

مدل رفتاری ماسه در شرایط زهکشی نشده تحت بارگذاری یکنواخت با در نظر گرفتن نسبت تنش

نسرین وفائی^۱ و توحید اخلاقی*^۲

^۱ کارشناس ارشد عمران - مکانیک خاک و پی، دانشگاه تبریز

^۲ استادیار گروه مهندسی خاک و پی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

چکیده

مدل کردن رفتار خاک در انواع بارگذاری‌های یکنواخت از اهمیت خاصی برخوردار است. مدل‌های قدیمی به دلیل عدم توانایی در مدل کردن دقیق رفتار مقاومتی خاک و در نتیجه خطای محاسباتی، منجر به تعریف غیر واقعی از مقاومت ماسه می‌گردند. همچنین در این مدل‌ها نمونه‌های یک نوع خاک با چگالی‌ها و تنش‌های همه‌جانبه مختلف به عنوان خاک‌های مختلف در نظر گرفته شده و هیچ کنترل قاطعی بر تغییر حالت در طی بارگذاری وجود ندارد. از سوی دیگر مدل‌های جدید نیز با وجود توانایی خوب آن‌ها در تعریف رفتار خاک دارای پیچیدگی‌های خاصی هستند که معمولاً کاربرد آن‌ها را با مشکل مواجه می‌کند. از این رو ضرورت ارائه مدلی ساده و با امکان محاسبه سریع برای استفاده‌های کاربردی کاملاً محسوس می‌نماید. در همین راستا در این کار تحقیقی ابتدا با استفاده از سه پارامتر حالت رفتار ماسه شامل نسبت تنش همه‌جانبه، نسبت تنش برشی و شاخص فشار روابطی برای رفتار ماسه ارائه می‌شود به نحوی که امکان تعریف رفتار ماسه را تحت بارگذاری زهکشی نشده و یکنواخت در تمامی محدوده‌های تنش همه‌جانبه و دانسیته، از حالت شل تا حالت متراکم فراهم می‌سازد. در نهایت به منظور ارزیابی و صحت‌سنجی کارکرد و قابلیت کاربرد مدل پیشنهادی، نتایج بدست آمده از بکارگیری مدل ساده شده نهایی با نتایج آزمایشگاهی آزمایشات سه‌محوری زهکشی نشده موجود در مقالات علمی معتبر منتشر شده مقایسه گردیده که نتایج حاصل نشان‌دهنده توانایی و قابلیت خوب مدل در پیش‌بینی رفتار ماسه در شرایط زهکشی نشده می‌باشد.

واژگان کلیدی: ماسه، پارامتر حالت، بارگذاری زهکشی نشده یکنواخت، نسبت تنش، حالت بحرانی.

۱- مقدمه

از رفتار انقباضی به اتساعی تغییر می‌کند نقطه گذار فاز گفته می‌شود [۲-۴]. علاوه بر آن، هر نوع ماسه چه به حالت شل و چه متراکم به یک حالت نهایی می‌رسد که در آن به طور پیوسته در حجم ثابت و بدون تغییرات تنش‌های برشی و همه‌جانبه تغییر فرم می‌دهد این حالت که به عنوان حالت بحرانی شناخته می‌شود با استفاده از یک سری نسبت تخلخل بحرانی و تنش همه‌جانبه و برشی به صورت سه‌بعدی تعریف می‌شود [۵-۷]. همچنین ماسه چه به حالت متراکم و چه به حالت شل پیش از رسیدن به حالت بحرانی در یک محدوده تنش تقریباً نسبت تنش برشی به تنش همه‌جانبه مقدار ثابتی به خود می‌گیرد که در مورد ماسه شل بر نقطه گذار فاز منطبق بوده و در ماسه متراکم پس از گذار فاز رخ می‌دهد. نقطه مربوط به ترکیب تنش برشی و همه‌جانبه‌ای که این وضعیت شروع می‌شود از اهمیت خاصی برخوردار است و از آنجایی که این نقطه بر روی خط گسیختگی ماسه جای دارد لذا آن را نقطه ابتدایی حالت گسیختگی می‌نامیم که در این کار تحقیقی معرفی و به این موضوع پرداخته می‌شود.

ارزیابی رفتار خاک‌های دانه‌ای تحت برش در مهندسی ژئوتکنیک از اهمیت خاصی برخوردار است. روش‌های قدیمی و متداول جهت تعریف مقاومت ماسه یا از مقاومت حداکثر که منجر به پیش‌بینی بالای مقاومت برشی خاک می‌گردد و یا از مقاومت پسماند که منجر به پیش‌بینی بیش از حد پایین مقاومت می‌گردد، استفاده می‌کنند. عدم توانایی در مدل کردن دقیق رفتار مقاومتی خاک و در نتیجه خطای محاسباتی منجر به تعریف غیر واقعی از مقاومت ماسه می‌گردد. همچنین در این مدل‌ها نمونه‌های یک نوع خاک با چگالی‌ها و تنش‌های همه‌جانبه مختلف به عنوان خاک‌های مختلف در نظر گرفته می‌شود. از سوی دیگر هیچ کنترل قاطعی بر تغییر حالت در طی بارگذاری وجود ندارد [۱].

رفتار عمومی ماسه تابعی از تخلخل و تنش مؤثر بر خاک است که پارامتر حالت اثر تخلخل و تنش را ترکیب می‌نماید. به طور معمول ماسه شل رفتار انقباضی و ماسه متراکم رفتار اتساعی دارد [۲ و ۳]. همچنین به وضعیت تنشی که رفتار خاک

نسبت تخلخل - تنش نرمال مؤثر و فضای تنش برشی - تنش نرمال مؤثر روی یک منحنی منحصر به فرد واقع می‌گردند که خط حالت بحرانی نامیده می‌شود.

خط حالت بحرانی یا دائمی ماسه به صورت مکان هندسی نقاطی است که به حالت بحرانی رسیده‌اند و در فضای نسبت تخلخل به تنش نرمال مؤثر ($e-p$) تعریف می‌شود. مشخص شده است که در بسیاری از خاک‌های ماسه‌ای خط حالت بحرانی در فضای $e - \log p$ خط راست نیست [۱۰]. خط حالت بحرانی به صورت زیر قابل تعریف است [۱۱]:

$$e_c = e_0 - \lambda_s \left(\frac{p_c}{p_a} \right)^\xi \quad (1)$$

باید توجه داشت که مقدار ثابت e_0 مقدار نسبت تخلخل در $p=0$ و p_a فشار اتمسفریک و λ_s و ξ ثابت‌های رابطه هستند. داده‌های آزمایش ماسه Toyoura و نمودار برازش شده با ثابت‌های $\lambda_s = 0.19$ و $\xi = 0.1$ و $e_0 = 0.934$ در شکل (۱) نشان داده شده است.

از ارتباط بین p_c و تنش همه جانبه مؤثر کنونی استفاده می‌شود و شاخص فشار به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$I_p = \frac{p}{p_c} \quad (2)$$

در صورتی که خط حالت بحرانی با رابطه (۱) تعریف شود، با توجه به شکل (۱) برای بارگذاری زهکشی نشده به دست می‌آید:

$$p_c = p_a \left(\frac{e_0 - e}{\lambda_s} \right)^\xi \quad (3)$$

بنابراین شاخص فشار برای بارگذاری زهکشی نشده به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$I_p = \frac{p}{p_c} = \left(\frac{e_0 - e}{e_0 - e} \right)^\xi \quad (4)$$

رابطه بین p ، p_c ، e و I_p در شکل (۱) نشان داده شده است. در حالت زهکشی نشده به دلیل ثابت بودن e مقدار p_c نیز ثابت است.

لازم به یادآوری است که ارزیابی رفتار ماسه در آزمایشگاه به طور مشخص وابستگی تأثیر تنش همه‌جانبه به دانسیته را نشان می‌دهد. به عنوان مثال ماسه شل در بارگذاری زهکشی نشده یکنواخت و تحت تنش‌های همه‌جانبه مختلف رفتار یکسانی از خود نشان می‌دهد در حالی که تغییرات تنش همه‌جانبه در رفتار ماسه متراکم تأثیر بارزی دارد؛ به طوری که با افزایش تنش همه‌جانبه ماسه رفتار انقباضی‌تر پیدا می‌کند. به طور کلی میزان تأثیر تنش همه‌جانبه بر رفتار ماسه از حالت بسیار شل تا بسیار متراکم از تأثیر خیلی کم تا تأثیر بسیار زیاد تغییر می‌کند. در حالی که مدل‌های معمول ماسه این تأثیرات را مدنظر قرار نداده‌اند [۸]. برای اعمال اثر دانسیته و تنش همه‌جانبه و تأثیر دانسیته در اثر تنش همه‌جانبه می‌توان از مفهوم "پارامتر حالت" بهره برد. مزیت استفاده از مفهوم حالت در مدل کردن رفتار ماسه مربوط به توانایی آن در کمی کردن تأثیر ترکیبی دانسیته و تنش همه‌جانبه در رفتار ماسه است. مفهوم پارامتر حالت راه حلی منطقی برای در بر گرفتن این عوامل در مدل کردن رفتار ماسه ارائه می‌دهد و در نتیجه ساختار تئوریک منطقی‌تری ارائه می‌نماید [۹]. پارامترهای حالت بسیاری برای توصیف رفتار ماسه پیشنهاد شده‌اند. یکی از این پارامترها که رفتار ماسه را به حالت بحرانی آن وابسته می‌کند پارامتر اندیس فشار، I_p ، است [۷].

به طور کلی تمامی مسیرهای تنش یک نوع ماسه در تمامی محدوده‌های تنش همه‌جانبه و دانسیته در فضای تنش برشی و تنش همه‌جانبه، $p-q$ و در فضای کرنش و تنش همه‌جانبه، $\epsilon-p$ ، مشابه هستند از این رو رفتار ماسه تحت بارگذاری برشی در فضای تنش برشی - تنش همه‌جانبه و تنش - کرنش با استفاده از پارامترهای حالت به صورت مسیرهای واحد پارامتری قابل تعریف می‌گردد. در این مقاله سه پارامتر حالت برای رسیدن به چنان روابطی معرفی می‌شوند که عبارتند از: نسبت تنش همه‌جانبه R_{p_0} و نسبت تنش برشی R_s که جدید بوده و در این کار تحقیقی ارائه می‌گردند و همچنین از شاخص فشار I_p که پیش از این توسط Wang و همکاران [۷] ارائه شده استفاده می‌شود.

۲- خط حالت بحرانی ماسه

آزمایش‌های انجام شده توسط محققین مختلف نشان داده‌اند که مقاومت نهایی یا مقاومت حالت بحرانی نمونه‌های ماسه، تابعی از خصوصیات دانه‌ها و همچنین نسبت تخلخل اولیه نمونه‌ها می‌باشد. به طوری که نقاط متناظر با تمام وضعیت‌های ممکن که در آنها خاک به حالت بحرانی رسیده است، در فضای

M نسبت تنش بحرانی (و یا گسیختگی) است که به زاویه اصطکاک داخلی ماسه، (ϕ) با رابطه $M = 6 \sin \phi / (3 - \sin \phi)$ مرتبط می‌شود. تعریف تحلیلی خط گذار فاز با استفاده از یک تابع ساده بر اساس داده‌های تجربی (شکل (۲)) تعریف می‌شود. اگر نقاط روی خط گذار فاز با q_d, p_d مشخص شود شیب خط با $M_d = q_d / p_d$ تعریف می‌شود که نسبت تنش اتساعی نامیده می‌شود و تابعی خطی از I_p و M_0 در مبدأ مختصات، خواهد بود و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{q_d}{p_d} = M_d = M_0 + (M - M_0) I_p \quad (5)$$

خط گذار فاز شرط $M_d = M_0$ را در $p = 0$ و شرط $M_d / p_d = M$ در $I_p = 1$ ($p = p_c$) در حالت بحرانی مربوط به نسبت تخلخل کنونی را تأمین می‌کند. بنابراین خط گذار فاز در فضای $q-p$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

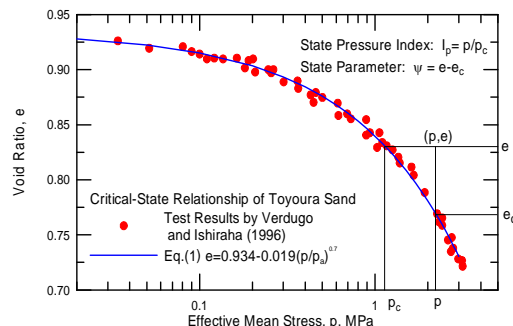
$$q = M_d p = (M_0 + (M - M_0) \frac{p}{p_c}) \quad (6)$$

مقدار p_c با استفاده از رابطه (۳) به دست می‌آید. بایستی توجه داشت که نسبت تخلخل e و p_c مربوط به آن در رابطه (۳) ثابت‌اند. شکل (۲) شکل یک خط گذار فاز را برای $e = 0.735$ و با پارامتر انتخابی $M_0 / M = 0.75$ و $M = 1/25$ نشان می‌دهد.

۴- حداکثر نسبت تنش بسیج شده

به طور تجربی نشان داده شده است که ماسه مترکم در بارگذاری برشی اتساع یافته و در نتیجه این اتساع نسبت تنش بزرگتری را نسبت به نسبت تنش حالت بحرانی از خود نشان می‌دهد. تعدادی روابط برای ارتباط بین نسبت تنش (و یا زاویه اصطکاک) حداکثر و نسبت تنش (و یا زاویه اصطکاک) بحرانی با اتساع ماسه ارائه شده است. برای ارتباط این رفتار با مدل ساطی برش سه محوری ماسه، وود و همکارانش نسبت تنش مجازی، M_b را پیشنهاد کردند [۱۲].

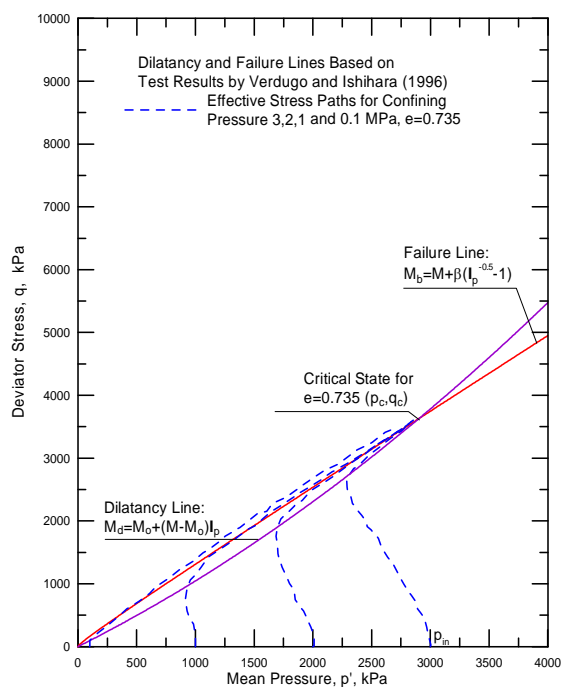
رابطه زیر برای تعریف M_b با استفاده از شاخص فشار استفاده می‌شود. با تعریف q_b و p_b به عنوان مختصات نقاط بر روی خط گسیختگی (حدی) به دست می‌آید:



شکل ۷-۱ خط حالت بحرانی ماسه Toyoura [۷]

۳- خط گذار فاز

شکل (۲) مسیر تنش مؤثر را در فضای $q-p$ در طی بارگذاری زهکشی نشده ماسه Toyoura نشان می‌دهد. این مسیرها از یک تنش همه جانبه اولیه، p_0 شروع شده و در حالت بحرانی (q_c, p_c) پایان می‌یابند. باید توجه داشت که تمامی این مسیرها برای نسبت تخلخل اولیه $e = 0.735$ که در شرایط زهکشی نشده برابر با e_c است، به دست آمده‌اند. محل تغییر جهت مسیرهای تنش نقاط تغییر فاز گفته می‌شود. مکان هندسی این نقاط که از $p=0$ شروع می‌شود برای نسبت تخلخل مربوطه خط گذار فاز را مشخص می‌کند. شکل (۲) خط گذار فاز را که به طور کلی خط راستی نیست، نشان می‌دهد. بنابراین خط گذار فاز برای هر نسبت تخلخل $e = e_c$ با استفاده از شرایط زهکشی نشده به دست می‌آید.



شکل ۷-۲ خط گذار فاز [۷]

همه‌جانبه، R_p مربوط به مسیر تنش پیش از گذار فاز که آن مقدار را R_{pa} نامیده می‌شود، مقدار تنش برشی متناظر با R_{pa} برای تمامی مسیرهای تنش تعیین می‌شود، این مقدار تنش برشی تعیین شده برای هر یک از مسیرهای تنش q_a نامیده می‌شود. نسبت تنش برشی به صورت نسبت تنش برشی کنونی به تنش برشی q_a تعریف می‌گردد:

$$R_s = \frac{q}{q_a} \quad (10)$$

که در آن q تنش برشی مربوط به R_p کنونی است.

۷- بررسی رفتار ماسه در چارچوب فضای $R_p - R_s$

برای تعریف اثر نسبت تخلخل و نیز اثر آن در میزان تأثیرگذاری تنش همه‌جانبه در مقاومت برشی خاک، نمودارهای $R_p - R_s$ و $\varepsilon_1 - R_p$ تعریف می‌شوند، همان‌طور که در شکل‌های (۳) و (۴) دیده می‌شود مسیر تنش با تغییر I_{p0} تغییر می‌کند و مسیرهای تنش مشخصی به دست می‌آید. مطابق شکل (۳- الف) در نمونه‌های متراکم با I_{p0} کوچکتر از یک، تحت بارگذاری، نمونه اندکی کرنش می‌یابد و تحت کرنش ابتدا کمی کاهش تنش همه‌جانبه را دارد، سپس به نقطه گذار فاز رسیده و در نقطه گذار فاز سرعت تغییر تنش همه‌جانبه صفر می‌شود و تنش همه‌جانبه بعد از گذار فاز افزایش یافته و با نزدیک شدن به حالت بحرانی سرعت افزایش تنش همه‌جانبه کاهش یافته و در حالت بحرانی به صفر می‌گراید.

$$\frac{q_b}{p_b} = M_b = M + \beta(I_p^{-1/2} - 1) \quad (7)$$

β یک پارامتر جدید است. در حالت بحرانی، $I_p = 1$ بوده بنابراین $M_b = M$ خواهد بود و برای $I_p < 1$ (ماسه متراکم و یا ماسه شل در فشار همه‌جانبه کم) $M_b > M$ است و در وضعیت $I_p > 1$ مقدار M_b به مقدار جزئی کمتر از M می‌گردد. این روابط در شکل (۲) با استفاده از مقدار ۰/۰۵ برای β نشان داده شده‌اند. خطوط گسیختگی مجازی بر اساس شیب سکانتی آن‌ها در رابطه (۷) به صورت زیر قابل تعریف‌اند:

$$q = M_b p = \left[M + \beta \left(\sqrt{\frac{p_c}{p}} - 1 \right) \right] p \quad (8)$$

۵- نسبت تنش همه‌جانبه

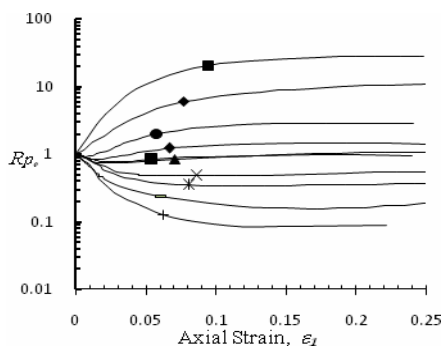
با توجه به اثر تنش همه‌جانبه اولیه در رفتار خاک، نسبت تنش همه‌جانبه به صورت نسبت تنش همه‌جانبه کنونی به تنش همه‌جانبه اولیه تعریف می‌شود:

$$R_p = \frac{p}{p_0} \quad (9)$$

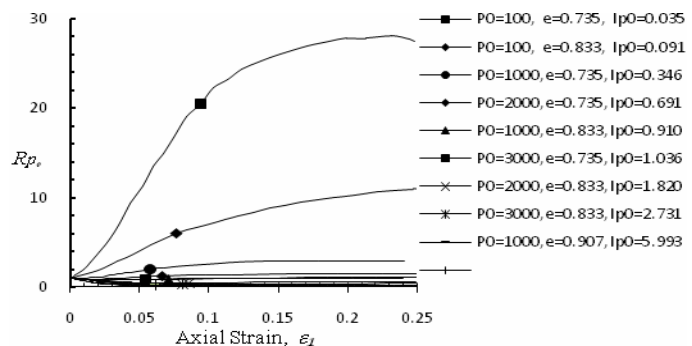
که p تنش همه‌جانبه کنونی و p_0 تنش همه‌جانبه اولیه در رابطه (۹) می‌باشد.

۶- نسبت تنش برشی

با توجه به این که در نسبت تخلخل ثابت مربوط به بارگذاری زهکشی نشده، مقاومت برشی ماسه تابع تنش همه‌جانبه است بنابراین با انتخاب مقدار دلخواه نسبت تنش



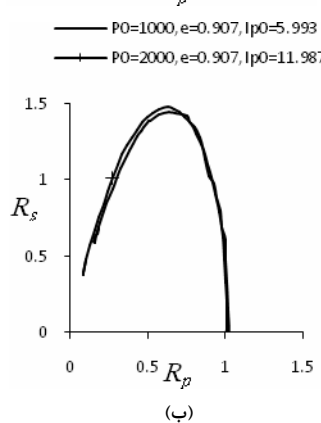
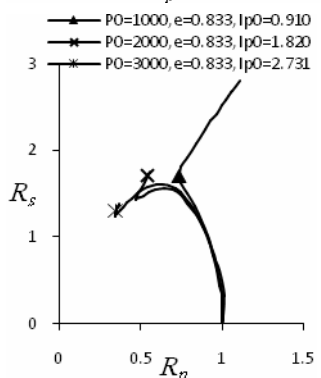
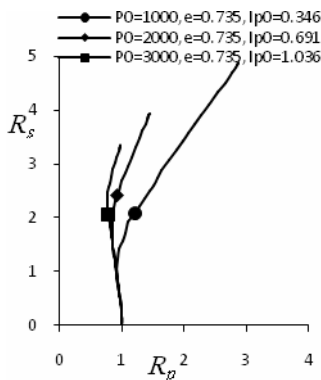
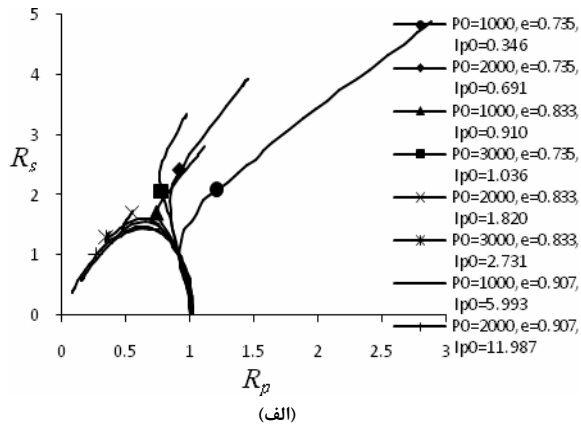
(ب)



(الف)

شکل ۳- مسیرهای کرنش محوری- نسبت تنش همه‌جانبه، $\varepsilon_1 - R_p$ (الف) اثر تخلخل در تأثیر تنش همه‌جانبه

(ب) تغییرات مسیر تنش با I_{p0}



شکل ۴- الف) مسیره‌های نسبت تنش همه‌جانبه- نسبت تنش برشی، $R_p - R_s$ (ب) مسیره‌های نسبت تنش همه‌جانبه- نسبت تنش برشی، $R_p - R_s$ برای نسبت تخلخل‌های ۰/۷۳۵، ۰/۸۳۳ و ۰/۹۰۷

با کاهش I_{p0} نمونه در کرنش‌های بسیار کمتر به گذار فاز می‌رسد و شدت افزایش تنش همه‌جانبه نیز به شدت افزایش می‌یابد. این رفتار ناشی از اثر تخلخل در تأثیر تنش همه‌جانبه می‌باشد.

در نمونه‌های با I_{p0} بزرگتر از یک نمونه تحت بارگذاری کرنش یافته و تحت کرنش کاهش تنش همه‌جانبه را دارد، سپس به نقطه گذار فاز رسیده و در نقطه گذار فاز سرعت تغییر تنش همه‌جانبه صفر می‌شود و تنش همه‌جانبه بعد از گذار فاز افزایش یافته و با سرعت افزایش تنش همه‌جانبه هموار که با سرعت کاهش نسبتاً ثابت همراه است، تا حالت بحرانی ادامه می‌دهد تا در حالت بحرانی به صفر گراید. در نمونه‌های با I_{p0} بزرگتر از یک با افزایش I_{p0} مسیره‌های کرنش- تنش همه‌جانبه به هم نزدیکتر می‌شوند زیرا با افزایش I_{p0} اثر تنش همه‌جانبه بر رفتار ماسه کاهش یافته و مسیره‌های تنش مشابه‌تر شده و به هم نزدیکتر می‌شوند همچنین همان‌طور که در شکل (۳-ب) نیز مشاهده می‌شود، مسیره‌های تنش کرنش را می‌توان به دو سری مجزای مسیره‌های تنش با شاخص فشار بزرگتر مساوی یک و مسیره‌های تنش با شاخص فشار کوچکتر از یک تقسیم کرد زیرا که مسیر تنش با شاخص فشار یک تحت کرنش ابتدا کمی کاهش تنش همه‌جانبه را دارد و پس از اندکی تغییر، مسیر نسبتاً یکنواختی را طی می‌کند که می‌تواند مرز رفتار حالت متراکم و شل در نظر گرفته شود.

در نمودارهای نشان داده شده در شکل (۴) نیز مشاهده می‌شود که با کاهش I_{p0} مقاومت برشی افزایش یافته و افزایش R_s در مسیره‌ها رخ می‌دهد. در مورد مسیره‌های تنش همه‌جانبه- تنش برشی نیز در نمونه‌های با I_{p0} کوچکتر از یک، تنش همه‌جانبه ابتدا کاهش می‌یابد تا به نقطه گذار فاز برسد و سپس تنش همه‌جانبه و تنش برشی رو به افزایش می‌گذارند. در نمونه‌های با I_{p0} بزرگتر از یک، تأثیر تنش همه‌جانبه به شدت کاهش یافته و مسیره‌های تنش به هم نزدیک می‌شوند به طوری که تمامی مسیره‌های تنش در 0.6376 تا 0.6485 R_p به تنش برشی حداکثر خود می‌رسند. با افزایش I_{p0} مسیره‌های تنش نیز به همدیگر نزدیکتر می‌شوند. نکته اصلی در مورد مسیره‌های تنش در رفتار کاملاً مشابه آن‌ها است به طوری که تمامی مسیره‌ها ابتدا با کاهش تنش همه‌جانبه همراه هستند تا این که به نقطه گذار فاز رسیده و بر روی خط حالت بحرانی قرار می‌گیرند و در پایان به حالت بحرانی می‌رسند.

۸- تعریف تحلیلی رفتار ماسه در چهارچوب فضای

$$R_p - R_s$$

رابطه بین نسبت تنش همه‌جانبه و کرنش محوری به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R_p = \begin{cases} 10^{(a_{p0} + b_{p0}(\log I_{p0})^1 + c_{p0}(\log I_{p0})^2 + d_{p0}(\log I_{p0})^3)}, & I_{p0} < 1 \\ 10^{(a_{p1} + b_{p1}(\log I_{p0})^1 + c_{p1}(\log I_{p0})^2 + d_{p1}(\log I_{p0})^3)}, & I_{p0} > 1 \end{cases} \quad (11)$$

در رابطه بالا $a_{p0}, b_{p0}, c_{p0}, d_{p0}$ ثابت‌های رابطه مربوط به حالت با شاخص فشار اولیه کوچکتر از یک و ثابت‌های رابطه مربوط به حالت با شاخص فشار اولیه بزرگتر مساوی یک می‌باشند که به صورت تابع کرنش تعریف می‌شوند. برای مسیرهای تنش $R_p - R_s$ از معادله درجه چهار به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$R_s = \begin{cases} -a_s + b_s * R_p^1 - c_s * R_p^2 + d_s * R_p^3 \\ -e_s * R_p^4, R_p \leq R_{pd} \\ M_b * R_p * p_0 / q_a, R_p > R_{pd} \end{cases} \quad (12)$$

R_{pd} مقدار نسبت تنش همه‌جانبه در لحظه رسیدن به خط گذار فاز است و در رابطه بالا a_s, b_s, c_s, d_s, e_s ثابت‌های رابطه می‌باشند که به صورت تابع نسبت تخلخل تعریف می‌شوند، با توجه به حدود محدود نسبت تخلخل با تعداد محدودی نتایج تجربی از دقت کافی برخوردار خواهند بود.

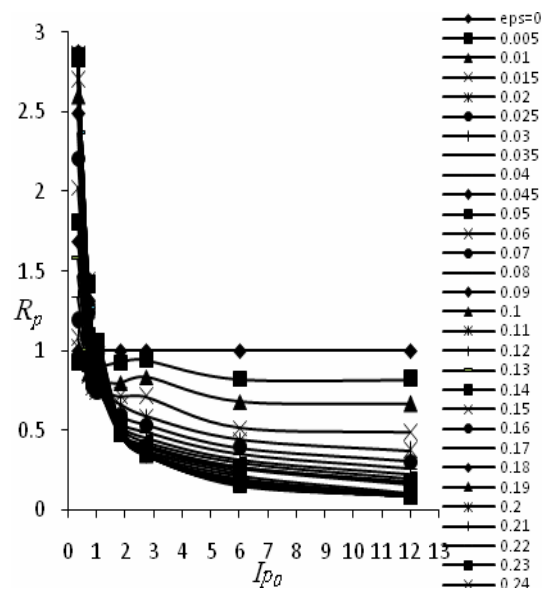
۹- تعریف ثابت‌های روابط پیشنهادی

ضرایب k_s و λ_s در مکانیک خاک تعریف شده بوده و محاسبات متناظر با خود را دارا هستند. با در دست داشتن نتایج آزمایش‌های سه محوری فشاری مقادیر ϵ, R_p و R_s مربوط به هر آزمایش بدست می‌آیند. هرچه تعداد آزمایش‌ها بیشتر باشد نتایج بدست آمده دقیق‌تر خواهد بود.

علاوه بر موارد اخیر، همان‌طور که در شکل (۴-ب) مشاهده می‌شود، مسیرهای تنش با نسبت تخلخل یکسان صرف نظر از تنش همه‌جانبه اولیه تماماً تا قبل از گذار فاز در یک پوش یکسان قرار دارند که این پوش مسیر تنش به صورت تابع نسبت تخلخل برای هر نسبت تخلخل به طور جداگانه به دست می‌آید. برای بیان اثر I_{p0} کالیبراسیونی بین مسیرهای تنش همه‌جانبه - کرنش و مسیرهای تنش برشی - تنش همه‌جانبه و تنش برشی - کرنش بر اساس I_{p0} صورت می‌گیرد.

برای بیان کمی اثر I_{p0} در تنش همه‌جانبه در طی کرنش، نمودار شاخص اندیس فشار - نسبت تنش همه‌جانبه، $I_{p0} - R_p$ تعریف می‌گردد به طوری که نسبت تنش همه‌جانبه مربوط به هر یک از مسیرها با I_{p0} متناظر برای کرنش‌های محوری ϵ_1 یکسان به دست می‌آید و منحنی‌های $I_{p0} - R_p$ برای کرنش‌های متناظر رسم می‌گردد. همان‌طور که در شکل (۵) به خوبی دیده می‌شود با افزایش کرنش، منحنی‌ها کشیده‌تر شده و باز هم تأثیر تنش همه‌جانبه در نمونه‌های متراکم ($I_{p0} < 1$) به سرعت افزایش می‌یابد و در نمونه‌های شل ($I_{p0} > 1$) به سرعت کاهش یافته و قابل اغماض می‌گردد.

برای بیان کمی اثر I_{p0} در تنش برشی در طی بارگذاری نمودار $R_p - R_s$ شاخص بسیار مناسبی می‌تواند باشد. همان‌طور که پیش از این نیز قید شد مسیرهای تنش کاملاً مشابه بوده و عامل مؤثر در کنترل رفتار آن‌ها شاخص فشار اولیه، I_{p0} و نسبت تخلخل است.



شکل ۵- مسیرهای شاخص اندیس فشار - نسبت تنش همه‌جانبه برای کرنش‌های محوری بین صفر تا ۰.۲۴،

$$I_{p0} - R_p$$

۱۰- محاسبات و شبیه‌سازی مدل

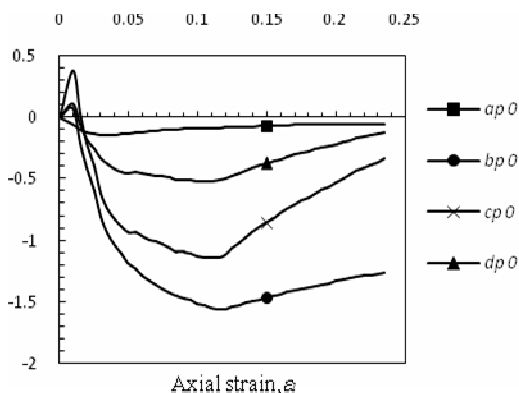
شبیه‌سازی مدل برای دو نوع ماسه متفاوت با بارگذاری‌های متفاوت صورت می‌پذیرد.

Ishihara و Verdugo [۱۰] آزمایش‌های سه محوری زهکشی نشده‌ای را در شرایط کنترل تنش بر روی ماسه Toyoura انجام دادند. سه سری آزمایش فشاری با بارگذاری یکنواخت زهکشی نشده تحت تنش‌های اولیه در رنج ۱۰۰ تا ۳۰۰۰ کیلوپاسکال انجام گرفت. برای هر یک از سری آزمایش‌ها نسبت تخلخل ثابتی بعد از تحکیم به دست آمد. نتایج آزمایش‌ها به ترتیب در شکل‌های (۱۵)، (۱۶) و (۱۷) برای نسبت تخلخل‌های ۰/۷۳۵، ۰/۸۳۳ و ۰/۹۰۷ نشان داده شده است.

Wang [۱۳] آزمایش‌های سه محوری زهکشی نشده‌ای را در شرایط کنترل کرنش بر روی ماسه UST انجام داد. آزمایش‌ها به صورت آزمایش فشاری با بارگذاری یکنواخت زهکشی نشده تحت تنش‌های اولیه در رنج ۱۰۰ تا ۸۰۰ کیلوپاسکال انجام گرفت. برای هر یک از سری آزمایش‌ها نسبت تخلخل ثابتی بعد از تحکیم به دست آمد. نتایج آزمایش‌ها در شکل (۱۸) به ترتیب برای نسبت تخلخل‌های ۰/۸۰۹۵ و ۰/۸۳۸۱، ۰/۸۵۵ و ۰/۷۹۴، ۰/۸۰۷۶ و ۲۰۰/۹۴ کیلوپاسکال نشان داده شده است.

پارامتر β و ثابت M برای تعیین نسبت تنش مجازی برای ماسه Toyoura به ترتیب ۰/۰۵ و ۱/۲۵ و برای ماسه UST ۰/۱۰۶۸ و ۱/۵ تعیین شد.

ضرایب $d_{p_0}, c_{p_0}, b_{p_0}, a_{p_0}$ ماسه Toyoura در شکل (۶)، ضرایب $d_{p_1}, c_{p_1}, b_{p_1}, a_{p_1}$ ماسه Toyoura در شکل (۷) و ضرایب $d_{p_0}, c_{p_0}, b_{p_0}, a_{p_0}$ ماسه UST در شکل (۸) ارائه شده است.



شکل ۶- ضرایب $d_{p_0}, c_{p_0}, b_{p_0}, a_{p_0}$ مربوط به رابطه (۱۱) ماسه Toyoura

۹-۱- تعیین ضرایب $d_{p_0}, c_{p_0}, b_{p_0}, a_{p_0}$ و d_{p_1}, c_{p_1}

با استفاده از داده‌های منحنی $I_{p_0} - R_{p_0}$ که در قسمت ۷ به آن اشاره شد مقادیر R_{p_0} برای کرنش‌های صفر تا ۰/۲۴ بدست می‌آید. با استفاده از رابطه (۱۱) مقدار عددی ضرایب $d_{p_0}, c_{p_0}, b_{p_0}, a_{p_0}$ برای هر یک از مسیرهای مربوط به سطح کرنش مربوطه و با شاخص فشار اولیه کوچکتر از یک تعیین می‌شود و به طور مشابه با استفاده از رابطه (۱۱) و داده‌های منحنی $I_{p_0} - R_{p_0}$ ، مقدار عددی ضرایب $d_{p_1}, c_{p_1}, b_{p_1}, a_{p_1}$ برای هر یک از مسیرهای مربوط به سطح کرنش مربوطه و با شاخص فشار اولیه بزرگتر از یک تعیین می‌شود.

۹-۲- تعیین ضرایب e_s, d_s, c_s, b_s, a_s

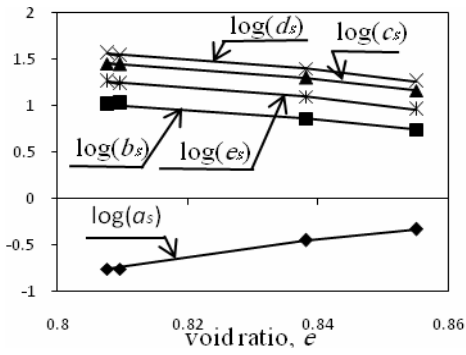
با استفاده از داده‌های منحنی $R_p - R_s$ مقادیر ثابت‌های برازش شده منحنی درجه چهار رابطه (۱۲) برای نسبت تخلخل‌های مربوطه و حداکثر تنش همه‌جانبه اولیه، ۳۰۰۰ کیلو پاسکال به دست می‌آیند. با در دست داشتن ضرایب و نسبت تخلخل مربوطه منحنی‌های تابع نسبت تخلخل به صورت $e - \log e_s$ و $e - \log d_s$ و $e - \log c_s$ و $e - \log b_s$ و $e - \log a_s$ ترسیم می‌گردد. در حین کاربرد مقدار عددی e_s, d_s, c_s, b_s, a_s برای هر یک از نسبت تخلخل مربوطه تعیین می‌شود.

۹-۳- تعیین تنش برشی q_a

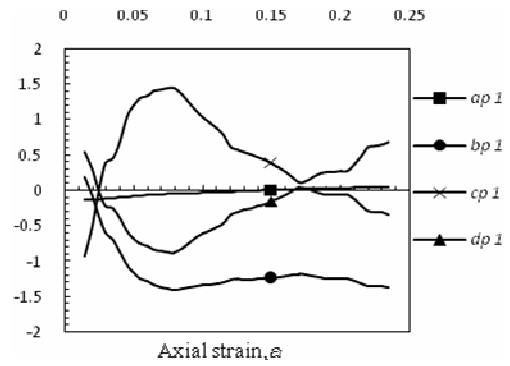
تنش برشی q_a برای تمامی مسیرهای تنش برای یک مقدار یکسان نسبت تنش همه‌جانبه، R_{p_a} تعیین می‌شود و با توجه به تأثیر تنش همه‌جانبه و نسبت تخلخل در مقدار q_a منحنی $q_a / (p_0^k e)$ برای تعیین مقدار q_a برای هر یک از مسیرهای تنش استفاده می‌شود.

۹-۴- تعیین نسبت تنش همه‌جانبه R_{p_d}

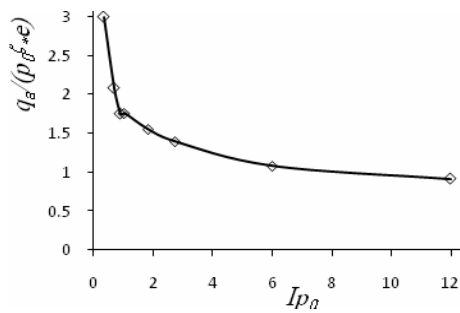
نسبت تنش همه‌جانبه در لحظه رسیدن به خط گذار فاز به صورت تابعی از شاخص فشار اولیه تعریف می‌شود. منحنی R_{p_d} برای تعیین مقدار p_d برای هر یک از مسیرهای تنش استفاده می‌شود.



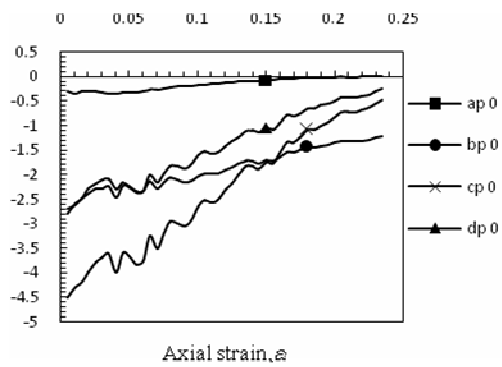
شکل ۱۰- ضرایب تابع نسبت تخلخل، ماسه UST



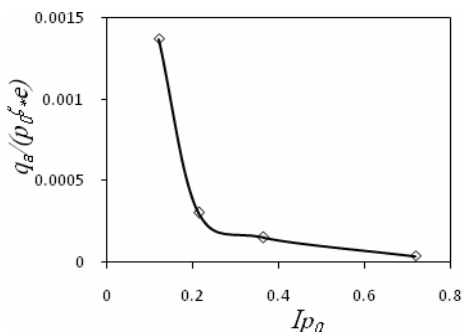
شکل ۷- ضرایب $d_{p1}, c_{p1}, b_{p1}, a_{p1}$ مربوط به رابطه (۱۱) ماسه Toyoura



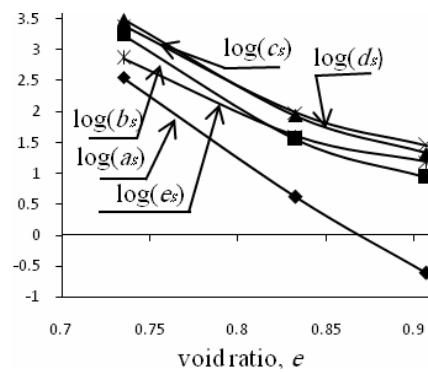
شکل ۱۱- منحنی $q_a / (p_0^\zeta e) - I_{p0}$ ماسه Toyoura، $\zeta = 0.843$



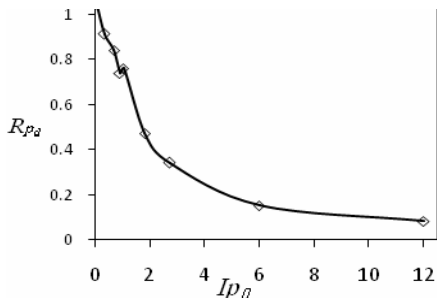
شکل ۸- ضرایب $d_{p0}, c_{p0}, b_{p0}, a_{p0}$ مربوط به رابطه (۱۱) ماسه UST



شکل ۱۲- منحنی $q_a / (p_0^\zeta e) - I_{p0}$ ماسه UST، $\zeta = 2.453$

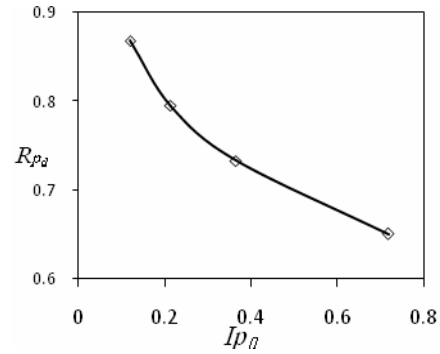
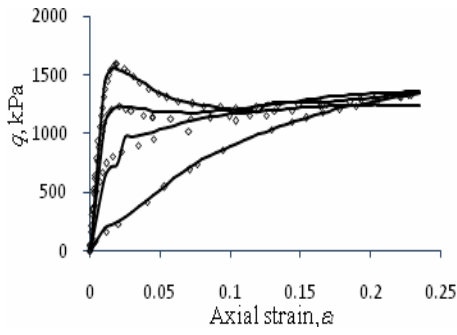


شکل ۹- ضرایب تابع نسبت تخلخل، ماسه Toyoura

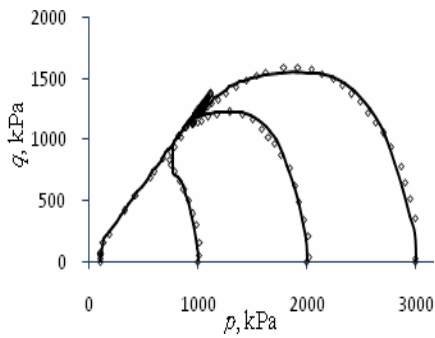


شکل ۱۳- رابطه بین نسبت تنش همه جانبه در لحظه رسیدن به خط حالت بحرانی با شاخص فشار اولیه، ماسه Toyoura

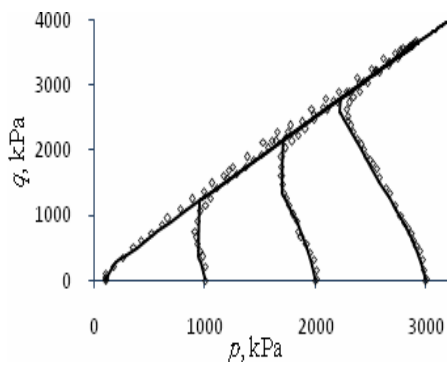
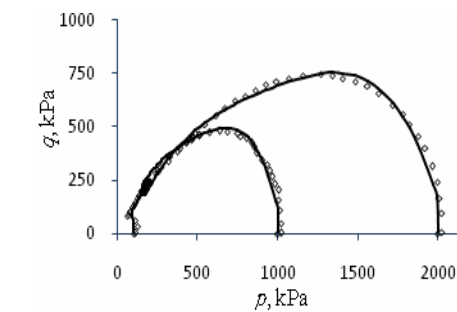
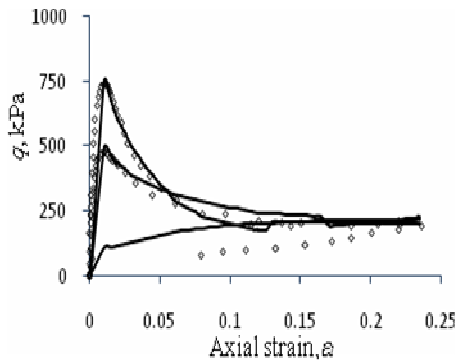
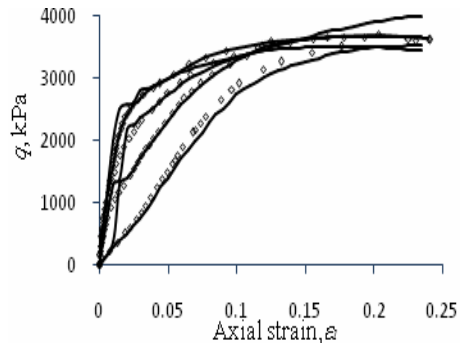
ضرایب a_s, d_s, c_s, b_s, e_s ماسه Toyoura در شکل (۹) و ماسه UST در شکل (۱۰) ارائه شده است. منحنی $q_a / (p_0^\zeta e) - I_{p0}$ ماسه Toyoura در شکل (۱۱) و ماسه UST در شکل (۱۲) ارائه شده است. منحنی R_{p_d} برای تعیین مقدار p_d ماسه Toyoura در شکل (۱۳) و ماسه UST در شکل (۱۴) ارائه شده است.



شکل ۱۴- رابطه بین نسبت تنش همه جانبه در لحظه رسیدن به خط حالت بحرانی با شاخص فشار اولیه، ماسه UST



شکل ۱۶- مقایسه مدل شبیه سازی شده با نتایج آزمایش سه محوری فشاری ماسه Toyoura بر روی نمونه تراکم متوسط با نسبت تخلخل $e=0.833$



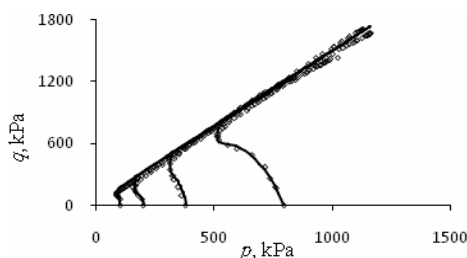
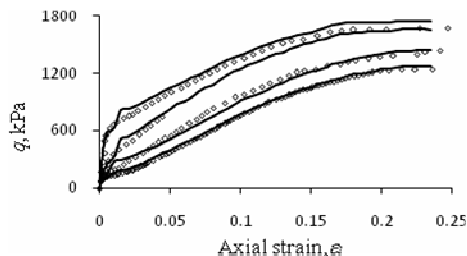
شکل ۱۵- مقایسه مدل شبیه سازی شده با نتایج آزمایش سه محوری فشاری ماسه Toyoura بر روی نمونه تراکم با نسبت تخلخل $e=0.735$ (Verdugo and Ishihara 1996)

شکل ۱۷- مقایسه مدل شبیه سازی شده با نتایج آزمایش سه محوری فشاری ماسه Toyoura بر روی نمونه سست با نسبت تخلخل $e=0.907$

همه‌جانبه به کار می‌رود و در فضای نسبت تنش همه‌جانبه ابتدایی - نسبت تنش برشی ابتدایی نیز I_{p0} به عنوان شاخص مؤثر در تعریف تأثیر تابع دانسیته تنش همه‌جانبه به کار رفته و رفتار نرم شونده و سخت‌شونده ماسه و رابطه بین تنش برشی و تنش همه‌جانبه به گونه‌ای تعریف می‌شود که دربر گیرنده مسیرهای تنش به صورت یک مسیر پارامتریک و واحد است.

۱۲- مراجع

- [1] Zhang, G., Zhang, J. M., "Simplified Method of Stability Evaluation for Strain-Softening Slopes", Mechanics Research Communications, 2007, 34, 444-50.
- [2] Lashkari, A., "On the Modeling of the State Dependency of Granular Soils", J. Computers and Geotechnics, 2009, 36, 1237-1245.
- [۳] لطیفی نمین، م، لشکری، ع، "اثر پارامتر حالت در بهبود پیش‌بینی مدل‌های الاستوپلاستیک برای خاک‌های دانه‌ای"، نشریه دانشکده فنی، ۱۳۸۳، ۳۸، ۲۶۹-۲۸۰.
- [4] Ishihara, K., Tatsuoka, F., Yasuda, S., "Undrained Deformation and Liquefaction of Sand under Cyclic Stress", J. Soils and Foundations, 1975, 15 (1), 29-44.
- [5] Castro, G., "Liquefaction of Sands", Harv. Soil Mech., 81, Harvard Univ. 1969, Cambridge, Mass.
- [6] Castro, G., Poulos, S. J., "Factors Affecting Liquefaction and Cyclic Mobility", Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, Division ASCE, 1977, 103 (6), 501-06.
- [7] Wang, Z. L., Dafalias, Y. F., Li, X. S., Makdisi, F. I., "State Pressure Index for Modeling Sand Behavior", Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, Division ASCE, 2002, 128 (6), 511-19.
- [8] Yang, J., Li, X. S., "State-dependent Strength of Sands from the Perspective of Unified Modeling", Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, Division ASCE, 2004, 130 (2), 186-98.
- [9] Cubrinovki, M., Ishihara, K., "State Concept and Modified Elastoplasticity for Sand Modeling", Soils and Foundations, 1998, 38 (4), 213-225.
- [10] Verdugo, R., Ishihara, K., "The Steady State of Sandy Soils", Soils and Foundations, 1996, 36 (2), 81-91.
- [11] Li, X. S., Dafalias, Y. F., Wang, Z. L., "State-Dependent Dilatancy in Critical-State



شکل ۱۸- مقایسه مدل شبیه‌سازی شده با نتایج آزمایش سه محوری فشاری ماسه UST بر روی نمونه متراکم تا تراکم متوسط [۱۳]

۱۱- بحث و نتیجه‌گیری

با وجود تعریف فضای نسبت تنش همه‌جانبه - کرنش محوری، $R_p - \epsilon_1$ و فضای نسبت تنش همه‌جانبه - نسبت تنش برشی، $R_s - R_p$ فقط برای بارگذاری زهکشی نشده یکنواخت، فضاهای تعریف شده امکان تعریف رفتار ماسه را به صورت یک نمونه خاک با پارامترهای یکسان برای بارگذاری زهکشی نشده را فراهم می‌آورد. همچنین فضای نسبت تنش همه‌جانبه ابتدایی - نسبت تنش برشی ابتدایی تمامی حالات رفتار خاک را در تمامی محدوده‌های تنش و دانسیته‌های مختلف دربر گرفته و رفتار نرم شونده و سخت‌شونده ماسه را در یک چهارچوب و ساختار یکسان تعریف می‌کند. ولی فضای نسبت تنش همه‌جانبه - کرنش محوری، $R_{p0} - \epsilon_1$ با وجود تعریف مناسب از پاسخ اتساعی و انقباضی ماسه در حین بارگذاری امکان تعریف همزمان رفتار نرم شونده ماسه شل و رفتار سخت‌شونده ماسه متراکم را ندارد و نیازمند تعریف پارامترهای مجزا است.

توانایی تعریف رفتار ماسه با اعمال اثر تنش همه‌جانبه و دانسیته با استفاده از چهار پارامتر حالت تعریف شده در این مقاله امکان تعریف رفتار ماسه را در تمامی محدوده‌های تنش و نسبت تخلخل شل تا متراکم فراهم می‌آورد. در فضای کرنش - نسبت تنش همه‌جانبه، رفتار ماسه در حین کرنش با رابطه بین کرنش و تنش همه‌جانبه به خوبی تعریف می‌شود به طوری که I_{p0} به عنوان شاخص مؤثر در تعریف تأثیر تابع دانسیته تنش

- [13] Wang, Y., "Characterization of dilative shear failure in sand", PhD Thesis, The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, 1997.
- [12] Wood, M., Belkheir K., D. M., Liu, D. F., "Strain softening and state parameters for sand modeling", *Geotechnique*, 1994, 44 (2), 335-339.
- Constitutive Modeling of Sand", *Canadian Geotechnical Journal*, 1999, 36 (2), 599-611.