

جناب آقای دکتر علی اخترپور
استاد محترم دانشکده مهندسی عمران
دانشگاه فردوسی مشهد

احتراماً بدینوسیله به اطلاع می رساند مقاله ی جناب عالی و آقای مهندس مرتضی سالاری تحت عنوان «شبه سازی عددی رفتار یک سد سنگریزه ای بلند با در نظر گرفتن پدیده شکست ذرات» به شماره مرجع ۳۰/۱۰۲۲/۹۴۰۳۶، به عنوان مقاله «پژوهشی» جهت چاپ در مجله علمی و پژوهشی شریف پذیرفته شده است.

ضمن تشکر از همکاری جناب عالی با مجله علمی و پژوهشی شریف، امید است در آینده نیز خوانندگان محترم مجله از تحقیقات علمی آنجناب بهره مند گردند.

با احترام
ابوالحسن وفایی
سرمدبیر

شبیه‌سازی عددی پدیده شکست ذرات در یک سد سنگریزه‌ای بلند

علی اخترپور^۱، مرتضی سالاری^۲

۱- استادیار گروه عمران دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد (نویسنده مسئول)

۲- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی عمران- مکانیک خاک و پی دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

akhtarpour@um.ac.ir
m.salari04@gmail.com

چکیده

در مصالح درشت دانه بویژه سنگریزه‌ها، خردشدگی ذرات گاهی مشخصات تغییرشکلی و مقاومتی این مصالح را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد. لذا وجود مدل رفتاری که با دقت مناسبی اثرات این پدیده را خصوصا در سازه‌های متشکل از حجم بالایی از این مصالح شبیه‌سازی نماید، بسیار حائز اهمیت است. آزمایشات بزرگ مقیاس مصالح سنگریزه‌ای سد مسجد سلیمان پتانسیل خردشدگی شدید ذرات این مصالح را نشان می‌دهند. در این مقاله، با پیشنهاد رابطه‌ای برای متغیر اصلی تابع پتانسیل یک مدل رفتاری الاستوپلاستیک سخت شونده/ نرم شونده شناخته شده، سعی شده است رفتار انقباضی ناشی از خردشدگی مصالح سنگریزه‌ای فرمول‌بندی گردد. در ادامه ابتدا آزمایشات سه محوری بزرگ مقیاس مصالح سنگریزه‌ای این سد با دقت مناسبی مدلسازی گردیده و پارامترهای رفتاری مصالح بدست آمدند. سپس مدل عددی تفاضل محدود سه بعدی سد در دوران ساخت بر مبنای پارامترهای حاصله، ساخته شده است. تطابق مناسب مقادیر محاسبه شده و اندازه‌گیری شده کمیت‌های تغییرشکلی و تنش در بدنه سد، حکایت از دقت قابل قبول این مدل رفتاری در شبیه‌سازی پدیده شکست ذره‌ای مصالح سنگریزه‌ای در مقیاس واقعی دارد.

کلمات کلیدی: شکست ذرات، مصالح سنگریزه‌ای، مدل رفتاری سخت شونده/نرم شونده، آزمایش سه محوری بزرگ مقیاس

A Numerical Modeling of Particles Breakage Phenomena in a High Rockfill Dam

A. Akhtrapour
M. Salari

Department of Engineering, Faculty of Civil engineering
Ferdowsi University of Mashhad, Iran

Abstract:

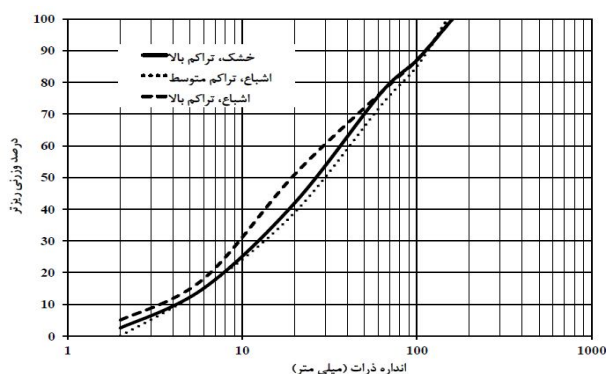
Particle breakage in coarse granular materials, especially in rockfills, sometimes, can strongly influence their behavior in the term of deformations and strengths. Large Deformations can occur due to particles breakage especially in high rockfill dams. Therefore, a proper constitutive model applied for simulating this phenomenon can significantly help to predicate the behavior of structures which includes enormous part of this material. Masjed-e-soleyman is a high central clay core rockfill dam which is located in the southwest of Iran. A series of instruments were installed in the dam body. Deformations of the rockfill shells in the dam during construction and first impounding are significantly higher in comparison with other rockfill dams. The Breakage of the particles in rockfill shells due to high level of stresses is known as the main reason. Large scale triaxial tests on rock fill materials of Masjed-e-Soleyman rockfill dam indicated that these materials have a high potential of particles breakage. In this research, a known frictional hardening constitutive model on the base of mohr-coloumb yield function was used to predict the behavior of the material. In the model hardening or softening behavior can be considered by the means of mobilized friction and dilation angles. Some modifications in the potential function of the model were implemented to the model. Two parameters add to the constitutive model which can be determined using back analysis on the triaxial tests data. The triaxial tests were numerically simulated and the model parameters were determined using a calibration procedure. 3D finite difference numerical model of the high rockfill dam was created. A good accordance can be seen between numerical and experimental results in the field of deformations and stresses which indicates the accuracy and efficiency of the modified model to predict the contractive behavior of the rockfills due to particle breakages phenomena.

Keywords: Particle breakage, Rockfill material, Hardening /softening constitutive model, Large scale triaxial test

مصالح با پتانسیل بالای شکست ذره ای دارد. این تابع دارای دو پارامتر است و با انجام آنالیز برگشتی بر روی داده های آزمایش سه محوری قابل تعیین می‌باشند. در ادامه کارایی مدل رفتاری ارتقاء یافته با مدلسازی سه بعدی تفاضل محدود رفتار پوسته‌های سنگریزه‌ای سد مسجد سلیمان ارزیابی شده است. نتایج موید دقت مناسب مدل رفتاری اصلاح مذکور در برآورد تغییرشکل‌های ناشی از شکست ذره‌ای مصالح پوسته‌های این سد دارد.

۲- آزمایش های سه محوری بزرگ مقیاس

مصالح سنگریزه ای انتخاب شده برای آزمایشات سه محوری شامل مصالح شکسته حاصل از انفجار آزمایشی در معدن سنگ سد مسجد سلیمان می باشد. این مصالح از جنس کنگلومرا با سیمان اهکی مقاوم می باشد. مطالعات سابق روی این مصالح نشان‌دهنده پتانسیل بالای شکست ذرات در این مصالح است [۱۴ و ۱۵]. آزمایشات سه محوری بر روی نمونه های با قطر ۸۰ سانتیمتر و ارتفاع ۸۰ سانتیمتر پس از اصلاح دانه بندی در دانشگاه کالسروهه آلمان صورت گرفته است. منحنی دانه بندی مصالح قبل از آزمایش در شکل ۱ مشاهده می گردد. آزمایشات در سه حالت بسیار متراکم خشک، بسیار متراکم اشباع و تراکم متوسط اشباع صورت گرفته است. کلیه نمونه ها ابتدا تحت فشار جانبی قرار گرفته و سپس در شرایط زهکشی شده تا کرنش ۱۲ درصد تحت بار انحرافی قرار گرفته است.



شکل ۱- منحنی دانه بندی نمونه ها قبل از آزمایش

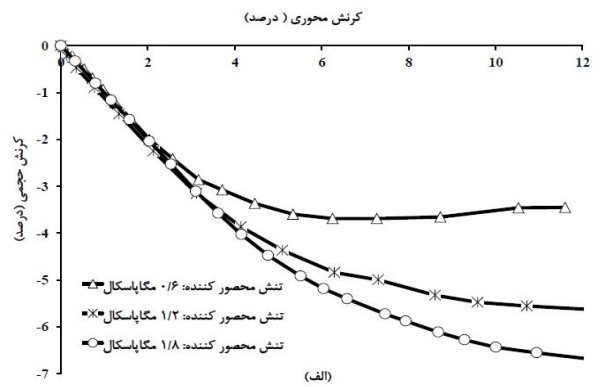
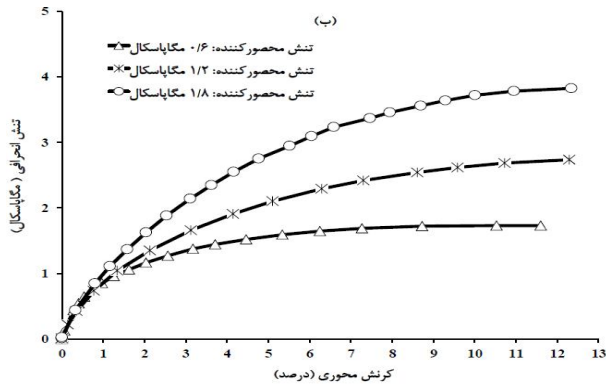
۲-۱- نتایج آزمایش ها

در شکل های ۲ تا ۴ منحنی های تنش انحرافی و کرنش حجمی در برابر کرنش محوری آورده شده است. همچنین در جدول ۱ دانسیته خشک، ρ ، ضریب یکنواختی، C_u ، قطر حداقل دانه، d_{min} ، قطر حداکثر دانه، d_{max} ، حداکثر کرنش حجمی در تنش برشی

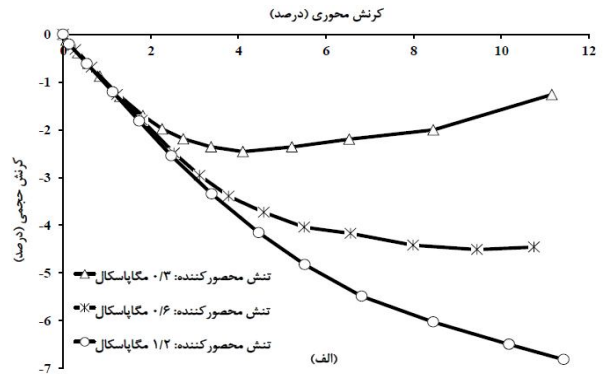
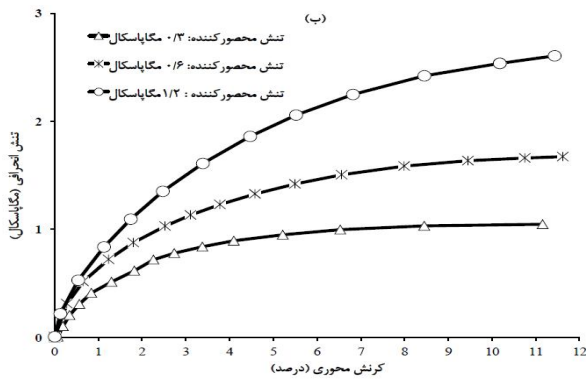
مصالح سنگریزه ای شامل ذرات درشت دانه شکسته حاصل از انفجار در معادن قرصه و یا ذرات گرد شده و یا تقریباً گرد گوشه موجود در بستر رودخانه‌ها می باشند. تعیین پارامترهای مقاومتی و تغییر شکل مصالح سنگریزه‌ای در شرایط برشی، با آزمایش سه محوری بزرگ مقیاس از اقدامات متداول در طراحی و رفتارسنجی سازه‌های متشکل از اینگونه مصالح خصوصاً سدهای سنگریزه‌ای بلند، می‌باشد. تحقیقات قبلی انجام شده [۹-۱۱] حکایت از تاثیر قابل توجه شکست ذرات بر اکثر خصوصیات ژئوتکنیکی این مصالح نظیر مقاومت برشی، تغییرشکل‌پذیری، توزیع فشار آب منفذی (در شرایط زهکشی نشده) و نفوذپذیری دارد [۸ و ۱۰]. تاکنون مدل های رفتاری متعددی جهت شبیه‌سازی رفتار غیر خطی مصالح دانه ای پیشنهاد گردیده است (نظیر [۱۱]). در حالیکه اکثر این مدل ها کارایی مناسبی در شبیه‌سازی کاهش حجم ناشی از شکست ذرات ندارند.

یک سری آزمایشات سه محوری بزرگ مقیاس روی مصالح سنگریزه ای در پوسته سد مسجد سلیمان (یک سد سنگریزه ای بلند در جنوب غربی ایران) صورت گرفته است [۱۲]. این آزمایش-ها پتانسیل بالای شکست ذره ای این مصالح را نشان می‌دهند. با توجه به اینکه حجم اعظم بدنه سد متشکل از اینگونه مصالح است انتظار می‌رود پدیده شکست ذره ای تاثیر قابل توجهی بر رفتار سد داشته باشد. در این مقاله برای شبیه سازی رفتار مصالح در نمونه های مورد استفاده در آزمایشات سه محوری بزرگ مقیاس از یک مدل رفتاری الاستو پلاستیک سخت شونده/ نرم شونده استفاده شده است. این مدل براساس مدل رفتاری موهر-کولمب توسعه یافته است بگونه ای که پس از اولین تسلیم، زاویه اصطکاک، چسبندگی، زاویه اتساع و مقاومت کششی با تغییرات کرنش پلاستیک می تواند کاهش یا افزایش یابد. تغییرات کمیت مدول یانگ، زاویه اصطکاک و زاویه اتساع همگام با تنش همه جانبه بصورت توابعی در مدل مذکور گنجانده شده است.

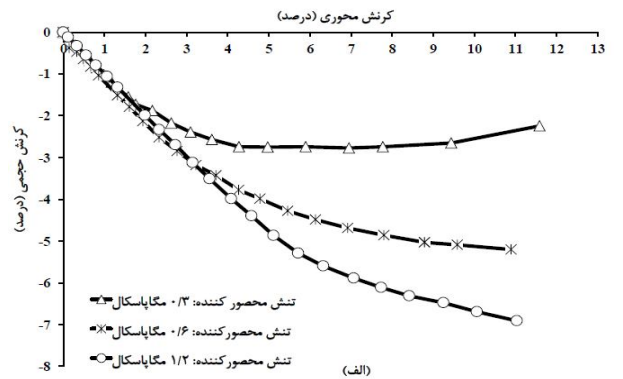
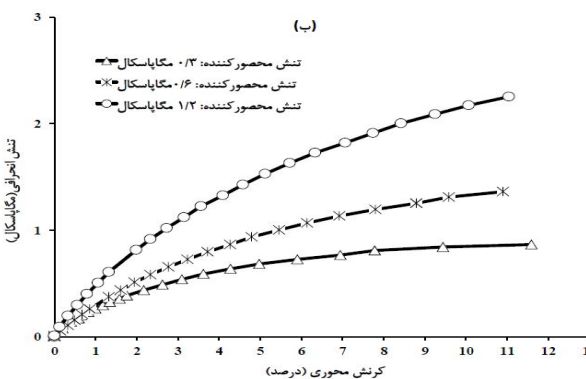
برای شبیه سازی رفتار تغییر حجم مصالح ژئوتکنیکی تحت برش، تابعی برای زاویه اتساع بسیج شده توسط راو [۱۳] پیشنهاد گردیده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که تابع پیشنهادی راو دارای دقت مناسبی در شبیه‌سازی تغییرحجم در مصالح با پتانسیل قابل توجه شکست ذرات نمی‌باشد. لذا در این مقاله تابعی برای تغییرات زاویه اتساع بسیج شده پیشنهاد شده است که کارایی مناسبی در شبیه سازی تغییرحجم در شرایط برش برای



شکل ۲- منحنی‌های آزمایش‌های سه محوری زهکشی شده روی نمونه های خشک با تراکم بالا



شکل ۳- منحنی‌های آزمایش‌های سه محوری زهکشی شده روی نمونه های اشباع و با تراکم بالا



شکل ۴- منحنی‌های آزمایش‌های سه محوری زهکشی شده روی نمونه های اشباع و با تراکم متوسط

جدول ۱- مشخصات و نتایج آزمایش‌های سه محوری تحکیم یافته زهکشی شده

مشخصات	$\rho(\frac{gr}{cm^3})$	C_u	$d_{min}(mm)$	$d_{max}(mm)$	$\sigma_3(MPa)$	$(\epsilon_v)_{q_{max}}(\%)$	$(\frac{q_{max}}{\sigma_3})$	$\phi_p(deg)$	B_g
خشک و با تراکم بالا	۲	۷/۲	۲	۱۶۰	۰/۱۶	-۳/۴۶	۵/۷۷	۴۷/۹	۵۴/۵
					۱/۲	-۵/۴۹	۴/۴۱	۴۳/۵	۵۶
					۱/۸	-۶/۴۴	۴/۱۳	۴۲/۴	۶
اشباع و با تراکم بالا	۲	۷/۵	۲	۱۶۰	۰/۱۳	-۲	۶/۹۸	۵۰/۸	۳۲
					۰/۱۶	-۴/۴۳	۵/۵	۴۷/۱	۴۹/۵
					۱/۲	-۶/۴	۴/۱۶	۴۲/۵	۵۵/۵
اشباع و با تراکم متوسط	۱/۸	۸/۹۵	۲	۱۵۰	۰/۱۳	-۲/۲	۵/۶۷	۴۷/۷	۲۳
					۰/۱۶	-۵/۱	۴/۴۷	۴۳/۷	۲۵
					۱/۲	-۶/۶۷	۳/۶۲	۴۰/۱	۲۹

حداکثر، $(\epsilon_v)_{q_{max}}$ ، نسبت تنش انحرافی حداکثر به جانبیه، $(\frac{q_{max}}{\sigma_3})$ ، زاویه اصطکاک داخلی در تنش برشی حداکثر، φ_p ، و ضریب شکست مارشال، B_g ، نشان داده شده است. روش‌های متعددی برای تخمین پتانسیل شکست ذرات تا کنون توسط محققین ارائه شده است [۱۶-۲۰] اما معمولاً شکست ذرات با استفاده از شاخص شکست مارشال [۱] بصورت کمی ارزیابی می‌گردد. شاخص شکست مارشال، برای یک نمونه در آزمایش از طریق الک‌کردن مصالح نمونه با یک دسته الک‌ها (۰/۰۷۵ تا ۵۰ میلی‌متر) قبل و بعد از آزمایش محاسبه می‌شود. درصد ذرات باقیمانده روی هر الک در هر دو موقعیت اندازه‌گیری می‌شود. بعد از آزمایش به علت شکست ذرات، درصد ذرات باقیمانده روی الک‌های با اندازه بزرگ کاهش می‌یابد و درصد ذرات باقیمانده روی الک‌های با اندازه کوچک افزایش می‌یابد. درصد مجموع کاهش‌ها برابر با درصد مجموع افزایش‌ها است. مقدار شاخص شکست مارشال است. ستون آخر در جدول ۱ نشان می‌دهد که شکست ذرات می‌تواند حتی در فشارهای جانبی کم اتفاق افتد که در تطبیق با مطالعات محققین سابق می‌باشد [۱۹ و ۲۱] برای هر سه حالت با شرایط اولیه متفاوت عموماً با افزایش فشار همه جانبه، شاخص شکست مارشال و کرنش حجمی حداکثر افزایش داشته و زاویه اصطکاک حداکثر در حداکثر تنش برشی، φ_p ، بخاطر شکست ذرات افزایش می‌یابد. در نمونه‌های اشباع در یک فشار جانبی معین، افزایش دانسیته خشک باعث افزایش اندیس شکست ذرات می‌گردد اما مقدار حداکثر کرنش حجمی کاهش می‌یابد. این مطلب نشان دهنده ضرورت تراکم مصالح سنگریزه‌ای در زمان اجرا برای یک سد سنگریزه‌ای بلند می‌باشد. مقایسه بین نمونه‌هایی که در ابتدا اشباع شده‌اند با نمونه آزمایش‌شده در شرایط خشک نشان می‌دهد که در یک فشار جانبی معین و تراکم برابر، اشباع‌شدگی اولیه تاثیر قابل توجهی بر روی شاخص شکست مارشال ندارد در حالیکه کرنش حجمی حداکثر را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد. این پدیده ناشی از این واقعیت است که اشباع‌شدگی اولیه می‌تواند باعث لغزش راحت‌تر ذرات بر روی یکدیگر گردد. لذا مصالح سنگریزه‌ای در پوسته‌های سد مورد بحث بایستی در زمان اجرا با جت آب با حجم زیاد بطور کامل مرطوب می‌گردید تا از نشست‌های زیاد در پوسته بالادست در زمان اولین آبیگری جلوگیری گردد در حالیکه به نظر می‌رسد به این مهم در اجرا توجهی نگردیده است. برای مصالح سنگریزه‌ای سازه‌هایی نظیر سد مسجد سلیمان که شاخص شکست مارشال آنها قابل توجه است یک مدل رفتاری مناسب که

که بتواند رفتار انقباضی قابل توجه ناشی از شکست ذرات مصالح سنگریزه‌ای را در این سد شبیه‌سازی کند می‌تواند نقش کلیدی در پیش‌بینی رفتار تغییرشکل‌ی آن ایفا کند.

۳- مشخصات مدل رفتاری و اصلاحات آن

یک مدل رفتاری مناسب برای مصالح سنگریزه‌ای بایستی قادر باشد مقاومت برشی حداکثر، رفتار سخت شونده/نرم شونده، تغییر سختی وابسته به تنش همه جانبه و شکست ذرات را در نظر بگیرد. در این تحقیق با اصلاح یک مدل رفتاری سخت شونده/نرم‌شونده موجود در برنامه تفاضلات محدود FLAC با استفاده از قابلیت برنامه نویسی FISH موجود در برنامه [۲۲] سعی شده است ویژگی‌های فوق منظور گردد. اصلاحات انجام شده شامل در نظر گرفتن سختی وابسته به تنش، رفتار سخت شونده و اتساعی می‌باشند که در ادامه تشریح می‌گردد.

۳-۱- وابستگی تنش مدول الاستیک

تقریباً در همه مصالح ژئوتکنیکی وابستگی سختی به تنش همه جانبه مشاهده می‌گردد. رابطه (۱) که ابتدا توسط دانکن و چانک [۱۱] پیشنهاد گردیده است برای تعریف این وابستگی مورد استفاده قرار گرفت. محققینی نیز اعتبار این معادله را برای انواع خاکها و سنگها تحت شرایط متفاوت آزمایشگاهی و صحرایی به اثبات رسانده‌اند [۲۳].

$$E = KP_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (1)$$

در رابطه (۱)، E ، مدول یانگ، K پارامتر مدول الاستیک، P_a فشار اتمسفر و n توان وابستگی مدول به تنش همه جانبه می‌باشند. ضریب پواسون در تحلیل ثابت در نظر گرفته شده است که در محدوده رفتار الاستیک منجر به نتایج قابل قبولی می‌گردد.

۳-۲- سطوح تسلیم و توابع پتانسیل

رفتار سخت شونده در مدل رفتاری مذکور با استفاده از تغییر پارامترهای موهر-کولمب به صورت تابعی از کرنش برشی پلاستیک تعریف شده است. سطح تسلیم در این مدل بر اساس روابط زیر تعریف شده است:

$$f^s = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 - \sin \varphi_m}{1 + \sin \varphi_m} + 2c_m \sqrt{\frac{1 - \sin \varphi_m}{1 + \sin \varphi_m}} \quad (2)$$

$$f^t = \sigma'_m - \sigma_3 \quad (3)$$

کاهش یابد. پارامترهای m و φ_0 می‌توانند با استفاده از نتایج آزمایشات سه‌محوری تعیین گردند. برای مقادیر بزرگتر m با افزایش کرنش پلاستیک، زاویه اصطکاک بسیج شده به مقدار کمتری افزایش می‌یابد. وقتی پارامتر m کمتر از یک انتخاب گردد، هر دو رفتار سخت شوندگی و نرم شوندگی فقط با یک رابطه قابل تعریف است. در محدوده رفتار الاستیک، زاویه اصطکاک بسیج شده همان φ_0 خواهد بود.

۳-۴- رفتار اتساعی

راو [۱۴] همبستگی را برای محاسبه زاویه اتساع بسیج شده در مصالح ژئوتکنیکی بر اساس زاویه اصطکاک بسیج شده به شرح روابط (۸) و (۹) ارائه نمود:

$$\sin \psi_m = \frac{\sin \varphi_m - \sin \varphi_{cv}}{1 - \sin \varphi_m \sin \varphi_{cv}} \quad (۸)$$

$$\sin \varphi_{cv} = \frac{\sin \varphi_p - \sin \psi_p}{1 - \sin \varphi_p \sin \psi_p} \quad (۹)$$

در این روابط ψ_m و ψ_p به ترتیب زاویه اتساع بسیج شده و زاویه اتساع حداکثر می‌باشند. پارامتر φ_{cv} زاویه اصطکاک در حالت تخلخل بحرانی و یا زاویه اصطکاک حجم ثابت مصالح می‌باشد. این همبستگی آنچنانکه در ادامه این تحقیق اثبات می‌گردد، دارای دقت کافی در شبیه‌سازی رفتار حجمی مصالح سنگریزه‌ای با پتانسیل بالای شکست ذرات نمی‌باشد و لذا مولفین اصلاحاتی را به شرح رابطه (۱۰) پیشنهاد می‌نمایند. در این رابطه دو پارامتر جدید، ضریب P و زاویه اتساع اولیه، ψ_0 ، اضافه شده است.

$$\sin \psi_m = \begin{cases} \sin \psi_m & P.\theta < \psi_0 \\ \sin(P.\theta) & \psi_0 \leq P.\theta \leq \psi_p \\ \sin \psi_p & P.\theta > \psi_p \end{cases} \quad (۱۰)$$

که θ از رابطه (۱۱) بدست می‌آید.

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{\sin \varphi_m - \sin \varphi_{cv}}{1 - \sin \varphi_m \sin \varphi_{cv}} \right) \quad (۱۱)$$

در روابط فوق $-90^\circ \leq \psi_0, \theta, \psi_p \leq +90^\circ$ و P یک عدد حقیقی مثبت می‌باشد.

پارامتر P و همچنین زاویه اتساع اولیه، ψ_0 ، می‌توانند براساس آزمایشات سه‌محوری تعیین گردند. در شکل ۵ تغییرات زاویه اتساع بسیج شده با کرنش پلاستیک برای مقادیر متفاوت P بر

که در آن f^s و f^t به ترتیب توابع تسلیم برشی و کششی بوده و σ_1 و σ_3 تنش‌های اصلی بزرگتر و کوچکتر می‌باشند. همچنین φ_m ، c_m و σ_m^t به ترتیب زاویه اصطکاک بسیج شده، زاویه اتساع بسیج شده و مقاومت کششی بسیج شده در مدل می‌باشند. قانون جریان در برش از نوع غیر وابسته و در کشش از نوع وابسته می‌باشد. توابع پتانسیل پلاستیک بصورت زیر در مدل تعریف گردیده اند.

$$Q^s = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 - \sin \psi_m}{1 + \sin \psi_m} \quad (۴)$$

$$Q^t = -\sigma_3 \quad (۵)$$

که در این رابطه ψ_m زاویه اتساع بسیج شده می‌باشد. در توابع پتانسیل مفروض هم رفتار سخت شوندگی و هم نرم شوندگی با توجه به تغییر در زاویه اتساع بسیج شده قابل مدلسازی خواهد بود. در مصالح سنگریزه‌ای، سخت شوندگی اصطکاک و رفتار اتساعی مصالح بر پایه مفهوم پارامترهای بسیج شده تعریف گردیده که در ادامه تشریح می‌گردد.

۳-۳- سخت شوندگی اصطکاک

ورمر و دبورست [۲۴] رابطه (۶) را برای سخت شوندگی اصطکاک برای مصالح ژئوتکنیکی پیشنهاد نمودند که در آن زاویه اصطکاک بسیج شده، φ_m ، به کرنش برشی پلاستیک، ε_p ، وابسته بوده و تا رسیدن به مقدار حداکثر، φ_p ، به تدریج افزایش می‌یابد.

$$\sin \varphi_m = \begin{cases} 2 \frac{\sqrt{\varepsilon_p \times \varepsilon_f}}{\varepsilon_p + \varepsilon_f} \sin \varphi_p & \text{for } \varepsilon_p \leq \varepsilon_f \\ \sin \varphi_p & \text{for } \varepsilon_p > \varepsilon_f \end{cases} \quad (۶)$$

در رابطه فوق، ε_f کرنش پلاستیک در زاویه اصطکاک حداکثر، φ_p ، می‌باشد.

مهمین روستا و عزیزاده [۲۵] اصلاحاتی را به رابطه (۶) با تعریف یک پارامتر جدید m و اضافه نمودن یک زاویه اصطکاک اولیه، φ_0 ، به شرح رابطه (۷) اعمال نمودند.

$$\sin \varphi_m = \begin{cases} \sin \varphi_0 + 2 \frac{\sqrt{\varepsilon_p \times \varepsilon_f^m}}{\varepsilon_p + \varepsilon_f} (\sin \varphi_p - \sin \varphi_0) & \text{for } \varepsilon_p \leq \varepsilon_f \\ \sin \varphi_p & \text{for } \varepsilon_p > \varepsilon_f \end{cases} \quad (۷)$$

در این رابطه، φ_0 کنترل‌کننده محدوده رفتار الاستیک در مصالح می‌باشد. انتظار می‌رود این پارامتر با افزایش تنش همه‌جانبه

جدول ۲- خواص مدل رفتاری اصلاح شده برای نمونه های مصالح سنگریز

پارامتر	خشک، تراکم بالا	اشباع، تراکم بالا	اشباع، تراکم متوسط
$\rho(\frac{gr}{cm^3})$	۲	۲	۱/۸
n	-۰/۱۲	۰/۷۴	۰/۲۷
K	۳۶۷۲	۵۵۶	۴۶۸
ν	۰/۱	۰/۱	۰/۱
$c(\frac{kN}{m^2})$	۶۵	۲۵	۱۵
$\varepsilon_p(\%)$	۶	۶	۶
m	۱	۱	۱
P	۵	$7.7(\frac{\sigma_3}{P_a})+0.25$	$0.37(\frac{\sigma_3}{P_a})-0.375$
ψ_0	-۸۰	-۸۰	-۸۰
φ_p	$51.3-7\log(\frac{\sigma_3}{P_a})$	$55-11.1\log(\frac{\sigma_3}{P_a})$	$52.6-11.3\log(\frac{\sigma_3}{P_a})$
ψ_p	$\begin{cases} 1.5 & \frac{\sigma_3}{P_a} \leq 6 \\ 0.0 & \frac{\sigma_3}{P_a} > 6 \end{cases}$	$\begin{cases} 5.5 & \frac{\sigma_3}{P_a} \leq 3 \\ 0.0 & \frac{\sigma_3}{P_a} > 6 \end{cases}$	$\begin{cases} 2.5 & \frac{\sigma_3}{P_a} \leq 3 \\ 0.0 & \frac{\sigma_3}{P_a} > 6 \end{cases}$
φ_0	$33.6-16.6\log(\frac{\sigma_3}{P_a})$	$41.9-30\log(\frac{\sigma_3}{P_a})$	$22-6.6\log(\frac{\sigma_3}{P_a})$

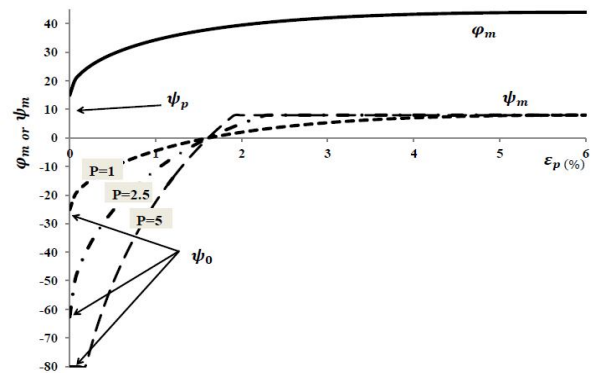
۴-۱- نتایج شبیه سازی

منحنی های تنش انحرافی و کرنش حجمی در برابر کرنش محوری حاصل از آزمایشات و مدل عددی برای شرایط متفاوت اولیه در شکل های ۶ تا ۸ آورده شده است نمودارها در دو حالت ارائه گردیده است. حالت اول تابع پتانسیل نتایج مدل عددی در این مدل بر پایه تابع پیشنهادی مولفین (رابطه ۱۰) بوده و در حالت دوم تابع پیشنهادی راو (رابطه ۸) به مدل معرفی گردیده است. با توجه در شکل های ۶ تا ۸ می توان دریافت که بعلت وجود کرنش های بالای حجمی ناشی از شکست ذرات مدلسازی بر اساس تابع پتانسیل پیشنهادی راو دقت کافی را در مدلسازی رفتار حجمی مصالح سنگریزه ای ندارد در حالیکه تابع پیشنهادی مولفین سبب افزایش قابلیت شبیه سازی مدل رفتاری اصلاح شده به ویژه در حوزه کرنش های حجمی گردیده است. لازم به ذکر است کلیه پارامترهای مدل به جز P و ψ_p در دو حالت تحلیل مشابه در نظر گرفته شده اند (جدول ۲).

به طور کلی مدول الاستیک برای نمونه های اشباع کمتر از نمونه های خشک بوده است. این کاهش مدول برای نمونه های با تراکم بیشتر، قابل توجه تر است. معمولاً در مصالح دانه ای مدول الاستیک با افزایش تنش همه جانبه افزایش می یابد. این رفتار در

اساس رابطه (۱۰) ارائه شده است. آنچه آنکه در شکل مشاهده می گردد، زاویه اتساع بسیج شده از یک مقدار اولیه، ψ_0 ، (۲۵-، $۶۲/۵$ و ۸۰ - درجه به ترتیب برای مقادیر P معادل با ۱، ۵ و ۲۵) تا مقدار حداکثر ψ_p ، افزایش یافته است. پارامتر P کنترل کننده میزان انحنای این منحنی می باشد.

در ادامه کارایی مدل رفتاری با تابع پتانسیل برای مصالح سنگریزه ای سد مسجد سلیمان مورد بررسی قرار می گیرد. در این تحقیق در واقع کرنش های حجمی ناشی از شکست ذرات با مفهوم تغییر در زاویه اتساع بسیج شده مدلسازی می گردد. شکل ۵ نشان می دهد که افزایش پارامتر P سبب کاهش زاویه اتساع بسیج شده می گردد. بنابراین نمونه های با پتانسیل شکست ذرات بیشتر، دارای ضریب P بالاتری خواهند بود. پارامتر ψ_0 ، کنترل کننده زاویه اتساع اولیه می باشد.



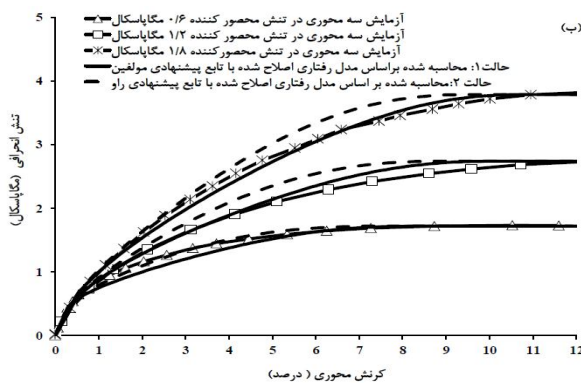
شکل ۵- تغییرات زاویه اصطکاک و اتساع بسیج شده با تغییرات ضریب P

۴-۲- شبیه سازی عددی

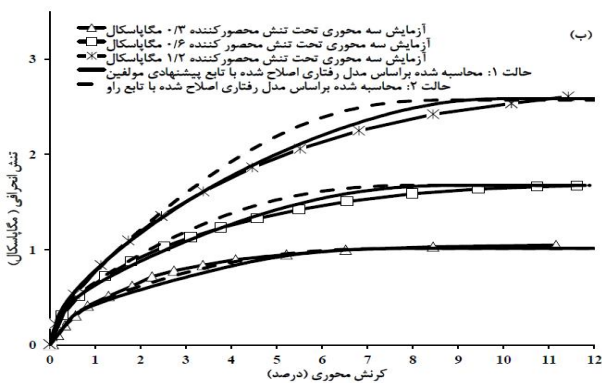
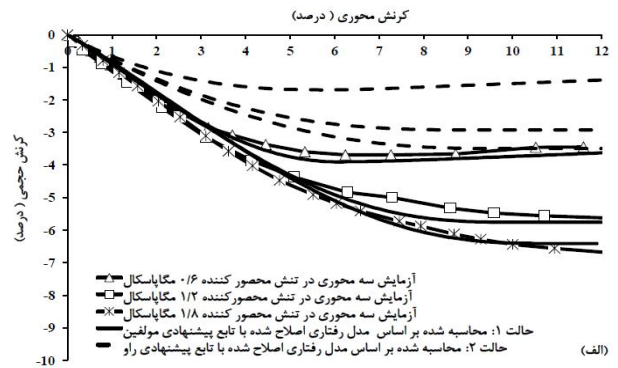
مدلسازی عددی آزمایش سه محوری با استفاده از نرم افزار *FLAC* صورت گرفت. کلیه توابع معرفی شده در بخش قبل با استفاده از قابلیت برنامه نویسی نرم افزار (*FISH*) به مدل رفتاری اعمال گردیده است. مدل سازی بر روی یک تک المان در شرایط تقارن محوری با در نظر گرفتن شرایط مرزی مناسب انجام پذیرفته است. برنامه نوشته شده در هر گام از تحلیل کرنش های برشی پلاستیک را محاسبه نموده و بر اساس توابع تعریف شده کلیه پارامترهای مدل به روز رسانی می گردد. بر اساس این روش کلیه آزمایشات سه محوری مدلسازی گردیده و پارامترهای نهایی به شرح جدول ۲ حاصل گردیدند. کلیه این پارامترها در بخش ۳ معرفی شده اند به جز پارامترهای C و D که به ترتیب چسبندگی و ضریب پواسون الاستیک می باشند.

همه‌جانبه دارد در حالیکه مقدار این زاویه در تنش‌های جانبی زیاد معادل صفر است. بعلاوه پارامتر P با افزایش تنش همه‌جانبه، افزایش می‌یابد. همچنین برای یک فشار جانبی و تراکم برابر این پارامتر در نمونه‌های خشک بیش از نمونه‌های اشباع می‌باشد. در مجموع نتایج حاکی از آن است که پدیده شکست ذرات نقش تعیین کننده را در رفتار تغییر شکلی مصالح سنگریزه‌ای دارد.

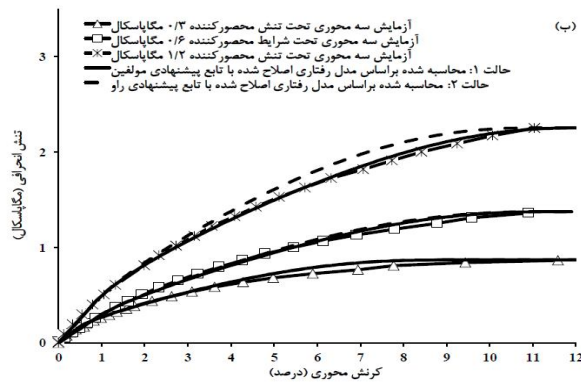
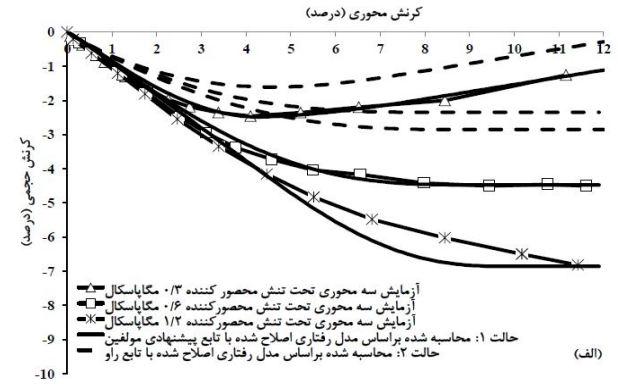
نمونه‌های اشباع به خوبی قابل رویت می‌باشد در حالیکه توجه به جدول ۲ نشان می‌دهد برای نمونه‌های خشک با افزایش تنش همه‌جانبه، مدول الاستیک کاهش می‌یابد (توان n منفی است). که می‌تواند ناشی از آن باشد که شکست ذرات در مصالح خشک شدیدتر از مصالح اشباع بوده که شاخص شکست مارشال، B_g ، ارائه شده در جدول ۱ گواه این مدعا می‌باشد. در همه آزمایشات زاویه اتساع حداکثر ψ_p مقدار بزرگتر از صفر در مقادیر پایین تنش



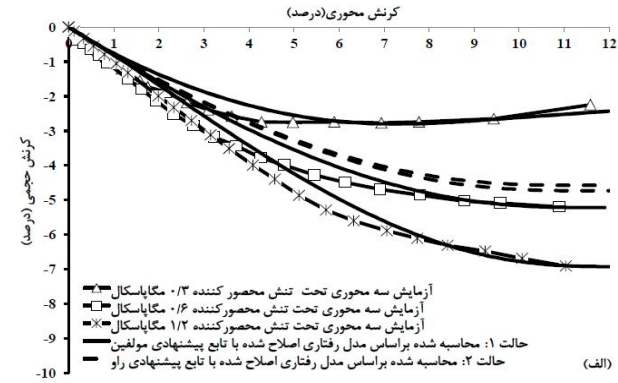
شکل ۶- نتایج آزمایش های سه محوری انجام شده و مدلسازی شده برای نمونه‌های خشک و با تراکم بالا



شکل ۷- نتایج آزمایش های سه محوری انجام شده و مدلسازی شده برای نمونه‌های اشباع و با تراکم بالا



شکل ۸- نتایج آزمایش های سه محوری انجام شده و مدلسازی شده برای نمونه‌های اشباع و با تراکم متوسط



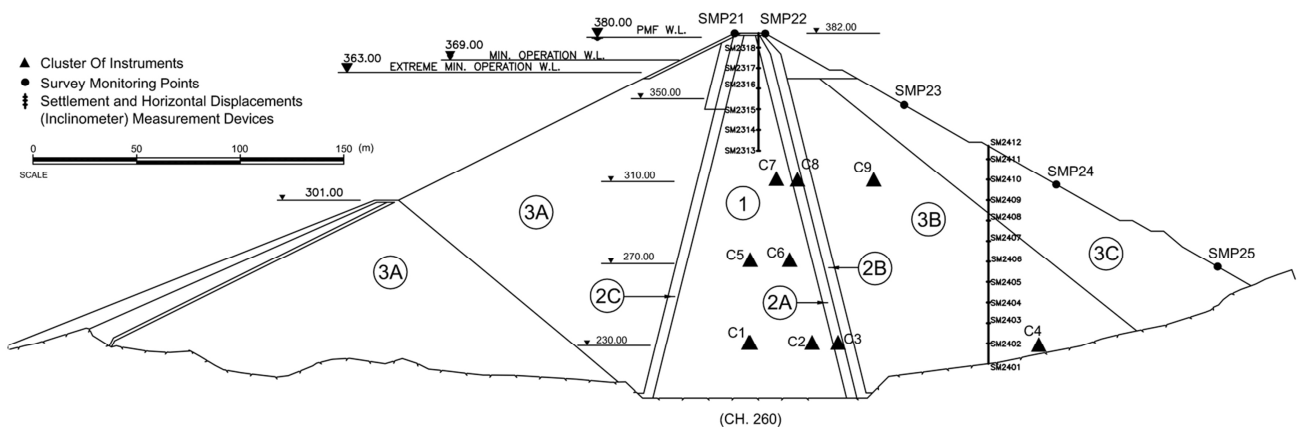
۵-ارزیابی کارایی مدل رفتاری اصلاح شده در سازه واقعی

در این بخش کارایی مدل رفتاری اصلاح شده در مقیاس واقعی با تحلیل عددی یک سازه واقعی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. سد مسجد سلیمان در جنوب شرق کشور یک سد سنگریزه‌ای با هسته مرکزی رسی بسیار بلند با ارتفاع ۱۷۸ متر بوده که در نوامبر ۲۰۰۰ ساخت آن به پایان رسیده و تا ژوئن ۲۰۰۲ آبیگری آن تکمیل گردید. پوسته‌های سنگریزه‌ای این سد از جنس کنگلومرا با سیمان آهکی مقاوم حاصل از انفجار در منبع قرضه می باشد. تعداد زیادی ابزار دقیق در بدنه این سد مورد نصب گردیده که متأسفانه بخش عمده‌ای از آنها از کارایی خارج شده است. در شکل ۹ مقطع اصلی سد و موقعیت ابزارهای سالم آن تا انتهای ساخت آورده شده است. پوسته‌های این سد (نواحی 3A، 3B و 3C) از مصالح سنگریزه‌ای با پتانسیل بالای شکست ذرات تشکیل گردیده است. آزمایشات سه‌محوری بزرگ مقیاس مشروطه در بخش قبل بر روی مصالح بخش‌های 3A و 3C که از یک جنس هستند صورت گرفته است. مطابق روش فوق آزمایشات سه محوری انجام شده برای کلیه مصالح بدنه سد در بخش‌های دیگر شبیه‌سازی عددی شده و پارامترهای رفتاری مدل رفتاری اصلاح شده برای آنها به شرح جدول ۳ است.

در شکل ۱۰ شبکه تفاضلات محدود سه‌بعدی سد نشان داده شده است. مدل‌سازی عددی دوران ساخت بصورت مرحله ای در ۴۲ لایه انجام شده است. تحلیل‌ها بصورت کوپل با در نظر گرفتن فشار آب‌منفذی و تحکیم در هسته صورت گرفته‌اند. پوگانو [۲۶] نشان داد کمیت‌هایی فشار آب‌منفذی(در شرایط وجود تعادل

هیدرولیکی در محیط متخلخل) و تغییرشکل‌ها نسبت به سایر کمیت‌های مناسب‌تر جهت کالیبره نمودن مدل‌های عددی مبتنی بر مکانیک محیط‌های پیوسته می‌باشند لذا در ادامه جهت اثبات کارایی مدل رفتاری اصلاح شده برای کالیبراسیون مدل تحلیلی سد در دوران ساخت از مقادیر اندازه گیری شده این کمیت‌ها استفاده شده است.

مقایسه بین مقادیر محاسبه شده و اندازه گیری شده فشار آب منفذی در هسته سد در زمان ساخت در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌گردد. همچنین مقادیر نشست حاصل از تحلیل عددی و مقادیر اندازه‌گیری شده حاصل از ابزار دقیق در هسته و روی محور سد و نیز پوسته پایین دست در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. در این شکل‌ها تطابق مناسبی بین نتایج تحلیل عددی و مقادیر اندازه‌گیری مشاهده می‌شود. منحنی‌های هم تراز فشارآب منفذی و نشست قائم برای مقطع حداکثر سد (مقطع ۲۶۰) در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ مشاهده می‌گردد. فشار آب منفذی بسیار زیاد در هسته سد از موارد مشاهده شده در این سد در زمان ساخت است که عمدتاً به رطوبت اجرایی بیش از بهینه در هسته (حدود ۲ درصد بیشتر)، نفوذپذیری بسیار کم هسته و همچنین سرعت سریع ساخت نسبت داده می‌شود. با توجه به اینکه وجود پتانسیل بالای شکست ذرات مصالح پوسته سد نقش تعیین کننده در وقوع تغییرشکل‌های بزرگ این سد داشته است، تطابق مناسب نتایج مدل عددی و نشست‌های اندازه‌گیری شده بویژه در پوسته حاکی از دقت و کارایی مناسب مدل رفتاری اصلاح شده در شبیه سازی پدیده خرد شدگی در مقیاس واقعی دارد.

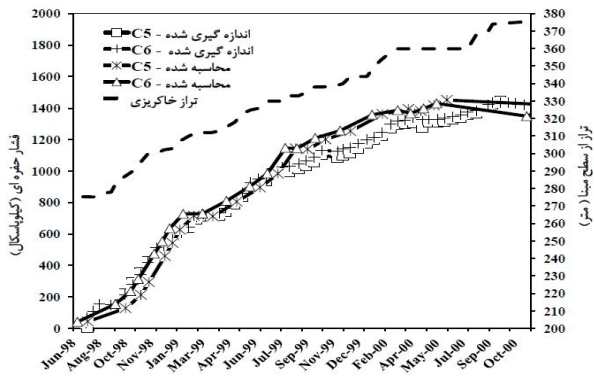


شکل ۹- ناحیه های مختلف بدنه و موقعیت ابزار دقیق سالم در مقطع اصلی سد (کیلومتر ۲۶۰)

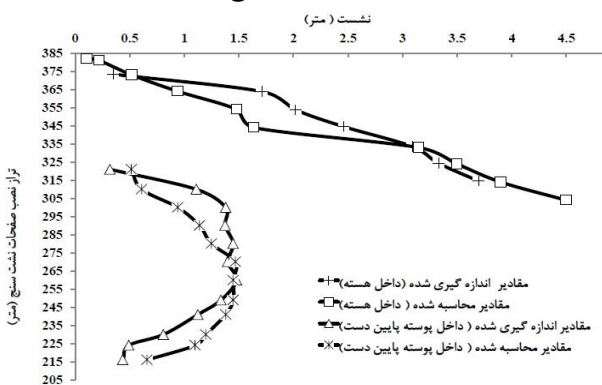
جدول ۳- پارامترهای مدل رفتاری اصلاح شده برای بخش های مختلف

بدنه سد مسجد سلیمان

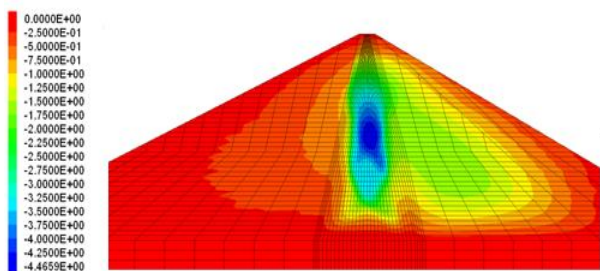
پارامتر	3B	2A	2B,2C	هسته (۱)
$\rho (\frac{gr}{cm^3})$	۲	۱/۹	۲/۱	۱/۸۹
n	۰/۰۵	۱	۰/۰	۰/۸
K	۴۲۲	۱۳۸	۱۶۶۳	۱۲۰
ν	۰/۲	۰/۱۵	۰/۱	۰/۱۵
$c (\frac{kN}{m^2})$	۴۰	۱۰	۲۰	۳۰
$\epsilon_p (\%)$	۷	۸/۵	۸/۵	۱۰
m	۱	۱	۱	۱
P	۲/۵	۳/۵	۱	۱
ψ_0	-۸۰	-۸۰	-۸۰	-۸۰
ϕ_p	$42.2 - 0.64 \log(\frac{\sigma_p}{P_s})$	$45 - 6.64 \log(\frac{\sigma_p}{P_s})$	$46.3 - 4.8 \log(\frac{\sigma_p}{P_s})$	۳۰
ψ_p	۰/۰	۰/۰	$1.15 - 0.83 \log(\frac{\sigma_p}{P_s})$	۰/۰
ϕ_0	$34.2 - 20 \log(\frac{\sigma_p}{P_s})$	$39.7 - 2.7 \log(\frac{\sigma_p}{P_s})$	$30 - 2.6 \log(\frac{\sigma_p}{P_s})$	۰/۰



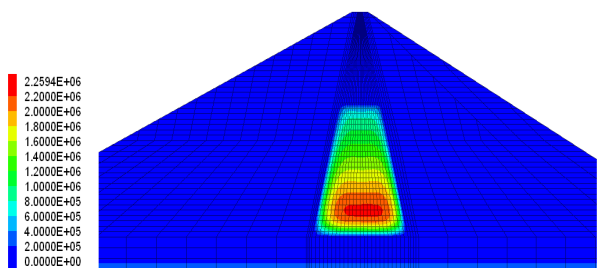
شکل ۱۲- تغییرات مقادیر محاسبه شده و اندازه گیری شده در پیژومترهای الکتریکی نصب شده در تراز +۲۷۰ در مقطع اصلی سد مسجد سلیمان



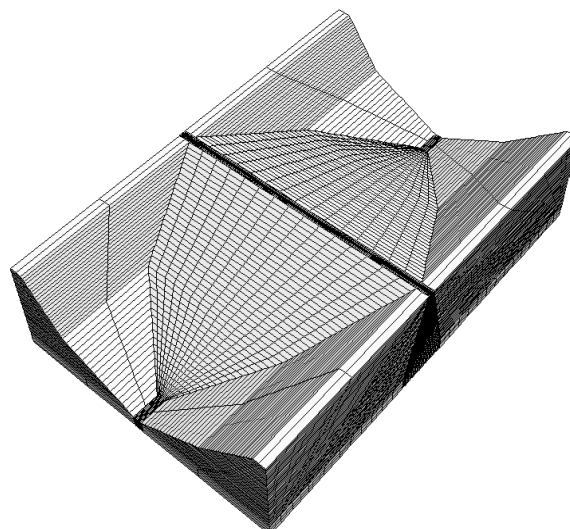
شکل ۱۳- پروفیل قائم نشست اندازه گیری شده و محاسبه شده در راستای محور سد و در پوسته پایین دست مقطع اصلی سد مسجد سلیمان و در انتهای ساخت



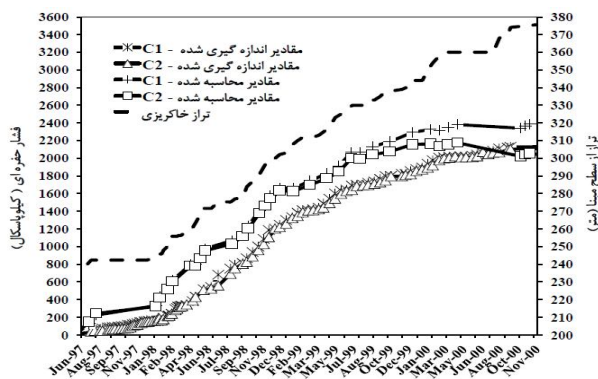
شکل ۱۴- توزیع کنتوری نشست در مقطع اصلی سد مسجد سلیمان در انتهای ساخت



شکل ۱۵- توزیع کنتوری فشار خرفه ای در مقطع اصلی سد مسجد سلیمان در انتهای ساخت



شکل ۱۰- هندسه سه بعدی المان بندی شده سد مسجد سلیمان



شکل ۱۱- تغییرات مقادیر محاسبه شده و اندازه گیری شده پیژومترهای الکتریکی نصب شده در تراز +۲۳۰ در مقطع اصلی سد مسجد سلیمان

۶- نتیجه گیری

تمرکز اصلی این تحقیق بر ارائه یک رویکرد برای شبیه‌سازی عددی رفتار پیچیده مصالح سنگریزه‌ای با توجه ویژه به تغییرات حجمی ناشی از پدیده شکست ذرات در شرایط بارگذاری برشی بوده است. در این شبیه‌سازی از یک مدل رفتاری سخت شونده/ نرم شونده استفاده می‌شود که در آن برای شبیه‌سازی مناسب‌تر رفتار انقباضی در مصالح دارای خردشدگی شدید، تابعی جدیدی برای تغییرات زاویه اتساع بسیج شده گنجانده شده است. سپس کارایی این مدل در شبیه‌سازی دسته‌ای از آزمایشات سه محوری بزرگ مقیاس روی مصالح پوسته سد مسجد سلیمان ارزیابی شده است. در ادامه کارایی این مدل اصلاح شده در برآورد کمیت‌های رفتاری (تغییر شکل، فشار حفره ای و...) یک سازه واقعی متشکل از مصالح سنگریزه‌ای دارای پتانسیل خردشدگی شدید ذرات نظیر سد مسجد سلیمان بررسی شده است. نتایج این ارزیابی‌ها حکایت از کارایی بالای این مدل رفتاری اصلاح شده در شبیه‌سازی رفتار مصالح سنگریزه‌ای با پتانسیل خردشدگی شدید در حوزه تغییر حجم های ناشی از این پدیده بویژه در شرایط بارگذاری برشی دارد.

۷- منابع

- [6] Marsal, R.J. (1973). Mechanical Properties of Rock fill, in: R.C. Hirshfeld, S.J. Poulos (Eds.), Embankment-Dam Engineering, Casagrande Volume, John Wiley & Sons Inc., N. Y., pp.109-200.
- [7] Indraratna, B., Wijewardena, L.S.S., Balasubramaniam, A.S. (1993). "Large-scale triaxial testing of greywacke rockfill". Geotechnique, Vol. 43, No.1, pp.37-51.
- [8] Lade, P.V., Yamamuro, J.A., Bopp, P.A. (1996). "Significance of particle crushing in granular materials", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 122, No.4, pp. 309-316.
- [9] Varadarajan, A., Sharma, K., Venkatachalam, K., Gupta, A. (2003), "Testing and modeling two rockfill materials", J. Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE, Vol.129, No.3, pp. 206-218.
- [10] Russell, A.R. and Khalili, N. (2004) "A bounding surface plasticity model for sands exhibiting particle crushing", Canadian Geotechnical Journal, Vol.41, No.6, pp.1179-1192.
- [11] Duncan, J.M., Chang, C.Y. (1970). "Nonlinear analysis of stress and strain in soils". Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol.96, No. 5, pp.1629-53.
- [12] Moshanir Power Engineering Consultants. (1996). Review on Additional Laboratory Tests on Materials of Masjed-e-Soleyman Dam, Tehran, Iran.
- [13] Rowe, P.W. (1963). "Stress-dilatancy, earth pressure and slopes", Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol.89, No.5, pp.37-6.
- [14] Aghaei A., Soroush A., Rayhani M. (2010). "Large-scale triaxial testing and numerical modeling of rounded and angular rockfill materials", Scientia Iranica, Transaction A: Civil Engineering, Sharif University of Technology, Vol.17, No.3, pp.169-183.
- [15] Soroush, A. and Jannatiaghdam, R. (2012). "Behavior of rockfill materials in triaxial compression testing", Iran, International Journal of Civil Engineering, Technical Note, pp. 153-161
- [16] Hazen, A. (1911), Discussion of Dam on Sand Foundation, by A. C. Koenig, Transaction ASCE, New York, N.Y.
- [1] Marsal, R.J. (1967). "Large scale testing of rock fill materials", Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 93, No. 2, pp. 27-43.
- [2] Fumagalli, E. (1969). "Tests on cohesion less materials for rockfill dams", Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 95, No.1, pp.313-332.
- [3] Bertacchi, P., Bellotti, R. (1970). "Experimental research on materials for rockfill dams", 10th Int. Congress on Large Dams, ICOLD, Montreal, Vol. Q36, pp. 511-529.
- [4] Fumagalli, E., Moscini, B., Rossi, P.P. (1970), "Laboratory tests on materials and static models for rockfill dams", 10th Congress on Large Dams, ICOLD, Montreal, Vol. Q3.6, pp. 531-551.
- [5] Marachi, N.D., Chan, C.K., Seed, H.B. (1972). "Evaluation of properties of rockfill materials", Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 98, No.1, pp.95-114.

- [17] Leslie, D.D. (1963). "Large scale triaxial tests on gravelly soils", Proceeding of the 2nd Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Brazil, Vol.1, pp,181-202
- [18] Lee, K. L., Farhoomand, I. (1967). "Compressibility and crushing of granular soils in anisotropic triaxial compression", Canadian Geotechnical Journal, Ottawa, Canada, Vol. 4, No.1, pp.68-86.
- [19] Miura, N., O-hara, S. (1979), "Particle crushing of decomposed granite soil under shear stresses", Soils and Foundations, Vol. 19 No.3, pp.1-14.
- [20] Hardin, B. O. (1985). "Crushing of soil particles", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 111, No.11, pp.1177-1192.
- [21] Indraratna, B., Salim W. (2002). "Modelling of particle breakage of coarse aggregates incorporating strength and dilatancy", Proceedings of the Institution of Civil Engineers, London, Vol. 155, No.4, pp.243-252.
- [22] Itasca consulting group. (2011).FLAC; FastLagrangian Analysis of Continua, Minneapolis, Minnesota, USA.
- [23] Escuder, I., Andreu, J. Rechea, M.(2005). "An analysis of stress-strain behavior and wetting effects on quarried rock shells", Canadian Geotechnical Journal, Vol.42, pp.51-60.
- [24] Vermeer, P. A., De Borst, R. (1984). "Non-associated plasticity for soils, concrete and rock", Heron, Vol. 29, No.3.
- [25] MahinRoosta, R. Alizadeh, A. (2012). "Simulation of collapse settlement in rockfill material due to saturation", Iran, International Journal of Civil Engineering, Vol.10, No.2.Pp.125-135
- [26] Pagano, L., Sica, S. and Desideri, A. (2006). "Representativeness of measurements in the interpretation of earth dam behavior", Canadian Geotechnical Journal, Vol.43, No.1, pp.87-99.