ارزيابي مدلهاي مور–كولمب و خزشي خاک نرم در پيشبيني نشست سدهاي خاكي (مطالعه موردي)

جمشيد صدركريمي — دانشیار گروه خاک و پی، دانشكده مهندسي عمران، دانشگاه تبريز
محمد علي كيا — دانشجوی دکترای ژئوتکنیک، دانشگاه آلبرتا، کانادا

چكيده

قسمت عمده نشست سدهاي خاكي در حين ساخت و اولين آبگيري مخزن رخ ميدهد. تخمين نرخ و مقدار اين نشستها در كنترل پايداري و طراحي بدنه و سازههای وابسته آن اهمیت فوقالعادهای دارد. در اين مقاله به منظور بررسي كارآمدي ميزان دقت و صحت مدل مور-كولمب و مدل خزشي خاک نرم، در پيشبيني نشستهاي هسته رسي سدهاي خاكي در حين ساخت و اولين آبگيري مخزن، سد علويان به عنوان مطالعه موردي انتخاب گرديده است. پس از معرفي مختصر مدلهای مورد نظر، با تعيين پارامترهاي مورد استفاده در مدلها از دادههاي آزمايشگاهي و كارگاهي، نتايج حاصل از تحليل عددي با نتايج حاصل از ابزار دقيق كارگذاشته شده در سد مقايسه شدهاند. نشان داده شده است كه الگوی کلی پروفیلهای نشست اندازهگیری شده با الگوهای تحلیلی تطابق خوبی دارد و حداکثر نشست اندازهگیری شده در یک سوم ارتفاع سد رخ داده است که با نتایج حاصل از هردو مدل همخوانی بسیار نزدیکی دارد. مدل مور-کولمب در کوتاه مدت نتایج نسبتاً خوبی میدهد ولی در ارزیابی نشستهای درازمدت اثرات رفتار خزشی خاک موجب کاهش دقت و انحراف نتایج از واقعیت میگردد در حالیکه مدل خزشی خاک نرم با دقت بسیار بهتری قادر به پیشبینی رفتار واقعی بوده است.

كلمات كليدى: **مدلسازي، نشست، سد خاكي، مدل مهر-كولمب، مدل خزشي خاك نرم، ابزاربندي.**

Appraisal of the Mohr-Coulomb and Soft-Soil-Creep models in settlement estimation of embankment dams, (A case study)

J. Sadrekarimi — Faculty of Civil Engineering, Tabriz University
M. Kia — Department of Geotechnical Engineering, University of Alberta, Canada

Abstract

The main fraction of embankment dam settlement occurs during construction and first impounding period. Estimation of magnitude of this settlement, prior to construction, is highly important in design and safety control of embankment and appurtenant structures. In order to evaluate the precision and accuracy of Mohr-Coulomb and soft soil creep models in estimation of embankment settlement, Alavian dam was selected as a well constructed and monitored case. The features of mentioned models and the dam under study have been explained in brief. The parameters required for analyses were provided screening laboratory and field test results. Then the during construction settlement profiles were established using Mohr-Coulomb and soft soil creep models through PLAXIS software and compared with those of obtained by direct field measurements with settlement meters. It was disclosed that, in general, the estimated settlement profiles are in agreement with that of field measurements. The predicted maximum settlement using both models, occur at 1/3 of embankment height which is coincident with field measurements. With Mohr-Coulomb model acceptable agreement is observed between the predicted and field measured settlements in short term. However, as time passes the field measured profiles precede the predicted values. With soft soil creep model, however, agreement between the predicted and field measured values is quite encouraging all through the construction period.

Key words: Modeling, Settlement, Embankment dam, Mohr-Coulomb model, Soft soil-creep model, Instrumentation.

۱- مقدمه

مصالح سنگي و خاكي تمايل بـه رفتار غيرخطـي و غيرالاستيک، در بارگذاري و باربرداري زهكشي شده دارند. براي مدلسازي رفتار اين مصالح ميتوان از مدلهاي مختلفي استفاده نمود. هرچه مدل پيچيدهتر باشد به پارامترهاي ورودي بيشتري در مورد خواص مصالح نياز خواهد بود. معهذا براساس تحقيقات در دسترس نتايج حاصل از بكارگيری مدلهای ساده ممكن است اختلاف خيلی فاحشی با مقادير اندازهگيری شده داشته باشد [۱]. بنابراين، تعيين مدل مناسب و با سطح پيچيدگي مربوطه، يكي از مسائلي است كه طراحان ژئوتكنيک با آن مواجه هستند. از طرفي، طراح سازههاي ژئوتكنيكي با دامنة گستردهاي از مصالح گوناگون طبيعي سروكار دارد كه بـه همان صورت طبيعي و يا با ايجاد تغييراتي به منظور اصلاح خصوصيات مهندسی به كار ميروند. در هر حال، مقادير دقيق خصوصيات مهندسي اين مصالح قابل تعيين نميباشد. گرچه آزمايشهاي صحرائي و آزمايشگاهي تعيين خصوصيات مهندسي بر روي نمونههاي منتخب انجام ميگردد، اما اين آزمايشها تنها دامنهاي از مقادير ممكنه را ارائه ميدهند. لذا طراحي يك سازة ژئوتكنيكي، براساس قضاوت مهندسي در تعيين محتملترين مقادير خصوصيات مهندسي در محدوده مقادير در دسترس انجام ميشود. همزمان با پيشرفت اجراي سازه و مشاهدة شرايط ژئوتكنيكي و ثبت رفتار سازه، ميزان اعتبار قضاوتهاي مرحله طراحي ارزيابي گرديده و در صورت لزوم اصلاح ميگردند [۲]. بنابراين مشاهدات مهندسي در حين اجراي سازههاي ژئوتكنيكي يك جزء مكمل روند طراحي بوده و ابزارگذاري ژئوتكنيكي، وسيلهاي براي كمك به اين مشاهدات ميباشد. رفتارسنجي سدها در مرحلة ساخت، آبگيري و بهرهبرداري، يكي از مفيدترين ابزارها جهت كنترل طرح يا بهينه نمودن و تصحيح آن و نيز فراهم آوردن تمهيدات لازم در حين ساخت بوده و پس از تكميل پروژه، به منظور جلوگيري از صدمات و خرابيهاي احتمالي و يا بيشينه كردن سود اقتصادي طرح به كار ميروند. بدين منظور با نصب ابزاردقيق مناسب، پارامترهاي مؤثر در پايداري و عملكرد سد در قسمتهاي مختلف آن و نيز رفتار سد نسبت به زمان، مورد تجزيه و تحليل قرار ميگيرند.

نشست جسم سدهای خاکی را میتوان به دو مؤلفه نشست حین ساختمان سد و نشست بعد از اتمام سد تفکیک نمود. نشست حین ساختمان در واقع نتیجه بارگذاری تدریجی هر لایه خاک توسط لایههای بعدی است که به تدریج اجراء میشوند. مارشال (۱۹۵۸) تغییرات نشست در امتداد محور قائم z سد به ارتفاع H را به صورت یک سهمی به معادله $S_z = a(H - z)z$ ارائه داده است که در آن حداکثر نشست سد در میانه ارتفاع سد رخ میدهد [۳]. معهذا براساس ادبیات در دسترس حداکثر نشست پایان ساختمان سد برحسب مورد ممکن است در بالا و یا زیر میانه ارتفاع سد رخ دهد [٤و ٥]. در هر حال به نظر میرسد حداکثر نشست اغلب در یک سوم الی یک دوم ارتفاع سد رخ میدهد [۶ و ۷]. برای تعیین مقدار نشست در انتهای ساخت، Speedie رابطه $S = 0.035(H - 13)$ را ارائه داده است که در آن S و H بـه ترتیب مقدار نشست و ارتفاع سد برحسب متر میباشند [۸]. همچنین Sherard بیان میکند که سدهای خاکی کلاً به اندازه ۰/۲ الی ۰/۴ درصد ارتفاع خود نشست میکنند [۹]. برای ارزیابی پایداری هر سازه خاکی میتوان یک کرنش حدی (critical strain) تعریف نمود به طوریکه اگر کرنشهای اندازهگیری شده هنوز از مقدار حدی کمتر باشند سازه پایدار خواهد بود [۱۰]. انجام این عمل در واقع یکی از مهمترین اهداف ابزاربندی سازهها است.

برای اجرای هسته سد معمولاً سعی میشود رطوبت خاک در حوالی اپتیمم و درصد تراکم بیشتر از ۹۸% تراکم پروکتور باشد. در موقع تراکم درجه اشباع لایههای خاک به حدود ۹۰ الی ۹۵% میرسد و خاک شدیداً پیش تحکیم یافته شده و فشار منفذی منفی در آن به وجود میآید [۷]. معهذا بار ناشی از اجرای لایههای بعدی فشار منفی را خنثی نموده و حتی موجب توسعه فشار منفذی مثبت نیز میشود [۷]. بنابراین با پیشروی اجرای جسم سد فشار منفذی از یک سو توسعه یافته و از سوی دیگر با گذشت زمان مستهلک شده و موجب نشست تحکیمی میگردد. این فرایند در هر حال به خواص مهندسی خاک، رطوبت و نحوه تراکم آن و سرعت اجرای هسته سد بستگی دارد.

در اين مقاله به منظور بررسی اعتبار مدل مور-كولمب و مدل خزشي خاک نرم در پيشبيني نشستهاي هسته رسي سدهاي خاكي در حين ساخت و اولين آبگيري مخزن، سد علويان به عنوان مطالعه موردي انتخاب گرديده است. با تعيين پارامترهاي مورد استفاده در اين مدلها از روی دادههاي آزمايشگاهي و كارگاهي، نتايج حاصل از تحليل عددي اين مدلها با نتايج حاصل از ابزار دقيق سد مقايسه شدهاند.

۲- معرفي سد علويان و سيستم رفتارنگاري آن

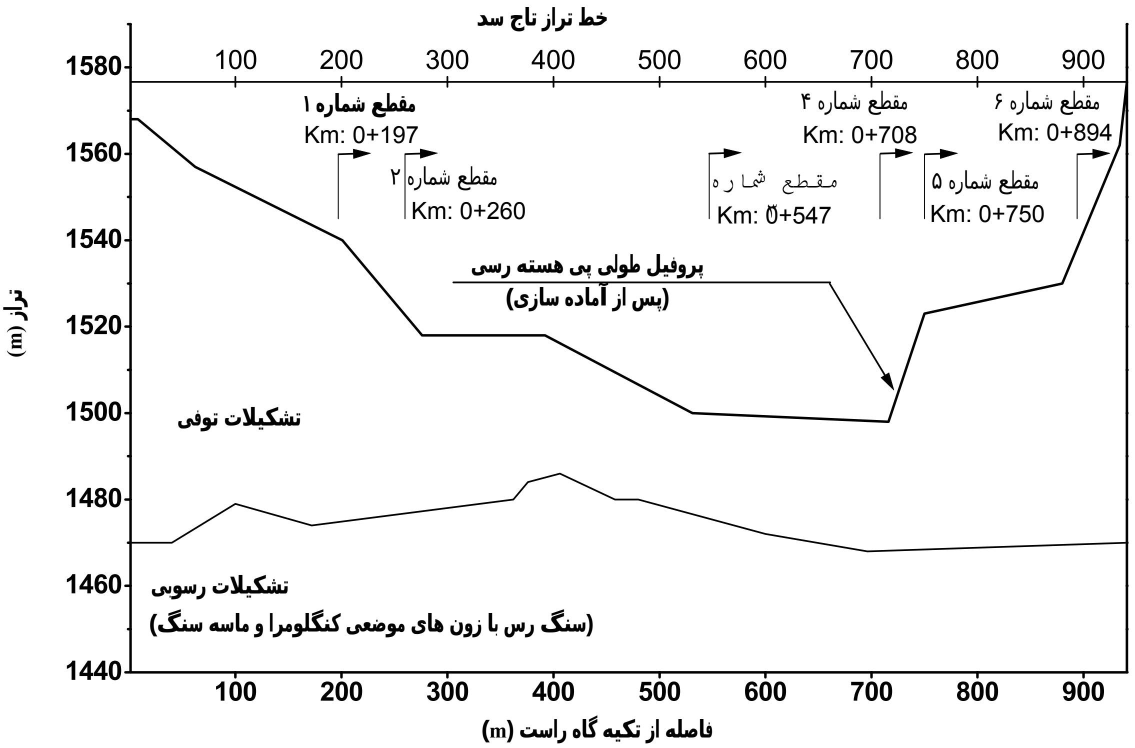
سد علويان در شمال غربي ايران و در دامنة جنوبي كوه سهند و جنوب شرقـي درياچة اروميه، در ۱۲۰ كيلومتري جنوب غربـي تبريـز بيـن ۳۶° ۲۵' تا ۴۶° طول شرقي و ۱۱' ۳۷° تـا ۲۸' ۳۷° عرض شمالي در ۳/۵ كيلومتري شمال مراغه قرار دارد. ارتفاع تاج سد از بستر رودخانه برابر با ۷۰ متر و از زمين پي برابر با ۷٦/۸ متر و طول و عرض تاج به ترتيب برابر با ۹۳۵ متر و ۱۰ متر می‌باشند.

سد علويان يك سد خاكي با هستة رسي مركزي و لايههاي فيلتر، ترانزيشن و پوسته شن و ماسهاي است. براي حفاظت شيرواني بالادست آن از ريپ راپ سنگي به ضخامت حدود ۱/۰ متر و سنگهاي با قطر بين ۱۰۰ تا ۸۰۰ ميليمتر، استفاده شده است. در زير هسته سـد و روی سنـگ کف يـك گالري تزريق بـه ابعاد داخلي ۳/۳۰*۲/۴۰ متر، با استفاده از بلوكهاي بتوني درجا ريخته شدة ۸ متري اجرا گرديده است [۴]. خصوصيات عمومی مصالح هسته و پوسته در جدول (۱) خلاصه شده‌اند:

جدول ۱- مصالح بدنة سد علويان [٤]

نوع مصالح	طبقه بندي متحد(Unified)	دانسيتة خشك ماكزيمم (gr/cm^3)
پوسته	GW و Rubbles	۲/۰۵ تا ۲/۱۰
فيلتر و ترانزيشن	SW	۲/۰۵ تا ۲/۱۰
هسته	CL-CH	۱/۵۶ تا ۱/۷۹

سنگ بستر از جنس توف است كه در لايههاي سطحي، شامل توف با هوازدگي متوسط و توف هوازده و در محل بستر رودخانه از مواد رسوبي پوشيده شده است. پروفيل تشكيلات پي و بستر در شكل (۱) نشان داده شده است. در زير لايههاي توف، تشكيلات رسوبي رس سنگ با برخي زونهاي موضعی كنگلومرا و ماسه سنگ شكل گرفته‌اند. در محل هستة سد، تشكيلات سطحي تا رسيدن به توف سالم برداشته شده ولي در محل پوسته، با توجه به اينكه جنس رسوبات بسيار نزديك به مصالح پوسته بوده است، لذا فقط در برخي مناطق به صورت موضعي اصلاحات و تميزكاريهائي انجام گرديده است.



شكل ۱- پروفيل تشكيلات پی و محل مقاطع ابزاربندی [۱]

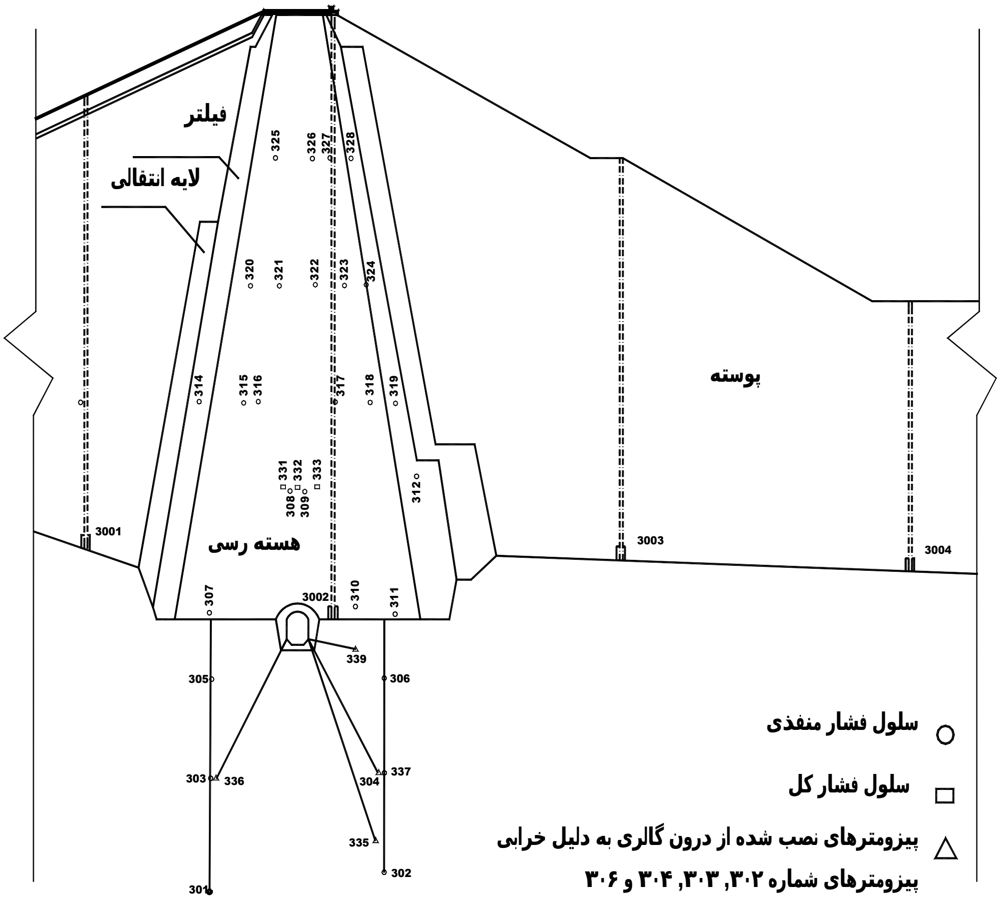
۳ـ سیستم ابزار دقیق

مجموعـــة کاملي از ابـزاردقیق براي رفتارسنجي سد در دوران ساخت, آبگیری و بهره‌برداري مورد استفاده قرار گرفته اسـت. شـرح مختصري از امکانات رفتـار نـگاري سد علویان، در جدول (۲) ارائه گردیده است.

محل مقاطع ابزاربندي (کلاً ۶ مقطع) درشکل (۱) نشان داده شده است. در شکل (۲)، بزرگترین مقطع یعنی مقطع ابزاربندي شمارة ۳ به عنوان نمونه ارائه شده است.

جدول ۲- شرح مختصر امکانات رفتارنگاري سد علویان [٤]

ابزار	تعداد	محل	ملاحظات
پیزومتر ارتعاشی	۱۴۲	پوسته، فیلتر هسته و پي	
پیزومتر لولهای بسته	۲۴	پي	لولهای با سیستم بسته
چاه مشاهدهای	۲۲	تکیه‌گاه‌ها	۱۴ مورد در تکیهگاه راست
دبی سنج نشت	۱	داخل گالري	
سلول فشار کل	۱۸	هسته	از نوع تارمرتعش
انحراف سنج	۱۶	پوسته، فیلتر و هسته	
صفحة مغناطیسي نشست	۲۲۹	در امتداد و کف انحراف سنجها	
نقاط نشانة ژئودزي	۸۰	بدنة سد، سازههاي وابسته و محوطه سد	
گوي نشانه	۸۰	سقف گالري	
لرزه نگار	۴	بدنة و محوطه سد	



شکل۲- مقطع ابزاربندي شماره ۳ - فقط قسمت مياني مقطع نشان داده شده است [۱]

۴- معرفي نرم افزار Plaxis و تئوري محاسبات

Plaxis، نرمافزاري تحت ويندوز بوده که بر پاية المان محدود براي تحليل رفتارهاي مکانيکي (تنش ـ تغيير شکل) و محاسبات جريان آب در محيطهاي خاکي و سنگي نوشته شده است. تحليل در فضای تنش مؤثر انجام میشود. با اين نرمافزار تحليل مسائل رايج در علم مهندسي ژئوتکنيك و خصوصاً سدسازي امکانپذير است. امکانات گستردهاي از قبيل تسهيلات گرافيکي مدلسازي و نمودارهاي خروجي قابل انتقال به ساير برنامههاي تحت ويندوز، مدل سازي مصالح مختلف مانند مدلهاي الاستيك خطي، مور- کولمب، خاك نرم، خاك سخت شونده و مدل خزشي خاك نرم براي خاکها و سنگها، مدلهاي مصالح فولادي ـ بتني، ژئوتکستايلها، مهارها و ... وجود دارد. علاوه برآن انجام انواع تحليلهاي پلاستيك، ساخت مرحلهاي و روش ضرائب کلي، تحکيم، مش تغييرشکل يافتــه و تحليل ديناميکي ممکن است [۱۱].

۵- مدل مورـ کولمب (الاستوپلاستيک کامل)

اساس رفتار الاستو پلاستيک بر تقسيم کرنشها به دو بخش الاستيک و پلاستيک استوار است:

$$\underline{\varepsilon} = \underline{\varepsilon^e} + \underline{\varepsilon^p} \qquad \underline{\dot{\varepsilon}} = \underline{\dot{\varepsilon}^e} + \underline{\dot{\varepsilon}^p} \qquad (۱)$$

قانون هوک در کرنشهاي الاستيک بيان شده است. با جايگذاري رابطه بالادر رابطه هوک داريم:

$$\underline{\dot{\sigma}'} = \underline{\underline{D^e}}\,\underline{\dot{\varepsilon}^e} = \underline{\underline{D^e}}(\underline{\dot{\varepsilon}} - \underline{\dot{\varepsilon}^p}) \qquad (۲)$$

براسـاس تئـوري کلاسـيک پلاستيـسيته، کرنـشهاي پلاسـتيک متناسب با مشتق تابع تسليم نسبت به تنشها ميباشد. اين بـدان معنـی اسـت کـه کرنـشهاي پلاسـتيک را مـيتـوان بـه صـورت بردارهايي عمود بر سطح تسليم نشان داد. ايـن شـکل کلاسـيک تئوري، به جريان وابسته (Associated Plasticity) مشهور اسـت. ولي براي اين حالت تئوري پلاستيـسيته، جريـان وابـسته مقـدار اتساع را بيش از مقدار واقعي به دست ميدهد. بنابراين عـلاوه بـر تابع تـسليم، يـک تـابع ديگـر بنـام تـابع پتانـسيل پلاسـتيک g پيشنهاد مي شود. حالت $g \neq f$ بـه عنـوان قـانون غيـر وابـسته ناميــده ميشود. در حالت کلي، کرنشهاي پلاستيک را ميتوان بـه صورت زير نوشت:

$$\underline{\dot{\varepsilon}^p} = \lambda \frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma'}} \qquad (۳)$$

که در اين رابطه λ ضريب پلاستيک است. در رفتار الاستيک کامل، λ برابرصفر است در حاليکه براي رفتار پلاستيک اين ضريب مقدار مثبتي دارد. بنابراين براي حالت الاستيک:

$$\frac{\partial f^T}{\partial \underline{\sigma'}} \underline{\underline{D^e}}\, \underline{\dot{\varepsilon}} \leq 0 \text{ يا } f<0 \text{ براى } \lambda = 0 \qquad (۴)$$

و در حالت پلاستيک:

$$\frac{\partial f^T}{\partial \underline{\sigma'}} \underline{\underline{D^e}}\, \underline{\dot{\varepsilon}} > 0 \text{ و } f=0 \text{ براى } \lambda > 0 \qquad (۵)$$

در حالت کلي, بـراي فرمـولبنـدی معيـار خرابـي مـور- کولمـب ميتوان سه تابع بر اساس تنشهاي اصلي بـه صـورت زيـر تعريـف کرد:

$$f_1 = \frac{1}{2}|\sigma'_2 - \sigma'_3| + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_3)\,Sin\,\varphi - cCos\,\varphi \leq 0 \qquad (۶)$$

$$f_2 = \frac{1}{2}|\sigma'_3 - \sigma'_1| + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_1)\,Sin\,\varphi - cCos\,\varphi \leq 0 \qquad (۷)$$

$$f_3 = \frac{1}{2}|\sigma'_1 - \sigma'_2| + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_1)\,Sin\,\varphi - cCos\,\varphi \leq 0 \qquad (۸)$$

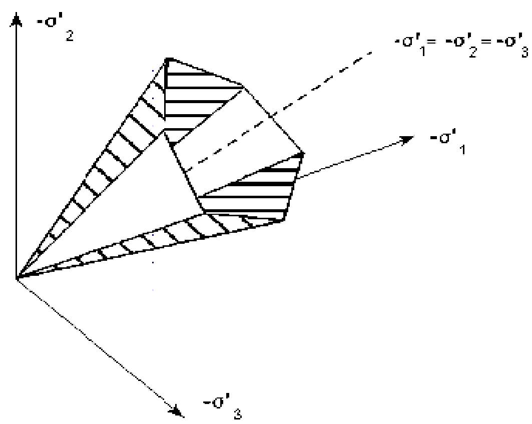
دو پارامتر مدل پلاستيک که در اين توابع تسليم وجود دارند، پارامترهاي شناخته شده φ و C هستند. ترسيم فضايي اين توابع مطابق شکل (۳) خواهد بود. همچنين علاوه بر تابع تسليم که در بالا ذکر شد، تابع پتانسيل پلاستيک زير نيز براي مدل مور- کولمب تعريف ميشوند:

$$g_1 = 1/2|\sigma'_2 - \sigma'_3| + 1/2(\sigma'_2 + \sigma'_3)Sin\,\psi \qquad (۹)$$

$$g_2 = 1/2\left|\sigma'_3 - \sigma'_1\right| + 1/2(\sigma'_3 + \sigma'_1)Sin\,\psi \qquad (۱۰)$$

$$g_3 = 1/2\left|\sigma'_1 - \sigma'_2\right| + 1/2(\sigma'_1 + \sigma'_2)Sin\,\psi \qquad (۱۱)$$

توابع اخير نيز شامل يک پارامتر ديگر پلاستيک، به عنوان ψ هستند. اين پارامتر براي مدل کردن افزايش حجمهاي مشاهده شده در خاکهاي متراکم (پيش تحکيم يافته) ميباشد. در محدودۀ سطح تسليم، رفتار خاک الاستيک است و ازقانون هوک تبعيت مي‌کند. بنابراين دو پارامتر ديگر E_s و υ، مدول الاستيسيته يانگ و ضريب پوآسون، نيز وارد معادلات ميشوند [۱۱و ۱۴].



شکل ۳- ترسيم فضايي توابع تسليم مور - کولمب

۶- مدل خزشي خاك نرم

منظور از خاک نرم، رسهاي عـادي تحکيم يافته و رسهاي سيلتي و خاکهاي آلي است. خصوصيت مهم اين دسته از خاکها، پتانسيل زياد آنها براي نشست است. به عنوان مثال در آزمايش ادومتري، خاک رس عادي تحکيم يافته داراي E_{oed} تقريباً يکدهم پارامتر مربوطه در ماسه عادي تحکيم يافته است. يک خصوصيت ديگر خاک نرم، ارتباط خطي تنش و مدول سختي خاک است.

از مکانيك خاك پيشرفته ميدانيم که در مدل HS (خاك سخت شونده):

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref}(\sigma / P^{ref})^m \qquad (۱۲)$$

براي يک رابطه خطي بايد m=1 فرض شود، و آنگاه خواهيم داشت:

$$E_{oed} = \sigma/\lambda^* \quad , \quad \lambda^* = P^{ref}/E_{oed}^{ref} \qquad (۱۳)$$

که در اين صورت مدل خاک سخت شونده به صورت زير در می‌آيد:

$$\dot{\varepsilon} = \lambda^* \dot{\sigma}/\sigma \qquad (۱۴)$$

که با انتگرالگيري ازآن به رابطه لگاريتمي فشردگی ميرسيم:

$$\varepsilon = \lambda^* \ln\sigma \qquad (۱۵)$$

مشاهده ميشود که مدل HS براي خاکهاي نرم، بسيار مدل مناسبي است و بسياري از مسائل را ميتوان با آن مدل کرد [۱۱]. بايد توجه شود هنگاميکه پاي خزش يا نشست ثانويه به ميان ميآيد، ديگر اين مدل نميتواند مناسب باشد. تقريباً تمامي خاکها به دنبال نشست اوليه، داراي يک نشست ثانويه نيز ميباشند. نشست ثانويه معمولاً در طي چند سال اتفاق ميافتد، که اگر فرض کنيم مثلاً در يک دوره ۱۰ تا ۳۰ ساله، اين نشست درصدي از نشست اوليه اين خاکها باشد، براي خاکهاييکه نشست اوليه زيادي دارند، خزش نيز تقريباً مقدار زيادي به دست خواهد آمد. مخصوصاً در خاکهای محتوی مواد آلی بخش عمده نشست ممکن است از خزش ناشی شود [۱۱و ۱۲]. در مورد سدهای خاکی با توجه به اینکه هسته سد از خاک تقریباً عاری از مواد آلی و با دامنه خمیری متوسط تا کم انتخاب می‌شود و در اثر تراکم کافی پیش تحکیم یافته می‌گردد [۷و ۱۳] بنابراین مقدار نشست خزشی هسته سد، حداقل در دوران ساخت را می‌توان ناچیز فرض کرد. در هر حال پارامترهای موردنیاز این مدل برای محاسبه نشست اولیه عبارتند از:

- پارامترهاي مدل مور- کولمب: ψ, c , φ به ترتيب زاوية اتساع، ضريب چسبندگي و زاوية اصطکاك داخلي

ـ پارامترهاي مکانيکی ماده: κ^* انديس تورم اصلاح شده، λ^* انديس فشردگی اصلاح شده و μ^* انديس خزش اصلاح شده

- پارامترهاي پيشرفته (براي کنترل بيشتر مدل): شامل υ_{ur} ضريب پواسون بارگذاري و باربرداري، k^{nc}_0 نسبت تنشهاي قائم و افقي در حالت عادي تحکيم يافته و M پارامتر مرتبط با k^{nc}_0

بوده و به طور پیشفرض مقدار آن، با نادیده گرفتن ضریب چسبندگی خاک، از فرمول $M = \frac{6Sin\varphi_{cv}}{3 - Sin\varphi_{cv}}$ محاسبه میشود [۱۴]. بعلاوه مقدار k^{nc}_0 در این حالت همان مقدار پیشفرض آن از فرمول جکي، یعنی $(1-\sin\varphi)$، است. پارامترهاي مکانیکی خاک را میتوان از نتایج آزمایش تحکیم سه محوری یا ادومتري محاسبه کرد. در آزمایش ادومتري، اگرمنحني $(\varepsilon - \ln\sigma)$ را رسم کنیم، دوخط مستقیم به دست میآید، از شیب خط عادي تحکیم یافته براي محاسبه مقدار ضریب λ^* و ازشیب خط باربرداري (تورم) براي محاسبه κ^* استفاده میشود. البته بین پارامترهاي اصلاح شده بالا و پارامترهاي اصلي λ, κ در مدل Cam-clay تفاوت وجود دارد. پارامتر μ^* را میتوان با اندازهگیري طولاني مدت کرنشهاي حجمي و رسم آن در دستگاه مختصات $(\varepsilon_v \;,\; \ln t)$ محاسبه کرد. با این توصیف برای تعیین پارامترهای فوق از روی نتایج آزمایش تحکیم تک بعدی از روابط زیر استفاده میگردد:

$$\lambda^* = \frac{C_c}{2.3(1+e)} \qquad (۱۶)$$

$$\kappa^* \approx \frac{3}{2.3}\,\frac{1-\upsilon_{ur}}{1+\upsilon_{ur}}\,\frac{C_r}{1+e} \qquad (۱۷)$$

$$\mu^* = \frac{C_\alpha}{2.3\ (1+e)} \qquad (۱۸)$$

که در آن C_c، C_r و C_α به ترتیب اندیس فشردگی، اندیس تورم و اندیس تحکیم ثانویه میباشند [۱۱و۱۴]. شرح کامل فرمولاسیون برای خزش یک و سه بعدی در کتابچه راهنمای نرمافزار ارائه شده است [۱۱].

۷- به دست آوردن پارامترهاي آزمایشگاهي و کارگاهي براي استفاده در مدل تحلیلي

۷- ۱- دادههاي آزمایشگاهي

بر روي نمونههاي گرفته شده از قرضهها، آزمایشات مختلف سه محوري، ادومتري و نفوذپذیري، به طور گسترده هم در ایران و هم در روماني، انجام شده که گزارشهاي حجیمي را در بر ميگیرد. با توجه به گزارشات آزمایشگاهي مربوط به آزمایش مصالح قرضهها، خصوصیات ژئوتکنیکي مصالح پوسته و هسته در جداول (۱ و ۳) خلاصه شدهاند. براي به دست آوردن مدول الاستیسیتة یانگ E_s که در مدل مور-کولمب استفاده ميشود، با به کارگیري نتایج آزمایش تحکیم براي رس، از روابط زیر استفاده شده است [۱۵]:

$$E_S = \frac{(1-2\nu)(1+\nu)}{(1-\nu)}E_{oed} \quad \text{و} \quad E_{oed} = \frac{1}{m_v} \qquad (۱۹)$$

که در آن :

$$a_v = \frac{\Delta e}{\Delta\sigma'} \qquad \text{و} \qquad m_v = \frac{a_v}{1+e_0} \qquad (۲۰)$$

که در آن e_0، a_v و m_v به ترتیب نسبت تخلخل اولیه، ضریب فشردگی و ضریب فشردگی حجمی را نشان میدهند [۱۵].

جدول ۳- ۱- خصوصیات ژئوتکنیکي مصالح بدنه سد علویان [٤]

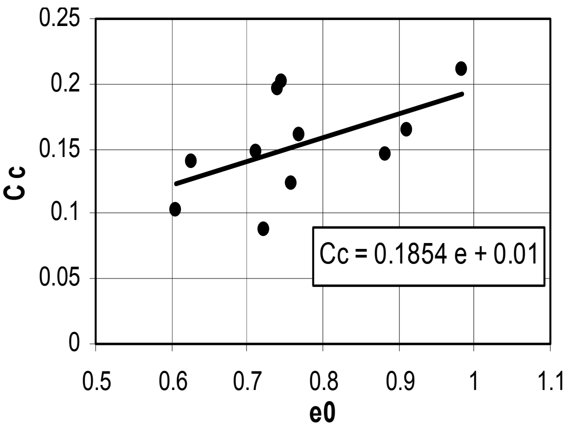
مصالح	Φ .Deg.	C Kg/cm2	Φ' Deg.	C' Kg/cm2	K (cm / sec)
پوسته و فیلتر	۳۵	صفر	۳۵	صفر	براي مصالح کوچکتر از ۲/۵ mm بین ۱۰-۲*۵ تا ۱۰-۳*۵
هسته رسي	۸ تا ۱۰ (رطوبت بهینه)	۱	۱۵ تا ۲۰	۰/۵	۱۰-۸ * ۴ تا ۱۰-۸ * ۰/۵

جدول۳-۲- خصوصيات ژئوتكنيكي مصالح بدنه سد علويان [٤]

مصالح	C_v $cm^2/Sec.$	E_{oed} Kg/Cm^2	E_s Kg/cm^2	ν	C_c	C_s	C_α
پوسته و فیلتر	--	--	۲۷۰ تا ۴۳۰	۰/۲۲	--	--	--
هسته رسي	۸*۱۰-۳ تا ۳*۱۰-۳	۱۰۰تا۳۰۰	۷۵ تا ۲۲۵	۰/۲۸	۰/۱۰ تا ۰/۲۰	۰/۰۱تا۰/۰۲	۰/۰۰۳ تا۰/۰۰۵

پارامترهاي λ^*، K^* و μ^* با استفاده از فرمولهاي ١٦ تا ١٨ محاسبه شده‌اند.

بـرای تعییـن مقـدار C_c، بـرای نسبت تخلخل e_0 و مقادیر C_c بـه دست آمده از آزمایشات تحکیم خط راستی با روش کمترین مربعات مطابق شکل (۴) برازش شده است که معادلهٔ آن $C_c=0.1854e+0.01$ مي‌باشد.



شكل ۴- تغییرات C_c نسبت به e_0، براي نمونه‌هاي مختلف آزمايش شده در آزمايشات تحكيم

با متوسطگيري از نسبت تخلخل در انتهاي آزمايشات تحكيم، عدد ۰/۶ به دست مي‌آيد كه متناظر با C_c = ۰/۱۲۱۲ (از معادلهٔ فوق) مي‌باشد. با استفاده از رابـــطهٔ $C_\alpha = 0.032 \times C_c$ مقـدار C_α بـرابـر با ۰/۰۰۳۹ به دست می‌آید [۱۲].

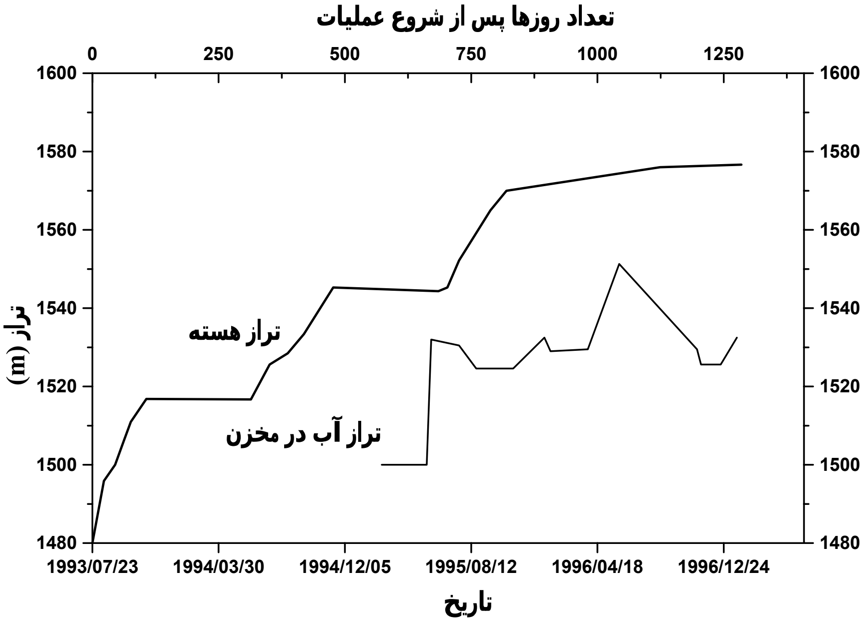
جدول ۴- پارامترهاي مورد استفاده در مدل خزشي خاك نرم (SSC) محاسبه‌شده از C_c، C_s و C_α

مصالح	λ^*	K^*	μ^*
هسته رسي	۰/۰۳۳	۰/۰۰۵۹	۰/۰۰۱۰۵

۷- ۲- دادههاي كارگاهي

با توجه به دادههاي كارگاهي مربوط به پيشرفت زماني ساخت بدنه و آبگيري مخزن، نمودار پيشرفت فيزيكي و آبگيري مخزن از اسناد موجود استخراج و مطابق شكل (۵) ترسيم گرديده است [۱]. اين نمودار در مدلسازي زمان‌بندي شدهٔ ساخت مرحله‌اي بدنهٔ سد و آبگيري مخزن كه در نرمافزار Plaxis با دقت و جزئيات كامل قابل انجام است، مورد استفاده قرار می‌گیرد. بدين ترتيب می‌توان تغييرشكلهاي بدنهٔ سد و همچنين فشار آب منفذي را در تاريخهاي موردنظر با مقادير اندازه‌گيري شده مقايسه نمود.

برای به دست آوردن مقادیر نشست و جابجائی حین ساختمان و آبگیری سد مقادیر قرائتهای حاصل از نشست سنجهای مغناطیسی جمع آوری و پس از بررسی صحت و دقت آنـها، نتایج نهائـی در اشـکال (۷ الی ۱۰) ترسیم شدهاند. لازم بـه ذکر است که نشست سنجهای مغناطیسی به موازات پیشرفت اجرای بدنه سد در مقاطع مختلف و در ۲٤ تراز مختلف نصب شدهاند. در رابطه با وضعیت فشار منفذی حین ساختمان هستـه سـد, لازم به ذکر است که براساس نتایج حاصل از نصب و قرائت پیـزومترهای ارتعاشی مقادیر فشار آب منفذی غالباً قابـل چشمپوشی و یا مقادیر اندکی بوده است. بهطوریکه در محل پیزومترهای قابل قرائت متوسط نسبت فشار آب منفذی r_u حدود ۰/۱۵ بوده است. در ضمن حداکثر مقدار نشست تاج سد شش ماه پس از خاتمه ساختمان سد ۸۱ میلی متر اندازهگیری شــده است که حاکی از کیفیت مناسب سد از نظر اجرائی است [۱و۴].



شکل ۵- پيشرفت فيزيکي ساخت بدنه سد علويان و آبگيري مخزن

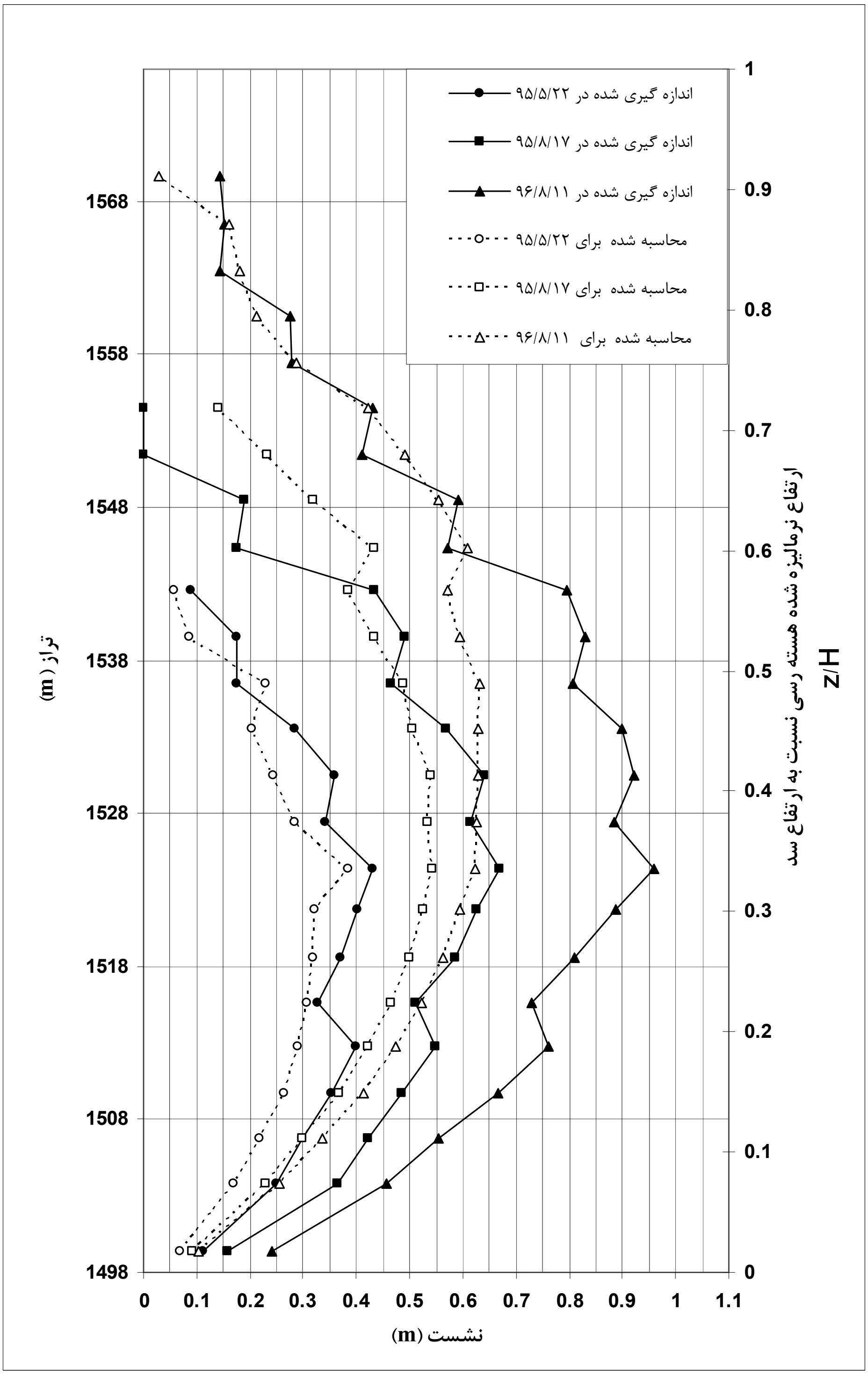
۸- روش تحليل نشست و نتايج

با مدلسازي دقيق هندسي و اعمال روند تدريجي ساخت و آبگيري سد با دو مدل مور-کولمب و مدل خزشي خاك نرم، نشستهاي متناظر محاسبه گرديده و با مقادير اندازه‌گيري شده مقايسه شده‌اند.

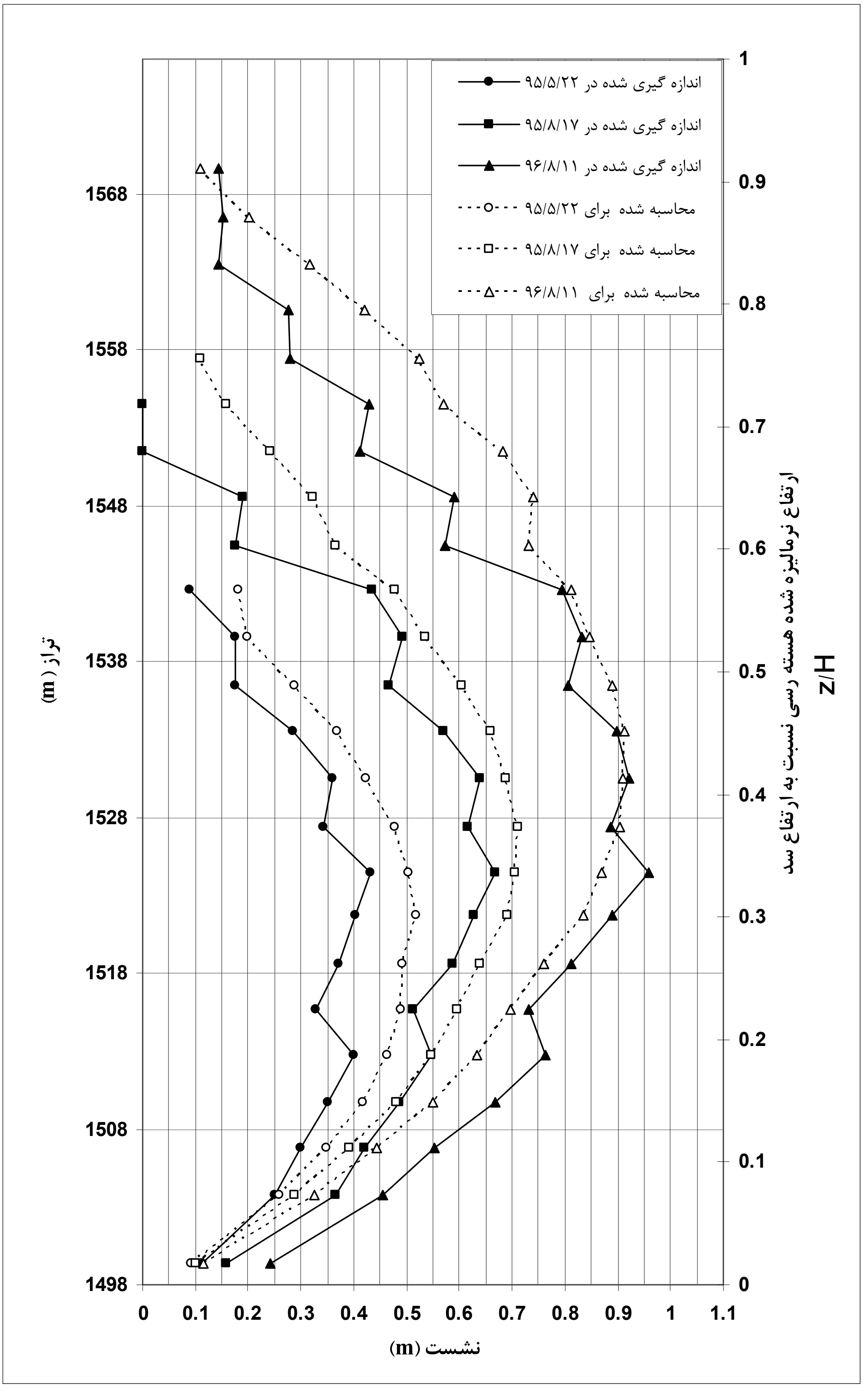
نکتة حائز توجه آن است که براي بررسي توزيع رخداد نشست نسبت به زمان در هر تراز، يعنی آن کميتي که در ژئوتکنيك به عنوان نشست مي‌شناسيم و اندازه مي‌گيريم و نه آنچه که برنامههاي محاسباتي به عنوان deformation يا تغيير شکل تجمعي مش المانبندی ارائه مي‌دهند، به اين صورت عمل شده که در هر يك از ۲۴ تراز مورد بررسي (دقيقاً همان ترازهاي نصب صفحـات نشست سنـج)، ابتـدا مراحل ساخت تا رسيدن بـه آن تراز (با توجه به اينکه ارتفاع وارد شده در مدل در واقع بايد همان ارتفاع برابر ساخت يا as bulilt باشد)، اعمال گرديده و سپس علی‌رغم حفظ شرايط تنش موجود و تاريخچة بارگذاري تا آن تاريخ، تغييرمکانها صفر گرديده (کاهش ارتفاع، با صفر کردن تغييرشکلها، جبران ميشود) و از آن پس مجدداً مراحل ساخت پله به پله تا رسيدن به تراز تاج ادامه يافته‌اند. اين مراحل ساخت بهگونه‌اي هستند که تمام تاريخهاي مهم و تأثيرگذار در طول ساخت، از قبيل تاريخهاي رسيدن به تراز برم و يا يك تراز خاص آب در مخزن و دوره‌هاي استراحت، را در بر گرفته است. همچنين براي جلوگيري از ناپايداري عددي به دليل زياد شدن تعـداد المانـها، راحتـي دسترسـي به داده‌هاي خروجي، و نياز بـه محاسبـه و اعمـال دقيق زمان‌بندي مراحل ساخت نسـبت به هم و براي هر تراز به طور جداگانه، محاسبات مربوط به هر تراز لزوماً در يك مدل جداگانه محاسبه گرديده است. بنابراين با توجه به لزوم مش‌بندي جديد، تمام شرايط اوليه و شرايط ضمن ساخت براي هر يك از ۲۴ تراز مورد بررسي بايد مجدداً به مدل معرفي مي‌گرديد که کاري بسيار زمان بر بوده است. اين نحوه کار را مي‌توان يکي از ضعفهاي Plaxis برشمرد، چراکه Plaxis تغيير مکانها را محاسبه مي‌کند نه نشست را، بدين دليل برای حصول نتايج مستدل از تلفيق سه ويژگي ساخت مرحله‌اي، صفرکردن تغييرمکانها با حفظ شرايط تنش موجود همراه با حفظ تاريخچة بارگذاري و نهايتاً با محاسبه مقدار نشست نقاط موردنظر از روی مقادير جدول خروجي تغييرمکان قائم پس از هر مرحله ساخت منحنيهای نشست با استفاده از امکانات ماکرو در نرمافزار Excel ترسيم گرديد.

در اشکال شماره (۶ و ۷)، به ترتيب نتايج تحليل نشست با مدل مور- کولمب و مدل خزشي خاك نرم با نتايج اندازه‌گيري شده، مقايسه شده‌اند. در اين تحليلها الگوی ساخت جسم سد و آبگيری مخزن مطابق شکل (۵) اعمال شده است. همچنين در شکلهاي (۸ و ۹)، نتايج تحليل توزيع نشست در ارتفاع هسته سد

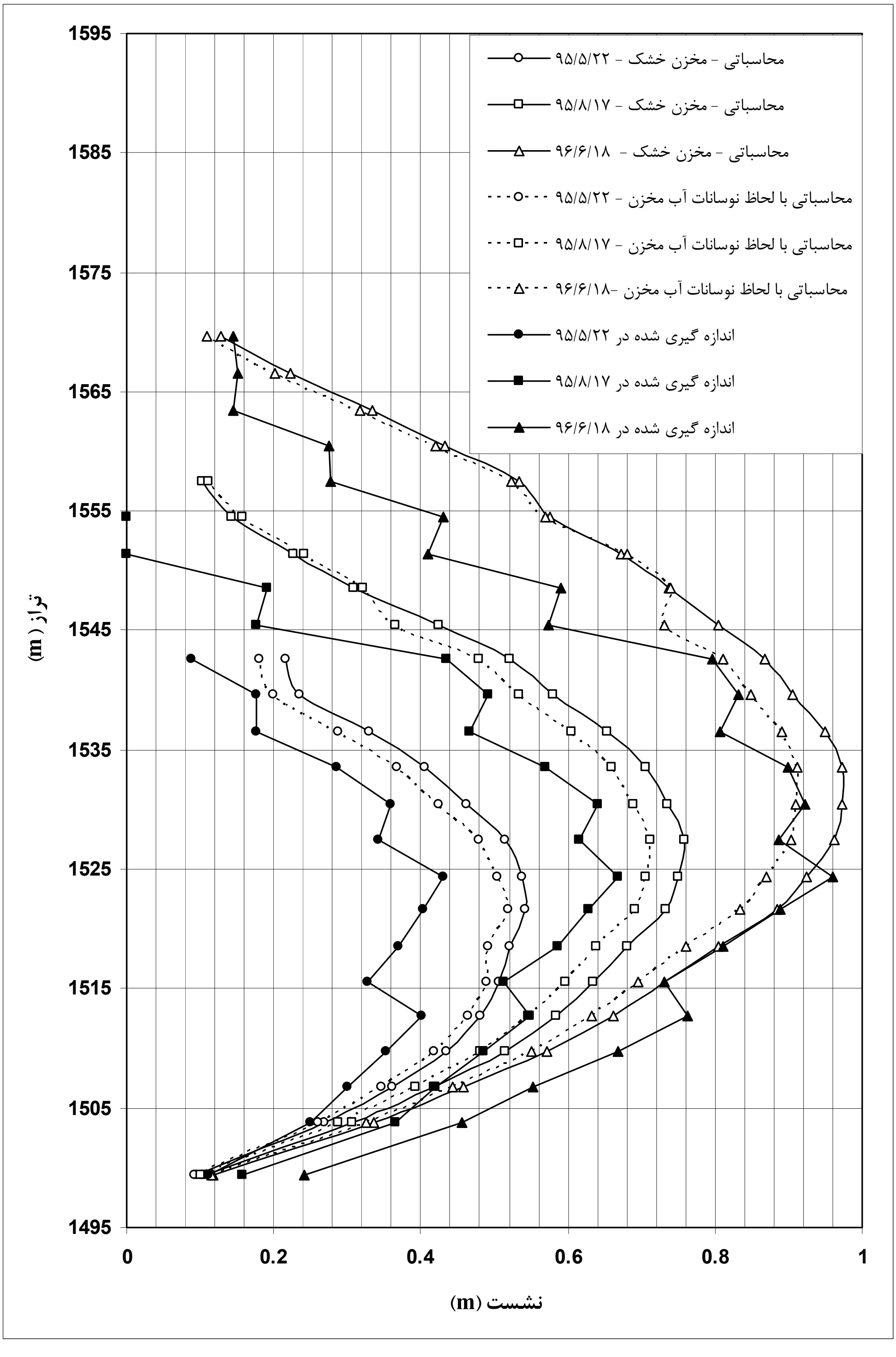
در زمانهای مختلف با فرض عدم آبگیری مخزن با مقادیر مشاهداتي مقايسه شده‌اند. باید توجه شود که در شکل (۹)، منحنیهاي با علامتگذار توپر، درصد افزایش نشست بدون احتساب آبگیري نسبت بهمقادير محاسباتي نظير با در نظرگرفتن برنامة زماني آبگيري مي‌باشند در حالیکه منحنیهای خطچین با علامتگذار توخالي، درصد افزایش نشست نسبت به مقادیر مشاهداتي را نشان می‌دهند.



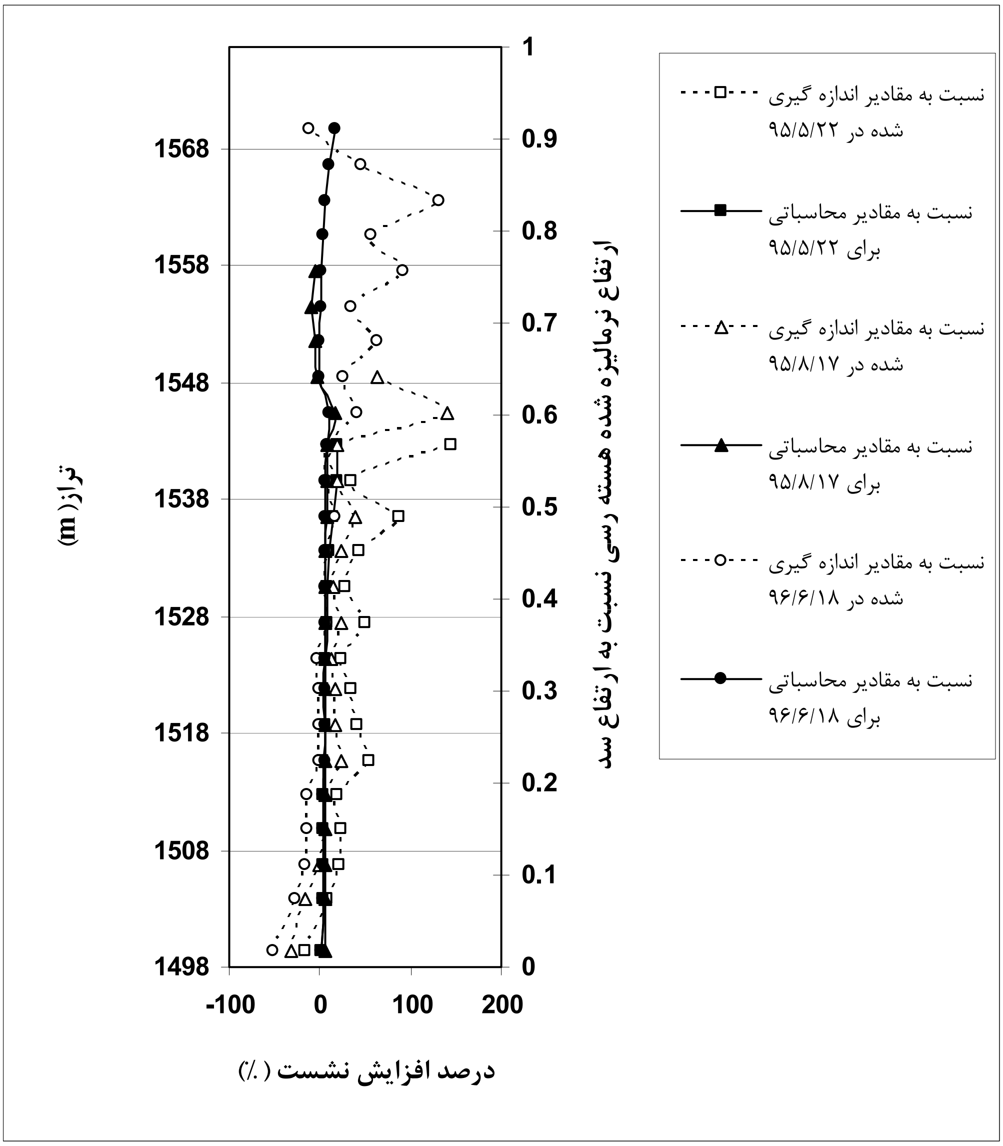
شکل ٦- مقايسة نشست تحليلی هسته رسي (مدل مور-کولمب یا MC) با مقادیر اندازه‌گیري شده در زمانهای مختلف



شکل ۷- مقایسة نشست تحليلی هسته رسي (مدل خزشی خاک نرم یا SSC) با مقادير اندازه‌گيري شده در زمانهای مختلف



شکل ۸- مقایسه اثر در نظر نگرفتن آبگيري مخزن در تحليل نشست هسته رسی (مدل SSC) با مقادیر اندازه‌گيري شده در زمانهای مختلف



شکل ۹- تاثیر آبگیری مخزن در توزیع نشست هسته رسی در ارتفاع سد

۹- نتیجه گیری

۱- با توجه به اشکال (۶ و ۷) ملاحظه می‌شود که حداکثر مقدار نشست اندازه‌گيري شده در فاصلهٔ يك سوم ارتفاع سد از بستر آن رخ داده است که با محل مقدار حداکثر نشست حاصل از نتايج محاسبات در هر دو مدل همخواني بسيار نزديکي دارد.

۲- اثر آبگيري زود هنگام مخزن، کاهش در نرخ انجام نشست تحکيمي است که منطقي مي‌نمايد (کاهش تنش مؤثر). با توجه به شکل شماره (۹) ملاحظه می‌شود که کاهش نشست محاسباتی (مدل SSC) ناشی از آبگیری زود هنگام (حين ساخت) در تراز ۱۵۳۰ (محل حداکثر نشست) در تاریخهای ۹۶/۶/۱۸ و ۹۵/۵/۲۲ نسبت به مقادير محاسباتي (مدل SSC) بدون ملحوظ نمودن اثر آبگیری به ترتیب حدود ۷ درصد و ۹ درصد و نسبت به مقادير اندازهگيری شده در دو تاریخ فوق به ترتیب ۵/۳ و ۲۸/۲ درصد بوده است. ماکزیمم درصد افزایش نشست محاسباتي بدون درنظر گرفتن آب در مخزن، نسبت به مقادير محاسباتي با در نظرگرفتن آبگيري مخزن، در تاريخهاي ۹۵/۵/۲۲، ۹۵/۸/۱۷و ۹۶/۶/۱۸ به ترتیب عبارتند از ۱۹/۱، ۱۶/۰ و ۱۷/۵ درصد و نسبت به مقادير اندازهگيری شده عبارتند از ۱۴۵، ۱۴۰ و ۱۳۱ درصد که مربوط به ترازهاي بالائي سد (ترازهای ۵۰% فوقانی ارتفاع) در هر تاريخ موردنظر مي‌باشند.

روند كلي بدين صورت است كه درصد ميزان افزايش نشست به دليل آبگيري نكردن، اولاً در هر تاريخ خاص، با افزايش ارتفاع سد عموماً تمايل به افزايش داشته و ثانياً با گذشت زمان مقدار اين درصد كمتر مي‌شود. اين نتايج نشان مي‌دهد كه آبگيري پيش از موعد مخزن ، با به تأخير انداختن تحكيم، نرخ انجام نشست را كند كرده و با نگاه به قضيه از ديدگاهي ديگر مي توان نتيجه گرفت كه با آبگيريهاي زمانبندي شده مي‌توان نرخ انجام نشست را تعديل نمود .

۳- در هر دو مدل الگوی کلی نشست با مقادير مشاهداتي همخواني خوبی دارد. ولي در عين حال عدم انطباقهائي هم به چشم می‌خورد که از دلايل آن مي‌توان يکسان در نظر گرفتن مصالح مصرف شده در هرکدام از بخشهای مختلف جسم سد (مخصوصاً هسته) در مدل تحليلي را نام برد. در حاليكه در عمل، خواص مهندسي لايه‌هاي سد متفاوت بوده و به عوامل متعددي بستگي دارد كه براي مدلسازي واقعي‌تر، به اعمال تفصيلي خواص مصالح، حاصل از گزارشات كارگاهي ضمن ساخت، نياز مي‌باشد. در اين بين، مدل خزشي خاك نرم با دقت بسيار بهتري قادر به پيش‌بيني رفتار واقعي بوده است و حداكثر مقدار نشست و محل آن را با ناحيه اطراف و نزديك به آن با دقت بسيار خوبي برآورد مي‌كند كه مشوق استفاده از اين روش در پيشبيني محل و مقدار حداكثر نشست بدنه در دوران ساخت، به منظور برنامهريزي زماني ساخت خاكريز مي‌باشد.

۴- از نمودار شكل (۷) مشاهده مي‌شود كه مدل مور-كولمب در كوتاه مدت نتايج نسبتاً خوبي ميدهد ولي در ارزيابي نشستهاي طولاني مدت به علت تأثير رفتار خزشي خاک، از دقت آن كاسته می‌شود. ملاحظه می‌شود كه در مورخه ۹٦/۸/۱۱ در قسمت بالائي نمودار (بالاي تراز ۱٥٤٥) بر خلاف قسمت پائيني آن، انطباق خوبي بين نشست مشاهداتي و محاسباتي وجود دارد. در تاريخ ۹٥/٥/۲۲ نيز دو نمودار مشاهداتي و محاسباتي همخواني خوبي دارند (به دورههاي ساخت و استراحت توجه شود).

۵- جدايش منحنيهاي محاسباتي در دو حالت با در نظر گرفتن و بدون درنظرگرفتن آب در مخزن در تاريخهاي مختلف، در ترازهائي رخ مي‌دهد كه اثر خزش در آنها بيشترين مقدار است (زمان سپري شده از تاريخ رسيدن به آن تراز در منحني ساخت بدنه و اثر نشست لايههاي پائين‌تر) كه عمدتاً همان فاصله يك سوم مياني ارتفاع است.

٦- در اين تحقيق از متوسط درصد تخلخل در انتهاي آزمايشهاي تحكيم به عنوان درصد تخلخل پايه در برازش مربوط به تعيين C_c براي استفاده در مدل خزشي خاك نرم استفاده شده است، مسلماً اگر در بکارگيری مدل SSC از خواص تفصيلی مصالح، خصوصاً شاخص فشردگي واقعي پس از اجراي لايهها، استفاده می‌گرديد دقت نتايج بازهم افزايش پيدا می‌کرد.

سپاسگزاریها

از پرسنل سازمان آب منطقه‌اي آذربايجان شرقي و اردبيل مخصوصاً كميتة بررسي پايداري و ايمني سدها، كارمندان آرشيو فني و همچنين پرسنل نگهداري و بهره‌برداري از سد علويان كه كمال همكاري را داشته‌اند، صميمانه قدرداني مي‌شود.

نمادها

a_v	ضریب فشردگی
m_v	ضریب فشردگی حجمی
e_0	نسبت تخلخل اولیه
m	توان نسبت تنش
C_c	اندیس فشردگی
C_r	اندیس تورم
C_α	اندیس خزش یا تحکیم ثانویه
E_s	ضریب الاستیسیته
υ	ضریب پواسون
M	پارامتر مرتبط با k^{nc}_0
f	تابع تسلیم
g	تابع پتانسیل پلاستیک
C	ضریب چسبندگی
t	زمان
φ	زاویه اصطکاک داخلی
φ_{cv}	زاویه اصطکاک داخلی بحرانی
ψ	زاویه اتساع
λ	اندیس فشردگی (ایزوترپ)
κ	اندیس تورم (ایزوترپ)
μ	اندیس خزش یا تحکیم ثانویه (ایزوترپ)
σ'	تنش موثر
λ^*	اندیس فشردگی اصلاح شده (ایزوترپ)
κ^*	اندیس تورم اصلاح شده (ایزوترپ)

μ^*	اندیس خزش یا تحکیم ثانویه اصلاح شده (ایزوترپ)
E_{oed}	مدول یانگ ادومتری
E_{oed}^{ref}	مدول یانگ ادومتری مبنا
p^{ref}	فشار مبنا
$\underline{\varepsilon}$	کرنش حجمی
$\underline{\varepsilon}^{e}$	کرنش حجمی الاستیک
$\underline{\varepsilon}^{p}$	کرنش حجمی پلاستیک

مراجع

[1] Sadrekarimi, J. Kia, M.A. and Sadrekarimi A., “A comparision between predicted and observed behavior of Alavian dam, Iran”. Proceedings of the 6th Int. Symposium on Field Measurements in Geomechanics, Oslo, 2003.

[2] Dunnicliff, J., Geotechnical instrumentation for monitoring field performance., John Wiley and Sons Publications, USA, 1993.

[3] Marsal, R. J., “analisis de asentamientos en la presa Presidente Aleman,” Oaxaca, No. 5, Instituto de Ingenieria, UNAM, Mexico City, Mexico (in Spanish), 1958.

[4] Mahab-Ghods Consulting Engineers Co., Alavian dam technical reports. Tehran, Iran, 1992-1997.

[5] Pagano, L., Desidri, A. and Vinale, F., “Interpreting Settlement Profiles of Earth Dams,” JGGED, ASCE, vol. 124, No. 10, pp 923-932, 1998.

[6] Coumoulos, D. G. and Koryalos, T. P. , “Performance of the clay core of a large embankment dam during construction”. Clay Fills, Institution of Civil Engineers, London, pp 73-78, 1978.

[7] Fell, R., MacGregor, P. and Stapledon, D. , Geotechnical Engineering of Embankment Dams. A.A.Balkema, p 349, 1992.

[8] Speedie, M. G., “Dam behavior measurements”. ANCOLD, Bulletin No. 30, March 1970, pp 27-35, 1970.

[9] Sherard, J. L., Woodward, R. J., Gizienski, S. F. and Clevenger, W. A., Earth and Earth – rock Dams, John Wiley & Sons Publications. 1963.

[10] Sakurai, S., “Interpretation of the results of displacement measurement in geotechnical engineering projects,” Proceedings of the 5th international symposium on field measurements in geomechanics. December 1-3, Singapore, pp.13-19, 1999.

[11] Plaxis incorporation. Reference and scientific manual, 1998.

[12] Bowles, J.E., Foundation analysis and design. 5th ed. McGraw-Hill Inc., p 335, 1997.

[13] ICOLD PI and organic matter, 1988

[14] Atkinson, J. H. and Bransby, P. L., The Mechanics of Soils. An Itroduction to Critical Soil Mechanics. McGraw-Hill, London, 1988.

[15] Terzaghi, j., Peck, R. B., and Mesri, G., Soil Mechanics in Engineering Practice, 3rd edition, john Wiley & sons, p 544, 1999.