

شبیه‌سازی ناهمسانی در سنگ نرم با استفاده از یک مدل

چندصفحه

رضا مهین‌روستا^{۱*}، نسرين جعفری^۲

۱- مدیر بخش مکانیک خاک و سنگ، شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، تهران

۲- کارشناس ارشد عمران- مکانیک خاک و پی، دانشگاه زنجان

reza.mahinroosta@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۳/۲۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۷/۰۹

چکیده- به خاطر ساختار ذره‌ها فرایند رسوبگذاری و بارگذاری‌های متعاقب، مصالح ژئوتکنیکی از خود رفتار ناهمسانی نشان می‌دهند. در این مقاله تاثیر ناهمسانی در رفتار برشی توده سنگ نرم بررسی می‌شود. ازین رو مدلی در چارچوب مدل‌های چندصفحه ارائه شده است که رفتار تغییر شکل توده را به وسیله‌ی پاسخ روی چندین صفحه تماسی بیان می‌کند. سطح تسلیم، قانون جریان و سخت‌شوندگی، روی صفحه‌ها فرمول‌بندی شده و ناهمسانی مواد رسوبی با در نظر گرفتن ویژگی‌های مقاومتی مختلف، روی صفحات فرضی مدل چندصفحه، شبیه‌سازی می‌شود. اگر تعداد صفحات از حدی کمتر باشد، از مدل ارائه شده می‌توان برای شبیه‌سازی توده سنگ درزه‌دار بهره برد. درحالی‌که با ارائه توابع تسلیم متفاوت روی تعداد زیادی از صفحات با پخش یکنواخت، رفتار سنگ نرم رسوبی، ناهمسان است. مدل چند صفحه به صورت مدل رفتاری به نرم‌افزار تفاضل محدود Flac اضافه شده و پس از بررسی درستی آن با روش حل بسته، از آن برای شبیه‌سازی رفتار ناهمسان یک نوع سنگ رسوبی استفاده شده است. در نهایت، شبیه‌سازی پایداری شیروانی از مصالح ناهمسان ارائه است.

واژگان کلیدی: ناهمسانی، مقاومت برشی، مدل چند صفحه، درزه، سنگ نرم رسوبی.

۱- مقدمه

ناهمسانی ذاتی که با ناهمسانی فابریک مرتبط است، موجب ناهمسانی در مقاومت می‌شود و وقوع این نوع ناهمسانی در شرایط سطح تنش اولیه همسان نیز ممکن است. ناهمسانی تحمیلی، مربوط به ناهمسانی رفتار خاک در اثر وابستگی رفتار به راستای بارگذاری، طی سطح تنش ناهمسان اولیه است حتی اگر خاک؛ رفتار همسان در مقاومت داشته باشد. افزون بر تعریف بالا، Zdravković و Potts ترکیب ناهمسانی ذاتی و ناهمسانی تحمیلی را

رفتار مکانیکی برخی نهشته‌های طبیعی به خاطر ساختار ذرات، فرایند رسوب و تاریخچه بارگذاری متعاقب، ناهمسان است. مقاومت مواد ناهمسان با تغییر راستای بارگذاری، تغییر می‌کند و ویژگی‌های آن در راستاهای مختلف، متفاوت است. Casagrande و Carrillo ناهمسانی ناشی از رسوب را ناهمسانی ذاتی و ناهمسانی ناشی از بارگذاری‌های متعاقب را ناهمسانی تحمیلی نامیدند [۱].

چندصفحه دیگری به وسیله *Wiltafsky* گسترش یافت که ناهمسانی در رس نرم را بدون نیاز به پارامترهای رفتاری جدید، مدل سازی کرد [۷]. مهبین روستا و همکاران، رفتار سخت شونده و نرم شونده برشی در توده سنگ را با استفاده از مدل چندصفحه بررسی کردند [۸]. مدل *Wiltafsky* به وسیله *Galavi* اصلاح و ناهمسانی ذاتی در مقاومت برشی به آن اضافه شد [۹]. و آثار سختی در کرنش های کوچک نیز، به وسیله *Scharinger* بر آن افزوده شد [۱۰]. *Schweiger* و همکاران، اثر ناهمسانی بر رفتار خاک های عادی تحکیم یافته و پیش تحکیم یافته را به روش مدل چندصفحه بررسی کردند. ایشان پایداری شیروانی خاکی را نیز با مدل چندصفحه بررسی کردند [۱۱] که از نتایج آن در این پژوهش استفاده شده است.

در این مقاله مدل سازی ناهمسانی مصالح با دو روش مختلف در قالب مدل چندصفحه بررسی است؛ یکی استفاده از صفحه ناهمسان و دیگری استفاده از صفحات یکسان لغزش با پارامترهای مختلف مقاومتی. در حالت نخست مدل سازی به صورت شبیه سازی آزمایش مقاومت فشاری تک محوری انجام شده است و در حالت دوم، مصالح ناهمسان رسوبی تحت آزمایش برش دو محوری، شبیه سازی شده است. شیروانی شبیه سازی شده به وسیله *Schweiger* و همکاران [۱۱] نیز با مدل ارائه شده شبیه سازی شده و نتایج حاصل با هم مقایسه شده است. در این حالت، ناهمسانی در پارامترهای مقاومت برشی (زاویه اصطکاک و چسبندگی) لحاظ شده است و مدل سازی برای انواع مقادیر ضریب ناهمسانی و در زوایای مختلف مصالح رسوبی انجام و نتایج بررسی شده است. معیار گسیختگی در هر صفحه مدل چند صفحه، معیار گسیختگی موهر - کلمب بوده و مدل گفته شده به صورت برنامه جانبی در قالب مدل های رفتاری به برنامه تفاضل محدود

ناهمسانی اولیه نامیدند [۲]. در مورد درزه ها یا شکاف های داخل سنگ ها نیز نوعی ناهمسانی پدید می آید که ممکن است تأثیر آن از ناهمسانی مربوط به لایه بندی بسیار زیادتر باشد، زیرا وجود درزه نقطه ضعف در توده سنگ به وجود می آورد. نادیده گرفتن ناهمسانی در مدل سازی مواد ژئوتکنیکی موجب پیش بینی نادرست رفتار آن می شود. در این مقاله، مدل سازی ناهمسانی بر پایه ی مدل چندصفحه بررسی می شود. مدل چندصفحه، رفتار تغییر شکل خاک را به وسیله ی پاسخ روی چندین صفحه تماسی بیان می کند که در آن ها سطح تسلیم، قانون جریان و سخت شوندگی، جداگانه فرمول بندی می شود. در شرایط ناهمسانی، منحنی تسلیم در صفحه های مختلف فرضی، متفاوت است و این موجب ناهمسانی در پیش بینی رفتار تنش - کرنش می شود. گسترش مدل های ساخته شده بر پایه ی ساختار چندصفحه با پشتوانه تئوری لغزش برای رفتار پلاستیک مواد، نخستین بار به وسیله *Taylor* بیان شد [۳]. در حالی که نخستین مدل چندصفحه برای مواد ژئوتکنیکی، به وسیله *Pande* و *Zienkiewicz* بیان شد [۴]. آن ها فرض کردند که ناهمسانی مشخص در سنگ درزه دار می تواند با دخالت دادن شماری از صفحه های بیان کننده مجموعه درزه ها به حساب آورده شود. روی این صفحه ها، مقدار لغزش و بازشدگی با فرمول بندی در مختصات محلی بیان می شود. رفتار کلی ماده از مجموعه این صفحه های ضعیف به دست می آید. در مدل چندصفحه ای که به وسیله *Sharma* و *Pande* برای رس به کار گرفته شد، اثر چرخش محورهای اصلی و ناهمسانی با استفاده از ۱۳ صفحه، بررسی شد [۵]. توضیحی از ناهمسانی ذاتی در ساختار چندصفحه به وسیله *Pietruszczak* و *Pande* بیان شد که در آن چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در مدل موهر - کلمب روی صفحه های فرضی، تابعی از جهت گیری نمونه است [۶]. مدل

Flac اضافه شده و درستی آن با تحلیل‌های حل بسته ویژه کنترل شده است.

محلی و پارامتر سخت شوندگی (k_i) در آن صفحه است:

$$f_i = f_i(\sigma'_i, k_i) \quad (2)$$

k_i تابعی از کرنش پلاستیک نرمال (عمود بر صفحه) $(\epsilon_{\gamma}^p)_i$ و کرنش پلاستیک برشی (مماس بر صفحه) $(\epsilon_{\gamma}^p)_i$ است. با استفاده از تئوری پلاستیسیته، نمو کرنش پلاستیک در صفحه i با استفاده از قانون جریان به صورت زیر بیان می‌شود:

$$d\epsilon_i^p = dA_i \frac{\partial g_i}{\partial \sigma'_i} \quad (3)$$

dA_i ، نمو ضریب پلاستیک و g_i تابع پتانسیل خمیری مطابق با تنش‌های صفحه i است. برای تعیین نرخ کرنش پلاستیک در همه‌ی توده خاک، لازم است همه‌ی صفحات فعال مشارکت داشته باشند؛ این کار با انتگرال‌گیری بر سطح کره فرضی با شعاع واحد (S) امکان پذیر است [۱۳]:

$$d\epsilon^p = \int_S T_i d\epsilon_i^p dS = \int_S dA_i T_i \frac{\partial g_i}{\partial \sigma'_i} dS \quad (4)$$

اگر n تعداد نقاط انتگرال‌گیری (تعداد صفحات) و w_i وزن مربوط به هر صفحه باشد که میزان مشارکت هر صفحه در نمو کرنش پلاستیک کل را تعیین می‌نماید، انتگرال‌گیری فوق به صورت مجموع وزنی زیر در می‌آید:

$$d\epsilon^p = \sum_{i=1}^n dA_i T_i \frac{\partial g_i}{\partial \sigma'_i} w_i \quad (5)$$

در این پژوهش در شرایط کرنش مسطح، تابع تسلیم روی صفحات نمونه فرضی تابع تسلیم موهرکلمب است که از دو قسمت جداگانه و مستقل "تابع تسلیم برشی" و "تابع تسلیم کششی" تشکیل شده است. همچنین روابط رفتاری در حالت کرنش مسطح است؛ در این صورت انتگرال‌گیری

۲- روش چندصفحه

اساس محاسبه در این مدل، انتگرال عددی از یک تابع مشخص ریاضی با گسترش در سطح یک کره با شعاع یک است. این تابع ریاضی می‌تواند تغییرات ویژگی‌های فیزیکی را در سطح کره بیان کند. سطح کره فرضی با شعاع یک در انتگرال‌گیری عددی می‌تواند با تعداد بی شماری صفحات تخت که مماس بر نقاط مختلف کره است تقریب زده شود. به این ترتیب هریک از صفحات یاد شده، یک نقطه تماس با سطح کره داشته که با محدود کردن این صفحات، تعداد نقاط تماس یا نقاط مبنا نیز قابل تعریف است و در محاسبه انتگرال عددی، می‌توان مقدار کمیت دارای گسترش روی سطح کره را در نقاط یاد شده به دست آورد [۱۲]. به این ترتیب، تغییر شکل کلی خاک از لغزش صفحات فرضی تحت تنش‌های نرمال مؤثر σ'_n و تنش‌های برشی τ که از تانسور تنش عمومی به دست می‌آید، محاسبه می‌شود.

نخست، در هر نقطه از توده سنگ، تنش‌های حاصل از تحلیل الاستیک به دست می‌آیند. اگر فرض شود i یک صفحه از n صفحه‌ای باشد که امکان لغزش در آن وجود دارد، بردار تنش محلی در صفحه i ، از تبدیل تنش کلی به وسیله‌ی ماتریس تبدیل T_i بدست می‌آید:

$$\sigma'_i = \begin{bmatrix} \sigma'_n \\ \tau \end{bmatrix} = (T_i)^T \cdot \sigma' \quad (1)$$

σ'_i بردار تنش محلی و σ' تنش مؤثر سراسری است و i به صفحه i اشاره می‌کند. σ'_n بردار تنشی عمود بر صفحه و τ بردار تنش برشی در صفحه (مماس بر صفحه) است.

تابع تسلیم f_i برای i امین صفحه، تابعی از تنش‌های

زاویه بین راستای صفحات فرضی با افق، پارامترهای مقاومت بر هر صفحه با توجه به راستای آن صفحه و ویژگی‌های مقاومتی نمونه در راستای صفحه رسوبی و صفحه عمود بر آن، محاسبه و بررسی شده و خطای موجود اعلام شده است.

در هر مرحله محاسباتی، تنش‌های سراسری جدید از نمو کرنش اعمال شده و تنش‌های سراسری مرحله پیش با فرض کرنش الاستیک به دست می‌آید. در توده سنگ، امکان تسلیم برشی و کششی در سنگ سالم نیز بررسی می‌شود و در صورت تسلیم، تنش‌های سراسری جدید با توجه به کرنش‌های پلاستیک، اصلاح می‌شوند. پس از این تنش‌های محلی، با استفاده از تنش‌های سراسری و راستای هر صفحه، در هر صفحه، مدل چندصفحه به دست می‌آید و امکان تسلیم در صفحات ضعیف (در توده سنگ) یا صفحات مدل چندصفحه (در مصالح رسوبی) کنترل می‌شود. در این مرحله تسلیم برشی و کششی در تک تک صفحات کنترل می‌شود. حد تسلیم برشی (f_i^s) و کشش (f_i^t) و تابع پتانسیل کششی (g_i^s) و برش g_i^t روی صفحه نام به ترتیب به صورت زیر است:

$$f_i^s = -\tau - (\sigma'_{22})_i \tan \phi_i + c_i \quad (7)$$

$$f_i^t = \sigma'_i - (\sigma'_{22})_i \quad (8)$$

$$g_i^s = -\tau - (\sigma'_{22})_i \tan \psi_i \quad (9)$$

$$g_i^t = -(\sigma'_{22})_i \quad (10)$$

σ'_i, ϕ_i, c_i و ψ_i به ترتیب چسبندگی، زاویه اصطکاک، مقاومت کششی و زاویه اتساع در آمین صفحه فرضی مدل چند صفحه است. کرنش‌های پلاستیک ایجاد شده در هر صفحه (اگر تسلیم روی داده باشد)، محاسبه و تغییر تنش‌های سراسری ناشی از کرنش پلاستیک هر صفحه محاسبه می‌شود. تغییر تنش سراسری مربوط به هر صفحه

به جای یک کره، روی یک دایره انجام شده است. در این حالت، روش ساده‌تر، استفاده از پخش یکنواخت صفحات است. تعداد صفحات فرضی (n) در این پژوهش ۳۲ است (تعداد نقاط تماس با سطح دایره، ۶۴ عدد است). وزن صفحات با فرض پخش یکنواخت از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$w_i = \frac{1}{n} \quad (6)$$

۳- مدل سازی ناهمسانی در مدل چندصفحه

در این مقاله، مدل‌سازی ناهمسانی مصالح با دو روش در قالب مدل چندصفحه بررسی شده است؛ یکی استفاده از صفحه ناهمسان و دیگری استفاده از صفحات یکسان لغزش با پارامترهای مختلف مقاومتی. حالت نخست برای مدل‌سازی درزه به کار می‌رود و محاسبات در درزه‌ها و توده سالم، جداگانه انجام می‌گیرد. در واقع این قسمت از مدل، تعمیم یافته مدل Ubiquitous-Joint است [۱۴] که به وسیله مؤلفین مقاله به نرم‌افزار Flac اضافه شده است. مدل پایه Ubiquitous-Joint از مدل‌های رفتاری موجود در نرم‌افزار Flac است که توانایی حل یک درزه را دارد. در مدل تهیه شده اگر تعداد صفحات فرضی مدل چند صفحه (n) کمتر از ۵ باشد، مقادیر پارامترهای توده سنگ درزه‌دار بررسی می‌شود و خطاهای موجود اعلام می‌شود، سپس زاویه بین هر درزه و راستای افق محاسبه است.

اگر تعداد صفحات (n) بیشتر از ۵ باشد، مدل‌سازی ناهمسانی به روش استفاده از صفحات یکسان لغزش با پارامترهای مختلف مقاومتی انجام می‌شود. پارامترهای مقاومتی صفحات فرضی مدل چند صفحه با وزن یکسان، وابسته به راستای صفحه است. این روش برای مدل‌سازی مصالح رسوبی کاربرد دارد. در این حالت پس از محاسبه

$$su(i) = \frac{su(h)su(v)}{\sqrt{su(h)^2 \cos^2 \beta + su(v)^2 \sin^2 \beta}} \quad (12)$$

روش سوم برای در نظر گرفتن ناهمسانی در مقاومت، در مدل چندصفحه، نشان دادن زوایای اصطکاک بیشینه روی صفحات فرضی، مطابق با تانسور ریزساختار است که به‌وسیله‌ی Mroz و Pietruszczak ارائه شده است [۱۷]. تانسور ریزساختار A، بیان‌کننده بخش فضایی پارامترهای ماده است. اگر $e^{(1)}, e^{(2)}, e^{(3)}$ راستاهای اصلی تانسور A باشند، رابطه زیر برقرار خواهد بود:

$$A_{ij} = a_1 e_i^{(1)} e_j^{(1)} + a_2 e_i^{(2)} e_j^{(2)} + a_3 e_i^{(3)} e_j^{(3)} \quad (13)$$

که a_1, a_2, a_3 ، مقادیر اصلی A است و A ماتریس متقارن است.

محاسبه اثر تانسور A در راستا بارگذاری و یا هر راستا دلخواه دیگر، با فرض بردار n، به عنوان بردار واحد که تعیین‌کننده هر راستای دلخواه در سامانه محورهای اورتونرمال $e^{(1)}, e^{(2)}, e^{(3)}$ است، امکان‌پذیر است:

$$a = An.n = A_{ij} n_i n_j \quad (14)$$

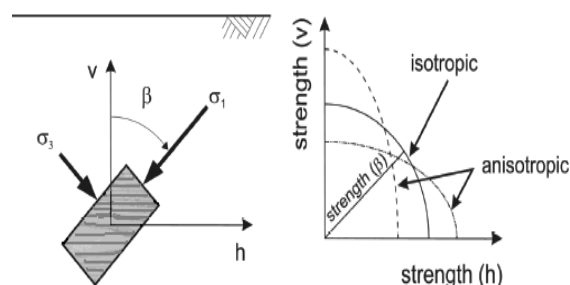
پارامتر اسکالر a می‌تواند مقاومت یا هر ویژگی دیگر ماده در راستای n باشد. قسمت نرمال‌شده انحرافی (Ω) تانسور ریزساختار به شکل زیر معرفی است:

$$\Omega_{ij} = \frac{A_{ij} - \frac{1}{3} S_{ij} A_{kk}}{\frac{1}{3} A_{kk}} \quad (15)$$

S_{ij} دلتای کرونگر است، Ω نیز یک تانسور متقارن است و $S_{ii} = 0$. در حالت ناهمسانی متقاطع (Cross anisotropy) که در آن ویژگی‌های مصالح در همه‌ی راستاهای افقی، یکسان و در راستای عمودی، متفاوت است، دو مقدار مشخص از

در وزن آن صفحه (ω_i) ضرب می‌شود و در نهایت، مجموع مقادیر به دست آمده به تنش‌های سراسری مرحله قبل اضافه و تنش‌های سراسری جدید به دست می‌آید.

در این پژوهش ناهمسانی در مقاومت مصالح با سه روش مختلف بررسی شده است. با توجه به شکل ۱، نمونه‌ای از خاک رسوبی را در نظر بگیرید که تحت بارگذاری سه محوری قرار دارد به‌گونه‌ای که راستای تنش اصلی σ_2 ، با راستای عمود بر صفحه رسوبی، زاویه β می‌سازد.



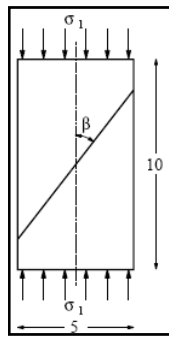
شکل (۱) تغییر مقاومت با تغییر راستای صفحه رسوبی [۹]

در روش نخست، از رابطه زیر که به‌وسیله‌ی Carillo و Casagrande (۱۹۴۴) برای محاسبه اثر راستاگیری در مقاومت برشی زهکشی‌نشده ارائه شده است [۱۵]، استفاده شده

$$su(i) = su(h) + (su(v) - su(h)) \cos^2 \beta \quad (11)$$

$su(v)$: مقاومت برشی زهکشی‌نشده در راستای قائم،
 $su(h)$: مقاومت برشی زهکشی‌نشده در راستای افقی و
 $su(i)$: مقاومت برشی زهکشی‌نشده خاک در حالتی است که تنش نرمال بیشینه، راستای زاویه β با عمودی می‌سازد.

در روش دوم، رابطه زیر برای رفتار ناهمسان مقاومت برشی مصالح ارائه شده که در آن پارامترها همان پارامترهای رابطه ۱۱ است. این رابطه را نیز Richardson ارائه داده است [۱۶].



شکل (۲) هندسه مدل

جدول (۱) پارامترهای مدل

n	ϕ_j, deg	C_j, Kpa	ϕ, deg	C, Kpa	K, Mpa	G, Mpa	$\rho, \text{kg/cm}^3$
۳ و ۱،۲	30°	1	40°	2	100	70	2000

بارگذاری به صورت کنترل کرنش با نرخ ثابت است و نسبت ارتفاع به طول نمونه، ۲ است. پارامترهای مدل نیز در جدول ۱ نشان داده شده است که در آن، n تعداد صفحات مدل، ρ جرم حجمی، G مدول برشی، K مدول حجمی، C و ϕ به ترتیب، چسبندگی و زاویه اصطکاک در نمونه سالم و C_j و ϕ_j به ترتیب چسبندگی و زاویه اصطکاک سطح ضعیف (درزه) است. حل تحلیلی این مسئله برای شرایط آزمایش سه محوری به وسیله Jaeger و Cook (۱۹۷۹) ارائه شده است [۱۸]. با توجه به نتایج کار ایشان، مقاومت فشاری تک محوری (σ_c) برای یک نمونه درزه دار از روابط پایش به دست می آید. لغزش روی صفحه ضعیف هنگامی رخ می دهد که $(1 - \tan \phi_j \tan \beta) > 0$ باشد؛ در این صورت:

$$\sigma_c = \min \left\{ 2c \sqrt{N\phi}, \frac{2c_j}{(1 - \tan \phi_j \tan \beta) \sin 2\beta} \right\} \quad (21)$$

در غیر این صورت، لغزش در سنگ سالم اتفاق می افتد و مقدار مقاومت تک محوری به صورت زیر بدست خواهد آمد:

$$\sigma_c = 2c \sqrt{N\phi} \quad (22)$$

Ω وجود دارد و تانسور $\Omega^{(2)}$ بردار واحد در راستای عمودی است) به شکل زیر است:

$$\Omega = \begin{bmatrix} -\Omega_v/2 & 0 & 0 \\ 0 & \Omega_v & 0 \\ 0 & 0 & -\Omega_v/2 \end{bmatrix}, \Omega_v = \frac{2(a_2 - a_1)}{a_2 + 2a_1} \quad (16)$$

در a_1 و a_2 مقادیر اصلی A است. با استفاده از رابطه ۱۴، در حالت ناهمسانی متقاطع و تعریف A_r (ضریب ناهمسانی) به عنوان مقاومت در راستای عمودی (a_v) به راستای افقی (a_h)، خواهیم داشت:

$$a = a_0 \left\{ 1 - \frac{A_r - 1}{A_r + 2} [1 - 3(n_v)^2] \right\} \quad (17)$$

که در آن:

$$A_r = \frac{a_v}{a_h} = \frac{1 - \Omega_v}{1 - (\Omega_v/2)}, a_0 = \frac{1}{3} a_{ii} \quad (18)$$

n_v مولفه عمودی بردار واحد در راستایی است که مقدار a محاسبه می شود.

بنابراین مقادیر زاویه اصطکاک و چسبندگی در

راستاهای مختلف از روابط زیر محاسبه می شود:

$$C = C_0 \left\{ 1 - \frac{A_r - 1}{A_r + 2} [1 - 3(n_v)^2] \right\} \quad (19)$$

$$\phi = \arctan \left[\tan \phi_0 \left\{ 1 - \frac{A_r - 1}{A_r + 2} [1 - 3(n_v)^2] \right\} \right] \quad (20)$$

۴- بررسی درستی مدل ارائه شده

بر اساس شکل ۲، نمونه درزه دار، تحت آزمایش تک محوری مدل سازی شده است، راستای درزه با راستای قائم نمونه، زاویه β را می سازد.

درجه تغییر می‌کند. تنش همه‌جانبه $T\sigma_3 = 1\text{Mpa}$ بوده و تعداد صفحات ۳۲ است. فرض شده است، k_c ضریب ناهمسانی مربوط به چسبندگی و مساوی با نسبت چسبندگی در راستای عمود بر صفحه رسوبی c_v به چسبندگی در راستای صفحه رسوبی c_h باشد) $(k_c = c_v / c_h)$. نیز ضریب ناهمسانی مربوط به زاویه اصطکاک و برابر با نسبت تانژانت زاویه اصطکاک در راستای عمود بر صفحه رسوبی (ϕ_v) به تانژانت زاویه اصطکاک در راستای صفحه رسوبی (ϕ_h) است $(k_f = \tan \phi_v / \tan \phi_h)$. پارامترهای استفاده‌شده در مدل‌سازی نمونه در جدول ۲ دیده است.

جدول (۲) پارامترهای مدل

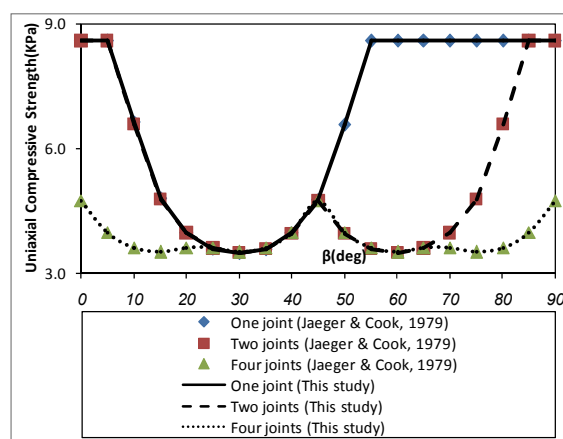
n	C_h, Kpa	ϕ_h, deg	K, Mpa	G, Mpa	$\rho, \text{kg/cm}^3$
۳۲	۱۰	۳۰	۱۰۰	۷۰	۲۰۰۰

در شکل ۴، ناهمسانی به وسیله روابط Casagrande و Carillo (۱۵)، Richardson (۱۶) و بخش فضایی پارامترهای مقاومت [۱۷] در نمونه‌ای که $k_c = 2$ و $k_f = 1$ است، نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، منحنی حاصل از رابطه Casagrande و Carillo منطبق بر نمودار حاصل از روابط پنخ فضایی ناهمسانی است. در هر دو حالت با تغییر زاویه بارگذاری بر مبنای شکل ۱، یعنی تغییر زاویه نمونه‌گیری، تنش انحرافی از یک مقدار بیشینه در زاویه $\beta = 0^\circ$ (تنش اصلی بیشینه عمود بر راستای صفحه رسوب)، به یک مقدار کمینه در زاویه $\beta = 90^\circ$ (تنش اصلی بیشینه هم‌راستا با صفحه رسوب که در این نمونه چسبندگی کمتر دارد) میل می‌کند. مقدار بیشینه تنش انحرافی در منحنی حاصل از رابطه Richardson در زاویه‌ای غیر از زاویه $\beta = 0^\circ$ است. در هر سه حالت، هنگامی که $\beta = 90^\circ$ می‌شود، کمترین تنش انحرافی حاصل می‌شود.

مقاومت سنگ سالم است، و $N\phi$ از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$N\phi = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (23)$$

نتایج مدل‌سازی انجام‌شده در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۳، نتایج مدل‌سازی برای یک، دو و چهار دسته درزه با روابط ارائه‌شده مطابقت می‌کند و درستی مدل را نشان می‌دهد. با افزایش تعداد درزه‌ها، وابستگی مقاومت به راستای بارگذاری (ناهمسانی)، کمتر می‌شود و عملاً مقاومت توده سنگ به مقاومت قسمت ضعیف آن یعنی درزه‌ها متمایل است.

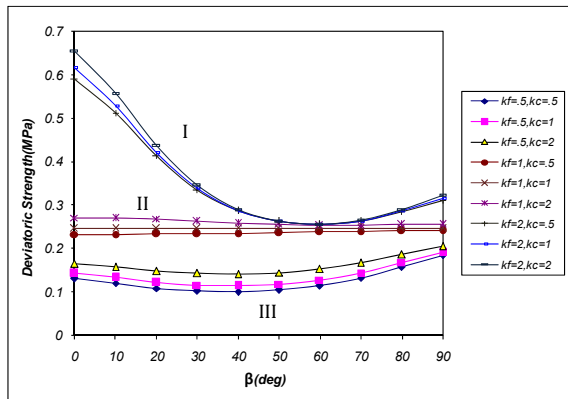


شکل (۳) وابستگی مقاومت فشاری تک‌محوری به راستای درزه

۵- حساسیت مدل به زاویه رسوبگذاری و نسبت ناهمسانی

در این بخش، مدل‌سازی مصالح تحت آزمایش مقاومت برشی دو محوری (biaxial) انجام شده است. نمونه مورد نظر، همان شکل ۱ است، با این تفاوت که زاویه β راستای رسوبگذاری را نشان می‌دهد. در این مدل‌سازی صفحات مختلف، زاویه اصطکاک و چسبندگی مختلفی دارند. کرنش، ثابت است و بارگذاری به صورت کنترل کرنش انجام شده است. زاویه β (زاویه رسوبگذاری) از ۰ تا ۹۰

است و به ترتیب وقتی k_c ، برابر با ۲ و ۰.۵ باشد، بالا و پایین منحنی همسان قرار می‌گیرد. بنابراین روشن است که در این نمونه به خاطر مقدار کم چسبندگی، تاثیر ناهمسانی در اصطکاک بر تنش انحرافی، بیشتر از ناهمسانی در چسبندگی است و هنگامی که k_f ، بزرگتر از ۱ است، این تاثیر بیشتر از حالتی است که k_f ، کوچکتر از ۱ است.

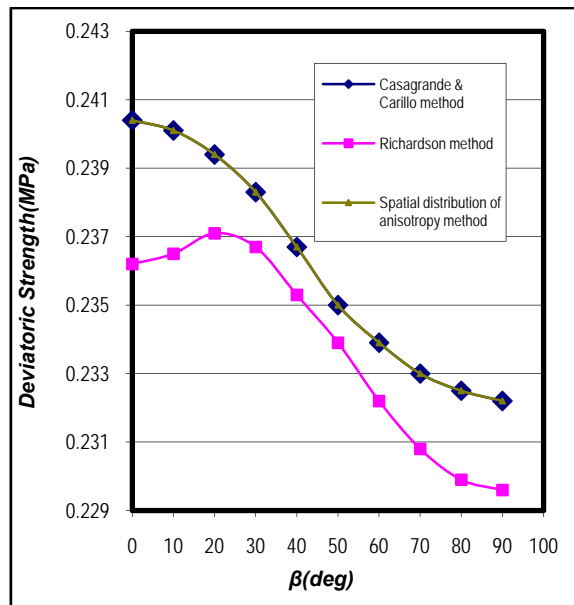


شکل (۵) وابستگی تنش انحرافی به راستای صفحه رسوبی در بارگذاری دو محوری

همان‌گونه که اشاره شد، کمترین مقدار تنش انحرافی در نمودارهای $k_f=2$ ، در زاویه ۶۰ درجه و در نمودارهای $k_f=0.5$ ، در زاویه ۴۰ درجه روی داده است. بنابر روابط ارائه‌شده به وسیله‌ی Cook, Jaeger [۱۸]، کمترین تنش انحرافی در زاویه $\beta = 45 + \varphi_w / 2$ را می‌دهد، (زاویه صفحه ضعیف است). در حالتی که $k_f=2$ است صفحه ضعیف، صفحه رسوبی است که زاویه اصطکاک آن، ۳۰ درجه و $\beta = 45 + 30 / 2 = 60^\circ$ است. در حالتی که $k_f=0.5$ است صفحه ضعیف، صفحه عمود بر صفحه رسوبی است.

در ادامه، نتایج مدل‌سازی برای مقادیر مختلف تنش همه‌جانبه، با ضرایب ناهمسانی در چسبندگی و زاویه اصطکاک ($k_c=1, k_f=2$) و ($k_c=2, k_f=0.5$) با روش پخش فضایی بررسی و نتایج آن در شکل‌های ۶ و ۷، نشان داده شده است.

در شکل (۵) نتایج تحلیل ناهمسانی برای ضرایب مختلف ناهمسانی در چسبندگی، k_c و زاویه اصطکاک، k_f روش پخش فضایی بررسی شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، هنگامی که ضریب ناهمسانی، یک است (ماده همسان)، تنش انحرافی برای همه‌ی زوایا ثابت است. هنگامی که k_f ۲ است (منحنی‌های I)، منحنی‌ها بالای منحنی همسان قرار می‌گیرد و با کاهش k_c از ۲ به ۰.۵، مقدار تنش انحرافی کاهش می‌یابد. با افزایش زاویه β تنش انحرافی ابتدا کاهش می‌یابد و در زاویه ۶۰ درجه به یک مقدار ثابت میل می‌کند و سپس تا زاویه ۹۰ درجه افزایش می‌یابد، ولی مقدار بیشه آن در زاویه صفر درجه رسوبگذاری رخ می‌دهد.



شکل (۶) وابستگی مقاومت برشی توده سنگ به زاویه رسوبگذاری برای وضعیت ناهمسانی در چسبندگی مصالح

هنگامی که k_f ، برابر ۰ است (منحنی‌های III)، منحنی‌ها پایین منحنی همسان قرار می‌گیرد و با کاهش k_c از ۲ به ۰.۵، مقدار تنش انحرافی کاهش می‌یابد. وقتی k_f ، برابر ۱ است (منحنی‌های II) منحنی‌های نزدیک منحنی همسان

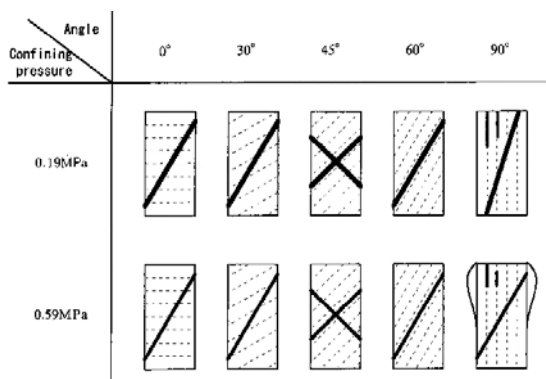
حالی که تأثیری بر روند نمودارهای حاصل ندارد.

۶- مدل‌سازی آزمایش‌های سه‌محوری

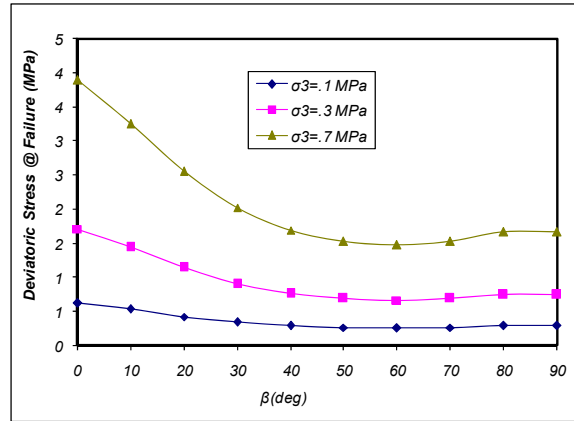
سنگ نرم Tomuro

در این نمونه آزمایش سه‌محوری که به وسیله‌ی Oka و همکاران (۲۰۰۲) روی نمونه سنگ رسوبی Tomuro درازا و پهنای ۴۰۰mm و ارتفاع ۱۰۰۰ mm انجام شده، در همان ابعاد، شبیه‌سازی شده است [۱۹]. نرخ کرنش، ثابت و تنش همه‌جانبه ۰/۱۹ و ۰/۵۹ و مگاپاسکال است. مشاهدات آزمایش، بیانگر تفاوت نتایج وابسته به راستای نمونه‌ها است.

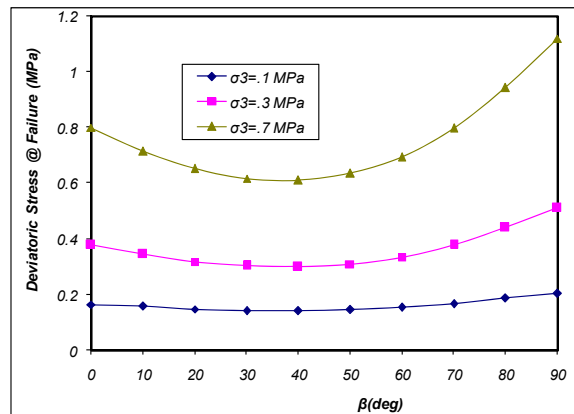
به دست آوردن پارامترهای مقاومتی از نتایج آزمایش سه‌محوری، از مسائل بحث شده در شبیه‌سازی با مدل چندصفحه است. در این پژوهش ابتدا با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و رسم دوایر موهر، پارامترهای مقاومت در هر نمونه به دست آمد و مقدار آن در هر زاویه بارگذاری، برابر مقدار آن در هر صفحه با همان زاویه نسبت به صفحه رسوبی، در نظر گرفته شد و روابط مربوط به پارامترهای مقاومت نسبت به زاویه بارگذاری، استخراج شد. نتایج شبیه‌سازی با این روابط، رضایت‌بخش نبود، به همین خاطر از روش دیگری که در ادامه آمده، استفاده شد.



شکل (۸) صفحه‌های گسیختگی پس از انجام آزمایش (angle= β) [۱۹] با توجه به شکل ۸، در زاویه $\beta = 60^\circ$ ، سطح گسیختگی،

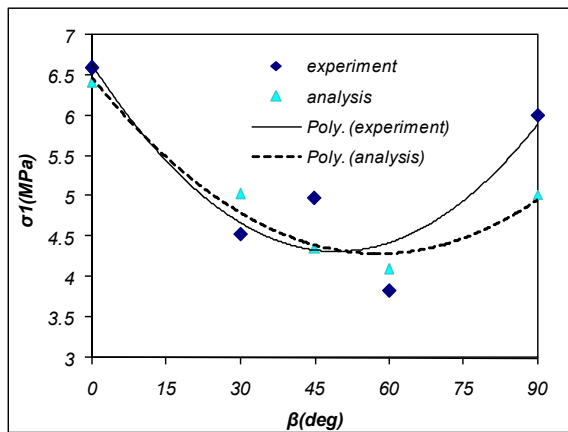


شکل (۶) تأثیر تنش همه‌جانبه بر روند تغییرات تنش انحرافی با زاویه β ($k_c = 1, k_f = 2$)

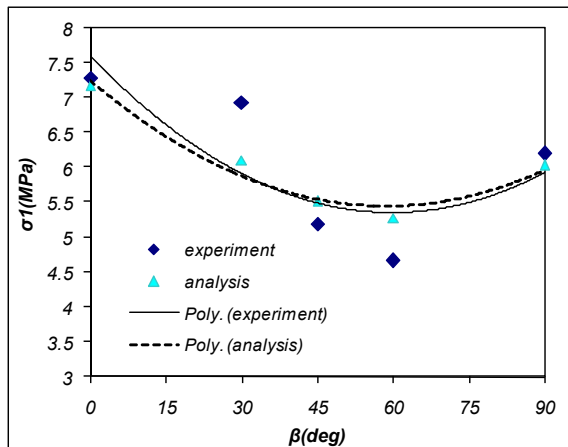


شکل (۷) تأثیر تنش همه‌جانبه بر روند تغییرات تنش انحرافی با زاویه β ($k_c = 2, k_f = 0.5$)

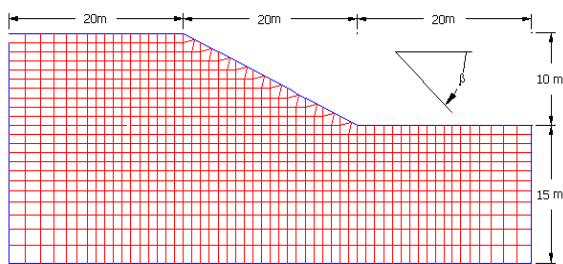
باتوجه به شکل ۶ کمترین تنش انحرافی در هر سه نمودار، در زاویه $\beta = 60^\circ$ روی داده است و روند هر سه نمودار با تغییرات زاویه β ، یکسان است. البته مشاهده شده است که شیب تغییرات مقاومت برشی، با افزایش تنش همه‌جانبه، افزایش می‌یابد. همچنین باتوجه به شکل ۷، کمترین تنش انحرافی در هر سه نمودار، در زاویه $\beta = 40^\circ$ روی داده است و روند هر سه نمودار با تغییرات زاویه β ، یکسان است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مدل ارائه شده، توانایی شبیه‌سازی در سطح تنش‌های مختلف را دارد و سطح تنش همه‌جانبه اولیه در مقدار نهایی تنش انحرافی اثر دارد، در



شکل (۹) نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی (فشار هم جانبی: ۰/۱۹ MPa)



شکل (۱۰) نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی (فشار هم جانبی: ۰/۵۹ MPa)



شکل (۱۱) ابعاد شیروانی و شبکه‌بندی المان‌ها

جدول (۴) پارامترهای مقاومت برشی در راستای عمودی، افقی و مقادیر میانگین

Ar	Horizontal		Vertical		Average	
	C (KPa)	ϕ ($^{\circ}$)	C (KPa)	ϕ ($^{\circ}$)	C (KPa)	ϕ ($^{\circ}$)
2.5	13.03	13.6	33.3	31.2	23.3	22.04
2.0	15.0	15.2	30.0	28.6	22.5	21.9
1.5	17.1	17.3	25.7	25.0	21.4	21.1

هم‌راستا با صفحه رسوبی است و در زاویه $\beta = 0^{\circ}, 30^{\circ}$ ، سطح گسیختگی با راستای افق، زاویه 60° می‌سازد. با توجه به روابط ارائه‌شده به‌وسیله‌ی Cook, Jaeger [۱۸] می‌توان نتیجه گرفت که پارامترهای مقاومتی حاصل از نتایج آزمایش سه‌محوری در زاویه $\beta = 60^{\circ}$ ، پارامترهای مقاومتی صفحه رسوبی است. با استفاده از این مقادیر و تغییر پارامتری در روابط پخش فضایی می‌توان مقدار پارامترها را در راستای عمود بر صفحه رسوبی به‌دست آورد. با توجه به مقادیر به دست آمده، شبیه‌سازی کامپیوتری با بارگذاری با نرخ کرنش ثابت، با پارامترهای به دست آمده، انجام شده است. تعداد صفحات مدل چندصفحه، ۳۲ است و پارامترهای آن در جدول ۳ دیده می‌شود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایش هماهنگی دلخواهی دارد، هر چند که نتایج در سطح تنش همه‌جانبه $0/59$ MPa، نسبت به سطح تنش همه‌جانبه $0/19$ MPa بیشتر قابل قبول است.

۷- بررسی درستی مدل در مجموعه المان‌ها

در این بخش برای بررسی درستی مدل در ترکیب المان‌ها در کنار هم، پایداری شیروانی خاکی غیرهمسان بررسی شده و نتایج آن با نتایج شبیه‌سازی، مقایسه شده است. شیروانی، هم با پارامترهای ناهمسان و هم با پارامترهای همسان، مدل‌سازی شده است. در حالت ناهمسان، ضریب ناهمسانی Ar، $1/5$ ، 2 و $2/5$ است. در حالت همسان، مدل‌سازی با ویژگی‌های مقاومتی در راستای عمودی (بشتر)، افقی (حد اقل) و میانگین $(C_v + C_h)/2$ و $(\phi_v + \phi_h)/2$ انجام شده است. شبکه المان‌ها و ابعاد هندسی، در شکل ۱۱ و پارامترهای مدل، در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول (۳) پارامترهای به‌دست آمده از نتایج آزمایشگاهی

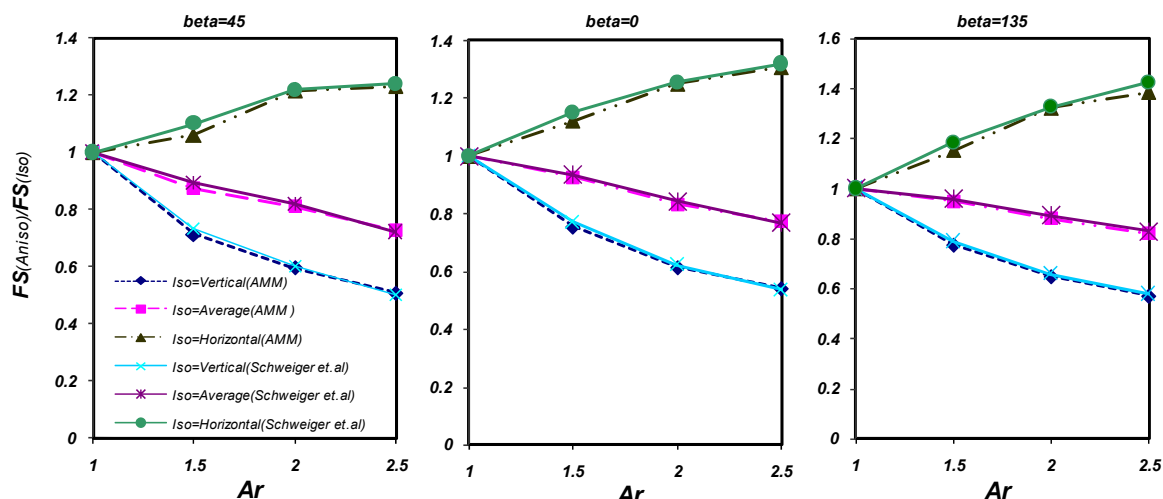
K (MPa)	G (MPa)	ρ (Kg/m 3)	C_v (MPa)	ϕ_v (deg)	C_h (MPa)	ϕ_h (deg)
۳۶۰	۳۶۶	۱۵۴۳	۲/۹	۹	۰/۸۶	۲۹

اطمینان‌های حاصل با مطالعات Schweiger و همکاران [۱۱] مقایسه شده است. مدل استفاده شده به وسیله‌ی ایشان، مدل حالت حدی است که سطح تسلیم آن، کلاهدک دارد. در شکل ۱۲، محور قائم، نسبت ضریب اطمینان در حالت ناهمسان (FSAniso) به ضریب اطمینان در حالت همسان (FSIso) است و محور افقی، ضریب ناهمسانی (Ar) را نشان می‌دهد.

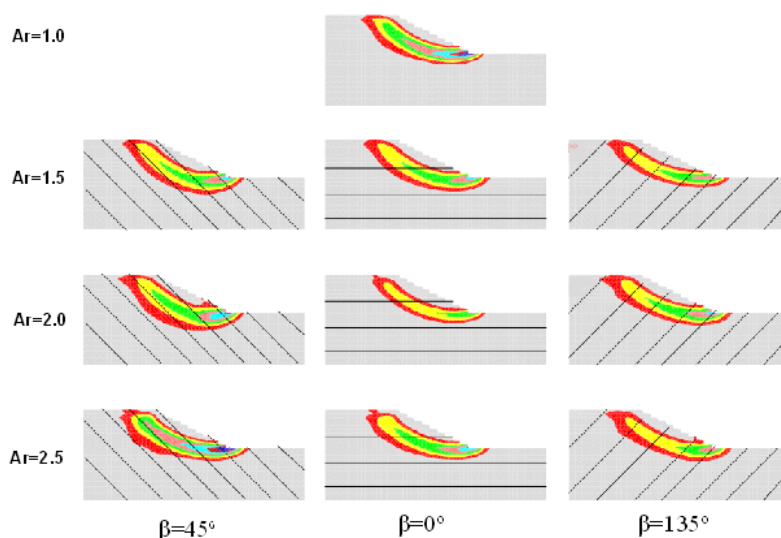
همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نتایج این پژوهش با نتایج مطالعات Shwiger و همکاران هماهنگی دارد که مؤید درستی فرمولاسیون مدل در این پژوهش است. تفاوت کوچک بین نتایج می‌تواند ناشی از تفاوت در المان‌بندی و همچنین چگونگی حل در روش المان محدود و روش تفاضل محدود باشد.

با توجه به شکل ۱۲، ضریب اطمینان به دست آمده در حالت $\beta = 45^\circ$ کمتر از ضریب اطمینان به دست آمده در حالت $\beta = 135^\circ$ است که دلیل آن در ادامه بیان شده است. در حالت $\beta = 45^\circ$ صفحه رسوبی (راستای مصالح یادشده با ویژگی‌های مقاومتی کمتر) هم‌راستا با شیب شیروانی است و بخش بسیار بزرگ سطح گسیختگی، هم‌راستا با راستای ضعیف است، به عبارتی، بخش بسیار بزرگ سطح گسیختگی ویژگی‌های مقاومتی کمتری دارد ولی در حالت $\beta = 135^\circ$ ، صفحه عمود بر صفحه رسوب (راستای مصالح یادشده با ویژگی‌های مقاومتی بیشتر) هم‌راستا با شیب شیروانی است و بخش بسیار بزرگ سطح لغزش، هم‌راستا با راستای قوی‌تر است و ویژگی‌های مقاومتی آن بیشینه است.

با توجه به شکل ۱۲، که در تحلیل همسان، با فرض پارامترهای راستای افقی (کوچکتر)، مقاومت حاصل، کمتر از مقاومت واقعی (مقاومت با فرض پارامترهای ناهمسان) است و در نتیجه، نسبت ضریب اطمینان در حالت ناهمسان FS(aniso) به ضریب اطمینان در حالت همسان FS(iso) بزرگتر از ۱ به دست می‌آید. در تحلیل همسان با پارامترهای راستای عمودی (بزرگتر)، نسبت



شکل (۱۲) تغییرات ضریب اطمینان و ضریب ناهمسانی (Ar) در زوایای مختلف رسوب‌گذاری (β)



شکل (۱۳) صفحه‌های گسیختگی برای مقادیر مختلف A_r و B (ساعتگرد)

ارائه و بحث شد. از جمله تحلیل‌های انجام‌شده، شبیه‌سازی رفتار ناهمسان مصالح سنگ نرم Tomuro است؛ مدل عددی نشان می‌دهد که کمترین مقدار مقاومت در سنگ نرم ناهمسان در زاویه رسوب ۳۰ تا ۶۰ درجه روی می‌دهد.

مقایسه ضریب اطمینان پایداری در شیروانی رسوبی ناهمسان با مدل‌سازی‌های سایر پژوهشگران نیز بیانگر درستی مدل ارائه‌شده است. نتایج نشان می‌دهد که ضریب اطمینان شیروانی ناهمسان، وابسته به درجه ناهمسانی و راستای صفحه رسوبی است. تحلیل پایداری شیروانی با مصالح همسان با ویژگی‌های مقاومتی برابر، با راستای عمودی، افقی و میانگین با نتایج شبیه‌سازی با ویژگی‌های واقعی (ناهمسان)، نشان می‌دهد که در ارزیابی‌های ژئوتکنیکی نمی‌توان ناهمسانی در مقاومت مصالح را نادیده گرفت. همچنین مشاهده شد که با ثابت بودن زاویه رسوب‌گذاری مصالح، با افزایش ضریب ناهمسانی در مقاومت مصالح، تفاوت ضریب اطمینان پایداری در حالت همسان و ناهمسان افزایش می‌یابد. همچنین ضریب ناهمسانی نسبت به راستای صفحه رسوبی، تأثیر کمتری بر شکل صفحه گسیختگی دارد.

با توجه به شکل ۱۳ و بررسی سطوح لغزش، شکل صفحه گسیختگی در یک ضریب ناهمسانی ثابت با تغییر راستای صفحه رسوبی، تغییر می‌کند در حالی که شکل صفحه گسیختگی در یک راستای ثابت صفحه رسوبی با تغییر ضریب ناهمسانی، تقریباً یکسان است. می‌توان نتیجه گرفت که ضریب ناهمسانی نسبت به راستای صفحه رسوبی، تأثیر کمتری بر شکل صفحه گسیختگی دارد.

۸- نتیجه گیری

در این مقاله، مدل عددی در شرایط کرنش مسطح در قالب مدل چندصفحه، برای شبیه‌سازی ناهمسانی در مقاومت در توده سنگ نرم ارائه شد. در شرایطی که توده سنگ تعداد محدودی درزه و ترک دارد، با مقایسه نتایج شبیه‌سازی مدل ارائه‌شده با روابط حل بسته پژوهشگران، مشاهده شد که این مدل توانایی کافی برای شبیه‌سازی درزه در توده سنگ را دارد. همچنین مدل چندصفحه تهیه‌شده، مدل مناسبی برای شبیه‌سازی سنگ نرم رسوبی ناهمسان است که درستی آن با مطالعه نتایج سایر پژوهشگران بررسی شد. در مدل یادشده با تعریف ضریب ناهمسانی در مقاومت، تحلیل‌های لازم،

۹- منابع

- [۱۲] صدرنژاد، سید امیرالدین؛ مبانی نظریه خمیری در خاک؛ چاپخانه دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی؛ ۱۳۷۹.
- [13] Pande, G.N. and Yamada, M., *The multilaminar framework of models for soil masses*, In Application of Computational Mechanics in Geotechnical Engineering, Rotterdam: Balkema, 105-124, 1994.
- [14] Itasca Consulting Group, Inc., *Ubiquitous-Joint Model, FLAC: Theory and Background*, Minneapolis, Minnesota, 2000.
- [15] Casagrande, A. and N. Carrillo, Shear Failure of Anisotropic Materials, in Contribution to Soil Mechanics 1941–1953, Boston Society of Civil Engineers, Boston, Mass., 1944.
- [16] Richardson, A. M., E. W. Brand, and A. Menon, In Situ Determination of Anisotropy of a Soft Clay, Proc. Conf. In Situ Measure. Soil Prop., vol. 1, Am. Soc. of Civ. Eng., pp. 336–349, 1975.
- [17] Pietruszczak, S. & Mroz, Z., Formulation of anisotropic failure criteria incorporating a microstructure tensor. *Comput. Geotech.* 26, No. 2, 105–112, 2000.
- [18] Jaeger J.C. and Cook, G.W., *Fundamentals of rock Mechanics*, 3rd Ed. New York:Chapman and hall,1979.
- [19] Oka, F., Kimoto, S., Kobayashi, H. and Adachi, T., *Anisotropic behavior of soft sedimentary rock and a constitutive model*, SOILS AND FOUNDATION, Japanese Geotechnical Society, Vol. 42, No 5,59-70, 2002.
- [20] Dawson, E. M., Roth, W.H. and Drescher, A., Slope stability analysis by strength reduction," *Geotechnique*, 49(6): 835-840, 1999.
- [21] Mahin Roosta, R., Sadaghiani, M.H., Pak, "Strength Reduction Technique in Stability Analysis of Jointed Rock Slopes," *International Journal of Civil Engineering*. Vol.3, Nos.3&4 September & December 2005.
- [1] Casagrande, A. and Carrillo, N., *Shear failure of anisotropic soils*, Journal of the Society of Civil Engineering, Contribution to Soil Mechanics, 1941-1953, 1944.
- [2] Zdravković, L. and Potts, D.M., *Advances in modeling soil anisotropy*, In *constitutive modeling of granular material*, (ed D. Kolymbas), pp 491-521. Berlin: Springer, 1999.
- [3] Taylor, G.I., *Plastic strain in metals*, J. Inst. Metals 62. pp.307-324, 1938.
- [4] Zienkiewicz, O.C. and Pande, G.N., *Time-dependent multilaminar model of rocks-A numerical study of deformation and rock masses*, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, vol. 1, No.3, 219-247, 1977.
- [5] Pande, G.N. and Sharma, K.G., *Multilaminar model of clays – a numerical evaluation of the influence of rotation of principal stress axes*, International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, vol. 7, No.4, 397-418,1983.
- [6] Pietruszczak, S. and Pande, G.N., *Description of soil anisotropy based on multi-laminar framework*, Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., 25, pp 197-206,2001.
- [7] Wiltafsky, C., *A Multilaminar Model for Normally Consolidated Clay*, TECHNISCHS UNIVERSITAT GRAZ, 2003.
- [8] MahinRoosta, R., Sadaghian, M.H., Pak, A. and Saleh, Y., *Rock joint modeling using a viscoplastic multilaminar model at constant normal load condition*, Geotechnical and Geological Engineering, 24, pp 1449–1468,2006.
- [9] Galavi, V., *A multilaminar model for structured clay incorporating inherent anisotropy and strain softening*, Ph.D. thesis, TU Graz, Austria, Heft 32,2007.
- [10] Scharinger, F., *A multilaminar model for soil incorporating small strain stiffness*, Ph.D. thesis, TU Graz, Austria, Heft 31, 2007.
- [11] Schweiger, H.F., Wiltafsky, C., Scharinger, F. and Galavi, V., *A multilaminar framework for modeling induced and inherent anisotropy of soils*, *Geotechnique*, 59, pp 87–101, 2009.

Simulation of Anisotropy in Soft Rock Using a Multilaminate Model

R. Mahin Roosta^{1*}, N. Jaafari²

1- Head of Soil and Rock Mechanics Department, Mahab Ghodss Consulting Engineering Co., Tehran, Iran

2- M.Sc. in Soil Mechanics and Foundation Engineering, Zanzan University, Zanzan, Iran

reza.mahinroosta@gmail.com

Abstract:

Due to sedimentation process, structure of particles and subsequent loading history, most of the natural soil and rock deposits, tend to be highly anisotropic, which manifests itself in the directional dependence of deformation and strength characteristics. Also, existence of discontinuities such as joints and faults cause anisotropic behavior in the rock mass. Different constitutive models have been introduced by researchers to simulate the inherited or induced anisotropy in geo-materials. Due to the concept of the multi-laminate framework, in which yield and plastic potential functions are defined on a number of independent acting planes, plastic flow is developed independently on different planes. Therefore multi-laminate models are able to simulate induced anisotropy, intrinsically. In this study, a constitutive model based on multi-laminate framework with Mohr-Coulomb failure criterion for modeling the anisotropy is written and added to a two-dimensional explicit finite difference program, FLAC. In this model, anisotropy of geo-materials can be modeled in two different ways; the first way is used to model jointed rocks with the assumption that a pronounced anisotropy of rock can be described by introducing a certain number of planes of weakness and behavior of rock mass can be determined from interaction of the joint planes and the intact rock. In the second way, anisotropy of sedimentary materials can be introduced in a straightforward manner by varying model parameters over the sampling planes that obtains by the parameters in the vertical and horizontal direction. When the number of planes is less than 5, geo-material is considered as the jointed rock mass with those number of joint sets, otherwise, geo-material considered as the sedimentary rock or soil mass; so application of different yield strength in numerous contact plane with uniform distribution, enable the model to simulate anisotropy in intact samples.

For each contact plane, two failure criteria are considered associated with two potential functions. In fact non-associated flow rule and associated flow rule are applied to simulate plasticity formulations in shear and tensile mode of failure, respectively. Strength parameters of each contact plane are calculated based on its dip angle and the strengths of the intact soft rock in the direction of parallel and vertical to the sedimentation.

The capability of the model is demonstrated by numerical simulation of uni-axial tests on jointed rock mass and the results are compared with those from analytical closed form solutions. The effect of anisotropy in friction angle and cohesion are investigated through the model in order to present sensitivity of the model to anisotropy ratio and angle of sedimentation. Finally the proposed model is used to simulate stability of a slope in the sedimentary domain; the results show that with a constant sedimentation angle, increase in anisotropy ratio will increase the differences of the safety factor of the slopes with isotropic and anisotropic behavior.

Keywords: Anisotropy, Shear Strength, Multi-Laminate Model, Joint, Sedimentary soft rock.