

چکیده

مصالح مخلوط رس - سنگ دانه به صورت طبیعی در منابع قرضه یافت می‌شوند و همچنین به صورت مصنوعی ترکیب شده و در احداث سدهای خاکی و یا پوشش مدفن زباله به کار می‌روند. شناخت خصوصیات رفتاری این مصالح به جهت وفور آن در طبیعت و تشکیل دادن هسته نفوذناپذیر تعداد زیادی از سدهای خاکی کشورمان حائز اهمیت است. این مقاله برای نخستین بار به تأثیر فشار همه‌جانبه متناوب^۱ بر توزیع فشار آب حفره‌ای اضافی ناهمگن در این مصالح می‌پردازد. یافته‌های این مطالعه عددی نشان می‌دهد که در فواصل نزدیک سنگ‌دانه‌ها، با تغییرات تناوبی بار محوری و فشار همه‌جانبه به صورت هم‌زمان، امتداد برآیند بار اعمالی و جهت قرارگیری سنگ‌دانه‌ها در مصالح رسی بر میزان فشار آب حفره‌ای تأثیر می‌گذارد؛ به نحوی که با نزدیک‌تر شدن این دو امتداد به یکدیگر مقدار فشار آب حفره‌ای افزایش چشمگیر می‌یابد. این روند با افزایش فاصله سنگ‌دانه‌ها حفظ نمی‌شود و تأثیر میزان نوسان فشار همه‌جانبه بر افزایش فشار آب حفره‌ای در فواصل دورتر سنگ‌دانه‌ها بیشتر می‌شود.

واژگان کلیدی: مخلوط رس - سنگ‌دانه، فشار همه‌جانبه تناوبی، فشار آب حفره‌ای اضافی، نرم‌افزار اجزای محدود پلکسیس.

بررسی تغییرات فشار آب حفره‌ای اضافی در مصالح مخلوط رس - سنگ‌دانه تحت فشار همه‌جانبه متناوب

جواد جلیلی (نویسنده مسئول)

استادیار پژوهشکده ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، jalili@iiees.ac.ir

صابر صفری

دانشجوی کارشناسی ارشد پژوهشکده ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

۱- مقدمه

از دو محیط را با چالش‌های جدی مواجه می‌سازد. هسته نفوذناپذیر سدهای خاکی از جمله موارد کاربرد این گونه مصالح مخلوط می‌باشند. در بسیاری از این سدها، با توجه به شرایط آب‌وهوای مناطق مستعد سد سازی، قرضه انتخابی برای مصالح هسته سد حاوی مخلوط طبیعی از رس یا سیلت و شن یا ماسه می‌باشد و کمتر موردی یافت می‌شود که در مصالح نفوذناپذیر هسته سد، درصدی از درشت‌دانه‌ها نیز وجود نداشته باشند [۱]. علاوه بر وجود مصالح مخلوط به‌طور طبیعی، در بعضی شرایط این مصالح به‌طور مصنوعی نیز ساخته می‌شوند: در ساخت سدهای خاکی در مناطق مرطوب و یا دارای منابع قرضه رس با پلاستیسیته بالا، در صورت انتخاب هسته خاکی به‌عنوان عامل نفوذناپذیری، جهت ایجاد پایداری لازم در مصالح نرم و یا مرطوب هسته سد و کاهش تراکم‌پذیری این مصالح، افزودن مصالح درشت‌دانه به ریزدانه مد نظر قرار می‌گیرد. ایجاد چنین مصالحی در ساخت هسته سد سابقه‌ای طولانی دارد [۱-۲].

مصالح خاکی که شامل کانی‌های حاصل از هوازدگی و فرسایش سنگ‌های پوسته زمین می‌باشند، از قدیمی‌ترین مصالح مهندسی می‌باشند که از دیرباز در ساخت سازه‌های گوناگون به کار می‌رفته‌اند و همواره بستر انواع سازه نیز بوده‌اند. با توجه به شرایط گوناگون محیطی و فرسایشی در انواع سنگ‌ها، ابعاد ذرات تشکیل‌دهنده خاک محدود و وسیعی را شامل می‌شود: از قطعات چند متری و سانتی‌متری خرده‌سنگ‌ها تا ذرات چند میکرونی رس. به‌رغم اینکه این امر در سیستم‌های طبقه‌بندی خاک‌ها در نظر گرفته شده است، اما عموم مباحث رفتار شناسی و مکانیکی مصالح خاکی در دو شاخه مصالح ریزدانه و درشت‌دانه صورت می‌پذیرد و تلویحاً بر این فرض متکی است که سازه یا بستر خاکی مورد مطالعه از یکی از این نوع مصالح تشکیل شده است. در هر حال آنچه در طبیعت یافت می‌شود، عموماً مخلوطی از مصالح درشت‌دانه و ریزدانه می‌باشد و این اختلاط به گونه‌ایست که استفاده صرف از روابط حاکم بر یکی

همه‌جانبه متناوب دارد.

مباحث مرتبط با فشار همه‌جانبه ثابت به کرات در مطالعات پیشین مرور شده‌اند که می‌توان جامع‌ترین آنها را در دومین مرجع این نوشتار مطالعه نمود [۲] و لذا جهت اختصار از تکرار آن در این نوشتار خودداری می‌شود.

انجام آزمایش‌های سه محوری تحت بارگذاری با فشار همه‌جانبه متناوب قدمت زیادی نداشته و با پیشرفت امکانات آزمایشگاهی در سال‌های اخیر مورد اقبال بیشتری واقع شده است. در ابتدا این نوع آزمایش‌ها برای در نظر گرفتن اثر واقعی بارگذاری‌های ترافیکی بر روی روسازی طراحی شد و در آن به نتایج جالبی دست یافتند که کار را برای مطالعات وسیع‌تر در این زمینه فراهم کرد [۳].

راندون و همکاران [۳] با انجام آزمایش سه محوری تناوبی با بارگذاری همه‌جانبه ثابت (CCP) و متغیر (VCP)، اثر تنش متناوب ناشی از عبور چرخ‌ها بر روی لایه‌های دانه‌ای مقید نشده^۳ در روسازی راه را بررسی کردند. نتایج کار آنها نشان می‌دهد که در بعضی مسیر تنش‌های خاص، کرنش حجمی و محوری پایدار در هر دو روش بارگذاری یکسان می‌باشد و در باقی مسیر تنش‌ها، آزمایش‌های با بارگذاری همه‌جانبه ثابت برخلاف بارگذاری همه‌جانبه متغیر مشابه، کرنش محوری پایدار ناچیزی را نتیجه می‌دهد.

گو و همکاران [۴] بر روی رفتار دینامیکی رس اشباع زهکشی نشده مطالعاتی انجام دادند. آزمایش‌های آنها با دستگاه سه محوری با قابلیت اعمال تنش همه‌جانبه متناوب نشان داده است که تنش‌های برشی و فشاری که در محل توسط زلزله یا بار ترافیکی ایجاد می‌شوند، در آزمایش VCP در مقایسه با آزمایش CCP بهتر شبیه‌سازی می‌شوند. در این مطالعه تغییرات فشار آب منفذی در اثر تغییرات متناوب فشار همه‌جانبه الگویی متفاوت از فشار همه‌جانبه ثابت دارد و بر سرعت وقوع تغییر شکل در نمونه اثر افزایشی دارد.

نتایج این تحقیق در دو فرکانس ۰/۱ و ۰/۰۱ هرتز انجام شده است که روند مشابه مشاهده شده مؤید صحت نتایج

با توجه به ضرورت طراحی صحیح سدها، اهمیت در نظر گرفتن رفتار مطابق واقع برای مخلوطی از ریزدانه و درشت‌دانه در هسته آنها دارای اهمیت غیر قابل اغمازی می‌باشد. بررسی توزیع فشار آب حفره‌ای در ابنیه‌ای همچون موارد فوق از موارد مهم تحلیل پایداری آنها خصوصاً در بارگذاری دینامیکی ناشی از وقوع زمین‌لرزه می‌باشد. مطالعاتی که تاکنون بر روی مصالح مخلوط رس-سنگ‌دانه صورت گرفته همگی دال بر توزیع ناهمگن فشار آب حفره‌ای و افزایش غیر منتظره مقادیر آن در اثر حضور سنگ‌دانه‌ها در مصالح رسی (تحت بارگذاری تناوبی کنترل کرنش) می‌باشد. در تمامی این مطالعات آزمایشگاهی و عددی، بارگذاری صورت گرفته بر روی نمونه خاک از الگوی استاندارد آزمایش سه محوری متناوب (فشار همه‌جانبه ثابت و بار محوری متناوب) بهره برده است [۲].

در این مطالعه عددی، اثر فشار همه‌جانبه متناوب بر پاسخ مصالح مخلوط مورد بررسی قرار می‌گیرد. این مطالعه گامی مؤثر در تخمین کمی میزان افزایش فشار آب حفره‌ای اضافی (با در نظر گرفتن توزیع ناهمگن آن) در مصالح مخلوط رس و درصد‌های مختلفی از سنگ‌دانه می‌باشد که می‌تواند در تحلیل پایداری ابنیه حاوی این مصالح و توسعه مدل‌های رفتاری موجود در این زمینه مد نظر قرار گیرد.

۲- مرور ادبیات فنی

از سال ۱۹۵۳ که ترولوپ و ظفر آزمایش سه محوری زهکشی شده بر روی مخلوط ماسه و رس انجام دادند تا اثر درصد‌های مختلف ریزدانه رسی را بر روی رفتار اتساعی ماسه مشاهده کنند، تا به امروز آزمایش‌های استاتیکی و دینامیکی زیادی بر روی مصالح مخلوط صورت پذیرفته‌اند که تأثیر افزودن درشت‌دانه‌ها بر رفتار مصالح ریزدانه (و یا برعکس) و به تبع آن تغییرات رفتار مصالح را مد نظر داشته‌اند [۲]. با توجه به اینکه این مطالعه بررسی رفتار مصالح مخلوط را در اثر تغییرات فشار همه‌جانبه به صورت متناوب مدنظر دارد، مرور ادبیات فنی آن نیز ترجیح بر بیان در دو بخش فشار همه‌جانبه ثابت^۲ و فشار

آزمایش‌ها قلمداد شده است [۴].

۳- نحوه مدل‌سازی عددی

۳-۱- نرم‌افزار مورد استفاده

مدل‌های عددی ساخته شده در این مطالعه در محیط نرم‌افزار PLAXIS 2D 2017 ساخته و تحلیل شده‌اند [۸]. جهت شبیه‌سازی نمونه‌های آزمایشگاهی سه محوری تناوبی به قطر ۷ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۴ سانتی‌متر، از مدل دارای تقارن محوری^۵ بهره برده شده است. در مطالعات جلیلی [۲] کفایت چنین مدلی در تحلیل نمونه حاوی سنگ‌دانه در محور مرکزی نمونه در مقایسه با مدل سه‌بعدی مود بررسی قرار گرفته است.

از مزایای این نرم‌افزار انجام تنظیمات مورد نیاز جهت انتگرال‌گیری عددی صریح^۶ به صورت خودکار می‌باشد، تا محاسبات پایدار صورت پذیرد. در عین حال کاربر نیز در موارد لزوم امکان تغییر برخی پارامترهای محاسباتی را دارد. مقادیر پیش‌فرض ضرایب انتگرال‌گیری عددی نیومارک که در نرم‌افزار به کار می‌رود از میرایی محاسباتی متأثر نمی‌گردد.

۳-۲- هندسه مدل

مش‌بندی نرم‌افزار PLAXIS به صورت خودکار صورت می‌پذیرد که استفاده از آن را سهولت بیشتری می‌بخشد. جهت تغییر ابعاد مش‌بندی، کاربر می‌تواند ضریب مش‌بندی را که مرتبط با متوسط بعد المان‌ها می‌باشد تغییر دهد، و با افزایش یا کاهش آن، المان‌ها را کوچک‌تر و یا بزرگ‌تر نماید [۸]. در تمامی تحلیل‌های صورت گرفته در این تحقیق ابعاد مناسب برای مش‌بندی به گونه‌ای انتخاب شد که با کوچک‌تر شدن المان‌ها تغییر قابل‌توجهی در مقادیر خروجی مورد نظر در تحلیل رخ ندهد. با توجه به فرکانس پایین بارگذاری (۰/۱ هرتز)، مش‌ها بسیار ریزتر از ۰/۱ طول موج بار هارمونیک اعمالی به نمونه می‌باشند.

شرایط مرزی نمونه هم‌جهت شبیه‌سازی نمونه آزمایشگاهی سه محوری تناوبی، در تمامی جوانب به صورت صلب تعریف شد (امکان انعکاس امواج). شکل (۱) هندسه ساخته شده در نرم‌افزار را به همراه مش‌بندی منتخب نشان می‌دهد.

در این مطالعه دانه‌های مدل با قطرهای ۲، ۳ و ۴ سانتی‌متری

کای و همکاران [۵] آزمایش‌های سه محوری متناوب یک‌طرفه با و بدون فشار همه‌جانبه متناوب بر روی رس اشباع زهکشی شده و مقداری زهکشی شده^۴ انجام دادند. مقایسه نتایج آزمایش‌های آنها نشان‌دهنده‌ی این بود که آزمایش با فشار همه‌جانبه متناوب نقش مهمی در رفتار رس اشباع دارد. در شرایط زهکشی شده، رشد فشار آب منفذی شدیداً تحت تأثیر مسیر تنش بارگذاری همه‌جانبه متناوب می‌باشد. در شرایط مقداری زهکشی شده، نرخ انباشتگی کرنش حجمی پایدار و کرنش محوری پایدار تحت تأثیر مسیر تنش بارگذاری همه‌جانبه متناوب (VCP) شدیداً افزایش می‌یابد.

سان و همکاران [۶] برای بررسی اثر هم‌زمان تنش انحرافی متناوب و تنش همه‌جانبه متناوب بر روی تغییرات رفتار رس طبیعی که مقداری زهکشی شده است، تعدادی آزمایش سه محوری متناوب یک‌طرفه با و بدون فشار همه‌جانبه متناوب انجام دادند. نتایج این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که تولید و اتلاف فشار منفذی اضافی در آزمایش‌های متناوب مقداری زهکشی شده به شدت تحت تأثیر فشار همه‌جانبه متناوب قرار دارد؛ به طوری که با افزایش دامنه فشار همه‌جانبه متناوب، مقدار دامنه‌ی فشار آب منفذی اضافی افزایش می‌یابد.

گو و همکاران [۷] بررسی‌هایی را بر روی تغییر خصوصیات رس‌های پیش‌تحکیم یافته در یک بارگذاری سه محوری تناوبی یک‌طرفه با قابلیت کنترل بارگذاری همه‌جانبه متناوب انجام دادند و نشان داده‌اند که فشار همه‌جانبه متناوب به طور قابل ملاحظه‌ای، انباشتگی کرنش حجمی پایدار را بیشتر می‌کند. همچنین در نمونه‌های عادی تحکیم و پیش‌تحکیم یافته، فشار همه‌جانبه متناوب سبب شتاب گرفتن نرخ انباشت کرنش محوری پایدار می‌شود.

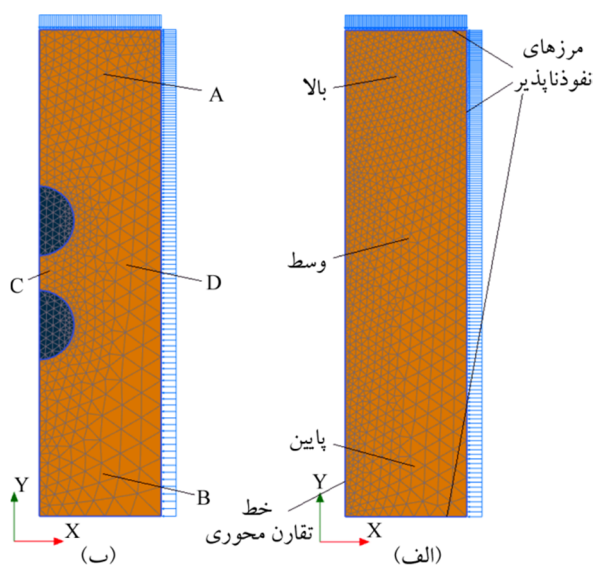
چنانچه مشهود است، رفتار نمونه از بارگذاری فشار همه‌جانبه متناوب تأثیر زیادی می‌پذیرد که مستلزم انجام مطالعات بیشتر جهت احاطه بر این جنبه رفتاری مصالح مخلوط می‌باشد.

از این مطالعه بررسی مقایسه‌ای توزیع ناهمگن فشار آب حفره‌ای درون نمونه (مقیاس مزو [۲]) می‌باشد و استخراج رفتار کل نمونه را به عنوان یک مصالح (مقیاس ماکرو [۲]) مد نظر ندارد، از قطرهای سنگ‌دانه بزرگ‌تر نیز استفاده شد. الگوی توزیع هندسی فشار آب در سنگ‌دانه‌های با قطر کمتر و بیشتر از یک ششم قطر نمونه یکسان مشاهده شد که نشان از عدم تأثیر این الگو از بزرگی قطر سنگ‌دانه‌ها در مقایسه با ابعاد نمونه میزبان دارد (شکل ۲).

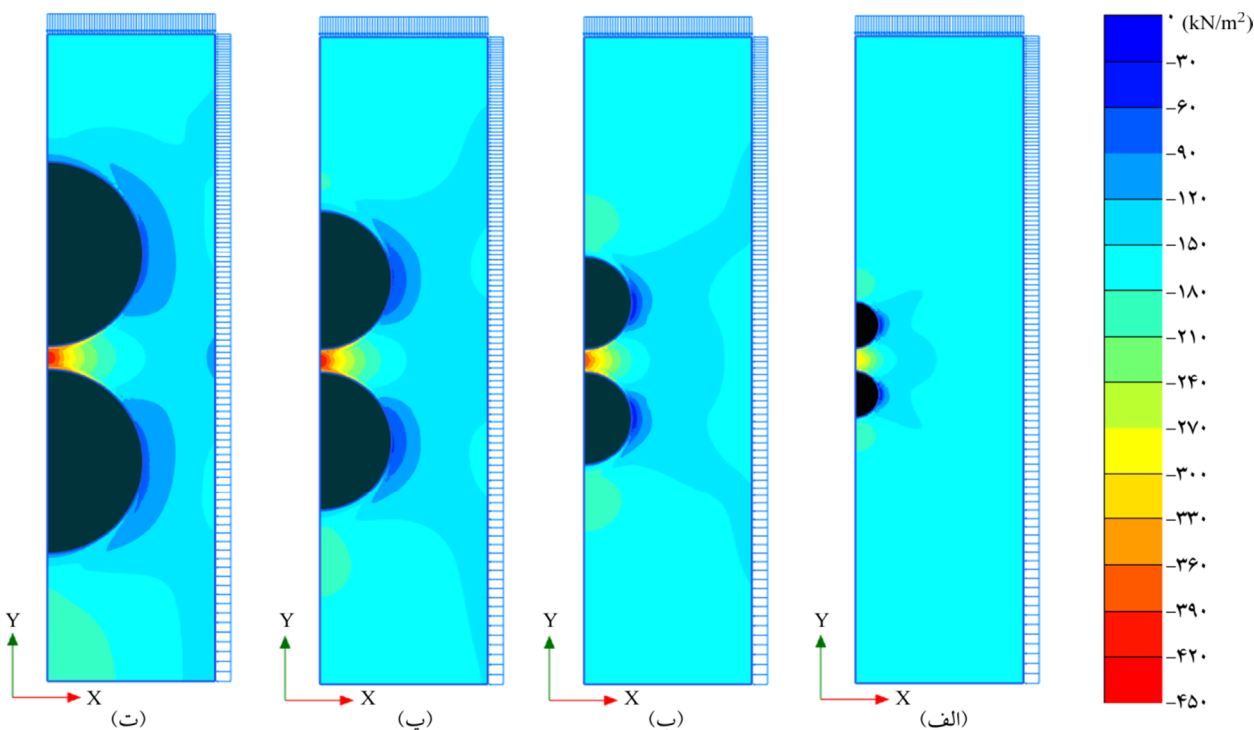
۳-۳- مدل رفتاری مورد استفاده

مدل UBCSand در نرم‌افزار PLAXIS امکان مدل کردن زوال متناوب و روانگرایی را دارد. در این مدل غیر همبسته^۷ سطح سیلان بر مبنای روابط موهر-کولمب و سطح پتانسیل بر مبنای روابط دراگر-پراگر به کار گرفته شده‌اند تا هم‌محوری^۸ تنش و کرنش تفاضلی تأمین گردد، و قانون جریان^۹ نیز از رابطه ساده شده Rowe بهره می‌برد. معادلات حاکم بر این مدل رفتاری و توصیف پارامترهای آن در دستنامه مربوطه [۱۰] به تفصیل بیان شده است که جهت رعایت اختصار از ذکر آن در این نوشتار صرف نظر می‌شود.

و به فواصل ۰/۵، ۱، ۲ و ۳ سانتی‌متر از یکدیگر مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. با وجودی که پیشینه قطر مجاز دانه‌های نمونه آزمایش سه محوری بیش از یک ششم قطر نمونه نیست [۹]، اما چون هدف



شکل (۱): هندسه مدل ساخته شده به همراه ابعاد مش: (الف) نمونه خالص و موقعیت نقاط منتخب بالا و وسط و پایین؛ (ب) نمونه حاوی سنگ‌دانه به قطر ۲ سانتی‌متر و فاصله ۱ سانتی‌متر به همراه موقعیت نقاط منتخب ذخیره داده‌ها.



شکل (۲): مقایسه الگوی توزیع فشار آب حفره‌ای اضافی در نمونه‌های حاوی سنگ‌دانه به فاصله ۰/۵ سانتی‌متر و قطر: (الف) ۱ سانتی‌متر؛ (ب) ۲ سانتی‌متر؛ (پ) ۳ سانتی‌متر؛ و (ت) ۴ سانتی‌متر (در پیک اولین سیکل بارگذاری).

جدول (۱): پارامترهای مدل UBCSand و مقادیر کالیبره شده آن در این تحقیق.

پارامتر	واحد	توضیحات	مقدار
ϕ_{cv}	درجه	زاویه اصطکاک حجم ثابت ^{۱۱}	۲۷
ϕ_p	درجه	زاویه اصطکاک بیشینه ^{۱۳}	۲۷/۱
c	کیلو نیوتن / مترمربع	چسبندگی ^{۱۴}	۵
k_G^e	-	عدد سختی برشی الاستیک ^{۱۵}	۵۰۰
k_G^p	-	عدد سختی برشی پلاستیک ^{۱۶}	۲۰۰
k_B^e	-	عدد مدول حجمی الاستیک ^{۱۷}	۲۰۰
m_e	-	اندیس مدول حجمی الاستیک ^{۱۸}	۰/۲
n_e	-	اندیس مدول برشی الاستیک ^{۱۹}	۰/۲
n_p	-	اندیس مدول برشی پلاستیک ^{۲۰}	۰/۲۵
R_f	-	نسبت سختی ^{۲۱}	۰/۹
P_A	کیلو نیوتن / مترمربع	فشار اتمسفر	۱۰۰
σ_t	کیلو نیوتن / مترمربع	مقاومت کششی	۰
e_0	-	تخلخل اولیه	-
γ_{unsat}	کیلو نیوتن / مترمربع	وزن مخصوص غیر اشباع	۱۸/۵
γ_{sat}	کیلو نیوتن / مترمربع	وزن مخصوص اشباع	۱۹/۵
k_x	متر / ثانیه	نفوذپذیری افقی ^{۲۲}	$4/5 * 10^{-6}$
k_y	متر / ثانیه	نفوذپذیری قائم	$3 * 10^{-6}$
$\hat{f}aC_{Hard}$	-	ضریب تراکم‌پذیری ^{۲۳}	۱/۲
Nl_{60}	-	عدد نفوذ استاندارد تصحیح شده	۱۵
$\hat{f}aC_{Post}$	-	ضریب رفتار پساروانگرایی ^{۲۴}	۱

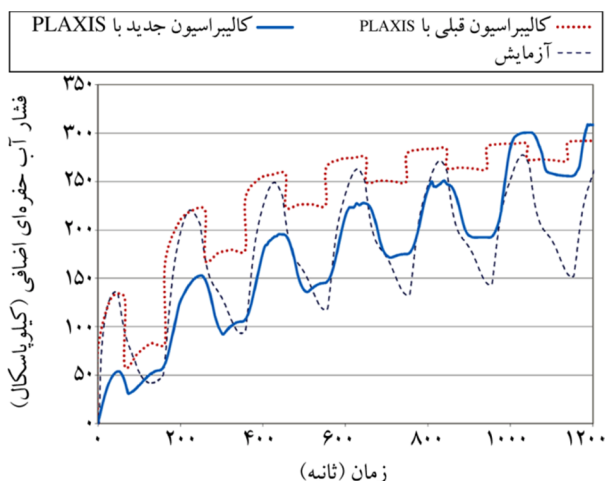
رفتار دانه‌های مصالح مخلوط با مدل الاستیک غیر متخلخل^{۲۴} شبیه‌سازی شده است که در آن سختی مصالح ۱۰۰ برابر سختی متوسط مصالح ریزدانه در نظر گرفته شده است.

۳-۴- معادلات حاکم بر مسئله و نحوه محاسبه فشار آب حفره‌ای

در این مطالعه ابتدا ضرورت در نظر گرفتن محاسبات کوپله^{۲۵} با لحاظ شتاب سیال (که PLAXIS قادر به لحاظ آن نیست) و یا اسکلت خاک (تحلیلی دینامیکی در PLAXIS) در حل معادلات، با توجه به معیار زینکیه‌ویچ و همکاران [۱۱] مد نظر قرار گرفت. هرچند معیار مذکور برای حل یک‌بعدی معادلات در محیط الاستیک است، لیکن به جهت تخمین اولیه، پارامترهای مرتبط با موضوع این مطالعه و موقعیت آنها در گراف

به‌رغم نام‌گذاری مدل، با کالیبراسیون مناسب پارامترهای آن، می‌توان رفتار بازه وسیعی از خاک‌های ریزدانه (که روانگرایی کامل در آنها رخ نمی‌دهد) تا دانه‌ای روانگرا را مدل نمود.

در کالیبراسیون پارامترهای این مدل رفتاری، ابتدا تغییرات فشار آب حفره‌ای نمونه مدل شده در نرم‌افزار و آنچه جلیلی [۲] طی آزمایش‌های مونوتونیک و متناوب انجام شده در آزمایشگاه بر خاک مورد مطالعه خود مشاهده کرده بودند، مبنای قرار گرفت. پس از انتخاب پارامترهای منطبق با آزمایش‌های پیشین، با توجه به اینکه خاک مورد اشاره به‌سرعت به سمت روانگرایی پیش می‌رفت [۳]، برای این مطالعه تغییراتی در پارامترهای مدل داده شد تا افزایش فشار آب حفره‌ای تدریجی‌تر صورت پذیرد. این امر با توجه به دقت کم مدل رفتاری UBCSand در محاسبات پساروانگرایی^{۲۴}، فرصت بیشتری جهت مشاهده رفتار مصالح مخلوط در مقایسه با مصالح خالص ریزدانه را در مرحله پیش از روانگرایی به دست می‌دهد. شکل (۲) مقایسه نتایج حاصل از کالیبراسیون جلیلی [۲] در مطالعات پیشین و این مطالعه را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه مطالعه پیشین در فرکانس ۰/۰۰۵ هرتز صورت گرفته بود، کالیبراسیون جدید نیز در همین فرکانس صورت پذیرفت (شکل ۳). پارامترهای مدل UBCSand و مقادیر کالیبره شده آن در این مطالعه در جدول (۱) ذکر شده‌اند.



شکل (۳): فشار آب حفره‌ای اضافی^{۱۱} (EPWP) در نمونه خالص با پارامترهای مدل مطالعه حاضر و مطالعه پیشین جلیلی [۲].

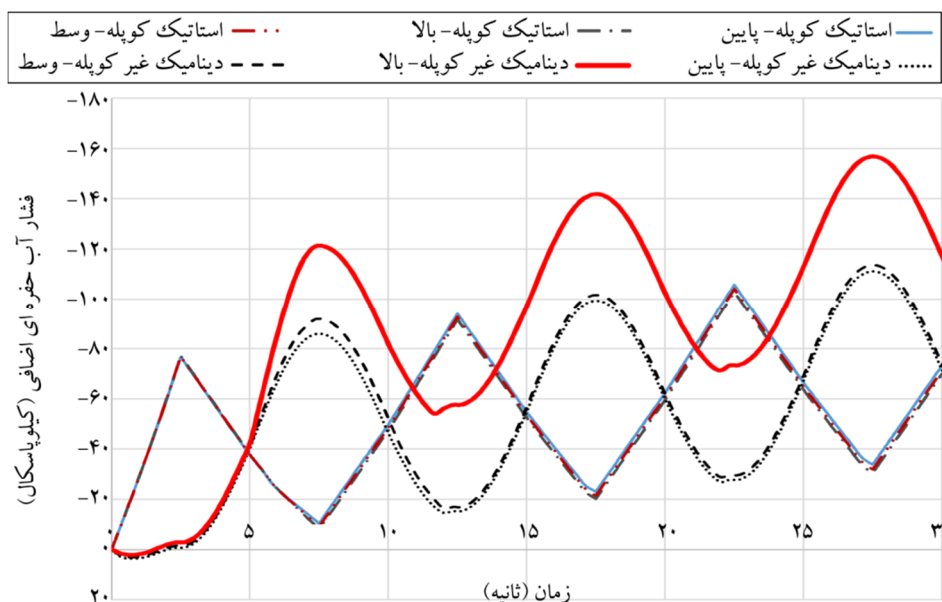
غیر کوپله^{۲۷} و استاتیکی (متناوب غیردینامیکی) کوپله بر روی یک نمونه و در شرایط بارگذاری یکسان جهت مقایسه صورت پذیرفت که نتیجه آن در شکل (۴) قابل مشاهده است. جهت وضوح بیشتر اهمیت این شکل، نحوه محاسبه فشار آب حفره‌ای در هر یک از حالات مورد اشاره در نرم‌افزار مورد استفاده باید مدنظر قرار گیرد.

نرم‌افزار PLAXIS جهت محاسبه فشار آب حفره‌ای در تحلیل پلاستیک غیر کوپله برای مصالح اشباع، سختی حجمی پیش فرض آب ($2 \times 10^{-6} \text{ kN/m}^2$) را به سختی خاک می‌افزاید و ماتریس سختی را تشکیل می‌دهد. با وقوع کرنش حجمی بسیار اندک، مقدار اضافه فشار آب حفره‌ای از حاصل ضرب سختی حجمی آب در کرنش مذکور محاسبه می‌شود. بدیهی است تنش مؤثر حاصله به دلیل سختی بسیار کوچک تر خاک در مقایسه با سیال، تغییر اندکی خواهد داشت و عملاً هرگونه بارگذاری، فشار آب حفره‌ای را متأثر می‌نماید.

در تحلیل کوپله محیط دو فازه در نرم‌افزار PLAXIS، فشار آب حفره‌ای نیز به عنوان یکی از درجات آزادی گره‌ها تعریف می‌شود و معادلات تغییر شکل اسکلت و جریان سیال به صورت کوپله حل می‌شوند. منظور از محیط دو فازه، مصالح خاکی

پیشنهادی زینکیه‌ویچ و همکاران به دست آمد؛ بدین منظور حالات هندسی متعددی شامل خصوصیات نمونه سه محوری، یک لایه از هسته سدهای خاکی متداول و یا کل هندسه هسته سد خاکی و همچنین بازه‌ای از مقادیر سرعت موج با توجه به تغییرات سختی مصالح در بازه بارگذاری مدنظر این مطالعه مورد بررسی قرار گرفت ($\Pi_1 \approx 0-3$ و $\Pi_2 \approx 0$) که در ناحیه کند^{۲۶} واقع شد؛ یعنی می‌توان در محاسبات با بارگذاری هارمونیک مشابه بر روی یک لایه خاک الاستیک از شتاب سیال و اسکلت خاک صرف نظر کرد و تحلیل دینامیکی انجام نداد. دلیل این امر فرکانس ۰/۱ هرتز انتخابی برای بار اعمالی به نمونه می‌باشد. این مقدار فرکانس با توجه به فاز آزمایشگاهی این مطالعات انتخاب شد؛ در مطالعات آزمایشگاهی جهت حفظ یکنواختی میدان تنش و کرنش در سرتاسر نمونه از فرکانس‌های محدوده ۰/۱ تا ۲ هرتز بهره برده می‌شود [۹].

با انجام چند تحلیل اولیه، با توجه به به کارگیری مدل رفتاری الاستوپلاستیکی که زوال تناوبی را نیز مدل می‌کند، رفتار مطابق با ادبیات فنی آزمایش‌های مشابه در بارگذاری دینامیکی [۱۲-۱۳]، در مدل‌های تحت بارگذاری استاتیکی مشاهده نشد. بدین منظور دو تحلیل دینامیکی زهکشی نشده



شکل (۴): فشار آب حفره‌ای اضافی (EPWP) در نقاط منتخب (شکل ۱-الف) نمونه خالص تحت بارگذاری دینامیکی غیر کوپله (خطوط منحنی) و استاتیکی کوپله (خطوط تیز گوشه).

می‌کنند، از متغیرهای η و CSR بهره برده می‌شود:

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (1)$$

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{p}{q} \quad (3)$$

$$CSR = \frac{q}{2p'_0} \quad (4)$$

با توجه به نتایج تحلیل‌های عددی ادبیات فنی مرتبط، تغییرات فشار همه‌جانبه نیز علاوه بر بار محوری در یک بارگذاری لرزه‌ای بر روی یک سد خاکی قابل توجه می‌باشد. لذا برای بررسی این مسیر بارگذاری بر نحوه افزایش فشار آب حفره‌ای بین سنگ‌دانه‌ها در مصالح مخلوط، الگوهای بارگذاری جدول (۲) در این مطالعه مد نظر قرار گرفتند.

۴- نتایج تحلیل‌های عددی

شکل (۱-ب) نقاط منتخب از نمونه مورد تحلیل را جهت ذخیره پیوسته داده‌های طراحی (شامل فشار آب حفره‌ای اضافی) نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، نقاط A و B در فاصله دوردست^{۲۸} [۲] از دانه‌ها قرار دارند و به‌نوعی نمایانگر وضعیت نمونه رس خالص بدون اثر دانه‌ها می‌باشند. نقطه C در بین دو دانه و نقطه D در مجاورت سطح بیرونی نمونه و در تراز دانه‌ها قرار داده شده است. در صورت هم امتداد بودن بارگذاری با امتداد دانه‌ها، نقطه C در مسیر تراکم^{۲۹} [۲] قرار می‌گیرد؛ در این حالت نقطه D به دلیل شرایط اتساعی تراز میانی نمونه باید در

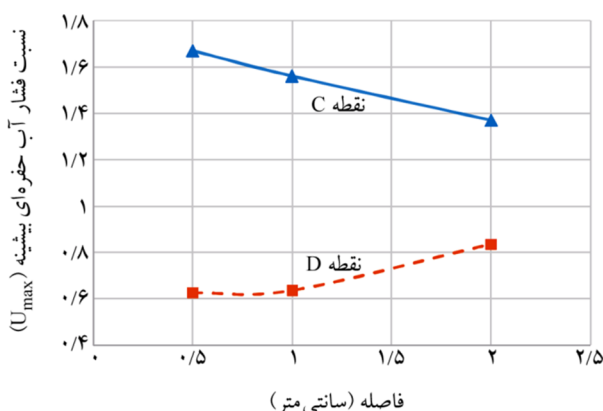
اشباع شامل یک فاز مصالح خاکی و فاز دیگر سیال موجود در خلل و فرج آن می‌باشد. بر خلاف محاسبات پلاستیک، در این حالت محاسباتی زمان اعمال بار، ضریب نفوذپذیری خاک و شرایط زهکشی در مرزهای هندسه از اهمیت برخوردارند [۸]. در تحلیل کوپله محیط دو فاز، گرادیان هیدرولیکی ایجاد شده در اثر به وجود آمدن فشار آب حفره‌ای ناشی از بارگذاری، با توجه به شرایط زهکشی مرزهای هندسه، در زمان داده شده برای اعمال بار به سمت تعادل فشار آب در سرتاسر نمونه پیش می‌رود [۲]. شکل (۴) مقایسه فشار آب حفره‌ای اضافی ناشی از دو تحلیل دینامیکی زهکشی نشده غیر کوپله و تحلیل کوپله استاتیکی را بر روی نمونه سه محوری تحت بارگذاری مشابه با فرکانس ۰/۱ هرتز نشان می‌دهد. چنانچه در این نمودار قابل مشاهده است، تمرکز فشار آب حفره‌ای که در نمونه‌های خالص در قسمت بالای نمونه مشهود است [۱۲-۱۳]، در مدل دینامیکی مشاهده می‌شود، لیکن در مدل غیر دینامیکی شکل نمی‌گیرد. نواحی میانی و پایینی نمونه از وضعیت یکسانی به لحاظ بیشینه فشار آب حفره‌ای برخوردارند. لذا به صورت محافظه کارانه تحلیل‌های این مطالعه به صورت دینامیکی زهکشی نشده غیر کوپله انجام شدند.

۳-۵- الگوی بارگذاری تناوبی

مطابق ادبیات فنی، جهت بررسی بارگذاری تناوبی که در آن هم بار محوری ($q = \sigma_1 - \sigma_3$) و هم فشار همه‌جانبه (σ_3) تغییر

جدول (۲): الگوی بارگذاری تناوبی در مطالعه حاضر.

P'_0	p	η	$q = p/\eta$	$\sigma_1 = p + 2(q/3)$	$\sigma_3 = p - (q/3)$	CSR
۳۰۰	۴۰	۰/۵	۸۰	۹۳/۳	۱۳/۳	۰/۱۳
۳۰۰	۸۰	۱	۸۰	۱۳۳/۳	۵۳/۳	۰/۱۳
۳۰۰	۱۲۰	۱/۵	۸۰	۱۷۳/۳	۹۳/۳	۰/۱۳
۳۰۰	۱۴۰	۱/۷۵	۸۰	۱۹۳/۳	۱۱۳/۳	۰/۱۳
۳۰۰	۱۶۰	۲	۸۰	۲۱۳/۳	۱۳۳/۳	۰/۱۳
۳۰۰	۱۸۰	۲/۲۵	۸۰	۲۳۳/۳	۱۵۳/۳	۰/۱۳
۳۰۰	۲۰۰	۲/۵	۸۰	۲۵۳/۳	۱۷۳/۳	۰/۱۳
۳۰۰	۲۴۰	۳	۸۰	۲۹۳/۳	۲۱۳/۳	۰/۱۳

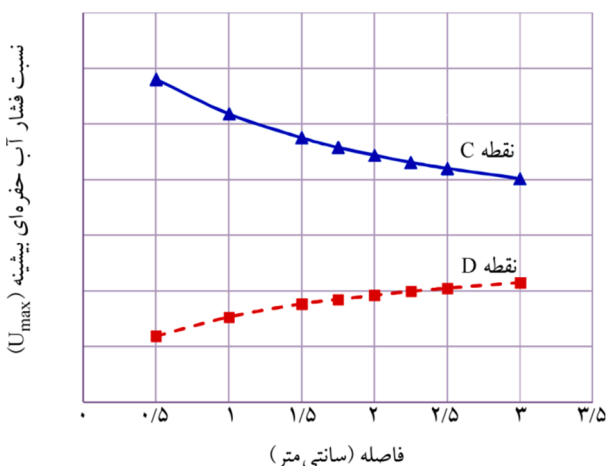


شکل (۵): تغییرات نسبت فشار آب حفره‌ای بیشینه در نقاط C و D با تغییر فاصله سنگ‌دانه.

$$U_{\max C} = \frac{u_{\max C}}{\text{Average}(u_{\max A}, u_{\max B})} \quad (5)$$

چنانچه انتظار می‌رود، با کاهش فاصله دانه‌ها، مقدار فشار آب حفره‌ای در مسیر تراکم افزایش و در مسیر اتساع کاهش می‌یابد.

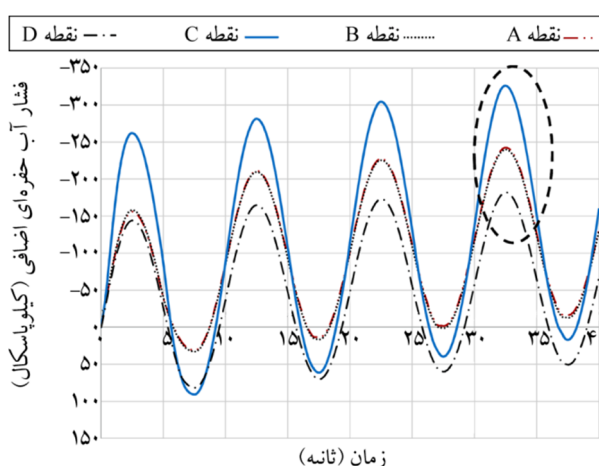
جهت بررسی اثر بارگذاری همه‌جانبه تناوبی در قالب پارامتر η ، در شکل (۷) تغییرات نسبت فشار آب حفره‌ای فوق‌الذکر با تغییر مقدار η برای قطر منتخب ۲ سانتی‌متر و فاصله ۱ سانتی‌متر نشان داده شده است. برای دیگر قطرها و فواصل نیز رویه به همین شکل است و لذا جهت اختصار از ارائه تمامی نتایج صرف‌نظر می‌شود.



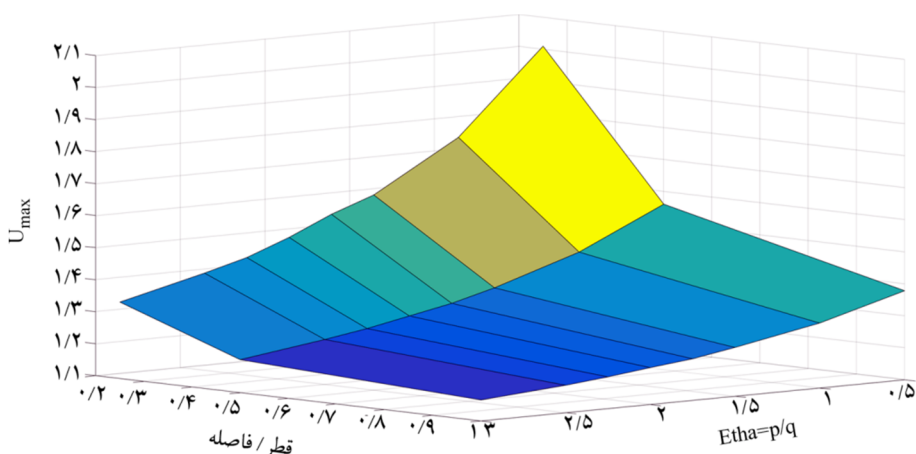
شکل (۷): تغییرات نسبت فشار آب حفره‌ای بیشینه در نقاط C و D با تغییر نسبت η (نمونه حاوی سنگ‌دانه به قطر ۲ سانتی‌متر و فاصله ۱ سانتی‌متر).

شرایطی شبیه مسیر اتساع [۲] باشد. در حالتی که برآیند بارگذاری به سمت تعامد با امتداد دانه‌ها سوق یابد، انتظار می‌رود نقطه D افزایش فشار آب بیشتری نسبت به دیگر امتدادهای بارگذاری نشان دهد.

شکل (۵) مقادیر فشار آب حفره‌ای اضافی ایجاد شده در هر نقطه را برای یک نمونه منتخب نشان می‌دهد. جهت محاسبه فشار آب حفره‌ای بیشینه در یک نقطه، مقدار بیشینه آن در انتهای سیکل چهارم و قبل از روانگر شدن مد نظر قرار گرفته است (ناحیه متمایز شده با نقطه چین در شکل ۵)؛ لازم به ذکر است که در کالیبراسیون مدل رفتاری، با توجه به اینکه در سیکل پنجم روانگرایی رخ داد، جهت یکسان بودن شرایط، تمامی قرائت‌ها در سیکل چهارم مبنای محاسبات قرار گرفته‌اند. مقدار بیشینه نیز به‌عنوان حالتی بحرانی در تحلیل پایداری سازه ژئوتکنیکی موضوع این مطالعه (هسته سد خاکی) به مقادیر ماندگار^{۳۱} ترجیح داده شده‌اند. بر این اساس در شکل (۶) تغییرات نسبت فشار آب حفره‌ای بیشینه در نقاط C ($u_{\max C}$) و D ($u_{\max D}$) به میانگین فشار آب حفره‌ای بیشینه در نقاط A ($u_{\max A}$) و B ($u_{\max B}$) بر اساس تغییر فاصله دانه‌ها نمایش داده شده است. این نسبت فشار در شکل‌های پیش رو با پارامتر U_{\max} و عبارت مختصر «نسبت فشار آب حفره‌ای بیشینه» نمایش داده می‌شود. همچنین نسبت تنش (CSR) همه مدل‌ها یکسان و برابر ۰/۱ می‌باشد.



شکل (۸): تغییرات فشار آب حفره‌ای اضافی (EPWP) در نقاط A، B، C و D در یکی از نمونه‌های مورد آزمایش (قطر دانه ۲ سانتی‌متر، فاصله ۱ سانتی‌متر، $\eta=0.5$, $CSR=0.1$).



شکل (۸): تغییرات نسبت فشار آب حفره‌ای بیشینه در نقطه C با تغییر نسبت η و نسبت فاصله سنگ‌دانه‌ها به قطر آنها.

به یکدیگر (کاهش η در این مطالعه) نسبت فشار آب حفره‌ای در مسیر تراکم افزایش یابد؛ مشاهدات این مطالعه مؤید این رفتار می‌باشند.

- انتظار می‌رود با افزایش قطر سنگ‌دانه‌ها و کاهش فاصله آنها میزان افزایش نسبت فشار آب حفره‌ای نیز افزایش یابد؛ این رفتار به خوبی در نتایج این مطالعه مشهود است.

با توجه به تأثیر سنگ‌دانه‌ها در افزایش فشار آب حفره‌ای و به تبع آن کاهش تنش مؤثر، در نظر نگرفتن رفتار واقعی مصالح مخلوط در تحلیل پایداری ابنیه حاوی این مصالح، محافظه کارانه نیست. لذا جهت بررسی کمی تأثیر تمامی عوامل فوق‌الذکر بر میزان افزایش نسبت فشار آب حفره‌ای در مسیر تراکم، تحلیل‌های بیشتری مورد نیاز است که برای فاز بعدی مطالعات مد نظر می‌باشند تا بتوان با داده‌های بیشتر به قضاوت دقیق‌تری در این مورد دست یافت.

قدردانی و تشکر

این مطالعه در قالب پروژه پژوهشی ۶۷۴ با کد فعالیت ۶۱۴۴ و عنوان «بررسی اثر فشار همه‌جانبه متناوب بر تغییرات فشار آب حفره‌ای در مصالح مخلوط رس- سنگ‌دانه» در پژوهشکده ژئوتکنیک پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله انجام شده است. لذا بدین وسیله از مدیریت محترم پژوهشگاه به جهت تأمین امکانات نرم‌افزاری و سخت‌افزاری مورد نیاز این مطالعه قدردانی به عمل می‌آید.

شکل (۸) تغییرات نسبت فشار آب حفره‌ای با تغییر η را به‌ازای مقادیر مختلف نسبت فاصله سنگ‌دانه به قطر آن نشان می‌دهد. چنانچه در این شکل قابل مشاهده است، در مقادیر کمینه نسبت فاصله به قطر، با افزایش η مقدار نسبت فشار آب حفره‌ای در مسیر فشار نیز افزایش می‌یابد که با توجه به افزایش بار اعمالی و حادث شدن شرایط مسیر فشار مطابق انتظار است. این روند در مقادیر بیشتر برای نسبت فاصله به قطر نیز به خوبی در این شکل قابل مشاهده می‌باشد، البته با شیب ملایم‌تر.

۵- جمع‌بندی نتایج تحلیل

- مشاهدات صورت گرفته در این مطالعه در شرایط مشابه، مؤید یافته‌های ادبیات فنی در موضوع مورد نظر (ناهمگنی فشار آب حفره‌ای اضافی در مخلوط رس- سنگ‌دانه) می‌باشد. این موضوع در بررسی پایداری ابنیه حاوی این مصالح- تخمین صحیح مقدار فشار آب حفره‌ای و تنش مؤثر- مدنظر قرار گیرد.

- در الگوهای متنوع بارگذاری ناشی از تغییرات تناوبی هم‌زمان بار محوری و همه‌جانبه، در مسیر تراکم افزایش فشار آب حفره‌ای در مقایسه با نقاط دور از سنگ‌دانه مشهود و در برخی موارد قابل توجه است.

- انتظار می‌رود میزان افزایش فشار آب حفره‌ای در مسیر تراکم به امتداد برآیند بارگذاری و امتداد قرارگیری سنگ‌دانه‌ها بستگی داشته باشد، به نحوی که با نزدیک شدن این دو امتداد

10. Petalas, A. and Galavi, V. (2013) *Plaxis Liquefaction Model UBC3DPLM. PLAXIS Report*. PLAXIS by, The Netherlands.
11. Zienkiewicz, O.C., Chang, C.T., and Bettess, P. (1980) Drained, undrained, consolidating and dynamic behavior assumptions in soils. *Geotechnique*, **30**(4), 385-395.
12. Jin, Y., Bin, Y., and Feng, Z. (2010) Numerical simulation of sand subjected to cyclic load under undrained conventional triaxial test. *Soils and Foundations*, **50**(2), 177-194.
13. Zhao, C., Koseki, J., and Miyashita, Y. (2017) Direct and Indirect Local Deformations of Sand in Undrained Cyclic Triaxial Tests by Image Analysis Technique. *Advances in Laboratory Testing and Modelling of Soils and Shales*, 215-222, Springer.

واژه‌نامه

- ۱- فشار همه‌جانبه متناوب (VCP) Variable Confining Pressure
- ۲- فشار همه‌جانبه ثابت (CCP) Constant Confining Pressure
- ۳- مقید نشده Unbounded
- ۴- مقداری زهکشی نشده Partially Drained
- ۵- تقارن محوری Axisymmetric
- ۶- صریح Implicit
- ۷- غیر همبسته Non-Associated
- ۸- هم‌محوری Coaxiality
- ۹- قانون جریان Flow Rule
- ۱۰- پسا روانگرایی Post-Liquefaction
- ۱۱- فشار آب حفره‌ای اضافی (EPWP) Excess Pore Water Pressure
- ۱۲- زاویه اصطکاک حجم ثابت Constant Volume Friction Angle
- ۱۳- زاویه اصطکاک بیشینه Peak Friction Angle
- ۱۴- چسبندگی Cohesion
- ۱۵- عدد سختی برشی الاستیک Elastic Shear Modulus Number
- ۱۶- عدد سختی برشی پلاستیک Plastic Shear Modulus Number
- ۱۷- عدد مدول حجمی الاستیک Elastic Bulk Modulus Number
- ۱۸- اندیس مدول حجمی الاستیک Elastic Bulk Modulus Index

مراجع

1. Jalili, J. (2005) *Investigation of Construction Methods of Wet Core Earth Dams in North of Iran*. M.Sc. Thesis, Shiraz University (in Persian).
2. Jalili, J. (2011) *An Investigation on Heterogeneous Pore Water Pressure Distribution in Clay-Aggregate Mixtures*. Ph.D. Thesis, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (in Persian).
3. Rondón, H.A., Wichtmann, T., Triantafyllidis, T., and Lizcano, A. (2009) Comparison of cyclic triaxial behavior of unbound granular material under constant and variable confining pressure. *Journal of Transportation Engineering*, **135**(7), 467-478.
4. Gu, C., Wang, J., Cai, Y., Yang, Z., and Gao, Y. (2012) Undrained cyclic triaxial behavior of saturated clays under variable confining pressure. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **40**, 118-128.
5. Cai, Y., Gu, C., Wang, J., Juang, C.H., Xu, C., and Hu, X. (2012) One-way cyclic triaxial behavior of saturated clay: comparison between constant and variable confining pressure. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **139**(5), 797-809.
6. Sun, L., Gu, C., and Wang, P. (2015) Effects of cyclic confining pressure on the deformation characteristics of natural soft clay. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **78**, 99-109.
7. Gu, C., Wang, J., Cai, Y., Sun, L., Wang, P., and Dong, Q. (2016) Deformation characteristics of overconsolidated clay sheared under constant and variable confining pressure. *Soils and Foundations*, **56**(3), 427-439.
8. Brinkgreve, R.B.J., Engin, E., and Swolfs, W.M. (2017) *PLAXIS 2017 Reference Manual*. PLAXIS bv, The Netherlands.
9. ASTM D3999/D3999M-11e1 (2011) *Standard Test Methods for the Determination of the Modulus and Damping Properties of Soils Using the Cyclic Triaxial Apparatus*. ASTM International, West Conshohocken, PA.

Elastic Shear Modulus Index	۱۹- اندیس مدول برشی الاستیک
Plastic Shear Modulus Index	۲۰- اندیس مدول برشی پلاستیک
Failure Ratio	۲۱- نسبت سختی
Densification Factor	۲۲- ضریب تراکم‌پذیری
Fitting Parameter to Adjust Post-Liquefaction Behavior	۲۳- ضریب رفتار پساروانگرایی
Non-Porous	۲۴- غیر متخلخل
Coupled	۲۵- کوپله
Slow Phenomena	۲۶- ناحیه کند
Uncoupled	۲۷- غیر کوپله
Far Field	۲۸- فاصله دور دست
Compression Path	۲۹- مسیر تراکم
Extension Path	۳۰- مسیر اتساع
Residual	۳۱- ماندگار