نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی
سال هفتم / شماره بیست و پنجم /تابستان ۹۹

Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant
7th Year / No. 25 / September 2020

رفتار نگاری سد چراغ‌ویس در دوران ساخت با استفاده از نتایج ابزار دقیق و پیش‌بینی رفتار سد در دوران آبگیری

علی‌اصغر میرقاسمی[۱*]
احسان شهیری طبرستانی[۲]
علیرضا مجیدی[۳]

چکیده

به‌منظور کنترل ایمنی و پایداری اجزای مختلف سدهای بزرگ در طول دوران ساخت با نصب ابزارهای لازم مقادیر فشارهای منفذی ، فشارهای توده خاک و تغییر شکل‌ها در طول سه دوران ساخت، اولین آبگیری و زمان بهره‌برداری اندازه‌گیری شده و عملکرد سد مورد ارزیابی و تجزیه‌وتحلیل قرار می‌گیرد. در این تحقیق سعی گردیده نتایج ابزار منصوب در سد چراغ ویس مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد. همچنین تحلیل مدل دوبعدی و سه‌بعدی سد مطابق با منحنی زمان – ساخت آن توسط نرم‌افزار اجزاءمحدود آباکوس به‌صورت لایه‌لایه مدل گردیده و مشخصات کالیبره شده مصالح برای هر دو مدل به تفکیک ارائه گشت و پس‌ازآن، آبگیری مرحله‌به‌مرحله در مدل سه‌بعدی لحاظ گردید. به‌منظور دستیابی به تطابق میان ابزار دقیق و مدل بر پایه پارامترهای اولیه، با تغییر خصوصیات مصالح، مدل‌های عددی دوبعدی و سه‌بعدی کالیبره گشته و پارامترهای دقیق مصالح به دست آمد. با بررسی مقدار ماکزیمم ضریب فشار آب حفره‌ای در نقاط مختلف هسته این نتیجه حاصل شد که نرخ مناسب آبگیری باعث افزایش این ضریب نگشته و در طول آبگیری فشارهای آب حفره‌ای که بیشترین مقدار آن در کف هسته تشکیل‌شده است به‌طور عمده در حال کاهش و محو شدن است و خطری از این بابت سد را تهدید نمی‌کند.

واژه‌های کلیدی:

رفتارنگاری، ابزار دقیق، سد سنگریزه‌ای، مدل المان محدود، تحلیل برگشتی

---

[۱]. استاد، عضو هیئت‌علمی دانشکده فنی دانشگاه تهران Aghasemi@ut.ac.ir

[۲]. کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، گرایش آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه تهران ehsan_shahiri@yahoo.com

[۳]. دکتری مهندسی عمران، گرایش ژئوتکنیک، شرکت مهاب قدس majidi@mahabghodss.com

علمی-پژوهشی

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۹/۱۴ تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۳/۱۱

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.25.4.4]

مقدمه

رفتار نگاری از نظر تخصصی به معنای ارزیابی عملکرد یک محصول و تطبیق آن با اهداف پیش‌بینی‌شده در طراحی و اصلاح طرح در صورت لزوم می‌باشد. طرح سازه بر پایه اطلاعات فنی به‌دست‌آمده از نتایج آزمایشگاهی و قوانین در نظر گرفته‌شده برای مصالح بکار رفته در سازه صورت می‌گیرد. سازه‌های خاکی به دلیل اینکه بدنه آن‌ها اغلب از خاک و سنگ تشکیل‌شده است، دارای عدم قطعیت فراوانی می‌باشد. این عدم قطعیت‌ها می‌تواند خطرات پیش‌بینی‌نشده‌ای را برای سازه به وجود آورد. پدیده-هایی مانند: روانگرایی، جوشش، لغزش شیروانی و ... ازجمله مواردی هستند که بر پیچیدگی رفتار خاک می‌افزایند. برای به دست آوردن رفتار مصالح باید مقادیر نیروها و کرنش‌ها موجود باشد. برای به دست آوردن آن‌ها از وسایل حساس به نام ابزار دقیق (instrument) استفاده می‌شود. ارزیابی از رفتار سد به قرن‌های گذشته باز می‌گردد. این بازبینی‌ها در ابتدا به‌صورت چشمی در مراحل مختلف بارگذاری سد صورت می‌گرفت. بعدها ابزارهایی به‌صورت ابتدایی برای رفتارنگاری مورداستفاده قرار گرفت. با پیشرفت فنّاوری در ساخت ابزار، مبدل‌هایی پیشرفته‌تر در ابزار بکار گرفته شدند که دقت نتایج گرفته‌شده را بالاتر می-بردند. استفاده از ابزارها به‌طور گسترده پس از خرابی سد تتون[۱] در آمریکا رواج یافت. پس‌ازآن هرسال مقالات فراوانی در خصوص اهمیت کاربرد ابزار در سدها منتشر می‌شود. در ادامه شماری از رفتارنگاری‌های انجام‌شده روی سدهای دنیا تشریح می‌گردد.

سد دی‌یرفلت[۲] از مواردی است که ابزارهای بکار رفته در سد به تحلیل مشکل موجود در سد کمک کرد. این سد در سال ۱۹۰۹ در کشور آمریکا به پایان رسید. ارزیابی نتایج پیزومترها و نشست سنج‌های به‌کاررفته در بدنه سد نشانگر تراوش غیرقابل کنترلی از بدنه بود که با تمهیدات ویژه‌ای این مشکل رفع شد.

سد سن لوییس[۳] از نوع خاکی در ایالت کالیفرنیا در سال ۱۹۶۲ ساخته شد. برای رفتار نگاری آن از شیب‌سنج‌ها و پیزومترهای تار مرتعش در بدنه استفاده کردند. بعد از آبگیری اولیه شیب‌سنج‌های نصب‌شده در بالادست بدنه مقدار جابه‌جایی‌های زیادی را نشان می‌دادند که بیانگر احتمال لغزش شیروانی بود. درنتیجه برای رفع مشکل سطح آب مخزن سریعاً پایین آورده شد و به کمک پیزومترها سطح لغزش مشخص شد و سپس با تمهیدات خاصی گوه لغزش پایدار شد. در صورت لغزش این گوه توده عظیمی به حجم ۹۹۴۰۰۰ مترمکعب دچار گسیختگی می‌شد. بنابراین با رفتار نگاری سد از خرابی کلی سد جلوگیری شد

در سال ۱۹۶۵ سد مالپاسه[۴] به دلیل نشت غیرعادی آب از تکیه‌گاه راست فرو می‌ریزد. علت بروز حادثه عدم نصب دستگاه‌های رفتار سنجی اعلام گردید. در این سد هیچ‌گونه ابزار رفتارسنجی نصب نشده بود و فقط سالی یک‌بار با استفاده از نقاط نشانه تاج برداشت ژئوتکنیک از آن انجام می گرفت.

سد زوری[۵] در سوئیس مجهز به ابزار دقیق کنترل رفتار سد می‌باشد. به دلیل عملیات ساختمانی و حفر تونل در عمق ۴۰۰ متری نزدیک سد ناگهان دچار تغییر مکان و درنهایت بروز ترک در بدنه می‌گردد که شبکه‌های ابزار دقیق این وضعیت را به‌وضوح نشان می‌دهند. به همین دلیل مخزن سد سریعاً تخلیه شد. در ایران نیز این کار در مورد بسیاری از سدها صورت گرفت. از آن جمله می‌توان به آنالیز برگشتی سد مارون در جنوب غربی ایران اشاره کرد که پس از بررسی نتایج ابزار دقیق و مقایسه آن با نتایج مدل به نتایج قابل قبولی برای پارامترهای مقاومتی و تغییر شکل بدنه دست یافتند. سد ماکو[۶] یک سد خاکی به ارتفاع ۷۸ متر و حجم مخزن ۱۵۰۰ میلیون مترمکعب می‌باشد که در ۱۲ کیلومتری شهرستان ماکو قرار دارد. نتایج آنالیز برگشتی برای این سد پایداری آن را نشان داد. با بررسی فشار آب حفره‌ای عملکرد المان آب‌بند پی تائید گردید و همچنین نشان داده شد که این سد در برابر گسیختگی هیدرولیکی ایمن است و خطری ازاین‌جهت آن را تهدید نمی‌کند.

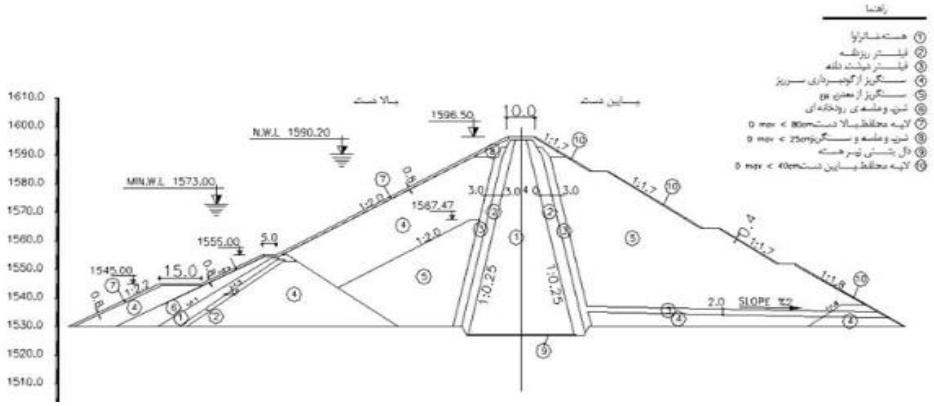
۱.Teton
۲. Deer Flat
۳.San Luis
۴.Malpasset
۵.Zori
۶.Maku

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.25.4.4]

سد خاکی تهم[۱] به ارتفاع ۱۲۳ متر و طول تاج ۴۵۸ متر می باشد. با مدلسازی شرایط ساخت و آبگیری آن ملاحظه شد تحلیل‌های انجام‌گرفته پس‌از آنالیز برگشتی نتایج نسبتاً دقیقی از مقادیر تنش کل و فشار آب حفره‌ای را نشان می‌دهند. البته این نتایج در ترازهای فوقانی همخوانی ندارند. دلیل اصلی این مسئله یکسان فرض شدن نفوذپذیری خاک در جهت فائم و درصد اشباع خاک می‌باشد.

ویژگی ساختگاه و مصالح بدنه سد

سد مخزنی چراغ ویس[۲] از نوع سنگریزه‌ای با هسته رسی قائم به ارتفاع ۶۴/۵ متر از بستر رودخانه و ۶۷ متر از پی با طول تاج ۲۷۴ متر، عرض در پی ۳۰۱ متر و عرض تاج ۱۰ متر ساخته شد. شیب بالادست و پائین‌دست بدنه سد به ترتیب ۱(V:H) :۲ و ۱(V:H) :۱/۷ در نظر گرفته‌شده است. سد مخزنی چراغ‌ویس در استان کردستان، حدفاصل شهرهای سقز[۳] و بانه[۴] بر روی رودخانه چم‌خان[۵] از سرشاخه‌های زرینه‌رود[۶] و حوزه آبریز دریاچه ارومیه[۷] احداث می‌گردد. هدف از احداث این سد، تنظیم و کنترل سیلاب‌ها و رواناب‌های این حوضه برای تأمین نیاز آب شرب دراز مدت شهر سقز به میزان ۳۳ میلیون مترمکعب و تأمین آب کشاورزی اراضی پایاب سد به مساحت ۶۰۰۰ هکتار می‌باشد. بدنه سد چراغ‌ویس از ۷ ناحیه و بدنه فرازبند آن از ۵ ناحیه تشکیل گردیده است. ناحیه شماره ۱ هسته ریزدانه رسی و عامل آب‌بندی بدنه می‌باشد که در پایین‌دست با یک لایه فیلتر و یک لایه عبوری و زهکش در مقابل فرسایش محافظت می‌شود. نواحی مختلف این سد در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): نمایی از قسمت‌های تشکیل‌دهنده بدنه سد

مدل عددی

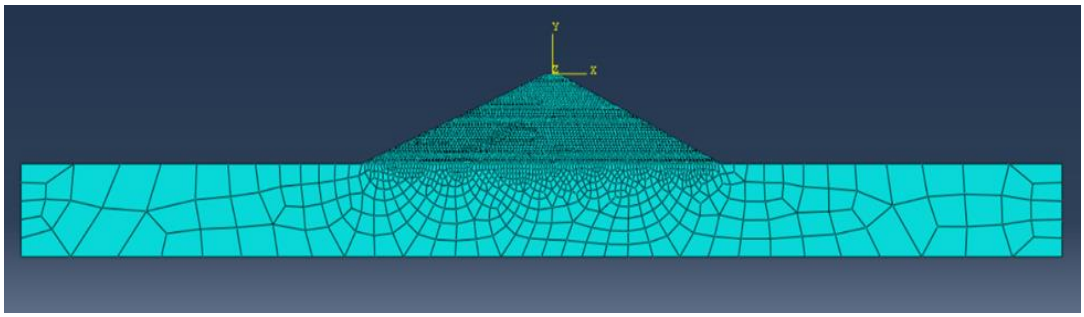
در این پژوهش از نرم‌افزار آباکوس[۸] به دلیل توانایی آن برای مدلسازی و تحلیل انفجار استفاده گردیده است. برای مدلسازی، پس از ترسیم هندسه مدل باید نواحی دارای مصالح و خصوصیات مختلف از هم مجزا شوند و درنهایت خصوصیات هر مصالح به آن بخش اختصاص داده شود. این خصوصیات شامل دانسیته و خصوصیات مکانیکی آن‌ها می‌باشد. خصوصیات مکانیکی با توجه به مدل رفتاری در نظر گرفته‌شده، برای تحلیل تنش- کرنش قابل‌استفاده هستند در این پژوهش از مدل رفتاری موهر- کولمب[۹] برای مدلسازی رفتار مصالح سنگریزه‌ای بدنه استفاده شده است. مدل موهر- کولمب در مسائل ژئوتکنیکی به‌صورت گسترده‌ای

۱.Taham
۲.Cheragh- veis
۳.Saghez
٤.Baneh
٥.Cham khan
٦. Zarrinehroud
۷.Urmia Lake
۸.Abaqus
۹.Mohr- coulomb

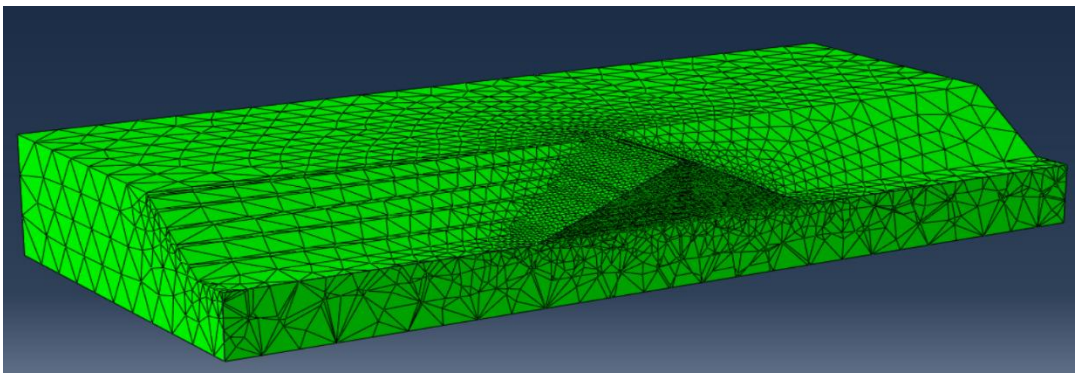
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.25.4.4]

مورداستفاده قرار گرفته است. در این معیار فرض می‌گردد که گسیختگی با تنش حداکثر برشی کنترل می‌شود که این تنش برشی طبق رابطه زیر خود وابسته به تنش قائم است.

برای شـــبکه‌بندی مدل ســـه‌بعدی از المان‌های چهاروجهی (free) و در مدل دوبعدی از المان‌های free و از نوع pore Fluid /stress استفاده شده است.



شکل(۲): هندسه مدل دوبعدی به همراه المان‌بندی آن



شکل(۳): هندسه مدل سه‌بعدی به همراه المان‌بندی آن

شرایط مرزی ضروری مانند صفر کردن تغییر مکان‌ها در مرزهای دور مدل و تعریف فشار آب حفره‌ای در بالادست و پایین‌دست سد به مدل اعمال شده است. تنش فشاری ناشی از آبگیری نیز در گام‌های متعدد متناسب با نرخ واقعی آبگیری که توسط مهندسین منابع آب با توجه به میزان آورد رودخانه در فصل آبگیری سد محاسبه گردیده، به مدل اعمال گشته و شرایط مرزی هیدرولیکی نیز به مرزها اختصاص داده می‌شود.

در انتهای کار پارامترهای ژئوتکنیکی مصالح موجود در سد به آن‌ها اختصاص می‌یابد و نتایج تحلیل اولیه با این دسته از پارامترها با نتایج اندازه‌گیری شده فشارهای آب حفره‌ای و تغییر شکل‌ها مقایسه شده و با تغییر پارامترهایی همچون نفوذپذیری مصالح و مدول الاستیسیته آن‌ها در مدل سه-بعدی و تکرار مراحل تحلیل، پارامترهای نهایی مصالح مصرفی در بدنه سد به دست آمدند تا رفتار واقعی سد و مدل عددی بر هم منطبق گردند. سپس این مصالح انتخاب‌شده در مدل سه‌بعدی را در مدل دوبعدی آن‌قدر تغییر می‌دهیم تا نتایج دو مدل نیز با هم تطابق داشته باشند. هدف از ساخت دو مدل به‌صورت دوبعدی و سه‌بعدی، مقایسه نتایج نهایی پارامترهای کالیبره شده و مقایسه میزان اختلاف این مشخصات در دو مدل می‌باشد. در جداول (۱) و (۲) پارامترهای اولیه و نهایی در مدل سه‌بعدی مشاهده می‌گردد. در جدول (۳) نیز مشخصات نهایی کالیبره شده مدل دوبعدی ارائه شده است.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.25.4.4]

جدول (۱): مقادیر اولیه پارامترهای مصالح سد در مدل دوبعدی و سه‌بعدی

Materials	Density ($\frac{KN}{m^3}$)	E(Gpa)	φ	ψ	K($\frac{cm}{s}$)	C(Kpa)	υ
Mixed clay core	۱۸/۳	۰/۰۲	۲۱	۰	1.00 E − 8	۱۰	۰/۲۵
Shell 4	۲۲/۵	۰/۰۲	۴۹/۱	۵	1.00 E − 3	۰	۰/۲۵
Shell 5	۲۲/۵	۰/۰۲	۴۳	۰	1.00 E − 4	۱۰	۰/۲۵
Filter	۲۰	۰/۰۲	۳۰	۰	1.00 E − 4	۰	۰/۲۵
Foundation	۲۴	۰/۷	۲۶	۰	7.00 E − 5	۲۱۰	۰/۲۵

جدول (۲): پارامترهای به‌دست‌آمده پس از کالیبره شدن مدل سه‌بعدی

Materials	Density ($\frac{KN}{m^3}$)	E(Gpa)	φ	ψ	K($\frac{cm}{s}$)	C(Kpa)	υ
Mixed clay core	۱۸/۳	۰/۰۱۲	۲۱	۰	6.00 E − 8	۱۰	۰/۲۵
Shell 4	۲۲/۵	۰/۰۸	۴۹/۱	۵	1.00 E − 3	۰	۰/۲۵
Shell 5	۲۲/۵	۰/۰۸	۴۳	۰	1.00 E − 4	۱۰	۰/۲۵
Filter	۲۰	۰/۰۴	۳۰	۰	1.00 E − 4	۰	۰/۲۵
Foundation	۲۴	۰/۷	۲۶	۰	7.00 E − 5	۲۱۰	۰/۲۵

جدول (۳): پارامترهای به‌دست‌آمده پس از کالیبره شدن مدل دوبعدی

Materials	Density ($\frac{KN}{m^3}$)	E(Gpa)	φ	ψ	K($\frac{cm}{s}$)	C(Kpa)	υ
Mixed clay core	۱۸/۳	۰/۰۱۷	۲۱	۰	1.00 E − 8	۱۰	۰/۲۵
Shell 4	۲۲/۵	۰/۰۲	۴۹/۱	۵	1.00 E − 3	۰	۰/۲۵
Shell 5	۲۲/۵	۰/۰۲	۴۳	۰	1.00 E − 4	۱۰	۰/۲۵
Filter	۲۰	۰/۰۲	۳۰	۰	1.00 E − 4	۰	۰/۲۵
Foundation	۲۴	۰/۷	۲۶	۰	7.00 E − 5	۲۱۰	۰/۲۵

اعمال تغییرات زاویه اصطکاک داخلی

نرم‌افزار آباکوس در کنار تمامی امکانات و گزینه‌های ریزودرشت پیش‌فرض، این قابلیت را در اختیار قرار داده تا بتوان به کمک برنامه‌نویسی در محیط نرم‌افزار فرترن[۱] (که پایه و اساس نرم‌افزارهای بزرگ محاسباتی همچون آباکوس است) برخی نیازها را مرتفع سازد. زیربرنامه USDFLD بسیار پرکاربرد است و در این زیربرنامه تغییر خواص ماده به یک متغیر وابسته دلخواه صورت می‌گیرد.

$$\emptyset = \emptyset_0 - \Delta\emptyset log^{\delta_3/P_{atm}} \quad (۱)$$

در رابطه بالا $\emptyset_0$ زاویه اصطکاک اولیه است که این مقدار برای sell4، ۴۹/۱ درجه و برای shell5، ۴۳ درجه اختیار شده است. مقدار $\Delta\emptyset$ اختلاف حداکثر و حداقل زاویه اصطکاک داخلی خاک می‌باشد که با توجه به مشخصات مصالح بکار رفته

۱.Fortran

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

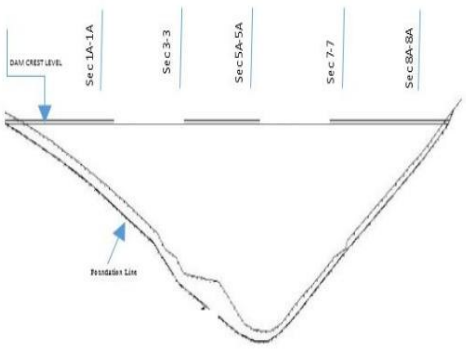
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.25.4.4]

در بدنه سد انتخاب می‌شود که در اینجا برای shell 4، مقدار ۸,۶ درجه و برای shell 5 مقدار ۶,۸ درجه است. این مقادیر از گزارش‌های اجرایی بدنه سد در فاز اول استخراج‌شده است. همچنین مقادیر δ_3 یا تنش همه‌جانبه از میانگین S_{11}، S_{22} و S_{33} که از نرم‌افزار خوانده می‌شوند به دست می‌آید. آباکوس در هر increment بر اساس $\emptyset_0$ مقدار δ_3 را به دست می‌آورد و با استفاده از رابطه (۱) زاویه اصطکاک جدید برای increment بعدی محاسبه می‌شود. واضح است که هرچه لایه خاک‌ریزی بیشتر شود تنش همه‌جانبه بیشتر شده و درنتیجه زاویه اصطکاک کوچک‌تر می‌شود.

مشخصات ابزاربندی بدنه سد

با توجه به نوع سد، شرایط پی و دیگر عوامل برای ابزاربندی سد چراغ ویس، ۵ مقطع عرضی در نظر گرفته‌شده است که دوتای آن‌ها روی تکیه‌گاه و مابقی در بستر رودخانه قرار دارد.

درمجموع ۱۲۳ عدد از انواع ابزار در بدنه سد چراغ‌ویس جایگذاری شده است که شامل پیزومترهای تار مرتعش و لوله ایستا، سلول‌های نشست سنج و سلول‌های فشار کل می‌باشند. در بین تمام مقاطعی از بدنه که دارای ابزاربندی هستند؛ مقطع شماره ۵ دارای بیشترین تعداد ابزار می‌باشد و به دلیل اینکه بخش عمده‌ای از بدنه سد دارای مقطعی بدین شکل می‌باشد، از این مقطع برای تحلیل مدل و مقایسه نتایج با تحلیل برگشتی در مدل دوبعدی استفاده می‌کنیم.

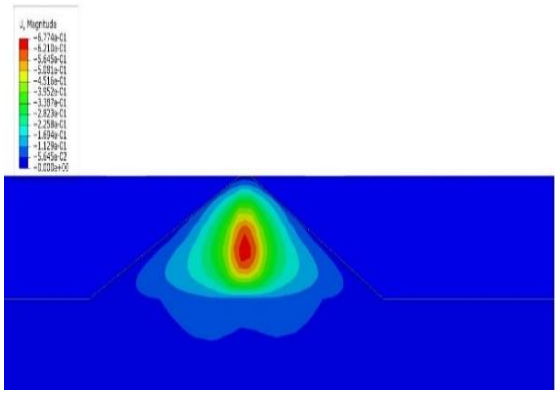


شکل(۴): مکان قرار دهی ابزارها در مقاطع طولی سد

نتایج و بحث

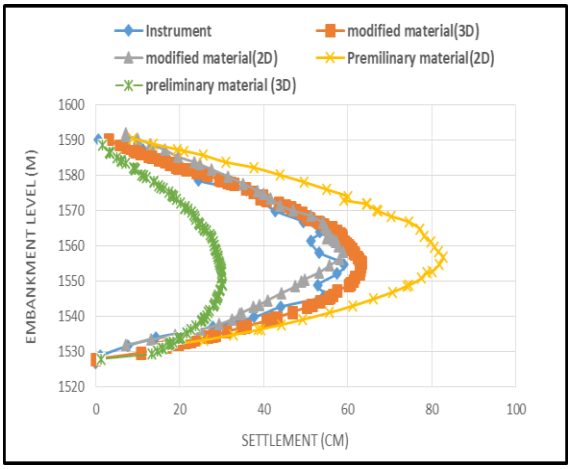
تغییر شکل بدنه سد

شکل (۵) شمارگر نشست بدنه سد را در پایان دوره ساخت (۱۳۹۳/۰۹/۱۰) نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد بیشترین نشست بدنه تقریباً در مرکز هسته به مقدار ۶۹ سانتیمتر برای مدل سه‌بعدی با مشخصات کالیبره شده می‌باشد.



شکل (۵): شمارگر نشست در مدل سه‌بعدی- مقطع ۵

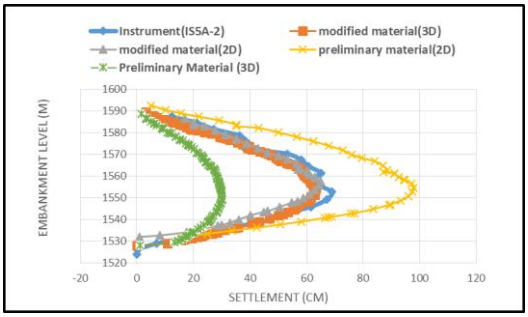
شکل‌های (۶)، (۷) و (۸) تغییرات نشست را برای پایان ساخت یعنی ۱۳۹۳/۰۹/۱۰ در مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی نشان می‌دهند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود پارامترهای اولیه نشست در حالت دوبعدی و سه‌بعدی به ترتیب بیشتر و کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهند که پس از کالیبره شدن انطباق خوبی بین مدل‌ها و نشست‌های واقعی حاصل می‌آید.



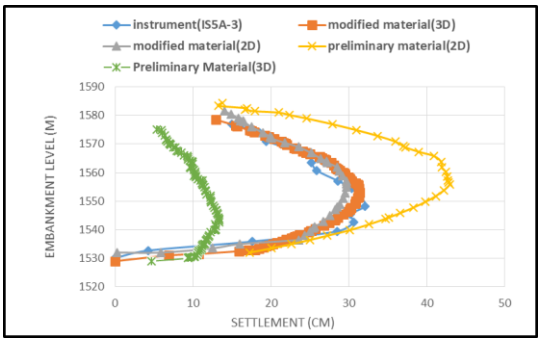
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.25.4.4]

شکل (۶): مقایسه نشست هسته در فاصله ۱۲ متر از محور سد در بالادست با تحلیل برگشتی- مقطع ۵



شکل (۷): مقایسه نشست هسته در فاصله ۶,۵ متر از محور سد در پایین‌دست با تحلیل برگشتی- مقطع ۵



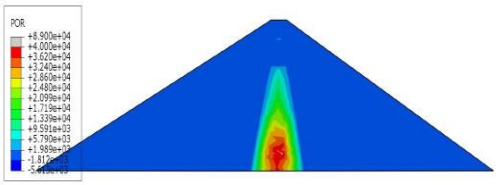
شکل (۸): مقایسه نشست پوسته پایین‌دست در فاصله ۲۸ متر از محور سد با تحلیل برگشتی - مقطع ۵

مقایسه فشارهای منفذی توسط نتایج ابزار دقیق و تحلیل برگشتی

در سدهای خاکی فشارهای منفذی تولید شده در هسته سد در حین ساخت از اهمیت بسزایی برخوردار است. طبق قانون تنش‌های ترزاقی افزایش فشارهای منفذی سبب کاهش تنش مؤثر می‌گردد که این امر خود سبب کاهش مقاومت خاک می‌شود. درواقع افزایش فشار منفذی روند خمیری شدن خاک را تسریع می‌کند. لذا نشست‌ها افزایش می‌یابند. کاهش مقاومت برشی خاک باعث به خطر افتادن پایداری سد می‌گردد.

یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی فشار آب حفره‌ای در سدهای خاکی ضریب فشار آب حفره ای Ru می‌باشد. این ضریب درواقع شاخصی برای کاهش تنش مؤثر می‌باشد و از تقسیم فشار آب در هر نقطه به تنش قائم در آن نقطه به دست می‌آید. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد با افزایش تراز خاک‌ریزی مقادیر ضریب فشار آب حفره ای به‌صورت عمده افزایش می‌یابد. ازآنجاکه این ضریب از فشارهای آب حفره ای و تنش قائم تأثیر می‌پذیرد، در کف هسته زمانی که به پایان ساخت نزدیک می‌شویم فشار آب حفره ای به دلیل روند کند ساخت به‌شدت رو به کاهش می‌باشند. پایین بودن ضرایب فشارهای آب حفره ای نشان‌دهنده ایمنی بالای سد از نظر گسیختگی هیدرولیکی هنگام آبگیری می‌باشد.

شکل (۹) شمارگرهای فشار آب حفره‌ای را در پایان ساخت (۱۳۹۳/۰۹/۱۰) نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است به دلیل نفوذناپذیری پی بیشترین فشار آب حفره‌ای در کف هسته و در محور هسته که دور از مرزهای زهکشی است اتفاق افتاده است.



شکل (۹): فشار آب حفره‌ای در انتهای دوران ساخت در مقطع۵

بیشترین مقدار فشار منفذی در بدنه سد مربوط به تراز ۱۵۳۲ متر یعنی محل اتصال هسته به پی می‌باشد که به علت بیشترین سربار ناشی از خاک‌ریزی در دوران ساخت به وجود آمده است. همچنین با توجه به ابعاد وسیع پی و محو شدن فشار منفذی در دوردست آن، به‌منظور نمایش بهتر مقادیر شمارگرها در شکل (۹) مقطع پی تصویر نشده است.

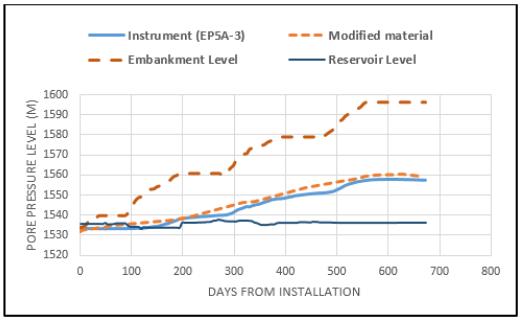
شکل (۱۰) نیز این روند را برای نقطه‌ای واقع در محور سد یعنی محل نصب پیزومتر EP5A-3 دنبال می‌کند که مشاهده می‌گردد انطباق خوبی بین نتایج ابزار دقیق و مدل کالیبره برقرار می‌باشد. اشکال (۱۱) و (۱۲) نیز تراز آب حفره‌ای را برای مدل سه‌بعدی کالیبره شده به ترتیب در سلول‌های EP5A-7 و EP5A-8 نتایج ابزار دقیق نشان می‌دهند. درنهایت شکل (۱۳) تغییرات تراز آب حفره‌ای را در عرض هسته در مقطع ۵ مدل سه‌بعدی و در پایان ساخت نشان می‌دهد. همان‌طور که قابل‌مشاهده می‌باشد در زمان ساخت تراز

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

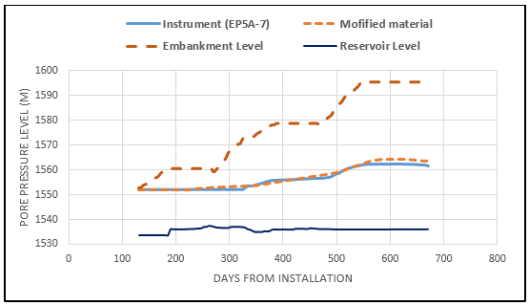
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.25.4.4]

آب حفره ای پیزومترهای منصوب در محور هسته از تراز آب حفره‌ای پیزومترهای مجاور فیلتر بیشتر می‌باشد. این امر به دلیل قرارگیری این پیزومترها در رس اتصال می‌باشد که فشار را در این ناحیه به‌طور موضعی بالا برده است.

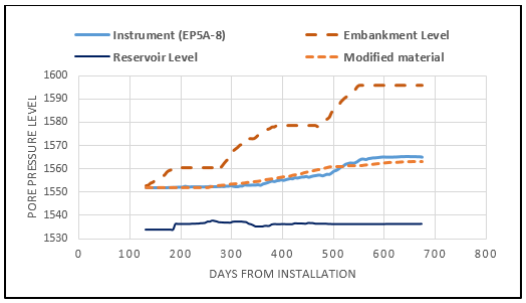
همچنین در شکل (۱۴) مقایسه‌ای بین مدل دوبعدی و سه-بعدی برای مشاهده تراز آب حفره‌ای در عرض هسته انجام شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مدل‌های کالیبره شده انطباق بسیار خوبی با نتایج ابزار دقیق دارد.



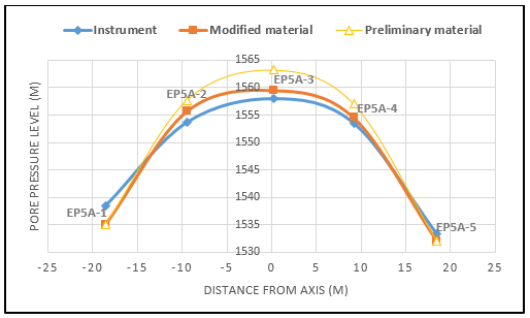
شکل (۱۰): مقایسه تراز آب حفره‌ای مرکز هسته با تحلیل برگشتی- مدل سه‌بعدی- تراز ۱۵۳۲ متر- مقطع ۵



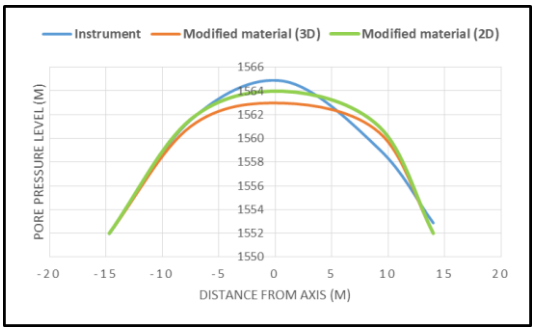
شکل (۱۱): مقایسه تراز آب حفره‌ای ۷,۵ متر بالادست محور سد با تحلیل برگشتی- مدل سه‌بعدی- تراز ۱۵۵۲ متر- مقطع ۵



شکل (۱۲): مقایسه تراز آب حفره‌ای مرکز هسته با تحلیل برگشتی- مدل سه‌بعدی- تراز ۱۵۵۲ متر- مقطع ۵



شکل (۱۳): مقایسه تراز آب حفره‌ای در عرض هسته با تحلیل برگشتی- مدل سه‌بعدی- تراز ۱۵۳۲ متر- مقطع ۵



شکل (۱۴): مقایسه تراز آب حفره‌ای در عرض هسته با تحلیل برگشتی- تراز ۱۵۳۲ متر- مقطع ۵

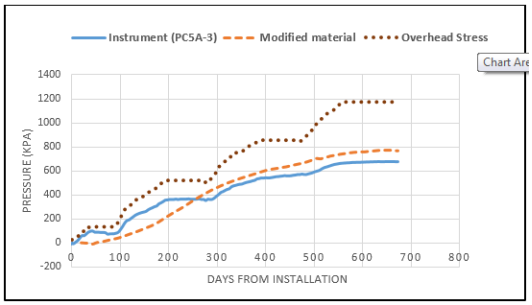
تنش‌های کل در بدنه سد میان نتایج ابزار دقیق و تحلیل برگشتی

به‌منظور ارزیابی تنش‌ها در یک توده خاک می‌توان با نصب سلول‌های فشار خاک در جهات مختلف مقادیر تنش را تعیین نمود. به‌طورکلی ۴۳ عدد سلول فشار کل در قسمت-های مختلف سد تعبیه شده است که این سلول‌ها تنش‌ها را در خوشه‌های سه طایی، دوتایی و تکی اندازه‌گیری می‌کنند. اشکال (۱۵) و (۱۶) روند تغییرات تنش قائم را برای دو سلول واقع در کف هسته و ارتفاع ۲۰ متری از کف هسته در مقطع ۵-۵ مدل سه‌بعدی نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد روند افزایش تنش با افزایش تراز خاک‌ریزی سد افزایش می‌یابد که این روند کاملاً طبیعی بوده و مطابق با اصول رفتار سدهای خاکی می‌باشد. همچنین مشاهده می-گردد تنش‌های به‌دست‌آمده از تحلیل‌های برگشتی بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده توسط ابزار دقیق می‌باشند. دلیل این امر را می‌توان در اثر قوس زدگی برای سلول تنش کل

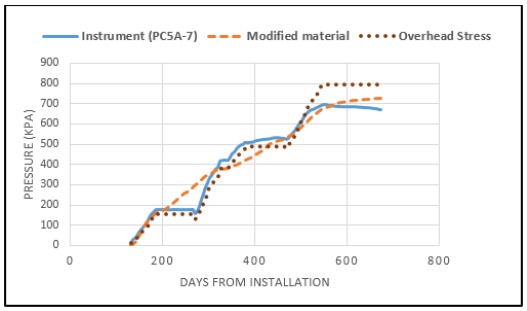
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.25.4.4]

جستجو نمود. تغییر در مدول سختی و زاویه اصطکاک خاک می‌تواند سبب ایجاد پدیده قوس‌زدگی[۱] شود. استفاده از ماشین سبک برای تراکم خاک ریزدانه‌تر عامل اصلی اختلاف سختی داخل و خارج ترانشه نصب سلول فشار می‌باشد. این اختلاف سبب انتقال تنش از ترانشه نصب سلول فشار به هسته و یا قوس‌زدگی موضعی می‌شود و سلول فشار تنش کمتری نسبت به واقعیت اندازه می‌گیرد. درصورتی‌که مصالح هسته و ترانشه از یک جنس باشند تنها قوس زدگی کلی اثر می‌کند. در سایر حالت‌ها قوس زدگی موضعی نیز اثر می‌کند.



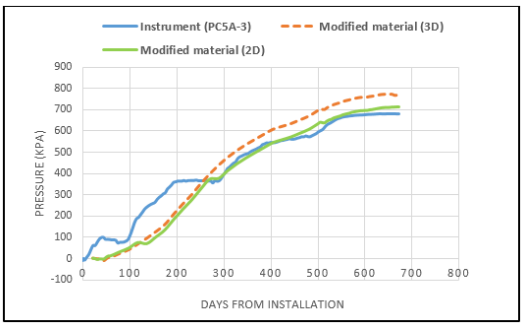
شکل (۱۵): مقایسه تنش‌های قائم مرکز هسته با تحلیل برگشتی- مدل سه‌بعدی- تراز ۱۵۳۲- مقطع ۵



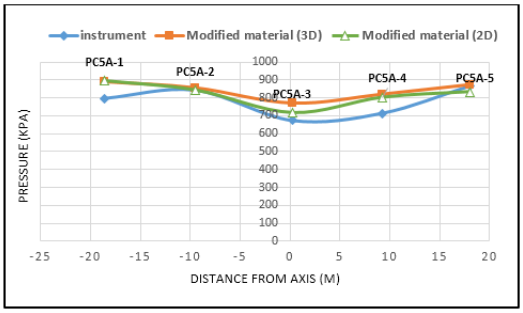
شکل (۱۶): مقایسه تنش‌های قائم هسته در ۷ متر بالادست محور سد با تحلیل برگشتی- مدل سه‌بعدی- تراز ۱۵۵۲- مقطع ۵

هرچند که توزیع واقعی تنش در خاک‌ها پیچیده و به علت عامل قوس زدگی در سدهای خاکی نیازمند یک مدل سه‌بعدی می‌باشد و نمی‌توان به مدل دوبعدی اطمینان کرد اما در این بخش مقایسه‌ای مختصر میان تنش‌های اندازه‌گیری شده و تنش‌های کالیبره شده در مدل دوبعدی انجام‌گرفته شده است.

تنش‌های محاسبه‌شده بر اساس ضخامت لایه‌ها و وزن مخصوص آن‌ها به ازای حدود ۱۰ متر خاکریز منطبق بر تنش اندازه‌گیری شده توسط سلول PC5A-3 که تنش در راستای قائم را اندازه می‌گیرد؛ می‌باشد. این امر نشان‌دهنده شرایط خوب نصب و ناچیز بودن قوس زدگی موضعی است.



شکل (۱۷): مقایسه تغییرات تنش قائم مرکز هسته در مدل دوبعدی و سه‌بعدی با تحلیل برگشتی- تراز ۱۵۳۲ متر- مقطع ۵



شکل (۱۸): مقایسه تغییرات تنش قائم در عرض هسته در مدل دوبعدی و سه‌بعدی - تراز ۱۵۳۲ متر- مقطع ۵

پیش‌بینی رفتار سد در دوران آبگیری در مدل سه‌بعدی

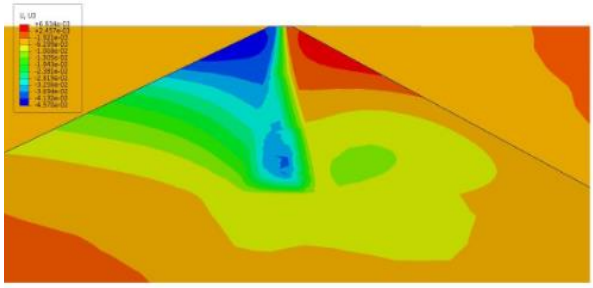
طبق گزارش مدیریت منابع آب استان کردستان و با توجه به میزان آورد رودخانه در فصول مختلف، نرخ آبگیری m/day ۰/۳ است یعنی مدت‌زمان در نظر گرفته‌شده برای رسیدن آب به تراز نرمال بهره‌برداری (حدود ۶۰ متر) برابر ۲۰۰ روز می‌باشد.

برای بررسی نحوه تغییر شکل بدنه سد، مدل جدیدی ساخته شد که در آن تغییر شکل بدنه پس از انتهای دوران ساخت صفر گردید و درنتیجه نرم‌افزار در مرحله آبگیری تنها نشست

۱. Archin

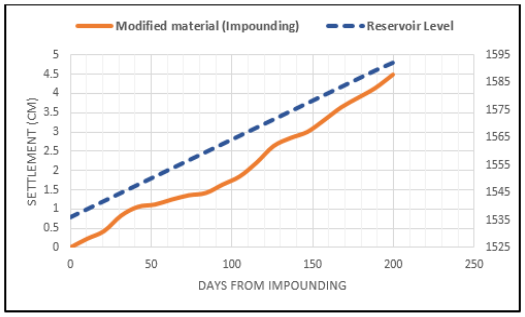
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.25.4.4]

ناشی از بار هیدرواستاتیکی وارده از سمت مخزن بر بدنه سد را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۱۹) نشان داده می‌شود برخلاف نشست در انتهای دوران ساخت، حداکثر نشست در انتهای دوران آبگیری در تراز تاج سد رخداده است که این مسئله با رفتارهای مشاهده‌شده در سدهای خاکی مطابقت دارد.



شکل (۱۹): شمارگر تغییر شکل بدنه سد در دوران آبگیری- مدل سه‌بعدی-مقطع ۵

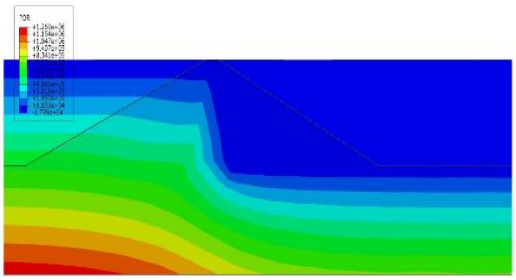
شکل (۲۰) نحوه تغییر شکل نقطه‌ای روی شیروانی پایین‌دست بدنه سد را نشان می‌دهد. در این نقطه مشاهده می‌گردد با افزایش تراز، میزان تغییر شکل پوسته پایین‌دست افزایش می‌یابد.



شکل (۲۰): نحوه تغییرات نشست حداکثر در تراز تاج سد در دوران آبگیری – مدل سه‌بعدی- مقطع ۵

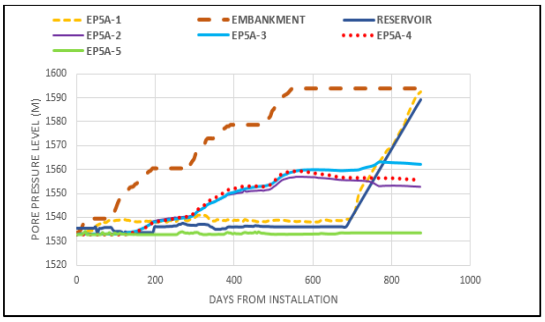
بررسی اثرات آبگیری بر فشار آب حفره‌ای

در شکل (۲۱) شمارگرهای فشار آب حفره‌ای پس از اولین آبگیری تا تراز حدود ۶۰ متر نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است باگذشت زمان و افزایش تراز مخزن فشارهای آب حفره‌ای متأثر از فشارهای هیدرواستاتیک مخزن گردیده و مقادیر فشار آب حفره‌ای نواحی بالادست محور هسته به‌مراتب بیشتر از نواحی پایین‌دست می‌باشد.



شکل (۲۱): شمارگر فشار آب حفره‌ای در انتهای اولین آبگیری

شکل (۲۲) نحوه تغییرات فشار آب حفره‌ای را در پیزومترهای کف هسته با توجه به مدل سه‌بعدی نشان می‌دهد. پیزومتر EP5A-1 واقع در فیلتر بالادست از تراز مخزن تأثیر پذیرفته و منطبق بر تراز آب مخزن است. همچنین پیزومترهای EP5A-2 و EP5A-3 روند افزایشی را با شیب ملایم نشان می‌دهند. بدین ترتیب نرخ آبگیری پیش‌بینی شده تغییرات چشمگیری را در فشار آب حفره‌ای این پیزومترها نشان نداد. پیزومترEP5A-5 به دلیل قرارگیری در فیلتر پایین‌دست از تراز آب مخزن تأثیری نپذیرفته است.



شکل (۲۲): نحوه تغییرات تراز آب حفره‌ای در محل پیزومترهای کف هسته- مدل سه‌بعدی- مقطع ۵

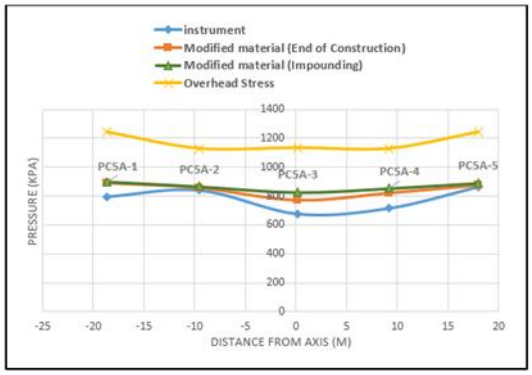
بررسی اثرات آبگیری بر تنش قائم

با توجه به شکل (۲۳)، ضریب قوس‌زدگی در کف هسته پس از دوران آبگیری و در انتهای دوران ساخت قابل‌محاسبه می‌باشد که همان‌طور که ملاحظه می‌گردد بیشترین ضریب قوس‌زدگی در سلول PC5A-3 ایجاد می‌شود که پس از بررسی‌های لازم این ضریب برابر ۰/۲۷ به دست آمد. این

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

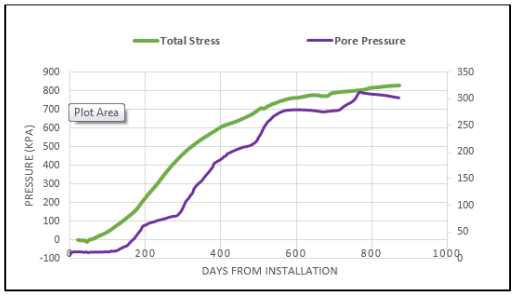
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.25.4.4]

ضریب برای سلول متناظر در زمان پایان ساخت مقدار ۰/۳۲ به دست می‌آید. ازاین‌رو نتیجه می‌گیریم که اولین آبگیری تأثیر چندانی بر میزان ضریب قوس‌زدگی در هسته ندارد.



شکل(۲۳): نحوه تغییرات تنش قائم در عرض هسته بعد از آبگیری- تراز ۱۵۳۲ متر- مقطع ۵

پارامتر دیگری که در دوران آبگیری اهمیت بسزایی دارد امکان ایجاد ترک هیدرولیکی است. برای کنترل این پارامتر مقایسه‌ای بین فشار آب حفره‌ای ایجادشده و تنش کل صورت می‌گیرد. با توجه به شکل (۲۴) نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که در پیزومتر PC5A-3 که بیشترین میزان قوس‌زدگی را در مقطع ۵ دارد، همواره فشار آب حفره‌ای به‌مراتب کمتر از تنش کل می‌باشد یعنی امکان تشکیل ترک هیدرولیکی در هسته سد وجود ندارد.



شکل (۲۴): مقایسه فشار آب حفره‌ای و تنش کل در سلول PC5A-3 به‌منظور کنترل ترک هیدرولیکی

نتیجه‌گیری

خلاصه‌ای از روند تحقیق و نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار آباکوس به شرح زیر است:

۱- در این تحقیق با مدلسازی سد به‌صورت دوبعدی و سه‌بعدی توسط مدل المان محدود اطلاعات مفیدی در مورد رفتار سد چراغ ویس در حین ساخت و اولین آبگیری به‌دست‌آمده است و مشخصات مصالح کالیبره شده در هر دو مدل جهت مقایسه ارائه شدند.

۲- بررسی نتایج پیزومترها و نشست سنج‌های منصوب در بدنه سد و رسم منحنی‌های مربوطه به‌منظور درک بهتر الگوی سد در دوران ساخت و آبگیری.

۳- مدلسازی مقطع بحرانی سد توسط نرم‌افزار المان محدود آباکوس در حالت دوبعدی و ساخت مدل سه‌بعدی به‌منظور مقایسه نتایج تحلیل عددی بر پایه پارامترهای اولیه ساخت با نتایج حاصله از ابزار دقیق و تفاوت مشخصات کالیبره شده در مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی.

۴- به‌منظور دستیابی به تطابق میان ابزار دقیق و مدل بر پایه پارامترهای اولیه، با تغییر خصوصیات مصالح، مدل‌های عددی دوبعدی و سه‌بعدی کالیبره گشت و پارامترهای دقیق مصالح به دست آمد.

۵- مقایسه نتایج حاصله از دو مدل کالیبره شده با نتایج ابزار دقیق.

۶- مدلسازی دوران اولین آبگیری در مدل سه‌بعدی.

۷- با بررسی مقدار ماکزیمم ضریب فشار آب حفره‌ای در نقاط مختلف هسته این نتیجه حاصل شد که نرخ مناسب آبگیری باعث افزایش این ضریب نگشته و در طول آبگیری فشارهای آب حفره‌ای که بیشترین مقدار آن در کف هسته تشکیل‌شده است به‌طور عمده در حال کاهش و محو شدن می‌باشد و خطری از این بابت سد را تهدید نمی‌کند.

۸- با بررسی نشست‌ها در پایان دوران ساخت تا تراز ۶۲ متر یعنی ابتدای آذر سال ۱۳۹۳ ملاحظه گشت نشست‌ها در محدوده مجاز قرار دارند. نشست هسته برابر ۶۹ سانتیمتر و نشست پوسته پایین‌دست به ۳۲ سانتیمتر می‌رسد. ماکزیمم نشست برای هسته در تراز حدود ۲۵ متر و برای پوسته بالادست تقریباً در تراز ۱۶ متر از کف بدنه سد اتفاق می‌افتد.

۹- ماکزیمم فشار آب حفره‌ای در هسته در پایان ساخت ۲۸۰ کیلوپاسکال می‌باشد. این مقدار در هنگام آبگیری تا تراز ۶۰ متر به ۳۰۰ کیلوپاسکال می‌رسد. لذا افزایش فشار آب حفره در اثر آبگیری بسیار ناچیز می‌باشد و نرخ آبگیری

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.25.4.4]

و سرعت محو شدن فشارهای منفذی ساخت همدیگر را متعادل نموده‌اند.

۱۰- همان‌طور که ملاحظه گشت، پیزومترهای بالادست هسته در حین آبگیری تأثیر بیشتری از افزایش فشار حفره‌ای نسبت به پیزومتر پایین‌دست پذیرفته‌اند.

۱۱- به دلیل استفاده از هسته مخلوط، نفوذپذیری هسته به‌گونه‌ای می‌باشد که اکثر فشارهای آب حفره‌ای در حین ساخت زایل می‌شوند و نشست سد پس از دوران ساخت بسیار کم می‌باشد و بیش از ۹۰٪ نشست هسته در دوران ساخت رخ می‌دهد.

۱۲- با بررسی سلول‌های تنش سنج افقی و ارزیابی صحت نتایج آن مشاهده گشت که ماکزیمم خطای به‌دست‌آمده بین نتایج ابزار و نتایج تحلیل عددی ۱۵ درصد می‌باشد.

مراجع

۱- ابوالفضل حجت انصاری ، رفتارنگاری سد گتوند در دوران آبگیری توسط نتایج ابزار دقیق، پایان‌نامه کارشناسی ارشد گرایش آب و سازه‌های هیدرولیکی دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۹۳

۲- رضا شهبازی ، مقایسه نتایج آنالیز دینامیکی دوبعدی و سه‌بعدی سدهای خاکی با هسته رسی در دره تنگ ، پایان‌نامه کارشناسی ارشد گرایش مهندسی خاک و پی دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۹۱

۳- فرزین کریمی، عباس سروش، تحلیل عددی رفتار استاتیکی سد خاکی تهم

۴- کیوان کولانی مطلق، بررسی رفتاری سدهای خاکی با استفاده از نتایج ابزاردقیق سد و تحلیل برگشتی (مطالعه موردی : سد خاکی شهر چای)، به راهنمایی دکتر محمد مناف پور، پایان‌نامه کارشناسی ارشد گرایش آب و سازه‌های هیدرولیکی دانشکده فنی دانشگاه ارومیه

۵- گزارش برنامه‌ریزی منابع آب سد مخزنی چراغ‌ویس، شرکت مشاوره دزآب،۱۳۹۱

6- Janasan. I. E. (1990), "Advanced Dam Engineering for Design, Construction and Rehabilitation"

7- Mirali Mohammadi, Mohammad Nabati, and Mojtaba Noury, "Maku dam monitoring by comparison of results of instrumentation and computer software, Journal JFAE, 2010, Vol. 8, Issue 3&4, pages 1010-1015.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.25.4.4]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.25.4.4]
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant
5th Year / No. ۱۷ / November 2018

نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق آبی
سال پنجم/ شماره هفدهم/ پاییز ۱۳۹۷

Monitoring of Cheragh-veis Dam during Impoundig Using Instrumantation Data

Ali Asghar Mirghasemi [*]
Ehsan Shahiri Tabarestani [2]
Alireza Majidi [3]

Abstract

In order to control the safety and stability of various components of large dams during construction, by installing necessary tools for pore volumes pressure, soil mass pressures and deformations during the three construction periods, the first dewatering and the time of exploitation were measured and the performance of the dam Evaluation and analysis. In this research, we tried to analyze the results of the instrument appointed at the Cheragh veis dam. Also, the analysis of the two and three dimensional model of the dam according to the time curve was constructed by the Abaqus in a layered layout, and the calibrated characteristics of the materials were presented separately for both models, and then the stage dewatering The stage was considered in a three-dimensional model. In order to achieve a match between the instrumentation and the model based on the initial parameters, by changing the properties of the materials, two-dimensional and three-dimensional numerical models were calibrated and the calculated parameters of the materials were obtained. By investigating the maximum value of the water pressure coefficient in different points of the nucleus, it was concluded that the proper dewatering rate did not increase this coefficient and during the dewatering of the water pressure of the hole, the largest amount of which was formed in the core floor, is mainly decreasing and fading. It does not threaten the dam.

Keywords
Monitoring, Instrumentation, Rockfill Dam, Finite Element Model, Back Analys

1* Professor .Aghasemi@ut.ac.ir
2 M.Sc. ehsan_shahiri@yahoo.com
3. PHD . majidi@mahabghodss.com

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.25.4.4]