

ارزیابی تأثیر اثر هندسه زهکش بر رفتار سدهای خاکی همگن (مطالعه موردی: سد کلان ملایر)

محمد امیری^{۱*}، یوسف ریسی ماکیان^۲، رعنا صالحیان^۳

^۱ استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد عمران گرایش سازه هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بندرعباس

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

(دریافت: ۹۸/۸/۳، پذیرش: ۹۹/۷/۷، نشر آنلاین: ۹۹/۷/۷)

چکیده

سدهای خاکی از مهم‌ترین سازه‌ها در مهندسی عمران است و بررسی ابعاد مختلف آن از اهمیت زیادی برخوردار است. هندسه زهکش‌ها علاوه بر عملکرد در فرایند تخلیه آب، بر رفتار سدهای خاکی پس از آگیری از اهمیت بسزایی برخوردار است. بر این اساس در این پژوهش به بررسی تأثیر اثر هندسه زهکش بر رفتار سدهای خاکی پس از آگیری پرداخته شده است. به علت قابلیت بالای کد FLAC2D در مدل کردن هندسه و شرایط مرزی پیچیده، امکان ساخت لایه لایه و تحکیم، اعمال بارگذاری‌های مختلف و همچنین امکان تعریف نقاط مشخصی از شبکه که بتوان رفتار آن را حین تحلیل بررسی کرد، از این نرم‌افزار جهت مدل‌سازی استفاده شده است. در این پژوهش به بررسی اثر هندسه زهکش بر رفتار سدهای خاکی پس از آگیری پرداخته شده است، به این منظور سد کلان ملایر به صورت موردی در نظر گرفته شده است. سد کلان، سد خاکی همگن با زهکش دودکشی با زاویه ۹۰ درجه است. جهت بررسی اثر هندسه زهکش، سه زاویه مختلف ۹۰ درجه، ۱۰۰ درجه و ۱۱۰ برای زهکش دودکشی در نظر گرفته شده است. با ثابت نگه‌داشتن، سایر ویژگی‌های سد، زاویه زهکش تغییر داده می‌شود و اثر زاویه زهکش بر نشست، فشار آب حفره‌ای و رفتار تنش- کرنش سد مورد بررسی قرار گرفته است. با انجام تحلیل‌های مختلف، نتایج نشان داد، با افزایش زاویه زهکش حداکثر میزان فشار آب حفره‌ای و همچنین نشست افزایش پیدا می‌کند. ضریب اطمینان پایداری در حالت زهکش با زاویه ۱۰۰ درجه حداکثر مقدار را نسبت به دو حالت دیگر زاویه زهکش دارد و اندازه آن برابر ۱/۶۲ است.

کلیدواژه‌ها: هندسه زهکش، سدهای خاکی همگن، فشار آب حفره‌ای، سد کلان ملایر.

۱- مقدمه

استفاده از وزن است، بنابراین سد خاکی به‌ناچار به صورت درونی و با مقطع دوزنقه‌ای شکل ساخته شود. اما از نظر نفوذ آب، چون بدنه سد از مصالح خاکی یعنی ذرات جدا از هم و بدون ملات ساخته می‌شود از این رو در مقابل آب نفوذپذیر خواهد بود و باید برای جلوگیری از نشست و تلفات آب تدابیر لازم اتخاذ گردد (Soltani, ۲۰۰۶).

شناخت کامل ویژگی‌های زمین‌شناسی ساختگاه سد به منظور اجرای دقیق عملیات آب‌بندی محل سد و مخزن آن از مهم‌ترین مسائل در فرآیند سدسازی به‌شمار می‌رود (Soltani و Soroush, ۲۰۰۷). معمولاً نفوذپذیری پی مخزن آب و نشست آن از پی سد و یا سازه‌های وابسته به‌عنوان معضل همواره فراروی طراحان و

به‌طور کلی، ایمنی سد تنها به طراحی و ساخت آن مربوط نمی‌شود، بلکه به رفتار نگاری کاملی از عملکرد آن در اولین دوره آگیری و بهره‌برداری و همچنین سرویس‌دهی منظم در طول عمر سد وابسته است (Beiranvand و Komasi, ۲۰۲۰). یکی از مهم‌ترین مراحل بعد از مطالعات ژئوتکنیک، طراحی و احداث سد، بررسی رفتار سد در دوران بهره‌برداری می‌باشد که در این راستا رفتار سد در مراحل مختلف ساخت، آگیری و دوران بهره‌برداری توسط ابزارهای دقیق نصب‌شده، قابل ارزیابی می‌باشد (Ghareh و Nowroozade, ۲۰۱۹). در سدهای خاکی به دلیل پیوسته نبودن مصالح معمولاً تنها راه مقابله با نیروهای وارد بر بدنه سد

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۷۷۲۹۲۸۹۶

در صورتی که از زهکش‌های با طول متوسط استفاده شود، هیچ‌کدام از خطوط نشت، پوسته پایین‌دست را قطع نمی‌کنند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که طول زهکش نسبت به ضخامت زهکش تأثیر به‌سزاتری خواهد داشت.

Zomorodian و همکاران (۲۰۱۲) تأثیر زهکش‌های افقی بر پایداری شیروانی بالادست سدهای خاکی در حین تخلیه سریع مخزن را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که در اکثر مواقع قرارگیری زهکش‌ها در شیروانی بالادست باعث استهلاک فشار آب حفره‌ای اضافی ناشی از تخلیه مخزن و بهبود پایداری می‌گردد و نامطلوب‌ترین اثر زهکش‌ها افزایش دبی نشت پایدار است که بایستی در تحلیل و طراحی سدها مورد توجه قرار گیرد.

Mansuri و Salmasi (۲۰۱۳) نیز به بررسی اثر مشخصات زهکش افقی بر رفتار سدهای خاکی پرداختند. آن‌ها نیز مشاهده نمودند که با افزایش طول زهکش افقی، کم‌کم میزان نشت عبوری افزایش یافته و گرادیان هیدرولیکی نیز افزایش پیدا می‌کند.

Abdelkader و همکاران (۲۰۱۴) از یک مدل سد خاکی همگن در آزمایشگاه جهت تعیین مکان زهکش دودکشی استفاده کردند و با توجه به نتایج به‌دست‌آمده موقعیت مناسب برای زهکش را به‌دست آوردند.

Çalamak و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی اثر مشخصات زهکش افقی بر رفتار سدهای خاکی پرداختند. به این منظور سد خاکی همگن با زهکش افقی در نظر گرفتند. با دقت در نتایج به‌دست‌آمده مشاهده شد، با تغییرات ضخامت زهکش تغییر چندانی در خط نشت به‌وجود نیامده است، تنها وقتی که ضخامت زهکش دو برابر شده است، مقدار اندکی فشار آب حفره‌ای تغییر کرده است. از طرف دیگر با افزایش ضخامت زهکش، مقدار دبی عبوری از محور مرکزی سد تغییر چندانی نداشته است و بیش‌ترین افزایش در دبی هنگامی بوده است که ضخامت زهکش دو برابر شده و دبی به‌اندازه ۵٪ افزایش پیدا کرده است.

Boushehrian و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی اثر زهکش بر رفتار سدهای خاکی ناهمگن پرداختند. هدف اصلی آن‌ها بررسی تغییرات فشار آب حفره‌ای و افزایش ضریب اطمینان پایداری سد بود. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده دریافتند که افزایش طول زهکش باعث می‌شود اضافه فشار آب حفره‌ای بیشتر تلف شود و از طرفی باعث افزایش رفتن ضریب اطمینان پایداری سد نیز شود.

Shayannejad و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی ارتفاع زهکش قائم در سدهای خاکی ناهمگن با هسته قائم پرداختند و با مدل-سازی سه سد در آزمایشگاه و همچنین در نرم‌افزار PLAXIS V 8.5

سازندگان سدها است که حتی می‌تواند تمام مراحل کار مطالعات و ساخت سد را تحت‌الشعاع قرار دهد. مطالعه محدوده زمین-شناسی ساختگاه سدها، به‌ویژه مسائل مرتبط با ژئوتکنیک، سبب می‌شود، طرحی ارائه شود که محافظه‌کارانه بوده و دارای ضریب اطمینان زیادی باشد و در مرحله اجرا دقیق و بهینه شود (Balmforth و همکاران، ۲۰۰۸).

بررسی کامل پایداری شیب دیواره‌های سد خاکی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است زیرا که ناپایداری و آسیب شیب‌ها باعث خرابی کل سازه خواهد شد. پژوهشگران زیادی بر روی پایداری شیب‌ها کار کرده‌اند (Matsui، ۱۹۸۸؛ Giam و Donald، ۱۹۸۸؛ San و Ugai، ۱۹۹۲؛ Leshchinsky، ۱۹۹۵). پس از تحقیقات پر دامنه در مورد لغزش شیب‌ها، یک گروه ژئوتکنیک سوئدی و در رأس آن‌ها Fellenius (۱۹۲۷)، از روش باریکه‌های قائم در بررسی شیب‌های خاکی استفاده کردند. در روش باریکه‌های قائم، بخش لغزنده را به باریکه‌هایی با فصل مشترک قائم تقسیم نموده و شرایط تعادل نیروها و گشتاورها را برای واحد طول هر باریکه (عمود بر صفحه) در نظر می‌گیرند (Zettler و همکاران، ۱۹۹۹). Sucolofsci (۱۹۶۰) با استفاده از تعادل استاتیکی محیط خاک و معیار گسیختگی موهر-کولمب و بر اساس راه‌حل عمومی پراندل^۱، روشی ارائه داد که به روش خطوط مشخصه معروف شد. این روش مبتنی بر فرض مختصات بدون بعد، است (Coulthard و Little، ۱۹۹۹).

Chahar (۲۰۰۶) برای تعیین حداکثر و حداقل طول زهکش افقی در سد، با فرض بر این‌که شیب پوسته بالادست ۱ به m و شیب پوسته پایین‌دست ۱ به n، عرض تاج، h ارتفاع آگیری و F_B ارتفاع آزاد سد باشد، روابطی را ارائه داد و نشان داد که طول زهکش افقی باید بین دو مقدار بیان‌شده در روابط (۱) و (۲) قرار گیرد.

$$l_{\min*} = \frac{1+n^2}{2n^2} \{0/3mh + n + F_{B*}(m+n) + T_* - \sqrt{0/3mh + n + F_{B*}(m+n) + T_*^2 - n^2}\} \quad (1)$$

که در آن:

$$F_{B*} = \frac{F_B}{h}$$

$$T_{B*} = \frac{T_B}{h}$$

$$l_{\max*} = F_{B*}(m+n) + T_* + \frac{1+n^2}{2n^2} [0/3mh + n - \sqrt{(0/3mh + n)^2 - n^2}] \quad (2)$$

Malekpour و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی اثر هندسه زهکش بر رفتار سدهای خاکی پرداختند و دریافتند که در حالت استفاده از کم‌ترین ضخامت، خط نشت شیب پایین‌دست را قطع می‌کند و

۲-۲- مدل سازی هندسی و مقایسه نتایج با مقادیر اندازه-گیری شده

در اولین مرحله از مدل سازی، باید شبکه‌ای مناسب برای مسئله تعریف شود و بدین ترتیب تعداد المان‌ها در مدل مشخص می‌شود. در نرم افزار FLAC^۲ مدل مش بندی مورد نظر با توجه به اولویت‌های مدنظر (تنش‌ها و جابه‌جایی‌ها) مشخص می‌شود و المان‌ها با ابعاد مناسب تعیین شده است (Itasca, ۲۰۰۰).

جهت مدل سازی هندسی از مدل مش بندی شده نشان داده شده در شکل (۳) استفاده شده است. شکل (۳) مربوط به مقطع عرضی سد است. جهت مدل سازی رفتاری مصالح بدنه و پی سد کلان ملایر در مرحله ساخت از مدل‌های رفتاری مور-کولمب^۳ و کم-کلی^۴ اصلاح شده، استفاده شده است. پارامترهای در نظر گرفته شده برای مصالح مختلف بدنه سد، بر اساس فرضیه‌های طراحی و آزمایش‌های صورت گرفته موجود در گزارش‌های طرح در جدول (۱) ارائه شده است (گزارش فنی ساخت سد کلان ملایر، ۲۰۱۱). در جدول (۱) پارامترهای مدل رفتاری مور-کولمب، برای مصالح بدنه و پی سد، که از نتایج آزمایشگاهی به دست آمده برای قسمت‌های مختلف سد ارائه شده است. پارامترهای ρ ، C و ϕ از این جدول و پارامترهای K و G به کمک پارامترهای E و ν و با استفاده از روابط (۳) و (۴) به دست می‌آیند (DeWolf و همکاران، ۲۰۱۱). با توجه به نبود مقادیر مربوط به پارامتر Ψ ، این مقادیر به صورت تقریبی و بر اساس مراجع معتبر در تحلیل در نظر گرفته می‌شود (Gomes و Palmeira, ۱۹۹۶).

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (۳)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (۴)$$

برخی از پارامترهای مدل رفتاری کم-کلی اصلاح شده از جدول (۱) و دیگر پارامترها از نتایج آزمایش‌ها و معادلات به دست آمده و مقدار پارامترها در جدول (۲) ارائه شده است. در بررسی شرایط مرزی سد، کف پی در دو جهت افقی و قائم و دیواره‌های دو طرف پی، در جهت افقی ثابت شده است. یکی از مراحل اعمال بارگذاری اولیه بر سد، اعمال بار ناشی از مرحله آبیگری سد در قسمت بالادست سد است. بعد از شبیه سازی مراحل ساخت بدنه سد کلان ملایر، نوبت به شبیه سازی مراحل آبیگری سد می‌رسد، برای مدل سازی شرایط آبیگری، با روشن بودن آنالیز جریان و خاموش بودن آنالیز مکانیکی، در هر مرحله از بالا آمدن تراز آب در مخزن، نیروهای وارده، شامل فشار هیدرواستاتیکی مثلثی ناشی از بالا آمدن تراز آب، بر شیب بالادست اعمال می‌شود.

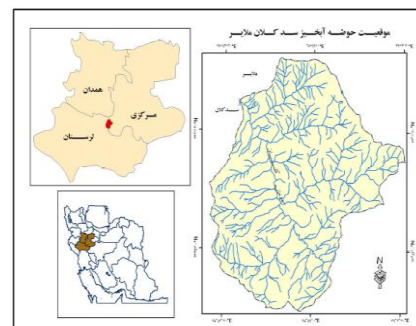
و مقایسه نتایج آن‌ها مشاهده کردند که نتایج به دست آمده از نرم-افزار در تطابق خوبی با نتایج مدل فیزیکی است.

Darabi و Maleki (۲۰۱۸) به بررسی تأثیر هندسه زهکش بر پاسخ دینامیکی سدهای خاکی همگن ملایر پرداختند و در نهایت نتایج حاکی از آن بود که در مرحله لرزه‌ای، زهکش دودکشی قائم طی زلزله اضافه فشار آب حفره‌ای کم‌تری نسبت به زهکش مایل ایجاد می‌کند. همچنین در مرحله پس‌لرزه‌ای مقادیر نشست ناشی از تحکیم، با افزایش زاویه زهکش افزایش پیدا می‌کند. در سال‌های اخیر مدل سازی‌های بسیاری بر اساس روش‌های تعادل حدی با استفاده از نرم افزارهای مختلف صورت گرفته است، اما نگرش گسترده‌ای به موضوع اثر هندسه زهکش بر رفتار سدهای خاکی همگن نشده است. بر این اساس در این پژوهش به بررسی پایداری سدهای خاکی با نگرش ویژه بر هندسه زهکش پرداخته شده است. برای ارزیابی دقیق در این پژوهش سد کلان ملایر مورد مطالعه قرار گرفته است.

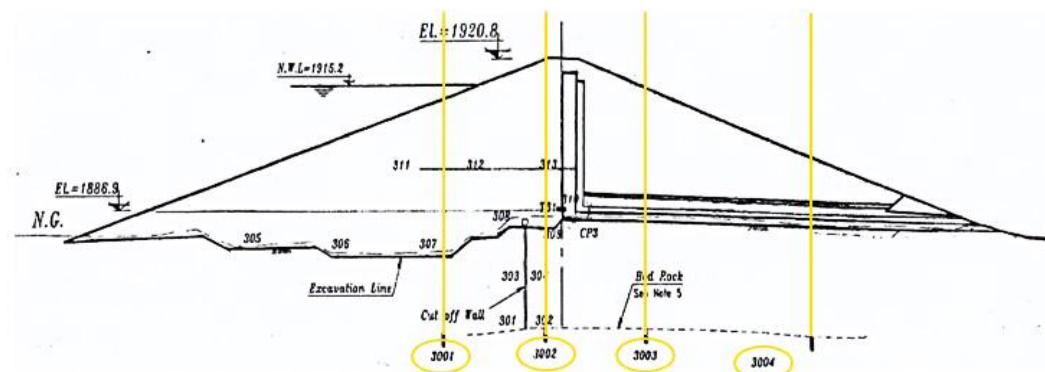
۲- روش تحقیق و مدل سازی

۲-۱- معرفی سد کلان ملایر

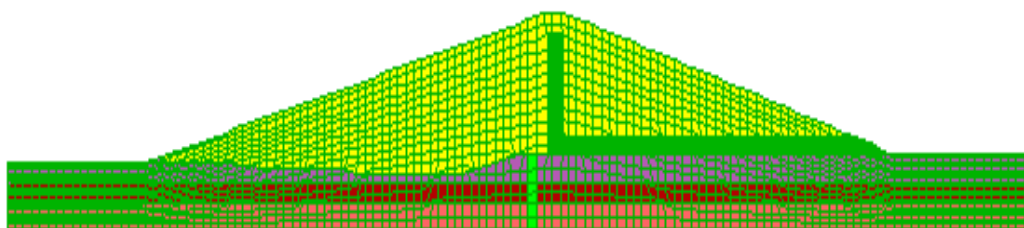
سد کلان ملایر در ۳۰ کیلومتری جنوب شهرستان ملایر در استان همدان و ۱۱۰۰ متری پایین دست و شمال روستای پاتیه قرار دارد. سد کلان به منظور تأمین آب شرب شهر ملایر (به میزان ۱۸ میلیون مترمکعب در سال) و بهبود و توسعه آبیاری در اراضی جنوب شهر ملایر ساخته شده است (گزارش فنی ساخت سد کلان ملایر، ۲۰۱۱). سد کلان ملایر از نوع خاکی همگن با زهکش دودکشی میانی و به ارتفاع ۴۷ متر از بستر طبیعی رودخانه است. حداکثر تراز نهایی تاج ۱۹۲۰ متر است. موقعیت حوضه سد در شکل (۱) و مقطع عرضی و سایر مشخصات سد کلان در شکل (۲) نشان داده شده است (گزارش فنی ساخت سد کلان ملایر، ۲۰۱۱).



شکل ۱- موقعیت حوضه سد کلان ملایر (نقشه زمین شناسی ملایر، ۲۰۰۰)



شکل ۲- برش عرضی سد کلان ملایر (گزارش فنی ساخت سد کلان ملایر، ۲۰۱۱)



شکل ۳- مدل مش بندی سد کلان ملایر با استفاده از توابع FISH

جدول ۱- پارامترهای مدل رفتاری مور- کولمب برای مصالح بدنه و پی سد (گزارش فنی ساخت سد کلان ملایر، ۲۰۱۱)

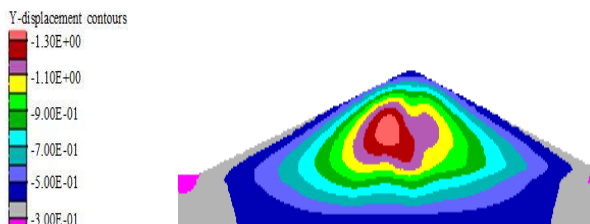
مصلح	وزن مخصوص (kN/m ³)	ضریب پوواسون	ضریب الاستیسیته (kN/m ²)	چسبندگی خاک (kN/m ²)	زاویه اصطکاک (deg)
سد همگن	۲۱/۲	۰/۳۵	۲×۱۰ ^۴	۷۰	۹
فیلتر و زهکش	۲۱/۵	۰/۳	۴×۱۰ ^۴	۰	۳۸
لایه ریزدانه اول (۰ تا ۱۰ متر)	۲۰	۰/۴	۱/۵×۱۰ ^۴	۲۰	۲۹
میان لایه درشت دانه (۱۰ تا ۱۵ متر)	۲۰/۵	۰/۳	۲/۵×۱۰ ^۴	۱۰	۳۰
میان لایه درشت دانه (۱۵ تا ۲۵ متر)	۲۰	۰/۳	۱/۷۵×۱۰ ^۴	۲۰	۲۰

جدول ۲- پارامترهای مدل کم- کلی اصلاح شده (گزارش فنی سد کلان ملایر، ۲۰۱۱)

شیب خط حالت بحرانی = ۱/۲	چگالی خاک = ۲۱/۲۰ kN/m ³	شیب تورم = ۰/۰۰۳۹	مدول برشی = ۷/۴ MPa	مدول حجمی = ۲۲ MPa
نسبت تخلخل اولیه = ۱/۹۴	فشار پیش تحکیمی = ۴۴۳ kPa	شیب خط تحکیم عادی = ۰/۱۵۶	ضریب پوواسون = ۰/۳۵	نسبت تخلخل مرجع = ۲/۲۶

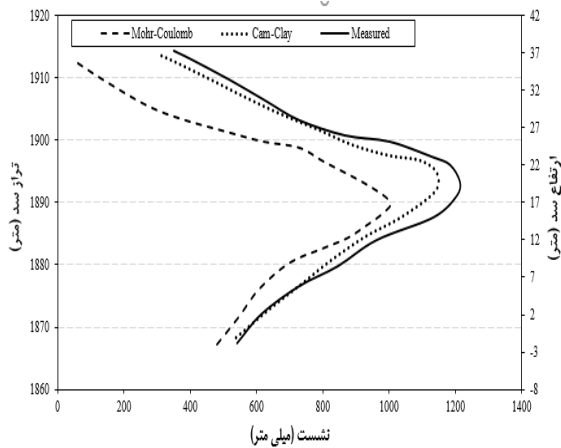


شکل ۴- نیروی ناشی از وزن آب



شکل ۵- کانتورهای نشست قائم سد کلان در انتهای ساخت

اطمینان قابل قبول در تحلیل پایداری سد را ۱/۲۵ پیشنهاد می-دهد (سازمان مهندسی ارتش آمریکا). با انجام تحلیل پایداری در انتهای ساخت سد، مشاهده شد که مقدار ضریب اطمینان پایداری سد برابر ۱/۵۸ است و مقداری بیشتر از ۱/۲۵ است.



شکل ۷- نشست در ارتفاع سد در بالادست (محور I3002)

جدول ۳- درصد خطا در حالت استفاده از مدل مور- کولمب و کم- کلی در انتهای ساخت

محور	مور- کولمب	کم- کلی
۱۳۰۰۱	$\frac{1015-850}{1015} = 16\%$	$\frac{1015-1005}{1015} = 1\%$
۱۳۰۰۲	$\frac{1205-1000}{1205} = 17\%$	$\frac{1205-1150}{1205} = 4.5\%$
۱۳۰۰۳	$\frac{1000-810}{1000} = 19\%$	$\frac{1000-960}{1000} = 4\%$
۱۳۰۰۴	$\frac{620-550}{620} = 11\%$	$\frac{620-605}{620} = 2.4\%$

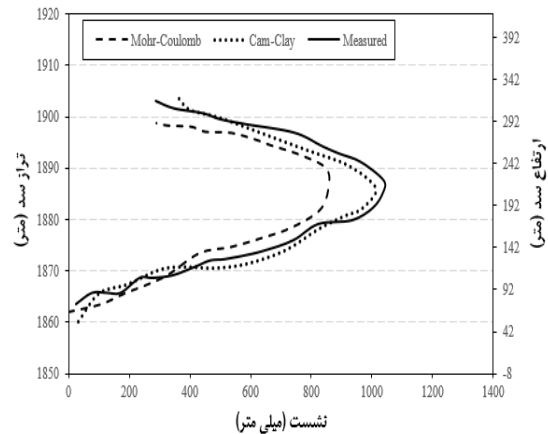
۲-۳- مدل سازی مرحله آبیگری و مقایسه با نتایج ابزار دقیق

یکی از اصلی ترین پارامترها جهت مدل سازی، فشار آب حفره-ای است. بنابراین با انجام تحلیل های مختلف سعی شده است، مقدار فشار آب حفره ای محاسباتی با فشار آب حفره ای اندازه گیری شده، تطابق خوبی داشته باشد. مدول بالک آب تأثیر به سزایی در مقدار فشار آب حفره ای ایجاد شده در سد دارد. از طرفی دیگر نفوذپذیری خاک نیز تأثیر زیادی در مقدار فشار آب حفره ای دارد. بنابراین با انجام چندین تحلیل و مقایسه نتایج با نتایج پیرومترها، مقدار نفوذپذیری قسمت های مختلف بدنه و مدول بالک آب تعیین شد. در سد کلان درجه اشباع محیط یک در نظر گرفته شده است، با توجه به گزارش های سد کلان، نفوذپذیری بدنه سد 10^{-10} cm/s ، قسمت آبرفتی پی 10^{-10} cm/s و برای ناحیه فیلتر و زهکش

همچنین نیروی ناشی از وزن آب بر روی پی بالادست به صورت یک بار یکنواخت اعمال می شود، شکل (۴) نحوه اعمال این نیروها را نشان می دهد. در این مرحله تراوش در داخل بدنه سد انجام می گیرد. در شکل (۵) کانتورهای نشست قائم در انتهای ساخت نشان داده شده است. حداکثر نشست در میانه ارتفاع سد اتفاقی افتاده است.

برای اعتبارسنجی نتایج، در سد کلان ملایر، نتایج میزان نشست اندازه گیری شده توسط ابزارهای دقیق تعبیه شده در چهار محور I3001، I3002، I3003 و I3004 (شکل (۲)) در بدنه سد با نتایج مدل سازی مقایسه شده است. در شکل های (۶) و (۷) نمودارهای نشست سد در برابر ارتفاع سد، به دست آمده از مدل های مور- کولمب و کم- کلی اصلاح شده برای محورهای I3001 و I3002 در کنار نتایج ابزار دقیق ارائه شده است.

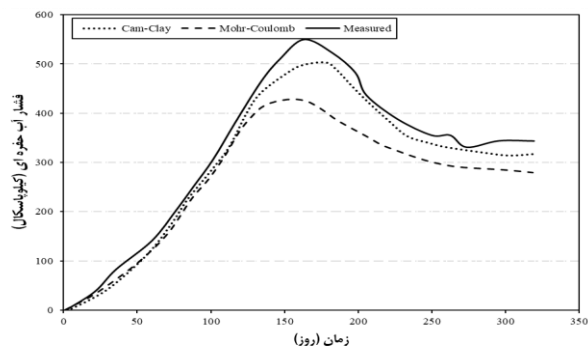
بر اساس نتایج ارائه شده مدل کم- کلی اصلاح شده، تطابق بیشتری را با نتایج ابزار دقیق نشان می دهد. حداکثر نشست در حالت استفاده از مدل کم- کلی در محور I3001 و I3002 به ترتیب برابر ۱۰۰۵ و ۱۱۵۰ میلی متر است و این مقدار در حالت استفاده از مدل مور- کولمب به ترتیب برابر با ۸۵۰ و ۱۰۰۰ میلی متر است. حداکثر نشست نشان داده شده توسط ابزار دقیق در محور I3001 و I3002 به ترتیب برابر ۱۰۱۵ و ۱۲۰۵ میلی متر است. حداکثر خطا در حالت استفاده از مدل مور- کولمب و کم- کلی در جدول (۳) برای تمام محورها ارائه شده است.



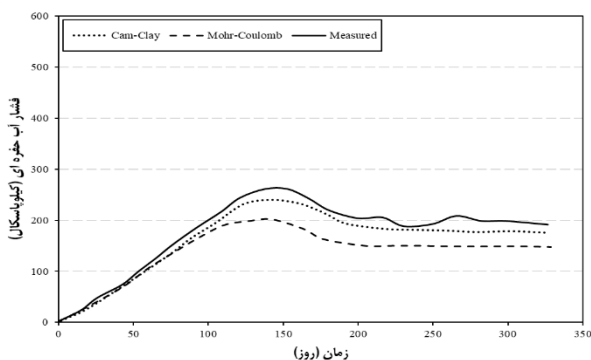
شکل ۶- نشست در ارتفاع سد در بالادست (محور I3001)

بر اساس نتایج ارائه شده، خطا در حالت استفاده از مدل کم- کلی زیر ۵٪ است و مقدار قابل قبولی است. مسئله مهمی که در انتهای ساخت سد مورد توجه است، میزان پایداری سد در انتهای ساخت آن است. سازمان مهندسی ارتش آمریکا، حداقل ضریب

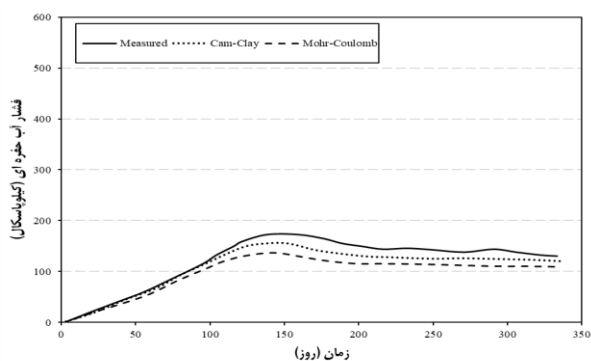
تراز سد از سطح دریا، به دست آمده از ابزار دقیق و در حالت استفاده از مدل کم-کلی و مور-کولمب در محورهای I3001، I3002 و I3003 در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

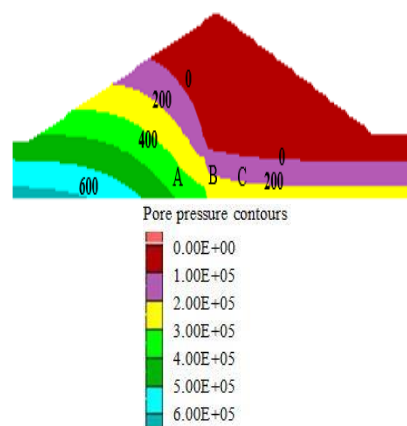


(ج)

شکل ۹- تغییرات فشار آب حفره‌ای در مدت یک سال:
الف) پیزومتر A، ب) پیزومتر B، ج) پیزومتر C

1.0 cm/s^{-1} در نظر گرفته شده است، با انجام تحلیل‌های مکرر و مقایسه نتایج با ابزار دقیق مدول حجمی مقدار $1/8$ گیگاپاسکال در نظر گرفته شده است.

شکل (۸) توزیع فشار آب حفره‌ای ایجاد ده در سد کلان را نشان می‌دهد. واحد استفاده شده در مدل‌سازی انجام شده، سیستم متریک است، بنابراین اعداد مشخص شده بر روی کانتورها، برحسب واحدهای اندازه‌گیری متریک می‌باشند. اعداد سمت راست شکل (۸) که لایه‌های مختلف کانتورها را نشان می‌دهد، برحسب پاسکال است. اعداد نشان داده شده بر روی شکل، برحسب کیلو پاسکال است. مشاهده می‌شود که فشار آب در سطح آزاد شبکه جریان صفر است. حداکثر فشار آب حفره‌ای در لایه‌های آبرفتی زیر سد برابر 600 کیلوپاسکال است. در این پژوهش نتایج سه پیزومتر جهت بررسی تغییرات فشار آب حفره‌ای در نظر گرفته شده است (یک پیزومتر در پوسته بالادست، دیگری در محور مرکزی سد و پیزومتر سوم در پوسته پایین دست سد).



شکل ۸- توزیع فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در آخرین مرحله آبیگری سد کلان

مکان این پیزومترها در شکل (۸) با نقاط A، B و C نشان داده شده است. پیزومتر A در 32 متری بالادست و پیزومتر B در محور مرکزی سد و پیزومتر C نیز در 18 متری پایین دست قرار دارد. شکل (۹) تغییرات فشار آب حفره‌ای در برابر زمان بعد از آخرین مرحله آبیگری که از پیزومترها و همچنین از مدل‌سازی با استفاده از مدل کم-کلی و مور-کولمب به دست آمده برای سه نقطه A، B و C را نشان می‌دهد.

در حین مرحله آبیگری دو نوع تغییر شکل در سدهای خاکی رخ می‌دهد، یکی تغییر شکل‌های ناشی از افزایش بار و دیگری تغییر شکل ناشی از تخریب ساختمان خاک در پوسته بالادست در اثر غرقاب شدن است. مقادیر نشست در برابر ارتفاع سد و همچنین

مدل مور- کولمب در انتهای آبیگری به ترتیب برابر با ۹۹۰، ۱۲۱۰ و ۹۰۰ است. حداکثر نشست نشان داده شده توسط ابزار دقیق در انتهای آبیگری در محورهای I3001، I3002 و I3003 به ترتیب برابر ۱۲۰۵، ۱۴۲۰ و ۱۲۷۰ میلی متر است. حداکثر خطا در حالت استفاده از مدل مور- کولمب و کم- کلی در جدول (۴) نشان داده شده است. مشاهده می شود که درصد خطای به دست آمده از حالت استفاده از مدل مور- کولمب مقدار قابل قبولی نیست و درصد خطای به دست آمده در حالت استفاده از مدل کم- کلی زیر ۵٪ است و به نظر می رسد این مدل جهت استفاده در مرحله آبیگری مناسب است. در ادامه جهت بررسی پایداری سد، در انتهای آبیگری از تحلیل پایداری استفاده می شود. اندازه ضریب اطمینان به دست آمده در انتهای آبیگری سد ۱/۵۵ است. که با توجه به مقادیر مجاز داده شده در محدوده قابل قبولی قرار دارد.

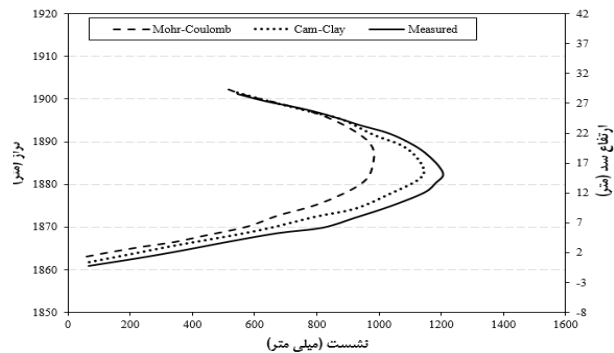
۳- بحث و بررسی نتایج

۳-۱- بررسی اثر زاویه زهکش دودکشی بر پاسخ سد پس از آبیگری

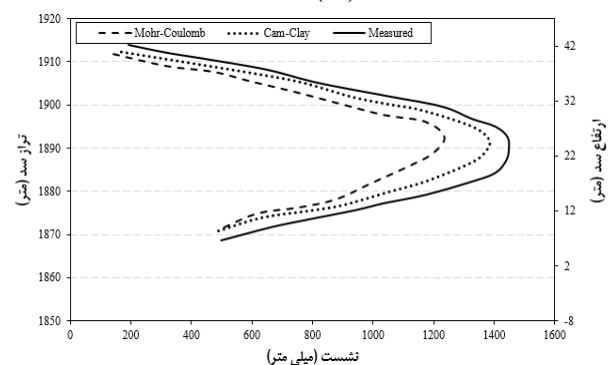
برای بررسی اثر هندسه زهکش دودکشی، با ثابت نگه داشتن سایر خصوصیات سد، زاویه زهکش تغییر داده شده است. در تعیین زاویه های مورد بررسی سعی شده است که محدوده رایج بین زاویه زهکش افقی و قائم به خوبی پوشش داده شود که شامل زوایای ۹۰، ۱۰۰ و ۱۱۰ درجه است. در ادامه اثر هر کدام از زوایای زهکش بر رفتار سد مورد بررسی قرار گرفته است. مدل مش بندی شده سد کلان ملایر برای زوایای مختلف زهکش در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

در شکل (۱۲) توزیع کرنش های برشی برای سه حالت زهکش با زاویه ۹۰، ۱۰۰ و ۱۱۰ درجه نشان داده شده است. بر اساس نتایج ارائه شده مشاهده می شود که توزیع کرنش های برشی به گونه ای است که گوه گسیختگی را در سد تداعی می کند، توزیع کرنش برشی در پایین دست، از محل تاج سد، در راستای شیب زهکش، به سمت پنجه سد پیش می رود.

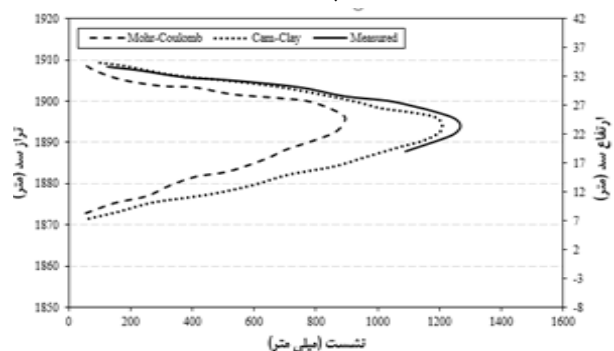
در ادامه کار با توجه به این که گوه گسیختگی به صورت واضح در نتایج نرم افزار نشان داده شده است. سعی شده است با روابط ریاضی اندازه شعاع گوه گسیختگی و مرکز آن محاسبه شود. به این ترتیب که با نوشتن معادله دایره و در دست داشتن مختصات سه نقطه بر روی گوه گسیختگی، مختصات مرکز گوه گسیختگی و شعاع گوه گسیختگی محاسبه می شود. روند محاسبه این پارامترها در ادامه کار ارائه شده است.



(الف)



(ب)



(ج)

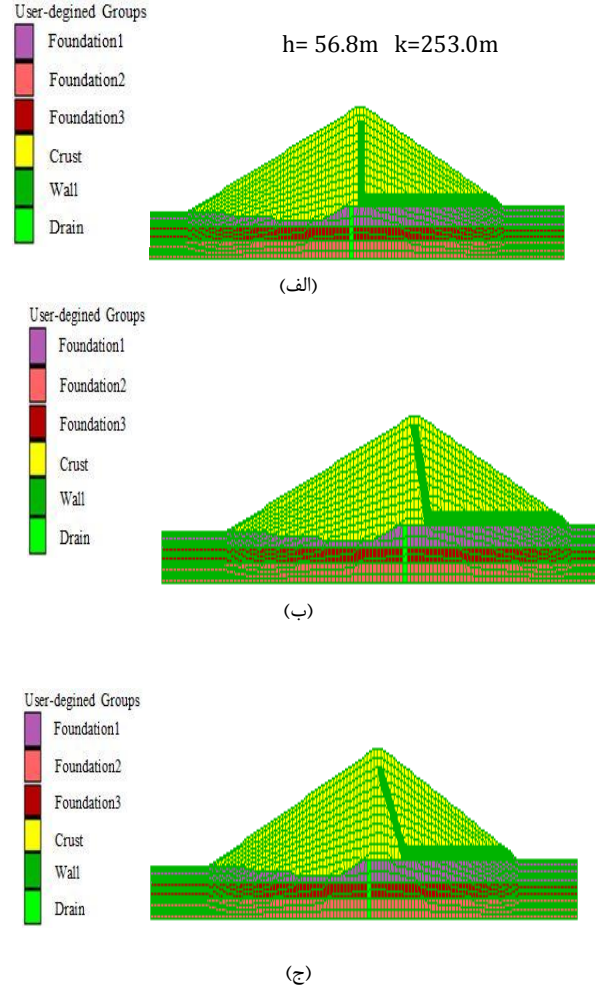
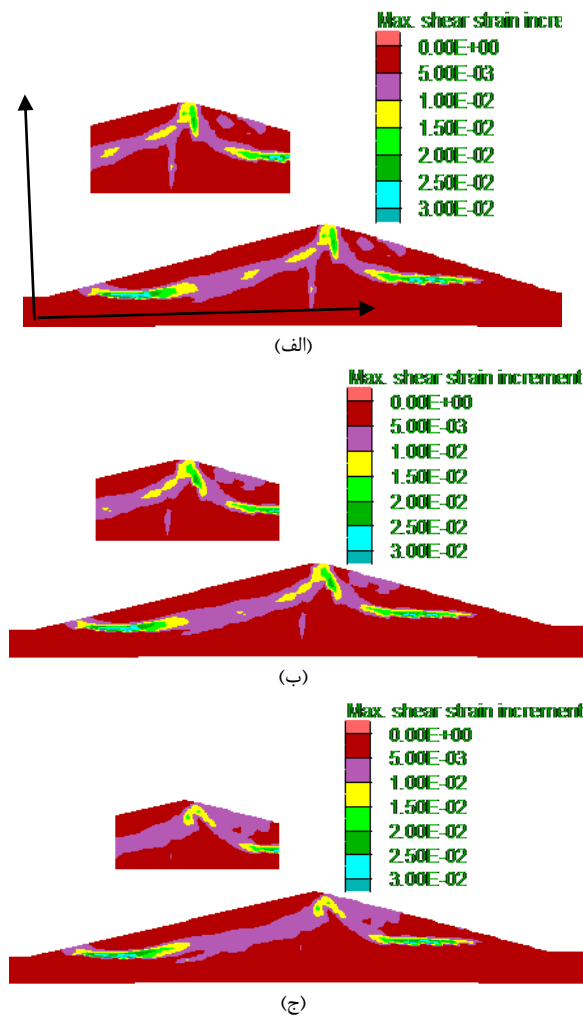
شکل ۱۰- نشست در برابر ارتفاع سد: (الف) ابزار دقیق I3001.

(ب) ابزار دقیق I3002، (ج) ابزار دقیق I3003

جدول ۴- خطای مدل سازی با مدل مور- کولمب و مدل کم-کلی

محور	مور- کولمب	کم- کلی
۱۳۰۰۱	$\frac{1205-990}{1205} = 17\%$	$\frac{1205-1180}{1205} = 2\%$
۱۳۰۰۲	$\frac{1420-1210}{1420} = 15\%$	$\frac{1420-1390}{1420} = 2\%$
۱۳۰۰۳	$\frac{1270-900}{1270} = 29\%$	$\frac{1270-1200}{1270} = 5\%$

حداکثر نشست در حالت استفاده از مدل کم- کلی در انتهای آبیگری در محور I3001، I3002 و I3003 به ترتیب برابر ۱۱۸۰، ۱۳۹۰ و ۱۲۰۰ میلی متر است و این مقدار در حالت استفاده از



شکل ۱۲- ناحیه باند برشی: (الف) زهکش با زاویه ۹۰ درجه، (ب) زهکش با زاویه ۱۰۰ درجه، (ج) زهکش با زاویه ۱۱۰ درجه (a) بزرگ‌نمایی در حالت زهکش با زاویه ۹۰ درجه، (b) بزرگ‌نمایی در حالت زهکش با زاویه ۱۰۰ درجه، (c) بزرگ‌نمایی در حالت زهکش با زاویه ۱۱۰ درجه

شکل ۱۱- مدل مش‌بندی شده سد کلان: (الف) زاویه زهکش ۹۰ درجه، (ب) زاویه زهکش ۱۰۰ درجه، (ج) زاویه زهکش ۱۱۰ درجه

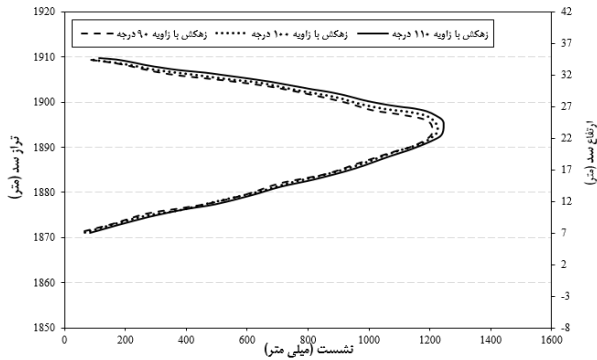
باجایگزیری مقادیر h و k در هر کدام از روابط معادلات دایره بیان شده، مقدار R برابر با ۲۴۸/۶ متر به دست می‌آید. بنابراین مرکز مختصات گوه گسیختگی (۲۵۳/۰، ۵۶/۸) و شعاع گوه گسیختگی نیز برابر با ۲۴۸/۶ متر به دست آمد.

محور مختصات بر روی شکل (۱۲-الف) نشان داده شده است. مختصات سه نقطه تصادفی انتخاب شده بر روی گوه گسیختگی در حالت استفاده از زهکش قائم به ترتیب برابر (۶، ۲۸/۵)، (۳، ۱۳/۳)، (۸، ۱۲۲/۸) و (۴۵، ۱۹۳) است. مختصات مرکز دایره گوه گسیختگی برابر (h, k) فرض می‌شود و شعاع دایره گسیختگی برابر R است. به این ترتیب معادله دایره با توجه به مختصات نقاط انتخاب شده بر روی کمانی از گوه گسیختگی به صورت ذیل خواهد بود:

به همین ترتیب مرکز دایره گسیختگی در حالت استفاده از زهکش با زاویه ۱۰۰ و ۱۱۰ درجه به ترتیب برابر است با (۳۷/۱۸۹، ۳۸/۷۰) و (۴۱/۱۵۲، ۶۶/۸۰) و شعاع دایره گسیختگی در حالت استفاده از زهکش با زاویه ۱۰۰ و ۱۱۰ درجه به ترتیب برابر با ۱۸۸/۱ متر و ۱۵۵/۴ متر است. از نکات قابل توجه کاهش شعاع دایره گسیختگی با افزایش زاویه زهکش است.

$$\begin{aligned} (28.5 - h)^2 + (6 - k)^2 &= R^2 \\ (122.8 - h)^2 + (13.3 - k)^2 &= R^2 \\ (28.5 - h)^2 + (6 - k)^2 &= (122.8 - h)^2 + (13.3 - k)^2 \\ 188.6h + 14.6k &= 14408.5 \\ (193 - h)^2 + (45 - k)^2 &= R^2 \\ (122.8 - h)^2 + (13.3 - k)^2 &= R^2 \\ (193 - h)^2 + (45 - k)^2 &= (122.8 - h)^2 + (13.3 - k)^2 \\ 140.4h + 63.4k &= 24017.3 \\ 188.6h + 14.6k &= 14408.5 \\ 140.4h + 63.4k &= 24017.3 \end{aligned}$$

در شکل (۱۳) و (۱۴) نشست قائم در برابر ارتفاع سد، برای سه حالت زاویه زهکش دودکشی نشان داده شده است. شکل (۱۳)



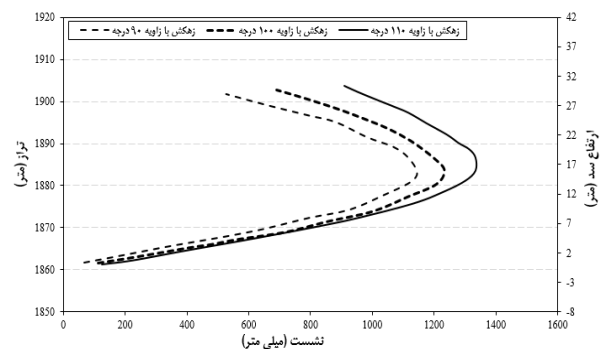
شکل ۱۴- تغییرات نشست در برابر ارتفاع سد برای مقادیر مختلف زاویه زهکش در محور I3003

با افزایش زاویه زهکش و مایل شدن حجم مصالح درشت‌دانه زهکش به سمت پایین‌دست، باعث شده است که مصالح ریزدانه بالادست تغییرات نشست را به‌صورت قابل‌توجه‌تری نسبت به پایین‌دست نشان دهد. شکل (۱۵) و (۱۶) فشار آب حفره‌ای را در مکان پیژومتر A (۳۲ متری بالادست) و C (۱۸ متری پایین‌دست) پس از آبیگری نشان می‌دهد (شکل (۸)). همان‌طور که در شکل (۱۵) و (۱۶) مشاهده می‌شود، در هر سه حالت زاویه زهکش ابتدا فشار آب حفره‌ای افزایش پیدا می‌کند تا به حداکثر مقدار برسد و سپس کاهش پیدا می‌کند و به یک مقدار ثابت می‌رسد. براساس نتایج ارائه‌شده در شکل (۱۵)، حداکثر مقدار فشار آب حفره‌ای در حالت وجود زهکش با زاویه ۹۰، ۱۰۰ و ۱۱۰ درجه به‌ترتیب در ۱۷۰، ۲۱۰ و ۲۵۰ روز پس از آبیگری اتفاق افتاده است. حداکثر مقدار فشار آب حفره‌ای نیز در سه حالت زهکش با زاویه ۹۰، ۱۰۰ و ۱۱۰ درجه در محور A (۳۲ متری بالادست) به‌ترتیب برابر ۵۲۰، ۵۵۰ کیلوپاسکال است و مقدار فشار آب حفره‌ای در این سه حالت زهکش در حالتی که به مقدار ثابتی می‌رسد به‌ترتیب برابر ۳۱۰، ۲۹۰ و ۲۱۰ کیلوپاسکال است. بنابراین مشاهده می‌شود، در محور A، در حالت استفاده از زهکش قائم حداکثر فشار آب حفره‌ای در مدت زمان کم‌تری نسبت به دو حالت دیگر زهکش اتفاق می‌افتد و حداکثر فشار آب حفره‌ای نیز کم‌ترین مقدار را نسبت به دو حالت دیگر خواهد داشت. در صورتی که در حالت استفاده از زهکش با زاویه ۱۱۰ درجه حداکثر فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در مدت زمان طولانی‌تری نسبت به دو حالت دیگر زهکش اتفاق می‌افتد و حداکثر فشار آب حفره‌ای نیز مقدار بیشتری نسبت به دو حالت دیگر زهکش را دارد. در حقیقت در حالت استفاده از زهکش مایل‌تر آب پشت سد فاصله بیشتری را باید طی کند تا به زهکش برسد و زهکش آب را به پایین‌دست انتقال دهد. بنابراین در حالت زهکش مایل با زاویه ۱۱۰ درجه مدت زمان بیشتری نیاز دارد تا به حداکثر مقدار خود برسد و این اختلاف زمان در حالت استفاده از زهکش با زاویه ۱۱۰ درجه نسبت به حالت استفاده از زهکش با زاویه ۹۰ درجه برابر ۸۰ روز

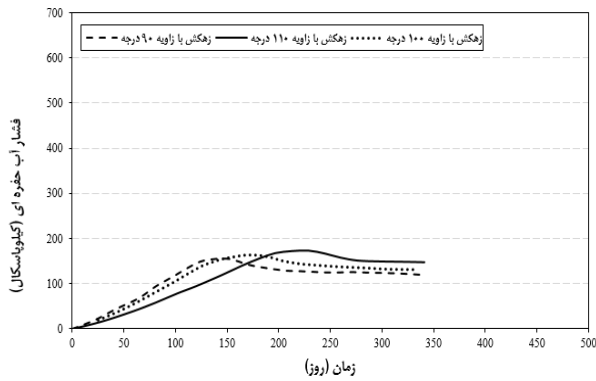
مربوط به محور I3001 (۴۴ متری بالادست) و نمودار شکل (۱۴) مربوط به محور I3003 (۲۵ متری پایین‌دست) است. برای نشان دادن نشست‌های ناشی از آبیگری نشست‌های ساخت صفر شده است. بنابراین نشست‌های مرحله نشان داده‌شده در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) فقط نشست‌های ناشی از آبیگری هستند. شایان‌ذکر است هنگامی که نشست از بالا به سمت پایین است با علامت منفی نشان داده شده است.

در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود، در سه حالت زاویه زهکش، حداکثر نشست در ۱۲ متری ارتفاع سد است. مقدار نشست در ارتفاع ۱۲ متری سد، برای سه حالت زاویه زهکش ۹۰، ۱۰۰ و ۱۱۰ درجه به‌ترتیب برابر با ۱۱۵۰، ۱۲۵۰ و ۱۳۵۰ میلی‌متر است. بنابراین با افزایش زاویه شیب زهکش اندازه نشست در طول ارتفاع سد افزایش پیدا کرده است. حداکثر این مقدار افزایش برای زهکش با زاویه ۱۰۰ درجه برابر ۷ درصد و برای زهکش با زاویه ۱۱۰ درجه برابر ۱۵ درصد است. در محور I3003 که در شکل (۱۴) نشان داده شده است (پایین‌دست سد)، تغییرات نشست با تغییر زاویه زهکش مقدار کم‌تری است. حداکثر نشست در محور I3003 در ارتفاع ۲۲ متری ارتفاع سد اتفاق افتاده است و این مقدار برای زهکش با زاویه ۹۰، ۱۰۰ و ۱۱۰ درجه به‌ترتیب برابر ۱۲۱۰، ۱۲۲۰ و ۱۲۳۰ میلی‌متر است. در حقیقت با افزایش زاویه زهکش میزان نشست‌پذیری افزایش یافته است.

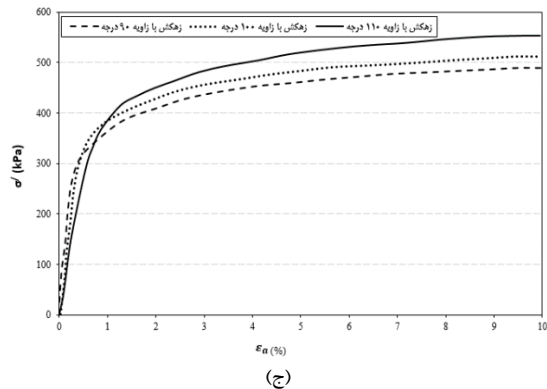
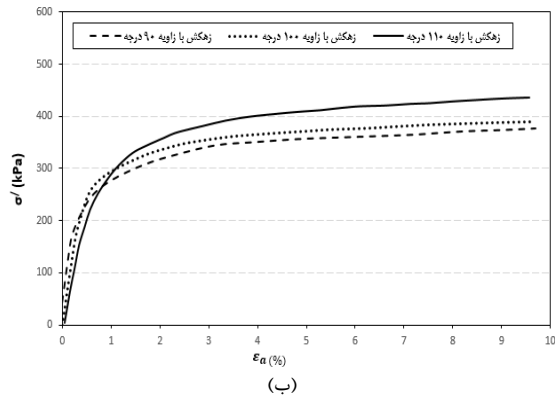
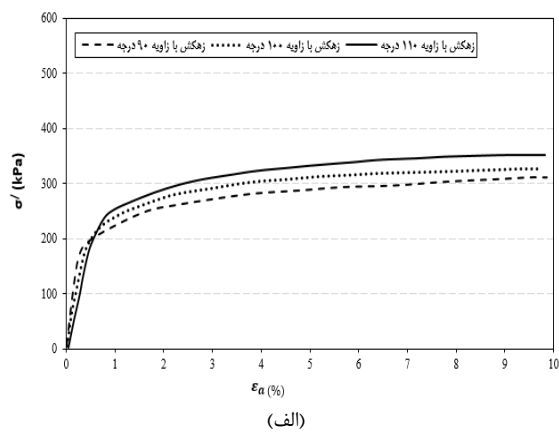
براساس نتایج ارائه‌شده تغییرات حداکثر نشست در محور I3003 (پایین‌دست سد)، با تغییر زاویه زهکش در حدود چند میلی‌متر بوده است. در ارتفاعات پایین سد تغییرات نشست با تغییر زاویه زهکش در دو محور I3001 و I3003 به مقدار ناچیزی است. اما با افزایش ارتفاع سد این تغییر در مقدار نشست افزایش پیدا می‌کند. یکی از دلایل آن می‌تواند، نشان دادن نشست به‌صورت تجمعی باشد، به‌این‌صورت که در ارتفاعات بالاتر سد، نشست نشان داده‌شده حاصل جمع نشست‌های رخ‌داده در کل ارتفاع سد تا ارتفاع مور نظر است.



شکل ۱۳- تغییرات نشست در برابر ارتفاع سد برای حالات مختلف زاویه زهکش در محور I3001



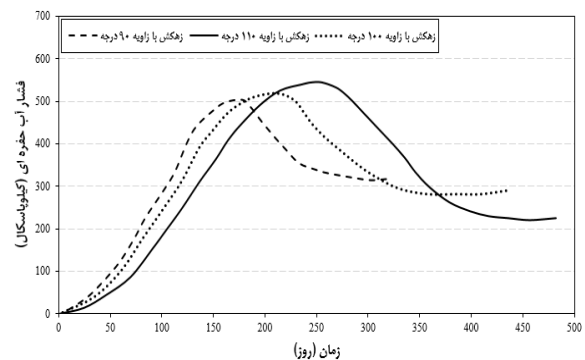
شکل ۱۶- تغییرات فشار آب حفره‌ای در برابر زمان برای سه زاویه مختلف زهکش در مکان پیزومتر C



شکل ۱۷- نمودار تنش- کرنش در محور 33001: الف) در تراز روی پی، ب) در ارتفاع ۱۰ متری، ج) در ارتفاع ۱۵ متری

و نسبت به حالت استفاده از زهکش با زاویه ۱۰۰ درجه برابر ۴۰ روز است.

از طرفی در شکل (۱۵) و (۱۶) همان‌طور که انتظار می‌رود، در حقیقت هر چه زاویه زهکش افزایش پیدا می‌کند، مدت زمان بیشتری، جهت رسیدن به مقدار ثابت فشار آب حفره‌ای نیاز است. مقدار ثابت فشار آب حفره‌ای در حالت استفاده از زهکش با زاویه ۹۰ درجه در مدت زمان ۳۰۰ روز پس از آبیاری، برابر ۳۱۰ کیلوپاسکال است. در حالت استفاده از زهکش با زاویه ۱۰۰ مقدار ثابت فشار آب حفره‌ای در مدت زمان ۳۵۰ روز پس از آبیاری و به مقدار ۲۹۰ کیلوپاسکال است، این مقدار در مدت زمان ۴۰۰ روز پس از آخرین مرحله آبیاری، به مقدار ۲۱۰ کیلوپاسکال برای زهکش با زاویه ۱۱۰ درجه است. مشاهده می‌شود که مقدار ثابت فشار آب حفره‌ای با افزایش زاویه زهکش، کاهش پیدا می‌کند. در واقع با مایل‌تر شدن زاویه زهکش، شبکه جریان در طول بیشتری در بالادست اتفاق می‌افتد و این امر باعث قرار گرفتن شبکه جریان در ارتفاع کم‌تر و در طول بیشتر می‌شود در حقیقت با افزایش زاویه زهکش فشار آب حفره‌ای در بالادست مقدار کم‌تری را نشان دهد. براساس نتایج ارائه شده در شکل (۱۶)، حداکثر فشار آب حفره‌ای در حالت استفاده از زهکش با زاویه ۹۰، ۱۰۰ و ۱۱۰ درجه به ترتیب برابر با ۱۵۵، ۱۶۵ و ۱۷۵ کیلوپاسکال است و این مقدار به ترتیب در زمان ۱۴۰، ۱۷۵ و ۲۲۵ روز پس از انتهای آبیاری اتفاق می‌افتد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مانند محور A که در بالادست قرار داشت، در محور C (۱۸ متری پایین‌دست)، نیز در حالت زاویه شیب زهکش بیشتر، مدت زمان بیشتری طول می‌کشد تا فشار آب حفره‌ای به حداکثر مقدار خود برسد. همین‌طور زمان بیشتری نیاز است تا فشار آب حفره‌ای به مقدار ثابت برسد. مقدار فشار آب حفره‌ای ثابت در حالت زهکش با زاویه ۹۰، ۱۰۰ و ۱۱۰ درجه به ترتیب برابر با ۱۲۰، ۱۳۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال است. مشاهده می‌شود، حداکثر مقدار فشار آب حفره‌ای و مقدار ثابت فشار آب حفره‌ای در حالت زاویه مایل‌تر شیب، مقدار بیشتری دارد.



شکل ۱۵- تغییرات فشار آب حفره‌ای در برابر زمان برای سه زاویه مختلف زهکش در مکان پیزومتر A

۱. نتایج مدل‌سازی در مرحله ساخت و آبیگری سد کلان، نشان داد که مدل کم-کلی نسبت به مدل مور-کولمب تطابق بیشتری با نتایج ابزار دقیق دارد. در حقیقت خطاهای مدل کم-کلی کم‌تر از ۵٪ است.

۲. در مرحله آبیگری سد کلان، خط نشت (فریاتیک) آب در حالت زهکش قائم نسبت به زهکش مایل، به دلیل این‌که مسافت کوتاه‌تری را طی می‌کند تا به زهکش برسد، در ارتفاع پایین‌تری قرار می‌گیرد.

۳. پس از آبیگری سد، ناحیه برشی در پوسته بالادست و پایین‌دست ایجاد می‌شود، کرنش‌های برشی ایجادشده در ناحیه برشی، برای زهکش قائم نسبت به زهکش مایل، مقدار بیشتری دارد.

۴. میزان نشست در بالادست و پایین‌دست سد در حالت استفاده از زهکش با زاویه ۱۱۰ درجه نسبت به زوایای ۱۰۰ درجه و ۹۰ درجه بیشتر است. زهکش قائم با اختلاف کمی نسبت به زهکش با زاویه ۱۰۰ درجه، کم‌ترین نشست را نسبت به زهکش‌های با زاویه ۱۰۰ و ۱۱۰ درجه در پایین‌دست و بالادست را دارد.

۵. در حالت استفاده از زهکش با زاویه ۱۱۰ درجه میزان فشار آب حفره‌ای در بالادست کم‌ترین مقدار و در پایین‌دست بیشترین مقدار را دارد. در حالت استفاده از زهکش قائم فشار آب حفره‌ای در بالادست بیشترین مقدار و در پایین‌دست کم‌ترین مقدار را دارد. در حالت استفاده از زهکش با زاویه ۱۰۰ درجه جریان آب حالتی بینابین دو حالت دیگر زهکش را دارد.

۶. ضریب اطمینان پایداری کل پس از آبیگری، در حالت استفاده از زهکش با زاویه ۱۰۰ درجه نسبت به حالات دیگر بیشتر است و در حالت استفاده از زهکش با زاویه ۱۱۰ درجه در حالت کمینه قرار دارد.

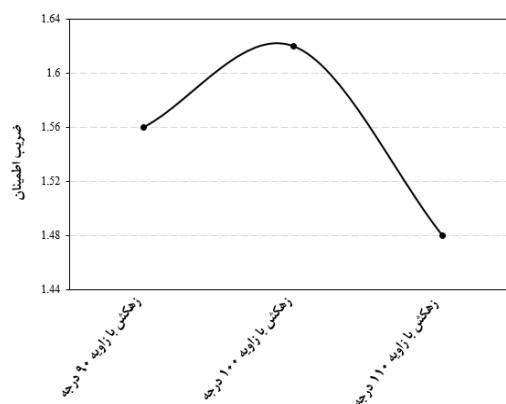
۷. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش زاویه زهکش از ۹۰ تا ۱۰۰ درجه میزان پایداری سد افزایش می‌کند و با افزایش زاویه زهکش از ۱۰۰ تا ۱۱۰ درجه میزان پایداری کاهش پیدا می‌کند. از طرفی میزان فشار آب حفره‌ای، نشست و تنش در حالت استفاده از زهکش با زاویه ۱۰۰ درجه مقادیر قابل قبولی داشته است، بنابراین این زاویه برای زهکش توصیه می‌شود.

۵- مراجع

- Balmforth Nj, Von Hardenberg J, Provenzale A, Zammett R, "Dam breaking by wave-induced erosional incision", Journal of Geophysical Research, Earth Surface, 2008, 113, (F1).
- Çalamak M, Bingöl An, Yanmaz Am, "Effect of Drainage Properties on Seepage Behavior of Earth-Fill Dams", the 12th International Congress on Advances in Civil Engineering, 2016.
- Chahar Bhabhu R, "Closure to determination of Length of

شکل‌های (۱۷) نمودار تنش مؤثر-کرنش را در محور I3001 (۴۴ متری بالادست)، به ترتیب در ارتفاع‌های صفر (تراز روی پی)، ۱۰ متری و ۱۵ متری روی پی را نشان می‌دهد. براساس نتایج ارائه شده در شکل (۱۷) مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه زهکش، با تغییر کرنش، تنش به مقدار بیشتری تغییر می‌کند. در کرنش ۰/۰۱ میزان تنش مؤثر در حالت زاویه زهکش برابر ۹۰، ۱۰۰ و ۱۱۰ درجه در تراز روی پی به ترتیب برابر با ۳۰۵، ۳۲۵ و ۳۵۰ کیلوپاسکال و در ارتفاع ۱۰ متری از روی پی، به ترتیب برابر با ۳۳۰، ۳۹۰ و ۴۴۰ کیلوپاسکال و در ارتفاع ۱۵ متری از روی پی به ترتیب برابر با ۴۹۵، ۵۰۵ و ۵۵۰ کیلوپاسکال است. مشاهده می‌شود با افزایش زاویه شیب زهکش، میزان تنش افزایش پیدا می‌کند.

در شکل (۱۸) ضریب اطمینان پایداری کلی سد برای مقادیر مختلف زاویه زهکش نشان داده شده است. مشاهده می‌شود حداکثر مقدار ضریب اطمینان مربوط به حالت استفاده از زهکش با زاویه ۱۰۰ درجه بوده است و مقدار آن نیز برابر ۱/۶۲ است. در حقیقت با افزایش زاویه زهکش از ۹۰ تا ۱۰۰ درجه میزان پایداری سد افزایش می‌کند و با افزایش زاویه زهکش از ۱۰۰ تا ۱۱۰ درجه میزان پایداری کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۱۸- ضریب اطمینان پایداری کلی در انتهای آبیگری برای مقادیر مختلف زاویه زهکش

۴- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر سعی شده است رفتار سد همگن کلان ملایر بررسی شود، در این مسیر استفاده از نتایج ابزارنگاری مرحله ساخت و آبیگری، باعث اعتباربخشی به عملکرد و نتایج کد محاسباتی شده است. با توجه به تحقیقات انجام‌گرفته، شامل مطالعات مروری و تحلیل‌های عددی انجام‌گرفته در خصوص سد کلان ملایر نکات و نتایج ذیل قابل ارائه است:

- comparison of results", *Soils and foundations*, 1995, 35 (4), 1-7.
- Zettler A, Poisel R, Roth W, Preh A, "Slope stability analysis based on the shear reduction technique in 3D", *FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics*, 1999, 11-16.
- Zomorodian S, Mohammad A, Abodollahzadeh SM, "Effect of Horizontal Drains on Upstream Slope Stability During Rapid Drawdown Condition", *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2012, 42, 1 (66), 29-34.
- a Horizontal Drain in Homogeneous Earth Dams", by Bhagu R. Chahar. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 2006, 132 (1), 89-90.
- Coulthard Ma, Little Tn, "Modelling of stability of high west wall at Ok Tedi copper-gold mine", *FLAC and numerical modelling in geomechanics*, Balkema, Rotterdam, 1999, 39-46.
- Darabi M, Maleki M, "Effect of Drain Geometry on Dynamic Response of Homogeneous Earth Dams", *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2018, 48, 3. (92), 99-108.
- Dewolf John T, Beer Ferdinand P, Jr E, Russell J, Mazurek David F, "Mechanics of Materials", (6th Edition ed.). 2011.
- Donald Ib, Giam Sk, "Application of the nodal displacement method to slope stability analysis", the Fifth Australia-New Zealand conference on geomechanics: prediction versus performance; Preprints of papers, 1988.
- Ghareh S, Nowroozzade R, "Back Analysis of Tabarakabad Embankment Dam Using Monitoring and Numerical Model Results", *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2019, 48,4 (93), 51-62.
- Hajiani Boushehrian A, Rezaee A, Vafamand A, "Studying the Effect of Horizontal Drains on Stability of Heterogeneous and Homogeneous Earth Dams during Rapid Drawdown Condition", *Journal of Structural Engineering and Geotechniques*, 2017, 7 (1), 31-45.
- Itasca F, "Fast Lagrangian analysis of continua", Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis, Minn, 2000.
- Komasi M, Beiranvand B, "Study of vertical and horizontal displacements of Eyvashan earth dam using monitoring and numerical analysis", *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 2020.
- Malekpour A, Farsadi Zade D, Dalir, Hossein Zadeh A, Sadrekarimi J, "Effect of horizontal drain size on the stability of an embankment dam in steady and transient seepage conditions", *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences* 36,(2): 139-152.
- Mansuri B, Salmasi F, "Effect of horizontal drain length and cutoff wall on seepage and uplift Pressure in heterogeneous earth dam with numerical simulation", *Journal of Civil Engineering, Urbanism*, 2013, 3 (3), 114-121.
- Matsui T, San KC, "Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique", *Soils and foundations*, 1992, 32 (1), 59-70.
- Palmeira E, Gomes R, "Comparisons of Predicted and Observed Failure Mechanisms in Model Reinforced Soil Walls", *Geosynthetics International* 3, 1996.
- Rahimi H, "Earth dam (3d edition ed.)", Tehran University, 2011.
- Soltani H, "Mechanical behavior of mixed clay under cyclic and post-cyclic loading. PhD thesis", Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, 2006.
- Soltani H, Soroush A, "Behavior of mixed clay under uniform loading. Amirkabir University of Technology", Tehran, Iran, 2007.
- Ugai K, Leshchinsky D, "Three-dimensional limit equilibrium and finite element analyses: a

EXTENDED ABSTRACT

Evaluation of the Effect of Drainage Geometry on the Behavior of Homogeneous Embankment Dams (Case Study: Kalan Dam of Malayer)

Mohammad Amiri^{1,*}, Yousef Raesi Makeyani², Raana Salhian³

¹ Faculty of Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

² Islamic Azad University of Bandar Abbas, Faculty of Engineering, Bandar Abbas, Iran

³ Faculty of Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

Received: 26 Octobe 2019; **Accepted:** 29 September 2020

Keywords:

Drainage Geometry, Embankment dams, Pore-fluid, Kalan Dam of Malayer.

1. Introduction

Embankment dams are one of the essential structures in civil engineering, and it is important to examine their various dimensions. In addition to affecting the water discharge process, drainage geometry also plays an important role in the after-filling behavior of embankment dams. In general, the safety of the dam is not only related to its design and construction, but it also depends on behavioral record of its performance in the first period of dewatering and operation, as well as regular service throughout the life of the dam (Ghareh and Nowroozzade, 2019, Komasi and Beiranvand, 2020). In These years, many modeling based on limiting equilibrium methods using different software has been performed. However, a broad view of the effect of drainage geometry on the behavior of homogeneous earth dams has not been done. Accordingly, this study investigates the stability of earth dams with a particular focus on drainage geometry. For accurate evaluation in this research, the Malayer dam has been studied.

2. Methodology

2.1. Introduction of Malayer Dam

Malayer Dam is located 30 km away from the south of Malayer city in Hamedan province and 1100 meters away from downstream and north of Patieh village. This Dam has been constructed to provide drinking water for Malayer city (18 million cubic meters per year) and improve and develop irrigation in the lands south of Malayer city. Malayer Dam is a homogeneous soil dam with a central chimney drain, and it has 47 meters in height from the natural river bed. The maximum final level of the dam crest is 1920 meters (Malayer Geological Report, 2000). The position of the dam is shown in Fig. 1. the cross-section and other characteristics of the Malayer dam are shown in Fig. 2.

* Corresponding Author

E-mail addresses: amirii@hormozgan.ac.ir (Mohammad Amiri); Yousef Raesi Makeyani (yousef.raesi@yahoo.com); Raana Salhian (raanaslhn@gmail.com).

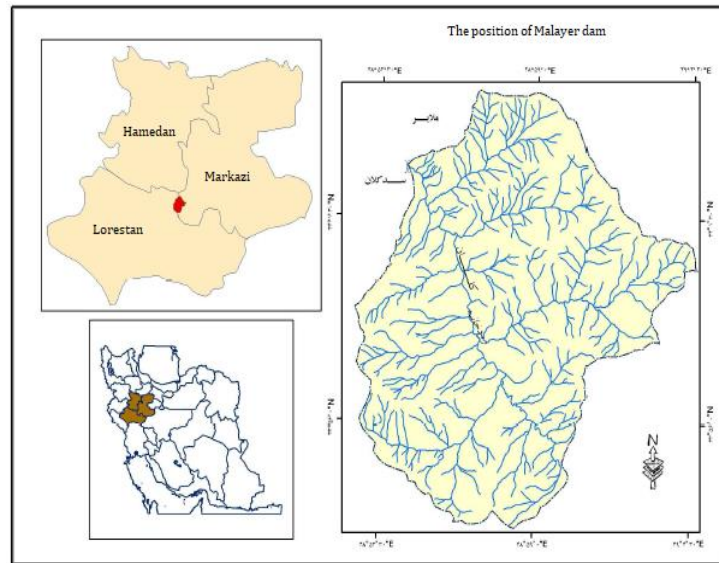


Fig. 1. The position of the Malayer dam

2.2. FLAC modeling

In the first stage of modeling, a suitable meshing for the problem should be defined; therefore, the number of elements in the model is determined. In FLAC software, the desired meshing model is determined according to the priorities (stresses and displacements), and the elements are determined with appropriate dimensions (Itasca, 2000).

Mohr-Coulomb and Cam clay behavioral models have been used for behavioral modeling of body materials and foundations of Malayer Dam in the construction stage. The parameters considered for different materials of the dam body are presented based on the design assumption and experiments in the design reports in Table 1. (Malayer Geological Report, 2000).

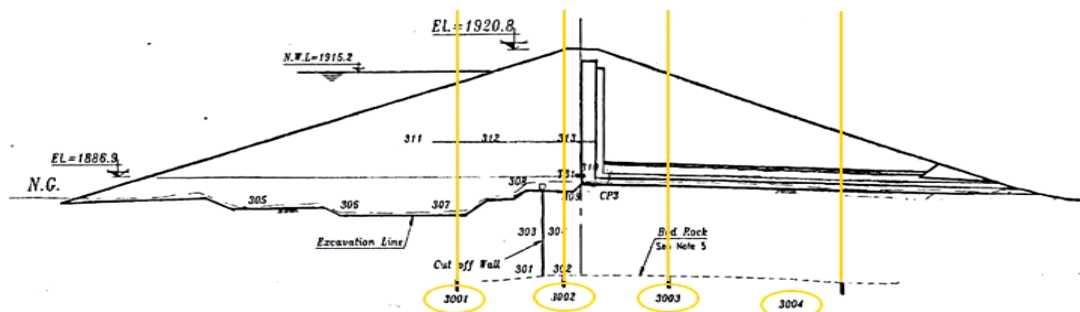


Fig. 2. The cross-section of the Malayer dam

Table 1. Mohr-Coulomb behavioral model parameters for body materials and dam foundation (Malayer Geological Report, 2000)

Material	ϕ (deg)	C (kN/m ²)	E (kN/m ²)	ν	γ (kN/m ³)
Homogeneous dam	9	70	2×10^4	0.35	21.2
Filter and Drain	38	0	4×10^4	0.3	21.5
The First fine-grained layer of foundation (0-10m)	20	20	1.5×10^4	0.4	20
Coarse-grained interlayer (10-15m)	30	10	2.5×10^4	0.3	20.5
The Second fine-grained layer of foundation (15-25m)	20	20	1.75×10^4	0.3	20

3. Results and discussion

To investigate the effect of drainage geometry, the drainage angle has been changed by keeping other dam properties constant. In determining the studied angles, it has been tried to cover the typical range between horizontal and vertical drainage angles, which includes angles of 90, 100, and 110 degrees.

In Fig. 3. the distribution of shear strains for three drainage states with angles of 90, 100, and 110 degrees is shown. Based on the presented results, it can be observed that the distribution of shear strains is such that

it relates the rupture wedge in the dam, the distribution of shear strain downstream, from the crest of the dam, in line with the slope of the drainage, advances toward the dam toe.

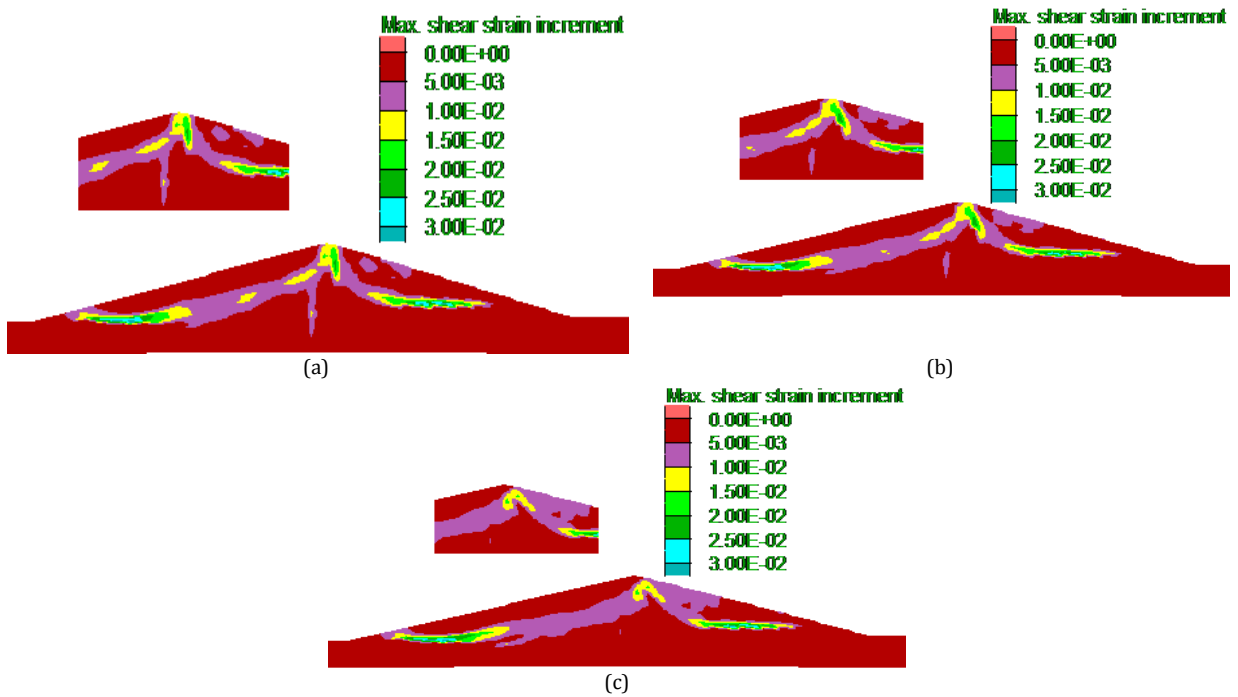


Fig. 3. Shear strain zone whit: a) angle of 90 degrees, b) angle of 100 degrees, c) angle of 110 degrees

In Fig. 4. In three drainage angles, the maximum settlement is at 12 meters in the height of the dam. The amount of settlement at 12 meters in the dam's height for three drainage angles of 90, 100 and, 110 degrees is 1150, 1250 and, 1350 mm, respectively.

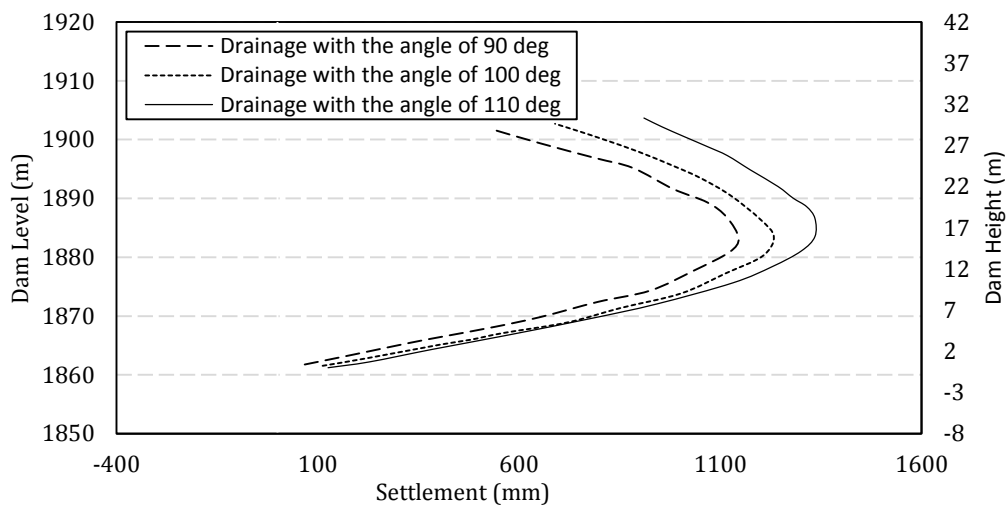


Fig. 4. Settlement Changes against the height of the dam for different drainage angles on the I3001 axis

4. Conclusions

In this paper, we have tried to investigate the behavior of the Malayer Homogeneous Dam; in this way, using the construction and dewatering instrumentation stage results has led to the validation of the performance and results of the computational code. The following points and results can be presented according to the research conducted, including review studies and numerical analyses conducted on Malayer Dam.

1. The results of modeling in the construction and dewatering phase of the dam showed that the low-overall model is more under the instrumentation results than the Mohr-Coulomb model. the Cam clay model errors are less than 5%.

2. The settlement rate upstream and downstream of the dam in the use of drainage at the angle of 110 degrees is higher than angles of 100 degrees and 90 degrees. Vertical drainage with a slight difference compared to drainage with an angle of 100 degrees has the lowest sitting compared to drains with angles of 100 and 110 degrees downstream and upstream.

5. References

- Ghareh S, Nowroozzade R, "Back analysis of Tabarakabad embankment dam using monitoring and numerical model results", Journal of civil and environmental engineering, 48, 51-62.
- Itasca 2000. "Fast lagrangian analysis of continua", Itasca consulting group inc., minneapolis, minn.
- Komasi, M, Beiranvand B, "Study of vertical and horizontal displacements of eyvashan earth dam using instrumentation and numerical analysis", Iranian journal of soil and water research, 2020, 51, 245-256.
- Malayer Geological Report "The Malayer geological map on a scale of 1: 100,000", Geological survey of Iran, 2000.