

ارزیابی رفتار ماسه‌ی زهکشی‌نشده با استفاده از پارامتر حالت

توحید اخلاقی* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

نسرین وفايي (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه امیرکبیر

هوشنگ کاتبی (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

مهندسی عمران شریف، (تابستان ۱۳۹۴)
دوره‌ی ۲ - ۳۱، شماره‌ی ۲/۲، ص. ۱۷-۲۶

مطالعات تجربی نشان داده‌اند که رفتار خاک‌های دانه‌یی از نسبت تخلخل و تنش همه‌جانبه‌ی تحکیم اولیه تأثیر می‌پذیرند. بنابراین لزوم تدوین روابطی برای تعریف تأثیر آنها در رفتار ماسه در چگالی‌ها، تنش‌های همه‌جانبه و برشی مختلف دیده می‌شود. در این نوشتار با معرفی ۴ پارامتر حالت: نسبت تنش همه‌جانبه، نسبت تنش همه‌جانبه‌ی ابتدایی، نسبت تنش برشی ابتدایی و شاخص فشار اولیه، دو فضای تنش جدید جهت تعریف رفتار ماسه تحت بارگذاری زهکشی‌نشده و یکنواخت در تمامی محدوده‌های تنش همه‌جانبه و چگالی پیشنهاد و دو رابطه بر اساس این فضاها ارائه شده است. در ادامه، با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی دیگر پژوهشگران، تمامی مسیرهای تنش و مسیریهای تنش - کرنش برای وضعیت‌های مختلف ماسه از حالت‌های شل تا متراکم تحت بارگذاری زهکشی‌نشده و یکنواخت شبیه‌سازی شده است. در نهایت، جهت صحت‌سنجی روابط پیشنهادی، نتایج حاصل با داده‌های آزمایشگاهی مربوط به آزمایش‌های سه محوری زهکشی‌نشده فشاری مقایسه و مورد بحث و ارزیابی قرار گرفته‌اند.

واژگان کلیدی: ماسه، پارامتر حالت، نسبت تنش، حالت بحرانی، آزمایش زهکشی‌نشده‌ی یکنواخت.

۱. مقدمه

را نقطه‌ی ابتدایی حالت گسیختگی نامیده و در این کار پژوهشی معرفی و به آن پرداخته‌ایم.

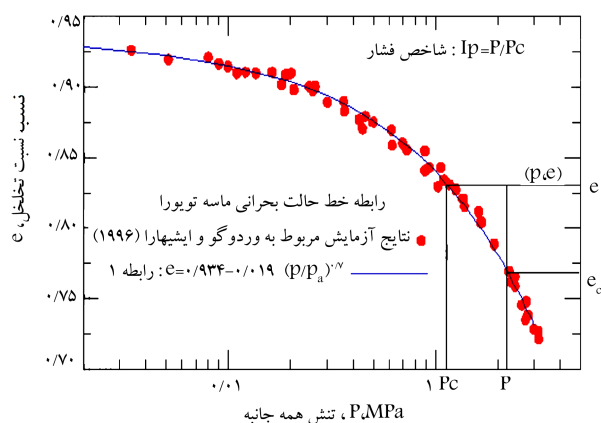
این تذکر لازم است که ارزیابی رفتار ماسه در آزمایشگاه به طور مشخص وابستگی تأثیر تنش همه‌جانبه را به چگالی نشان می‌دهد. برای مثال ماسه‌ی شل در بارگذاری زهکشی‌نشده‌ی یکنواخت و تحت تنش‌های همه‌جانبه‌ی مختلف رفتار یکسانی از خود نشان می‌دهد، در حالی که تغییرات تنش همه‌جانبه در رفتار ماسه‌ی متراکم تأثیر بارزی دارد؛ به طوری که با افزایش تنش همه‌جانبه، ماسه رفتار انقباضی‌تر پیدا می‌کند. به‌طور کلی میزان تأثیر تنش همه‌جانبه در رفتار ماسه از حالت خیلی شل تا خیلی متراکم از تأثیر قابل اغماض تا تأثیر بسیار زیاد تغییر می‌کند. در حالی که مدل‌های معمول ماسه، این تأثیرات را مد نظر قرار نداده‌اند.^[۱] برای اعمال اثر چگالی و تنش همه‌جانبه و نیز تأثیر چگالی در اثر تنش همه‌جانبه می‌توان از مفهوم «پارامتر حالت» بهره برد.^[۱] مزیت استفاده از مفهوم حالت در مدل‌کردن رفتار ماسه مربوط به توانایی آن در کمی‌کردن تأثیر ترکیبی چگالی و تنش همه‌جانبه در رفتار ماسه است. مفهوم پارامتر حالت راه حلی منطقی برای در بردگرفتن این عوامل در مدل‌کردن رفتار ماسه ارائه می‌دهد و در نتیجه، ساختار

ارزیابی رفتار خاک‌های دانه‌یی تحت برش، اهمیت خاصی در مهندسی ژئوتکنیک دارد. چگالی و تنش همه‌جانبه‌ی اولیه دو عامل مهم و مؤثر در رفتار خاک‌های ماسه‌یی هستند. معمولاً ماسه‌ی شل رفتار انقباضی و ماسه‌ی متراکم رفتار اتساعی دارند.^[۳-۱] و به وضعیت تنشی که رفتار خاک از رفتار انقباضی به اتساعی تغییر می‌کند، نقطه‌ی گذار فاز گفته می‌شود.^[۵-۲] به‌علاوه هر نوع ماسه، چه در حالت شل و چه در حالت 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 با عنوان حالت بحرانی شناخته می‌شود، با استفاده از یک مجموعه‌ی نسبت تخلخل بحرانی و تنش همه‌جانبه و برشی بحرانی به صورت سه‌بعدی تعریف می‌شود.^[۱۰-۶] همچنین در رفتار ماسه در هر دو حالت متراکم و شل، نسبت تنش برشی به تنش همه‌جانبه در یک محدوده پیش از رسیدن به حالت بحرانی تقریباً مقدار ثابتی به خود می‌گیرد. نقطه‌ی شروع این وضعیت اهمیت خاصی دارد و از آنجایی که این نقطه بر روی خط گسیختگی ماسه جای دارد، ما آن

* نویسنده مستقر

تاریخ: دریافت ۱۳۹۱/۱۲/۱۹، اصلاحیه ۱۳۹۲/۱۰/۱۶، پذیرش ۱۳۹۲/۱۱/۲.

takhlaghi@tabrizu.ac.ir
nasrin.vafaei@aut.ac.ir,
kat ebi@tabrizu.ac.ir



شکل ۱. خط حالت بحرانی ماسه‌ی توپورا. [۷]

۳. شاخص فشار

وَنگ و همکارانش (۲۰۰۲) نیز ترکیبی از تنش هم‌جانبه‌ی کنونی و تنش هم‌جانبه‌ی بحرانی را معرفی کرده و از ارتباط بین تنش هم‌جانبه‌ی حالت بحرانی (p_c) و تنش هم‌جانبه‌ی مؤثر کنونی (p) استفاده و شاخص فشار را به صورت رابطه‌ی ۲ تعریف کرده‌اند: [۸]

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

تنش هم‌جانبه‌ی مؤثر تحکیم اولیه (p_0) و چگالی اولیه (با نسبت تخلخل اولیه (e_0)) نقش مهمی در تعیین رفتار ماسه دارد. [۱۵] از میان خطوط مشابه، تنش هم‌جانبه‌ی مؤثر اولیه پس از تحکیم (p_0) می‌تواند به تنش حالت بحرانی، p_c با رابطه‌ی p_0/p_c مرتبط شود. این رابطه برای تعریف کثی رفتار زهکشی‌نشده‌ی ماسه براساس حالت اولیه‌ی آن استفاده و شاخص فشار اولیه به صورت رابطه‌ی ۳ تعریف می‌شود:

$$I_{p_0} = \frac{p_0}{p_c} \quad (3)$$

همچنین شاخص فشار اولیه، خود شاخص مناسبی برای بیان اثر نسبت تخلخل در تأثیر تنش هم‌جانبه است. تنش مؤثر حالت بحرانی (p_c) براساس نسبت تخلخل کنونی (e) و با استفاده از خط حالت بحرانی به دست می‌آید. اگر برای تعریف خط حالت بحرانی از رابطه‌ی ۱ استفاده کنیم، تنش مؤثر حالت بحرانی برای بارگذاری زهکشی‌نشده از رابطه‌ی ۴ به دست می‌آید:

$$p_c = p_a \left(\frac{e_0 - e}{\lambda_s} \right)^{1/\xi} \quad (4)$$

رابطه‌ی بین I_p, e_c, p_c, e, p در شکل ۱ نشان داده شده است. در حالت زهکشی‌نشده به دلیل ثابت بودن e مقدار p_c نیز ثابت است.

۴. نقطه‌ی ابتدایی حالت گسیختگی

در رفتار ماسه در هر دو حالت متراکم و شل، نسبت تنش برشی به تنش هم‌جانبه در یک محدوده‌ی پیش از رسیدن به حالت بحرانی تقریباً مقدار ثابتی به خود می‌گیرد که در مورد ماسه‌ی شل، نقطه‌ی شروع این رفتار بر نقطه‌ی گذار فاز منطبق

تئوریک منطقی‌تری ارائه می‌کند. [۱۲] 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 که وَنگ و همکارانش (۲۰۰۲) ارائه کرده‌اند. [۱۳]

براساس بررسی‌های انجام‌شده در این مطالعه، به‌طور کلی تمامی مسیرهای تنش یک نوع ماسه در تمامی محدوده‌های تنش هم‌جانبه و چگالی در فضای تنش هم‌جانبه و تنش برشی و کرنش ($p - q - \varepsilon$) مشابه هم هستند، از این رو رفتار ماسه تحت بارگذاری برشی در فضاهای جدید با استفاده از پارامترهای حالت به صورت مسیرهای واحد پارامتری قابل تعریف می‌شود. در این مطالعه سه پارامتر جدید حالت برای رسیدن به چنان روابطی معرفی می‌شوند که عبارت‌اند از: نسبت تنش هم‌جانبه (R_{p_c})، نسبت تنش هم‌جانبه‌ی ابتدایی (R_{p_e})، و نسبت تنش برشی ابتدایی (R_{s_e}) که جدید است و در این مطالعه ارائه شده‌اند و همچنین از شاخص فشار (I_p) پارامتر حالت اندیس فشار معرفی‌شده‌ی وَنگ و همکارانش (۲۰۰۲)، [۱۳] نیز استفاده شده است.

براساس مطالعات پژوهشگران مختلف مشخص شده است که در تعریف رفتار ماسه، عوامل مؤثر در مقاومت برشی آن شامل: نسبت تخلخل، تنش هم‌جانبه و اثر نسبت تخلخل بر تأثیر ناشی از تنش هم‌جانبه است که تنش هم‌جانبه‌ی اولیه در مورد رفتار زهکشی‌نشده‌ی خاک اهمیت خاصی پیدا می‌کند. [۹، ۱۳، ۱۴] پیش از این مهندسان ژئوتکنیک ابتدا فضای تنش برشی - تنش محوری ($\tau - \sigma$) و بعداً فضای تنش برشی - تنش هم‌جانبه ($q - p$) را برای تعریف اثر مقاومتی تنش هم‌جانبه و اثر تخریبی تنش برشی ارائه کرده‌اند. [۱۶، ۱۵، ۱۳] در ادامه، پژوهشگران دیگری از فضای نسبت تنش برشی - تنش هم‌جانبه ($r - p$) برای تعریف مجزای تغییرات کرنش ناشی از تنش هم‌جانبه و نسبت تنش برشی استفاده کرده‌اند. [۱۷]

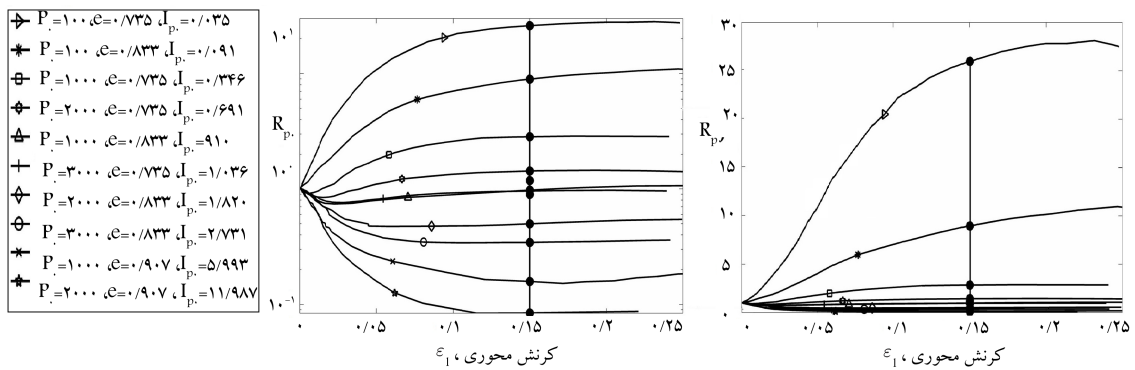
در این مطالعه، فضای جدید $\varepsilon - R_{p_c}$ برای تعریف و تدوین رابطه‌ی بین تنش هم‌جانبه با کرنش و فضای $R_{s_e} - R_{p_e}$ برای ارتباط مابین تنش برشی با تنش هم‌جانبه و کرنش معرفی شده است. همچنین از نتایج داده‌های آزمایش‌های آزمایشگاهی ماسه‌ی توپورا به‌عنوان داده‌های مرجع جهت بررسی نتایج حاصل از روابط ارائه‌شده استفاده شده است. این آزمایش‌ها توسط وردگو و ایشهارا (۱۹۹۶) به صورت سری آزمایش‌های سه محوری زهکشی‌نشده بر روی ماسه‌ی توپورا انجام شده‌اند. [۱۳]

۲. خط حالت بحرانی ماسه

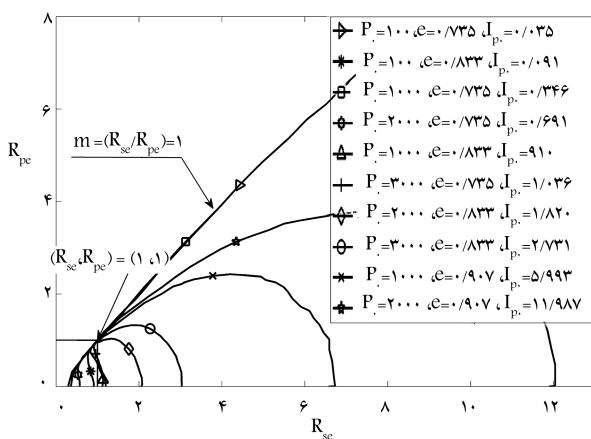
خط حالت بحرانی یا دائمی ماسه به صورت مکان هندسی نقاطی است که به حالت بحرانی رسیده‌اند و در فضای نسبت تخلخل - تنش نرمال مؤثر ($e - p$) تعریف می‌شود. لی و همکارانش (۱۹۹۹) [۱۴] نشان داده‌اند که خط حالت بحرانی به صورت رابطه‌ی ۱ قابل تعریف است:

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

که در آن e_0 مقدار نسبت تخلخل در $p = 0$ و p_a فشار اتمسفریک و λ_s و ξ ثابت‌های رابطه هستند. داده‌های آزمایش ماسه‌ی توپورا و نمودار برازش‌شده در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۲. مسیرهای کرنش محوری - نسبت تنش هم‌جانبه $(\epsilon_1 - R_{p_e})$.



شکل ۳. مسیرهای نسبت تنش هم‌جانبه‌ی ابتدایی - نسبت تنش برشی ابتدایی $R_{p_e} - R_{s_e}$.

مطابق شکل ۲، در نمونه‌های متراکم ($I_p < 1$) تحت بارگذاری، نمونه‌ها اندکی کرنش را تجربه کرده و تحت کرنش، ابتدا کمی کاهش تنش هم‌جانبه صورت گرفته و سپس به نقطه‌ی گذار فاز رسیده و در نقطه‌ی گذار فاز، سرعت تغییر تنش هم‌جانبه صفر می‌شود. تنش هم‌جانبه بعد از گذار فاز افزایش می‌یابد و با نزدیک شدن به حالت بحرانی، سرعت افزایش تنش هم‌جانبه کاهش و در حالت بحرانی به صفر گرایش پیدا می‌کند. با کاهش I_p ، نمونه در کرنش‌های بسیار کمتر به گذار فاز می‌رسد و سرعت افزایش تنش هم‌جانبه نیز به شدت افزایش می‌یابد. این رفتار ناشی از اثر تخلخل در تأثیر تنش هم‌جانبه است. در نمونه‌های شل ($I_p > 1$)، نمونه‌ها تحت بارگذاری کرنش می‌یابند و تحت کرنش، کاهش تنش هم‌جانبه اتفاق می‌افتد و سپس به نقطه‌ی گذار فاز می‌رسند. در نقطه‌ی گذار فاز سرعت تغییر تنش هم‌جانبه صفر می‌شود و تنش هم‌جانبه بعد از نقطه‌ی گذار فاز افزایش می‌یابد و با سرعت افزایش تنش هم‌جانبه‌ی هموار، که با سرعت تغییر تنش هم‌جانبه‌ی کاهشی نسبتاً ثابت همراه است، تا حالت بحرانی ادامه می‌یابد تا در حالت بحرانی به مقدار صفر برسد. در نمونه‌های شل ($I_p > 1$) با افزایش I_p مسیرهای کرنش - نسبت تنش هم‌جانبه به هم نزدیک‌تر می‌شوند، زیرا با افزایش I_p اثر تنش هم‌جانبه در رفتار ماسه کاهش می‌یابد و مشابهت مسیرهای تنش بیشتر می‌شود و به هم نزدیک‌تر می‌شوند، به علاوه همان‌طور که در شکل ۲ نیز مشاهده می‌شود، مسیرهای تنش کرنش را می‌توان به دو سری مجرای مسیرهای تنش با شاخص فشار بزرگ‌تر یا مساوی ۱ و مسیرهای تنش با شاخص فشار کوچک‌تر از ۱ تقسیم‌بندی کرد، زیرا که مسیر تنش با شاخص فشار ۱ تحت کرنش، ابتدا کمی کاهش تنش هم‌جانبه

بوده است و در ماسه‌ی متراکم پس از گذار فاز رخ می‌دهد. نقطه‌ی مربوط به ترکیب تنش هم‌جانبه و برشی (p_{f_e}, q_{f_e}) ، که این وضعیت شروع می‌شود، اهمیت خاصی دارد و از آنجایی که این نقطه بر روی خط گسیختگی ماسه جای دارد، لذا آن را نقطه‌ی ابتدایی حالت گسیختگی می‌نامیم و در این کار پژوهشی از آن در تعریف نسبت‌های تنش مربوط استفاده خواهیم کرد.

۵. نسبت‌های تنش

نسبت تنش هم‌جانبه (R_{p_e}) : با توجه به اثر تنش هم‌جانبه‌ی اولیه در رفتار خاک، نسبت تنش هم‌جانبه به صورت نسبت تنش هم‌جانبه‌ی کنونی (p) به تنش هم‌جانبه‌ی اولیه (p_0) مطابق رابطه‌ی ۵ تعریف می‌شود:

$$R_{p_e} = \frac{p}{p_0} \quad (5)$$

نسبت تنش هم‌جانبه‌ی ابتدایی (R_{p_e}) : نسبت تنش هم‌جانبه‌ی ابتدایی به صورت نسبت تنش هم‌جانبه‌ی کنونی (p) به تنش هم‌جانبه‌ی نقطه‌ی ابتدایی حالت گسیختگی (p_{f_e}) مطابق رابطه‌ی ۶ تعریف می‌شود:

$$R_{p_e} = \frac{p}{p_{f_e}} \quad (6)$$

نسبت تنش برشی ابتدایی (R_{s_e}) : این نسبت عبارت است از نسبت تنش برشی کنونی (q) به تنش برشی نقطه‌ی ابتدایی حالت گسیختگی (q_{f_e}) ، که از رابطه‌ی ۷ به دست می‌آید:

$$R_{s_e} = \frac{q}{q_{f_e}} \quad (7)$$

۶. بررسی رفتار ماسه

۱.۶. بررسی رفتار ماسه در فضای $R_{p_e} - \epsilon_1$ و $R_{p_e} - R_{s_e}$

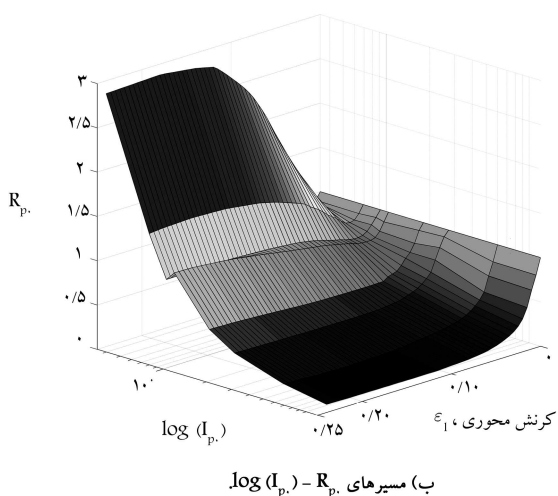
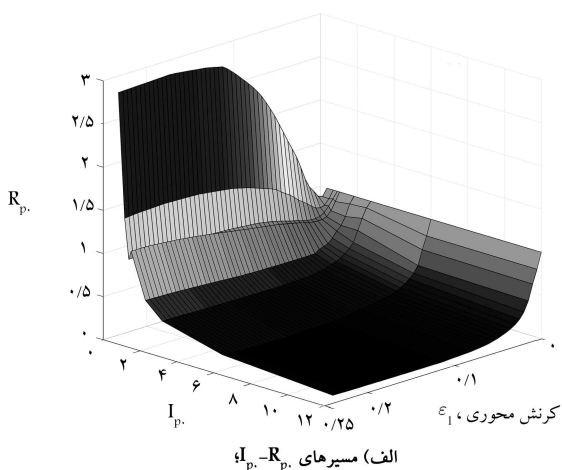
به منظور بررسی اثر نسبت تخلخل و نیز لحاظ کردن تأثیر آن در میزان اثرگذاری تنش هم‌جانبه در مقاومت برشی خاک، نمودارهای $R_{p_e} - \epsilon_1$ و $R_{p_e} - R_{s_e}$ را تعریف می‌کنیم، نمودارهای تغییرات آنها به ازاء مقادیر مختلف I_p, e, p_0 در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در شکل‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود، مسیر تنش با تغییر I_p تغییر پیدا می‌کند و مسیرهای تنش مشخصی به دست می‌آید.

دارد و پس از اندکی تغییر، مسیر نسبتاً یکنواختی را طی می‌کند، که می‌توان آن را مرز تفکیک رفتار حالت متراکم و شل در نظر گرفت.

از نمودار تغییرات $R_{pe} - R_{se}$ در شکل ۳ مشاهده می‌شود که رفتار نرم‌شونده و سخت‌شونده‌ی ماسه در چهارچوب فضای نسبت تنش همه‌جانبه‌ی ابتدایی - نسبت تنش برشی ابتدایی به خوبی قابل تعریف می‌شود؛ به طوری که با افزایش (I_p) و کاهش تراکم در حالت شل، ماسه مسیر طولانی‌تری را طی می‌کند. در حالت شل در طی بارگذاری با کاهش تنش همه‌جانبه، تنش برشی افزایش می‌یابد تا اینکه تنش برشی به مقدار بیشینه‌ی خود می‌رسد و پس از آن تنش برشی نیز همراه با تنش همه‌جانبه رو به کاهش می‌گذارد، تا اینکه به نقطه‌ی گذار فاز می‌رسد. از آنجایی که در ماسه‌ی شل، نقطه‌ی گذار فاز و نقطه‌ی ابتدایی حالت گسیختگی بر هم منطبق هستند، لذا نسبت تنش برشی ابتدایی و نسبت تنش همه‌جانبه‌ی ابتدایی به مقدار ۱ می‌رسد و با شیب ثابت ۱، مسیر نسبت تنش همه‌جانبه‌ی ابتدایی - نسبت تنش برشی ابتدایی ادامه و همچنان افزایش می‌یابد تا به حالت بحرانی برسد.

در مورد حالت متراکم ($I_p < 1$) در طی بارگذاری، تنش برشی به طور پیوسته افزایش می‌یابد و تنش همه‌جانبه نیز ابتدا اندکی تا گذار فاز کاهش و پس از آن افزایش پیدا می‌کند. سپس در طی بارگذاری به نقطه‌ی ابتدایی حالت گسیختگی می‌رسد و نسبت تنش برشی ابتدایی و نسبت تنش همه‌جانبه‌ی ابتدایی به مقدار ۱ می‌رسند و با شیب ثابت ۱ مسیر نسبت تنش همه‌جانبه‌ی ابتدایی - نسبت تنش برشی ابتدایی ادامه و افزایش می‌یابد تا به حالت بحرانی برسد. در نمونه‌های بسیار متراکم حتی کاهش تنش همه‌جانبه نیز رخ نداده و از ابتدا با افزایش تنش همه‌جانبه همراه بوده است. باید توجه داشت که هر قدر ماسه متراکم‌تر باشد، فاصله‌ی نقطه‌ی گذار فاز تا نقطه‌ی ابتدایی حالت گسیختگی بیشتر خواهد بود.

برای بیان کمی تأثیر (I_p) در رفتار ماسه، کالیبراسیونی بین مسیرهای کرنش محوری - نسبت تنش همه‌جانبه و کالیبراسیونی بین مسیرهای نسبت تنش همه‌جانبه‌ی ابتدایی - نسبت تنش برشی ابتدایی براساس به این شرح انجام شده است:



شکل ۴. مسیرهای $I_p - R_{pe}$ در فضای $\epsilon_1 - R_{pe} - I_p$ برای سطح کرنش ۰.۲۵-۰.

در حالی که در نمونه‌های شل از آغاز بارگذاری تا رسیدن به مقدار نسبت تنش برشی ابتدایی بیشینه (R_{se}) افزایش می‌یابد و پس از آن R_{se} تا رسیدن به نقطه‌ی ابتدایی حالت گسیختگی رو به کاهش می‌گذارد. این رفتار ناهمگون نسبت تنش برشی ابتدایی امکان کالیبراسیون مستقیم و ساده را از آن صلب می‌کند، بنابراین ما از مسیرهای شعاعی با شیب m استفاده می‌کنیم که امکان ارتباط R_{pe} به R_{se} را (با رابطه‌ی $R_{se} = m * R_{pe}$) فراهم می‌کند و نیز R_{se} را به تأثیر کمی I_p بر روی تنش همه‌جانبه ارتباط می‌دهد و در نتیجه R_{se} را به طور کمی به I_p مرتبط می‌سازد.

مسیرهای شعاعی به صورت خطوط شعاعی که از مرکز مختصات با شیب m ($m = 0 \sim 1$) در فضای $R_{pe} - R_{se}$ تعیین می‌شوند، تعریف شده‌اند (شکل ۵).

همان‌طور که از این شکل پیداست، رفتار نمونه‌ها براساس I_p آنها تغییر می‌کند و نسبت تنش همه‌جانبه‌ی ابتدایی و نسبت تنش برشی ابتدایی متفاوتی برای هر نمونه به دست می‌آید. برای مثال در شیب $m = 0.3$ هر نمونه یک مقدار مشخص نقطه‌ی تنش (R_{pe}, R_{se}) را دارد، که این نقاط تنش با دایره‌های کوچک توپر در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. این امر می‌تواند نشان‌گر تعریف مسیر جدیدی متشکل از I_p و نسبت تنش همه‌جانبه‌ی اولیه مربوط به شیب $m = 0.3$ در

۲.۶. رفتار ماسه در فضای $\epsilon_1 - R_{pe} - I_p$ و

$$m - (R_{se}/m) - (\exp(I_p))^{-0.5}$$

همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، رفتار نمونه‌ها براساس (I_p) آنها تغییر کرده و نسبت تنش همه‌جانبه‌ی متفاوتی برای هر نمونه به دست آمده است. برای مثال در کرنش $\epsilon_1 = 0.15$ ، هر نمونه مقداری مشخص از نسبت تنش همه‌جانبه را دارد، این مطلب نشان می‌دهد که می‌توان مسیر جدیدی متشکل از (I_p) و نسبت تنش همه‌جانبه‌ی مربوط به کرنش ۰.۱۵ در فضای $\epsilon_1 - R_{pe} - I_p$ را تعریف کرد. به طور مشابه مسیرهای $I_p - R_{pe}$ در یک سطح کرنش مشخص نیز با تعیین نسبت‌های تنش همه‌جانبه‌ی آن سطح کرنش برای تمامی مقادیر I_p و ترسیم مسیر مربوط به دست می‌آید. رویه‌ی $\epsilon_1 - R_{pe} - I_p$ در دو وضعیت I_p و $\log(I_p)$ در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۴ الف مشاهده می‌شود، با افزایش سطح کرنش مسیرهای $I_p - R_{pe}$ کشیده‌تر می‌شود و تأثیر تنش همه‌جانبه در نمونه‌های متراکم ($I_p < 1$) به سرعت افزایش می‌یابد، ولیکن در نمونه‌های شل ($I_p > 1$) به سرعت کاهش می‌یابد و قابل اغماض می‌شود.

در طی بارگذاری در محدوده‌ی آغاز بارگذاری تا نقطه‌ی ابتدایی حالت گسیختگی در نمونه‌های متراکم، نسبت تنش برشی ابتدایی (R_{se}) به طور پیوسته افزایش می‌یابد،

شکل ۱ به مقدار ثابت ۱ به شکل $(R_{se}/m) - (\exp(I_p))^{-0.5}$ به صورت یک خط با مقدار ثابت ۱ به شکل $R_{se} = 1$ برای تمامی نمونه‌ها با حالت‌های شل تا متراکم می‌رسد. پس از رسیدن به نقطه ابتدایی حالت گسیختگی، شیب مسیرهای تنش تغییر نمی‌کند و تا حالت بحرانی به صورت خط راست ($m = 1$) ادامه می‌یابد.

۳.۶. تعریف تحلیلی رفتار ماسه در فضای $R_{pe}, R_{se} - R_{pe}$

دو عامل مؤثر در تعیین نسبت تنش همه‌جانبه عبارت‌اند از: ۱. سطح کرنش، ۲. حالت اولیه که با پارامتر حالت I_p اعمال می‌شود. ارتباط نسبت تنش همه‌جانبه و کرنش در شکل ۲ نشان داده شده است، که مطابق آن مسیرهای تنش - کرنش در فضای نیمه لگاریتمی بر حسب لگاریتم نسبت تنش همه‌جانبه $\log R_{pe}$ و کرنش محوری ε_1 تعریف شده است، که نشان‌دهنده‌ی ارتباط تنش همه‌جانبه با کرنش به صورت توانی است.

همچنین در شکل ۴ مشاهده می‌شود که با اعمال اثر I_p در فضای جدید $\log I_p - R_{pe} - \varepsilon_1$ می‌توان مسیرهای همواری برای $\log I_p - R_{pe}$ به دست آورد. بنابراین ارتباط نسبت تنش همه‌جانبه با I_p را می‌توان به صورت لگاریتم I_p تعریف کرد.

با توجه به دو عامل فوق و ارتباط آنها با نسبت تنش همه‌جانبه، رابطه‌ی تعیین نسبت تنش همه‌جانبه باید به صورت ضرایب تابع کرنش و تابع $\log I_p$ مطابق رابطه‌ی ۸ تعریف شود:

$$R_{pe} = \begin{cases} 1 \cdot (a_{p_1} + b_{p_1} (\log I_p)^1 + c_{p_1} (\log I_p)^2 + d_{p_1} (\log I_p)^3), & I_p < 1 \\ 1 \cdot (a_{p_1} + b_{p_1} (\log I_p)^1 + c_{p_1} (\log I_p)^2 + d_{p_1} (\log I_p)^3), & I_p \geq 1 \end{cases} \quad (8)$$

که در آن، $a_{p_1}, b_{p_1}, c_{p_1}, d_{p_1}$ ثابت‌های رابطه مربوط به حالت با شاخص فشار اولیه‌ی کوچک‌تر از ۱ و $a_{p_1}, b_{p_1}, c_{p_1}, d_{p_1}$ ثابت‌های رابطه‌ی مربوط به حالت با شاخص فشار اولیه‌ی بزرگ‌تر یا مساوی ۱ هستند، که به صورت تابع کرنش تعریف می‌شوند.

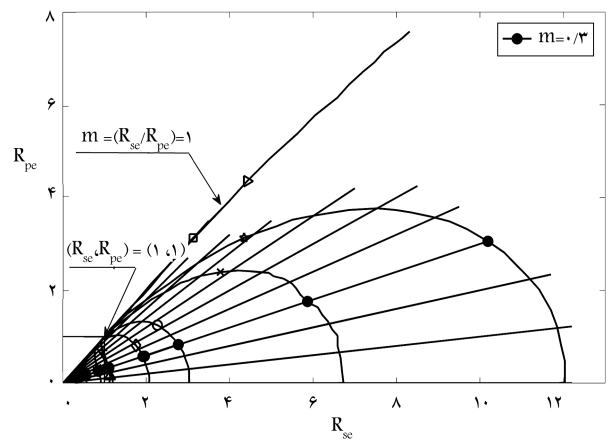
همان‌طور که در بخش پیشین در مسیرهای شعاعی بر حسب شیب بین صفر تا ۱ در شکل ۵ نشان داده شده است، با تغییر شیب m هر یک از مسیرها بر حسب I_p مربوط، مقادیر نسبت تنش همه‌جانبه‌ی اولیه و نسبت تنش برشی اولیه‌ی مربوط به آن مسیر را می‌توان بر حسب $R_{se} = mR_{pe}$ ارائه کرد. لذا از یک طرف رابطه‌ی تنش همه‌جانبه‌ی اولیه با شیب m به صورت ضرایب تابع شیب m قابل بیان است و از طرف دیگر، رابطه‌ی نسبت تنش برشی اولیه به طور غیرمستقیم از طریق رابطه‌ی آن با نسبت تنش همه‌جانبه‌ی اولیه با این ضرایب برقرار می‌شود.

با توجه به شکل ۷ مشاهده می‌شود که مناسب‌ترین رابطه برای معادل کردن این مسیرها، بر حسب $(\exp(I_p))^{-0.5}$ و ضرایبی بر حسب شیب m به صورت رابطه‌ی ۹ قابل بیان است:

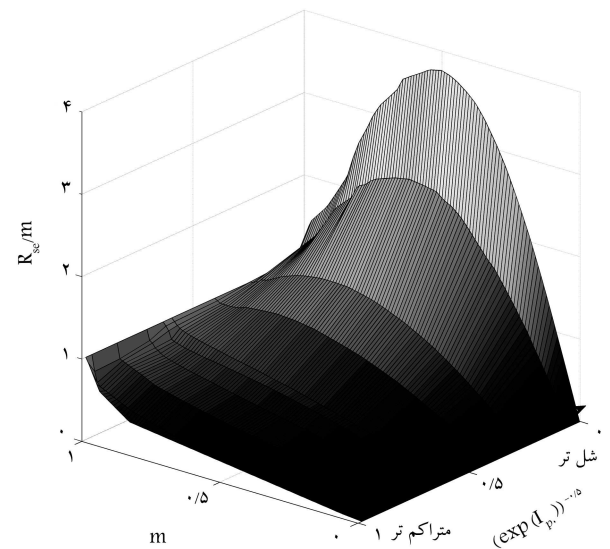
$$R_{pe} = a_s * (b_s)^{(\exp(I_p))^{-0.5}} * (\exp(I_p))^{-0.5c_s} \quad (9)$$

که در آن، a_s, b_s, c_s ثابت‌های رابطه هستند که به صورت تابع شیب مسیرهای شعاعی (m) تعریف می‌شوند. با محاسبه‌ی R_{pe} با استفاده از شیب مسیر شعاعی مربوطه m مقدار R_{se} نیز به صورت رابطه‌ی ۱۰ به دست می‌آید:

$$R_{se} = m * R_{pe} \quad (10)$$



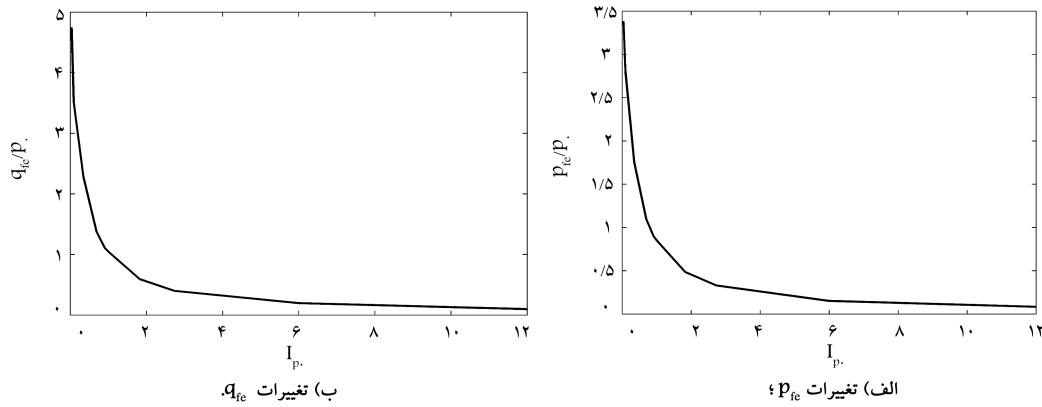
شکل ۵. مسیرهای شعاعی با شیب m از صفر تا ۱ در فضای نسبت تنش همه‌جانبه‌ی ابتدایی - تنش برشی ابتدایی.



شکل ۶. مسیرهای $(R_{se}/m) - (\exp(I_p))^{-0.5}$ در فضای $(\exp(I_p))^{-0.5} - (R_{se}/m) - m$ برای شیب شعاعی m صفر تا ۱.

فضای $(\exp(I_p))^{-0.5} - (R_{se}/m) - m$ باشد. به طور مشابه مسیرهای $(\exp(I_p))^{-0.5} - (R_{se}/m)$ را می‌توان به ازای مقدار شیب دیگری از m با تعیین نسبت‌های تنش همه‌جانبه‌ی ابتدایی آن مقدار شیب m و برای تمامی مقادیر I_p به دست آورد.

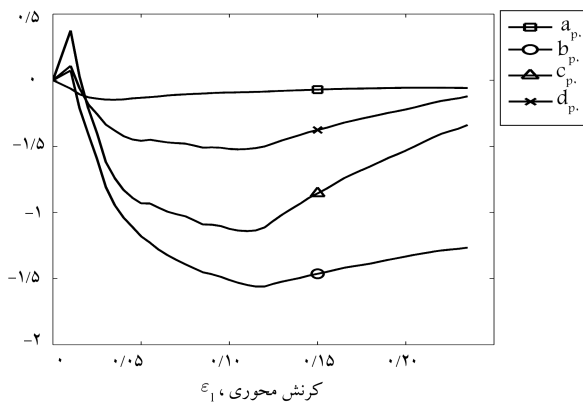
رویه‌ی $(\exp(I_p))^{-0.5} - (R_{se}/m) - m$ در شکل ۶ نشان داده شده است، که با توجه به شکل مذکور ملاحظه می‌شود که در طی بارگذاری با افزایش شیب m ، مسیرهای $(\exp(I_p))^{-0.5} - (R_{se}/m)$ کشیده‌تر می‌شوند و اثر چگالی در تنش برشی در نمونه‌های شل ($I_p > 1$) به سرعت بیشتر می‌شود. در حالی که در حالت متراکم ($I_p < 1$) آن‌چنان تأثیر مهمی ندارد و قابل صرف‌نظر کردن است. این اثر فزاینده‌ی چگالی در تنش برشی در نمونه‌های شل تا رسیدن شل‌ترین نمونه به بیشینه‌ی تنش برشی ادامه می‌یابد و پس از آن مسیرهای تنش $(\exp(I_p))^{-0.5} - (R_{se}/m)$ به تدریج ملایم‌تر می‌شوند و اثر چگالی در تنش برشی در نمونه‌های شل رو به کاهش می‌گذارد، تا اینکه در نقطه‌ی ابتدایی حالت گسیختگی، که با شیب $m = 1$ مشخص می‌شود، مسیر تنش



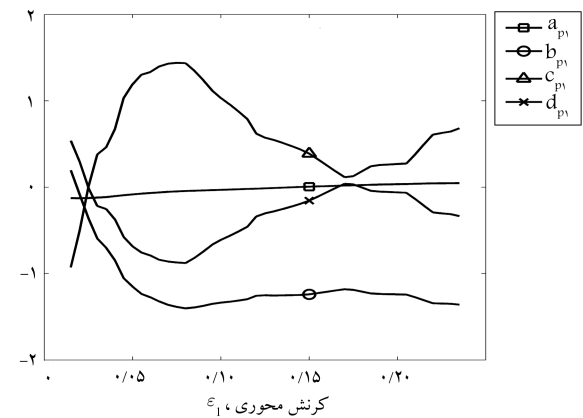
شکل ۷. نمودار تنش مربوط به نقطه‌ی تنش ابتدایی حالت گسیختگی.

۴.۶. تعریف ثابت‌های روابط پیشنهادی

همان‌طور که در بخش مقدمه نیز ذکر شد، در این مطالعه از نتایج داده‌های آزمایش‌های آزمایشگاهی ماسه‌ی توپورا به‌عنوان داده‌های مرجع استفاده شده است. این آزمایش‌ها توسط وردگو و ایشهارا (۱۹۹۶) به‌صورت سری آزمایش‌های سه محوری زهکشی‌نشده بر روی ماسه‌ی توپورا انجام شده‌اند. ضرایب λ_s , ξ در مکانیک خاک تعریف شده‌اند و محاسبات متناظر با خود را دارند. این پارامترها همان ثابت‌های رابطه‌ی خط حالت بحرانی هستند. برای ماسه‌ی توپورا از نتایج آزمایشگاهی وردگو و ایشهارا (۱۹۹۶)، مقادیر λ_s , ξ به ترتیب ۰/۷ و ۰/۱۹ به‌دست آمده‌اند. تنش مربوط به نقطه‌ی گسیختگی اولیه (p_{fs} , q_{fe}) نیز به‌صورت تابعی از شاخص فشار اولیه ترسیم شده است، که در شکل ۷ مشاهده می‌شود.



شکل ۸. نمودار تغییرات ضرایب a_{p_0} , b_{p_0} , c_{p_0} , d_{p_0} بر حسب کرنش محوری.



شکل ۹. نمودار تغییرات ضرایب a_{p_1} , b_{p_1} , c_{p_1} , d_{p_1} بر حسب کرنش محوری.

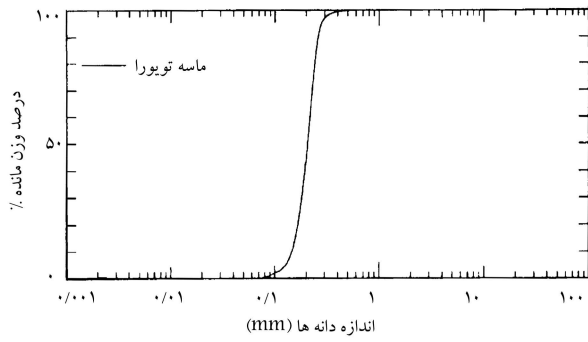
۴.۶.۲. تعیین ضرایب a_s , b_s , c_s

با استفاده از داده‌های منحنی $I_{p_0} - R_{p_0}$ می‌توان مقادیر R_{p_0} را برای مسیرهای شعاعی با شیب 0° تا 1° و نیز به کمک رابطه‌ی ۹ می‌توان مقادیر عددی ضرایب a_s , b_s , c_s را برای هر یک از مسیرهای مربوط به مسیر شعاعی با شیب مشخص تعیین کرد. لذا با در دست داشتن ضرایب مذکور، منحنی تابع شیب مسیرهای شعاعی (شکل ۱۰) مشابه شکل ۵ ترسیم شده است.

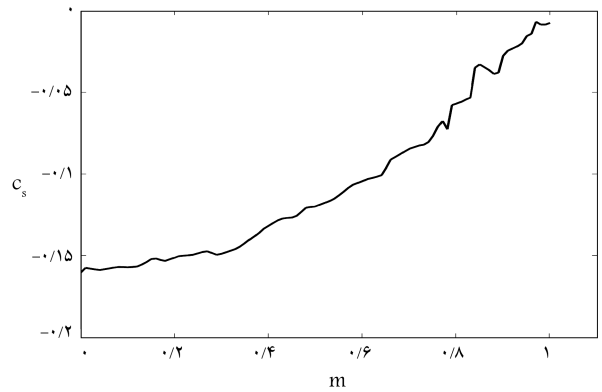
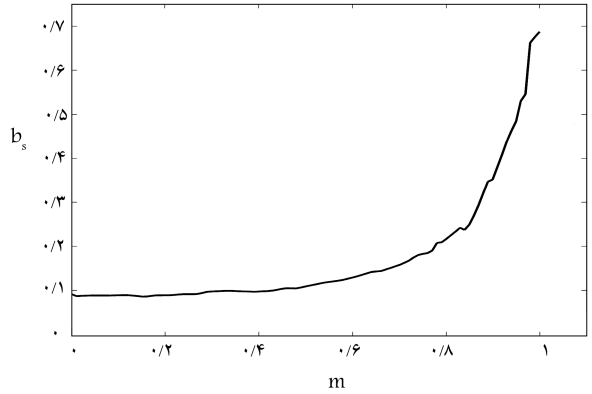
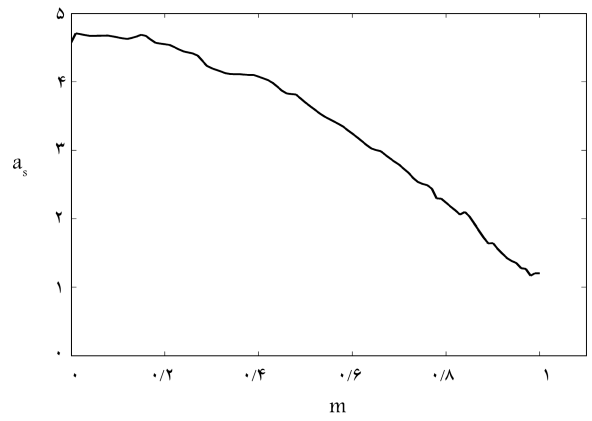
۴.۶.۱. تعیین ضرایب a_{p_0} , b_{p_0} , c_{p_0} , d_{p_0} و a_{p_1} , b_{p_1} , c_{p_1} , d_{p_1}

با در دست داشتن نتایج تنش هم‌جانبه (p) و کرنش محوری (ϵ_1) مربوط به آزمایش‌های سه محوری فشاری و با تقسیم تنش هم‌جانبه در طی هر آزمایش به تنش هم‌جانبه‌ی اولیه‌ی آن آزمایش، مقادیر $R_{p_0} = p/p_0$ مربوط به هر آزمایش به‌دست آمده است و لذا براساس آنها منحنی‌های $I_{p_0} - R_{p_0}$ ترسیم شده‌اند. شاخص فشار اولیه‌ی I_{p_0} برای هر آزمایش با استفاده از رابطه‌های ۱ و ۳ محاسبه شده است. براساس مقدار شاخص فشار اولیه، آزمایش‌ها به دو دسته‌ی آزمایش‌های با شاخص فشار کوچک‌تر از ۱ (نمونه‌های متراکم) و آزمایش‌های با شاخص فشار بزرگ‌تر یا مساوی ۱ (نمونه‌های شل) تقسیم شده‌اند.

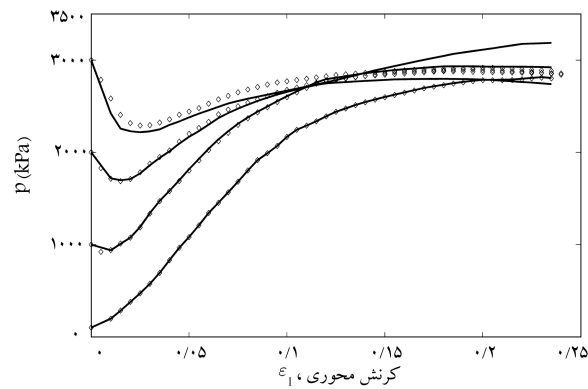
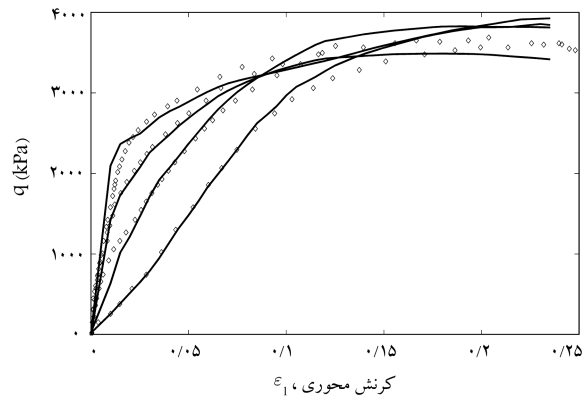
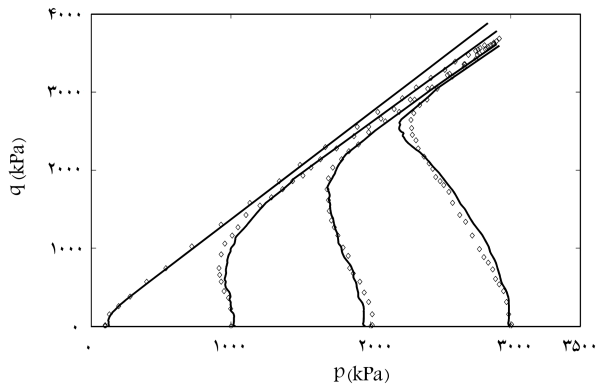
در ادامه، داده‌های منحنی‌های $I_{p_0} - R_{p_0}$ با استفاده از منحنی‌های $I_{p_1} - R_{p_1}$ مشابه آنچه در بخش ۲.۶. به آن اشاره شده است، به‌طور مجزا برای دو دسته‌ی آزمایش‌های با شاخص فشار کوچک‌تر از ۱ (نمونه‌های متراکم) و آزمایش‌های با شاخص فشار بزرگ‌تر یا مساوی ۱ (نمونه‌های شل) به‌دست آمده‌اند. با استفاده از آن دسته از منحنی‌های $I_{p_0} - R_{p_0}$ مربوط به نمونه‌های متراکم و برای کرنش‌های صفر تا ۲۵٪ و با استفاده از رابطه‌ی ۸، مقدار عددی ضرایب a_{p_0} , b_{p_0} , c_{p_0} , d_{p_0} برای هر یک از مسیرهای مربوط به شاخص فشار اولیه‌ی بزرگ‌تر یا مساوی ۱ تعیین شده است. با در دست داشتن این ضرایب، منحنی‌های تغییرات آنها بر حسب کرنش محوری ترسیم شده‌اند (شکل‌های ۸ و ۹).



شکل ۱۱. منحنی دانه بندی ماسه‌ی توپورا. [۱۴]



شکل ۱۰. منحنی تغییرات ضرایب a_s , b_s , c_s بر حسب شیب.



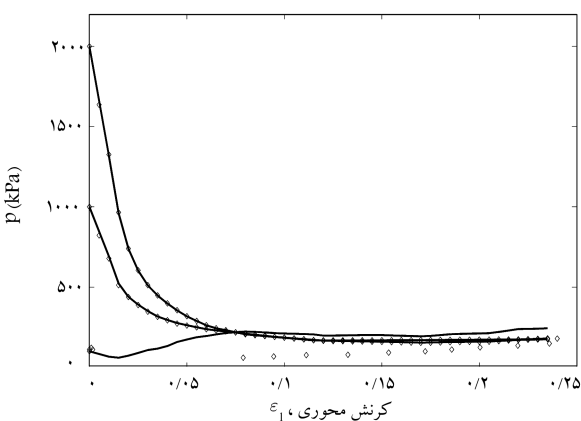
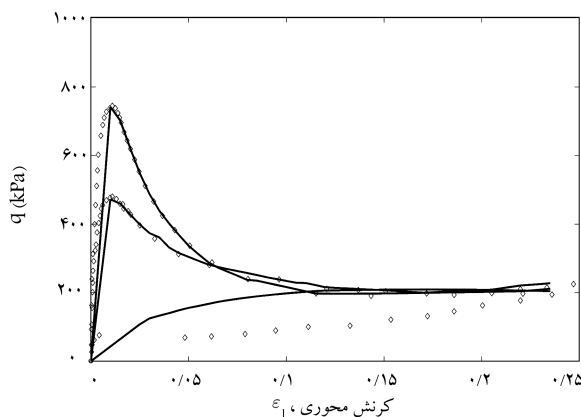
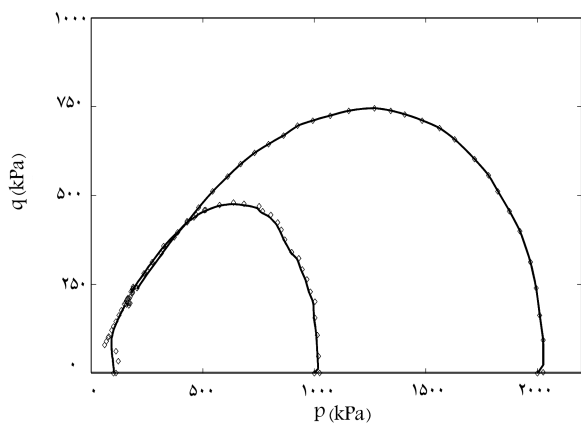
شکل ۱۲. مقایسه‌ی مدل شبیه‌سازی شده با نتایج آزمایش سه‌محوری فشاری ماسه‌ی توپورا بر روی نمونه‌ی متراکم با نسبت تخلخل $e = 0.735$ (وردگو و ایشهارا، ۱۹۹۶).

۷. نتایج و بحث شبیه‌سازی مدل

در این مطالعه از نتایج داده‌های آزمایش ماسه‌ی توپورا به عنوان مرجع جهت شبیه‌سازی مدل پیشنهادی این پژوهش استفاده شده است. همان‌طور که قبلاً بیان شد، وردگو و ایشهارا (۱۹۹۶) سری آزمایش‌های سه‌محوری زهکشی نشده‌ی را بر روی ماسه‌ی توپورا انجام داده‌اند. منحنی دانه‌بندی و مشخصات ماسه‌ی توپورا به ترتیب در شکل ۱۱ و جدول ۱ ارائه شده است. سه سری آزمایش زهکشی نشده‌ی یک‌نواخت فشاری تحت تنش تحکیم در محدوده‌ی ۱۰۰ تا ۳۰۰۰ کیلو پاسکال انجام شده است. برای هر سری از آزمایش‌ها نسبت تخلخل ثابتی بعد از زهکشی به دست آمده است. نتایج آزمایشگاهی پژوهشگران مذکور با نقاط منقطع و نتایج محاسباتی این پژوهش با خط ممتد در شکل‌های ۱۲ الی ۱۴ برای نسبت تخلخل‌های 0.735 ،

جدول ۱. مشخصات ماسه‌ی توپورا.

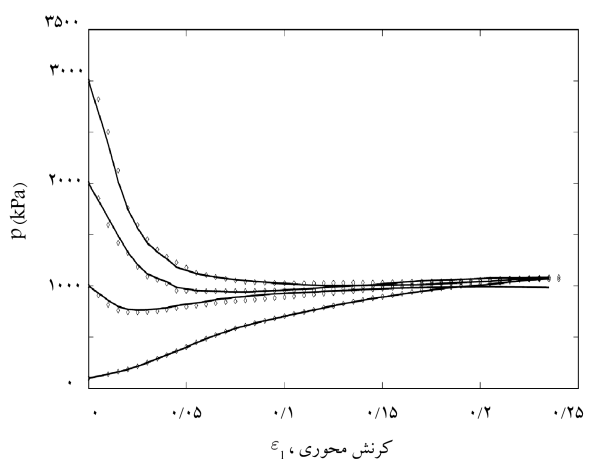
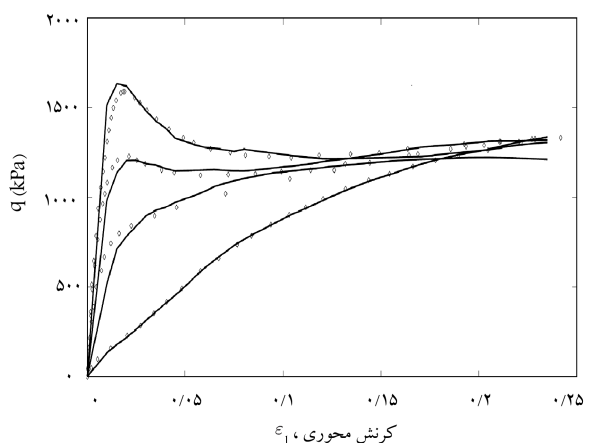
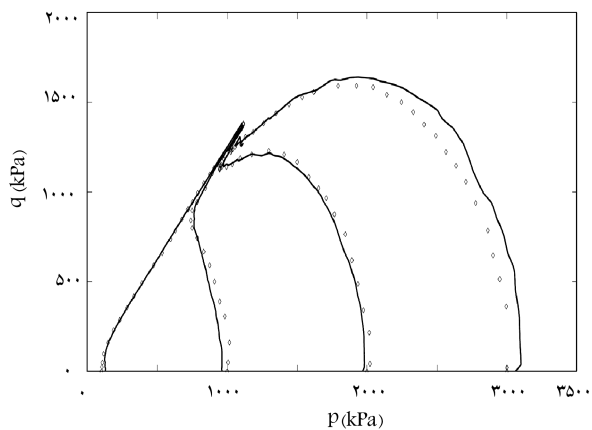
e_{min}	e_{max}	U_c	D_{50} (mm)	D_{max} (mm)	G_s
۰٫۶۷۸	۱٫۰۲۸	۱٫۶	۰٫۲۷	۰٫۸۴	۲٫۶۳



شکل ۱۴. مقایسه مدل شبیه‌سازی شده با نتایج آزمایش سه‌محوری فشاری ماسه توپورا بر روی نمونه سست با نسبت تخلخل $e = ۰٫۹۰۷$ (وردوگو و ایشیهارا، ۱۹۹۶).

۰٫۸۳۳ و ۰٫۹۰۷ به عنوان نمونه نشان داده شده است. نتایج هم‌خوانی بسیار خوبی را نشان می‌دهند.

با تعریف فضای کرنش محوری - نسبت تنش همه‌جانبه $(\varepsilon_1 - R_p)$ و فضای نسبت تنش همه‌جانبه‌ی ابتدایی - نسبت تنش برشی ابتدایی $(R_{pe} - R_{se})$ ، فقط برای بارگذاری زهکشی‌نشده‌ی یک‌نواخت این فضاها امکان تعریف رفتار ماسه به صورت یک نمونه‌ی خاک با پارامترهای یکسان برای بارگذاری زهکشی‌نشده را فراهم می‌آورد. این در حالی است که مدل‌های دیگر نمونه‌های یک خاک را به عنوان خاک متفاوت با پارامترهای مجزا تعریف می‌کنند. همچنین فضای نسبت تنش همه‌جانبه‌ی ابتدایی - نسبت تنش برشی ابتدایی، تمامی حالات رفتار خاک را



شکل ۱۳. مقایسه مدل شبیه‌سازی شده با نتایج آزمایش سه‌محوری فشاری ماسه توپورا بر روی نمونه تراکم متوسط با نسبت تخلخل $e = ۰٫۸۳۳$ (وردوگو و ایشیهارا، ۱۹۹۶).

ماسه در شرایط زهکشی نشده به نحوی ارائه شده‌اند که تمامی محدوده‌های تنش همه‌جانبه و چگالی را در برگیرند.

توانایی تعریف رفتار ماسه با اعمال اثر تنش همه‌جانبه و چگالی با استفاده از ۴ پارامتر حالت تعریف شده در این نوشتار، امکان تعریف رفتار ماسه در تمامی محدوده‌های تنش و نسبت تخلخل شل تا متراکم را فراهم آورده است. در فضای کرنش - نسبت تنش همه‌جانبه $(\varepsilon_1 - R_p)$ ، رابطه‌ی بین کرنش و تنش همه‌جانبه به خوبی تعریف شده است، به طوری که I_p به عنوان شاخص مؤثر در تعریف تأثیر تابع چگالی تنش همه‌جانبه به کار رفته است. همچنین در فضای نسبت تنش همه‌جانبه‌ی ابتدایی - نسبت تنش برشی ابتدایی $(R_{pe} - R_{se})$ نیز I_p به عنوان شاخص مؤثر در تعریف تأثیر تابع چگالی تنش همه‌جانبه به کار رفته و رفتار نرم‌شونده و سخت‌شونده‌ی ماسه و رابطه‌ی بین تنش برشی و تنش همه‌جانبه به گونه‌ی تعریف شده است، که در برگزیده‌ی مسیرهای تنش به صورت یک مسیر، پارامتریک و واحد است.

به منظور ارزیابی و صحت‌سنجی کارکرد و قابلیت کاربرد مدل ارائه‌شده، نتایج به دست آمده از به‌کارگیری این مدل با نتایج آزمایشگاهی موجود از کار پژوهشی قبلی مقایسه شده است، که نتایج حاصل همخوانی خوبی را نشان می‌دهد و این کار بیانگر توانایی و قابلیت خوب مدل پیشنهادی در پیش‌بینی رفتار ماسه در شرایط زهکشی نشده است.

در تمامی محدوده‌های تنش و چگالی‌های مختلف در برگرفته و رفتار نرم‌شونده و سخت‌شونده‌ی ماسه را در یک چهارچوب و ساختار یکسان تعریف می‌کند. ولی فضای کرنش محوری - نسبت تنش همه‌جانبه $(\varepsilon_1 - R_p)$ با وجود تعریف مناسب از پاسخ انشاعی و اقباضی ماسه در حین بارگذاری، امکان تعریف هم‌زمان رفتار نرم‌شونده‌ی ماسه‌ی شل و رفتار سخت‌شونده‌ی ماسه‌ی متراکم را ندارد و نیازمند تعریف پارامترهای مجزا است.

۸. نتیجه‌گیری

مدل کردن رفتار خاک‌ها به خصوص ماسه در شرایط مختلف، اهمیت خاصی دارد. مدل‌های قدیمی به دلیل نداشتن توانایی در مدل کردن دقیق رفتار مقاومتی خاک منجر به تعریف غیرواقعی از خاک می‌شوند. از سوی دیگر، مدل‌های جدید نیز با وجود قابلیت‌های خوب آنها در تعریف رفتار خاک، پیچیدگی‌های عدیده‌ی دارند که معمولاً کاربرد آنها را با مشکل مواجه می‌کند. از این رو ضرورت ارائه‌ی مدلی ساده را با امکان محاسبه‌ی سریع برای استفاده‌های کاربردی کاملاً محسوس می‌کند. در همین راستا، در این مطالعه با استفاده از مفهوم پارامتر حالت، روابطی برای رفتار

منابع (References)

- Lashkari A. "On the modeling of the state dependency of granular soils", *Computers and Geotechnics*, **36**(7), pp. 1237-1245 (2009).
- Cheng, C. and Zheng-ming, Z. "Development of nonlinear cross-anisotropic model for sands based on state parameter", *Central South University Press and Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, **20**, pp. 1992-2000 (2013).
- Sawicki, A. and Świdziński, W. "Drained against undrained behaviour of sand", *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*, **54**(3), pp. 207-222 (2007).
- Ishihara, K., Tatsuoka, F. and Yasuda, S. "Undrained deformation and liquefaction of sand under cyclic stress", *Soils and Foundations*, **15**(1), pp. 29-44 (1975).
- Been, K. and Jeffries M.G. "A state parameter for sands", *Géotechnique*, **35**(2), pp. 99-112 (1985).
- Castro, G. "Liquefaction of sands", *Harv. Soil Mech.*, **81**, Harvard Univ., Cambridge, Mass. (1969).
- Castro, G. and Poulos, S.J. "Factors affecting liquefaction and cyclic mobility", *ASCE, J. Geotech Geoenviron Engng.*, **103**(6), pp. 501-506 (1977).
- Wang, Z.L., Dafalias, Y.F., Li, X.S. and Makdisi, F.I. "State pressure index for modeling sand behavior", *ASCE, J. Geotech. Geoenviron Engng.*, **128**(6), pp. 511-519 (2002).
- Yang, J. and Li, X.S. "State-dependent strength of sands from the perspective of unified modeling", *ASCE, J. Geotech. Geoenviron Engng.*, **130**(2), pp. 186-198 (2004).
- Cubrinovski, M. and Ishihara, K. "State concept and modified elastoplasticity for sand modeling", *Soils and Foundations*, **38**(4), pp. 213-225 (1998).
- Fu, P. and Dafalias, Y.F. "Fabric evolution within shear bands of granular materials and its relation to critical-state theory", *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, **35**(18), pp. 1918-1948 (2011).
- Sadeghian, S. and Namin, M.L. "Using state parameter to improve numerical prediction of a generalized plasticity constitutive model", *Computers & Geosciences*, **51**, pp. 255-268 (2013).
- Li, X.S., Dafalias, Y.F. and Wang, Z.L. "State-dependent dilatancy in critical-state constitutive modelling of sand", *Canadian Geotechnical J.*, **36**(4), pp. 599-611 (1999).
- Yao, Y.P., Sun, D.A. and Luo, T. "A critical state model for sands dependent on stress and density", *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, **28**(4), pp. 323-337 (2004).
- Atkinson J., *The Mechanics of Soils and Foundations*, 2th ed. London and New York, Taylor & Francis (2007).
- Nagase, H., Yasuda, S., Tsujino, S., Shinji, R. and Yanagihata, T. "Liquefaction strength characteristics of overconsolidated sand samples", Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Elsevier Science Ltd, Paper No. 1089 (1996).
- Wang, Z.L., Dafalias, Y.F. and Shen, C.K. "Bounding surface hypoplasticity model for sand", *J. Eng. Mech.*, **116**(5), pp. 983-1001 (1990).

جدول ۱. علائم پارامترهای مورد استفاده و عناوین کاربرد آنها.

پارامتر	موارد کاربرد
λ_s, ξ	ثابت‌های رابطه خط حالت بحرانی
a_p, b_p, c_p, d_p	ثابت‌های رابطه‌ی نسبت تنش همه‌جانبه برای حالت با شاخص فشار اولیه‌ی کوچک‌تر از ۱، تعریف شده به صورت تابع کرنش.
$a_{p_1}, b_{p_1}, c_{p_1}, d_{p_1}$	ثابت‌های رابطه‌ی نسبت تنش همه‌جانبه برای حالت با شاخص فشار اولیه‌ی بزرگ‌تر یا مساوی ۱، تعریف شده به صورت تابع کرنش.
a_s, b_s, c_s	ثابت‌های رابطه‌ی نسبت تنش همه‌جانبه‌ی اولیه، تعریف شده به صورت تابع شیب مسیرهای شعاعی (m).
(p_{fc}, q_{fc})	نقطه‌ی گسیختگی اولیه، تعریف شده به صورت منحنی عددی تابع شاخص فشار اولیه.