Archive of SID

تحلیل عددی سدهای سنگریزه‌ای در اولین آبگیری- مطالعه موردی سد مسجد سلیمان

محمد ملکی استادیار دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان
امیرعطا علوی فر کارشناس ارشد ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

چکیده

بررسی پایداری و تغییر شکل سدهای خاکریز در حین اولین آبگیری از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. نواحی پوسته در سدهای سنگریزه‌ای غالباً به صورت خشک کوبیده می‌شوند. در زمان اولین آبگیری، حضور آب باعث کاهش مقاومت بین سنگدانه‌ها، شکست در نقاط اتصال و نهایتاً لغزش و جابجایی دانه‌ها در پوسته بالادست خواهد شد. اگرچه مطالعات زیادی در اشل آزمایشگاهی، جهت بررسی پدیده رمبش اشباعی یا فرونشست و عوامل موثر بر آن در مراجع موجود نمی‌باشد ولی نتایج رفتارسنجی موجود از تعداد نسبتاً زیادی سد، اهمیت و لزوم در نظرگیری این پدیده را به اثبات می‌رساند. در این مقاله هدف ارائه یک تحلیل عددی است که قابلیت مدل کردن رمبش اشباعی را دارا باشد. پس از انجام یک مجموعه مطالعه در انتخاب مدل رفتاری، یک مدل ارتجاعی خمیری با مکانیزم نرم شوندگی تغییر شکل مناسب به نظر رسید. کد محاسباتی جهت انجام تحلیل‌ها *FLAC 2D VER 4.00* می‌باشد. جهت اعتبار بخشی به نتایج حاصل از تحلیل‌ها، از نتایج رفتارنگاری بدنه سد مسجد سلیمان استفاده شده است. انجام تحلیل مراحل آبگیری سد نشان می‌دهند که مدل رفتاری مورد نظر بطور نسبی قابلیت مدل کردن رفتار سد در حین ساخت و اولین آبگیری را داراست.

کلمات کلیدی: اولین آبگیری، سد سنگریزه‌ای، رمبش اشباعی، تحلیل عددی، نرم شوندگی کرنش.

Numrical Analysis of Rock fill Dams During First Stage Impounding-Case Study of Masjed Soleyman Rockfill Dam

M. Maleki Dept. of Civil. Eng., University of Bu-Ali-Sina Hamedan
A. Alavi Far Geotechnical Eng., University of Bu-Ali-Sina Hamedan

Abstract

The evaluation of stability and deformation of rock fill dams during the first stage of impounding is a very important subject. The upstream zone of rock fill dams usually is compacted in a dry condition. In the first filling of reservoir, due to the presence of water, a reduction in strength among rock particles and a breakage in contact zone of them happen. This causes sliding between granular materials. Even though there are not enough researches focusing on the saturated collapse or settlement of this phenomenon, the results of monitoring process in several dams indicate the necessity for inclusion of this phenomenon in numerical analysis. This paper provides a numerical analysis to simulate such a collapsible performance. An elasto-plastic constitutive model with the mechanism of strain softening was used with application of Flac 2D Ver. 4.00 as a computational code. For validation of outcoming results, the monitoring information of Masjed Soleyman dam were used. The results show that the implemented model has an acceptable ability to model the behaviour of this dam during the first impounding stage.

Key words: First impounding, Rock fill dam, Collapse settlement, Numerical analysis, Strain softening model.

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

یکی از مسائل مربوط به اولین دوره آبگیری سدهای سنگریزه‌ای، بروز پدیده رمبش اشباعی است. اساساً رمبش اشباعی در پوسته بالادست، مربوط به لغزش و شکست، در نقاط تماس سنگ‌دانه‌ها در اثر اشباع شدن است. بیشتر مشاهدات انجام شده در مورد سدهای سنگریزه‌ای بلند، نشان می‌دهند که عمل بالا آمدن آب، معمولاً با یک نشست پیوسته یا رمبش ناگهانی بعد آبگیری مخزن همراه بوده است که از آن جمله می‌توان به سدهای Ellsiro، Valley، Cougar، Gepatsch، Roud، Butte-LG-2 و Infiernillo اشاره کرد که یک چنین عکس العملی را در هنگام و بعد از یک دوره کامل آبگیری تجربه کرده‌اند (Duncan &Nobari (1972)، Hagashi (1975)، List و Sadgorski (1984)) [۶]. در مقیاس کارهای آزمایشگاهی پدیده رمبش اشباعی مورد توجه تعدادی از محققین قرارگرفته است. غالب آزمایش‌ها در مسیرهای ادئومتری و سه‌محوری بوده است. در یک آزمایش ادئومتری اگر نمونه سنگریزه خشک تحت بار قرار گیرد و لحظه‌ای برسد که افزایش نشست متوقف گردد در صورت خیس شدن، سنگریزه متحمل نشست قابل توجهی می‌گردد. این مسئله به اثر روان‌کنندگی (کاهش اصطکاک) آب نسبت داده می‌شود که موجب لغزش و آرایش جدید دانه‌ها و قطعات درون توده سنگ، برای ایجاد حالت پایدارتر می‌شود [۷]. دانکن و نوبری در یک مجموعه آزمایش‌های گسترده اثر خیس شدگی را طی مسیرهای ادئومتری و سه‌محوری مورد ارزیابی و مطالعه قرار دادند. آنها مشاهده کردند که بین منحنی‌های تنش انحرافی – کرنش محوری در حالت خشک و تر تفاوت وجود دارد. در مرحله‌ای از آزمایش روی نمونه خشک اگر نمونه در معرض خیس‌شدگی قرار گیرد، بعد از تحمل مقداری نشست وضعیت تنش– تغییر شکل روی منحنی حالت اشباع قرار می‌گیرد [۶]. برطبق نظر ترزاقی (۱۹۶۰) [۶]، قسمت بیشتری از نشست تولید شده، ناشی از خیس شدن توده سنگ، به کاهش مقاومت برشی بین قطعات این توده برمی‌گردد. این موضوع باعث شکست نقاط تیز در محل اتصال دانه‌ها و نهایتاً موجب نشست‌های بیشتری در توده سنگریز می‌شود. درسنگ‌های هوازده این پدیده با شدت بیشتری صورت خواهد پذیرفت [۶].

در واقع دو نظریه مکمل هم، می‌تواند رفتار ویژه سنگریزه‌ها را در مرحله آبگیری تشریح کند:

- لغزش، که شامل تغییر شکل‌های برگشت ناپذیر و تمایل به ساختار پایدارتر در توده سنگریزه‌ای است و،
- شکست و خردشدگی در نقاط تماس سنگدانه‌ها، که اساساً در اثر تنش‌های عمودی بزرگ در سدهای بلند بوجود می‌آید. این موضوع باعث کاهش زاویه اصطکاک داخلی مصالح شده و در مرحله آبگیری عمل لغزش دانه‌ها را تسهیل می‌بخشد. (کاهش زاویه اصطکاک داخلی مصالح دانه‌ای تحت تنش‌های محدود کننده بالا توسط محققین زیادی در آزمایشگاه بوسیله دستگاه سه محوری مورد مطالعه قرار گرفته است). طی عمل آبگیری با افزایش سطح آب دریاچه، لایه‌های پوسته مستغرق می‌شوند و باید توجه داشت که این لایه‌ها تحت تأثیر وزن لایه‌های بالایی هستند که هنوز اشباع نشده‌اند و بنابراین کاهش تنش مؤثر ناشی از اشباع‌شدگی و استغراق مصالح تأثیر بسزایی در کاهش عمل رمبش اشباعی نخواهد داشت.

تأثیر پدیده رمبش اشباعی در طرح و محاسبه سدهای خاکریز، نیازمند اطلاع کافی از رفتار مصالح بدنه سد در این زمینه است. تحلیل عددی وقتی رضایت‌بخش خواهد بود که بتواند این پدیده را در قالب یک مجموعه روابط رفتاری، با در نظرگیری عوامل موثر و تعیین کننده بخوبی مدل کند. ارائه چنین روابط رفتاری براساس نتایج آزمایش‌های مناسب در آزمایشگاه و استفاده از نتایج ابزار دقیق عملی خواهد بود. جهت بررسی تأثیر عواملی چون نوع مصالح (جنس، اندازه و شکل دانه‌ها)، درصد اشباع شدگی، درصد رطوبت، دانسیته نسبی، اصطکاک (زبری) بین دانه‌ها، انجام آزمایش‌ها در آزمایشگاه می‌تواند کمک شایانی را ارائه دهد.

روابط رفتاری بدست آمده براین‌اساس، روی نتایج رفتارنگاری، اعتباربخشی می‌گردند تا در صورت موفقیت بتوانند در پیش‌بینی رفتار سدهای خاکریز در اولین مرحله آبگیری مورد استفاده قرارگیرند. کاهش زاویه اصطکاک داخلی در حین آبگیری می‌تواند بعنوان یک عامل مهم بشمار آید که میزان و نحوه این کاهش بستگی به عوامل ذکر شده در فوق دارد. در این تحقیق، جهت نیل به این هدف، از یک مدل رفتاری ارتجاعی خمیری با مکانیزم نرم شوندگی تغییر شکل (ارتجاعی- خمیری نرم شونده) استفاده شده است. در واقع مکانیزم نرم شوندگی موجود در مدل، امکان مدل کردن رمبش اشباعی را فراهم می‌آورد. در پروسه نرم شوندگی، کاهش زاویه اصطکاک داخلی نقش عمده را

www.SID.ir

Archive of SID

بر عهده خواهد داشت. برای اعتبار بخشی تحلیل عددی، از نتایج ابزار دقیق کار گذاشته شده در بدنه سد مسجد سلیمان، در حین آبگیری استفاده شده است. قسمت‌های مختلف این مقاله علاوه بر مقدمه عبارتند از: ۲- مدل‌سازی عددی پدیده رمبش اشباعی پیشنهاد شده در این تحقیق ۳-توصیف مختصری از مدل نرم شونده موجود در کد FLAC ۴- معرفی سد مسجد سلیمان و ابزارنگاری سد ۵- هندسه مقطع مورد تحلیل ۶- مدل‌سازی پدیده رمبش اشباعی برای سد مسجد سلیمان، انتخاب پارامترهای مدل و نحوه انجام آنالیز ۷- بررسی تحلیل عددی و مقایسه با نتایج رفتارنگاری ۸- نتیجه‌گیری.

۲- مدل‌سازی عددی پدیده رمبش اشباعی پیشنهاد شده در این تحقیق

همانگونه که در مقدمه گفته شد پیش‌بینی رفتار سدها در اولین مرحله آبگیری نیازمند درنظرگیری روابط رفتاری مناسب در این خصوص است. تغییر شکل پوسته سد در اولین مرحله آبگیری را در حالت کلی می‌توان یک جریان خمیری دانست که منشأ آن لغزش دانه‌ها نسبت به یکدیگر تا رسیدن به یک وضعیت تعادل (پایدار) است. میزان این تغییر شکل از یک طرف بستگی به اندازه، شکل و جنس دانه‌ها دارد و از طرف دیگر به وضعیت تراکمی مصالح وابسته است. در مقیاس دانه‌ها، لغزش دانه‌ها نسبت به یکدیگر یک پدیده تسلیم‌شدن (yielding) است. به عبارت دیگر معیار کلمب در محل اتصال دانه‌ها ارضا می‌گردد. در مقیاس کلی در مسیرهای ادئومتری یا سه محوری همسان پدیده تغییر شکل (که به صورت حجمی است) ناشی از اشباع شدن مصالح دانه‌ای خشک را به‌عنوان رمبش اشباعی می‌شناسند. گر چه در مسیر سه محوری انحرافی عنوان کردن پدیده تسلیم شدگی در بیان رفتار ناشی از اشباع شدن بی ارتباط نخواهد بود. واقعیت امر آنست که در مصالح خاک، دامنه ارتجاعی بسیار کوچک است به عبارت دیگر جواب این مصالح تقریباً از همان ابتدای بارگذاری بصورت ارتجاعی- خمیری است. جریان خمیری برای مسیرهای مختلف بارگذاری اتفاق می‌افتد. بدین ترتیب برای بیان رفتار یک دامنه ارتجاعی (سطح تسلیم) تعریف می‌کنند. وقتی وضعیت تنش به این سطح رسید با ادامه بارگذاری جریان خمیری یا پدیده تسلیم شدگی اتفاق می‌افتد که این می‌تواند برای هر مسیر تنشی (از جمله ادئومتر یا سه محوری) اتفاق افتد. بدین ترتیب می‌توان گفت که پدیده تغییر شکل ناشی از اشباع شدگی را در چارچوب تئوری ارتجاعی – خمیری می‌توان مورد تحلیل قرار داد و تعبیر تسلیم شدگی را مدنظر قرار داد. برای مدل کردن این پدیده نیاز به تعریف یک یا چند متغیر وضعیت داخلی است. قانون حاکم بر چگونگی تغییر این متغیرهای وضعیت با توجه به مشاهدات تجربی تعیین خواهد شد. این قانون می‌تواند به عنوان بخش مکمل در یک مدل رفتاری ارتجاعی خمیری پایه در کدهای محاسباتی اجزاء محدود یا تفاوت‌های محدود نصب گردد. قطعاً اگر مدل پایه، قابلیت بیان جنبه‌های بیشتری از رفتار خاک را داشته باشد، دقت پیش‌بینی نیز بیشتر خواهد شد. در این تحقیق برای حصول این هدف از قابلیت‌های کد FLAC استفاده گردید. زاویه اصطکاک داخلی به عنوان متغیر وضعیت داخلی در نظر گرفته شد. دلیل چنین انتخابی نیز منطقی است زیرا در شرایطی که تنش عمودی ناشی از وزن لایه‌های خشک خاکریز بالای تراز آبگیری ثابت است، این مشخصه اصطکاکی بین دانه‌ای است که بلافاصله پس از خیس شدن کاهش یافته و باعث لغزش می‌گردد. بنابر این با کاهش این متغیر در تحلیل می‌توان انتظار داشت که در محیط تغییر شکل اتفاق افتد. کاهش این متغیر درست بلافاصله بعد از خیس شدن شروع می‌شود. این لحظه شروع جریان خمیری نیز خواهد بود. با توجه به آنکه کاهش این متغیر با کاهش تنش انحرافی حداکثر همراه خواهد بود بنابر این می‌توان تحلیل پوسته بالادست سد را در مرحله اولین آبگیری با جریان خمیری نرم شوندگی تغییر شکل مدل کرد. به همین منظور مدل مور کولمب غیر متحد نرم شونده موجود در کد FLAC مورد استفاده قرار گرفت. نکته مهم یا یکی از اشکالات اساسی مدل‌های ارتجاعی خمیری کامل مانند مور کلمب این است که شروع جریان خمیری بعد از آنکه وضعیت تنش به سطح خرابی رسید شروع می‌شود. با توجه به آنکه در محدوده داخل سطح خرابی جواب مدل کاملاً ارتجاعی است، لذا با وضع موجود آن امکان مدل کردن اثرات ناشی از اشباع شدن در کلیه نواحی پوسته بالادست وجود نخواهد داشت. بدین منظور با استفاده از زبان برنامه نویسی FISH که مختص کدFLAC است، ابتدا برای هر لایه‌ی در معرض آبگیری تنش‌های اصلی در نقاط مختلف محاسبه شده و از آنجا زاویه اصطکاک داخلی مربوطه تعیین می‌گردد. کاربرد مدل با این مقادیر زاویه اصطکاک داخلی، در لحظه آبگیری مصالح را تحت جریان خمیری قرار می‌دهد. نحوه کاربرد مدل نرم شونده مطابق دستورات کد FLAC صورت

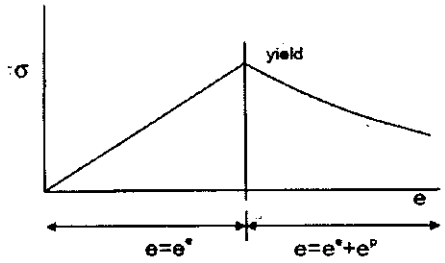
www.SID.ir

Archive of SID

می‌گیرد. عملیات فوق برای لایه‌های بعدی که بطور متوالی در معرض اشباع شدن قرار می‌گیرند انجام خواهدگرفت. در خصوص نحوه مدل‌کردن پدیده نرم شوندگی تغییر شکل میزان کاهش زاویه اصطکاک داخلی بستگی به نوع مصالح مقدار زاویه اصطکاک مبناء (شروع جریان خمیری، که در نقاط مختلف متفاوت است) دارد. مقدار کل کاهش بصورت درصدی از زاویه مبناء تعیین می‌شود. که در این تحقیق نیز بدین ترتیب عمل شده است. مرجع اصلی در حدس این درصد نتایج تجربی است که متأسفانه انجام نگرفته است.

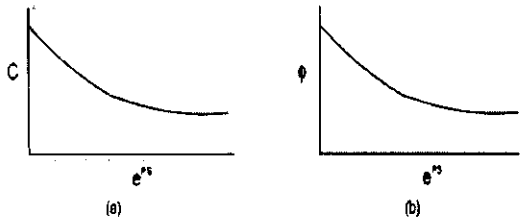
۳- توصیف مختصری از مدل نرم شونده

این مدل براساس مدل مور-کولمب و دارای قانون جریان غیرمتحد برشی می‌باشد [۵]. با توجه به آنکه این مدل قادر به بیان تغییر شکل‌های خمیری ناشی از بارهای همه جانبه نیست بنابراین در پیش‌بینی پدیده رمبش اشباعی در محیط‌های تحت این نوع بار با ضعف همراه است، و جهت برطرف کردن این نقیصه اضافه کردن یک مکانیزم خمیری همسان به مدل لازم خواهد بود



شکل ۱- منحنی تنش کرنش در مدل نرم شوندگی[۵]

تفاوت این مدل با مدل پایه آن (مور کولمب)، امکان تغییر پارامترهای مدل، یعنی چسبندگی، زاویه اصطکاک و اتساع و مقاومت کششی مصالح پس از رخ‌دادن جریان پلاستیک در ماده می‌باشد. همانطور که می‌دانیم، در مدل مورکولمب، این خصوصیات پس از رسیدن ماده به حالت پلاستیک، به صورت ثابت فرض می‌شوند، ولی در این مدل می‌توان پارامترهای مدل را به صورت توابعی از پارامتر نرم‌شوندگی، که کرنش برشی پلاستیک را اندازه‌گیری می‌کند، تعریف نمود.



شکل ۲- نحوه تغییرات چسبندگی(a) و زاویه اصطکاک (b) تابعی از قسمت پلاستیک کرنش برشی کل[۵]

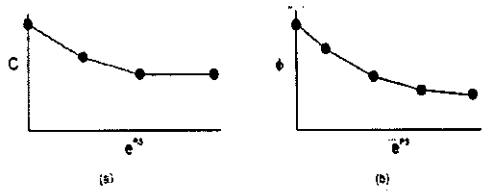
برنامه، کرنش برشی کل پلاستیک را بر حسب جزء پارامتر نرم شوندگی در هر سیکل محاسباتی اندازه‌گیری کرده، باعث تغییر پارامترهای مدل براساس توابع تعریف شده توسط کاربر می‌گردد. کرنش برشی پلاستیک، توسط پارامتر نرم‌شوندگی کرنش برشی، ε^{ps} اندازه‌گیری می‌گردد. فرمول جزیی این پارامتر به صورت زیر می‌باشد:

$$\Delta\varepsilon^{ps}=\left\{\frac{1}{2}\left(\Delta\varepsilon_1^{ps}-\Delta\varepsilon_m^{ps}\right)^2+\frac{1}{2}\left(\Delta\varepsilon_m^{ps}\right)^2+\frac{1}{2}\left(\Delta\varepsilon_3^{ps}-\Delta\varepsilon_m^{ps}\right)^2\right\}^{\frac{1}{2}} \qquad (1)$$

که در آن:

$$\Delta\varepsilon_m^{ps}=\frac{1}{3}\left(\Delta\varepsilon_1^{ps}+\Delta\varepsilon_3^{ps}\right) \qquad (2)$$

توابع تعریف شده توسط کاربر، جهت تغییر پارامترهای چسبندگی، زاویه اصطکاک و اتساع را می‌توان با بررسی یک منحنی یک بعدی تنش-کرنش که پس از آغاز تسلیم شروع به نرم شدن نموده و پارامترهای مقاومتی آن کاهش می‌یابد، نشان داد (شکل (۱)).



شکل۳- نحوه تخمین تغییرات چسبندگی (a) و زاویه اصطکاک (b) به صورت مجموعه‌ای از قسمت‌های خطی در برنامه [۵]

www.SID.ir

Archive of SID

با توجه به این شکل، این منحنی تا نقطه آغاز تسلیم به صورت خطی است. در این محدوده کرنش‌ها فقط ارتجاعی می‌باشند ($\varepsilon = \varepsilon^e$). پس از تسلیم، کرنش کل به صورت ترکیبی از قسمت‌های الاستیک و پلاستیک خواهد بود ($\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p$). در مدل SS، تغییرات چسبندگی، زاویه اصطکاک و اتساع به صورت تابعی از قسمت پلاستیک کرنش کل (ε^p)، تعریف می‌شود. مثال‌هایی از این توابع برای چسبندگی و زاویه اصطکاک در شکل‌های (۲) و (۳) نشان داده‌شده‌اند. مطابق شکل(۳) این توابع به صورت مجموعه‌ای از قسمت‌های خطی دربرنامه FLAC تخمین زده می‌شوند.

رفتار نرم‌شوندگی برای پارامترهای مدل، برحسب کرنش پلاستیک برشی ε^{ps}، توسط کاربر به صورت جدول‌هایی تعریف می‌شود. در فرمول‌نویسی مدل، هر پارامتر به صورت خطی میان دو پارامتر نرم‌شوندگی متوالی، تغییر می‌کند.

۴- معرفی سد مسجد سلیمان

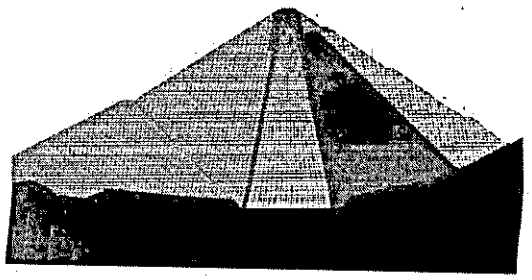
همانطور که اشاره شد، مصالح سنگریزه‌ای پوسته بالادست سد مسجد سلیمان یا گدارلندر به علت خشک کوبیده شدن در دو سال آخر ساختمان بدنه سد و بالا آمدن سریع تراز آب مخزن و با عنایت به نشست های حاصل شده در هسته، همچنین رفتار نقاط نشست سنجی سطحی، دچار رمبش اشباعی شده است[۲]. به همین علت به عنوان مطالعه موردی تحقیق مد نظر قرار گرفته است. سد مسجد سلیمان، بر روی رودخانه کارون، در محل گدارلندر در شمال شرقی شهر مسجد سلیمان، در استان خوزستان قرارگرفته است. محل سد تقریباً در ۲۳/۵ کیلومتری پایین‌دست سد شهید عباسپور (کارون ۱) می‌باشد. مشخصات اصلی این طرح به شرح زیر است شکل(۴) [۸]:

نوع:	سنگریزه‌ای با هسته مرکزی رسی
ارتفاع:	۱۷۷متر
حجم خاکریزی:	۱۴ میلیون متر مکعب
طول تاج:	۴۸۰ متر
تراز تراز تاج:	۳۸۲ متر
تراز پرمخزن حداکثر:	۳۷۲ متر
تراز پایه هسته سد:	۶ متر (متراژ ۲۶۰)

شکل ۴- نمایی از سد مسجد سلیمان

۵- مدل سازی هندسی

مقطعی از سد را که دارای بیشترین ارتفاع و نتایج ابزار رفتارنگاری آن در دست بود مدنظر قرار گرفت و با توجه به نواحی مختلف مقطع و موقعیت سنگ بستر اقدام به مدل‌سازی هندسی آن صورت گرفت. نرم‌افزار FLAC 4.00 دو بعدی که از نرم افزارهای قدرتمند در زمینه مهندسی ژئوتکنیک به شمار می‌رود جهت انجام این تحقیق انتخاب گردید. شبکه المان‌های تولید شده سد و پی آن در شکل (۵) ارائه شده است. لازم به ذکر است که ایجاد هندسه مدل، با دقت بالا و همچنین تولید شبکه‌های پیچیده، از قابلیت‌های این نرم‌افزار است. تعداد المان‌های مدل هندسی ساخته شده، بالغ بر ۱۰۰۰۰ المان است، که این تعداد المان ازیک طرف زمان تحلیل را بسیار طولانی کرده و از طرف دیگر تأثیر بسزایی در افزایش دقت جواب‌ها خواهد داشت [۱].



شکل ۵- شبکه المان‌بندی شده سد مسجد سلیمان [۱]

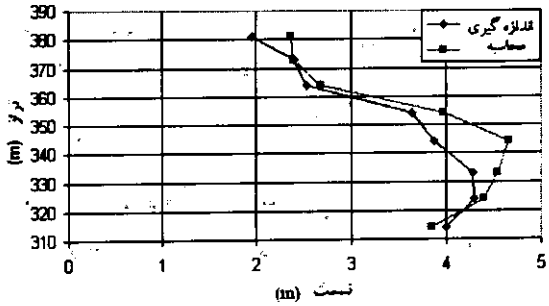
www.SID.ir

Archive of SID

شکل‌های (۹) و (۱۰) در رابطه با مقایسه توزیع نشست‌های محاسبه شده و اندازه‌گیری شده در مرکز هسته از انتهای ساخت تا آخرین مرحله آبگیری می‌باشند.

با توجه به اشکال نشان داده شده، توزیع نشست‌ها دارای شکل هماهنگ بوده، ولی نشست‌های محاسباتی از نشست‌های اندازه‌گیری شده مقداری بیشتر است.

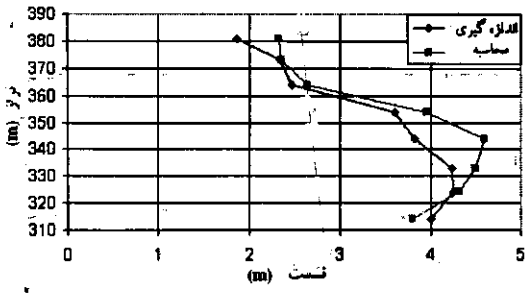
بخش عمده این افزایش مربوط به عملکرد مدل در پایان مرحله ساخت است. زیرا نشست‌های ارائه شده در اشکال یاد شده نشست کلی مربوط به مراحل ساخت و آبگیری است و همانگونه که در قسمت ۶ گفته شد در مرحله پایان ساخت در قسمت‌های میانی و بالای هسته نشست محاسبه شده بیش از مقادیر اندازه‌گیری توسط ابزار نگار است. در بعضی از نقاط قسمت‌های میانی و بالای هسته در مرکز هسته، مقدار اضافه نشست محاسبه شده قبل از آبگیری به بیش از نیم متر هم رسیده است [۱]. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مدل درنظرگرفته شده برای پدیده رمبش اشباعی در حد قابل قبولی خوب عمل کرده است.



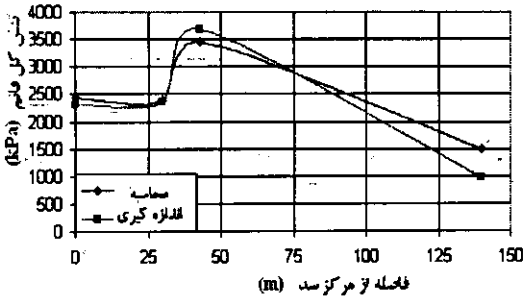
شکل ۹- مقایسه توزیع نشست‌های محاسبه شده و اندازه‌گیری شده در مرکز هسته در پایان آبگیری تا تراز ۳۵۵MASL

بطور کلی باید گفت که با افزایش تراز آبگیری، نشست‌ها افزایش می‌یابند. البته آهنگ افزایش میزان نشست ایجاد شده در اثر رمبش اشباعی، با افزایش تراز آبگیری در مخزن کاهش می‌یابد (کمتر شدن حجم مصالح ناحیه اشباع شده با افزایش تراز آب).

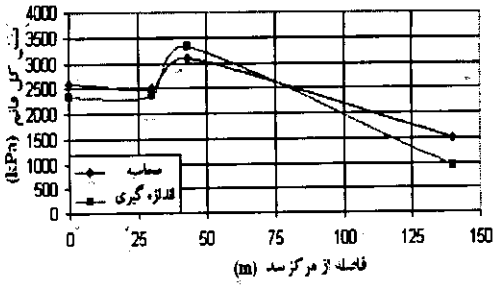
شکل‌های (۱۱) و (۱۲)، به ترتیب مقایسه توزیع تنش‌های کل در اولین و آخرین مرحله آبگیری (ترازهای ۲۵۵ و ۳۵۵ آبگیری) و در مقطع افقی و تراز ۲۳۰ از بدنه سد را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰- مقایسه توزیع نشست‌های محاسبه شده و اندازه‌گیری شده در مرکز هسته در پایان آبگیری تا تراز ۳۳۰MASL



شکل ۱۱- مقایسه تنش‌های کل حداکثر محاسبه شده و اندازه‌گیری شده در هسته و پوسته پایین‌دست در رقوم MASL ۲۳۰در پایان آبگیری تا ترازMASL ۲۵۵.



شکل ۱۲- مقایسه تنش‌های کل حداکثر محاسبه شده و اندازه‌گیری شده در هسته و پوسته پایین‌دست در رقوم MASL ۲۳۰در پایان آبگیری تا تراز ۳۵۵MASL

هر یک از نقاط شکل مربوط به موقعیت نصب ابزارهای دقیق می‌باشد. دراین خصوص، نقطه دارای حداکثر میزان تنش مربوط به فشارسنج نصب شده در فیلتر پایین دست سد می‌باشد. لازم به ذکر است که شبکه ابزاربندی بدنه، شامل زا هسته و خود پوسته بالادست

www.SID.ir

Archive of SID

اختلاف میان تنش‌های موجود در منطقه فیلتر و هسته، بروز پدیده قوس‌زدگی در این تراز آشکار می‌شود. لیکن با مقایسه تنش‌ها در فشارسنج نصب شده در منطقه فیلتر، کاهش میزان تنش کل در انتهای آبگیری نسبت به مرحله اول آبگیری به چشم می‌خورد. دراین خصوص می‌توان چنین اظهار نظر نمود که با افزایش تراز آب در مخزن سد، از شدت قوس زدگی میان هسته و فیلتر کاسته شده است. با توجه به مکانیزم رمبش اشباعی و شبیه‌سازی ایجاد آن در پوسته بالا دست (تحت فشار قرار گرفتن هسته توسط پوسته به هنگام رخداد رمبش)، علل کاسته شدن شدت قوس‌زدگی را می‌توان مربوط به رمبش اشباعی پوسته بالادست سد دانست.

تغییرات نسبت فشار آب حفره‌ای و نسبت قوس‌زدگی در طی مراحل آبگیری نیز محاسبه شده‌اند که مقدار آنها در بعضی از نقاط رفتارسنجی به شرح جداول (۱)، (۲) و (۳) می‌باشد.

جهت مقایسه، مقادیر مربوط به قبل از آبگیری نیز داده شده است. و همانطور که از جداول مشخص است، مقادیر نسبت فشار آب حفره‌ای با افزایش تراز آب در مخزن سد، ثابت مانده و یا کاهش یافته‌اند. کاهش نسبت‌های فشار آب حفره‌ای نشان دهنده افزایش بیشتر تنش نسبت به فشارهای منفذی است که یکی از علل آن می‌تواند ناشی از وقوع تحکیم در اثر فشار وارده فشار ناشی از تسگریز بالادست در اثر رمبش باشد. ثابت ماندن این نسبت‌ها نیز می‌تواند به نوعی نشان دهنده ادامه پروسه تحکیم باشد. در رابطه با نسبت‌های قوس‌زدگی در این نقاط، این نسبت‌ها، با افزایش تراز آب افزایش یافته‌اند. افزایش نسبت قوس‌زدگی نشان می‌دهد که به همراه افزایش تراز آب در مخزن سد و رخ‌دادن رمبش در مناطق اشباع شده، از میزان قوسی شدن هسته کاسته می‌شود، که این مطلب با توجه به اثرات رمبش (فشار وارد آوردن پوسته بالادست بر روی هسته) دور از انتظار نیست. نکته مهم بدست آمده از این تحلیل‌ها مؤید این بود که برای مدل کردن پدیده رمبش اشباعی که یکی از عوامل اصلی نشست‌ها در نواحی هسته و بالادست می‌باشد، بایستی با توجه به مکانیزم این پدیده، زاویه اصطکاک داخلی مصالح سنگریز را درست در لحظه آبگیری به دلایل زیرکاهش داد:

اولاً لغزش دانه‌ها در اثر روان‌کنندگی آب در مصالحی که دارای تراکم کم هستند، و ثانیاً شکست دانه‌های بزرگ در نقاط تماسشان، به علت کم بودن سطح تماس و به تبع آن تمرکز تنش زیاد در سنگریزهای با ارتفاع زیاد، که باعث ایجاد حرکات افقی و عمودی دانه‌های شکسته شده می‌گردد.

جدول ۱- تغییرات نسبت فشار آب حفره‌ای و نسبت قوس زدگی در دوران آبگیری در تراز MASL ۲۳۰

	پائین دست هسته				مرکز هسته			
	نسبت قوس زدگی		نسبت فشار آب حفره ای		نسبت قوس زدگی		نسبت فشار آب حفره ای	
	اندازه گیری	محاسبه	اندازه گیری	محاسبه	اندازه گیری	محاسبه	اندازه گیری	محاسبه
قبل از آبگیری	۰/۷۵	۰/۷۶	۰/۹۱	۰/۷۸	۰/۶۸	۰/۷۱	۰/۹۴	۰/۹۱
آبگیری تا MASL ۳۰۰	۰/۷۷	۰/۷۸	۰/۹۲	۰/۷۸	۰/۷	۰/۷۴	۰/۹۴	۰/۹
آبگیری تا MASL ۳۳۰	۰/۷۷	۰/۸	۰/۹۲	۰/۷۸	۰/۷	۰/۷۷	۰/۹۵	۰/۸۸
آبگیری تا MASL ۳۵۵	۰/۷۸	۰/۸۲	۰/۹۲	۰/۷۸	۰/۷۱	۰/۷۹	۰/۹۴	۰/۸۷

جدول ۲- تغییرات نسبت فشار آب حفره‌ای و نسبت قوس زدگی در دوران آبگیری در مرکز هسته در تراز MASL ۲۷۰

	پائین دست هسته				مرکز هسته			
	نسبت قوس زدگی		نسبت فشار آب حفره ای		نسبت قوس زدگی		نسبت فشار آب حفره ای	
	اندازه گیری	محاسبه	اندازه گیری	محاسبه	اندازه گیری	محاسبه	اندازه گیری	محاسبه
قبل از آبگیری	۰/۶۴	۰/۶۶	۰/۹۳	۰/۸۷	۰/۵۸	۰/۶۳	۰/۹۷	۰/۷۷
آبگیری تا MASL ۳۰۰	۰/۶۶	۰/۶۹	۰/۹۷	۰/۸۷	۰/۶	۰/۶۶	۰/۹۸	۰/۷۷
آبگیری تا MASL ۳۳۰	۰/۶۶	۰/۷۲	۰/۹۸	۰/۸۶	۰/۶۱	۰/۷	۱	۰/۷۵
آبگیری تا MASL ۳۵۵	۰/۶۶	۰/۷۴	۰/۹۸	۰/۸۶	۰/۶۴	۰/۷۴	۰/۹۵	۰/۷۵

www.SID.ir

Archive of SID

جدول۳- تغییرات نسبت فشار آب حفره‌ای و نسبت قوس‌زدگی در دوران آبگیری در ترازMASL ۳۱۰

	نسبت قوس‌زدگی		نسبت فشار آب حفره‌ای	
	اندازه گیری	محاسبه	اندازه گیری	محاسبه
قبل از آبگیری	۰/۵۸	۰/۶۳	۰/۹۷	۰/۷۷
آبگیری تا MASL ۳۰۰	۰/۶	۰/۶۶	۰/۹۸	۰/۷۷
آبگیری تا MASL ۳۳۰	۰/۶۱	۰/۷	۱	۰/۷۵
آبگیری تا MASL ۳۵۵	۰/۶۴	۰/۷۴	۰/۹۵	۰/۷۵

۸- نتیجه‌گیری

۱- براساس نتایج رفتارسنجی و تحلیل‌های عددی صورت گرفته، نشست حداکثر، در انتهای آبگیری و تقریباً در سه پنجم ارتفاع سد رخ داده و در حین مراحل آبگیری محل آن به سمت بالادست حرکت می‌کند.

۲- اثر قوس‌زدگی به دلیل تفاوت سختی مصالح هسته و پوسته مشهود است، که کاهش میزان تنش‌ها در ناحیه هسته را به دنبال دارد و ناشی از آبگیری اولیه اثر آن کاهش می یابد.

۳- علت اصلی نشست‌های زیاد هسته و سنگریز بالادست پس از آبگیری، رمبش اشباعی این مصالح بوده است که لزوم در نظرگیری این پدیده را در طرح و محاسبه سدهای خاکریز به اثبات می رساند.

۴- مدل رفتاری نرم‌شوندگی (ارتجاعی- خمیری نرم شونده) و مدل‌سازی عددی پیشنهادی در این تحقیق، در مدل کردن مراحل اولین آبگیری و شبیه‌سازی پدیده رمبش اشباعی در اثر اشباع شدن پوسته بالادست از قابلیت نسبتاً خوبی برخوردار است.

۵- در اثر رمبش اشباعی در پوسته بالادست، نقاط دارای حداکثر خطوط هم نشست، در نواحی هسته و پوسته بالادست، افزایش می‌یابند.

۶- مدل مورکولمب به عنوان مدل پایه در تحلیل مراحل ساخت و آبگیری در مجموع قابلیت برآورد نتایج ابزارسنجی را بطور نسبی داشته و برای حصول دقت بیشتر لازم است از مدل‌های پیشرفته‌تر استفاده شود.

مراجع

[۱] امیرعطا علوی‌فر (۱۳۸۳)، تحلیل عددی سدهای خاکریز در حین اولین آبگیری- مطالعه موردی سد مسجد سلیمان، پایاننامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی دانشگاه بوعلی سینا.

[۲] مشانیر، نیپون کویی و لامایر بین‌الملل (۱۳۸۰)، گزارش رفتار سنجی سد مسجد سلیمان در حین ساختمان و اولین مرحله آبگیری تا تاریخ اردیبهشت ۱۳۸۰

[۳] مشانیر، نیپون کویی و لامایر (۱۳۸۰)، گزارشات نتایج ابزار دقیق سد مسجد سلیمان

[۴] شرکت خاک آزما (۱۳۷۳ تا ۱۳۷۷)، مجموعه گزارش‌های آزمایش‌های سه‌محوری بر روی مصالح سد مسجد سلیمان.

[5] ITASCA, Consulting Group.,(2001), "Fast Lagrangian Analysis of Continua-FLAC Code s Technical Manuals", www.Itascacg.com.

[6] Maranha Das Neves, E. (1990), "Advances in Rockfill Structures", Science: Applied Sciences – Vol. 200.

[7] Naylor, D.J. (1997), "Collapse Settlement - Some Developments", Applications of Computational Mechanics in Geotechnical Engineering, Balkema, Rotterdam, pp:37-54.

[8] Nippon Koei, Moshanir and Lahmeyer (May 1996), "Review on Additional Laboratory Test (Static Test Results) of the GODAR-E-LANDAR".

[9] Nippon Koei, Moshanir and Lahmeyer (Till 25 February 2001), Draft Report on MASJED – E - SOLEYMAN Dam Monitoring.

[10] USCOLD (1995). Geotechnical Analysis by the Finite Element Method, ETL1110-2-544, 31.

www.SID.ir