

بررسی تغییر شکل افقی دیوار خاک مسلح به روش محیط دوفازی و مدل رفتاری هایپربولیک

سیاوش هنری^۱، سید احسان سیدی حسینی نیا^۲

۱- دانشجوی دکتری مکانیک خاک و پی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

honari@stu-mail.um.ac.ir
eseyedi@um.ac.ir

خلاصه

گسترش کاربرد توده های خاک مسلح، لزوم شناخت و پیش بینی بهتر رفتار آنها و پیچیده و پرهزینه بودن تحلیل عددی توده های مسلح بصورت مستقیم موجب پیدایش و کاربرد روش های تحلیل همگن شده است. در این پژوهش به توسعه روش محیط های دوفازی که چارچوب جدیدی در روش های همگن سازی محسوب می گردد، پرداخته شده است. این توسعه با بکارگیری مدل رفتاری هایپربولیک دانکن - چانگ در روش محیط دوفازی و شبیه سازی رفتار خاک توده مسلح با این مدل رفتاری انجام شده است. پس از ارائه الگوی رفتاری اشاره شده، یک دیوار خاک مسلح تمام مقیاس بصورت همگن و مجزا مورد تحلیل عددی قرار گرفت. پس از بررسی و مقایسه نتایج تحلیل ها با مقادیر اندازه گیری شده برای تغییر شکل افقی دیوار، دقت مناسب الگوی دوفازی توسعه یافته تأیید گردید.

کلمات کلیدی: دیوار خاک مسلح، همگن سازی، الگوی دوفازی، مدل رفتاری هایپربولیک دانکن - چانگ

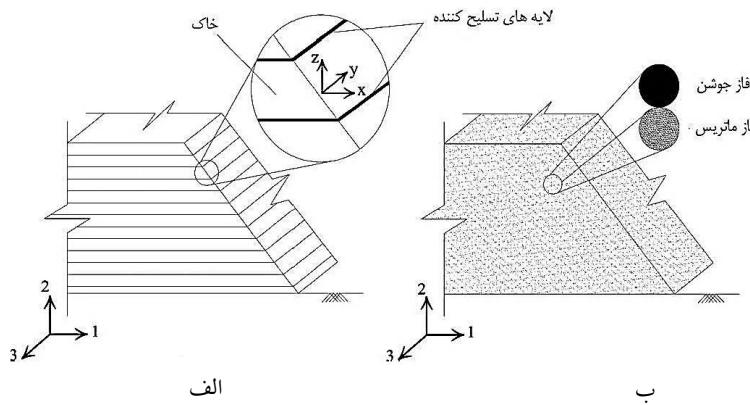
۱. مقدمه

اهمیت روزافزون و گستردگی کاربرد خاک های مسلح بر کسی پوشیده نیست. مفهوم کلی خاک مسلح عبارت است از به کار بردن عناصر کششی نواری یا صفحه ای در خاک دانه ای که به توده هی تشكیل یافته، نوعی چسبندگی ناهمسان در امتداد تسليح کننده ها می بخشد.^[۱] بطور کلی دیوار خاک مسلح با توجه به مزایای فنی و اقتصادی فراوان، غالباً بر دیگر روش ها نظیر دیوار حائل بتنی ارجحیت دارد. بر این اساس ضرورت شبیه سازی هرچه دقیق تر رفتار این سازه احساس می شود. با توجه به سیستم لا یاهی خاک مسلح که در بیشتر موارد با آرایش منظم لایه ها همراه است، رفتار محیط خاک را می توان به دو روش بررسی نمود. در روش اول عناصر تشكیل دهنده توده هی مسلح بصورت جداگانه در نظر گرفته شده، ویژگی ها و رفتار هر یک در بررسی رفتار مجموعه لحاظ می شود. به بیان دیگر خاک و تسليح کننده ها بصورت مجزا در نظر گرفته می شوند. در دیدگاه دوم، به جای نگرش جداگانه به اجزای سازنده توده هی مسلح، کل توده بصورت یک محیط همگن یکپارچه در نظر گرفته شده، ویژگی های رفتاری معادلی برای آن در نظر گرفته می شود. روش های تحلیلی براساس دیدگاه اول، روش های مجزا و روش های تحلیلی دیدگاه دوم، روش های همگن سازی نام دارند. در حالی که استفاده از تحلیل های عددی به روش های مجزا در محیط های ناهمگن (نظیر خاک مسلح)، با پیچیدگی ها و دشواری هایی همراه است، بکارگیری روش های همگن سازی می تواند تحلیلی ساده تر و سریع تر برای محیط های چند لایه ارائه نماید که در نتیجه به کاهش هزینه تحلیل منجر می گردد. یکی از جدیدترین روش های همگن سازی، روش محیط چند فازی است که در آن محیط مرکب از روی هم قرار گیری تمام عناصر تشكیل دهنده آن پدید می آید؛ در حالی که در روش های پیشین همگن سازی، محیط مرکب تنها بصورت یک ماده هی همگن معادل فرض می گردد. به عناصر تشكیل دهنده محیط چند فازی با ویژگی های رفتاری متفاوت «فاز» می گویند. مزیت های روش محیط چند فازی، سبب کاربرد گسترده و رو به رشد آن نسبت به سایر روش های همگن سازی شده است.

۲. معرفی محیط چند فازی

طیعت ساختار خاک مسلح و حضور دو جسم با ویژگی های مکانیکی و مقاومتی کاملاً متفاوت در کنار هم سبب می شود تا شبیه سازی عددی اجزای این ساختار مرکب پیچیده شود. در نتیجه مدل سازی مجزای محیط غیر همگن موجب پیچیده شدن شبکه های المان ها، افزایش تعداد آنها و ناسازگاری و

نایپوستگی عناصر مجاور با رفتارهای متفاوت شده و در نتیجه به طولانی و پرهزینه شدن فرآیند تحلیل و حتی غیرقابل اعتماد بودن نتایج مدل‌سازی‌ها می‌انجامد. یکی از راهکارهای رفع این مشکل، استفاده از روش‌های همگن‌سازی است. در این راهکار تلاش می‌شود تا به جای جزئی‌نگری و بررسی رفتار جسم‌سازنده خاک مسلح به طور مجزا (دید ریزمقیاس)، کل آن به صورت یک توده مرکب یکنواخت اما ناهمسان در نظر گرفته شود (دید بزرگ‌مقیاس). به کمک روش‌های همگن‌سازی، امکان مطالعه‌ی سیستم‌های لایه‌ای به گونه‌ای ساده‌تر، سریع‌تر و ارزان‌تر فراهم می‌گردد. هزینه‌ی تحلیل یک محیط لایه‌ای به روش همگن‌سازی حدود یک دهم الی یک پانزدهم هزینه‌ی تحلیل همان محیط به روش مجزا تخمین زده شده است. [۲] روش همگن‌سازی، علی رغم سادگی و کارایی مناسب، نواقصی نیز به همراه دارد. از آن جمله می‌توان به عدم درنظر گیری اندرکنش تسلیح‌کننده‌ها و خاک، و در نتیجه عدم بررسی امکان گسیختگی سازه در اثر لغزش تسلیح‌کننده‌ها و یا خمیری شدن موضعی محل تماس آن‌ها با خاک اشاره کرد. برای رفع این نواقص، چارچوب جدیدی در روش همگن‌سازی تعریف شد که در آن به جای درنظر گرفتن توده‌ی مسلح بعنوان یک محیط یک جنس، می‌توان آن را به شکل یک محیط همگن که از برآیند چند ماده – که در اینجا «فاز» نامیده می‌شود – مدل‌سازی نمود. این چارچوب جدید که درواقع روش پیشرفته‌ی همگن‌سازی تلقی می‌شود، «مدل چندفازی» نام دارد. نخستین مدل چندفازی برای شبیه‌سازی محیط سنگی تقویت شده با بولت، به وسیله‌ی پاتریک دوبوهان و برونو سودره ارائه گردید. [۳] تعریف محیط چندفازی اشاره شده، بر پایه‌ی اصل کار مجازی در محیط‌های پیوسته بنا نهاده شده است که براساس آن می‌توان مجموعه را با یک محیط معادل همگن جایگزین نمود، به طوری که خواص مکانیکی محیط جدید، از خواص مکانیکی ماده پرکننده و تسلیح‌کننده تشکیل شده باشد. در شکل ۱ یک توده خاک مسلح در حالت‌های مختلف نشان داده شده است. شکل ۱-الف دید ریزمقیاس (متناظر با تحلیل مجزا) دیوار خاک مسلح و شکل ۱-ب دید بزرگ مقیاس همان دیوار را نشان می‌دهد. در دید بزرگ مقیاس که نماینده‌ی مدل‌سازی به روش چندفازی است، در هر نقطه از جسم هر دو ماده‌ی پرکننده (عنی خاک) و تسلیح‌کننده وجود دارند. همان‌طور که بیان شد، در محیط چندفازی، به فاز ماده‌ی پرکننده «ماتریس» می‌گویند و در مقابل، فاز تسلیح‌کننده «جوشن» نامیده می‌شود.



شکل ۱ - توده‌ی خاک مسلح در مقیاس‌های مختلف (الف) دید ریزمقیاس: خاک و لایه‌های تسلیح‌کننده قابل تمایز از هم هستند (ب) دید بزرگ‌مقیاس: در هر نقطه هر دو فاز ماتریس و جوشن حضور دارند [۴]

۳. معرفی مدل رفتاری هایبریولیک

یکی از مهمترین چالش‌های پیش رو در مکانیک خاک، پیش‌بینی رفتار مکانیکی و ارائه رابطه‌ای دقیق و در عین حال ساده میان تانسورهای تنش و کرنش خاک بوده است. در ادبیات فنی، الگوهای رفتاری بسیار متنوعی برای خاکهای مختلف را در میان الگوهای کشسان-خمیری، مدل مور-کولمب است. رفتار بخش کشسان این مدل رفتاری بصورت خطی و رفتار بخش خمیری آن ایده‌آل (بدون سخت شوندگی یا نرم شوندگی) فرض می‌شود. با توجه به اینکه تقریباً تمام خاک‌ها از دامنه کرنش‌های اندک رفتاری غیرخطی داشته و پس از عبور از حد تسلیم، سخت یا نرم شدنگی را تجربه می‌نمایند، قابل پیش‌بینی است که فرضیات مدل رفتاری مور-کولمب سبب بروز خطأ در تحلیل‌های مرتبط با آن می‌شود. تاکنون تلاش‌های زیادی برای معرفی یک مدل رفتاری که در عین سادگی، توانایی قابل قبولی در مدل‌سازی رفتار حقیقی خاک داشته باشد انجام شده است. یک دسته از موفق‌ترین مدل‌های رفتاری که توانسته است نیازهای مطرح شده را به خوبی پاسخ دهد مدل رفتاری هایبریولیک است. مدل هایبریولیک دانکن-چانگ، یک مدل رفتاری کشسان غیرخطی است که برای شبیه‌سازی رفتار تنش-کرنش خاک تا رسیدن به مقاومت نهایی با استفاده از توابع ریاضی به کار می‌رود. شبیه‌سازی مذکور با استفاده از یک تابع هایبریولیک انجام می‌شود که اولین بار توسط کندر پیشنهاد شد. [۵ و ۶] بر این

اساس، دانکن و چانگ رابطه‌ی (۱) را برای تعیین مقدار مدول مماسی خاک در حالت بارگذاری اولیه، به شکل تابعی غیرخطی از فشار جانبی آن بیان ارائه نمودند. [۷] در این رابطه، R_f کمیتی به نام نسبت شکست است که به عنوان نسبت مقدار تنش انحرافی متناظر با مقاومت برشی خاک به مقدار جانب تنش انحرافی در نمودار رفتار تنش-کرنش آن تعریف می‌شود. K عدد ضریب سختی در حالت بارگذاری اولیه و n عدد توان، معرف نرخ تغییرات مدول اولیه خاک با تنش اصلی کمیته است که از نتایج مجموعه آزمایش‌های سه محوری بدست می‌آید. P_a نیز برابر با فشار اتمسفر است.

$$E_t = \left(1 - \frac{R_f(1 - \sin \phi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos \phi + 2\sigma_3 \sin \phi} \right)^2 K P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (1)$$

دانکن و چانگ با ارائه رابطه‌ای برای حالت باربرداری-بارگذاری مجدد، شبیه‌سازی رفتار برگشت ناپذیر خاک در نمودار تنش انحرافی-کرنش محوری را بررسی کرده و رابطه‌ی (۲) را برای تعیین مدول باربرداری-بارگذاری مجدد خاک ارائه نمودند. [۷]

$$E_{ur} = K_{ur} P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (2)$$

در این رابطه E_{ur} مدول باربرداری-بارگذاری مجدد خاک و K_{ur} ضریب مدول سختی است که مقدار آن برای شرایط باربرداری-بارگذاری مجدد، مشابه پارامتر K تعیین می‌گردد. مدل هایپربولیک دانکن-چانگ در محدوده کرنش‌های نسبتاً کوچک می‌تواند رفتار حقیقی انواع خاک‌ها را با دقیقی مناسب پیش‌بینی نماید.

۴. توسعه‌ی قانون رفتاری محیط دوفازی

براساس پیشنهاد سودره، تانسور تنش کلی Σ در هر نقطه از محیط چند فازی برابر است با مجموع تانسور تنش‌های جزئی فاز ماتریس و فاز جوشن. [۹] به بیان دیگر برای تعیین تنش کلی در هر المان از محیط چند فازی، می‌توان تنش‌های جزئی المان ماتریس و المان جوشن را با هم جمع نمود. برای تعیین تانسور تنش فاز ماتریس (متناظر با خاک در توده‌ی مسلح) مدل رفتاری متناظر با فاز ماتریس مدل هایپربولیک دانکن-چانگ در نظر گرفته می‌شود. گفتنی است بالاترین m استفاده شده در روابط زیر بیان گر فاز ماتریس است. رابطه‌ی نموی کلی تنش-کرنش یک جامد با رفتار الاستیک، در حالت کلی به شکل زیر بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}_{11}^m &= \alpha_1 \dot{\epsilon}_{11}^m + \alpha_2 (\dot{\epsilon}_{22}^m + \dot{\epsilon}_{33}^m) \\ \dot{\sigma}_{22}^m &= \alpha_1 \dot{\epsilon}_{22}^m + \alpha_2 (\dot{\epsilon}_{11}^m + \dot{\epsilon}_{33}^m) \\ \dot{\sigma}_{33}^m &= \alpha_1 \dot{\epsilon}_{33}^m + \alpha_2 (\dot{\epsilon}_{11}^m + \dot{\epsilon}_{22}^m) \\ \dot{\sigma}_{12}^m &= 2G \dot{\epsilon}_{12}^m \end{aligned} \quad (3)$$

$$\alpha_1 = K^m + \frac{4}{3} G^m \quad \text{و} \quad \alpha_2 = K^m - \frac{2}{3} G^m \quad (4)$$

در روابط بالا، G و K به ترتیب بیان گر مدول برشی و مدول حجمی خاک (فاز ماتریس) هستند. برای محاسبه تانسور تنش فاز جوشن، این فاز با رفتار کشسان خطی-خمیری کامل و تسلیح کننده‌های دیوار خاک مسلح به صورت صفحه‌ای فرض می‌شوند. در روابط زیر، بالاترین r و inc به ترتیب بیان گر پارامتر متناظر با تسلیح کننده (در تحلیل مجزا، دید ریز مقیاس) و فاز جوشن (در تحلیل همگن، دید بزرگ مقیاس) هستند. نسبت تسلیح (χ) یا نسبت حجمی تسلیح کننده‌ها بصورت نسبت حجمی لایه‌های تسلیح کننده به توده‌ی خاک تعریف می‌شود. تنش محوری σ_i^r فاز جوشن برابر است با حاصلضرب نسبت تسلیح در تنش σ_i^{inc} تسلیح کننده‌ها. بنابراین مدول کشسان فاز جوشن (E^r) در دید بزرگ مقیاس بدین صورت تعریف می‌گردد:

$$\sigma_i^r = \chi \sigma_i^{inc} \quad (5)$$

$$E^r = \chi E^{inc} \quad (6)$$

با تعریف تنش تسلیم σ_u^{inc} در لایه‌های تسلیح کننده داریم:

$$\sigma_u^r = \chi \sigma_u^{inc} \quad (7)$$

که در آن، σ_u^r تنش متناظر در فاز جوشن است. با توجه به ناچیز بودن ضخامت صفحه‌ای تسلیح کننده در مقایسه با سایر ابعاد آن، بالحظ کردن شرط کرنش مستوی ($\dot{\gamma}_y^r = 0$)، رابطه‌ی تنش-کرنش حاصل از از قانون هوک در محدوده رفتار ارجاعی خطی به شکل زیر در می‌آید:

$$\dot{\sigma}_x^r = \left[\frac{E^r}{(1-v^r)^2} \right] \dot{\varepsilon}_x^r, \quad \dot{\sigma}_y^r = \left[\frac{v^r E^r}{(1-v^r)^2} \right] \dot{\varepsilon}_x^r \quad (8)$$

تابع سطح تسلیم فاز جوشن (براساس معیار تسلیم ترسکا) به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$f^r(\sigma_i^r) = \sigma_x^r - \sigma_u^r \quad (9)$$

برای تعیین مشخصات مکانیکی تسلیح کننده‌ها نظریه تنش حد تسلیم E^{inc} ، مدول کشسان σ_u^{inc} و نسبت پواسون v^{inc} ، می‌توان با انجام آزمون کشش ساده بر روی لایه‌ی تسلیح کننده، پس از تعیین سختی (J^{inc}) و نیروی کشش نهایی بر واحد طول (T^u) آن، پارامترهای اشاره شده را برای یک لایه‌ی تسلیح کننده به ضخامت t به شکل زیر بدست آورد:

$$E^{inc} = J^{inc} / t \quad (10)$$

$$\sigma_u^{inc} = T^u / t \quad (11)$$

پس از ساده‌سازی روابط، تانسورهای تنش و کرنش فاز جوشن را می‌توان به شکل برداری زیر بیان نمود:

$$\begin{Bmatrix} \dot{\sigma}^r \\ \dot{\sigma}_{11}^r \\ \dot{\sigma}_{22}^r \\ \dot{\sigma}_{12}^r \end{Bmatrix} = \dot{\sigma}_x^r \begin{Bmatrix} \cos^2 \alpha \\ \sin^2 \alpha \\ \cos \alpha \sin \alpha \end{Bmatrix} \quad \text{و} \quad \begin{Bmatrix} \dot{\varepsilon}^r \\ \dot{\varepsilon}_{11}^r \\ \dot{\varepsilon}_{22}^r \\ \dot{\varepsilon}_{12}^r \end{Bmatrix} = \dot{\varepsilon}_x^r \begin{Bmatrix} \cos^2 \alpha \\ \sin^2 \alpha \\ \cos \alpha \sin \alpha \end{Bmatrix} \quad (12)$$

مدول یانگ فاز جوشن نیز از رابطه‌ی (۱۳) تعیین می‌گردد.

$$[E^r] = \frac{E^r}{(1-v^r)^2} \begin{bmatrix} \cos^4 \alpha & \cos^2 \alpha \sin^2 \alpha & \cos^3 \alpha \sin \alpha \\ \cos^2 \alpha \sin^2 \alpha & \sin^4 \alpha & \cos \alpha \sin^3 \alpha \\ \cos^3 \alpha \sin \alpha & \cos \alpha \sin^3 \alpha & \cos^2 \alpha \sin^2 \alpha \end{bmatrix} \quad (13)$$

۵. تلفیق دو فاز و تشکیل الگوی رفتاری محیط دوفازی

در این بخش به تشکیل معادله‌ی رفتاری محیط دوفازی، بر مبنای فرض پیوند کامل دو فاز ماتریس و جوشن پرداخته می‌شود. براساس این فرض، میدان تغییر شکل و درنتیجه کرنش هر دو فاز خاک (ماتریس) و تسلیح کننده یکسان هستند. بنابراین مطابق با شرط سازگاری کرنش‌ها داریم:

$$\dot{\underline{\underline{\varepsilon}}} = \dot{\underline{\underline{\varepsilon}}}^m = \dot{\underline{\underline{\varepsilon}}}^r \quad (14)$$

که در آن، $\dot{\underline{\underline{\varepsilon}}}$ تانسور نمو کرنش در کل محیط دوفازی و $\dot{\underline{\underline{\varepsilon}}}^m$ و $\dot{\underline{\underline{\varepsilon}}}^r$ به ترتیب تانسورهای نمو کرنش در فازهای ماتریس و جوشن است. تعداد خطهای نمایش داده شده در زیر حروف، نشان دهنده درجه تانسور است. همان‌طور که پیش تر بیان شد، تنش کلی $\dot{\underline{\underline{\sigma}}}$ در هر نقطه از محیط چند فازی، برابر است با مجموع تنش‌های جزئی فاز ماتریس $\dot{\underline{\underline{\sigma}}}^m$ و فاز جوشن $\dot{\underline{\underline{\sigma}}}^r$. بنابراین مطابق رابطه‌ی (۱۵)، تانسور نمو تنش $\dot{\underline{\underline{\sigma}}}$ در محیط دوفازی برابر است با مجموع تانسورهای نمو تنش جزئی دو فاز.

$$\dot{\underline{\underline{\sigma}}} = \dot{\underline{\underline{\sigma}}}^m + \dot{\underline{\underline{\sigma}}}^r \quad (15)$$

براساس فرض پیوند کامل میان فازها (رابطه‌ی ۱۴) می‌توان نوشت:

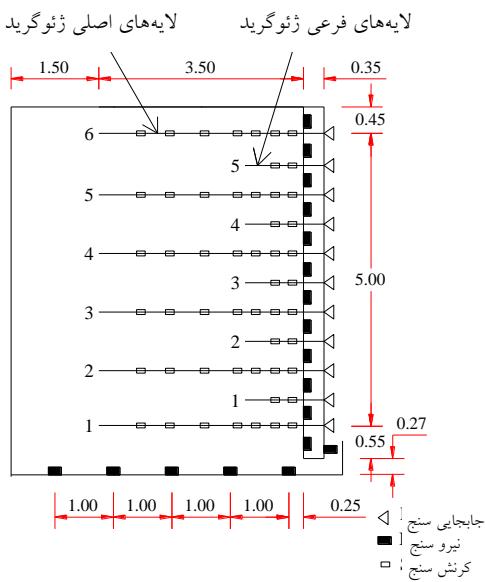
$$\dot{\underline{\underline{\sigma}}} = \left(A^m + E^r \right) : \dot{\underline{\underline{\varepsilon}}} \quad (16)$$

در روابط اشاره شده، تعداد خطوط زیرنویس نشان‌دهنده‌ی مرتبه‌ی تانسور و علامت ":" به معنای ضرب عددی دو تانسور است. A^m و E^r به ترتیب تانسورهای سختی فازهای ماتریس و جوشن هستند. رابطه‌ی (۱۶) شکل تانسوری رابطه‌ی کلی نمو تنش و کرنش در محیط دوفازی است. [۱۰]

۶. تحلیل دیوار خاک مسلح به روش محیط دوفازی

در این بخش به مطالعه‌ی رفتار دیوار خاک مسلح تمام مقیاس گزارش شده در پژوهش (Ling and Liu 2009) و مدل‌سازی عددی آن با استفاده از نرم‌افزار FLAC پرداخته می‌شود. مدل‌سازی این دیوار در حالت همگن با برنامه‌نویسی الگوی دوفازی توسعه یافته به زبان FISH در بستر نرم‌افزار FLAC صورت می‌گیرد. سپس نتایج تحلیل حالت همگن با نتایج حالت مجزا و اندازه‌گیری‌های واقعی مقایسه می‌گردد. دیوار مورد بررسی، یک دیوار خاک مسلح بلوکی قطعه‌ای است که رفتار آن در حین ساخت پیمایش شده است. مؤسسه‌ی تحقیقاتی امور عمومی (PWRI) در ژاپن متصدی

انجام مطالعات بر روی این دیوار بوده است. شرح کامل نحوه ساخت دیوار توسط تاجیری و همکاران [۱۲] ارائه شده است. هندسه دیوار و ابزار دقیق نصب شده بر روی آن در شکل ۲ آمده است. دیوار مورد بررسی شش متر ارتفاع داشته و مستقیماً بر روی یک کفه بتنی قرار گرفته است. خاکریز دانه‌ای پشت دیوار با تسلیح کننده‌های ژئوستیکی مسلح شده است. تسلیح کننده‌های اشاره شده از شش لایه اصلی به طول $3/5$ متر و پنج لایه فرعی به طول یک متر تشکیل شده‌اند. لایه‌های اصلی با فواصل یک متری نسبت به هم و لایه‌های فرعی نیز با همین فاصله در میان آن‌ها قرار گرفته‌اند. پوسته دیوار از ۱۲ بلوك با عرض ۳۰ سانتی متر و ارتفاع ۵۰ سانتی متر ساخته شده است. جهت اندازه گیری کرنش محوری لایه‌های ژئوستیک در مجموع از ۵۲ کرنش سنج استفاده شده است. تغییر مکان افقی پوسته دیوار در ۱۲ نقطه در راستای ارتفاع دیوار و نیروی جانبی که از طرف خاک بر پشت دیوار وارد می‌شود بوسیله ۱۱ مبدل نیرو اندازه گیری شده است. نیروی قائم ناشی از وزن خاکریز نیز در شش نقطه واقع بر کف آن مقدار سنجی شده است. دیوار خاک مسلح مورد ساخته تها تحت اثر وزن خود قرار داشته و سرباری به آن وارد نمی‌شود.



شکل ۲ - نمایش هندسه و ابزار دقیق دیوار خاک مسلح [۱۰] PWRI

در این پژوهش، جنس بتن کف و جبهه دیوار یکسان بوده، رفتار آن کشسان خطی در نظر گرفته شده است. مشخصات مکانیکی بتن مذکور، شامل وزن مخصوص، نسبت پواسون، مدول برشی و مدول حجمی (K) آن در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱ - مشخصات مکانیکی بتن پوسته دیوار خاک مسلح

K (KN/m ³)	G (MPa)	V (بی بعد)	γ (KN/m ³)
۱۰۱۰	۸۵۵	۰/۱۷	۲۳/۰

خاکریز پشت دیوار از ماسه سیلتی با وزن مخصوص $\gamma = 16.0 kN/m^3$ تشکیل شده است و پارامترهای رفتاری آن در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲ - مشخصات مکانیکی خاکریز دیوار خاک مسلح

γ (kN/m ³)	V	C (kPa)	ϕ	K_{pl}	K_{ur}	n	R_f
۱۶/۰	۰/۴۲	۱/۸۲	۳۹/۰	۲۷۶/۵	۷۰۰/۰	۰/۶۶۱	۰/۸۳

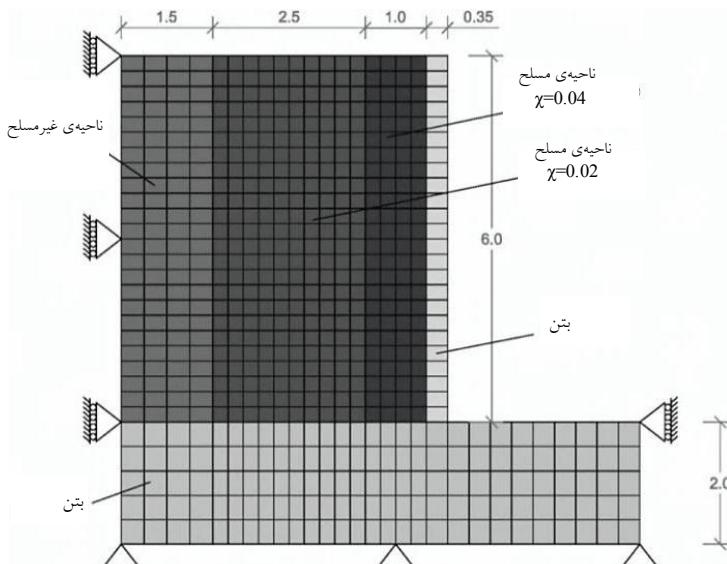
۷. مدل سازی به دو روش مجزا و دوفازی

شبیه سازی دیوار به دو حالت کلی همگن و مجزا انجام شد. پس از تحلیل دیوار بصورت مجزا، آن را بصورت همگن، مدل نموده و در نهایت نتایج

بدست آمده از این تحلیل‌ها با یکدیگر و مقادیر حقیقی اندازه‌گیری شده مقایسه می‌شود. در شکل ۳، مدل دوفازی شبیه‌سازی شده‌ی دیوار در نرم افزار FLAC نشان داده شده است. مراحل ساخت دیوار با تحلیل گام به گام آن در فواصل $0/5$ متری شبیه‌سازی گردید و کل دیوار در دوازده مرحله ساخته شد. برای مدل‌سازی دیوار مورد بحث، در حالت تحلیل مجزا، تعداد 804 زون در مدل شبیه‌سازی شده در FLAC در نظر گرفته شد که 208 عدد از آن‌ها مربوط به عناصر خطی (تعزیف شده به عنوان کابل) متناظر با لایه‌های تسلیح کننده بود. در حالت تحلیل همگن، 596 عدد زون در مدل دیوار (شکل ۳) بکار رفت. المان‌های مذکور مشتمل بر بخش‌های مختلف مدل مانند کفه‌ی بتی، بلوک‌های بتی و نواحی مسلح و غیرمسلح خاکریز است. همچنین 48 زون به عنوان عنصرهای فصل مشترک (میان بلوک‌ها، خاکریز و کفه‌ی بتی)، در هر دو حالت تحلیل همگن و مجزا در نظر گرفته شد. در مدل دیوار مورد بحث، میان جبهه‌ی بتی دیوار و خاکریز مجاور آن، بین کفه‌ی بتی و خاکریز بالای آن و نهایتاً میان بلوک‌های بتی پوسته‌ی دیوار عناصر فصل مشترکی با ضخامت صفر در نظر گرفته شدند. برای تمام عناصر فصل مشترک اشاره شده فرض اتصال کامل با اجزای مجاور لحاظ گردید. برای تعیین سختی عمودی (k_n) و برشی (k_s) عناصر مذکور از فرآیند سعی و خطابه‌ر گرفته شد؛ به نحوی که اولاً از بروز تغییر شکل‌های بیش از حد در مدل، بر اثر لغزش و یا گسیختگی اجزای طوفین فصل مشترک و ثانیاً افزایش زمان تحلیل (ناشی از انتخاب مقادیر بسیار بزرگ سختی) جلوگیری شود. [۱۳] بر این اساس، مقادیر مربوط به سختی‌های عمودی و برشی فصل مشترک‌های گوناگون، مطابق با جدول زیر تعیین شدند:

جدول ۳ - سختی‌های عمودی و برشی انتخاب شده برای فصل مشترک‌های گوناگون در مدل دیوار PWRI

k_n (MPa/m)	k_s (MPa/m)	نوع فصل مشترک
۲۰	۱۰	خاک - بتن
۶۰	۲۵	بتن - بتن

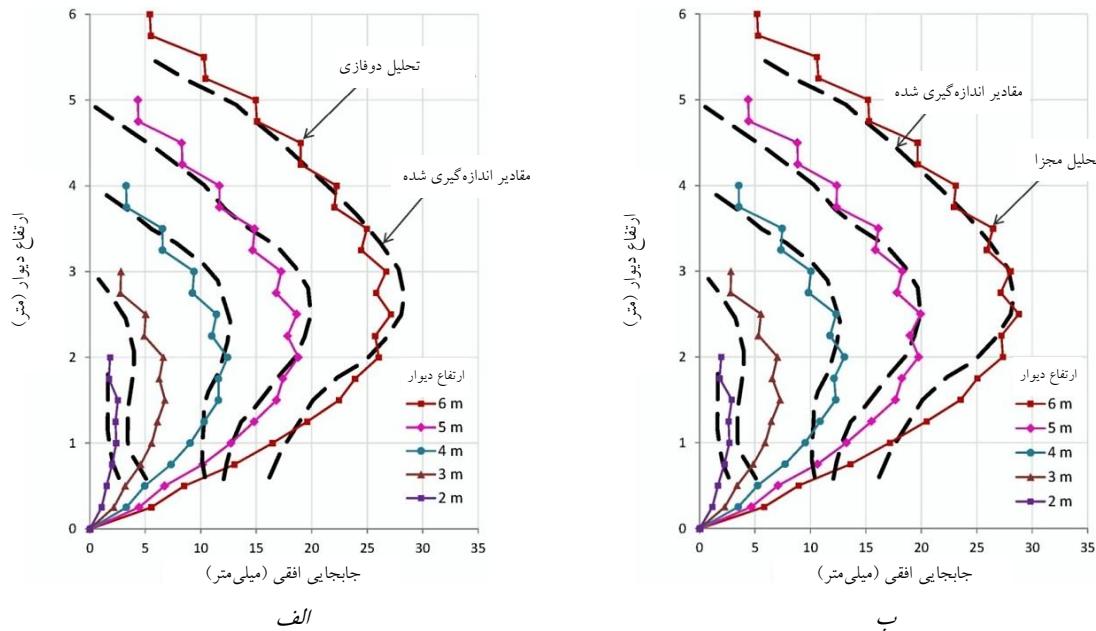


شکل ۳ - نمایش مدل شبیه‌سازی شده دیوار PWRI در FLAC

۸. ارائهٔ نتایج مربوط به جابجایی‌های افقی جبهه‌ی دیوار

شکل‌های ۴-الف و ب جابجایی افقی پوسته‌ی دیوار را در مراحل مختلف ساخت، به ترتیب در حالت تحلیل همگن و مجزا نشان می‌دهند. جابجایی‌های اندازه‌گیری شده در حالت واقعی نیز برای مقایسه در شکل‌های یاد شده آمده است. خط‌چین‌ها نمایندهٔ مقادیر واقعی و خطوط پیوسته دندانه‌دار بیان گر نتایج شبیه‌سازی‌های عددی هستند. با توجه به شکل ۴، انطباق مناسبی میان نتایج تحلیل دوفازی و مقادیر واقعی، خصوصاً برای ارتفاع چهار متر و بیشتر وجود دارد. با این حال به نظر می‌رسد در تحلیل دوفازی، حداکثر جابجایی جبهه‌ی دیوار که در نواحی میانی آن رخ می‌دهد اندکی دست پایین تخمین زده می‌شود؛ گرچه اختلاف اشاره شده بسیار اندک بوده و حداکثر حدود 10 درصد است. این طور به نظر می‌رسد که تحلیل مجزای دیوار با مدل دانکن-چانگ، جابجایی‌های حداکثر دیوار را بهتر پیش‌بینی می‌نماید؛ هرچند در ترازهای بالایی و پایینی دیوار، جابجایی‌های پیش‌بینی شده در این حالت کمی دست بالا به نظر می‌رسد. باید توجه نمود که تمام نتایج تحلیلی ارائه شده با فرض پیوند کامل میان فازها و چسبندگی کامل

عناصر فصل مشترک با محیط مجاور بدست آمده است که با توجه به دقت مناسب نتایج تحلیلی می‌توان نتیجه گرفت که این فرض‌های ساده کننده نزدیک به واقعیت هستند. البته باید توجه نمود که جابجایی‌های افقی جبهه در پایین دیوار بسیار کمتر از مقادیر حقیقی پیش‌بینی شده است که به نظر می‌رسد مهمترین عامل بروز آن فرض عدم لغزش خاکریز و بلوک‌های تحتانی پوششی دیوار نسبت به کفه‌ی بتی باشد. با این حال باید توجه نمود که خطای اشاره شده تنها در یک متر پایین جبهه‌ی دیوار قابل توجه بوده و در مجموع دقت الگوی دوفازی ارائه شده در پیش‌بینی جابجایی‌های افقی جبهه‌ی دیوار مناسب ارزیابی می‌شود.



شکل ۴ - مقایسه‌ی پروفیل جابجایی جبهه‌ی دیوار در مراحل مختلف ساخت با نتایج بدست آمده از (الف) تحلیل دوفازی با مدل ارائه شده و (ب) تحلیل مجزا با مدل دانکن- چانگ

۹. نتیجه‌گیری

در این مطالعه به توسعه‌ی روش محیط‌های دوفازی با بکار گیری مدل رفتاری هایپربولیک دانکن- چانگ در روابط محیط‌های دوفازی و شبیه‌سازی رفتار خاک توده‌ی مسلح با این مدل رفتاری پرداخته شد. سپس دیوار خاک مسلح تمام مقیاس PWRI به دو روش مجزا و دوفازی، به ترتیب با استفاده از مدل دانکن- چانگ و الگوی توسعه یافته پرداخته شد. پس از بررسی نتایج تحلیل به دو روش اشاره شده و مقایسه‌ی آن‌ها با مقادیر اندازه گیری شده، دقت مناسب الگوی دوفازی توسعه یافته تأیید گردید و نتایج زیر بدست آمد:

- با توجه به دقت مناسب نتایج بدست آمده از تحلیل مجزا دیوار با مدل دانکن- چانگ، به نظر می‌رسد که این مدل رفتاری، با وجود سادگی، پیش‌بینی‌هایی مناسب و نزدیک به واقعیت از رفتار دیوار خاک مسلح ارائه می‌دهد.
- با توجه به شباهت زیاد نتایج تحلیل دوفازی و مجزا دیوار خاک مسلح، می‌توان ادعا نمود که تحلیل دیوار با استفاده از روش محیط‌های دوفازی، پاسخ‌هایی شبیه و نزدیک به حالت مجزا ارائه می‌دهد. در حقیقت نوع روش تحلیل (همگن یا مجزا) بر رفتار دیوار تقریباً بی اثر است.
- با توجه به انطباق مناسب جابجایی‌های کلی جبهه‌ی دیوار بدست آمده از تحلیل‌های عددی و مقادیر اندازه گیری شده، می‌توان نتیجه گرفت که فرض پیوند کامل خاک و تسلیح کننده‌ها فرضی قابل قبول بوده و تأثیر زیادی بر مقدار جابجایی‌های کلی جبهه‌ی دیوار ندارد.
- با توجه به دقت مناسب نتایج تحلیل عددی دیوار خاک مسلح به روش محیط دوفازی نسبت به مقادیر اندازه گیری شده، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از روش محیط‌های چندفازی، خصوصاً در حالت توسعه یافته با مدل رفتاری دانکن- چانگ، پیش‌بینی‌های مناسبی از عملکرد دیوار (دست کم در کرنش‌های نسبتاً اندک و شرایط بدون سربار) ارائه می‌دهد.

۱۲. مراجع

۱. فاخر، ع. (۱۳۹۰) مهندسی پی پیشرفت: انتشارات دانشگاه تهران.

2. Herrmann, L., K. Welch, and C. Lim (1984) "Composite FEM Analysis for Layered Systems," Journal of Engineering Mechanics, Vol. 110, No. 9, pp 1284-1302.
3. Sudret, Bruno (1999) "Modélisation multiphasique des ouvrages renforcés par inclusions." Thèse de doctorat de Ecole Nationale des Ponts et Chaussées: Paris, p 364.
4. Seyed Hosseininia, Ehsan, and Orang Farzaneh (2010) "Development and Validation of a Two-Phase Model for Reinforced Soil by Considering Nonlinear Behavior of Matrix," Journal of Engineering Mechanics, Vol. 136, No. 6, pp 721-735.
5. Kondner, R. L. (1963a) "A Hyperbolic Stress-Strain Formulation for Sands," Proceedings, 2nd Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering. Brazil, pp 289-324.
6. Kondner, R. L. (1963b) "Hyperbolic Stress-Strain Response: Cohesive Soils," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 89, pp 115-143.
7. Duncan, James M., and Chin-Yung Chang (1970) "Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils," Soil Mechanics and Foundation Division ASCE, Vol. 96, pp 1629-1653.
8. Janbu, Nilmar (1963) "Soil Compressibility as Determined by Oedometer and Triaxial Tests," European Conference on Soil Mechanics & Foundations Engineering. Wiesbaden, Germany, pp 19-25.
9. Sudret, Bruno, and Patrick de Buhan (2001) "Multiphase model for inclusion-reinforced geostructures: Application to rock-bolted tunnels and piled raft foundations," International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 25, No. 2, pp 155-182.
10. سیدی حسینی نیا، س.ا. (۱۳۸۸) "توسعه مدل چندفازه برای تحلیل توده خاک مسلح" رساله دکتری، دانشکده مهندسی عمران: دانشگاه تهران.
11. Ling, Hoe I., and Huabei Liu (2009) "Deformation analysis of reinforced soil retaining walls—simplistic versus sophisticated finite element analyses" Acta Geotechnica, Vol. 4, No. 3, pp 203-213.
12. Tajiri, N., H. Sasaki, J. Nishimura, Y. Ochiai, and K. Dobashi (1996) "Full-scale failure experiments of geotextile-reinforced soil walls with different facings," Earth reinforcement, pp 525-530.
13. Hatami, K., and R.J. Bathurst (2005) "Development and verification of a numerical model for the analysis of geosynthetic reinforced soil segmental walls under working stress conditions," Canadian Geotechnical Journal, Vol. 42, No. 4, pp 1066-1085.



Faculty of Civil Engineering
Shahid Rajae Teacher Training University
3-4 December 2014
Tehran, Iran

جشنواره ملی نخستین کنفرانس ملی مکانیک خاک و مهندسی پایه

*The First National Conference on
Soil Mechanics and Foundation Engineering*

گواهی پذیرش مقاله

شناسه مقاله: A-10-1276-1

نویسنده (گان): سیاوش هنری، سید احسان سیدی حسینی نیا

عنوان مقاله: بررسی تغییر شکل افقی دیوار خاک مسلح به روش محیط دوفازی و مدل رفتاری هایپربولیک

با سپاس ویژه از نویسنده (گان) فرهیخته، بنابراین گواهی، اعلام می دارد مقاله ایشان توسط کمیته علمی نخستین «کنفرانس ملی مکانیک خاک و مهندسی پایه» به صورت سخنرانی پذیرفته شده و در مجموعه مقالات کنفرانس به چاپ رسیده است.

دکتر سعید غفاری پور جهرمی
دبیر کنفرانس



دانشگاه تربیت دیر شید رجایی
دانشکده مهندسی عمران
۱۳۹۳ و ۱۲ آبان
تهران - ایران