

استفاده از روش جدید اجزای محدود برای تحلیل خاک های نیمه اشباع تحت اثر بارهای دینامیکی

زلیخا کاظمی، کارشناسی ارشد زمین شناسی نکتونیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز zoleykhkazemi@yahoo.com

سیدسجاد موسوی امجد، کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشگاه سیستان و بلوچستان smsmousavi7@gmail.com

مجید پریچهر، دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی زلزله، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یاسوج majidparichehr@gmail.com

چکیده:

در این مقاله کارایی یک روش عددی در برآورد رفتار دینامیکی خاک های نیمه اشباع مورد ارزیابی واقع 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.

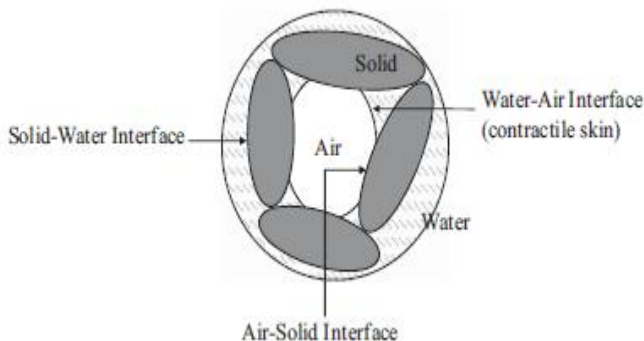
کلمات کلیدی: اجزای محدود، مکش ماتریک، تحلیل

دینامیکی، خاک های نیمه اشباع

۱. 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 یافته اند. با این حال، مطالعه دینامیک خاک-های نیمه اشباع، به ویژه تحت بارهای دینامیکی، یک زمینه جدید در مهندسی ژئوتکنیک لرزه ای است. اندازه گیری دقیق مقادیر مختلف مانند دینامیک آب و فشار هوا و درجه اشباع در خاک های نیمه اشباع در طی بارگذاری دینامیکی کار دشواری است. در چنین مواردی، روش های 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 ۱). 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 خاک های 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 مومنوم 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 می گیرند که بتواند راه حل های 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 می توان 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 می شود و معادلات با در نظر گرفتن جابه جایی جامد، فشار آب و فشار هوا را به عنوان مجهولات گره ای اولیه حل می شوند. [1,3]



شکل ۱. مقدار و ارتباط بین فازهای مختلف در خاک های نیمه اشباع

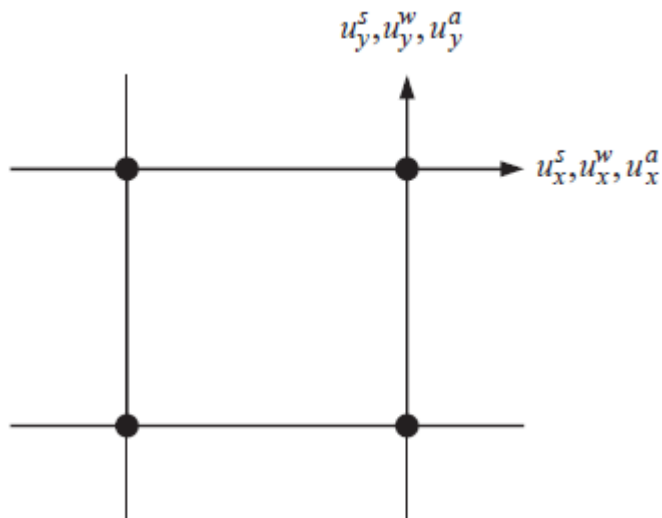
۲. خلاصه ای از معادلات کاملاً حاکم برای خاک های جزئی اشباع شده

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

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

دینامیک خاک نیمه اشباع، (معادلات ۶ تا ۲)، مشکل از پنج معادله هستند (معادله تعادل حرکت برای مخلوط، آب و هوا و جرم معادلات تعادل آب و هوا) و پنج مجهول (جابه جایی 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 (۹ تا ۷) نشان داده شده است، بیان کرد. در حل اجزای محدود، جابجایی هر سه فاز به عنوان مجهولات گره ای اولیه (شکل ۲) در نظر گرفته می شوند.



شکل ۲. مجهولات گره ای در یک المان

$$\rho^w \ddot{u}_j - (k_{ij}^w n^w) u_i + (k_{ij}^w n^w) u_i + \mu^{11} \dot{u}_{i,jj}^s + \mu^{12} \dot{u}_{i,jj}^w + \mu^{13} \dot{u}_{i,jj}^a - \rho^w g_j = 0 \quad 7$$

$$\rho^a \ddot{u}_j - (k_{ij}^a n^a) u_i + (k_{ij}^a n^a) u_i + \mu^{21} \dot{u}_{i,jj}^s + \mu^{22} \dot{u}_{i,jj}^w + \mu^{23} \dot{u}_{i,jj}^a - \rho^a g_j = 0 \quad 8$$

که $\mu^{22}, \mu^{21}, \mu^{13}, \mu^{12}, \mu^{11}$ و μ^{23} بترتیب معادلاتی از Γ^w

$$\frac{\partial n^w}{\partial \varepsilon_v} \text{ و } \frac{\partial n^w}{\partial S}, \Gamma^a, n^a, n^w$$

عنوان اجزای ثانویه در نظر گرفته شده است و با استفاده از معادلات زیر محاسبه می شوند:

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

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

۳. ویژگی های 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 ۲۸،۰، حد پلاستیك ۲۰،۰) انجام شد. پارامترهای مدل برای لای مینکو با استفاده از تست های آزمایشگاهی انجام شده توسط Ananthanathan و

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

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

که در آن u^s جابجایی فاز جامد، u^w جابجایی فاز آب، Γ^w مدول بالک فاز آب است. شبیه به فاز آب، تعادل جرم فاز هوا می تواند بیان شود:

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

u^a جابجایی فاز هوا و Γ^a مدول بالک فاز هوا است.

۲،۲. معادلات تعادل ممنوم

یک دستگاه از معادلات تعادل شتاب عبارتند از: تعادل حرکت برای فاز جامد، فاز آب و فاز هوا. معادلات تعادل حرکت سیالات براساس معادلات جریان داری تعمیم یافته اند. رابطه های (۴) تا (۶) به ترتیب تکانه خطی معادلات تعادل را برای مخلوط، آب و هوا نشان می دهند.

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

$$\rho^w \ddot{u}_j - (k_{ij}^w n^w) u_i + (k_{ij}^w n^w) u_i + (\delta_{ij} p^w)_i - \rho^w g_j = 0 \quad 5$$

$$\rho^a \ddot{u}_j - (k_{ij}^a n^a) u_i + (k_{ij}^a n^a) u_i + (\delta_{ij} p^a)_i - \rho^a g_j = 0 \quad 6$$

در اینجا σ_{ij} تانسور تنش کل، g بردار شتاب گرانشی زمین،

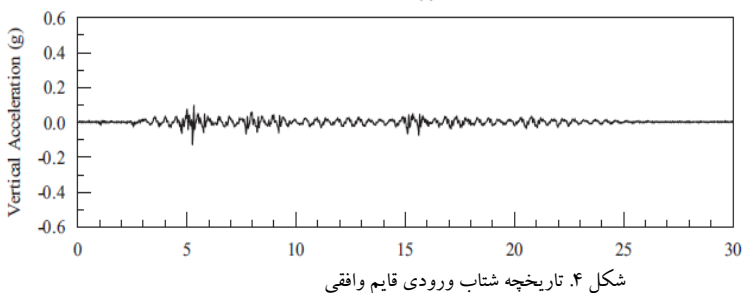
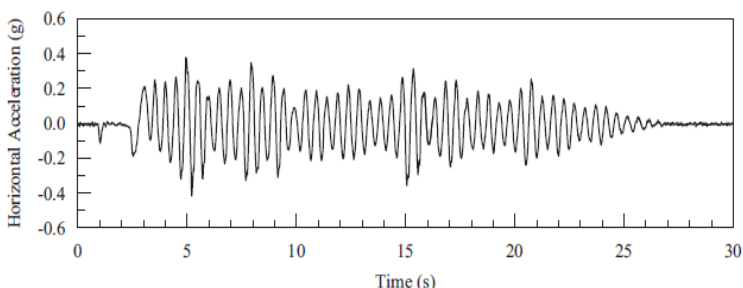
k_{ij}^w تانسور معکوس نفوذپذیری فاز آب، k_{ij}^a تانسور نفوذپذیری

معکوس فاز هوا است، و δ_{ij} دلتای کرونگر است.

3.2 فرمول بندی اجزای محدود معادلات کاملاً جفت حاکم

راه حل های منحصر بفرد برای حل مسائل دینامیکی خاک های 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 المان ها، تعداد المان ها، درجه تابع درونیابی و معیارهای همگرایی می تواند کیفیت راه حل را تحت تاثیر قرار دهند. سیستم معادلات دیفرانسیل تشریح کننده

آید. تکان پایه موقعی که نیروی اینرسی اعمال می شود در المان های گره ای بوجود می آید.



شکل ۴. تاریخچه شتاب ورودی قائم وافقی

۵. انجام تحلیل اجزای محدود

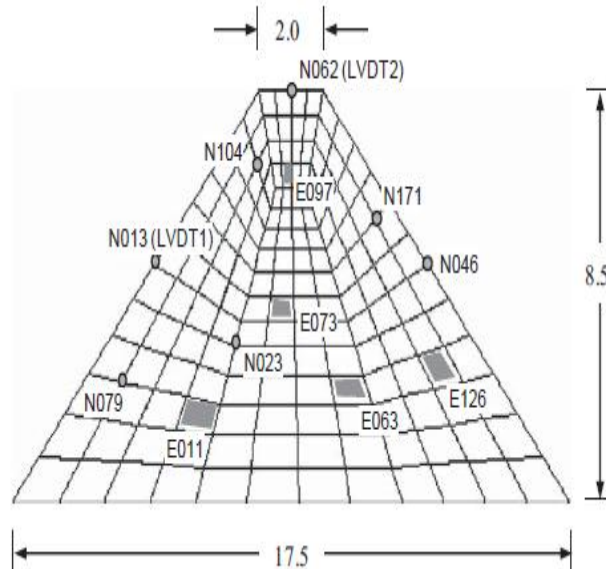
باید ذکر شود که دینامیک خاک نیمه اشباع یک موضوع تحقیقاتی پیچیده است و مشکلات در حین انجام آزمایش مانند حفظ مدل در رطوبت ثابت و اندازه گیری فشار آب منفذی دینامیکی و فشار هوا منفذی در طول بارگذاری دینامیکی وجود دارد. همچنین در روش های عددی نشان دادن رفتار تنش کرنش و دیگر معادلات ساختاری که درست بودن شبیه 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 ۵ و ۶ 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 ۷). 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 ۵۸ و ۱۵ 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 ۵ ثانیه آغاز می شود که در این گره ها جابجایی قابل توجهی را پس از ۳ ثانیه نشان می دهد.

Vinayaga به دست آمد. نفوذ پذیری نسبی با استفاده از SWCC و نفوذپذیری اشباع محاسبه شد در این تحلیل نفوذپذیری اشباع $10^{-7} * 1,02$ متر / ثانیه و درجه اولیه اشباع ۴۳ 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 ۱۰ - ۳ محاسبه شده است. این حاکی از آن است که به خاک نیمه اشباع نفوذپذیری $10^{-10} * 1,02$ متر / ثانیه برای شرایط اولیه داده شده است.

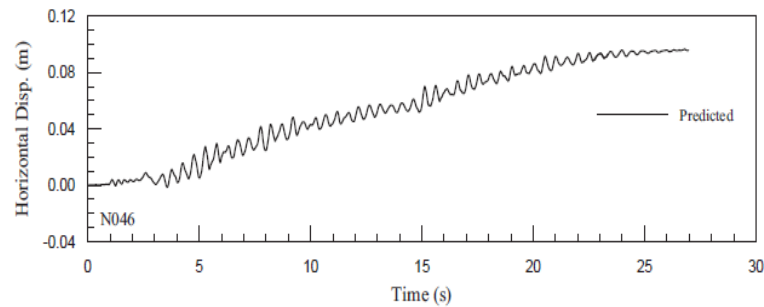
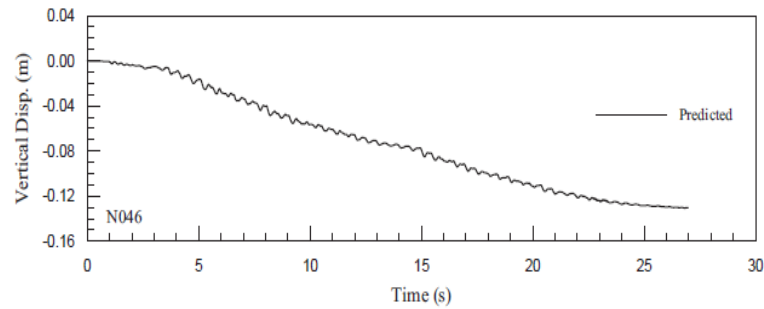
۴. مدل اجزای محدود

مش بندی اجزای محدود برای خاکریز با خاک نیمه اشباع مورد استفاده در این تحقیق در شکل ۳ نشان داده شده است. مدل خاکریز به ۱۶۰ اجزای چهاروجهی تقسیم شده است. این مدل دارای ۱۸۱ گره و $181 * 6 = 1086$ درجه آزادی گره ای 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 پراکنندگی 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 ۳. 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 ۴ حرکت داده می شود. تکان پایه موقعی که نیروی اینرسی اعمال می شود در المان های گره ای بوجود می -



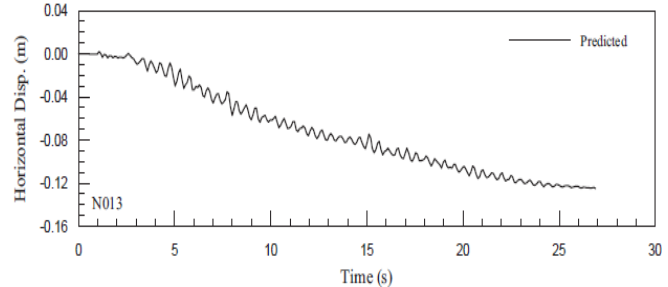
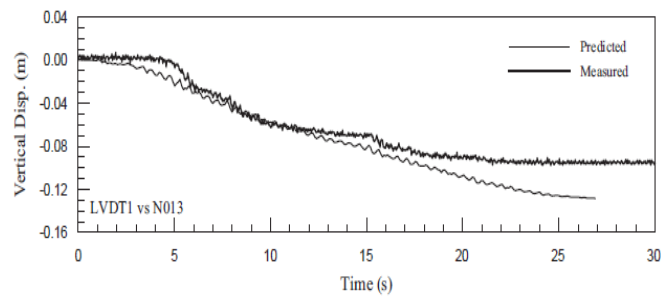
شکل ۷. محاسبه جابجایی افق و قائم در گره N046

۶. نتایج

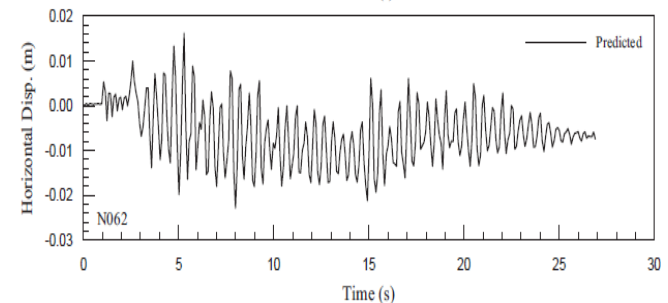
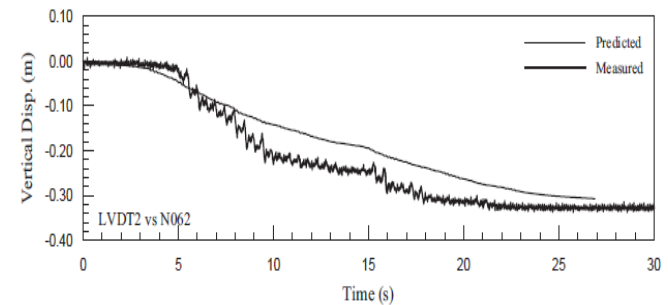
فرمول بندی کلی جابجایی برای خاک های نیمه اشباع با استفاده از یک روش اجزاس محدود ارائه شده که نتایج حکایت از عملکرد موفق روش فوق الذکر دارد. نتایج انجام تحلیل نشان می دهد که، علاوه بر رشد فشار آب منفذی و فشار هوای منفذی در حین بارگذاری لرزه ای، مکش می تواند کاهش یافته و مقاومت خاک کاهش می یابد. پس فرض اینکه فشار هوا ثابت می ماند فرض درستی نبوده و مقدار فشار هوا افزایش می یابد. و نتایج حکایت از آن دارد که سختی خاکریز هنگامی که میزان رطوبت کاهش می یابد، افزایش پیدا می کند.

۷. 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-



شکل ۵. محاسبه جابجایی افق و قائم در گره N013



شکل ۶. محاسبه جابجایی افق و قائم در گره N062

مجموعه مقاله های دومین کنفرانس ملی زلزله
۲۷ فروردین ۱۳۹۴، ایران، قزوین، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)



Heinemann Publication; 2000 ISBN0750650559, 2,459 pages.