

ارزیابی کاهش ایمنی سازه‌های ناشی از نفوذ آب مخزن به درون سطح ترک سازه‌های یک سد بزرگ بتنی قوسی

وحید بیات^۱، محمدتقی احمدی^۲

- ۱- کارشناس ارشد سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۲- استاد، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

mahmadi@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۹/۷/۲۷ تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۰/۲۳

چکیده

آسیب در سدهای قوسی که از سازه‌های بسیار مهم و حیاتی هر جامعه‌ای محسوب می‌شوند، به دلیل خسارت‌های فاجعه‌آمیز ناشی از خرابی احتمالی‌شان باید همواره از نظر عملکردی ارزیابی شوند و سطح ایمنی آن‌ها برای ادامه حیات سد بررسی و مشخص شود. در این میان اگر آسیبی مشخص همچون ترک خوردگی در این سازه‌ها وجود داشته باشد، این ارزیابی‌ها برای مشخص شدن سطح ایمنی فعلی و پیش‌بینی از مقاومت رزرو سازه در برابر بارگذاری‌های مختلف از جمله زلزله ضرورت می‌یابد که مورد مشابه آن در کشور موجود است. سد ماروپوینت به عنوان مطالعه موردی برای دستیابی به شناخت لازم در مورد تأثیر ترک خوردگی بر عملکرد سد و مشخص شدن سطح ایمنی آن انتخاب شد و هندسه‌ای مشخص از ترک در بدنه سد ایجاد شد. مدل‌سازی سه‌بعدی سد همراه با پی برای چند دسته ترک مختلف با هندسه مشخص و مشخصات مکانیکی مختلف ساخته شد و برای مدل‌سازی ترک نیز از درز فشاری-برشی استفاده شد. بارگذاری‌های اعمال‌شده نیز بارهای سرویس (وزن و فشار آب) و همچنین بار غیرعادی نفوذ آب در ترک هستند. در دسته اول تحلیل‌ها مشخصات مصالح خطی فرض شدند و با مشاهده تنش‌های کششی بزرگ، برای موارد منتخب از مصالح غیرخطی بتن با به‌کارگیری مدل آسیب پلاستیک استفاده شد و مصالح پی خطی باقی ماند. ضرایب اطمینان برشی و فشاری برای سطوح درزهای انقباض و صفحه ترک محاسبه شدند و برای ضرایب اطمینان سطوح بدنه سد از معیار گسیختگی متناسب با بتن استفاده شده است. همچنین برای ساخت مدل‌های سه‌بعدی سد، مراحل ساخت سد و درزهای انقباض بین طره‌ها مدل شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشانگر این هستند که برای ترک با عمق نفوذ نصف در ضخامت پوسته، برای هر دو حالت نفوذ و عدم نفوذ آب در ترک، ضرایب اطمینان افت محسوس‌تری نداشتند و نگرانی از بابت عملکرد و ایمنی متوجه سد نیست. اما با افزایش عمق نفوذ به‌کل ضخامت سد، برای بارهای سرویس بدون نفوذ آب در ترک، با کاهش زاویه‌ی اصطکاک سطح ترک‌خورده، ضرایب اطمینان افت محسوس‌تری دارند و در صورت افزودن نفوذ آب داخل ترک‌ها، این بارگذاری به‌عنوان عاملی تشدیدکننده عمل‌نموده و خرابی‌های پای‌طری ترک‌خورده را افزایش می‌دهد. همچنین اثر خرابی‌های مذکور روی پی، خبر از افت ایمنی برشی در محل اتصال سد به طره‌ی ترک‌خورده می‌دهد.

واژگان کلیدی: سدهای بتنی قوسی، ترک‌خوردگی، ارزیابی ایمنی و عملکرد، مدل‌سازی مراحل ساخت، سد ماروپوینت.

۱- مقدمه

پدیده‌های گوناگون همچون، نفوذپذیری بتن سازه و بازشدگی ترک در طول ترک بر آن اثر می‌گذارند. از سویی، چرخه‌ی باز توزیع و بهبود نیم‌رخ فشار آب درون ترک به همراه پیشروی ترک به گونه‌ای فزاینده تا رسیدن به شرایط پایدار ادامه می‌یابد [3]. آزمایش نمونه‌های بسیاری از ملات، نشان داده که فشار آب می‌تواند تا ۸۰٪ در فرآیند پیدایش و به دنبال آن گسترش ترک خوردگی نقش داشته باشد که با افزایش طول ترک بیشتر نیز خواهد شد [4]. اما در این پژوهش منظور نفوذ یا عدم نفوذ در جسم بتن و بدرون دیواره‌های ترک بوده و با بحث نفوذ در شکاف ترک متفاوت است.

شکل ۱- نفوذ آب به داخل ترک و اعمال فشار آب دیواره‌های ترک

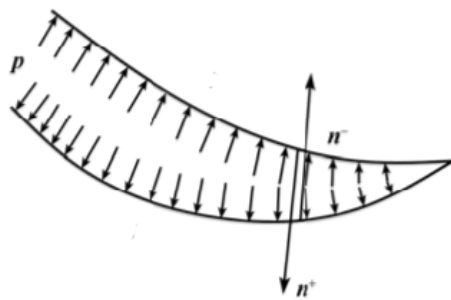


Fig.2. Water Penetration into the crack and applying pressure

۲- حادثه مشابه در تاریخ سدسازی [5]

سد قوسی ال‌آتازار ۱ در سال ۱۹۷۷ به علت جابه‌جایی بیش‌ازحد تکیه‌گاه ضعیف سمت چپ دچار ترکی افقی و پیش‌رونده در سراسر رویه سراب در تراز ۳۰ متر بالاتر از پی (یعنی در بدترین نقطه بدنه سد قوسی) شد. ترک به سرعت تا لایه وسط بدنه سد توسعه یافت و در نهایت به طول ۴۵ متر از درون گالری مشاهده شد. با رشد بازشدگی ترک به مقدار ۳ تا ۸ میلی‌متر، مقدار نشت آب از ۱۵۰۰ به بیش از ۹۰۰۰ لیتر در دقیقه رسید. با کوشش فراوان و در شرایط هد ۹۰ متری عمق مخزن و هم‌زمان با جریان شدید آب، ترک به روش Rodour با رزین خاص مورد تزریق قرار گرفت. با این حال حرکت تکیه‌گاه ادامه یافت و منجر به خردشدگی محل تماس بدنه و

سدهای بزرگ همان‌قدر که سرمایه بزرگی برای مردم و کشور محسوب می‌شوند، خطرات حاصل از خرابی آن‌ها نیز بزرگ و قابل ملاحظه است. عملکرد این سدها می‌تواند تحت تأثیر سیل، زلزله، لغزش توده‌های سنگی، زوال پی، زوال بتن به کاررفته در بدنه و عوامل دیگر باشد. به دلیل این اهمیت و حساسیت، طراحی و ارزیابی ایمنی سد در برابر پدیده‌های مخرب جایگاه ویژه‌ای دارد. یک سد بتنی پس از ساخته شدن و بهره‌برداری در طول عمر سازه‌ای خود، تحت تأثیر پدیده‌های مختلف دچار آسیب‌دیدگی می‌شود و سد باید برای تمامی مودهای محتمل آسیب و شکست و ترک‌خوردگی و نیز تأثیر این مودها روی یکدیگر ارزیابی شود و سلامت آن به‌طور پیوسته بازرسی و مشکلات و آسیب‌های موجود ترمیم شود تا سلامت سازه و در نتیجه سلامت جامعه و سرمایه ملی حفظ شود [1]. سدهای بتنی قوسی با ارتفاع‌های بلند، در کنار ذخیره‌سازی منابع آبی در حجم‌های بسیار زیاد و تولید انرژی که سرمایه‌های بزرگی برای جامعه محسوب می‌شوند. اما این سرمایه بزرگ جامعه را با خطری بالقوه همراهی می‌کند که همان خرابی و شکست سد است. با اینکه تجارب شکست سدهای قوسی و بروز فجایع انسانی به انگلستان دست نمی‌رسد، ولی همان رویدادها حاکی از آن است که در صورت غافل بودن از عملکرد سد و اطمینان حاصل نکردن از ایمنی در بهره‌برداری، گریزی از فاجعه نیست [2]. با وجود اینکه ترک‌خوردگی در سدهای قوسی عوامل بسیاری دارد و عوامل تشدید کننده آن نیز همینطور (بارهای حرارتی، لرزه‌ای، اثرات تکیه‌گاه و...)، اما در این پژوهش هدف ارزیابی اثر نفوذ آب به درون شکاف حاصل از ترک و ارزیابی ریسک امکان توسعه ترک بر اثر این نفوذ است.

نخستین اثر ورود آب به ترک یا درز، اعمال باری گسترده به صورت فشاری بر دیواره‌های ترک یا درز و در نتیجه افزایش ضریب شدت تنش مود اول شکست در نوک ترک است. این تأثیر فشار آب در درون ترک «اثر شکافت گوه‌ای» نامیده می‌شود. این فشار گسترده اندازه‌ای یکنواخت ندارد و

قسمت موازی با درز انقباض سد قوسی هستند که سه پارامتر اول برای ترک خوردگی اعمالی نامشخص بوده ولی پارامتر آخر که تا حدودی مشخص است برای پیش‌بینی رفتار سد قوسی ترک‌خورده با افزایش طول ترک‌خوردگی در نظر گرفته شده‌است.

در این پژوهش رفتار فشاری و برشی درزهای انقباض سد مدل شده و از اثر کشش و مدل کردن آن صرف‌نظر شده‌است. برای مدل‌سازی رفتار درزها در فشار از المان درز ۸ گرهی با روش حل پنالتی و در برش از مدل اصطکاکی کولمب استفاده شده‌است. در محل هر درز، دو سطح به‌عنوان سطح برده ۲ و مرجع ۳ تعریف شده که تماس این دو صفحه باهم از نوع تماس سطح به سطح است [7].

جدول ۲. مشخصات المان درز انقباض

φ	$\tau_{\max} (MPa)$	Elastic slip (mm)	$K_n (GPa / m)$
50	8	2	adjacent $\times 130$ element's E

Table 2. Joint element Properties

هندسه ترک خوردگی اعمال شده به سد ماروپوینت شامل طول ترک خوردگی و همچنین ضخامت آن در بدنه‌ی سد قوسی است. طول ترک خوردگی شامل دو قسمت (۱) عمود بر تکیه‌گاه (۲) موازی درز انقباض است که مشخصات آن در شکل (۲) قابل مشاهده است. این ترک خوردگی در ضخامت سد اعمال شده است و مشابه درزهای انقباض با استفاده از المان درز فشاری-برشی مدل شده است [8].

ترک در دو شاخه رشد کرده است که شاخه شماره یک، شاخه موازی با درز انقباض بوده و در پژوهش حاضر مورد مطالعه و مدل سازی قرار گرفته‌است. شاخه شماره دو نیز احتمالاً با برخورد به درز انقباض رشد خود را متوقف کرده است. شاخه‌ی شماره یک که به بالادست سد رسیده امکان نفوذ آب را در خود خواهد دید و با توجه به اینکه در بدنه سد هنوز

پی شد. با افزایش شدید آبگذرانی در پی، تزریق جدی پی برای تثبیت حرکت آن نیز (۴ سال بعد) انجام شد. این سازه که سد بتنی با ارتفاع متوسطی محسوب می‌شود، مورد مهمی است که علاج بخشی آن بدون تخلیه مخزن (به سبب وابستگی شدید آب شرب پایتخت اسپانیا به مخزن آن) و به وسیله تزریق سازه‌ای استثنایی و بی‌سابقه و با پذیرش ریسک‌های بالاتر از معمول توسط یک گروه آمریکایی-اسپانیایی مرکب از باتجربه‌ترین افراد متخصص تزریق سدها انجام شده است. با این حال این تزریق منجر به علاج بخشی قطعی نشد و رفتار پی در سال‌های بعد نیازمند تمهیدات اضافی مانند تزریق آب‌بندی و تحکیمی شد.

۳- روش مطالعات

سد قوسی ماروپوینت^۱ برای مطالعه موردی در این پژوهش در نظر گرفته شده است. برای سد از دو ردیف المان ۲۰ گرهی ایزوپارامتریک و در پی از المان‌های ۸ گرهی ایزوپارامتریک که از هر دو نوع المان به صورت انتگرال‌گیری کامل، استفاده شده‌است. تحلیل‌ها در دو گروه کلی قرار می‌گیرند که گروه اول، شامل تحلیل‌های با مصالح خطی برای سد و پی بوده و گروه دوم با در نظر گیری رفتار غیرخطی برای مصالح سد هستند.

جدول ۱. ویژگی‌های مصالح [6]

20/68	Young's modulus E(GPa)	20/68
0/2	Poisson's ratio ν	0/2
2403	Density $\rho(Kg/m^3)$	2403

Table 1. Material Properties [6]

هدف از تحلیل‌های گروه اول حساسیت سنجی‌ها برای پارامترهایی بوده‌است که از نظر نویسندگان بر ایمنی سد و عملکرد آن ممکن است تأثیرگذار باشند. این پارامترها شامل، زاویه اصطکاک سطح ترک‌خوردگی، عمق نفوذ ترک در ضخامت پوسته سد، نفوذ و عدم نفوذ آب و طول ترک در

۳. Master

۴. Surface to surface

۱. Morrow point dam

۲. Slave

شکل ۲. الف) مدل المان محدود سد-پی (ب) هندسه ترک خوردگی اعمالی به سد ماروپوینت

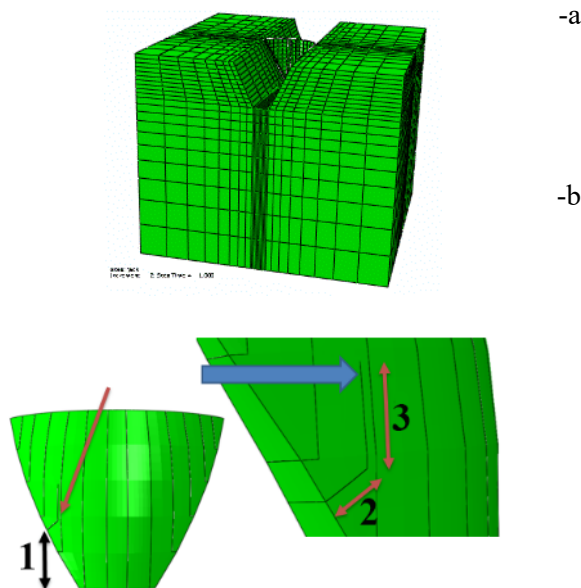


Fig 2. a) FE model of Dam-Foundation. b) Applied geometry of crack

۳-۴- شرایط وجود ترک الگو و نفوذ آب

در این بخش به بررسی اثر نفوذ آب در ترک خوردگی پرداخته شده است. برای تمامی تحلیل‌های تشریح شده در بخش قبل اثر نفوذ آب در ترک خوردگی به صورت فشار آب هم مقدار با هد هیدرواستاتیک سد، وارد بر صفحات ترک مورد مطالعه قرار گرفته شده است.

۵- نتایج و بحث

جهت اختصار و سادگی در تشریح هر مورد بررسی شده، برچسبی متشکل از سه بخش عددی برای هر مورد مطالعاتی در نظر گرفته شده است که قسمت اول آن نشان دهنده وجود (۱) یا عدم وجود آب (۰)، قسمت دوم عمق نفوذ صفحه ترک خوردگی در ضخامت بدنه سد که شامل عمق نفوذ کامل در ضخامت بدنه سد (۱) و نصف ضخامت (۰,۵)، و در پایان طول ترک خوردگی موازی درز انقباض که شامل طول‌های ۳۵ و ۴۴ متری است خواهد بود که برای بررسی تأثیر افزایش طول ترک در ایمنی سد مورد بررسی قرار گرفته شده است. برای مثال مورد مطالعاتی "1-0.5-44"، ترک ۴۴ متر موازی درز انقباض با عمق نفوذ ترک نصف ضخامت بدنه سد، و در حضور نفوذ آب به داخل ترک را معرفی می‌کند.

امکان رشد را دارد، لذا ارزیابی رشد و ایمنی این طره‌ی ترک خورده ضروری می‌نماید.

۴- تحلیل‌ها

۱-۴- تحت بارهای سرویس، بدون ترک

برای روشن شدن سطح عملکردی سد در شرایط عادی و روشن شدن تغییر مکان‌ها و تنش‌های سازه، همچنین پیش‌بازشدگی‌های درزهای انقباض سد، نیاز است که ابتدا سد تحت بارهای وزن و فشار آب که عمده بارهای بهره‌برداری سد محسوب می‌شوند ارزیابی شود تا از نتایج حاصل بتوان برای مقایسه‌های بعدی مورد استفاده قرار داد.

۲-۴- شرایط وجود ترک الگو

با توجه به اینکه اطلاعات روشنی از میزان ترک خوردگی و مشخصات آن اعم از ضخامت ترک، مشخصات مکانیکی صفحات ترک، وضعیت بازشدگی صفحات ترک و... در دسترس نیست، در پژوهش حاضر تصمیم به بررسی چند دسته از ترک خوردگی با در نظرگیری احتمالات مختلف گرفته شده است. در دسته اول مشخصات مکانیکی صفحه ترک به نمایندگی زاویه اصطکاک صفحات مورد بررسی قرار گرفته شده است که بررسی‌ها برای چهار زاویه اصطکاک ۰,۲۵، ۰,۵۰، ۰,۷۵ و ۱,۰۰ انجام شده است. زاویه اصطکاک صفر به معنای باز شدن و جدایی زبری‌ها از دو طرف ترک است و در حضور آب بسیار محتمل است. زاویای دیگر در بازه رایج مهندسی است.

در دسته دوم تحلیل‌ها مقدار نفوذ ترک در ضخامت بدنه سد و تأثیر آن در عملکرد سد بررسی گردیده که در دو قسمت ترک در نصف ضخامت بدنه سد و ترک در کل ضخامت بدنه سد مورد مطالعه قرار گرفته شده است. سومین دسته از تحلیل‌ها به بررسی اثر طول ترک در عملکرد سد می‌پردازد. در این دسته اثر طول ترک در دو بخش مورد مطالعه قرار گرفته است.

بارگذاری این چند دسته از تحلیل‌ها مشابه سد سالم است، فقط با این تفاوت که یک مرحله تحلیل اضافه برای مشاهده اثر ترک خوردگی در نظر گرفته شده است. در این مرحله بارگذاری جدیدی علاوه بر بارگذاری‌های موجود سد، اضافه نشده است.

هرچند لازم به ذکر است این روند افزایش برای عمق نفوذ کامل ترک در ضخامت سد است که مشاهده شده است و برای عمق نفوذ نیمه ترک از آنجا که این حرکت‌ها رخ نمی‌دهند و یا بسیار ناچیز هستند افزایش هر دو تنش کششی و فشاری را در سد نمی‌توان مشاهده کرد.

مورد بعدی که تشدید کننده تنش‌ها در این بخش است، بازشدگی دهانه ترک (شکل ۵) در محل تلاقی با تکیه‌گاه سد است. همان‌طور که در بخش ابتدایی دیده شد این منطقه در بالادست خود دارای تنش‌های کششی است که اتفاقاً بیشترین تنش کششی سد را داراست. با غیرخطی عمل کردن صفحه ترک و عدم توانایی تحمل کشش در این صفحه، کشش ایجاد شده در این منطقه در محل صفحه از بین رفته و کشش به دو طرف تقسیم می‌شود. اما پس از تقسیم شدن مشاهده می‌شود که سهم تنش در قسمت پایینی بیشتر می‌شود و محل ماکزیمم تنش کششی در سد هم همین قسمت خواهد بود. از طرفی در پایین دست این قسمت افزایش تنش کششی خود را نمایان می‌کند و افزایش متناسب این دو را هشدار می‌دهد. این روند افزایش در عمق نفوذ کامل تا زاویه اصطکاک ۱۵ درجه مقدار زیادی نیست (حدود نیم مگاپاسکال کشش و در تنش‌های فشاری حدود ۱ مگاپاسکال)، ولی برای افت ضریب اصطکاک تا مقدار صفر که مربوط به زاویه اصطکاک صفر درجه بوده، این افزایش مقداری قابل ملاحظه است.

این طور برمی‌آید که در بیشتر نقاط صفحه ترک آستانه‌ی تحمل تنش برشی صفحه ترک زوایای اصطکاک بالای صفر درجه از مقدار تنش برشی ایجاد شده در صفحه، فاصله‌ای قابل ملاحظه داشته و لغزش‌های این نقاط روی صفحه ترک در محدوده لغزش‌های الاستیک است (مقادیر لغزش‌ها کم‌تر از ۲ میلی‌متر). بنابراین افزایش تنش برشی صفحه‌ی ترک از زاویه ۱۵ تا ۵۰ درجه مقدار کمی بوده (حدود نیم مگاپاسکال) و در الگوی تغییر حرکت صفحات ترک تفاوت خاصی دیده نمی‌شود جز آن‌که بزرگی لغزش صفحه‌ی پایینی در زوایای کوچک‌تر افزایش یافته است؛ اما به نظر می‌رسد با نزدیک شدن به تنش برشی صفر در صفحه ترک، لغزش‌ها در این صفحه به شدت افزایش یافته و دو پدیده را منتج خواهد شد. اولی افزایش شدید تنش‌های

ابتدا به بررسی تنش‌های بیشینه فشاری و کششی ایجاد شده در سد پرداخته شده است.

در طره‌ی ترک‌خورده برای دو طرف صفحه ترک (قسمت بالایی و پایینی بخش مورب ترک‌خوردگی که عمود بر تکیه‌گاه است)، بخش پایینی متحمل فشار آب بیشتر است (به دلیل بزرگی مقدار فشار آب در سطح بالادست سد) و همین بار آب بیشتر باعث حرکت بیشتر صفحه‌ی پایین نسبت به حرکت صفحه بالایی شده است. حرکت بیشتر صفحه پایینی و در نتیجه بخش پایینی طره ترک خورده و با توجه به مقید بودن این قسمت در محل تلاقی با تکیه‌گاه و گیردار بودن آن، افزایش چرخش این قسمت را به دنبال خواهد داشت که افزایش لنگر خمشی را در این محل به ارمغان خواهد آورد. در نتیجه این اتفاق، تنش‌های کششی در بالادست این بخش و تنش‌های فشاری (شکل ۴) پایین دست این محل که ریشه طره هم هست افزایش می‌یابند.

شکل ۳. بیشینه تنش کششی ایجاد شده در سد به ازای زوایای اصطکاک مختلف مفروض در سطح ترک خوردگی

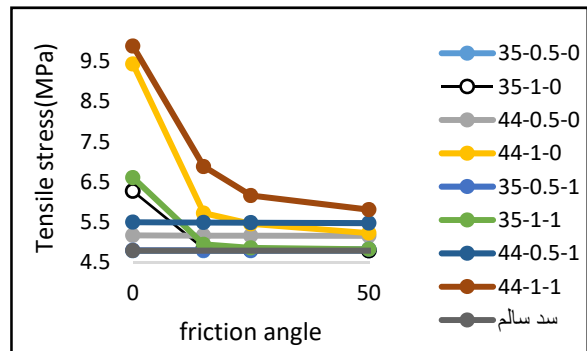


Fig 3. Maximum tensile stresses for different friction angle of crack surface

شکل ۴. بیشینه تنش فشاری ایجاد شده در سد به ازای زوایای اصطکاک مختلف مفروض در سطح ترک خوردگی

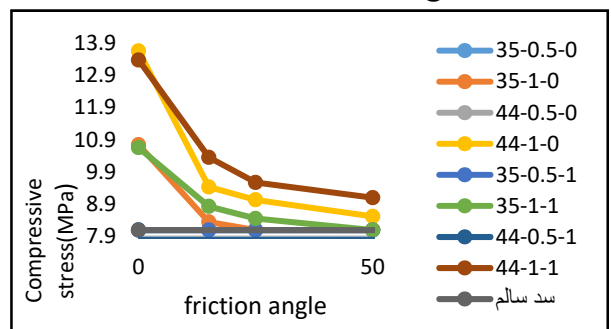


Fig4. Maximum compressive stresses for different friction angle of crack surface

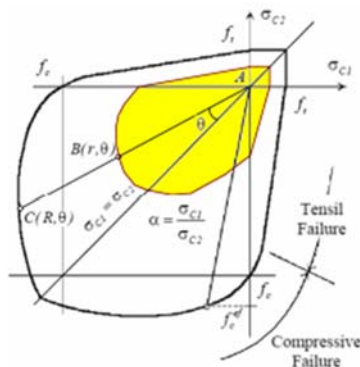
با کاهش زاویه اصطکاک سطح ترک مقدار تنش برشی بحرانی τ_{cr} برای لغزش صفحه ترک کاهش می‌یابد و به دنبال آن از آنجا که تنش برشی ناشی از بارهای وارده روی این صفحه ثابت هستند، نقاط بیشتری از سطح ترک لغزیده می‌شوند. این لغزش‌ها بستر مناسبی برای بازشدگی را در نقاط بیشتری فراهم کرده و مکانیسم باربری طره برای این طره ترک‌خورده غالب تر شده و در نتیجه آن، تنش‌ها در پای طره در محل ریشه افزایش می‌یابند. البته بررسی‌ها نشان می‌دهند این قسمت تا قبل از ترک‌خوردگی، تحت فشار بوده و البته با وجود اعمال صفحه ترک هم صفحات ترک در بیشتر مناطق به هم فشار می‌آورند، که این فشار مانعی اصلی در رشد ترک در نوک آن واقع در بالای قسمت عمودی ترک است.

برای حالتی که عمق نفوذ ترک نصف ضخامت سد است، از آنجا که در قسمت پایین دست ترک، سد انسجام خود را حفظ نموده و تنش‌های فشاری در بدنه سد هنوز وجود دارد، بازشدگی‌های صفحه ترک در باربری قوس در این منطقه خلل خاصی ایجاد نکرده (حتی با وجود نفوذ آب در ترک و اعمال فشار آب بر رویه‌های ترک) و این بازشدگی‌ها در سطح بالادست ترک تنش قابل ملاحظه‌ای بر تنش‌های ریشه طره ترک‌خورده نیفزوده است.

۱-۵- ضریب اطمینان تنشی در برابر گسیختگی بتن

برای محاسبه ضرایب اطمینان موجود بدنه سد از معیار گسیختگی کوپفر-گرتسل (۱۹۷۳) استفاده شده است (شکل ۶) [9].

شکل ۶. پوش گسیختگی کوپفر-گرتسل



Kupfer-Gretsel failure criteria

کششی و فشاری در ریشه ۱ طره ترک‌خورده است که به شدت ضرایب اطمینان شکست کششی و فشاری بتن را در این ناحیه کاهش داده و حتی وارد ناحیه خرابی می‌کند. مورد دوم مربوط به افزایش تنش کششی در نوک ترک در قسمت موازی درز انقباض است که در صورت اضافه کردن نیروی آب نفوذ کرده در ترک این افزایش تنش کششی در نوک ترک هم محسوس خواهد بود.

اما در طره‌های دیگر باید گفت که الگوی تنش سد و مقادیر تنش، همچنین حرکت درزهای انقباض، با توجه به این که زاویه اصطکاک بین درزهای انقباض ثابت و ۵۰ درجه فرض شده است و این مقدار در همه‌ی موارد حساسیت سنجی شده با اختلاف بسیار کمی یکسان بوده، در اثر کم شدن زاویه اصطکاک سطح ترک و افزایش تنش‌ها در ریشه طره‌ی ترک‌خورده تغییر محسوسی نکرده‌اند و این برای تمامی حالات مشاهده شده است. این بدین معناست که ترک‌خوردگی حتی با وجود احتمالاتی بودن ذاتش -از جمله زوایای مختلف اصطکاک سطح ترک و نفوذ آب در آن و عمق نفوذش در ضخامت بدنه سد و همچنین طول قسمت عمودی ترک که موازی درزهای انقباض سد است- در عملکرد دیگر طره‌های سد اثر ناچیزی دارد که قابلیت نادیده گرفته شدن حتی در بدترین حالت را نیز دارند. بازشدگی صفحه ترک هرچه بیشتر اتفاق می‌افتد طره‌ی ترک‌خورده عملکرد قوسی خود را بیشتر از دست می‌دهد و مکانیسم باربری طره بیشتر فعال می‌شود. این موضوع سبب افزایش‌های ناهنجار تنش‌های پای طره‌ی ترک‌خورده شده است.

شکل ۵. بیشینه بازشدگی دهانه صفحه ترک به ازای زوایای اصطکاک مختلف مفروض در سطح ترک‌خوردگی

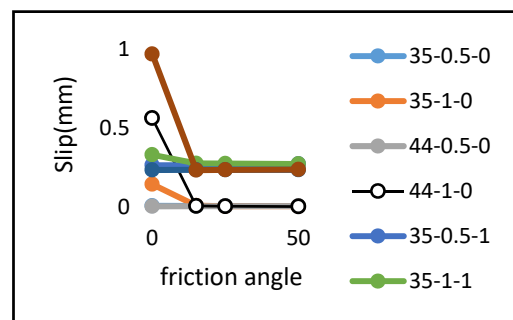


Fig.5. Maximum Crack Opening Depth

یافته و با اضافه کردن فشار آب به داخل ترک این افت ها تا حدود دو الی سه برابر شده و این خطرناک بودن این دسته از ترکها را نشان می‌دهد. اما برای بخش بالایی طره در این حالت نیز افت‌های چشمگیری اتفاق نیافتاده است. اما درصد افت‌های منفی نشان‌دهنده افزایش ضرایب اطمینان در جدول به دلیل کاهش مقدار تنش و در نتیجه بالا رفتن ضرایب اطمینان است. شکل ۸. مقایسه درصد افت ضرایب اطمینان‌های طره حاوی ترک ۴۴ متری بر اثر حالت‌های مختلف ترک و نفوذ آب در بخش دوم طره

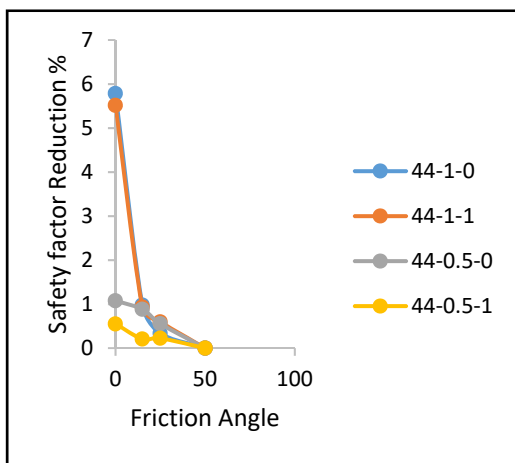


Fig.8.Reduction of Safety Factor or Cracked cantilever (44-meter Crack) for different situation of Cracking in second section of cantilever

شکل ۹. مقایسه درصد افت ضرایب اطمینان‌های طره حاوی ترک ۴۴ متری بر اثر حالت‌های مختلف ترک و نفوذ آب در بخش اول طره

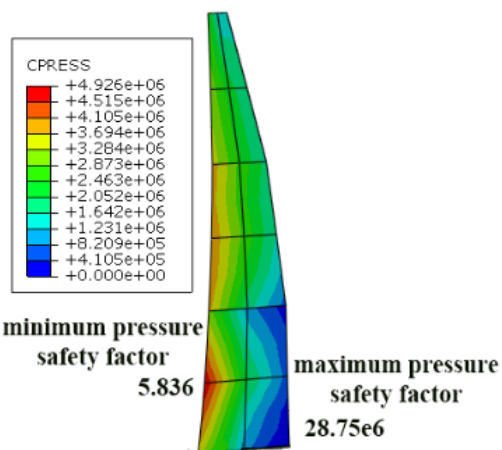


Fig 9. Reduction of Safety Factor for Cracked cantilever (44-meter Crack) for different situation of Cracking in first section of cantilever

شکل ۷. توزیع فشار روی سطح بین طره های سوم و چهارم در طرفین طره مرکزی تحت بارگذاری وزن، فشار آب، نفوذ آب در ترک و بدست آوردن بیشینه و کمینه ضرایب اطمینان فشاری

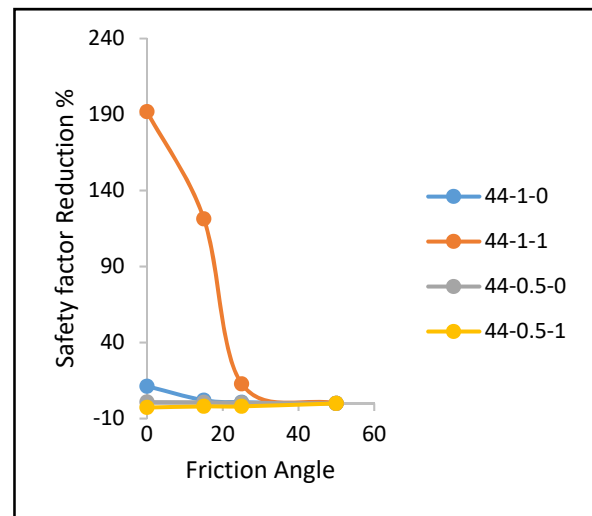


Fig.7.Disturbance of Pressure between the third and fourth cantilever for each side of Crown section cantilever under Weight, Hydrostatic, Water Penetration loading conditions, and calculating minimum safety factor

برای رفتارهای مختلف ترک که در قسمت‌های پیشین حساسیت سنجی شدند، ضرایب اطمینان به شرحی که در بالا آمد محاسبه گردید. برای طره‌هایی که ترک در آن‌ها دخیل نبوده است، میانگین درصد افت ضرایب اطمینان در نقاط انتگرال گیری مقادیری بسیار کم مشاهده می‌شود (شکل ۷). برای طره‌ای که ترک خوردگی در آن واقع شده ضرایب اطمینان به دست آمده و افت آن‌ها (اشکال ۸ تا ۱۰) با طره‌های دیگر شرحی متفاوت دارد. این طره بعد از ترک خوردگی به دو قسمت تقسیم شده که قسمت پایین بخش اول طره ترک خوردگی نامیده شده و قسمت بالای صفحه ترک بخش دوم طره نامگذاری شده است. برای ترک ۴۴ متری به عنوان مثال ضرایب اطمینان این دو بخش از طره‌ها در سطح رویه‌های بالادست و پایین دست محاسبه شد و نتایج حاصل از میانگیری این ضرایب اطمینان‌ها، با سد بدون ترک مقایسه شد.

نتایج حاکی از این است که در

عمق نفوذ های ترک در نصف ضخامت بدنه سد افت‌های بسیار کمی حتی با وجود زاویه اصطکاک پایین و نفوذ آب در داخل ترک اتفاق افتاده است. اما با افزایش عمق ترک به کل ضخامت بدنه سد، این درصد افت‌ها در بخش اول طره افزایش

۲-۵- ضرایب اطمینان مربوط به درزهای انقباض

درزهای انقباض که رفتاری فشاری-برشی از خود نشان می‌دهند در برابر فشار و تنش برشی باید ضرایب اطمینان مد نظر را ارضا نمایند. این ضرایب اطمینان در سطح درزها با استفاده از معیار موهر-کولمب محاسبه شده‌اند که به قرار زیر

$$[10]: \text{است:} \quad (\sigma_t = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \rightarrow (S.F.)_s = \frac{\sigma_n \tan \phi}{\sigma_t}) \quad (1)$$

$$(2) \quad \left((S.F.)_c = \frac{f_c}{\sigma_n} \right)$$

در این روابط σ_t تنش برشی معادل در صفحه درز، و σ_n تنش فشاری وارد بر صفحه درز هستند و f_c مقاومت فشاری تک محوره بتن و ϕ نیز زاویه اصطکاک صفحه درز است که برای محاسبه ضرایب اطمینان استفاده گردیده است.

برای مدل‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته در قسمت‌های پیشین برای تمامی درزهای انقباض مقادیر این ضرایب اطمینان با اختلافاتی بسیار کم مشابه هم بوده، و از سطح ایمنی مناسبی برخوردار هستند.

شکل ۱۲. توزیع ضریب اطمینان برشی روی صفحه درز طره مرکزی و طره های مجاور آن تحت بارگذاری وزن، فشار آب و نفوذ آب در ترک

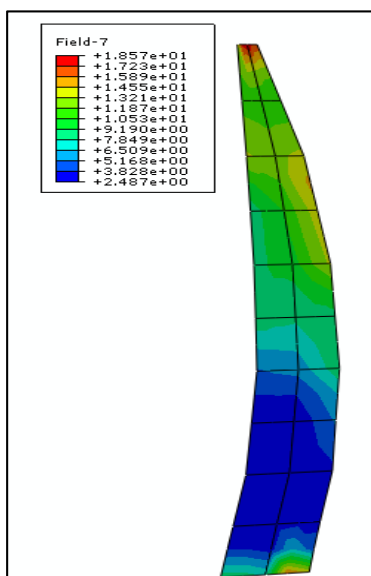


Fig.12. Shear safety contour on contraction joint between center crown and adjacent cantilever

شکل ۱۰. تغییرات ضریب اطمینان برای طره ترک خورده با ترک ۳۵ متری و عمق نفوذ کامل در ضخامت پوسته همراه با فشار آب در رویه ترک. انتهای مرحله ساخت (بار وزن).

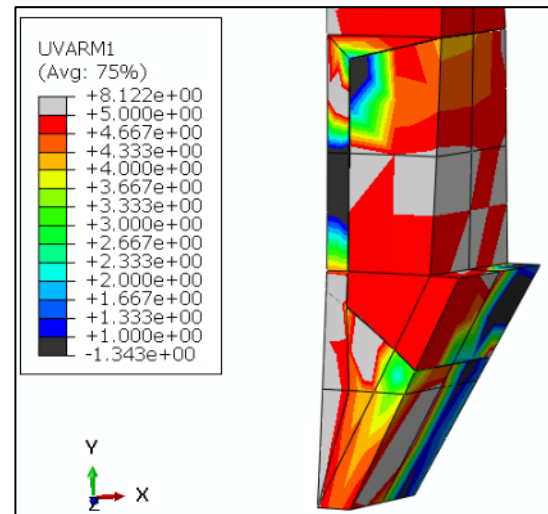


Fig 10.. Safety coefficient variations for cracked cantilever (35-meter crack), full depth of crack with water penetration into the crack. 1. On right, after construction step

شکل ۱۱. تغییرات ضریب اطمینان برای طره ترک خورده با ترک ۳۵ متری و عمق نفوذ کامل در ضخامت پوسته همراه با فشار آب در رویه ترک. سمت چپ، بعد از اعمال بارهای وزن و فشار آب و نفوذ آب در ترک

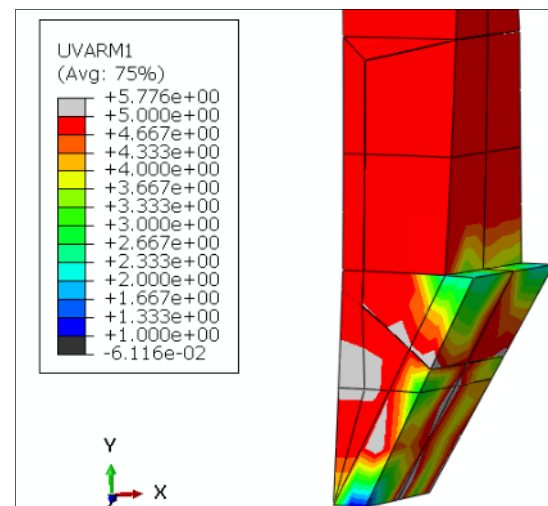


Fig. 11. Safety coefficient variations for cracked cantilever (35-meter crack), full depth of crack with water penetration into the crack. 1. On right, after construction step. 2. On left, after applying Weight, Hydrostatic and Water penetration.

نصف ضخامت نفوذ نموده، مقایسه تنش‌های فشاری سطح ترک نشان داد که تقریباً فشار داخل صفحه ترک ثابت باقی می‌ماند. لذا ضریب اطمینان فشاری این دسته از ترک‌ها با حاشیه امن بالایی از مقاومت فشاری بتن فرار گرفته است. برای ترک ۴۴ متری مقدار کمینه ضریب اطمینان فشاری در فشار بیشینه معادل ۳,۴۴۱ مگاپاسکال عدد ۸,۳۵ به دست آمد که نشان می‌دهد این دسته از ترک‌ها در مقابل فشار ضریب اطمینان بالایی از خود نشان می‌دهند (شکل ۱۲). برای ضرایب اطمینان برشی هم مقایسه زیر قابل بررسی است. در زاویه اصطکاک ۵۰ درجه محدوده ضرایب اطمینان با مقادیر کمتر از ۵ بسیار محدوده کوچکی است که می‌توان این زاویه را از نظر ایمنی در سطح خوبی قرار داد. زوایای ۱۵ و ۲۵ درجه تقریباً عملکرد مشابهی دارند که محدوده ای در قسمت عمودی ترک به محدوده ضریب اطمینان کمتر از ۳ به آن‌ها افزوده شده و نشان دهنده این است که با کاهش زاویه اصطکاک در این دسته ترک‌ها سطح عملکردی کاهش می‌یابد. ولی با این وجود می‌توان حتی این ترک‌ها را در مقابل تنش برشی ایمن توصیف نمود. در مورد زاویه اصطکاک صفر درجه هم باید به نداشتن هیچ‌گونه ضریب اطمینانی در برابر لغزش و تنش برشی اذعان داشت (شکل ۱۳).

ملاحظه شد که درزهای انقباض تحت اثر فشار ضرایب اطمینان بالایی را دارا هستند و حتی با وجود بارگذاری غیرعادی نفوذ فشار آب در داخل ترک، در کمترین حالت ضریب اطمینان فشاری ۵,۸۳۶ را در درز بین طره های سوم و چهارم از دو طرف طره مرکزی دارا هستند (شکل ۷). در مورد ضرایب اطمینان برشی سطوح درزه نیز در حالت‌های مختلف همان نتایج قابل مشاهده است.

ملاحظه می‌شود که ضریب اطمینان برشی سطوح درز نیز وضعیت مناسبی دارند و در بدترین حالت حدود ۲,۵ بوده که برای بارگذاری عادی و غیر عادی سد مقدار مناسبی به نظر می‌رسد. هرچند ناحیه‌ای هم که این مقدار ضریب اطمینان را دارد نیز ناحیه بزرگی نیست و باقی ضرایب در محدوده‌های بزرگ‌تری قرار دارند (شکل ۱۱).

۳-۵- ضرایب اطمینان صفحه ترک

برای صفحه ترک مشابه سطوح درزها دو ضریب اطمینان فشاری و برشی مطرح است که طبق روابط ذکر شده در قسمت قبلی محاسبه خواهند شد. این ضرایب اطمینان برای حالت‌های مختلف عدم و حضور آب در داخل ترک محاسبه شده ولی برای اختصار نتایج‌های مربوط به حضور آب در ترک که حالت‌های بحرانی‌تر هستند به صورت گرافیکی آمده است. اما شرح کلی به صورت زیر است. برای مدل‌هایی که ترک در

شکل ۱۳. توزیع فشار صفحه ترک برای عمق نفوذ نصف ضخامت پوسته و ارتفاع ۴۴ متری با زاویه های اصطکاک مختلف ضرایب اطمینان برشی صفحه ترک ۴۴ متری برای عمق نفوذ نصف ضخامت پوسته با زاویه های اصطکاک مختلف

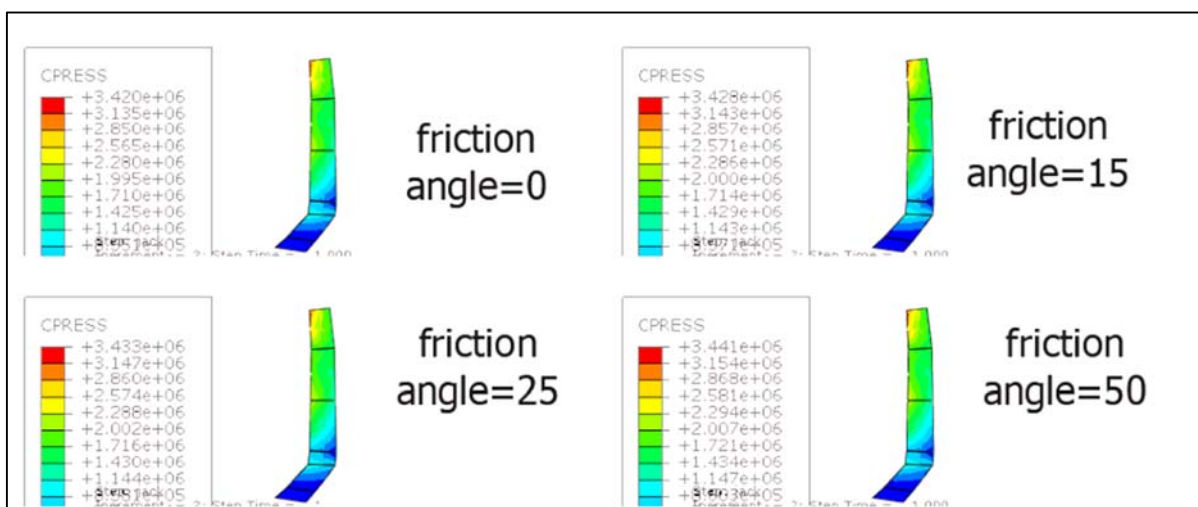


Fig 13. Shear safety counter for 44-meter crack surface with half depth in dam thickness for various friction angles.

شکل ۱۴. ضریب اطمینان برشی برای سطح بالادست ترک ۳۵ متری با عمق نفوذ کامل ضخامت پوسته با زوایای اصطکاک مختلف

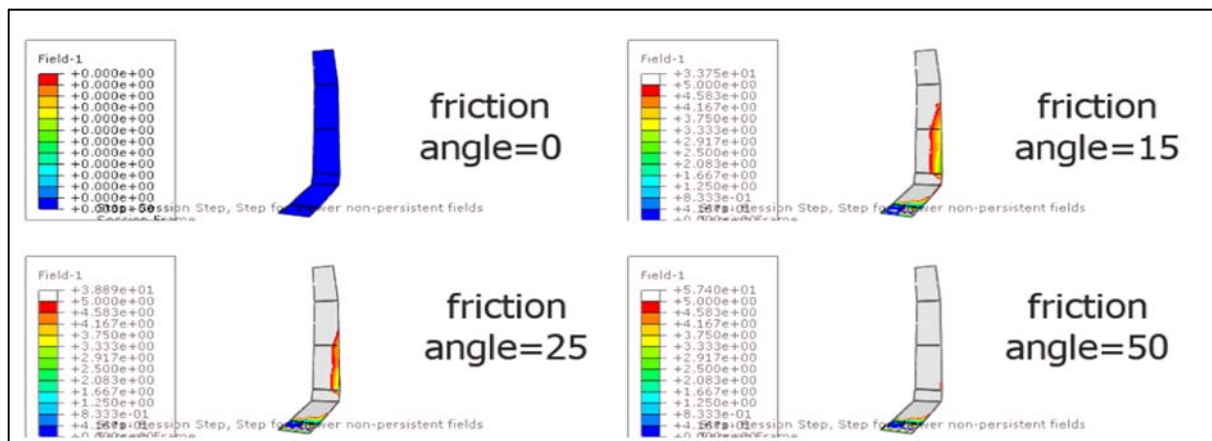


Fig.14. Shear safety counter for 35-meter crack surface (full depth penetration) for upstream face

کاهش می‌یابد (شکل ۱۵) ولی حتی این کاهش هم سطح ایمنی بالایی را برای سطح ترک در برابر فشار نشان می‌دهد. برای سطح بالادست ترک با کاهش زاویه اصطکاک ضرایب اطمینان افت می‌کنند. برای زاویه ۵۰ درجه سطح ایمنی مناسبی در برابر تنش برشی موجود است (شکل ۱۴). برای زاویه ۲۵ درجه ضرایب افت محسوسی دارند به طوری که پراکندگی کلی آن‌ها در حدود ۲ است که مرزی برای بارگذاری‌های غیرعادی به شمار می‌رود. زاویه اصطکاک صفر هم که مطابق انتظار تحملی در برابر لغزش نخواهد داشت. برای سطح پایین دست سد نیز در زاویه اصطکاک ۵۰ درجه ضرایب اطمینان بالا قابل مشاهده است. و با کاهش زاویه اصطکاک این ضرایب کاهش یافته‌اند و حالت‌های ۲۵ و ۱۵ درجه ضرایب ایمنی در محدوده ۱,۵ تا ۲,۵ را نشان می‌دهند. برای ترک ۴۴ متری فشار ضرایب اطمینان بالا حاکی از آن است که این ترک تحت اثر فشار وضعیت مناسبی از نظر ایمنی را برخوردار است. برای سطح بالادست این ترک به جز زاویه ۵۰ درجه که ضرایب اطمینان مناسبی را داراست با کاهش زاویه اصطکاک از ۲۵ به صفر افت ضرایب اطمینان مشاهده می‌شود که حتی زاویه اصطکاک ۲۵ درجه نیز ضرایب مناسبی برای تأمین ایمنی لازم سد را دارا نیست. شرایط در سطح پایین دست سد نیز مشابه آنچه در مورد سطح بالادست ترک گفته شد حاکم است و برای زوایای اصطکاک پایین‌تر از ۵۰ درجه وضعیت ایمنی برای سطح ترک در برابر تنش‌های برش و لغزش دیده نمی‌شود.

برای ترک ۳۵ متری نیز مقادیر بیشینه فشار وارد بر سطح ترک و کمینه ضریب اطمینان فشاری برابر با ۲,۴۴۳ مگاپاسکال و ۱۱,۷۷ می‌باشند که حاکی از ایمن بودن این دسته ترک‌ها در بارگذاری‌های موجود در برابر فشار است. در زاویه اصطکاک ۵۰ درجه، به دلیل تنش برشی‌های ایجاد شده تحت اثر اصطکاک در سطح ترک کسر ضریب اطمینان بزرگ شده و ضریب اطمینان کاهش می‌یابد. مناطق کانتور شده مناطق با ضریب اطمینان کمتر از ۵ هستند. کمترین مقدار در این حالت ۰/۴ است که نشانگر ضعف سطح ترک در برابر تنش برشی است. برای زاویه اصطکاک‌های ۱۵ و ۲۵ درجه با کمتر شدن تنش برشی سطح ترک کسر ضریب اطمینان کوچک‌تر شده و ضرایب اطمینان بالاتر می‌روند. درست است که مقدار ضریب اطمینان حداقل در این دو مورد هم نزدیک ۰,۴ است ولی محدوده‌ای از سطح ترک که نسبت به زاویه ۵۰ درجه ضرایب اطمینان کمتر از ۳ دارد محدوده بزرگ‌تری است و این نشانگر این است که این دو زاویه اصطکاک شرایط بهتری رقم می‌زنند. اما زاویه اصطکاک صفر درجه که هیچ کدام از صورت و کسر ضریب اطمینان را ندارد (هر دو صفر)، در برابر تنش برشی نمی‌تواند ایمنی و مقاومتی از خود نشان دهد و در نتیجه سطح ایمنی پایینی را به خود اختصاص خواهد داد.

اما در مورد ترک‌هایی که در کل ضخامت سد نفوذ کرده‌اند نتایج زیر قابل بحث هستند:

برای این دسته از ترک‌ها (۳۵ متری) با کاهش زاویه اصطکاک ترک ضریب اطمینان در برابر فشار در سطح ترک

شکل ۱۵. توزیع فشار و محل ضریب اطمینان فشاری حداقل برای ترک ۳۵ با عمق نفوذ کامل در بدنه سد

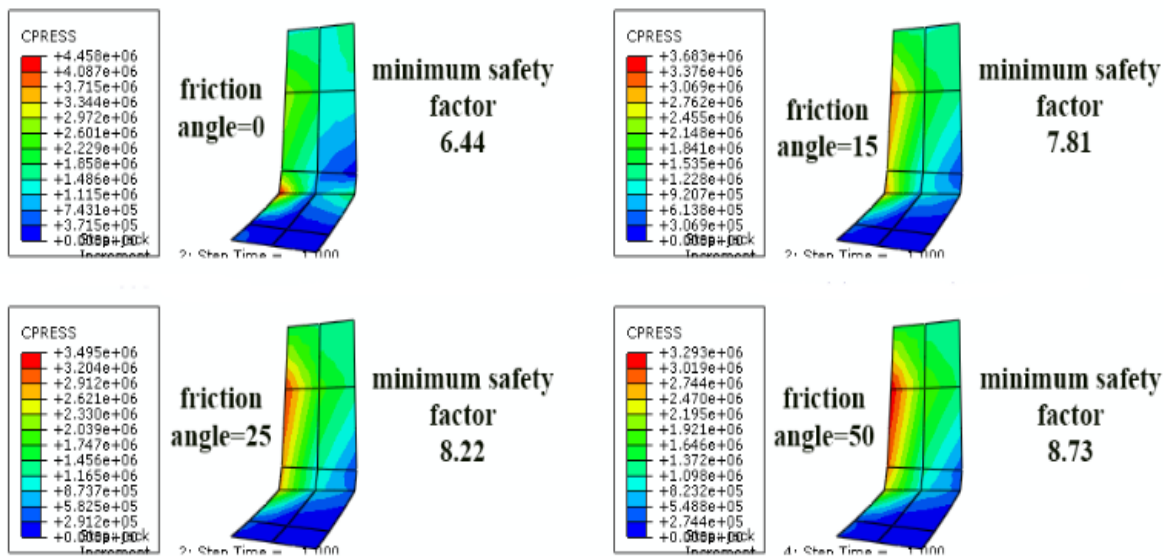


Fig 15. Contact pressure counter and minimum compressive safety factor for 35-meter crack full depth in dam thickness for various friction angles.

برشی پی به دلیل افزایش تنش فون میزس در محل اتصال سد و پی در قسمت ترک خورده است. نکته دوم افزایش تغییر مکان های این قسمت است که بدون شک در رفتار سد حائز اهمیت است. شکل ۱۶. نمودار تنش- کرنش غیرخطی بتن استفاده شده برای تحلیل غیرخطی

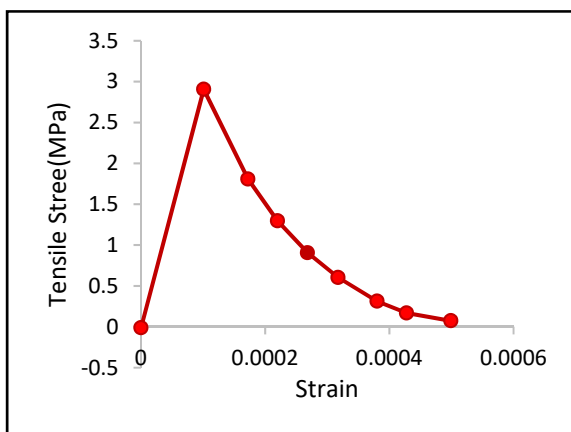


Fig.16 Nonlinear Stress-Strain diagram for concrete

۶- بررسی رشد ترک در سد و تنش های تکیه گاه

با وجود اینکه تحلیل صرفا به افت ضریب اطمینان و ارزیابی میزان خطر توسعه رشد ترک پرداخته که جنبه قضاوت مهندسی مهمی را برای آینده سد تامین میکند، هدف تحلیل نحوه و میزان رشد ترک نبوده و فقط آستانه خطر ارزیابی شده است. از آنجا که این ترک با رشد خود ضرایب اطمینان را همراه خود کاهش داده، لذا برای ترک در ضخامت ترک خوردگی کل سد، تحلیل غیرخطی مصالح بتن [11] (شکل ۱۶) انجام گردید تا امکان توسعه و رشد این ترک خوردگی بررسی شود. بخش های خاکستری موجود در کانتور آسیب بتن ناشی از خطای برون یابی نرم افزار بوده که این مقدار به مقدار عددی یک برای نمایش محدود شده است.

در تحلیل های مربوط به زاویه اصطکاک صفر آسیب در نوک ترک مشاهده می شود که حاکی از امکان توسعه و رشد ترک در این شرایط است (شکل ۱۷). نکته اول افت ایمنی

شکل ۱۷. کانتور خرابی کششی برای ترک ۳۵ متری (پایین) و ترک ۴۴ متری (بالا) با عمق نفوذ کامل ضخامت پوسته در حالت سطوح ترک بدون اصطکاک

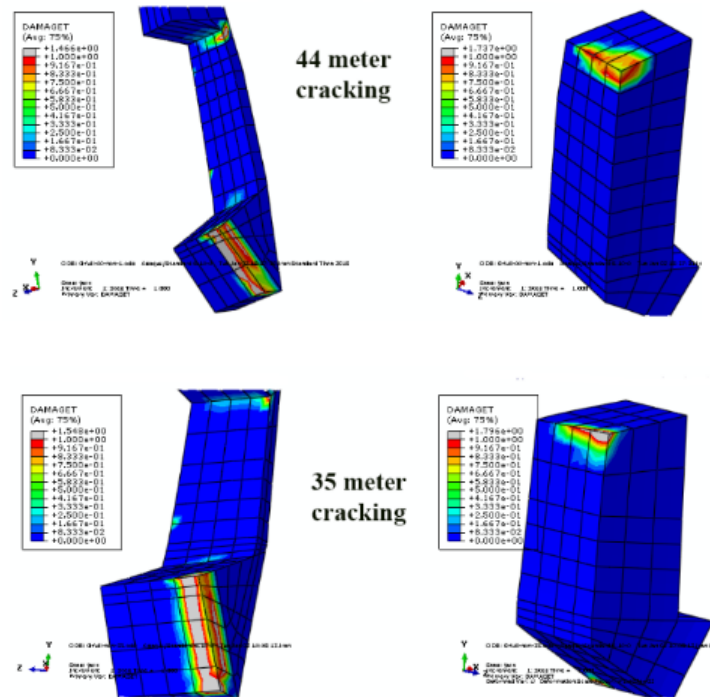


Fig 17. Tensile Damage counter for 35-meter crack (down) and 44-meter crack (up) with full depth of crack on dam thickness- zero friction angle

۷- نتیجه گیری

۷-۱- ترک‌های با عمق نفوذ نصف در ضخامت بدنه سد بدون بارگذاری فشار آب در ترک

برای این دسته از ترک‌ها مشاهده گردید که سد انسجام خود را حفظ نموده و تنش‌های بیشینه سد مقدار قبلی خود را تقریباً حفظ نموده و ضرایب اطمینان مناسبی برای عملکرد سد، چه در بدنه‌ی سد، چه در درزهای انقباض و چه در سطح ترک خوردگی را داراست. این موضوع برای ترک ۳۵ متری و ترک ۴۴ متری صادق بوده، و بازشدگی صفحه ترک در حدی نیست که منجر به کاهش عملکرد قوسی در این ناحیه و آسیب به سد شود.

۷-۲- ترک‌های با عمق نفوذ نصف در ضخامت بدنه سد با نفوذ آب در ترک و اعمال فشار آب در آن

برای این دسته از ترک‌ها اگرچه بازشدگی صفحه‌ی ترک افزایش یافت، ولی افزایش چشمگیر و قابل ملاحظه‌ای در مقادیر تنش‌های طره‌ی ترک خورده مشاهده نشد.

۷-۳- ترک‌های با عمق نفوذ کامل در ضخامت بدنه سد بدون نفوذ آب در ترک

در این دسته از ترک‌ها با کاهش زاویه اصطکاک صفحه ترک از مقداری مناسب (۵۰ درجه در این پژوهش) و میل کردن به سمت صفر درجه، کاهش عملکرد قوسی در طره‌ی ترک خورده مشاهده می‌شود که همین پدیده علت بالا رفتن تنش‌های کششی و فشاری در پای طره‌ی ترک خورده است. این افزایش‌ها با بیشتر شدن طول ترک مقادیر بزرگ‌تری به خود دیده و نشانگر این هستند که اگر ترک به دلایلی رشد نمود و بالاتر رفت، وضعیت عملکردی و ایمنی آن وخامت بیشتری پیدا خواهد کرد. هرچند در طره‌های دیگر و درزهای انقباض سد مشکلی مشاهده نشده، ولی همین نکته خطرناک بودن ترک خوردگی حاضر و خاموش بودن تحرکات آن را در پالایش کلی بدنه سد یادآور می‌شود.

۸- مراجع

- [1] Wieland, M. Seismic design and performance criteria for large storage dams. in 15th World Conference on Earthquake Engineering. 2012.
- [2] Commission, F.E.R., Engineering guidelines for the evaluation of hydropower projects. Chapter 11-Arch Dams. Washington DC, 1999. **20426**: p. 11-18.
- [3] Bažant, Z. Recent advances in fracture mechanics, size effect and rate dependence of concrete: implication for dams. in Proc., Int. Workshop on Dam Fracture and Damage. 1994.
- [4] Visser, J.H.M., Extensile hydraulic fracturing of (saturated) porous materials. 1998: TU Delft, Delft University of Technology.
- [5] Bruce, D.A. and P. De Porcellinis, Sealing cracks in concrete dams to provide structural stability. Hydro Review, 1991. **10(4)**: p. 116-124.
- [6] Engineers, U.S.A.C.o., Engineering and Design, ARCH DAM DESIGN. 1994.
- [7] Simulia, ABAQUS-Documantation.
- [8] Soltani, N., Evaluation of the causes of cracking and abnormal displacements in concrete arch dams, in Hydraulic Structures. 1394, Tarbiat Modares University.
- [9] Kupfer, H.B. and K.H. Gerstle, Behavior of concrete under biaxial stresses. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1973. **99(4)**: p. 853-866.
- [10] Bayat, V., Safety and performance evaluation of cracked concrete arch dam under service loads and water penetration in crack, in Hydraulic Structures. 1396, Tarbiat Modares University.
- [11] Alembagheri, M. and M. Ghaemian, Seismic performance evaluation of a jointed arch dam. Structure and Infrastructure Engineering, 2016. **12(2)**: p. 256-274.

۴-۷- ترک‌های با عمق نفوذ کامل در ضخامت بدنه سد با نفوذ آب در ترک و اعمال فشار آب در آن

با توجه به اینکه در این دسته از ترک‌ها کاهش عملکرد قوسی سد در طره‌ی مربوط به ترک خوردگی مشاهده می‌شود، افزایش تنش‌های فشاری و کششی در ریشه طره امری مطابق پیش‌بینی خواهد بود. اما بار فشار آب اعمالی بر دیواره‌های ترک خوردگی عاملی تشدید کننده بوده و باعث تشدید در کاهش عملکرد قوسی می‌شود. افت شدیدتر ضرایب اطمینان در این حالات نسبت به حالات بدون نفوذ آب حاکی از این است که این دسته از ترک‌ها بحرانی‌ترین حالات بررسی شده باید نام‌گذاری گردند.

۵-۷- بررسی آسیب در سد قوسی ترک خورده و ارزیابی روند توسعه و رشد ترک خوردگی

از حالات بررسی شده برای پیگیری روند توسعه آسیب و ترک خوردگی، برای نوک ترک جز ۲ حالت که برای عمق نفوذهای کامل و زاویه اصطکاک صفر درجه، برای ترک‌های ۳۵ و ۴۴ متری، که در هر دو حالت روند توسعه ترک در نوک آن مشاهده گردید، توسعه ترک به سمت تاج سد دیده نمی‌شود و این خبر از آرام بودن ترک در قسمت بالایی آن می‌دهد. اما در ریشه‌ی طره ترک خورده مشاهدات حاکی از آن هستند که کاهش ضریب اصطکاک صفحه ترک موجب افزایش خرابی کششی ریشه طره و همچنین افزایش تنش‌های فشاری را در این ناحیه به همراه دارد. که در صورت افزایش خرابی‌های کششی امکان شکست فشاری در نقاطی از ریشه‌ی طره‌ی ترک خورده دور از تصور نیست.

۶-۷- وضعیت پی با آسیب سد ترک خورده

هرچند بررسی‌های انجام شده در این بخش اجمالی و مختصر بوده، اما افزایش تنش‌های میزس در حباب تنش مربوط به تکیه‌گاه چپ در محل اتصال طره ترک خورده و پی، نشانگر این موضوع هستند که امکان نفوذ ترک خوردگی در پی وجود داشته و تنش‌های بالای لهیدگی و برشی خبر از تأثیرگذاری شدید سد و پی در این ناحیه و امکان بروز مشکلات جدی در پی می‌دهند.

Evaluation of structural safety reduction due to reservoir water penetration into a major structural crack in a large concrete dam.

V. Bayat¹, M.T. Ahmadi²

- 1- M. Sc. Graduate Student of Civil Eng. Tarbiat Modares University
- 2- Prof, Department of Civil Eng., Tarbiat Modares University

Mahmadi@modares.ac.ir

Abstract

Structural damages in arch dams, are often of major concern and should inevitably be evaluated for probable rehabilitation to ensure safe regular normal operation and safe behavior in future under unusual loading. These are crucial to prevent any catastrophic or failure consequences for the life time of the dam. If there is a specific major infection such as a large crack in the dam body, the assessments will be necessary to determine the current level of safety and predict the resistance of the structure to various future loading, such as earthquakes, etc. In this research, Morrowpoint dam is selected as a case study to assess the dam performance and its safety level, at the presence of an actual crack with almost known geometry created in the dam body during the sequence of its reservoir first impounding. Three-dimensional modeling of the dam and its foundation is constructed for several different crack types with specific geometry and different mechanical properties. For modeling of both the existing cracks, and the vertical contraction joints of the arch dam, no-tension, zero-thickness joint elements with variable compression-shear behavior are used. The applied loads include normal or service loads (weight and hydrostatic water pressure) as well as abnormal load of water penetration into the crack surface. In the first set of analyses, concrete material is assumed as linear. By observing the high tensile stresses, non-linear concrete materials with plastic damage model is introduced for selected cases although the foundation materials remain as linear. Safety factors of shear and compressive tractions are calculated at the surfaces of the contraction joints and the cracks. For the safety factor of the dam body mass concrete surfaces, a 2-D failure criterion is employed. In applying the weight load, the construction sequence of 3D blocks of the dam, and the stages of grouting the contraction joints have been fully accounted for. The results indicate that for cracking with an extension depth of half the thickness of the dam body, for both cases of penetration and non-penetration of water load into the cracks, safety factors are only slightly reduced and thus the dam safety in normal loading condition remains acceptable. However, in the case of increasing the depth of crack extension into the entire thickness of the dam body, the friction angle of the cracked surface is crucial, and if reduced, the normal loading safety factors of stresses and joints tractions are reduced significantly even when neglecting water penetration effects in cracks. When water penetration into the cracks is added during normal loading case, the situation is of much concern and great damages are expected. Simultaneously, it is observed that, the foundation interface also suffers of much shear safety loss.

Keywords: Arch concrete dams, Cracking, Safety and Performance Evaluation, Stage Construction, Morrow Point dam.