

ارایه یک مدل اجزای محدود برای تحلیل دینامیکی خاک های نیمه اشباع

صمد ظاهر مند¹ نعمت الله فردوس²

1- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش خاک و پی دانشگاه آزاد اسلامی واحد یاسوج

2- عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد دهدشت

ferdoos62@yahoo.com

samadzahermand@yahoo.com

چکیده:

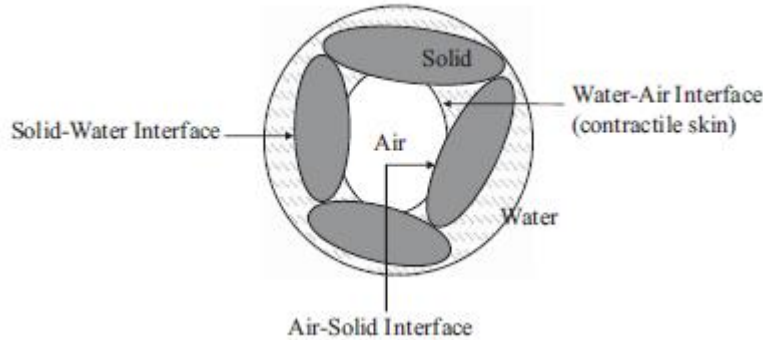
ارزیابی واکنش خاک‌های دارای ساختار نیمه اشباع در زیر بارهای استاتیکی و دینامیکی مختلف برای طراحی و ساخت و ساز اقتصادی و ایمن مهم است. در این مطالعه، برای بررسی رفتار دینامیکی خاک های نیمه اشباع، از روش عددی استفاده شده است. معادلات ریاضی حاکم بر دینامیک خاک‌های نیمه اشباع بر اساس تئوری ترکیب و با استفاده از تحلیل اجزای محدود ارایه شده است. رفتار تنش کرنش خاک بر اساس مدل الاستو پلاستیک برای خاک‌های غیر اشباع بر اساس تئوری صفحه مرزی و مکانیزم مکش مرطوب با استفاده از مدل گنوختن ارایه شده است. شبیه سازی اجزاء محدود برای مطالعه پاسخ خاکریزی خاک نیمه اشباع تحت بارگذاری زلزله انجام شده و اعتبار نتایج، با نتایج آزمایشگاهی ارایه شده توسط سایر محققین کنترل شده است. در این تحقیق همچنین فشار آب منفذی، فشار هوای منفذی، مکش ماتریک، درجه اشباع در المان های مختلف، و پاسخ خاکریز تحت رطوبت های مختلف اولیه بررسی شده است. نتایج تحقیق از پاسخ بسیار مناسب مدل استفاده شده برای اندازه گیری جابجایی حکایت دارد.

کلمات کلیدی: اجزای محدود، مکش ماتریک، تحلیل دینامیکی، خاک های نیمه اشباع

1. مقدمه

درک پاسخ زمین با ساختار نیمه اشباع در زیر بارهای استاتیکی و دینامیکی مختلف برای طراحی و ساخت و ساز اقتصادی و ایمن مهندسی ژئوتکنیک مهم است. تئوری های عددی و آزمایشگاهی به خوبی برای مطالعه دینامیک خاک اشباع و خشک توسعه یافته‌اند. با این حال، مطالعه دینامیک خاک‌های نیمه اشباع، به ویژه تحت بارهای دینامیکی، یک زمینه جدید در مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای است. اندازه گیری دقیق مقادیر مختلف مانند دینامیک آب و فشار هوا و درجه اشباع در خاک‌های نیمه اشباع در طی بارگذاری دینامیکی کار دشواری است. در چنین مواردی، روش‌های تحلیلی و عددی می توانند بینش ارزشمندی از رفتار بخشی از ساختار خاک تا نیمه اشباع، تحت شرایط بارگذاری های پیچیده ای مانند زلزله فراهم کنند. خاک نیمه اشباع یک سیستم سه فازی متخلخل است. بخشی از فضای خالی بین جامدات توسط آب و بقیه توسط هوا اشغال شده است. علاوه بر این سه فاز، سه رابط نیز وجود دارد: جامد آب و هوا آب و هوا جامد (شکل 1). در این میان، رابط آب هوا، همچنین به عنوان جلد انقباضی شناخته می شود تا تاثیر بیشتری بر رفتار مکانیکی خاک نیمه اشباع شده داشته باشد. رابط هوا آب با مقدار آب در خاک نیمه اشباع کنترل می شود. این رابط کمک می کند که اختلاف فشار بین فاز آب و هوا حفظ شود و نتایج فشار آب در سیستم خاک نیمه اشباع شده همیشه منفی باشد. رفتار مکانیکی خاک نیمه اشباع شده رفتار و رابط اکثریت فازها را کنترل می کند. این عوامل مطالعه خاک‌های نیمه اشباع شده را در مقایسه با خاک کاملاً اشباع و خشک مشکل تر و پیچیده تر کرده است. معادلات ریاضی حاکم بر دینامیک سیستم خاک نیمه اشباع شده را می توان بر اساس

قوانین فیزیکی مانند تعادل جرم، تکانه خطی تعادل، تعادل مومنتوم زاویه ای، تعادل انرژی، و قوانین اول و دوم ترمودینامیک استنتاج کرد. به دلیل پیچیدگی، روشی به عنوان روش عملی برای ساده کردن و استنتاج دستگاه حاکم مورد استفاده قرار می‌گیرند که بتواند راه حل‌های عددی بر اساس این قوانین فیزیکی برای مسائل دنیای واقعی به دست آورد. در مورد مدل سازی اجزای محدود از خاک نیمه اشباع، به طور معمول از شتاب نسبی بین آب و هوا با توجه به اسکلت جامد می‌توان چشم پوشی کرد. یک مطالعه انجام شده سیستماتیک برای ارزیابی تاثیر این فرض در پیش بینی رفتار خاک-های نیمه اشباع به خصوص تحت شرایط بارگذاری دینامیک وجود ندارد. در رایج ترین شکل راه حل المان محدود برای خاک نیمه اشباع، از شتاب نسبی فاز آب و هوا صرفه نظر می‌شود و معادلات با در نظر گرفتن جابه جایی جامد، فشار آب و فشار هوا را به عنوان مجهولات گره ای اولیه حل می‌شوند. [1,3]



شکل 1. مقدار و ارتباط بین فازهای مختلف در خاک‌های نیمه اشباع

2. خلاصه ای از معادلات کاملاً حاکم برای خاک های جزئی اشباع شده

معادلات تعادل جرم برای فازهای کلی استنتاج شده‌اند. معادله تعادل جرم فاز جامد با فرض این که ذرات جامد تراکم ناپذیر هستند استنتاج شده و به شکل زیر کاهش می‌یابد:

$$-\dot{n} + (1-n)\text{div}(\mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

که در آن n تخلخل سیستم خاک تا نیمه اشباع، \mathbf{u}^s بردار جابجایی از فاز جامد است و نقطه مشتق شده را با توجه به زمان نشان می‌دهد. با استفاده از یک روش مشابه به عنوان فاز جامد، تعادل جرم در فاز آب را می‌توان استنتاج کرد که در فرم زیر بیان شده:

$$\left(\frac{\partial n^w}{\partial \varepsilon_v}\right) \dot{\mathbf{u}}_{i,j} + n^w \dot{\mathbf{u}}_{i,i} + \left(\frac{n^w}{\Gamma^w} - \frac{\partial n^w}{\partial S}\right) \dot{p}^w + \left(\frac{\partial n^w}{\partial S}\right) \dot{p}^a = 0 \quad (2)$$

که در آن \mathbf{u}^s جابجایی فاز جامد، \mathbf{u}^w جابجایی فاز آب، Γ^w مدول بالک فاز آب است. شبیه به فاز آب، تعادل جرم فاز هوا می‌تواند بیان شود:

$$(1-n-\frac{\partial n^w}{\partial \varepsilon_v}) \dot{\mathbf{u}}_{i,j} + n^a \dot{\mathbf{u}}_{i,i} + \left(\frac{n^a}{\Gamma^a} - \frac{\partial n^w}{\partial S}\right) \dot{p}^w + \left(\frac{\partial n^w}{\partial S}\right) \dot{p}^w = 0 \quad (3)$$

\mathbf{u}^a جابجایی فاز هوا و Γ^a مدول بالک فاز هوا است.

2.2. معادلات تعادل ممنتوم

یک دستگاه از معادلات تعادل شتاب عبارتند از: تعادل حرکت برای فاز جامد، فاز آب و فاز هوا. معادلات تعادل حرکت سیالات بر اساس معادلات جریان داری تعمیم یافته‌اند. رابطه‌های (4) تا (6) به ترتیب تکانه خطی معادلات تعادل را برای مخلوط، آب و هوا نشان می‌دهند.

$$n^s \rho^s \ddot{\mathbf{u}}_j + n^w \rho^w \ddot{\mathbf{u}}_j + n^a \rho^a \ddot{\mathbf{u}}_j - \sigma_{ij,i} - \rho g_j = 0 \quad (4)$$

$$\rho^w \ddot{u}_j^w - (\hat{k}_{ij}^w n^w) \dot{u}_i^s + (\hat{k}_{ij}^w n^w) \dot{u}_i^w + (\delta_{ij} p^w)_i - \rho^w g_j = 0 \quad (5)$$

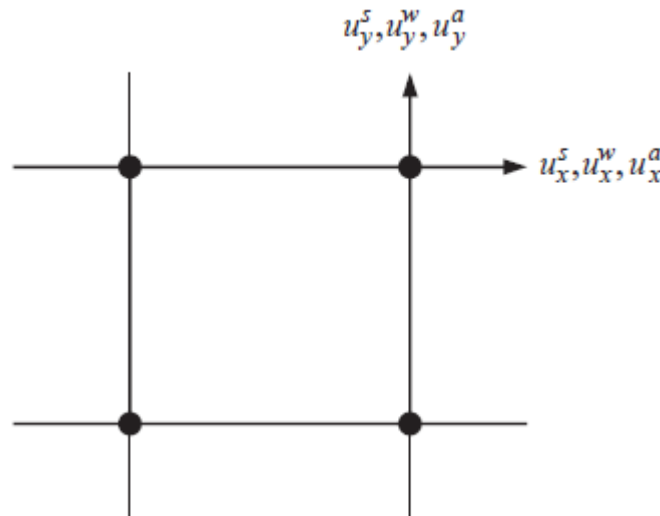
$$\rho^a \ddot{u}_j^a - (\hat{k}_{ij}^a n^a) \dot{u}_i^s + (\hat{k}_{ij}^a n^a) \dot{u}_i^a + (\delta_{ij} p^a)_i - \rho^a g_j = 0 \quad (6)$$

در اینجا σ_{ij}^w تانسور تنش کل، σ_{ij}^a بردار شتاب گرانشی زمین، \hat{k}_{ij}^w تانسور معکوس نفوذپذیری فاز آب، \hat{k}_{ij}^a تانسور نفوذپذیری معکوس فاز هوا است، و δ_{ij} دلتای کرونگر است.

3.2 فرمول‌بندی اجزای محدود معادلات کاملاً جفت حاکم

راه حل های منحصر بفرد برای حل مسائل دینامیکی خاک‌های نیمه اشباع در جهان واقعیت وجود ندارد. بنابراین، باید یک روش عددی مانند روش اجزای محدود برای پیدا کردن راه حل های تقریبی سیستم با معادلات دیفرانسیل مورد استفاده قرار گیرد. مهم ترین عامل موثر بر کیفیت راه حل های تقریبی معادلات فوق این است که چگونه مشتقات ریاضی، پاسخ واقعی سیستم را نشان دهند و شامل معادلات تشکیل دهنده باشد. عواملی مثل نوع المان‌ها، تعداد المان‌ها، درجه تابع درونیابی و معیارهای همگرایی می تواند کیفیت راه حل را تحت تاثیر قرار دهند. سیستم معادلات دیفرانسیل تشریح کننده دینامیک خاک نیمه اشباع، (معادلات 2 تا 6)، متشکل از پنج معادله هستند (معادله تعادل حرکت برای مخلوط، آب و هوا و جرم معادلات تعادل آب و هوا) و پنج مجهول (جابجایی جامد، جابجایی آب، جابجایی هوا، فشار آب و فشار هوا).

فشار آب (P^w) و فشار هوا (P^a) با استفاده از معادلات تعادل جرم در معادلات تعادل حرکت می توانند حذف شود. دستگاه نهایی از معادلات را می توان با ترم جابجایی، سرعت و شتاب از فاز جامد، آب و هوا که در رابطه (7 تا 9) نشان داده شده است، بیان کرد. در حل اجزای محدود، جابجایی هر سه فاز به عنوان مجهولات گره‌ای اولیه (شکل 2) در نظر گرفته می‌شوند.



شکل 2. مجهولات گره‌ای در یک المان

$$\rho^w \ddot{u}_j^w - (\hat{k}_{ij}^w n^w) \dot{u}_i^s + (\hat{k}_{ij}^w n^w) \dot{u}_i^w + \mu^{11} u_{i,j}^s + \mu^{12} u_{i,j}^w + \mu^{13} u_{i,j}^g - \rho^w g_j = 0 \quad (7)$$

$$\rho^a \ddot{u}_j^a - (\hat{k}_{ij}^a n^a) \dot{u}_i^s + (\hat{k}_{ij}^a n^a) \dot{u}_i^a + \mu^{21} u_{i,j}^s + \mu^{22} u_{i,j}^w + \mu^{23} u_{i,j}^g - \rho^a g_j = 0 \quad (8)$$

که $\mu^{11}, \mu^{12}, \mu^{13}, \mu^{21}, \mu^{22}, \mu^{23}$ برترتیب معادلاتی از $\Gamma^w, n^w, n^a, \Gamma^a$ و $\frac{\partial n^w}{\partial \varepsilon_v}$ هستند. فشار آب و هوا به عنوان

اجزای ثانویه در نظر گرفته شده است و با استفاده از معادلات زیر محاسبه می‌شوند:

$$p^w = \mu^{11} u_{k,k}^s + \mu^{12} u_{k,k}^w + \mu^{13} u_{kk}^a \quad (9)$$

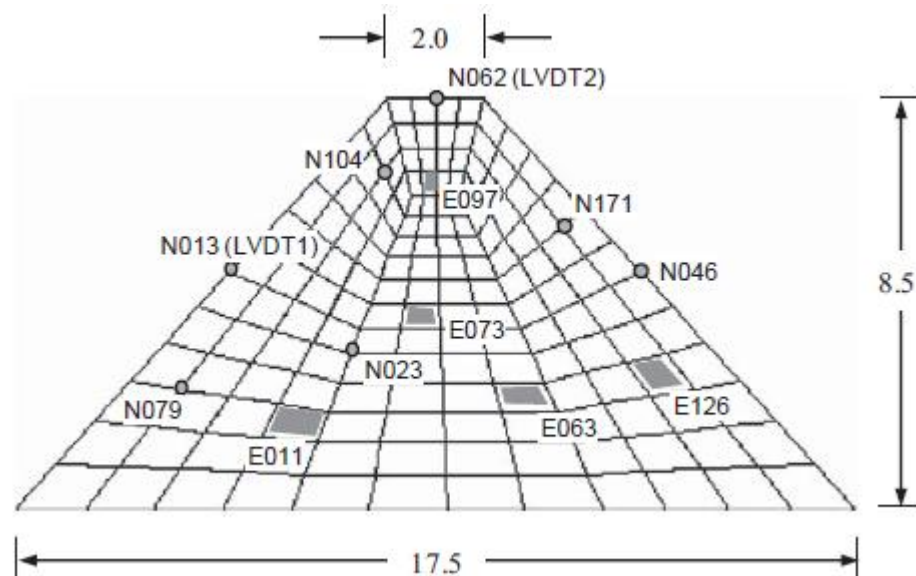
$$p^a = \mu^{21} u_{k,k}^s + \mu^{22} u_{k,k}^w + \mu^{23} u_{kk}^a \quad (10)$$

3. ویژگی‌های مصالح و پارامترهای مدل

نتایج حاصل از شبیه سازی با نتایج داده تست سانتریفیوژ مقایسه شده است. آزمایش سانتریفیوژ برای خاک اوکلاهما به نام لای مینکو (حد مایع 28.0، حد پلاستیک 20.0) انجام شد. پارامترهای مدل برای لای مینکو با استفاده از تست های آزمایشگاهی انجام شده توسط Vinayaga و Ananthanathan به دست آمد. نفوذ پذیری نسبی با استفاده از SWCC و نفوذپذیری اشباع محاسبه شد در این تحلیل نفوذپذیری اشباع 1.02×10^{-7} متر / ثانیه و درجه اولیه اشباع 43 مورد استفاده قرار گرفته است. فشار آب منفذی اولیه و فشار هوای منفذی، به ترتیب 30.52- و 0.0 کیلو پاسکال هستند. نفوذ پذیری نسبی فاز آب با استفاده از روش Genuchten و از درجه 10-3 محاسبه شده است. این حاکی از آن است که به خاک نیمه اشباع نفوذپذیری 1.02×10^{-10} متر / ثانیه برای شرایط اولیه داده شده است.

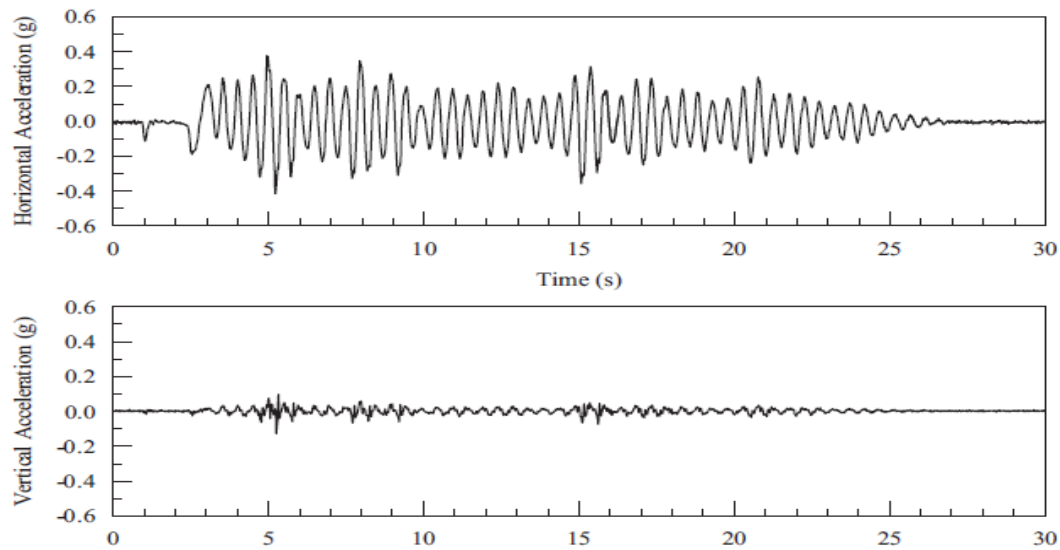
4. مدل اجزای محدود

مش بندی اجزای محدود برای خاکریز با خاک نیمه اشباع مورد استفاده در این تحقیق در شکل 3 نشان داده شده است. مدل خاکریز به 160 اجزای چهاروجهی تقسیم شده است. این مدل دارای 181 گره و (181*6) 1086 درجه آزادی گره‌ای دو بعدی است. پایه خاکریز نفوذناپذیر و ثابت (گیردار) در حین آنالیز فرض شده است. یک تحلیل استاتیکی برای تعیین حالت اولیه تنش در مدل خاکریز انجام شده است. تحلیل استاتیکی بطور دینامیکی بوسیله انتگرال گیری زمانی پارامترهای انجام شده است. تنش های اولیه برای تحلیل استاتیکی متناظر با 0.1g در میانه خاکریز بدست آمده اند. مقادیر بالاتر نفوذپذیری در پراکندگی فشار آب و فشار هوای سرعت در حین تحلیل استاتیکی مورد استفاده قرار گرفته اند. فقط تنش های هر المان از تحلیل استاتیکی به تحلیل دینامیکی انتقال داده می شوند و با آغاز تحلیل دینامیکی همه گره ها و المان های دیگر به صفر ریست می شوند. شرایط مرزی برای تحلیل دینامیکی برابر شرایط تحلیل استاتیکی هستند.



شکل 3. مدل اجزای محدود استفاده شده در تحلیل

برای تحلیل دینامیکی پارامترهای انتگرال گیری با زمان تغییر می کنند و مدل خاکریز با تحریک های افقی و قائم مانند شکل 4 حرکت داده می شود. تکان پایه موقعی که نیروی اینرسی اعمال می شود در المان های گره ای بوجود می آید. تکان پایه موقعی که نیروی اینرسی اعمال می شود در المان های گره ای بوجود می آید.

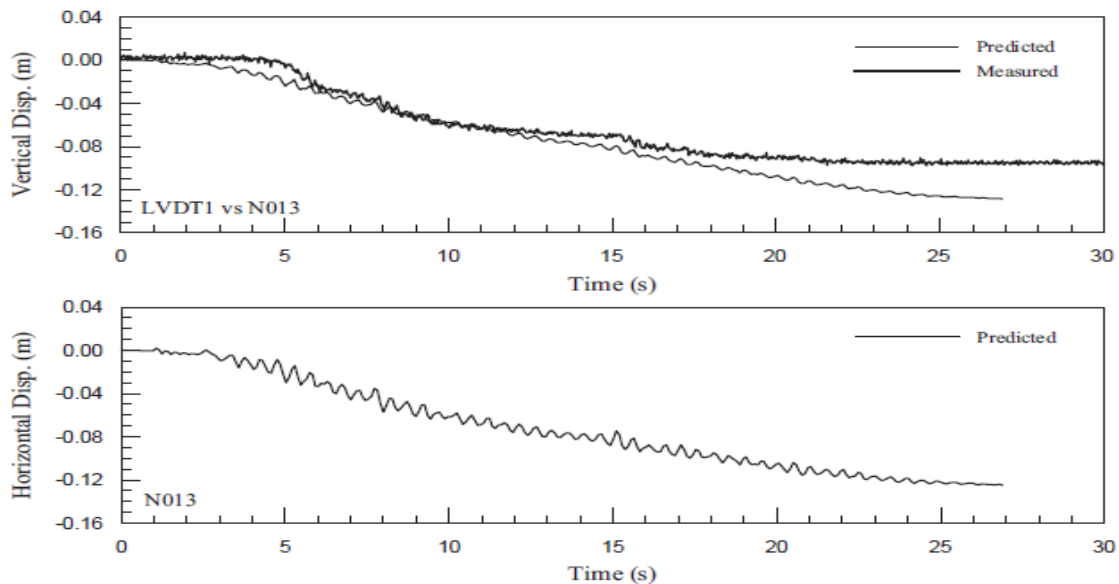


شکل 4. تاریخچه شتاب ورودی قائم و افقی

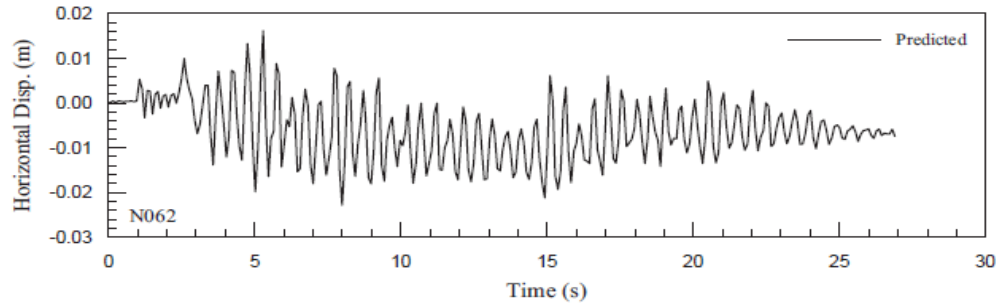
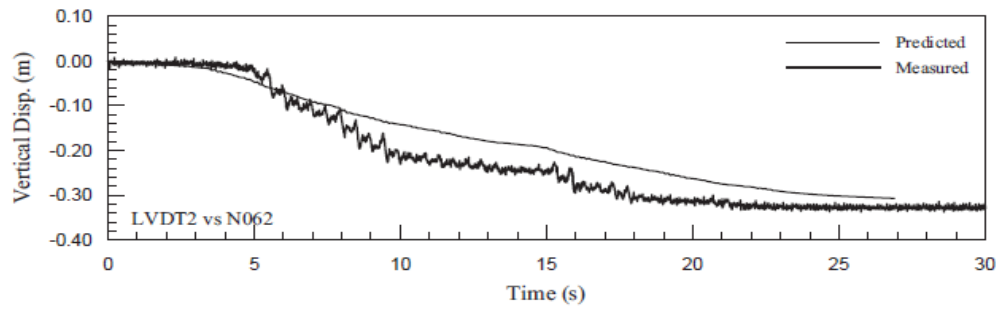
5. انجام تحلیل اجزای محدود

باید ذکر شود که دینامیک خاک نیمه اشباع یک موضوع تحقیقاتی پیچیده است و مشکلات در حین انجام آزمایش مانند حفظ مدل در رطوبت ثابت و اندازه گیری فشار آب منفذی دینامیکی و فشار هوا منفذی در طول بارگذاری دینامیکی وجود دارد. همچنین در روش های عددی نشان دادن رفتار تنش کرنش و و دیگر معادلات ساختاری که درست بودن شبیه سازی اجزای محدود به آن ها وابسته است مشکل می باشد.

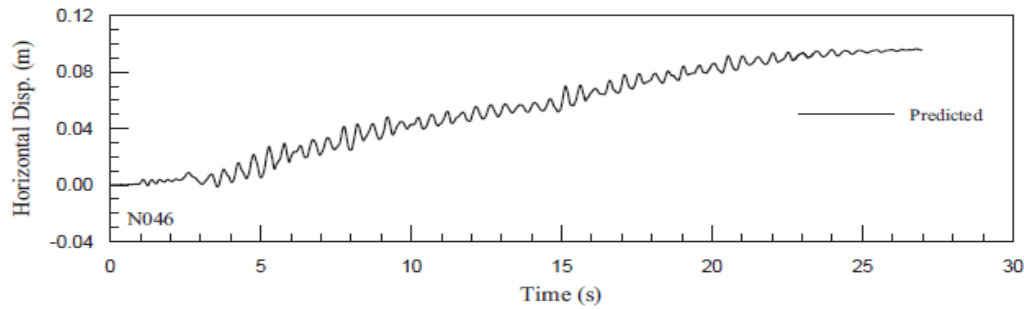
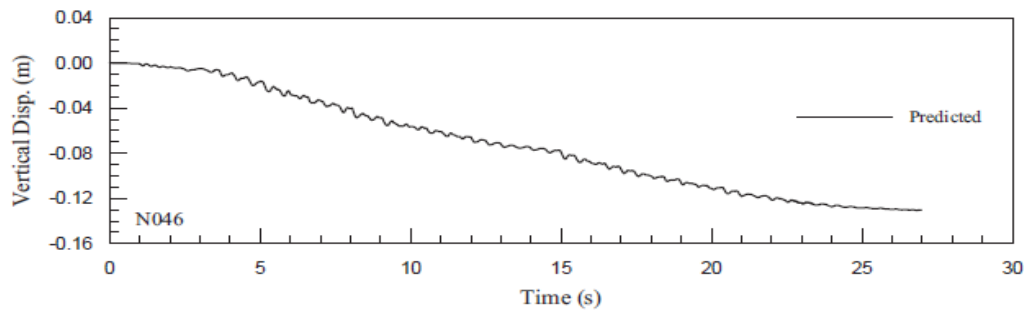
سنجش و پیش بینی جابجایی در گره های N013 و N062 و N013 در شکل های 6 و 7 نشان داده شده است. جابجایی در N013 و N062 معقولانه است. با وجود اینکه سنجش جابجایی تاریخچه زمانی گره N046 در دسترس نبود (داده ها مورد آزمون قرار گرفت، اما تحکیم قائم را نشان نمی دهد) اما با مدل های جدید پیش بینی شده بود (شکل 7). از سنجش و پیش بینی جابجایی تاریخچه زمانی نیز می توان دید که پاسخ های خاکریز به لرزش اعمال شده با تغییرات ناگهانی در حوالی 5، 8 و 15 ثانیه رخ می دهد. با این حال، جابجایی عمودی اندازه گیری شده در گره N013 و N062 نشان می دهد که پاسخ خاکریز به لرزش با جابجایی عمودی پیش بینی شده پس از 5 ثانیه آغاز می شود که در این گره ها جابجایی قابل توجهی را پس از 3 ثانیه نشان می دهد.



شکل 5. محاسبه جابجایی افق و قائم در گره N013



شکل 6. محاسبه جابجایی افق و قائم در گره N062



شکل 7. محاسبه جابجایی افق و قائم در گره N046

6. نتایج

فرمول بندی کلی جابجایی برای خاک‌های نیمه اشباع با استفاده از یک روش اجزاس محدود ارائه شده که نتایج حکایت از عملکرد موفق روش فوق‌الذکر دارد. نتایج انجام تحلیل نشان می‌دهد که، علاوه بر رشد فشار آب منفذی و فشار هوای منفذی در حین بارگذاری لرزه‌ای، مکش می‌تواند کاهش یافته و



مقاومت خاک کاهش می‌یابد. پس فرض اینکه فشار هوا ثابت می‌ماند فرض درستی نبوده و مقدار فشار هوا افزایش می‌یابد. و نتایج حکایت از آن دارد که سختی خاکریز هنگامی که میزان رطوبت کاهش می‌یابد، افزایش پیدا می‌کند.

7. مراجع

1. Hassanizadeh SM, Gray WG, General conservation equation for multi-phase system: Averaging procedure. *Advances in Water Resources* 1979; 2: 131–44
2. Wei CF, Static and Dynamic Behavior of Multi-Phase Porous Media: Governing Equations and Finite Element Implementation. PhD. Dissertation, University of Oklahoma, Norman 2001
3. Fredlund dDG, Rahardjo H, Soil mechanics for unsaturated soils. New York: A Wiley-Inter science Publication, Wiley, INC; 1993. 517 pages.
4. Zienkiewicz OC, Taylor RL. The finite element method. Solid mechanics. Fifth Edition. Linacre House, Jordan Hill, Oxford: Butterworth–Heinemann Publication; 2000 ISBN 0750650559, 2,459 pages.