

تحلیل سه‌بعدی گسترش ترک در سد بتنی پشت‌بند دار لتیان با استفاده از روش ترک پخشی

محمد رحیمیان

دانشیار گروه مهندسی عمران - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

آذین امینی

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد سازه - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۱/۶/۲۰، تاریخ تصویب ۸۲/۳/۳)

چکیده

اجرای سد بتنی پشت‌بنددار لتیان در سال ۱۳۴۶ به پایان رسید. براساس نتایج دستگاههای ابزار دقیق سد تا سال ۱۳۴۹ در وضعیت مناسبی قرار داشته و جایابی آن در حد معقولی بوده است. برای اولین بار در مرداد ماه ۱۳۴۹ ترکهایی با امتداد قائم در پشت‌بند ۱۰/۱۱ سد ظاهر شدند. این ترکها در هر دو دیواره اتاقک دریچه واقع شده‌اند و از لحاظ رقوم ارتفاعی از تراز تاج سد تا کف اتاقک دریچه امتداد یافته‌اند. عملیات علاج بخشی این ترکها در زمستان ۱۳۴۹ با تزریق اپوکسی انجام شد، ولی به علت از بین رفتن علت اصلی مولد ترک این ترکها مجدداً در تابستان ۱۳۵۰ باز شدند. اندازه‌گیری روند بازشدگی ترکها نشان می‌دهد که ترکها دارای روند باز و بسته شدن نسبت به تغییرات فصلی دما می‌باشند. با توجه به این تغییرات منظم بازشدگی ترک با دمای محیط و با در نظر گرفتن محل وقوع ترکها به نظر می‌رسد که تغییرات فصلی دما مولد ترک در بلوک ۱۰/۱۱ بوده است.

در این مقاله، آنالیز اجزای محدود ترک‌خوردگی و گسترش آن در پشت‌بند ۱۱/۱۰ سد لتیان، با استفاده از مدل ترک پخشی و براساس مفاهیم مکانیک شکست غیر خطی، جهت بررسی مساله ترک‌خوردگی در آن تحت اثر اعمال بارهای استاتیکی انجام شده است.

در ابتدا با انجام تحلیل انتقال حرارت، توزیع درجه حرارت در بدنه سد در فصول سرد و گرم سال بدست می‌آید. در ادامه، با اعمال ترکیبات مختلف بارهای استاتیکی بر بدنه سد، بارگذاری مولد ترک تعیین می‌گردد. در مرحله بعد تحلیل استاتیکی غیر خطی تحت اثر بارگذاری سیکلی حرارتی انجام می‌شود و بارها به ترتیبی که بر سد اعمال شده‌اند، بر مدل اعمال می‌شوند. نتایج تحلیلها نشان می‌دهد که نتایج بدست‌آمده پس از اعمال چند سیکل بارگذاری حرارتی به صورت پایا در آمده و با افزایش سیکلهای بارگذاری، اختلاف قابل توجهی در نتایج ایجاد نمی‌شود.

بدین ترتیب با افزایش سیکلهای بارگذاری الگوی ترک تغییر نمی‌کند. بنابراین با اعمال بارهای استاتیکی ترک ایجاد شده گسترش نخواهد یافت و سد به خطر نخواهد افتاد.

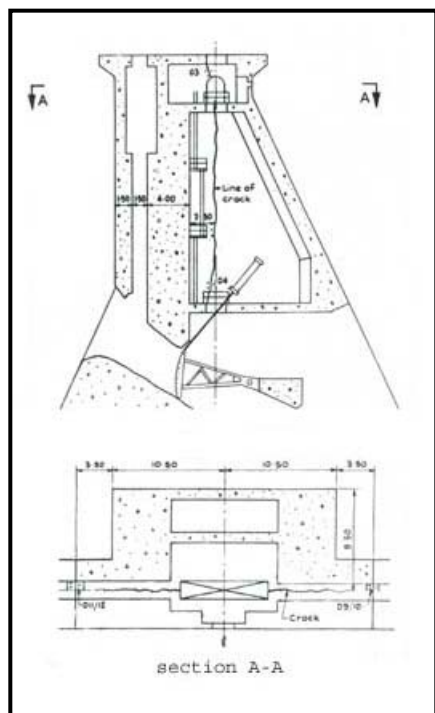
واژه‌های کلیدی: مکانیک شکست غیرخطی، روش ترک پخشی، فرایند شکست، ضریب انتقال برش

مقدمه

برخوردار است. چرا که اولاً حجم سرمایه‌گذاری مورد نیاز جهت ساخت این سازه‌ها قابل توجه است و ثانیاً هر نوع آسیبی که موجب آزاد شدن مخزن سد گردد، خسارات جبران‌ناپذیری در پی خواهد داشت. امروزه با در اختیار قرار گرفتن روشهای محاسباتی توانمند و اطلاعات آزمایشگاهی

مساله ایجاد و توسعه ترک در سازه‌های بتنی از دیرباز مورد توجه بوده است و تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه صورت گرفته است. از بین سازه‌های بتنی مختلف، مساله ترک‌خوردن سدها از اهمیت ویژه‌ای

تغییرات منظم بازشدگی ترک با دمای محیط و با در نظر گرفتن محل وقوع ترکها، به نظر می‌رسد که تغییرات فصلی دما مولد ترک در بلوک ۱۰/۱۱ بوده است. در اثر افزایش دمای هوا نسبت به دمای هوای مرجع (دمای نظیر تنش صفر) بلوکها منبسط می‌شوند، بخشی از این انبساط بلوکها در راستای محور سد توسط شکل‌پذیری پی جبران می‌گردد، ولی بقیه این انبساط به صورت تغییر شکل داخلی بلوکها جذب می‌شود. به این ترتیب که بلوکها در راستای محور سد به یکدیگر فشار وارد می‌کنند و انبساط جانبی ناشی از حرارت توسط این فشار جانبی خنثی می‌گردد. [۲] در بلوک ۱۰/۱۱، به علت اینکه عرض آن از بلوکهای دیگر بیشتر است، میزان انبساط حرارتی بیشتری خواهیم داشت. از سوی دیگر چون فضاهای خالی بزرگی در داخل این بلوک وجود دارد، سختی جانبی آن در مقابل سختی جانبی بلوکهای دیگر کمتر است و بخش بزرگتری از جابجایی جانبی بین بلوکها را جذب می‌کند. (به عبارت دیگر این بلوک به صورت حلقه ضعیف یک زنجیر عمل می‌کند که بیشترین تغییر شکل را در طی تغییر شکل کل زنجیر متحمل می‌گردد.) بنابراین بلوک ۱۰/۱۱ در محل تماس با بلوکهای مجاور تحت اثر فشار جانبی قابل توجهی قرار خواهد داشت. [۳]



شکل ۱: موقعیت و امتداد ترک در بلوک ۱۰/۱۱.

کافی راجع به رفتار بتن در هنگام شکست و با توجه به شایع بودن پدیده ترک خوردگی سدها، بررسی عوامل ایجاد ترک و پیش بینی نحوه گسترش آن به یکی از مبانی تعیین ایمنی چنین سازه‌هایی بدل گردیده است.

اجرای سد لتیان در سال ۱۳۴۲ آغاز شده و در سال ۱۳۴۶ به پایان رسیده است. این سد از نوع بتنی پایه‌دار بوده و دارای ۲۳ بلوک پشت‌بنددار و ۸ بلوک وزنی می‌باشد. براساس نتایج ابزار دقیق، سد تا سال ۱۳۴۹ در وضعیت مناسبی قرار داشته و جابجاییهای آن در حد معقولی بوده است. برای اولین بار در تاریخ نهم مرداد ماه سال ۱۳۴۹ ترکهایی با امتداد قائم در پشت بند ۱۰/۱۱ سد ظاهر شدند. پشت بند ۱۰/۱۱ یک پشت بند دوگانه (به عرض ۲۸ متر) می‌باشد که سرریز اصلی سد با دبی خروجی ۶۵۰ متر مکعب بر ثانیه در این بلوک تعبیه شده است.

ترکهای مزبور در هر دو طرف اتاقلک دریچه قطاعی سرریز واقع شده‌اند و از لحاظ رقم، از تراز تاج سد تا کف اتاقلک دریچه امتداد یافته‌اند. این ترکها در هر دو دیواره اتاقلک دریچه قرار دارند و نسبت به راستای رودخانه تقریباً متقارن می‌باشند. در هر دو طرف اتاقلک دریچه این ترکها تک شاخه هستند و هرچه از تراز تاج سد به سمت کف اتاقلک دریچه نزدیک می‌شویم، عرض بازشدگی ترکها کاهش می‌یابد و امتداد ترکها نیز به سمت بالادست متمایل می‌گردد. این ترکها در کف و سقف گالری تاج سد نیز ادامه می‌یابند و در محل درز انقباض بین بلوک ۱۰/۱۱ با بلوکهای مجاور (بلوکهای ۹ و ۱۲) قطع می‌شوند. میزان بازشدگی این ترکها در گالری تاج هر چه به سمت محل اتاقلک دریچه نزدیک می‌شویم، افزایش می‌یابد. در حالت حداکثر بازشدگی، عرض ترک در دیواره اتاقلک دریچه حدود دو سانتیمتر می‌باشد. [۱] در شکل ۱ موقعیت و امتداد ترکها نشان داده شده است.

عملیات علاج بخشی این ترکها در زمستان سال ۱۳۴۹ با تزریق اپوکسی انجام شد، ولی به علت از بین رفتن علت اصلی مولد ترک، این ترکها مجدداً در تابستان سال ۱۳۵۰ باز شدند. پس از این تاریخ روند بازشدگی ترکها بصورت پیوسته اندازه‌گیری شده است. این اندازه‌گیریها نشان می‌دهد که ترکها دارای روند مشخص باز شدن و بسته شدن نسبت به تغییرات فصلی دما می‌باشند. با توجه به این

باقی می ماند. مزیت عمده روش ترک پخشی سادگی و صرفه آن از لحاظ زمان و هزینه های محاسباتی می باشد. اشکال این روش این است که طبیعت فیزیکی ترک بوجود آمده بر واقعیت منطبق نیست و نمی توان میزان بازشدگی ترک ویا میزان فشار آب نفوذی در ترک را بدست آورد. [۵]

مدلسازی مساله

در مطالعات حاضر از برنامه ANSYS جهت مدلسازی و انجام تحلیل سد بتنی پایه دار لتیان استفاده شده است. المان بتن استفاده شده دارای قابلیت ترک خوردن تحت اثر بارهای کششی در سه جهت عمود بر هم می باشد. مدل ترک بکار رفته در این المان مدل ترک پخشی می باشد و با مقداردهی صحیح به پارامترهای رفتاری المان بتن ، این المان می تواند به خوبی جهت مدلسازی رفتار بتن در تحلیلهای غیرخطی مورد استفاده قرار گیرد. [۷]

در مدل بتن موجود در صورتیکه معیار ترک خوردگی در یک نقطه انتگرال گیری ارضا شود و بتن ترک بخورد، ماتریس ارتباط تنش کرنش در آن نقطه به ترتیب زیر اصلاح می شود: با صفر قراردادن مقاومت کششی در جهت عمود بر ترک، در واقع از سختی نرمال بر صفحه ترک تحت بار کششی محلی صرف نظر می شود. از آنجا که پس از وقوع ترک، تنش برشی که در صفحه ترک انتقال پیدا می کند نسبت به حالت بتن ترک نخورده کاهش می یابد، لازم است که این کاهش انتقال برش در صفحه ترک به نوعی در تحلیلها در نظر گرفته شود. برای این منظور از ضریب انتقال برش، β_e ، استفاده می شود. مقدار این ضریب براساس توصیه های مرجع [۸] و همچنین نتایج بدست آمده از تحلیل استاتیکی غیرخطی برابر با ۰/۱ انتخاب شده است.

سایر مشخصات بتن که در تحلیلها استفاده شده بدین شرح می باشد:

میزان مقاومت فشاری بتن طبق گزارش سال ۱۹۶۸ مشاور طرح و میزان مقاومت کششی آن در حالت استاتیکی بر اساس رابطه زیر [۹] تعیین شده است:

$$(f'_t) = 0.95(f'_c)^{2/3}$$

در بسیاری موارد برای مقابله با مساله ترک خوردگی در سازه ها آنها را براساس معیارهای مقاومتی طراحی می کنند، اما مطالعات انجام شده در سالهای اخیر نشان می دهند که مکانیزم گسیختگی کششی در مصالح بتنی، متفاوت با مفاهیم معمول مبتنی بر مقاومت می باشد. به همین دلیل تلاشهای انجام شده اخیر در جهت تدوین معیارهایی بوده است که اولاً قادر به توجیه روند شکست مصالح بتنی باشند، ثانیاً ناتوانی معیارهای مقاومت در پیش بینی رفتار گسیختگی سازه ها را برطرف سازند. تئوری مکانیک شکست که در آن پدیده گسترش ترک براساس مفاهیم اتلاف انرژی مورد مطالعه قرار می گیرد، ابزار مناسبی برای این منظور می باشد [۵،۴].

در تحلیل گسترش ترک در سازه های بتنی، دو دسته مدل کلی برای مدلسازی سازه و نمایش ترک وجود دارد: مدل های ترک مجزا^۱ و مدل های ترک پخشی^۲.

در مدل های ترک مجزا، ترک با ایجاد ناپیوستگی در محیط و تغییر المان بندی سازه مدل می شود. انتشار ترک می تواند با معیار مقاومت و یا معیارهای مکانیک شکست خطی و غیرخطی تعیین شود. در این مدلها پس از هر گام زمانی تحلیل، هندسه المان بندی سازه تغییر می کند، بگونه ای که بازشدگی و روند گسترش ترک بطور واقعی در المان بندی سازه منظور می شود.

مزیت عمده این روش نمایش واقعی ترک و بازشدگی آن و همچنین امکان در نظر گرفتن فشار آب نفوذ کرده در داخل ترک در تحلیل سدهای بتنی می باشد. عیب این روش ، صرف زمان و هزینه محاسباتی زیاد ، به دلیل تغییر مداوم شبکه اجزاء محدود در حین آنالیز می باشد.

در مدل های ترک پخشی فرض بر جایگزین کردن ترک، با یک محیط پیوسته با خصوصیات فیزیکی متغیر می باشد. در این مدلها با شروع فرآیند شکست ، رفتار تنش-کرنش مصالح که تا این زمان رفتاری ایزوتروپ ، الاستیک و خطی بوده، با یک رابطه رفتاری ایزوتروپ جایگزین می شود. بدین ترتیب که با ارضاء معیار گسیختگی ، ترک در جهت عمود بر تنش اصلی حداکثر اتفاق می افتد و پس از ترک خوردگی ، سختی بتن در جهت عمود بر صفحه ترک خوردگی بصورت ناگهانی و یا تدریجی کاهش یافته و در امتداد موازی با ترک ثابت

در مدل حاضر سعی شده است در حد امکان جزئیات هندسی خارجی پشت بند ۱۰/۱۱ و فضاهای داخلی آن دیده شوند. این جزئیات شامل گالری تاج، اتافک کنترل، تکیه گاه دریچه قطعی، ورودی و شوت سرریز و همچنین حفره‌های مربوط به دریچه اضطراری سرریز می‌باشد.

تحلیلهای انجام شده

تحلیل انتقال حرارت

همانطور که پیش از این نیز اشاره شد، عامل اصلی ایجاد ترک در بلوک ۱۰/۱۱ تغییرات دمای محیط بوده است. به همین علت تعیین توزیع دقیق دما در بتن بدنه سد در زمان ترک خوردگی و بعد از آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، چرا که تعیین دقیق تنشهای حرارتی در بدنه سد بدون اطلاع از مقادیر درجه حرارت در نقاط مختلف بدنه سد امکان پذیر نمی‌باشد. یک راه مناسب جهت تعیین توزیع درجه حرارت در بدنه سد استفاده از مقادیر قرائت شده از دماسنجهای تعبیه شده در بدنه سد و درونیابی مقادیر این قرائت ها جهت تعیین درجه حرارت در سایر نقاط بدنه می‌باشد. ولی متأسفانه در مورد سد لتیان این دماسنجهای تنها در بلوک ۲۲ تعبیه شده‌اند و از آنجائیکه هندسه داخلی بلوک ۱۰/۱۱ به علت وجود فضاهای خالی بزرگ با بلوک ۲۲ تفاوت قابل توجهی دارد، نمی‌توان از نتایج قرائت های مربوط به بلوک ۲۲ جهت تخمین توزیع دما در بلوک ۱۰/۱۱ بهره گرفت. راه حل دیگر جهت تعیین توزیع درجه حرارت در بتن بدنه سد، استفاده از تحلیل انتقال حرارت با استفاده از مدل اجزاء محدود می‌باشد. [۱۰]

جهت تعیین توزیع دما در بدنه سد لتیان در گرمترین و سردترین ماههای سال دو تحلیل جداگانه انتقال حرارت صورت گرفته است و با توجه به شرایط مرزی حرارتی در هر حالت، توزیع درجه حرارت زمستانی و تابستانی در بدنه سد بدست آمده است. براساس اختلاف مقادیر درجه حرارت در هر فصل با درجه حرارت نظیر تنش صفر، میزان تنش حرارتی در تحلیلهای استاتیکی محاسبه شده است. شرایط مرزی حاکم بر مدل حین انجام تحلیل‌های انتقال حرارت در ادامه آمده است.

- شرایط مرزی جهت انجام تحلیل انتقال حرارت تابستانی

$$E_c = 300000 \text{ Kg / Cm}^2 \quad \text{۱- مدول الاستیسته}$$

$$\nu = 0.17 \quad \text{۲- ضریب پواسون}$$

$$\rho = 2.45 \text{ ton / m}^3 \quad \text{۳- وزن مخصوص}$$

$$\alpha = 0.8 \times 10^{-5} 1/^\circ \text{ c} \quad \text{۴- ضریب انبساط حرارتی}$$

$$f'_c = 325 \text{ Kg / Cm}^2 \quad \text{۵- مقاومت فشاری}$$

$$f'_t = 44.9 \text{ Kg / Cm}^2 \quad \text{۶- مقاومت کششی}$$

برای در نظر گرفتن اثرات پی، پی سد در زیر بلوک ۱۰/۱۱ تا حدود ۱/۵ برابر ارتفاع سد مدل شده است. حداکثر بعد المانها در پی ۳۰ متر می‌باشد. مشخصات سنگ پی به شرح زیر در نظر گرفته شده است:

$$E_c = 70000 \text{ Kg / Cm}^2 \quad \text{۱- مدول الاستیسته}$$

$$\nu = 0.20 \quad \text{۲- ضریب پواسون}$$

$$\rho = 0 \quad \text{۳- وزن مخصوص}$$

در انجام تحلیلهای از جرم پی صرف نظر شده است، چرا که تغییر شکلهای مربوط به وزن پی پیش از احداث سد اتفاق افتاده است و لزومی به در نظر گرفتن نیروی وزن پی در تحلیلهای مربوط به سد نمی‌باشد.

در مدل اجزاء محدود پشت بند ۱۱/۱۰ سد بتنی پایه دار لتیان جمعاً ۱۱۰۰ المان برای مدلسازی بتن بدنه و پی بکار رفته است. تعداد المانهای بدنه ۸۵۰ و تعداد المانهای پی ۲۵۰ عدد می‌باشد. در شکل ۲ مدل سه بعدی کلی بدنه سد و پی آمده است. بعد المانها در نقاط مختلف پشت بند متفاوت است. در بخش فوقانی سد که ترک خوردگی داریم و جزئیات هندسی بیشتری در بلوک وجود دارد المانهای ریزتر و در سایر نقاط از جمله در پی که از ناحیه ترک خورده دور هستیم المانهای درشت تری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. ابعاد المانها در حوالی گالری تاج حدود ۱/۵ متر می‌باشد در حالی که در قسمتهای پائینی بلوک ۱۰/۱۱ ابعاد المانها به ۴ الی ۵ متر می‌رسد.

$$\nabla T = 0$$

-شرایط مرزی جهت انجام تحلیل انتقال حرارت زمستانی در این مرحله توزیع درجه حرارت در بدنه سد تحت اثر دمای محیط در زمستان محاسبه شده است. شرایط مرزی جهت انجام تحلیل انتقال حرارت زمستانی به شرح زیر می باشد :

مرز شماره یک (محل تماس بدنه سد و آب)

در این مرز توزیع درجه حرارت بر اساس نتایج گزارش ایزاربنندی بهمن ۱۳۴۹ در نظر گرفته شده است.

مرز شماره دو (کلیه نقاط خارجی در تماس هوا)

در زمستان دمای هوا در بالادست و پائین دست بدنه برابر با دمای میانگین هوای بهمن ماه سال ۱۳۴۹ در نظر گرفته شده است.

مرز شماره سه (کلیه نقاط تماس سد با پی)

در زمستان نیز دمای نقاط روی این مرز برابر با میانگین دمای سالیانه سال ۱۳۴۹ در نظر گرفته شده است.

مرز شماره چهار (فضاهای خالی داخل بدنه سد)

دما در فضاهای داخلی در زمستان برابر هفت درجه سانتیگراد بیشتر از نقاط خارجیدر تماس با هوا می باشد .
- مرز شماره پنج (ناحیه تماس بلوک ۱۰/۱۱ با بلوکهای مجاور)

همانطور که در مورد شرایط مرزی تابستانی ذکر شد، روی این مرز شار حرارتی برابر صفر می باشد.

تحلیل‌های استاتیکی خطی

هدف اصلی از انجام تحلیل‌های استاتیکی خطی، یافتن عامل یا عوامل ایجاد ترک در بلوک ۱۰/۱۱ می باشد. بدین منظور مدل اجزاء محدود بدنه سد و پی را تحت اثر ترکیبات مختلف بارگذاری استاتیکی مورد تحلیل قرار می‌دهیم، تا مشخص گردد که کدامیک از این ترکیبات بارگذاری می‌توانند منجر به تنش‌های کششی بیشتر از مقاومت کششی بتن در محدوده ترک خورده فعلی شوند.

ترکیبات بارگذاری اعمال شده بر مدل عبارتند از :

(۱) وزن + فشار هیدروستاتیک (تراز نرمال)

در تحلیل نخست توزیع درجه حرارت در بدنه سد تحت اثر دمای محیطی در تابستان محاسبه شده است. شرایط مرزی جهت انجام تحلیل انتقال حرارت به شرح زیر می‌باشد:

مرز شماره یک (محل تماس بدنه سد و آب)

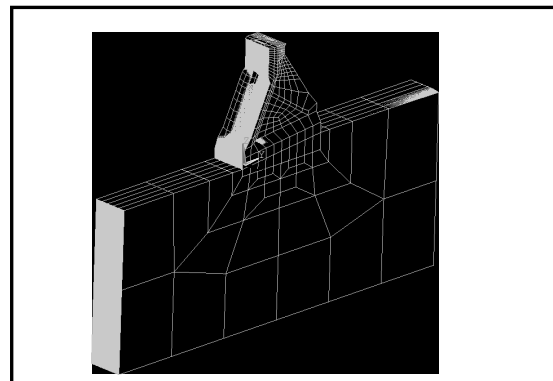
در این مرز توزیع درجه حرارت در آب در بالادست سد مطابق پروفیل ارائه شده بر مبنای گزارش ایزاربنندی مردادماه سال ۱۳۴۹ استخراج شده است.

مرز شماره دو (کلیه نقاط خارجی در تماس با هوا)

برای کلیه نقاط بالادست سد و پائین دست بدنه که در مجاورت هوا قرار دارند، دمای هوا برابر با دمای میانگین تابستان سال ۱۳۴۹ در نظر گرفته شده است.

مرز شماره سه (کلیه نقاط تماس بدنه سد و پی):

در این محل دما برابر با دمای میانگین سالیانه در سال ۱۳۴۹ (سال وقوع ترک) در نظر گرفته شده است.



شکل ۲: مدل کل پشتبند ۱۰/۱۱ و پی آن .

مرز شماره چهار (فضاهای خالی داخل بدنه سد مثل

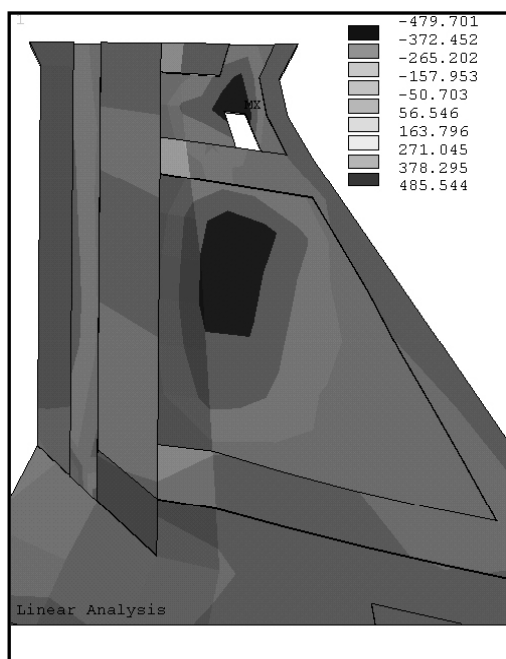
گالری تاج، اتاقک کنترل دریچه و ...)

طبق اطلاعات موجود اختلاف دمای این نواحی داخلی بادمای هوای بیرون در حدود هفت درجه سانتیگراد می‌باشد بدین ترتیب در تابستان دمای این نقاط ۷ درجه کمتر از دمای نقاط خارجی در نظر گرفته شده است.

مرز شماره پنج (ناحیه تماس بلوک ۱۰/۱۱ با بلوکهای

مجاور)

روی این مرزها فرض می‌شود که شار حرارتی صفر است. یعنی در راستای محور سد بلوکها به تعادل حرارتی رسیده‌اند و از بلوکی به بلوک دیگر انتقال حرارت صورت نمی‌پذیرد، یعنی



شکل ۳: توزیع تنش تحت اثر اعمال بارگذاری مولد ترک .

تحلیل استاتیکی غیرخطی

پس از اینکه بارگذاری مولد ترک با انجام تحلیل‌های استاتیکی خطی تعیین شد، با انجام تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی، مدل الگوی ترک موجود بازسازی می‌گردد. برای این منظور مدل پشت‌بند را چندین بار با تغییر پارامترهای رفتاری بتن تحت اثر بارگذاری مولد ترک تحلیل می‌کنیم. در میان تحلیل‌های صورت گرفته، پارامترهایی به پارامترهای واقعی رفتاری بتن نزدیکتر خواهند بود که با بکارگیری آنها محدوده ترک‌خورده و میزان گسترش عرضی ترک تا حد امکان با مشاهدات محلی سازگار باشد. یعنی ترک خوردگی از تاج سد شروع شده و پس از عبور از وسط گالری به سمت پائین امتداد پیدا کند و کمی بالاتر از رقوم کف اتاقک دریچه قطع گردد. از لحاظ گسترش عرضی ترک، هر قدر میزان گسترش عرضی ترک کمتر باشد، مدل رفتاری به واقعیت نزدیکتر است.

بدین ترتیب پارامترهای رفتاری بتن جهت انجام تحلیل‌های آتی زیر تعیین می‌شوند.

تحلیل استاتیکی غیرخطی تحت اثر بارسیکلیک حرارتی

در این مرحله بارگذاری ناشی از حرارت به صورت سیکل‌های سالیانه بر مدل اعمال می‌شود. بدین ترتیب

(۲) وزن + فشار هیدروستاتیک + بارگذاری حرارت تابستانی

(۳) وزن + فشار هیدروستاتیک + بارگذاری حرارت تابستانی + جابجایی جانبی اعمالی از بلوکهای مجاور در تابستان

(۴) وزن + فشار هیدروستاتیک + بارگذاری حرارت زمستانی

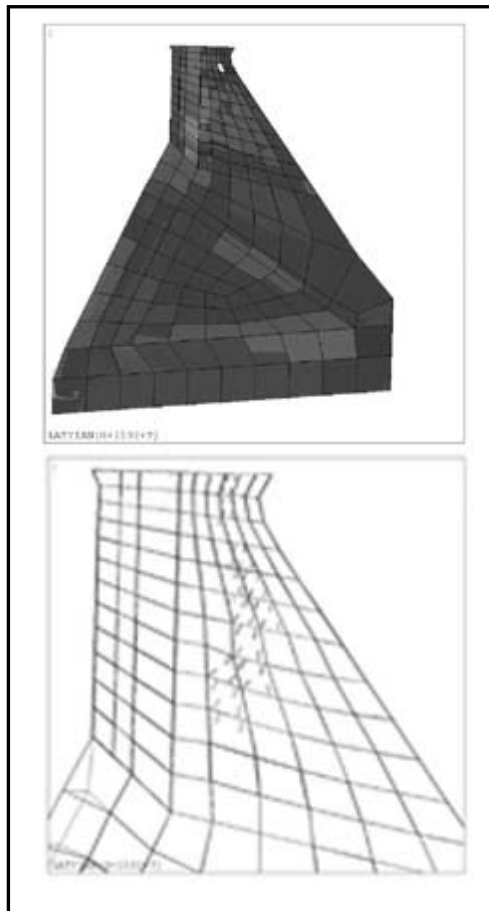
در این سری تحلیلها شرایط مرزی مدل به صورت زیر بوده است:

در طی اعمال کلیه بارهای فوق‌الذکر تغییر مکان نقاط مرز دور پی در هر سه راستا بسته شده است. شرایط مرزی نقاطی از بلوک ۱۰/۱۱ که در تماس با بلوکهای مجاور قرار دارند در بارگذاریهای مختلف متفاوت است. بدین ترتیب که هنگام اعمال بار وزن و فشار هیدروستاتیک، در این نقاط تغییر مکان در راستای محور سد بسته شده است و در دو راستای دیگر آزاد است. در حین اعمال بار ناشی از حرارت تابستانی، در نقاطی که در تماس، با بلوکهای مجاور قرار دارند و بالاتر از تراز ۱۵۹۰ متر از سطح دریا قرار دارند، تغییر مکانی معادل دو میلیمتر از هر طرف در جهت فشرده کردن بلوک ۱۰/۱۱ در راستای محور سد اعمال می‌گردد. در ترازهای پائین تر در این دو وجه، تغییر مکان در راستای محور سد بسته شده است. علت عدم اعمال تغییر مکان دو میلیمتری در ترازهای پائین تبعیت این قسمت سد از تغییرات درجه حرارت محدود مخزن است. هنگام اعمال بار ناشی از حرارت زمستانی، گره‌هایی که در تماس با بلوکهای مجاور قرار دارند در راستای محور سد آزاد می‌باشند.

با توجه به تحلیل‌های انجام شده، به نظر می‌رسد که ترکیب بارگذاری شماره ۳ مولد ترک در بدنه سد بوده است، تحت اثر این بارگذاری در ناحیه ترک خورده فعلی میزان حداکثر تنشهای کششی ایجاد شده بیشتر از مقاومت کششی بتن می‌باشد. بنابراین می‌توان انتظار داشت که در این ناحیه ترک خوردگی داشته باشیم.

در شکل (۳) توزیع تنش در ناحیه ترک‌خورده تحت اثر اعمال ترکیب بارگذاری مولد ترک نشان داده شده است.

سوی بالادست متمایل می‌شود. بنابراین می‌توان گفت :
 ۱ - مدل ترک پخشی مدل مناسبی برای تحلیل گسترش ترک سه بعدی در سدهای بتنی می‌باشد و اگر پارامترهای رفتاری بتن جهت مدلسازی مساله به خوبی انتخاب شود می‌توان جوابهای مناسبی با استفاده از این روش بدست آورد.



شکل ۴ : توزیع تنش و الگوی گسترش ترک پس از اعمال دو سیکل بار حرارتی .

۲ - مدل بتن ارائه شده در برنامه ANSYS مدل کارایی می‌باشد و با توجه به این امر که امروزه تحلیل گسترش سه بعدی ترک به دلیل مشکلات محاسباتی کمتر انجام می‌شود، این برنامه می‌تواند وسیله مناسبی برای شروع روند انجام محاسبات سه بعدی در آینده باشد.

در مورد گسترش ترک در سد بتنی پایه دار لتیان با بررسی نتایج بدست آمده از تحلیلها به خصوص تحلیل استاتیکی غیر خطی تحت اثر بارگذاری سیکلیک حرارتی

امکان گسترش ترک تحت اثر بارهای استاتیکی اعمالی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

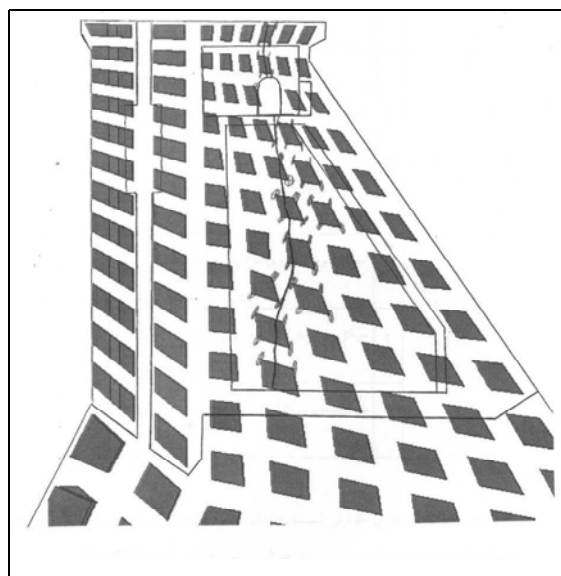
طبق تحلیل‌های استاتیکی خطی انجام شده، حساسیت تنشهای کششی در محدوده ترک خوردگی نسبت به تراز آب مخزن ناچیز می‌باشد، از این رو از اثرات سیکلیک تغییر تراز آب مخزن صرف نظر شده است. ولی جهت مطالعه اثرات تغییرات سیکلیک دما بر میزان و توسعه ترک خوردگی در بدنه سد سیکل‌های مختلف بارگذاری و باربرداری حرارتی مورد استفاده قرار گرفته است.

با توجه به تحلیل‌های انجام شده طی پنج سیکل بارگذاری به نظر می‌رسد که از سیکل دوم بارگذاری حرارتی به بعد رشد ترک ناچیز می‌باشد. تنشهای ایجاد شده در بدنه سد پس از اعمال چند سیکل بارگذاری به حالت تعادل می‌رسد. همچنین وضعیت ترک خوردگی ثابت می‌ماند و اعمال سیکل‌های بیشتر بار حرارتی تغییری در وضعیت تنشهای نهایی ایجاد نمی‌کند. الگوی ترک خوردگی و نیز وضعیت تنشهای نهایی پس از اعمال دو سیکل بارگذاری در شکل (۴) آمده است. همچنین در شکل (۵) انطباق پروفیل ترک بدست آمده و پروفیل واقعی ترک آمده است. همانگونه که در این شکل دیده می‌شود وضعیت صفحات ترک خوردگی انطباق بسیار خوبی با وضعیت ترکهای واقعی دارد، چرا که پروفیل ترک ایجاد شده از تراز تاج شروع شده و با گذشتن از گالری تاج تا کف اتافک دریچه امتداد می‌یابد و به تدریج به سمت بالادست متمایل می‌شود (همانگونه که در واقعیت رخ داده است).

نتیجه گیری

نتایج بدست آمده از تحلیل‌های اجزاء محدود انجام شده تطابق بسیار مناسبی با ترک خوردگی واقعی در پشت بند ۱۰/۱۱ سد بتنی پایه دار لتیان دارد. همچنین گسترش ترک ایجاد شده در مدل دقیقاً در ناحیه ترک خورده فعلی در این پشت بند می‌باشد و از نظر ارتفاعی، المانهای ترک خورده در محدوده تاج سدا کف اتافک دریچه واقع شده‌اند، که این امر با واقعیت سازگار است. همچنین از لحاظ شکل پروفیل ترک ایجاد شده، تطابق بسیار خوبی بین نتایج بدست آمده از تحلیل با واقعیت وجود دارد. بدین ترتیب که در الگوی ترک حاصله ترک از تراز تاج سد شروع شده و با حرکت به سمت پایین به

به نظر می‌رسد:
گزارشها و اطلاعات مربوطه را در اختیار ایشان قرار دادند،
تشکر نمایند.



شکل ۵: انطباق الگوی ترک حاصل از تحلیلها با ترک موجود.

۱ - عامل اصلی ایجاد ترک در پشت بند ۱۰/۱۱ سد لتیان، تغییرات درجه حرارت می‌باشد. اثر تغییرات درجه حرارت بر این پشت‌بند به دو صورت انبساط داخلی بتن این بلوک و نیز فشار جانبی اعمال شده از جانب بلوکهای مجاور، اعمال می‌شود.

۲ - عدم گسترش پروفیل ترک با افزایش تعداد سیکلهای بارگذاری حرارتی بیانگر این مطلب است که تحت اثر بارگذاری استاتیکی موجود ترک گسترش نخواهد یافت. این بدین معنی است که برای ادامه بهره‌برداری از سد بتنی پشت‌بند دار لتیان، نیاز به انجام علاج‌بخشی برای مقابله با بارهای عادی نیست و سد با وضعیت فعلی در برابر این بارها ایمن است و خطری آن را تهدید نمی‌کند.

قدر دانی

در پایان نویسندگان مقاله لازم می‌دانند مراتب قدردانی خود را نسبت به شرکت مهندسی مشاور مه‌اب‌قدس که

مراجع

- ۱- "مطالعات مرحله اول علاج بخشی لتیان." جلد دوم، گزارش فنی طرح (سازه و روش اجرا)، شرکت مهندسی مشاور مه‌اب‌قدس، اسفند ماه (۱۳۷۳).
- ۲- "طرح علاج بخشی لتیان، مطالعات مرحله دوم."، گزارش میان دوره‌ای طرح علاج بخشی لتیان، شرکت مهندسی مه‌اب‌قدس، دی ماه (۱۳۷۷).
- ۳- سلطانی‌پور، م. "علاج بخشی و ترمیم ترک پشت بند ۱۰/۱۱ سد لتیان." پایان‌نامه، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، (۱۳۷۴).
- 1 - Saouma, V. E., Bruhwiler, E. and Boggs, H. (1998). "A review of fracture mechanics applied to concrete dams." *Dam Engineering Journal*, Vol. 1, Issue 1, PP. 41-57.
- 2 - Hillerborg, A. (1978). "Analysis of concrete structure by fracture mechanics." *Book*.
- 3 - Broek, D. (1986). "Elementary engineering fracture mechanics." *Book, 4th Edition, Martinnus Nijhoff Publishers*.
- 4 - ANSYS Manuals, (1998). *Theory Manual, User's Guide, Element Manual*, V. 5.5.1.
- 5 - Pavlovic, Kotsovos, M. D. (1995). *Structural concrete finite element analysis for limit state design*" *Book*, Thomas Telford Publications.
- 6 - Raphael, J. M. (1984). "Tensile strength of concrete." *Journal of American Concrete Institute (ACI)*, Title No. 81-17, PP. 158-165.
- 7 - Leger, P. and Bhattacharjee, S. S. (1993). "Seismic analysis of gravity dams considering severe seasonal temperature variations." *Internationa Workshop on Dam Safety Evaluation*.
- 8 - Bazant, Z. P. and Oh, B. H. (1983). "Crack band theory for fracture of concrete." *Material and Structures*, PP. 155-177.

- 9 - Saouma, V. E. (2000), *Lecture Note in Fracture Mechanics*, Dept. of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado- Boulder.
- 10 - Espandar, R., Lotfi, V. and Razaqpour, G. (2000). "Seismic analysis of concrete arch dams by smeared crack approach." *12WCEE*.
- 11 - Saouma, V. E. and Morris, D. I. "Application of fracture mechanics to concrete dams (a detailed case study)." *Dam Engineering Journal*, Vol. 9, Issue 4. PP. 321-344.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1- Discrete Crack Models
2 – Smeared Crack Models
-