از نصب جداره (Lining) برابر با ۶ متر خواهد بود. ضخامت قطعات بتنی پیش ساخته ۳۰ سانتی‌متر و هر حلقه آن (Ring) از ۵+۱) ۵ قطعه + یک قطعه کلید) تشکیل شده است. از نظر لیتولوژی اکثر تشکیلات و طبقات زمین‌شناسی آذربایجان شامل طبقات رسوبی، تشکیلات آتشفشانی و تبخیری است. مهم‌ترین این طبقات که در اکثر آذربایجان رخنمون دارند عبارت‌اند از طبقات آهکی، مارنی، ماسه سنگ‌های قرمز، سنگ‌های آواری، سنگ‌های آذرین و رسوبات تبخیری شامل طبقات گچ و نمک و همچنین لایه‌های شیل و رگه‌های نازکی از زغال (لیگنیت). به طور کلی محدوده مورد مطالعه در شمال غربی ایران واقع است که شامل مناطق شمال شرقی فلات ایران و کشور ارمنستان و نیز بخش‌هایی از کشور آذربایجان و ترکیه است. از جمله ویژگی‌های این ناحیه می‌توان به گسلش فعال، چین‌خوردگی فعال در بالای راندگی‌های پنهان، فعالیت آتشفشانی جوان و غیره است. بنابراین احتمال وقوع زلزله در این محدوده زیاد است [۱۰].

## ۲- روش تحلیلی

## ۲-۱- تعیین بارگذاری زلزله

سید و همکارانش<sup>۵</sup> روش خاصی برای یک سری تاریخچه زمانی تنش برشی حاصل از حرکات نیرومند ثبت شده زمین، جهت تعداد سیکل تنش معادل،  $N_{eq}$  (در یک دامنه‌ی ۰.۶۵٪ تنش برشی سیکلی بیشینه یعنی  $\tau_{cyc} = 0.65\tau_{max}$ ) که سبب افزایش فشار منفذی معادل مقداری که تاریخچه زمانی غیرمنظم ایجاد می‌کند، به کار بردند [۲].

## ۲-۲- تعیین مقاومت بر اساس آزمایش‌های برجا

در سال ۱۹۷۱، ویتمن<sup>۶</sup> روشی ارائه کرد که بهره‌گیری از تاریخچه وقوع پدیده‌ی روانگرایی برای تعیین مقاومت روانگرایی بر حسب پارامترهای اندازه‌گیری شده در محل را بیان می‌کند. در این روش از نسبت تنش سیکلی معمولاً به‌عنوان پارامتر بارگذاری و از پارامترهای آزمایش‌های محلی که چگالی و خصوصیات فشار منفذی خاک را منعکس می‌نمایند به عنوان پارامترهای مقاومت روانگرایی استفاده می‌شود.

۲-۳- آزمایش نفوذ استاندارد (SPT<sup>v</sup>)

آزمایش نفوذ استاندارد در ایالات متحده و اغلب کشورها متداول‌ترین آزمون صحرایی جهت تعیین مقاومت روانگرایی بوده است. عواملی که مقاومت روانگرایی را افزایش می‌دهند (مانند چگالی، کرنش قبل از زلزله، ضریب بیش تحکیم یافتگی، فشار جانبی زمین و طول مدت تحت فشار بودن) مقاومت SPT را نیز افزایش می‌دهند. همچنین سید و همکارانش بیان کردند که وجود ذرات ریز می‌تواند بر مقاومت SPT تأثیر بگذارد و لذا باید در ارزیابی مقاومت روانگرایی به حساب آید. آزمون‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که تنش لازم برای شروع روانگرایی در فشارهای مؤثر جانبی بزرگ افزایش یافته است [۴].

سید (۱۹۸۳) پیشنهاد نموده است که اثرات تنش برشی اولیه و فشارهای مؤثر جانبی بزرگ برای اصلاح نسبت تنش سیکلی با استفاده از رابطه (۲) محاسبه گردند:

$$[CSR]_{\alpha, \sigma} = [CSR]_{side} |_{\alpha=0, \sigma=1 \text{ ton/ft}^2} K_{\alpha} K_{\sigma} \quad (2)$$

که در رابطه (۲)  $\alpha = \frac{\tau_{h,static}}{\sigma'_{vo}}$  و  $K_{\alpha}$  و  $K_{\sigma}$  به ترتیب ضرایب اصلاح برای تنش برشی اولیه و فشار سربار مؤثر هستند. مقادیر  $K_{\sigma}$  و  $K_{\alpha}$  برای خاک‌های مختلف متفاوت است و باید در صورت امکان برای هر محل خاص ارزیابی و تعیین شوند.

جهت بیان رفتار سیکلی استفاده می شود. پیش بینی فشار منفذی توسط مدل های فشار منفذی که قادر به تخمین ایجاد فشار منفذی تحت شرایط بارگذاری نامنظم هستند، انجام پذیر است. فشار منفذی محاسبه شده جهت کاهش یا هموار کردن منحنی اصلی در حالتی که تنش مؤثر و (سختی خاک) کاهش یافته، به کار گرفته می شود [۱].

## ۲-۵- مدل فین و مارتین

المانی از خاک اشباع تحت تنش مؤثر قائم  $\sigma'_v$  را در نظر بگیرید. در طی آزمایش برش ساده در شرایط زهکشی شده و تحت کرنش برشی،  $\gamma$ ، کرنش حجمی فشرده گی،  $\Delta\varepsilon_{vd}$ ، به دلیل لغزش دانه ها به وجود می آید. در طی آزمایش در شرایط زهکشی نشده تحت فشار مؤثر یکسان، کرنش برشی باعث افزایش فشار آب حفره ای،  $\Delta u$ ، می گردد. به دلیل آنکه فشار مؤثر در هر دو آزمایش قبل از شروع سیکل های بارگذاری برشی یکسان است، لغزش میان دانه های یکسانی باید اتفاق افتد. در صورتی که آب تراکم ناپذیر فرض شود، تغییر حجمی در طی آزمایش زهکشی نشده اتفاق نمی افتد. بدین سان کرنش حجمی فشرده گی  $\Delta\varepsilon_{vd}$  توسط کرنش حجمی انبساطی یکسان، به علت برگشت ارتجاعی یک بعدی دانه های ماسه تحت کاهش تنش مؤثر به اندازه  $\Delta u$ ، جبران می شود. در صورتی که مدول برگشت ماسه در تنش مؤثر  $\sigma'_v$  با  $\overline{E}_r$  نشان داده شود، می توان نوشت:

$$\Delta u = \overline{E}_r \Delta\varepsilon_{vd} \quad (5)$$

بنابراین برای محاسبه افزایش فشار آب حفره ای در طی یک سیکل کرنش برشی لازم است تا کرنش حجمی مرتبط با کرنش برشی و مدول برگشت در تنش مؤثر موجود، مشخص شود. نتایج آزمایشگاهی حاکی از آن است که افزایش کرنش حجمی  $\Delta\varepsilon_{vd}$  تابعی از کرنش حجمی تجمعی  $\varepsilon_{vd}$  و مقدار کرنش برشی سیکلی  $\gamma$  است. فین و مارتین برای اولین بار با استفاده از نتایج آزمایش ساده سیکلی فرمولی برای محاسبه کرنش حجمی ناشی از برش به صورت رابطه (۶) ارائه کردند:

$$\Delta\varepsilon_{vd} = C_1(\gamma - C_2\varepsilon_{vd}) + \frac{C_3\varepsilon_{vd}^2}{\gamma + C_4\varepsilon_{vd}} \quad (6)$$

برای ماسه کریستال سلیکا با چگالی نسبی  $D_r = 45\%$  ضرایب به صورت زیر است:

$$C_1 = 0.8, C_2 = 0.79, C_3 = 0.45, C_4 = 0.73$$

پارامترهای آزمون محلی اجازه می دهند که مقدار  $CSR_L$  محاسبه شود (یعنی  $CSR^A$  لازم برای شروع روانگرایی). با بهره گیری از تعریف نسبت تنش سیکلی، تنش برشی سیکلی لازم برای شروع روانگرایی عبارت است از:

$$\tau_{cyc,L} = CSR_L \sigma'_{vo} \quad (3)$$

که در آن  $CSR_L$  نسبت تنش سیکلی روانگرایی،  $\sigma'_{vo}$  تنش مؤثر قائم و  $\tau_{cyc,L}$  تنش برشی سیکلی روانگرایی است. هنگامی که بارگذاری سیکلی ناشی از زلزله، مشخص و مقاومت روانگرایی خاکها تعیین شده باشد، پتانسیل روانگرایی را می توان ارزیابی نمود. روش تنش سیکلی، بارگذاری زلزله را با دامنه تنش یکنواخت معادل و مقاومت روانگرایی را با دامنه تنش سیکلی لازم برای ایجاد روانگرایی در همان تعداد سیکل مشخص می کند. بنابراین ارزیابی پتانسیل روانگرایی به مقایسه بین بارگذاری و مقاومت لایه خاک مورد نظر منتهی می شود. روانگرایی در اعماقی رخ می دهد که بارگذاری بزرگتر از مقاومت باشد یا هنگامی که ضریب روانگرایی که به صورت رابطه (۴) بیان می شود کمتر از یک شود:

$$FS_L = \frac{\tau_{cyc,L}}{\tau_{cyc}} = \frac{CSR_L}{CSR} \quad (4)$$

ضریب روانگرایی نسبت تنش برشی سیکلی لازم برای وقوع روانگرایی به تنش برشی سیکلی معادل ناشی از زلزله است که برای وقوع روانگرایی باید کمتر از یک باشد. قابل توجه است که اضافه فشار منفذی حتی هنگامی که ضریب اطمینان محاسبه شده بزرگتر از یک هم باشد می تواند گسترش یابد. کاهش تنش مؤثر به همراه این اضافه فشار منفذی می تواند سختی خاک را کاهش دهد و با از میان رفتن اضافه فشار منفذی نشست رخ خواهد داد [۱].

## ۲-۴- روش تحلیل پاسخ برمبنای تنش مؤثر

مدل رفتاری تنش-کرنش خاک موضوعی است که سالها محور تحقیقات وسیعی بوده است. عملیات توصیف رفتار پیچیده ی خاکهای بالقوه روانگرا به وسیله مدل های ساده رفتاری با چالش همراه بوده است. رفتار غیرخطی تنش-کرنش خاک را می توان توسط مدل های غیرخطی تنش-کرنش و مدل های رفتاری پیشرفته بیان نمود. در مدل های غیرخطی و سیکلی تنش-کرنش از یک منحنی اصلی تجربی و یک سری قوانین باربرداری- بارگذاری مجدد

$$\bar{E}_r = K_m P_a \left( \frac{\sigma'_v}{P_a} \right)^m \quad (15)$$

که در آن استفاده از مقادیر  $K_m \approx 1600$  و  $m=0.5$  و  $P_a$  فشار جو، مدولی را ارائه می‌کند که با مقدار ارائه شده توسط فین و مارتین<sup>۱۱</sup> و نتایج آزمایش‌های روانگرایی تطابق خوبی دارد [۳، ۴، ۶].

### ۳- روش عددی

هنگام ساخت فضای زیرزمینی حتی اگر تنش‌های برجا در حد متوسط خود باشند احتمال بروز گسیختگی ناشی از القاء تنش در توده‌سنگ‌های ضعیف در برگیرنده وجود دارد. گسیختگی از این نوع که بیشتر در توده‌سنگ‌های ضعیف در برگیرنده یک سازه زیرزمینی رخ می‌دهد، مشکلاتی را از لحاظ طراحی به وجود می‌آورند، به طوری که هم‌اکنون نه تنها هیچ‌گونه مدل ساده عددی برای آن وجود ندارد، بلکه محاسبات دقیق ضریب ایمنی که در طی آن بتوان محدوده مجاز و قابل قبول این‌گونه فرآیندهای گسیختگی را تعریف کند نیز در دسترس نیست. قضاوت مهندسی در خصوص کیفیت طراحی سیستم نگهداری، باید بر اساس ارزیابی صحیحی از عواملی نظیر بزرگی و توزیع تغییر مکان در سنگ‌ها و همچنین بزرگی و نحوه توزیع تنش‌ها در المان‌های تشکیل دهنده سیستم نگهداری انجام شود که لازمه‌ی این امر تحلیل استاتیکی و دینامیکی محدوده پروژه است. از آن‌جا که اکثر حفاریات زیرزمینی شکل منظم ندارند و از طرفی تحت تأثیر شرایط محیطی خود هستند، روش‌های فرم بسته برای محاسبه تنش‌ها، جابه‌جایی‌ها و شکست توده‌سنگ با محدودیت‌هایی مواجه خواهند شد. خوشبختانه تعدادی از روش‌های عددی در طی چند دهه گذشته توسعه یافته‌اند و این روش‌ها قادر به حل تقریبی این‌گونه مسائل هستند. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش تفاضل محدود اشاره کرد. در این پژوهش برای برآورد میزان تنش‌های ناشی از بارگذاری زلزله و تغییر فشار آب منفذی به تونل مترو تبریز از روش عددی تفاضل محدود با کمک نرم‌افزار FLAC2D استفاده شده است.

و  $\Delta \varepsilon_{vd}$  و  $\varepsilon_{vd}$  و  $\gamma$  به صورت درصد بیان می‌شوند. تغییر حجم در چگالی نسبی دیگر،  $Dr_1$ ، توسط رابطه (۷) به دست می‌آید.

$$(\Delta \varepsilon_{vd})_{Dr_1} = R(\Delta \varepsilon_{vd})_{45} \quad (7)$$

که در آن  $R$  پارامتری است که با چگالی نسبی متغیر است. بر اساس داده‌های سیلور و سید<sup>۹</sup> رابطه زیر برای محاسبه  $R$  ارائه شده است.

$$R = 0.0003(100 - Dr)^2 + 0.062 \quad (8)$$

مدول برگشت نیز در هر تراز تنش موثری به صورت رابطه (۹) ارائه شده است.

$$\bar{E}_r = \frac{(\sigma'_v)^{1-m}}{mk_2 (\sigma'_{v0})^{n-m}} \quad (9)$$

که در آن  $\sigma'_{v0}$  تنش مؤثر اولیه،  $k_2$  و  $m$  و  $n$  ضرایب تجربی است [۳، ۴].

### ۲-۶- مدل بایرن

بایرن رابطه (۱۰) را برای محاسبه افزایش کرنش حجمی ناشی از برش ارائه کرده است:

$$\Delta \varepsilon_{vd} = \gamma C_1 \exp\left(\frac{-C_2 \varepsilon_{vd}}{\gamma}\right) \quad (10)$$

ضریب  $C_1$  مقدار افزایش کرنش حجمی را کنترل می‌کند و ضریب  $C_2$  شکل آن را. بهترین راه برای پیدا کردن پارامترهای  $C_1$  و  $C_2$  انجام آزمایش برش سیکلی است. در غیر این صورت ضرایب بالا را می‌توان از رابطه‌های (۱۱) و (۱۲) به دست آورد.

$$C_1 = 7600(Dr)^{-2.5} \quad (11)$$

$$C_2 = 0.4 / C_1 \quad (12)$$

که در فرمول بالا  $Dr$  برحسب درصد است. سید و توکیما<sup>۱۰</sup> ارتباطی میان چگالی نسبی و عدد SPT ارائه کرده‌اند که به صورت رابطه (۱۳) است.

$$Dr = 15(N_1)_{60}^{0.5} \quad (13)$$

لازم به ذکر است برای الگوی تصادفی سیکل‌های کرنش برشی (بارگذاری زلزله)، مناسب است که کرنش حجمی در هر نیم سیکل بر اساس رابطه (۱۴) محاسبه شود.

$$(\Delta \varepsilon_{vd})_{1/2cycle} = 0.5 \gamma C_1 \exp\left(\frac{-C_2 \varepsilon_{vd}}{\gamma}\right) \quad (14)$$

بایرن مدول برگشت برای محاسبه مقدار افزایش آب حفره‌ای را در رابطه (۱۵) ارائه کرده است.

#### ۴- ارزیابی پتانسیل وقوع روانگرایی برای ساختگاه پروژه به روش تحلیلی

مشخصات ساختگاه (ایستگاه شماره ۱۳) در جدول ۱ آورده شده است.

بر طبق رابطه سید:

$$\tau_{cyc} = (0.65) \left( \frac{0.35g}{g} \right) (245.54) = 55.86 Kpa \quad (16)$$

با در دست داشتن مقدار  $N_{60}$ ، با استفاده از جدول (۲) به دست می‌آید.

جدول ۱: خصوصیات لازم برای بررسی روانگرایی در ساختگاه پروژه [۱۰]

SPT (N60)	درصد ریزدانه	چگالی تر (mg/m3)	چگالی خشک (mg/m3)	سطح آب زیرزمینی (متر)	عمق (متر)	تنش قائم کل (Kpa)
۲۳/۵	۸-۲۰٪	۲/۶۴	۱/۸۲	۵/۳	۱۳/۶۷	۲۴۵/۵۴

جدول ۲: همبستگی بین  $\phi'$ ،  $Dr$ ،  $\gamma$ ،  $N_{60}$ ،  $N$  برای خاک‌های درشت دانه [۵]

N	$N_{60}$	توضیحات	$\gamma$ (KN/m3)	$Dr$ (%)	$\phi'$ درجه
۰-۵	۰-۳	خیلی شل	۱۱-۱۳	۰-۱۵	۲۶-۲۸
۵-۱۰	۳-۹	شل	۱۴-۱۶	۱۶-۳۵	۲۹-۳۴
۱۰-۳۰	۹-۲۵	متوسط	۱۷-۱۹	۳۶-۶۵	۳۵-۴۰
۳۰-۵۰	۲۵-۴۵	متراکم	۲۰-۲۱	۶۶-۸۵	۳۸-۴۵
>۵۰	>۴۵	خیلی متراکم	>۲۱	>۸۶	>۴۵

با استفاده از جدول ۳،  $CSR_{M=7.5}$  به  $CSR$  زلزله مورد نظر تبدیل می‌شود.

جدول ۳: ضرایب اصلاح بزرگای برای روش تنش سیکلی [۱]

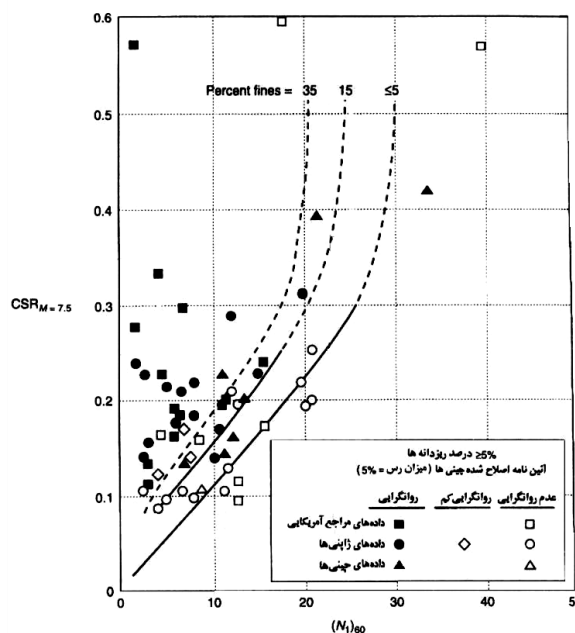
$CSR_M / CSR_{M=7.5}$	بزرگای M
۱/۵	۵/۲۵
۱/۳۲	۶
۱/۱۳	۶/۷۵
۱/۰۰	۷/۵
۰/۸۹	۸/۵

و طبق رابطه (۴)،

$$FS_L = \frac{\tau_{cyc,L}}{\tau_{cyc}} = 1.28 \quad (17)$$

همان طور که مشاهده می‌شود ضریب اطمینان روانگرایی بزرگ‌تر از یک است و در نتیجه احتمال روانگرایی در ساختگاه وجود ندارد، ولی اضافه فشار منفذی حتی هنگامی که ضریب اطمینان محاسبه شده بزرگ‌تر از یک هم باشد، می‌تواند گسترش یابد و کاهش تنش مؤثر به همراه این اضافه فشار منفذی می‌تواند سختی خاک را کاهش دهد و با از میان رفتن اضافه فشار منفذی نشست رخ خواهد داد.

با در دست داشتن  $N_{60}$  و درصد ریزدانه خاک و با استفاده از نمودارهای شکل ۱،  $CSR_{M=7.5}$  محاسبه می‌شود.



شکل ۱: رابطه بین نسبت تنش‌های سیکلی مولد روانگرایی و مقادیر  $(N_1)_{60}$  برای ماسه سیلت دار در زلزله های با  $M=7.5$  [۱]

## ۵- مدل عددی برای ساختگاه پروژه

## ۵-۱- انتخاب شتاب‌نگاشت مناسب

در این پژوهش به منظور انتخاب شتاب‌نگاشت مناسب از اصلاح شتاب‌نگاشت‌های واقعی استفاده شده است. در این روش شتاب‌نگاشت ثبت شده در زلزله‌ای که بیشترین انطباق را با لرزه‌زمین‌ساخت و زمین‌شناسی ساختگاه مورد نظر داشته باشد، انتخاب می‌شود. براین اساس عواملی چون مکانیزم گسیختگی گسل عامل زلزله، بزرگای زلزله، فاصله سطحی و لیتولوژی محل شتاب‌نگاشت مورد توجه قرار می‌گیرند. پس از بررسی‌های فراوان، شتاب‌نگاشت بم انتخاب

شد. زمین‌لرزه ۵ دیماه ۱۳۸۲ بم در ساعت ۵:۲۶:۲۶ به وقت محلی (ساعت ۱:۲۶:۲۶ روز ۲۶ دسامبر ۲۰۰۳ به وقت بین المللی GMT) در شهر تاریخی بم در جنوب شرقی کشور و در جنوب شرقی کرمان رخ داد. نگاشت به دست آمده در ایستگاه بم بیشینه شتاب تصحیح نشده افقی با ترتیب  $g/0.8$  و  $g/0.7$  بر روی مولفه‌های افقی شرقی-غربی و شمالی-جنوبی نشان می‌دهد. همچنین بیشینه شتاب تصحیح نشده  $g/0.98$  بر روی مولفه قائم نشان می‌دهد. زلزله بم با بزرگای گشتاوری  $6/5$  (با محاسبه گشتاور لرزه ای) در اثر جنبائی مجدد گسل بم رخ داد و شهر بم را به دلیل اثر حوزه نزدیک گسل ویران نمود [۸].

جدول ۴: پارامترهای ژئوتکنیکی و لرزه ای در ساختگاه پروژه [۱۰]

پارامتر	شتاب بیشینه در سطح (DBE)	چگالی محیط ( $Kg/m^3$ )	نسبت پواسون محیط	مدول الاستیسیته محیط (Mpa)	مدول برشی محیط (Mpa)	سرعت انتشار موج S ( $m/s$ )
مقدار	$0.35g$	۲۱۵۰	۰/۳۵	۲۲۲/۲	۷۴/۰۷۴	۲۲۸/۶۲

بیشینه شتاب ثبت شده در ایستگاه بم،  $g/0.62$  است. این مقدار با بیشینه شتاب به دست آمده از تحلیل خطر زلزله برای زلزله DBE که  $g/0.35$  است، تفاوت دارد. بنابراین لازم است تا شتاب‌نگاشت پایه نسبت به مقادیر مورد نظر مقیاس شود. ضریب مقیاس به صورت نسبت بیشینه شتاب هدف به بیشینه شتاب پایه تعریف می‌شود. به منظور جلوگیری از اعوجاج موج در مدل و انتشار صحیح آن، لازم است تا بزرگ‌ترین بعد المان کوچک‌تر از یک دهم تا یک هشتم طول موج بزرگ‌ترین فرکانس موج ورودی باشد. بزرگ‌ترین بعد المان را می‌توان به صورت رابطه (۱۸) تعیین کرد.

$$l_{max} = \frac{C_s}{10f_{max}} \quad (18)$$

در این رابطه  $C_s$  سرعت موج برشی و  $f_{max}$  بزرگ‌ترین فرکانس تاریخچه زمانی موج است که  $50 \text{ Hz}$  است. با توجه به اینکه حرکات افقی زلزله به صورت یک موج برشی مدلسازی خواهد شد، از این‌رو در رابطه اخیر از سرعت موج برشی استفاده می‌شود. در فواصل دور از منبع لرزه می‌توان فرض کرد که امواج به صورت صفحه‌ی منتشر می‌شوند. بنابراین سرعت موج برشی در ساختگاه تونل از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

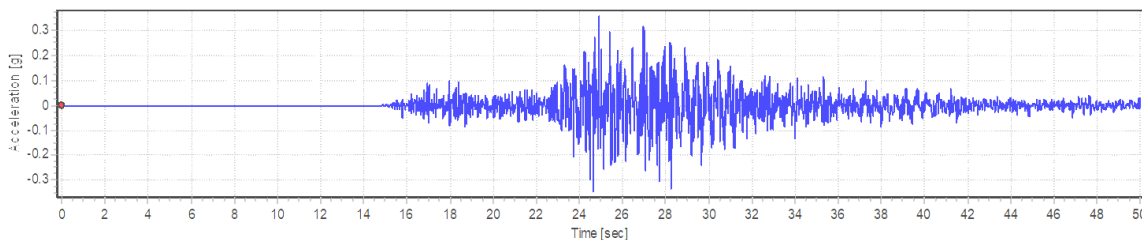
$$C_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (19)$$

با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته سرعت موج برشی  $185/61 \text{ m/s}$  به دست می‌آید. اکنون با جایگزینی مقادیر معلوم  $C_s$  و  $f_{max}$  در رابطه (۱۸) بزرگ‌ترین بعد المانی که می‌تواند در مدل استفاده شود،  $0.37$  متر است. بدیهی است که در چنین شرایطی تعداد المان‌های مدل افزایش یافته و در نتیجه زمان و حافظه مورد نیاز برای تحلیل به شدت افزایش می‌یابد. به منظور جلوگیری از این مشکل لازم است تا  $f_{max}$  را کاهش داده، یا به بیان دیگر فرکانس‌های بالای تاریخچه زمانی شتاب را فیلتر کرد. شکل ۲ دامنه فوریه نسبت به فرکانس را بعد از فیلتر کردن فرکانس‌های بالاتر از  $25$  هرتز نشان می‌دهد. بدین ترتیب مدلی با ابعاد  $0.5$  متر برای تحلیل انتخاب شد.

## ۵-۲- مدل دینامیکی تفاضل محدود

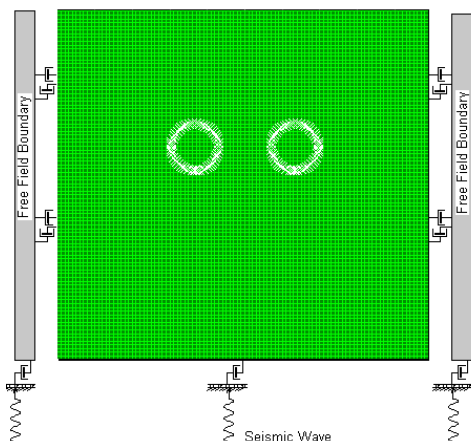
برای تحلیل دینامیکی باید تغییراتی در مدل کالیبره شده FLAC2D به وجود آمده تا آماده مدلسازی دینامیکی شود. این تغییرات شامل اعمال شرایط مرزی جدید، اعمال بارگذاری دینامیکی و تبدیل میرایی سیستم به میرایی رایلی است. شرایط مرزی جدید مدل شامل مرزهای ویسکوز و میدان آزاد است که در طرفین مدل، مرزهای میدان آزاد تعبیه شده است. این مرزها با استفاده از میراگرهای افقی و قائم به مدل متصل می‌شوند. مرزهای میدان آزاد شرایطی را

مرز بالای مدل (سطح زمین) به سمت پایین منعکس می‌شوند. این امواج پس از برخورد با پایه مدل توسط میراگرها جذب شده و از انعکاس مجدد آن ممانعت به عمل می‌آید. همین روند حرکتی در ستون میدان آزاد نیز وجود دارد [۱۳]. مشخصات ژئوتکنیکی و لرزه‌ای به کار رفته در مدل‌سازی دینامیکی برای ساختگاه پروژه مطابق جدول ۴ است.



شکل ۲: شتاب نگاشت زلزله بم بعد از اصلاح

زلزله ۰/۱۲۷۶DBE مگاپاسکال است. اوج بارگذاری زلزله در لحظه ۲۸/۷۶۵ ثانیه رخ می‌دهد.



شکل ۳: شرایط مرزی و بارگذاری دینامیکی مدل کالیبره شده FLAC2D

میرایی Rayleigh در نرم‌افزار FLAC2D با دو مقدار فرکانس غالب ( $f_{min}$ ) و نسبت میرایی بحرانی ( $\xi_{min}$ ) مشخص می‌شود. همان‌طور که بیان شد نسبت میرایی وابسته به فرکانس است، اما محدوده‌ی از فرکانس را می‌توان یافت که در آن محدوده نسبت میرایی بحرانی مستقل از فرکانس است. بنابراین  $f_{min}$  که در برنامه استفاده می‌شود، باید در این محدوده واقع شده باشد. این فرکانس با ترکیبی از فرکانس مرکزی بار ورودی و فرکانس طبیعی سیستم قابل تعیین است.

فرکانس مرکزی شتاب‌نگاشت بم، ۲/۸۴ هرتز است. برای تعیین فرکانس طبیعی سیستم، نیروی ثقل به طور ناگهانی

فراهم می‌کنند تا انتشار امواج در دوردست تحت تأثیر سازه قرار نگیرد. به عبارت دیگر این مرزها مدلی با ابعاد بی‌نهایت را شبیه‌سازی کرده که امواج دینامیکی بدون هیچ اغتشاشی در آن منتشر می‌شوند. به منظور جلوگیری از انعکاس امواج به داخل مدل از مرزهای ویسکوز در پایه مدل استفاده شده است. همچنین این مرزها در پایه مرزهای میدان آزاد نیز اعمال شده است. بدین ترتیب امواج لرزه پس از برخورد با

در هنگام وقوع زلزله، امواج حجمی از منبع به تمام جهات منتشر می‌شوند. هنگامی که این امواج به مرز لایه‌ها می‌رسند، دچار انعکاس و انکسار می‌شوند. با توجه به این که سرعت عبور امواج در لایه‌های نزدیک به سطح معمولاً کم‌تر از لایه‌های زیرین است، انکسار رخ می‌دهد. این پدیده سبب می‌شود که جهت انتشار امواج زلزله در لایه‌های افقی سطحی به صورت عمودی گردد [۱۳]. بر اساس این واقعیت بارگذاری دینامیکی به صورت یک موج صفحه‌ای برشی در نظر گرفته شده که از پایه مدل در جهت قائم منتشر می‌شود. از این رو لازم است تا تاریخچه سرعت به تاریخچه تنش تبدیل شود. با فرض موج صفحه‌ای این تبدیل به صورت رابطه (۲۰) انجام می‌پذیرد.

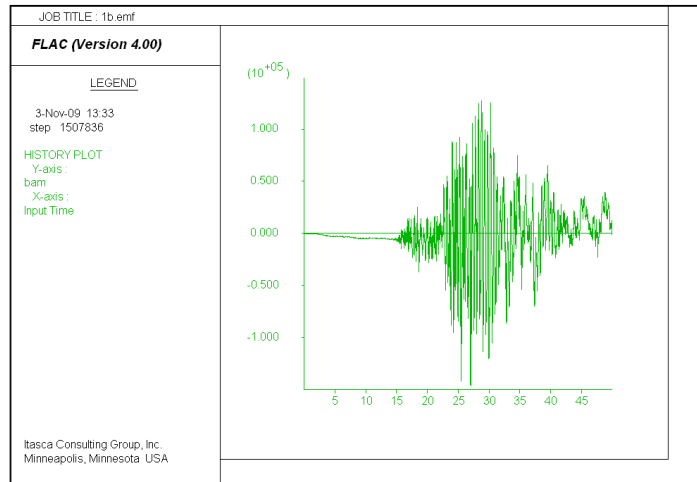
$$\sigma_{xy} = -2(\rho C_s v) \quad (20)$$

که در آن  $v$  سرعت حرکات زمین است. مضرب دو به این دلیل است که نیمی از ورودی تنش در محل مرزهای ویسکوز جذب شده و تنها نیمی از آن که مقدار واقعی بار دینامیکی است به مدل اعمال می‌شود. حال با انتخاب حرکات نیرومند تاریخچه تنش و حذف باقیمانده آن، بارگذاری نهایی زلزله DBE مطابق شکل ۳ به دست می‌آید. مدت زمان بارگذاری ۵۲ ثانیه است. این زمان که بیش‌تر از زمان حرکات نیرومند (۴۹/۹۸ ثانیه) است. به این دلیل انتخاب شده که جابه‌جایی در آن لحظه صفر است. عدم توجه به این مسأله سبب القاء جابه‌جایی ماندگاری در مدل می‌شود که اساساً واقعیت ندارد. لازم به ذکر است که بیشینه تنش برشی برای



در شکل ۴ مشاهده می‌شود، فرکانس طبیعی، دو هرتز برای سازه به دست آمده است. با توجه به تحلیل‌های انجام شده، فرکانس غالب،  $f_{min} = 2\text{Hz}$  برای بم انتخاب شد.

و در حالت بدون میرایی به مدل اعمال می‌شود. در این شرایط مدل شروع به نوسان کرده و با ثبت تاریخچه حرکت قائم آن می‌توان فرکانس طبیعی را تعیین کرد. همان‌طور که

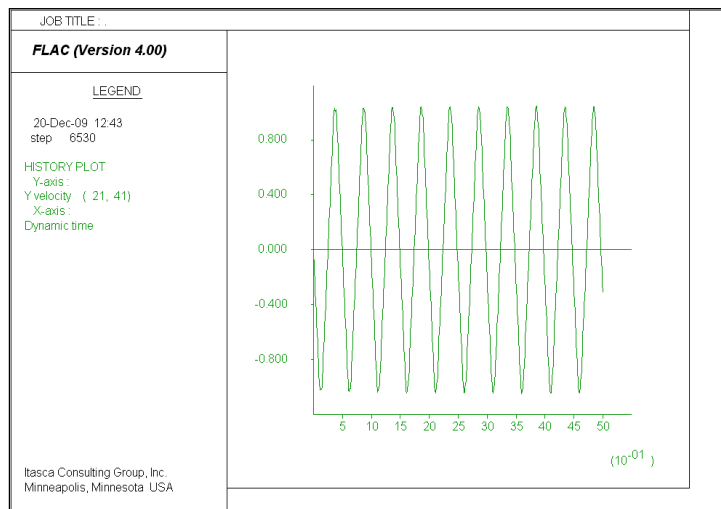


شکل ۴: تاریخچه زمانی بارگذاری زلزله DBE

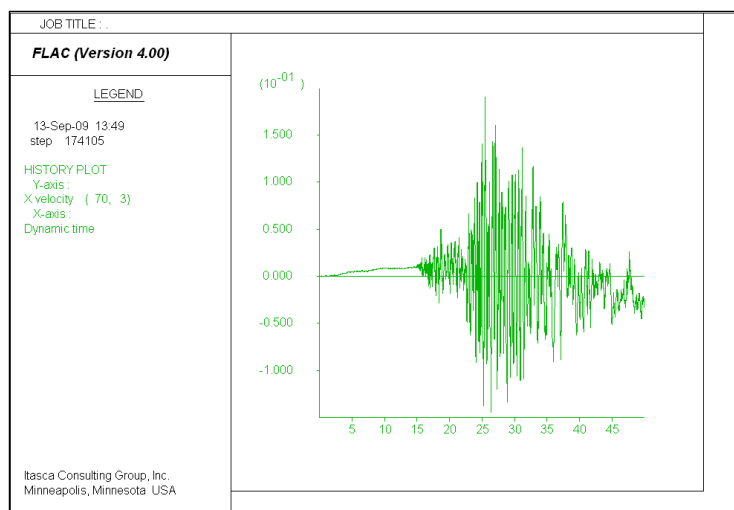
عبوری تفاوت زیادی با بارگذاری اولیه پیدا کند. بدین منظور مدل ساده‌ای بدون وجود فضای حفاری ساخته شد و رفتار الاستیک خطی برای مصالح انتخاب شد. تاریخچه سرعت در پایه مدل و پایه میدان آزاد برای زلزله بم در شکل ۵ نشان می‌دهد که انتشار موج در مدل اصلی و ستون میدان آزاد به درستی شبیه‌سازی شده است و هیچ‌گونه اعوجاجی به چشم نمی‌خورد. بیشینه سرعت در پایه مدل ۱۹/۶ سانتی‌متر در ثانیه است (شکل ۶). بیشینه سرعت ثبت شده در سطح زمین ۱۸ سانتی‌متر در ثانیه بوده که تغییر زیادی مشاهده نمی‌شود (شکل ۷).

نسبت میرایی بحرانی ( $\xi_{min}$ ) دومین پارامتری است که باید مشخص شود. این نسبت در سنگ‌ها کم‌تر از خاک است. اگرچه اندازه‌گیری در این زمینه انجام نشده است اما بر اساس تجربه مقدار دو تا پنج درصد برای محیط و دو تا ۱۰ درصد برای پوشش مناسب به نظر می‌رسد [۱۳] که در این پروژه مقدار پنج درصد برای محیط و دو درصد برای پوشش در نظر گرفته شده است.

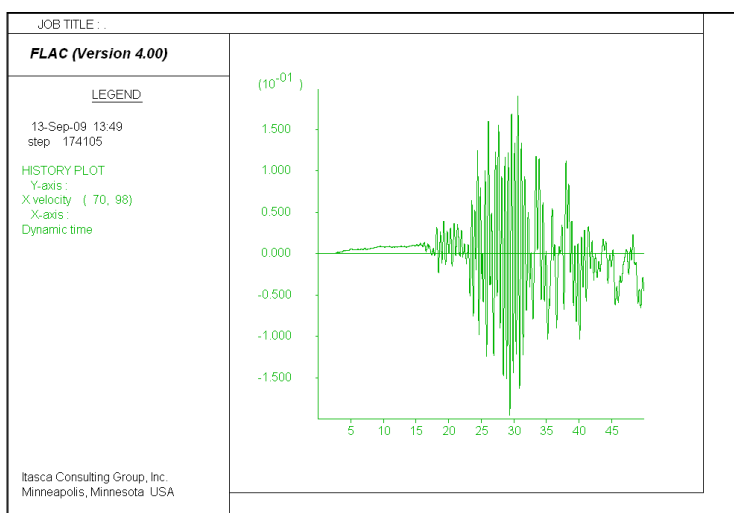
یکی از مشکلاتی که می‌تواند در حین مدلسازی دینامیکی رخ دهد، اعوجاج و عدم انتشار صحیح موج در مدل است. این پدیده معمولاً به دلیل ابعاد بزرگ المان‌ها و شرایط مرزی نادرست روی داده و سبب می‌شود که شکل موج



شکل ۵: تاریخچه زمانی جابه‌جایی قائم برای مدل در شرایط ارتعاش آزاد نامیرا



شکل ۶: تاریخچه زمانی سرعت افقی در پایه مدل و پایه ستون میدان آزاد برای زلزله بم



شکل ۷: تاریخچه زمانی سرعت افقی در بالای مدل برای زلزله بم

### ۵-۳- تحلیل دینامیکی مدل عددی به زلزله بم

در این بخش پاسخ دینامیکی تونل مترو تبریز تحت تأثیر زلزله بم تحت شرایط بدون لغزش مورد بررسی قرار گرفته شده است. لازم به ذکر است تحلیل‌های دینامیکی برای مقطع تونل تحت شرایط مکانیکی و با در نظر گرفتن فشارهای منفذی صورت گرفته شده است. لازم به ذکر است تحلیل‌های دینامیکی برای مقطع تونل تحت شرایط مکانیکی و با در نظر گرفتن فشارهای منفذی صورت گرفته شده است. فشار منفذی در گام تحلیل اولیه به کل مدل داده شده و در گام تحلیل نهایی به دور مدل و همین طور به دور تونل داده شده تا حرکت شعاعی سیال در درون مدل از مرز خارجی به مرز داخلی ایجاد شود و اثر جریان سیال در ایجاد ناپایداری محسوس تر شود. در مدلسازی عددی از مدل بایرون<sup>۱۲</sup> برای

بررسی تأثیر همزمان بارهای دینامیکی و فشار منفذی استفاده شده است. پارامترهای مدل به طریق زیر محاسبه شده است:

$$N = 27.7$$

$$N_{60} = 23.5$$

$$Dr = (15)(N_{60})^{0.5} = 72.71$$

$$C_1 = (8.7)(N_{60})^{-1.25} = 0.168$$

$$C_2 = \frac{0.4}{C_1} = 2.378$$

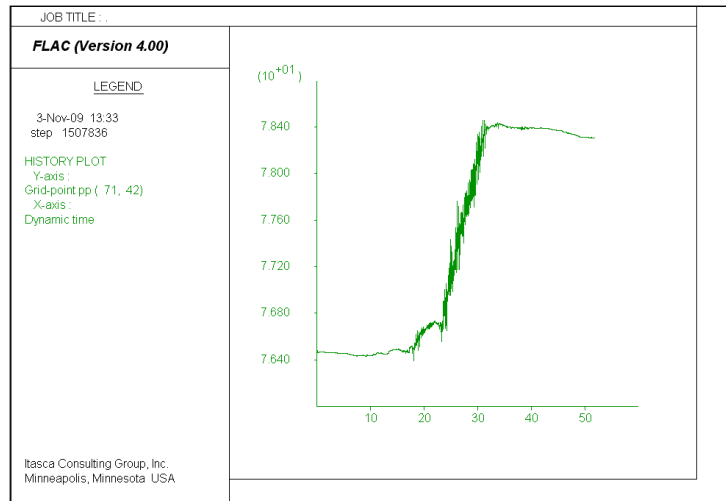
شکل‌های ۸ و ۹ تغییرات فشار منفذی نسبت به زمان بارگذاری زلزله در دو عمق مختلف (دلخواه) را نشان می‌دهد. در اثر اعمال بارهای دینامیکی و تغییر حجم المان‌ها، فشار منفذی افزایش می‌یابد و سبب تغییر در رژیم جریان سیال در محیط متخلخل می‌شود. از سوی دیگر افزایش فشار

خاک برای وقوع روانگرایی روش‌های مختلفی وجود دارد که به اختصار روش تنش سیکلی بررسی شد. با استفاده از داده‌های موجود در ساختگاه پروژه و به روش تنش سیکلی به محاسبه احتمال روانگرایی در منطقه پروژه پرداخته شد و محاسبه شد که با ضریب اطمینان ۱/۲۸ برای زلزله بم با بزرگای گشتاوری ۶/۵ روانگرایی اتفاق نخواهد افتاد.

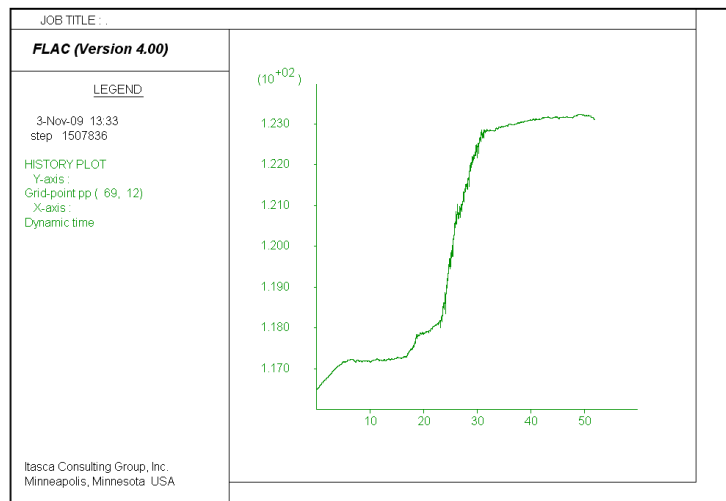
منفذی سبب تغییر تنش مؤثر در نتیجه موجب تغییر در کرنش‌ها و وضعیت تعادل گره‌ها می‌شود و در نتیجه مقادیر بارهای بیشتری در روش عددی به مدل وارد می‌شود.

### ۶- نتیجه‌گیری

همان‌طور که اشاره شد، یکی از آثار مخرب زلزله در زمین‌های سست، روانگرایی است. برای بررسی استعداد



شکل ۸: تغییرات فشار منفذی در عمق ۲۹ متری از سطح زمین در طول زلزله بم



شکل ۹: تغییرات فشار منفذی در عمق ۴۴ متری از سطح زمین در طول زلزله بم

دینامیکی باید تغییراتی در مدل کالیبره شده FLAC2D به‌وجود آمده تا آماده مدلسازی دینامیکی شود. این تغییرات شامل اعمال شرایط مرزی جدید، اعمال بارگذاری دینامیکی و تبدیل میرایی سیستم به میرایی رایلی است شرایط مرزی جدید مدل شامل مرزهای ویسکوز و میدان آزاد به مدل اعمال شد و نسبت میرایی لازم در مدل تعبیه گردید. به علت

در ادامه برای برآورد میزان تنش‌های ناشی از بارگذاری زلزله و تغییر فشار آب منفذی به تونل مترو تبریز از روش عددی تفاضل محدود با کمک نرم‌افزار FLAC2D استفاده شده است. به منظور هم‌خوانی شتاب نگاشت بم با سطح زلزله مورد مطالعه، شتاب نگاشت بم فیلتر و ابعاد مش‌های مورد نیاز برای مدل عددی انتخاب گردید. برای تحلیل

Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, paper No.1.24,47-55.

[5] Das. B.G. 1371 "Principles of geotechnical engineering", transferred by Shapor Tahoni, , In Persian.

[6] Kramer S. L., 1996, "Geotechnical earthquake engineering", Prentice Hall, Upper Saddle River.

[7] Diskenson.S.E. and Yang.D.S., 1998, "Seismically- Induced Deformations of caisson Retaining Walls in Improved Soils", Proc, Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamic III, Vol. II, Geotich Speacil,N75.

[8] Cooke.H.G., 2001, "Ground improvement for liquefaction mitigation at existing highway bridges Ph.D. dissertation", Dept. of Civil and Environmental Engineering Polytechnic Institute and state University, Virginia.

[9] Arabliui, Amir, 1385, "Seismic response of pier crate of interaction, including water, soil and structures", Sahand University of Technology, master thesis, In Persian.

[10] [Harazrah consulting engineering group](#), 1382, "Report of seismology and earthquake probability investigation in Tabriz metro", In Persian.

[11] Sharify Borojerdi, Mohsen, 1383, "Modeling of underground structure behavior in dynamic loads, Karone 3 powerhouse case study", master thesis, Amirkabir University of Technology, In Persian.

[12] Initial report of Bam earthquake, Iran Seismology Website.

[13] Itasca Consulting Group, 1999, Flac version 4.10 User's manual, Minneapolis.

وجود فشار منفذی در ساختگاه پارامترهای لازم برای استفاده مدل بایرن به منظور بررسی تأثیر همزمان بارهای دینامیکی و فشار منفذی محاسبه گردید تا در مدلسازی عددی مورد استفاده قرار گیرد. نتایج حاکی بر افزایش فشار منفذی در اثر اعمال بارهای دینامیکی ناشی از زلزله را دارند که در نتیجه مقادیر بار بیش‌تری به ساختگاه مورد نظر (تونل مترو) وارد می‌شود و در نهایت امکان برآورد سیستم نگهداری مناسب‌تری برای تونل با در نظر گرفتن این بارها وجود خواهد داشت.

## مراجع

[1] Kramer. S, 1378 "Seismic geotactic engineering", transferred by Saeid magdadin mir hosseini and Babak areifpor hoseuni, International institute of seismology and engineering of earthquake, Tehran, In Persian.

[2] Mir Hossein, Saeid Magdadin, Kari, Mehdi, 1374, "Preliminary fine mapping of areas prone to liquefaction in Tehran", Second conference on seismology and engineering of earthquake, In Persian.

[3] Martin.G.R, .Finn W.D.L and H.B.Seed, 1975, "Fundamentals of Liquefaction under Cyclic Loading".J.Geotech.Div.ASCE, 101(GT5), pp 423-438.

[4] Byrne,P. ,1991,"A Cyclic Shear – Volume Coupling and Pore – Pressure Model for sand", Second International Conference on Recent

<sup>7</sup> Standard penetration test

<sup>8</sup> Cyrclc strees rating

<sup>9</sup> Silver and Seed

<sup>10</sup> Tokimatsu and Seed

<sup>11</sup> Finn and Martin

<sup>12</sup> Byrne

<sup>1</sup> Iwasaki

<sup>2</sup> Finn

<sup>3</sup> Yang and Dickenson

<sup>4</sup> Permanent International Association for Navigational Congresses

<sup>5</sup> Seed and et al

<sup>6</sup> Whitman