

## توسعه روش تحلیل محیط دوفازی با تعمیم مدل رفتاری خاک

سید احسان سیدی حسینی نیا<sup>۱\*</sup>، اورنگ فرزانه<sup>۲</sup>

۱- استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استادیار، دانشکده عمران، پردیس دانشکده های مهندسی، دانشگاه تهران

\* eseyedi@ut.ac.ir

### چکیده

در مقاله حاضر، به توسعه روش تحلیل محیط دوفازی که یکی از جدیدترین روش های همگن سازی می باشد، پرداخته شده است. توسعه مزبور در راستای توجه به رفتار خاک در توده خاک مسلح با معرفی یک مدل رفتاری غیرخطی در چارچوب مدل های سطح مرزی می باشد. با بکارگیری این مدل در چارچوب محیط دوفازی، رفتار خاک مسلح شبیه سازی شده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. مقایسه نتایج حاکی از تطابق خوب میان آن ها دارد.

**کلمات کلیدی:** خاک مسلح، روش تحلیل همگن سازی، مدل رفتاری، محیط دوفازه، مدل سطح مرزی، تغییر شکل ها.

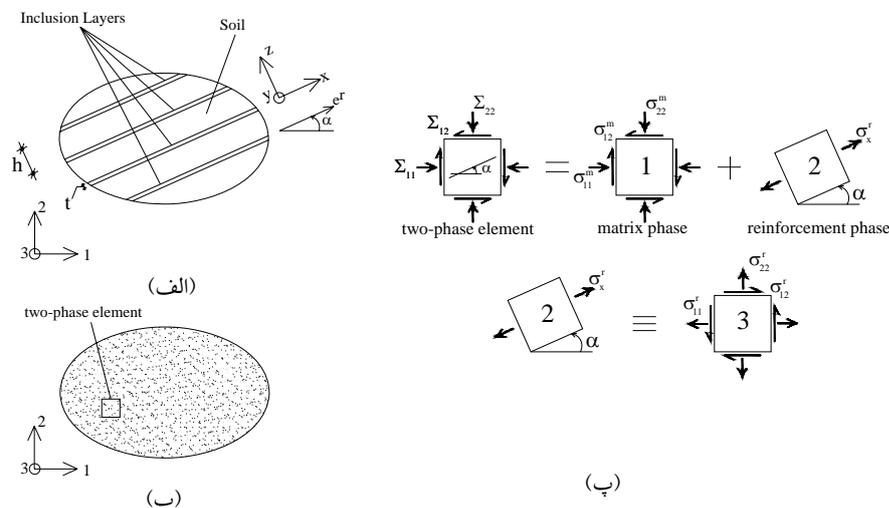
### ۱. مقدمه

خاک مسلح عبارت از بکارگیری عناصر نواری یا صفحه ای مقاوم در برابر کشش در میان توده خاک می باشد. با توجه به سیستم لایه ای خاک مسلح و آرایش منظم لایه ها، محیط خاک مسلح را می توان بصورت محیطی در نظر گرفت، بطوریکه با آن بتوان رفتار مجموعه اولیه را با تقریب قابل قبولی تخمین زد. به این شیوه تحلیل، همگن سازی گویند. در این شیوه، محیط خاک مسلح - که بطور ذاتی یک محیط ناهمگن می باشد - با یک محیط معادل همگن ولی ناهمسان جایگزین می شود. در ادبیات فنی، روش های همگن سازی متنوعی وجود دارند که هر کدام بر اصول و فرضیات مختص به خود استوارند. در اواخر دهه ۹۰ میلادی، یک چارچوب جدیدی بنام «محیط چندفازی» توسط پروفیسور دوبوهان و همکارانش [1]، [2] ارائه شده که حاصل بیست سال پژوهش های قبلی انجام شده در مدرسه دولتی پل و راه فرانسه در زمینه روش های همگن سازی بوده است و مطالعات و تحقیقات بر روی آن همچنان ادامه دارد. چارچوب مذکور بر پایه اصل کار مجازی در محیط های پیوسته بنا نهاده شده است. الگوی چندفازی را می توان به عنوان روش توسعه یافته روش های همگن سازی تلقی نمود. زیرا در روش های همگن سازی محیط مورد نظر بصورت فقط یک ماده همگن ولی غیرهمسان معادل در نظر گرفته می شود. در صورتیکه یک محیط چندفازی، نه فقط از یک ماده، بلکه از روی هم قرارگیری تمام عنصرها تحت عنوان «فاز» (phase) تشکیل می شود. به عبارت دیگر، در محیط چندفازی ای که برای خاک مسلح در نظر گرفته می شود، فرض می شود که در هر نقطه از هندسه محیط، هم فاز متناظر خاک (فاز ماتریس) و هم فاز متناظر تسلیح کننده (فاز جوشن) وجود دارد.

در الگوهای چندفازی ارایه شده تاکنون، رفتار خاک و تسلیح کننده به صورت یک ماده ارتجاعی خطی - خمیری کامل در نظر گرفته شده است. از مدل مذکور در تحلیل عددی گروه شمع [3] و تحلیل عددی تونل سنگی تقویت شده با بولت [4] استفاده شده است.

## ۲. معرفی محیط دوفازی

محیط چندفازه از رویهم قرارگیری چندین محیط پیوسته تشکیل شده است که به هر یک از این محیط ها «فاز» گفته می شود. با توجه به اینکه در خاک مسلح، تنها یک ردیف تسلیح کننده در میان خاک قرار می گیرد، خاک مسلح به صورت محیط دوفازی تعریف می گردد که شامل فازهای ماتریس (متناظر با خاک) و یک فاز جوشن (متناظر با یک لایه تسلیح کننده) می باشد.



شکل ۱- معرفی محیط دوفازی: (الف) شمای محیط خاک مسلح؛ (ب) شمای محیط دوفازی؛ (پ) جداسازی عناصر فازهای ماتریس و تسلیح کننده مربوط به المان دوفازی؛

مطابق شکل ۱ محیط خاک مسلح را در دستگاه مختصات کلی راستگرد ۱-۲-۳ در نظر می گیریم. این محیط بوسیله تسلیح کننده های صفحه ای تقویت شده که با افق زاویه  $\alpha$  می سازد. برای این صفحات یک دستگاه مختصات موضعی راستگرد  $X-Y-Z$  را طوری اختیار می کنیم که محور  $Z$  در راستای بردار عمود بر صفحه به موازات محور  $Z$  قرار گیرد. محیط جدیدی مطابق شکل ۱-ب در نظر گرفته می شود که برخلاف اولی، همگن بوده و در هر نقطه ای از آن دو فاز ماتریس و جوشن وجود دارد. المان های شماره (۱) و (۲) به ترتیب نشانگر المان های فاز ماتریس و جوشن می باشد. با چرخاندن المان (۲) به اندازه  $\alpha$  المان (۳) حاصل می شود.

با توجه به وجود هر دو فاز در هر نقطه از جسم، رابطه تعادل برای هر فاز براساس اصل کار مجازی بصورت زیر بدست می آید [2]:

$$\text{div} \sigma_{ij}^r + \rho^r F_i^r - I_i = 0 \quad \text{div} \sigma_{ij}^m + \rho^m F_i^m + I_i = 0 \quad (1)$$

که در آن،  $\sigma_{ij}^m$  (و  $\sigma_{ij}^r$ ) تانسور تنش کوشی فاز ماتریس (و جوشن) می‌باشد. جمله  $\rho^m F_i^m$  (و  $\rho^r F_i^r$ ) نشاندهنده نیروی حجمی از طرف ماتریس (و جوشن) می‌باشد. نیروی اندرکنش میان فازهای ماتریس و جوشن با جمله  $\pm I$  تعریف شده است. حل این معادلات تعادل با در نظر گرفتن شرایط مرزی تنش میسر می‌شود که بر روی مرز هر یک از فازها در نظر گرفته شده است. با جمع کردن دو رابطه تعادل هر فاز، رابطه تعادل در محیط دوفازی به شکل زیر حاصل می‌شود.

$$\text{div} \Sigma_{ij} + \rho F_i = 0 \quad (2)$$

که در آن، داریم:  $\rho F_i = \rho^m F_i^m + \rho^r F_i^r$  و  $\Sigma_{ij} = \sigma_{ij}^m + \sigma_{ij}^r$ . تانسور  $\Sigma_{ij}$  نشانگر تنش کل اعمالی بر محیط دوفازی می‌باشد. از طرف دیگر، در هر فاز روابط تنش و کرنش بطور جداگانه تعریف می‌شوند. به عبارت دیگر، داریم:

$$\sigma_{ij}^m = A_{ijkl}^m \varepsilon_{kl}^m, \quad \sigma_{ij}^r = A_{ijkl}^r \varepsilon_{kl}^r \quad (3)$$

در محیط دوفازی مورد نظر، فرض می‌شود که دو فاز بطور کامل بهم اتصال دارند (perfect bonding). به عبارت دیگر:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^m = \varepsilon_{ij}^r \quad (4)$$

در نتیجه، رابطه تنش - کرنش کل در محیط دوفازی بصورت زیر نمایان خواهد شد:

$$\Sigma_{ij} = (A_{ijkl}^m + A_{ijkl}^r) \varepsilon_{kl} \quad (5)$$

در رابطه بالا،  $A_{ijkl}^m$  (و  $A_{ijkl}^r$ ) تانسور سختی فاز ماتریس (و جوشن) می‌باشد.

## ۱.۲. مدل رفتاری فاز جوشن

برخلاف شبیه سازی های قبلی که در آن، فاز جوشن بصورت میله (یک بعدی) در نظر گرفته شده بود، تسلیح کننده در شبیه سازی کنونی به شکل صفحه لحاظ می‌شود. به عبارت دیگر، مقدار تنش بوجود آمده در تسلیح کننده، علاوه بر مدول ارتجاعی ( $E^{inc}$ )، تابع نسبت پواسون ( $\nu^{inc}$ ) نیز می‌باشد. همچنین، فرض می‌شود که فقط نیروی کششی تحمل می‌کند. جهت بکارگیری هویت عنصر تسلیح کننده به عنوان فاز جوشن در محیط دوفازی، از تعریف نسبت تسلیح ( $\chi$ ) که برابر با نسبت حجمی لایه‌های تسلیح کننده به توده خاک می‌باشد، استفاده می‌گردد. میدان تنش  $\sigma_i^r$  در فاز جوشن (دید بزرگ مقیاس) به صورت حاصلضرب نسبت تسلیح ( $\chi$ ) در میدان تنش  $\sigma_i^{inc}$  در تسلیح کننده (دید ریزمقیاس) بدست می‌آید ( $\sigma_i^r = \chi \sigma_i^{inc}$ ). به طور مشابه، مدول ارتجاعی فاز جوشن ( $E^r$ ) به صورت  $E^r = \chi E^{inc}$  تعریف می‌شود.

فرض می‌شود که ضخامت صفحه تسلیح کننده در مقایسه با ابعاد دیگر آن ناچیز باشد. در محدوده رفتار ارتجاعی خطی، رابطه تنش - کرنش حاصل از قانون هوک برای چنین صفحه‌ای (در صفحه X-Y) و برای فاز جوشن بصورت زیر نوشته می‌شود (در دید ماکروسکوپی):

$$\begin{Bmatrix} \dot{\sigma}_x^r \\ \dot{\sigma}_y^r \end{Bmatrix} = \frac{E^r}{(1-\nu^{r^2})} \begin{bmatrix} 1 & \nu^r \\ \nu^r & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\epsilon}_x^r \\ \dot{\epsilon}_y^r \end{Bmatrix} \quad (6)$$

با توجه با اینکه در لایه‌های تسلیح‌کننده مقدار تنش عمود بر صفحه  $\sigma_z^{inc}$  در مقایسه با صفحات داخل صفحه اندک است  $(|\sigma_z^{inc}| \gg |\sigma_y^{inc}| > |\sigma_x^{inc}|)$ ، از آن مولفه صرف نظر می‌شود. برای جسم دوبعدی فوق، معیار سطح تسلیم ترسکا که بر حسب اختلاف تنش‌های اصلی بیان می‌شود، در نظر گرفته می‌شود. با توجه به شرح داده شده، تابع سطح تسلیم فاز جوشن به صورت زیر بیان می‌شود:

$$f^{inc}(\sigma_x^{inc}, \sigma_y^{inc}) = |\sigma_x^{inc} - \sigma_y^{inc}| \leq |\sigma_{yield}^{inc}| \quad (7)$$

که در آن،  $\sigma_{yield}^r = \chi \sigma_{yield}^{inc}$  تنش تسلیم متناظر در فاز جوشن می‌باشد. جهت وارد کردن رفتار فاز جوشن در صورت بندی رفتار محیط فازی، لازم است تا قانون رفتاری فاز جوشن به صورت تانسوری ارائه شود. بنابراین، رابطه ۶ به شکل زیر در می‌آید:

$$\dot{\sigma}_{ij}^r = E_{ijkl}^r \epsilon_{kl}^r \quad (8)$$

که در آن  $\dot{\epsilon}_{ij}^r = \dot{\epsilon}_x^{inc} (e_i \otimes e_j)$  و  $\dot{\sigma}_{ij}^r = \dot{\sigma}_x^r (e_i \otimes e_j)$  و  $A_{ijkl} = E^r (e_i^r \otimes e_j^r \otimes e_k^r \otimes e_l^r)$  می‌باشد. در روابط بالا،  $e_r = \{Cos\alpha, Sin\alpha\}$  بردار یک‌ای می‌باشد که راستای قرارگیری صفحه تسلیح‌کننده را در فضا نشان می‌دهد.

## ۲.۲. مدل رفتاری فاز ماتریسی

مدل رفتاری خاک بکار گرفته شده در کارهای انجام شده گذشته، بر اساس الگوی رفتاری مرسوم ارتجاعی خطی-خمیری کامل موهر-کولمب شکل گرفته است. الگوی رفتاری پیشنهادی در این تحقیق، رفتار توام ارتجاعی و خمیری را از ابتدای بارگذاری و بصورت غیرخطی در نظر می‌گیرد. الگوی رفتاری مذکور فقط برای حالت بارگذاری یکسویه تعریف شده است. شایان ذکر است که در ارتقای الگو نکات زیر همواره مدنظر قرار گرفته شده اند: (۱) تا حد امکان از پیچیده شدن صورت بندی جلوگیری شود و با در نظر گرفتن کمترین تعداد پارامتر، رفتار خاک را تا حد ممکن بخوبی شبیه سازی نمود. (۲) پارامترهای خاک با کمک آزمایش‌های متداول موجود براحتی قابل اندازه گیری باشند. (۳) امکان توسعه و ارتقای مدل برای شبیه سازی رفتار در شرایط مختلف نظیر مسیره‌های بارگذاری خاص (نظیر بارگذاری رفت و برگشتی) وجود داشته باشد. بدین منظور، الگوی ارتقا یافته در قالب خانواده الگوهای سطح مرزی معرفی خواهد شد. در تعریف الگوی رفتاری مورد نظر، شرایط خاک در این گونه سازه‌ها مدنظر قرار می‌گیرد. الگوی رفتاری پیشنهاد شده بر اساس فرضیات زیر استوار است: (۱) تعریف پارامترهای الگوی رفتاری تابعی از تراکم (و یا نسبت تخلخل) نمی‌باشد. (۲) الگوی رفتاری نمی‌تواند رفتار نرم شونده (بعد از مقاومت بیشینه) را پیش بینی کند. (۳) از تاثیر تنش همه جانبه بر تغییرات مقاومت نهایی خاک (زاویه اصطکاک داخلی) صرف نظر می‌شود. در ادامه، به شرح صورت بندی (فرمولاسیون) روابط می‌پردازیم.

بطور کلی، کرنش جزئی وارد بر خاک را می‌توان بصورت مجموع بخش‌های ارتجاعی و خمیری فرض نمود.

$$\dot{\epsilon}_i = \dot{\epsilon}_i^e + \dot{\epsilon}_i^p \quad (9)$$

برای بخش ارتجاعی، رابطه نمودی تنش و کرنش بصورت زیر است:

$$\dot{\epsilon}_i^e = \frac{1}{2G(1+\nu)} \left[ \dot{\sigma}_i - \nu \sum_{j \neq i} \dot{\sigma}_j \right] \quad (10)$$

که در آن،  $G = G_0 \left( \frac{p}{p_r} \right)^n$  می باشد. مقدار  $n$  برای انواع ماسه متراکم معمولاً برابر با ۰/۵ می باشد [5].

جهت تعیین مولفه های جزء کرنش خمیری، توابع سطح تسلیم و سطح مرزی را بصورت زیر تعریف می کنیم:

$$f(\sigma_1, \sigma_3) = (\sigma_1 - \sigma_3) - \text{Sin} \phi_{mob} (\sigma_1 + \sigma_3) = 0 \quad (11\text{-الف})$$

$$F^b(\bar{\sigma}_1, \bar{\sigma}_3) = (\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_3) - \text{Sin} \phi_{peak} (\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_3) = 0 \quad (11\text{-ب})$$

که در این روابط،  $\sigma_1$  و  $\sigma_3$  تنش های اصلی بیشینه و کمینه هستند. همچنین، پارامترهای  $\phi_{mob}$  و  $\phi_{peak}$  به ترتیب زوایای اصطکاک داخلی بسیج شده و بیشینه در خاک می باشند. از تاثیر تنش اصلی میانی در تابع سطح تسلیم صرف نظر شده است. برای تابع اتساع (D) که طبق مرجع [6] برابر با  $D = -\dot{\epsilon}_v^p / \dot{\epsilon}_q^p$  تعریف می شود، رابطه زیر لحاظ شده است:

$$D = D_0 [\text{Sin} \phi_{mob} - \text{Sin} \phi_{PTL}] \quad (12)$$

در این رابطه،  $D_0$  ثابت مدل و  $\phi_{PTL}$  زاویه اصطکاک داخلی خاک در لحظه تغییر رفتار انقباضی به انبساطی می باشد. شایان ذکر است  $\dot{\epsilon}_v^p$  و  $\dot{\epsilon}_q^p$  نمودی کرنش های برشی و حجمی می باشند که برابرند با:  $\dot{\epsilon}_v^p = \dot{\epsilon}_1^p + \dot{\epsilon}_3^p$  و  $\dot{\epsilon}_q^p = \dot{\epsilon}_1^p - \dot{\epsilon}_3^p$ . در تعریف معادلات رفتاری به کمک مدل های سطح مرزی، از مدول خمیری ( $K_p$ ) استفاده می شود. در مدل حاضر، از تعریف مدول خمیری به شکل زیر استفاده می شود.

$$K_p = h_0 G \left( \frac{\text{Sin} \phi_{peak} - \text{Sin} \phi_{mob}}{\text{Sin} \phi_{mob}} \right) \quad (13)$$

که در آن،  $h_0$  ثابت مدل می باشد. در نهایت، با انجام محاسبات ریاضی، رابطه نمودی تنش و کرنش بصورت زیر حاصل می شود:

$$\begin{Bmatrix} \dot{\epsilon}_1 \\ \dot{\epsilon}_2 \\ \dot{\epsilon}_3 \end{Bmatrix} = \frac{1}{2G(1+\nu)K_p} \begin{bmatrix} K_p + (1-D)(1 - \text{Sin} \phi_{mob})G & -\nu K_p & -\nu K_p - (1-D)(1 + \text{Sin} \phi_{mob})G \\ -\nu K_p & K_p & -\nu K_p \\ -\nu K_p - (1+D)(1 - \text{Sin} \phi_{mob})G & -\nu K_p & K_p + (1+D)(1 + \text{Sin} \phi_{mob})G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\sigma}_1 \\ \dot{\sigma}_2 \\ \dot{\sigma}_3 \end{Bmatrix} \quad (14)$$

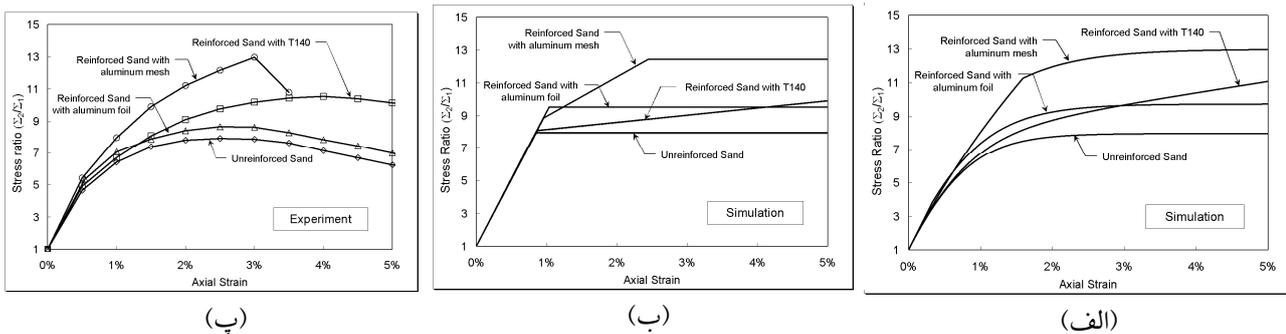
به طور خلاصه، مدل رفتاری خاک پیشنهاد شده در مجموع ۷ پارامتر دارد که عبارتند از:  $D_0$ ،  $G_0$ ،  $n$ ،  $\nu$ ،  $\phi_{mob}$ ،  $\phi_{peak}$  و  $h_0$ . روش تعیین این پارامترها در مراجع [7] و [8] ارایه شده است.

### ۳. شبیه سازی رفتار خاک مسلح با مدل دوفازی

در این بخش، به شبیه سازی رفتار نمونه های خاک مسلح آزمایشگاهی در حالت کرنش مستوی پرداخته می شود. بدین جهت، از دو مجموعه آزمایش های معتبر موجود در ادبیات فنی استفاده می شود.

#### ۳.۱. سری اول شبیه سازی ها

این سری آزمایش ها توسط McGown et al. بر روی ماسه Leighton Buzzard انجام شده است [9]. جهت تسلیح نمونه ها، یک لایه تسلیح کننده در وسط سلول کرنش مستوی گذاشته شده است. در این آزمایشها، ماسه Leighton Buzzard با درصد تراکم ۶۵٪ در دستگاه کرنش مستوی فشاری تحت تنش جانبی ۷۰ کیلو پاسکال قرار گرفته است. بر اساس نمودارهای بدست آمده از آزمایش های آزمایشگاهی، پارامترهای لازم جهت شبیه سازی رفتار خاک تعیین می شوند. بر اساس مدل موهر-کولمب، پارامترهای خاک عبارتند از:  $\phi = 51^\circ$ ،  $\psi = 21^\circ$ ،  $\nu = 0.3$  و  $E = 52\text{MPa}$ . پارامترهای مدل رفتاری ارایه شده در تحقیق حاضر عبارتند از:  $\phi_{peak} = 51^\circ$ ،  $G_0 = 63\text{MPa}$ ،  $\nu = 0.35$ ،  $h_0 = 0.86$  و  $\nu = 0.5$ . از آنجاییکه در مرجع مورد نظر، نمودار تغییر حجم داده نشده است، نمی توان پارامترهای تغییر شکل  $\phi_{PTL}$  و  $D_0$  را بدست آورد. بجای آن، از تعریف مستقیم تابع اتساع بصورت  $D = \sin \psi$  استفاده می شود. در این آزمایش ها از سه نوع مختلف تسلیح کننده ورق آلومینیومی، شبکه آلومینیومی و ژئوتکستایل بافته نشده (T140) استفاده شده است. مدول ارتجاعی تسلیح کننده های نام برده به ترتیب برابرند با ۲۰، ۳۵۰ و ۲۰۰ مگاپاسکال. همچنین، مقاومت کششی تسلیح کننده های فوق عبارتند از: ۱۵، ۳ و ۲ مگاپاسکال. نسبت پواسون برای تمام تسلیح کننده ها برابر با  $\nu = 0.1$  در نظر گرفته شده است.



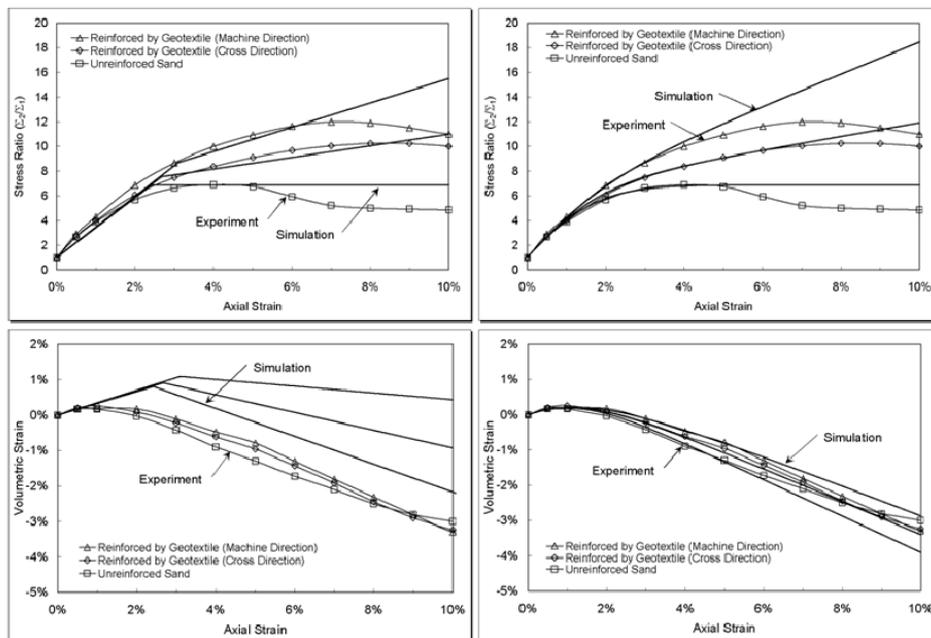
شکل ۲- تغییرات اختلاف تنش با کرنش محوری در نمونه های غیر مسلح و مسلح ماسه Leighton Buzzard در تنش جانبی ۷۰ کیلو پاسکال (الف) داده آزمایشگاهی؛ (ب) شبیه سازی با الگوی رفتاری موهر کولمب؛ (پ) شبیه سازی با رفتار غیرخطی

نمودار تغییرات نسبت تنش ( $\Sigma_2/\Sigma_1$ ) در در مقابل کرنش محوری برای نمونه های غیرمسلح و مسلح و با کمک دو نوع شبیه سازی مختلف رفتار خاک در شکل ۲ نمایش داده شده است. در شبیه سازی با الگوی رفتاری موهر کولمب مشاهده می شود که نمودار تنش-کرنش از چندین خط بصورت شکسته تشکیل شده است، در صورتیکه در شبیه سازی با رفتار غیرخطی، روند رشد نسبت تنش از همان ابتدای شروع بارگذاری بصورت پیوسته و غیرخطی رشد می کند. نکته دیگر آن که

شیب منحنی ها در شبیه سازی با مدل غیرخطی از هم متمایز هستند، در صورتیکه با مدل موهر-کولمب، بخش اول منحنی ها کاملاً بر هم منطبق هستند. به عبارت بهتر، اختلاف رفتار با کمک مدل پیشنهادی برای خاک بهتر تمیز داده می شود.

### ۲.۳. سری دوم شبیه سازی ها

در دومین سری از شبیه سازی ها، آزمایش های آزمایشگاهی انجام شده توسط Tatsuoka and Yamauchi شبیه سازی می شود [10]. آنها ماسه متراکم Toyoura را در یک دستگاه کرنش مستوی با قرار دادن یک لایه ژئوتکستایل در وسط آن مسلح کردند. نمونه مورد نظر تحت تنش جانبی ثابت ۴۹ کیلوپاسکال قرار گرفته و از بالا بصورت کنترل کرنش بارگذاری می شود. با بررسی رفتار خاک ماسه ای Toyoura در فضای تنش و کرنش برشی و نیز کرنش های حجمی و برشی، پارامترهای الگوی رفتاری به شرح زیر بدست آمده است. با در نظر گرفتن مدل موهر کولمب، پارامترها عبارتند از:  $\psi = 9.5^\circ$ ,  $\phi = 48.3^\circ$ ,  $E = 12 \text{ MPa}$  و  $\nu = 0.4$ . پارامترهای مدل غیرخطی ارایه شده عبارتند از:  $D_0 = 0.7$  و  $\phi_{PTL} = 27$ ,  $n = 0.5$ ,  $0.25$ . در این آزمایشها از یک نوع ژئوتکستایل بافته نشده استفاده شده است، بطوریکه در دو جهت در راستای ماشین و عمود بر ماشین، مشخصات مکانیکی مختلفی از خود نشان می دهد. مقدار مدول ارتجاعی و تنش تسلیم در نظر گرفته شده در شبیه سازی ها در این دو راستا به ترتیب عبارتند از:  $E = 640 \text{ MPa}$  و  $\sigma_{yield} = 9.75 \text{ kPa}$  و  $E = 266.7 \text{ MPa}$  و  $\sigma_{yield} = 4.0 \text{ kPa}$ . مقدار نسبت پواسون برای این ژئوتکستایل صفر گزارش شده است.



(ب)

(الف)

شکل ۳- شبیه سازی تغییرات (الف) نسبت تنش و (ب) کرنش حجمی با کرنش محوری نمونه های غیر مسلح و مسلح ماسه متراکم Toyoura در تنش جانبی ۱۰۰ کیلوپاسکال بوسیله رفتار غیر خطی

نتایج شبیه سازی های آزمایشگاهی به همراه نتایج حاصل از مدل سازی رفتار خاک غیر مسلح و مسلح در شکل ۳ ارایه شده اند. از آنجاییکه شبیه سازی ها نمی توانند مقاومت بیشینه و نهایی نمونه ها را پیش بینی کنند، در فضای نسبت تنش - کرنش، تطابق

خوبی تا قبل از رسیدن به مقاومت بیشینه نمونه وجود دارد. هر چه سختی تسلیح کننده بیشتر باشد، شیب نمودار نسبت تنش  $(\Sigma_2 / \Sigma_1)$  تندتر می شود. با بررسی تغییر شکل ها، مشاهده می شود که مقدار تغییر شکل های حاصل از الگوی موهر کولمب، خیلی بزرگتر از واقعیت تخمین زده شده است (در حد ۳ تا ۴ برابر). در صورتیکه تطابق خوبی میان نتایج آزمایش و شبیه سازی با مدل غیرخطی خاک وجود دارد. از اینرو، با مقایسه شبیه سازی های انجام شده از نظر نوع رفتار ماتریس، می توان به اهمیت رفتار غیرخطی و مخصوصاً نقش آن در تخمین تغییر شکلها پی برد.

#### ۴. نتیجه گیری

در این مقاله، خاک مسلح به عنوان یک محیط دوفازی در نظر گرفته شده و رفتار آن با مدل های رفتاری مختلف برای فاز ماتریس (نشانگر خاک) شبیه سازی شده است. با مقایسه شبیه سازی ها و همچنین مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی می توان به این نکته پی برد که توجه به نحوه شبیه سازی رفتار خاک به عنوان بخشی از خاک مسلح که حجم بزرگی از آن را شامل می شود، می تواند منجر به شبیه سازی دقیق تر رفتار خاک مسلح شود. این نکته در مورد تخمین تغییر شکل های خاک مسلح مشهودتر است.

#### مراجع

1. Sudret, B. (1999). Modélisation "multiphasique des ouvrages renforcés par inclusions", PhD thesis, Ecole nationale des ponts et chaussées, Paris, France (in french);
2. Sudret, B. and de Buhan, P. (2001). "Multiphase model for inclusion-reinforced geostructure: Application to rock-bolted tunnels and piles raft foundations." Int. J. Anal. Meth. Geomech. 25, 155-182;
3. de Buhan, P. and Sudret B. (2000). "Micropolar multiphase model for materials reinforced by linear inclusions". Eur. J. Mech. A/Solids. 19, 669-687;
4. Sudret, B. and de Buhan, P. (2001). "Multiphase model for inclusion-reinforced geostructure: Application to rock-bolted tunnels and piles raft foundations." Int. J. Anal. Meth. Geomech. 25, 155-182;
5. Manzari, M.T. and Dafalias, Y.F. (1997). "A critical state two-surface plasticity model for sands" Géotechnique, 47 (2), 255-272;
6. Rowe, P. W. (1962). "The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of articles in contact". Proc. R. Soc. London. Ser. A. 269, 500-527;
7. Seyed Hosseininia, E., Farzaneh, O. (2009). "Development and validation of a two-phase model for reinforced soil by considering non-linear behavior of matrix", J. of Eng. Mechanics (ASCE). (to be published);
- ۸ سیدی حسینی نیا، س.ا. (۱۳۸۸)، "توسعه مدل چندفازه برای تحلیل توده خاک مسلح"، پایان نامه مقطع دکتری، دانشکده عمران، پردیس دانشکده های مهندسی، دانشگاه تهران؛
9. McGown A., Andrawes K. Z., and Hasani M. M. (1978). "Effect of inclusion properties on the behavior of sands" Géotechnique, 3(28), 327-346;
10. Tatsuoka, F. and Yamauchi, H. (1986). "A reinforcing method for steep clay slopes with non-woven fabric", Geotextiles and Geomembranes, 4(3/4), 241-268;