

بررسی تأثیر درز محیطی و پولینو بر رفتار بدنه سد قوسی با پی سنگی نرم

مبین منصوری^۱، محمدتقی احمدی^{۲*}

۱- کارشناس ارشد سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

*mahmadi@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۵/۱۰/۱۸]

تاریخ دریافت: [۹۵/۰۲/۰۴]

چکیده

در مطالعه‌ی پیش‌رو تأثیر پولینو بر رفتار بدنه سد، در سدهای با پی سنگی دارای لایه نرم بررسی می‌شود و با مقایسه با یک سد معمولی (بدون پولینو به عنوان شاهد) تأثیر پولینو به عنوان یک راه حل سازه‌ای بررسی می‌شود. رفتار مصالح استفاده شده الاستیک خطی است. مدل تحت بارهای وزن و هیدرواستاتیک با در نظر گرفتن مراحل ساخت سد قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد استفاده از پولینو باعث توزیع متقارن و یکنواخت تنش در بدنه‌ی سد خواهد شد حتی اگر پی سد دارای لایه‌های نرم و نامتقارن باشد. تنش بیشینه‌ی کششی در پولینو رخ می‌دهد و بدنه‌ی اصلی سد از این تنش‌ها مصون می‌ماند. گرچه ساخت سدهای دارای پولینو گران‌تر بوده و اجرای مشکل‌تری دارند اما حجم کمتر این‌گونه سدها و الگوی مناسب‌تری که از توزیع تنش ارائه می‌دهند، باعث می‌شود این سدها هم‌چنان اقتصادی باشند و به عنوان رقیبی جدی برای سدهای معمولی باقی بمانند.

واژگان کلیدی: سد قوسی، پولینو، درز محیطی، پی سنگی، لایه‌ی نرم.

۱- مقدمه

به وسیله‌ی یک درز محیطی از پولینو جدا شده است [1]. درز محیطی برای پیوستگی بین پولینو و بدنه‌ی اصلی سدهای قوسی در نظر گرفته شده است. درز محیطی یک درز مستحکم برای جلوگیری از جریان آب بین پولینو و سد ایجاد می‌کند و این‌گونه از تراوش و فشارهای بالابرنده جلوگیری می‌کنند. این درز هم‌چنین، مقاومت کششی موجود در پایه‌ی سدهای قوسی در بالادست را از بین برده و ترک‌های محتمل در این ناحیه را هم کمتر خواهد کرد [2]. ایده‌ی استفاده از درز محیطی را می‌توان به مهندس اسکالابرنی نسبت داد که قصد داشت سد روچتا را با این روش طراحی کند اما در پایان این سد بدون پولینو ساخته شد [3]. درز محیطی به طور عملی اولین بار به

برای طراحی و ساخت یک سد قوسی دو شرط اساسی لازم است: پی سنگی خوب و توپوگرافی مناسب. وقتی این شروط انجام شوند، سد قوسی مطلوب‌ترین و اقتصادی‌ترین حالت انواع سدها خواهد بود. ایده‌ی ساخت سدهای دارای درز محیطی و پولینو در دهه‌ی ۱۹۴۰ میلادی به وسیله‌ی مهندسان ایتالیایی برای بهبود شرایط سد در ساختگاه‌های مورد نظر معرفی شد و به تدریج در دهه‌های بعد گسترش یافت. پولینو، یک فونداسیون بتنی ضخیم است که بین پوسته‌ی قوسی بدنه‌ی سد و سنگ تکیه‌گاه ساخته می‌شود. پولینو در توزیع بارها به پی و کوله‌ها کمک می‌کند. پوسته‌ی قوسی بدنه

بازشدگی درز محیطی متأثر از تغییرات دما و سطح آب و تقابل این دو با هم است. در شرایطی که سطح آب ثابت است، مقادیر کمینه‌ی دما باعث بیشینه‌ی بازشدگی در سمت بالادست می‌شود و با افزایش دما به بیشترین حالت بسته شدگی می‌رسد [4].

مدل‌سازی درزهای انقباض و درزهای محیطی با توانایی باز و بسته شدن جزئی و هم‌چنین توانایی حرکت‌های مماسی، می‌تواند بر الگوی توزیع تنش‌ها و تغییر مکان‌های بدنه‌ی سد در مدت بارگذاری استاتیکی و تحریک لرزه‌ای تأثیرگذار باشد. مگلا در گزارشی به مطالعه‌ی رفتار استاتیکی و دینامیکی سد قوسی - وزنی طراحی شده به وسیله‌ی گروه انل که در دهه‌ی ۵۰ ساخته شده، می‌پردازد. در این مطالعه، سه مدل ریاضی المان محدود از سیستم سد و پی و مخزن ساخته شد. مدل اول یکپارچه و بدون درز محیطی با رفتار الاستیک خطی، مدل دوم با درز محیطی مدل شده با المان-های تماسی با رفتار غیرخطی و مدل سوم علاوه بر درز محیطی یک درز پی نیز بین پولینو و سنگ پی داشت. سپس این مدل‌ها با لحاظ کردن بارهای استاتیکی (وزن و فشار هیدرواستاتیک) و بارهای دینامیکی بخاطر فعالیت‌های لرزه‌ای، بارگذاری شدند. در تحلیل‌های استاتیکی در حالتی- که مخزن خالی است تنش‌ها در هر دو مدل، سد یکپارچه‌ی بدون درز و با درز محیطی، تقریباً یکسان است ولی در حالتی که مخزن پر باشد، درز محیطی باعث کاهش حدود ۳۰ درصد در تنش‌های کششی در سطح بالادست می‌شود در حالی که تنش‌های فشاری در حدود ۳ تا ۴ درصد افزایش می‌یابد. در تحلیل‌های شبه استاتیکی در حالتی که مخزن خالی است بیشینه‌ی تنش‌های کششی در مدل با درز محیطی ۱۵ درصد نسبت به مدل بدون درز کاهش می‌یابد و تنش‌های فشاری تا حدود ۱۸ درصد افزایش می‌یابد. در حالت مخزن پر تفاوت تنش‌ها در دو مدل بیشتر نمایان می‌شود طوری که مدل با درز محیطی حدود ۴۹ درصد کاهش را در تنش‌های بیشینه‌ی کششی از خود نشان می‌دهد و افزایش تنش فشاری مانند قبل همان ۱۸ درصد است. در تحلیل‌های دینامیکی در حالتی که مخزن خالی است تنش-

وسيله‌ی نیکولای به کار برده شد، سرسخت‌ترین پشتیبان آن کارلو سمنا نام داشت و پایه‌های نظری و آزمایشگاهی آن را پروفیسور اوبرتی بنیان نهاد [4 و 5]. پولینو به عنوان یک تکیه-گاه مصنوعی برای بدنه‌ی سد به کار برده می‌شود و استفاده از این مولفه‌ی سازه‌ای، به خاطر کاهش عدم اطمینان از سنگ پی زیر بدنه، باعث لاغرتر شدن بدنه‌ی اصلی سد می‌شود. درز محیطی که بین پولینو و بدنه‌ی سد ساخته می‌شوند: (۱) توزیع تنش و کرنش متقارن در بدنه‌ی سد را تضمین می‌کند. (۲) تنش‌های کششی محتمل در بتن حجیم بدنه را کاهش می‌دهد. (۳) تنش در کوله‌ها را به طور مناسب توزیع می‌کند و از تنش-های شدید در این مناطق جلوگیری می‌کند.

در طراحی سد قوسی ایمن، اطمینان از پایداری پی سنگی از فاکتورهای بسیار مهم است، زیرا قسمت بزرگی از بارهای خارجی به واسطه عملکرد قوسی در هر دو طرف قوس به پی منتقل می‌شود. این نیروها در سدهای قوسی بسیار بزرگ‌تر از نیروهای مشابه در سدهای دیگر است و باید گفت که پایداری یک سد قوسی به ظرفیت باربری سنگ‌های پی در محل کوله‌ها بستگی دارد. حوادث رخ داده برای سدهایی مثل سدهای قوسی ایدبار، فرایله و مالپاست از اهمیت پی در سدهای قوسی حکایت دارد. پس برای تصمیم‌گیری در مورد ساخت سد قوسی در یک دره، مهم‌ترین نکته‌ای که باید روی آن تمرکز داشت این است که آیا در ساختگاه مورد نظر توده‌ی سنگی با جنس خوب و با ضخامت مناسب که قابلیت ایستایی در برابر نیروهای وارد شده از قوس‌های سد را داشته باشد وجود دارد یا نه؟ عملکرد سدهای دارای پولینو به عنوان یک فرضیه برای رفع این مشکل در چنین ساختگاهی بررسی، و رفتار این‌گونه سدها سنجیده خواهد شد.

۲- بررسی رفتار درز محیطی

دولکتا و همکاران رفتار درزهای محیطی و نمود سازه‌ای آن را روی سدهای قوسی مطالعه کردند. ایشان برای بررسی بازشدگی این درز آزمایش‌های مختلفی انجام دادند. باز شدگی بیشتر در ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس (فصول سرد سال) اتفاق می‌افتاد و وابسته به تغییرات دما بود. بیشینه

می‌کند. در حالت مخزن خالی و بار حرارتی مربوط به زمستان تنش‌های کششی بیشتری در سد رخ می‌دهد. بتن کاهش حجم می‌دهد و تنش‌های کششی بحرانی در بدنه سد بوجود می‌آید. تنش کششی حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد کاهش پیدا می‌کند و این در حالی است که تنش فشاری، افزایشی را متحمل نمی‌شود. حالتی که مخزن پر است و بار حرارتی تابستانی اعمال می‌شود، در بالادست بر خلاف آنچه اتفاق می‌افتد، فشار ۱۰ تا ۱۵ درصد کاهش می‌یابد و کشش نیز ۷۰ تا ۸۰ درصد کاهش می‌یابد. در پایین دست کشش ۱۵ تا ۴۰ درصد کاهش و فشار ۳ تا ۴ درصد افزایش می‌یابد. در حالت مخزن پر و بار حرارتی زمستانی، تنش اصلی کششی در بالادست بیشتر دستخوش تغییر می‌شود و حدود ۲۵ درصد کاهش می‌یابد در حالی که در پایین دست حدود ۴ درصد کاهش می‌یابد و فشار هم ۲ تا ۳ درصد تغییر می‌کند [7].

نایه‌ها در مورد لغزش رو به بالای سدها مطالعه‌ای انجام داد. وی اظهار داشت در سدها تحت عملکرد شعاعی بار هیدرواستاتیک، فشار منتقل از قوس به کوله‌ها به یک مولفه-ی نرمال و یک مولفه‌ی مماسی در امتداد سطح شیب تجزیه خواهد شد. ممکن است مولفه‌ی مماسی باعث لغزش سد در امتداد شیب کوله‌ها شود و مولفه‌ی قائم باعث مقاومت در برابر لغزش در سطح شیب شود. البته لغزش رو به بالا رایج نیست و فقط تحت شرایط مشخصی رخ می‌دهد، برای نمونه سد لاغر باشد و شعاع انحنای بزرگی داشته باشد یا ناپیوستگی‌هایی وجود داشته باشد که در سد یا در کوله‌های سنگی (درز محیطی یا گسل‌ها) به شکل یک صفحه‌ی جانبی عمل کند و یا شیب کوله‌ها یا صفحه‌ی لغزش ملایم باشد. این مطالعه به بررسی گسیختگی سد قوسی می‌هوا که دارای درز محیطی بود می‌پردازد. البته برای سدهای بدون درز محیطی هم گرایش لغزش به سمت بالا و ناپایداری وجود دارد، گرچه احتمال آن کمتر است. در این مطالعه، معادله‌ای ارائه شده است که می‌تواند به عنوان یک ضابطه‌ی ایمنی در برابر لغزش رو به بالا در سدها باشد. این رابطه چهار عامل

های کششی تا ۲۰ درصد کاهش می‌یابد و تنش‌های فشاری حدود ۷ درصد افزایش را نشان می‌دهد. در حالت مخزن پر تنش‌های کششی ۴۲ درصد کاهش و تنش‌های فشاری ۱۰ درصد افزایش می‌یابد. نتایج به دست آمده، بطور وسیعی نظریه‌های فرض شده به وسیله‌ی طراحان درز محیطی در همان زمان ساخت را تأیید می‌کرد، فرضیه‌هایی مثل کاهش تنش‌های کششی همراه با افزایش ناچیز تنش‌های فشاری. البته کاهش کشش محدود به درز محیطی نیست و در کل بدنه‌ی سد رخ می‌دهد [3].

در مطالعه دیگری که در مورد رفتار دینامیکی سدهای با درز محیطی صورت گرفته، اردبیلی و میرزابزرگ تاثیر غیر-خطی بودن مصالح و درز را تحت بارگذاری لرزه‌ای بررسی کردند. ایشان برای این هدف سه مدل المان محدود را آزمایش کردند: بدنه سد با مصالح الاستیک خطی، بدنه سد با مصالح الاستیک خطی شامل درزهای انقباض و درز محیطی و بدنه سد با بتن غیرخطی. یکی از انتظارات مهم در رفتار سازه‌ی بدنه‌ی سد، باز و بسته شدن و لغزش در درزهای انقباض است. در این مطالعه مقایسه‌ی جابه‌جایی نقاط مجاور درزهای انقباض نشان می‌دهد که لغزش در درزهای انقباض در مدل‌های دارای درز محیطی نسبت به مدل‌های بدون درز محیطی افزایش می‌یابد و منجر به افزایش تغییر مکان‌ها در نیمه‌ی بالایی سد می‌شود [6].

مگلا در گزارشی دیگر سدهای گروه انل را بطور مفصل تحت بارگذاری حرارتی تحلیل نمود سدها با درز-محیطی و بدون آن در دو حالت مخزن پر و خالی تحلیل و با هم مقایسه شدند. تحلیل‌های المان محدود با دو حالت مختلف بارهای حرارتی انجام گرفت: حالت کلاسیک که مربوط به تابستان (انتهای ماه جولای) و زمستان (انتهای ماه ژانویه) می‌شود و حالت دیگر در یک چرخه‌ی سالانه (۱۲ ماه). با توجه به نتایج، وقتی مخزن خالی است و بار حرارتی مربوط به تابستان است، تنش‌ها تغییر زیادی نمی‌کنند زیرا بر اثر گرمای تابستان بتن منبسط شده و درز بسته می‌شود و عملکرد خوبی نخواهد داشت و مانند حالت بدون درز رفتار

دو سد به گونه‌ای طراحی شدند که تنش‌های تقریباً یکسانی را در حالت پی بدون لایه‌ی نرم نتیجه دهند. در این حالت حجم سد معمولی ۴۰ درصد بیشتر از حجم سد دارای پولوینو در نظر گرفته شد.

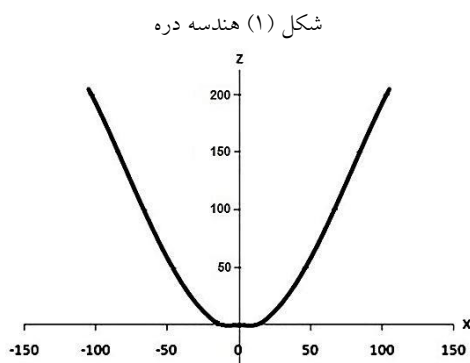


Fig. 1. Geometry of valley

شکل (۲) طره‌ی مرکزی سدهای طراحی شده (سمت راست: سد با پولوینو، سمت چپ: سد معمولی)

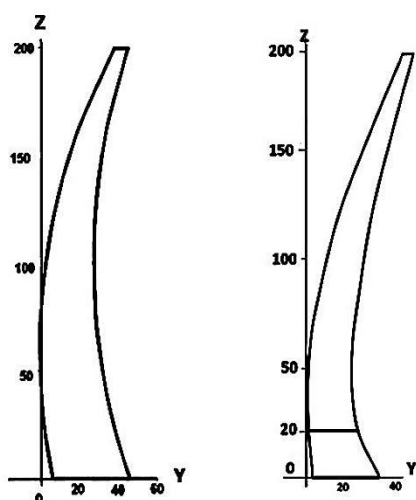


Fig. 2. crown cantilever of designed dams (right: dam with pulvino, left: conventional dam)

مدل المان محدود پی و سدهای طراحی شده در شکل‌های (۳) تا (۵) آمده است. سدها در جهت ضخامت در چهار لایه مش-بندی شدند و بیشترین بعد مش بدنه نیز به حدود بیست متر محدود شد. حجم مدل المان محدود سد با پولوینو ۴۶۶۵۶۷/۰۵۴ مترمکعب و مدل سد معمولی ۶۵۷۸۴۹/۴۱۳ مترمکعب شد. ضریب رعنایی سد معمولی ۷/۳۳ و سد با پولوینو ۹/۷۹ است. ضریب رعنایی از رابطه $c = \frac{F^2}{VH}$ به دست می‌آید که در آن V حجم سد، H ارتفاع سد و F مساحت

اصلی و تاثیرگذار در پایداری در مقابل لغزش را نشان می‌دهد: شعاع قوس خارجی، ضخامت میانگین المان‌های قائم سد، زاویه‌ی سطح شیب‌دار بین صفحه‌ی لغزش و صفحه‌ی افقی و زاویه‌ی اصطکاک روی صفحه‌ی لغزش. وی برای جلوگیری از لغزش به سمت بالا در سدها پیشنهاد می‌کند: برای کوله‌ها در هر دو طرف، زاویه‌ی شیب کمتر از ۴۵ درجه نباشد. اگر این شیب کمتر باشد، به کار بردن درز محیطی مناسب نیست. هم‌چنین، سد قوسی باید روی کوله‌های سنگی عالی ساخته شود و نیاز به توجه ویژه در مورد رفتار صفحات ضعیف سازه‌ای کم عمق زیر پی دارد [8].

مطالعات انجام شده در مورد درز محیطی کمیاب بوده و تاکنون مطالعه‌ای برای بررسی سدهای دارای درز محیطی که در ساختگاه‌های ویژه ساخته می‌شوند، (دره‌های نامتقارن یا دارای لایه‌های ضعیف در پی)، انجام نشده است. با بررسی سدهای دارای درز محیطی در چنین ساختگاه‌هایی به کارایی این‌گونه سدها پی برده خواهد شد. در این پژوهش سد دارای درز محیطی که در پی خود لایه‌ای نرم دارد بررسی خواهد شد و با مقایسه با یک سد معمولی (بدون پولوینو) به تأثیر این درز بر رفتار بدنه‌ی سد قوسی پی برده می‌شود.

۳- روش تحقیق

در این مطالعه دو سد قوسی، یکی با پولوینو و دیگری معمولی و بدون پولوینو (به‌عنوان شاهد) با شرایط یکسان (هندسه‌ی دره و بارگذاری مشابه) طراحی و مدل شده و پس از تحلیل با یکدیگر مقایسه شدند.

۱-۱- طراحی سدهای قوسی این تحقیق

دره‌ی مورد نظر در شکل (۱) از نظر طبقه‌بندی جز دره-های ۷- شکل باریک است. این دره شبیه دره‌ی سد دز است، اما کاملاً متقارن شده است. در شکل (۲) طره‌های مرکزی هر دو سد نمایش داده شده و ارتفاع سدهای طراحی شده ۲۰۰ متر است و عرض دره در این تراز ۲۰۶ متر است. عرض دره در کف ۲۰ متر و در ارتفاع ۰.۴۵H از کف نیز ۱۲۶ متر است. این

صفحه قائم عبور کننده از بدنه سد است [9].

شکل (۳) مش المان محدود پی سنگی

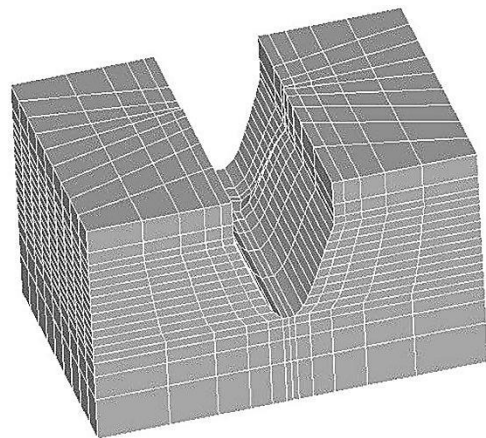


Fig. 3. finite element mesh of rock foundation

شکل (۴) مش المان محدود سد معمولی

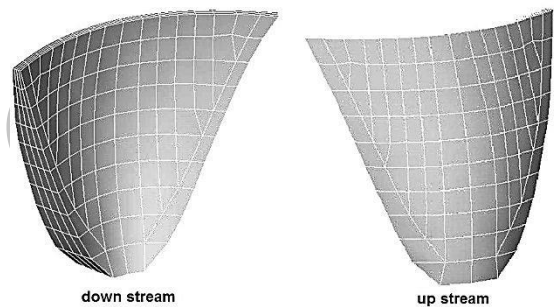


Fig. 4. finite element mesh of conventional dam

شکل (۵) مش المان محدود سد با پولوینو

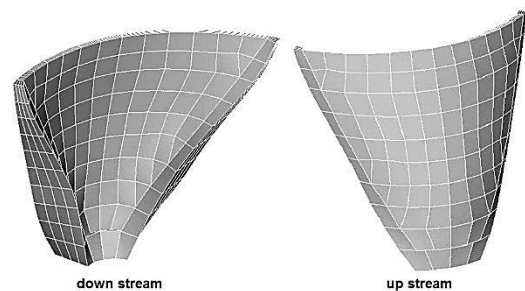


Fig. 5. finite element mesh of dam with Pulvino

همراه آورد. سختی تماس تابعی از سختی نسبی سطوح تماسی است. فنوس در شبیه‌سازی تماس بین سطوح مربوط به المان‌های جامد برای سختی نرمال رابطه $K_n = \frac{n \cdot E}{L}$ را پیشنهاد می‌دهد که E مدول ارتجاعی مصالح اطراف درز، L بعد المان عمود بر درز و n مقداری بین ۰ تا ۱۰ است [10]. تعیین مقدار مناسب این پارامتر نیازمند تکرار حل با چندین مقدار متفاوت خواهد بود. مقدار مناسب برای سختی مماسی نیز حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد مقدار سختی نرمال است. مقادیر انتخاب شده برای تماس در جدول (۱) آمده است. برای مدل‌سازی چگونگی برهم‌کنش سطوح تماسی بر یکدیگر از روش استاندارد استفاده شد. این روش تماسی را مدل می‌کند که اگر در آن جدایی اتفاق بیفتد فشار تماسی برابر صفر می‌شود. بنابراین می‌تواند هر سه حالت چسبیدن، لغزش و جدایی سطوح تماس از یکدیگر را مدل کند.

جدول (۱) مشخصات فیزیکی درز محیطی

| Normal stiffness of perimetral joint, k_n (GPa/m) | Tangential stiffness of perimetral joint, k_s (GPa/m) | Friction angle of concrete | Cohesion of perimetral joint (MPa) |
|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| 80 | 40 | 45 | 0.1 |

Table (1) Mechanical properties of perimetral joint

۳-۳- مشخصات مصالح و بارگذاری

مصالح بدنه‌ی سد و پولوینو از بتن حجیم و مصالح پی، سنگ همگن با لایه‌ی نرم در آن است. مصالح مورد استفاده همگی الاستیک خطی در نظر گرفته شده‌اند. ویژگی‌های فیزیکی مصالح به شرح جداول (۲) و (۳) است.

جدول (۲) مشخصات فیزیکی بتن بدنه و پولوینو

| elasticity (GPa) | poisson's ratio | density (Kg/m^3) | Compress strength (MPa) | Tensile strength (MPa) |
|------------------|-----------------|----------------------|-------------------------|------------------------|
| 40 | 0.2 | 2400 | 35 | 3.4 |

Table (2) Mechanical properties of mass concrete

۳-۲- سختی نرمال و مماسی سطح درز محیطی

از مهم‌ترین شاخصه‌های مدل‌سازی درز، تعیین مقدار سختی نرمال آن است. مقادیر بالای سختی نرمال (سختی پنالتی) از میزان نفوذ سطوح تماسی کاسته و بر دقت آن می‌افزاید. هر چند که این مقادیر بالا ممکن است مشکلات همگرایی را به

پولینو) در این ساختگاه پس از بارگذاری و تحلیل، با یکدیگر مقایسه شدند.

شکل (۶) وضعیت لایه نرم در پی (لایه با رنگ تیره)

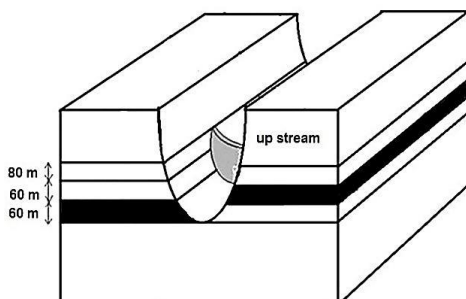


Fig. 6. weak layer situation of rock foundation (dark layer)

۳-۴- تحلیل نتایج

برای تحلیل از نرم افزار انسیس نسخه ۱۲/۱ استفاده شد. سدهای طراحی شده روی پی سنگی مناسب تحلیل شدند و کانتورهای تنش اصلی استخراج شد. پس از آن این سدها روی پی دارای لایه نرم مورب تحلیل شدند. شکل‌های (۷ و ۸) تنش‌های بیشینه و کمینه در سد معمولی را نشان می‌دهد. بیشترین تنش کششی در سد معمولی در ترازهای پایین در پایین دست سد و حدود ۲ مگاپاسکال رخ داده است.

شکل (۷) سد معمولی، پی یکنواخت مناسب، تنش اصلی بیشینه

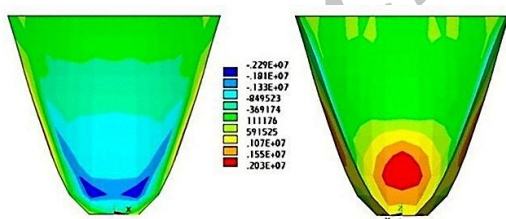


Fig. 7. conventional dam, uniform convenient foundation, maximum principal stress

شکل (۸) سد معمولی، پی یکنواخت مناسب، تنش اصلی کمینه

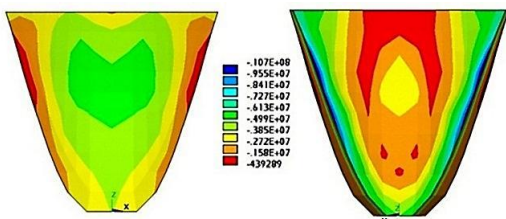


Fig. 8. conventional dam, uniform convenient foundation, minimum principal stress

بارگذاری‌های مورد نظر در این مطالعه بار وزن و بار هیدرواستاتیک بودند. سطح زیرین محیط سنگی پی برای جلوگیری از حرکت، در تمام جهات مقید شد.

جدول (۳) مشخصات فیزیکی سنگ پی

| Good rock elasticity (GPa) | Weak rock elasticity (GPa) | Rock density (kg/m ³) | Good rock poisson's ratio | weak rock poisson's ratio |
|----------------------------|----------------------------|-----------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 13 | 3 | 0 | 0.25 | 0.4 |

Table (3) Mechanical properties of rock

بار وزن بدنه‌ی سد به صورت مرحله‌ای وارد شد تا بتواند مراحل ساخت مونولیت‌های سد را شبیه‌سازی کند. سد-های قوسی هنگام ساخت به بلوک‌های قائم زوج و فرد تقسیم می‌شوند و بلوک‌های زوج با هم و بلوک‌های فرد با هم ساخته می‌شوند، برای نمونه ابتدا بلوک‌های فرد تا ارتفاع ۲۰ متر ساخته شده و سپس بلوک‌های زوج نیز به این ارتفاع می‌رسند. به همین ترتیب این روند ادامه پیدا می‌کند تا ارتفاع سد به‌طور یکنواخت به ارتفاع ۶۰ متر برسد. در این مرحله تزریق درزهای انقباض انجام می‌شود. تا قبل از تزریق، مونولیت‌ها باید به وسیله‌ی عملکرد طره‌ای ایستایی خود را حفظ کنند و بعد از تزریق عملکرد قوسی تکمیل شده و بارها به وسیله‌ی قوس نیز منتقل می‌شود. این روند ادامه پیدا می‌کند تا سد به ارتفاع مورد نظر خود برسد. در این پژوهش، سدها به پنج مونولیت تقسیم شده و روند ساخت مونولیت‌ها در دو تراز در نظر گرفته شد. بعد از اتمام مراحل ساخت و تکمیل بدنه سد، بار هیدرواستاتیک بر رویه‌ی بالادست اعمال و روند حل ادامه پیدا کرد. تراز آب در تراز تاج سد در نظر گرفته شد. تحلیل‌های مورد نظر بخاطر وجود درز و المان‌های تماسی و امکان تغییر شکل‌های بزرگ غیرخطی انجام شدند. در تحلیل‌های استاتیکی به دلیل ساده‌سازی در مدل، از رفتار درزهای انقباض چشم‌پوشی می‌شود زیرا لغزش و بازشدگی در آن‌ها رخ نمی‌دهد. در شکل (۶) نیز حالت قرارگیری لایه‌ی نرم (لایه با رنگ تیره) نشان داده شده است. هر دو سد (سد معمولی و سد با

در سد معمولی (سد بدون پولینو) مطابق شکل (۱۳) بیشینه‌ی تنش کششی در دو نقطه، یکی در تماس با لایه‌ی نرم پی و دیگری در بدنه‌ی اصلی رخ داده است. این تنش حدود ۳/۳ مگاپاسکال بوده و توزیع تنش حالت نامتقارن و غیریکنواختی دارد. تنش فشاری نیز در بیشترین مقدار خود مطابق شکل (۱۴) به حدود ۱۰ مگاپاسکال رسیده است.

شکل (۱۱) سد با پولینو، لایه ی نرم مورب، تنش اصلی بیشینه

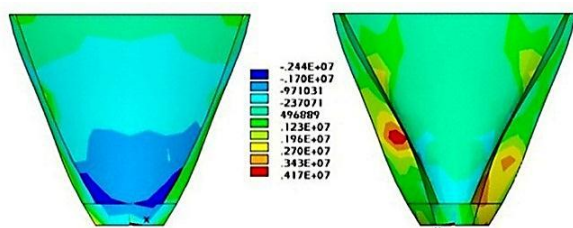


Fig. 11. dam with pulvino, foundation with weak layer, maximum principal stress

شکل (۱۲) سد با پولینو، لایه ی نرم مورب، تنش اصلی کمینه

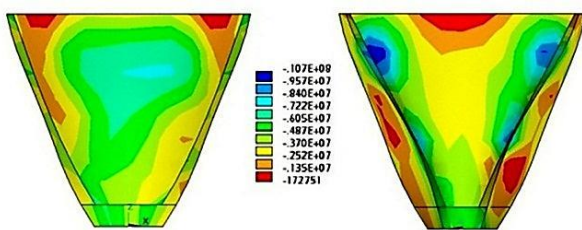


Fig. 12. dam with pulvino, foundation with weak layer, minimum principal stress

با توجه به نتایج، وقتی لایه نرم وجود دارد، بیشینه‌ی تنش کششی در بدنه‌ی اصلی سد با پولینو ۲/۷ مگاپاسکال است و در سد معمولی این مقدار ۳/۳ مگاپاسکال است. بیشترین تنش فشاری در سد با پولینو حدود ۱۰/۷ و در سد معمولی این مقدار حدود ۱۰ مگاپاسکال است. توزیع تنش در سد با پولینو متقارن و یکنواخت و در سد معمولی نامتقارن است. با وجود لایه‌ی نرم در پی، بیشترین تنش‌های کششی در پولینو رخ داده و این تنش‌ها از درز محیطی عبور نکرده و به بدنه‌ی اصلی سد وارد نمی‌شوند.

شکل‌های (۹ و ۱۰) تنش‌های بیشینه و کمینه را برای سد دارای پولینو نمایش می‌دهد. در سد دارای پولینو تنش یکنواخت‌تر توزیع شده است. فقط در ترازهای بالا تمرکز تنش وجود دارد که ممکن است ناشی از انتخاب زاویه‌ی برخورد نامناسب قوس‌های بدنه با سطح پولینو و یا انتخاب زاویه اصطکاک بزرگ برای درز محیطی باشد. بیشترین مقدار تنش کششی در این حالت حدود ۲/۵ مگاپاسکال است.

شکل (۹) سد با پولینو، پی یکنواخت مناسب، تنش اصلی بیشینه

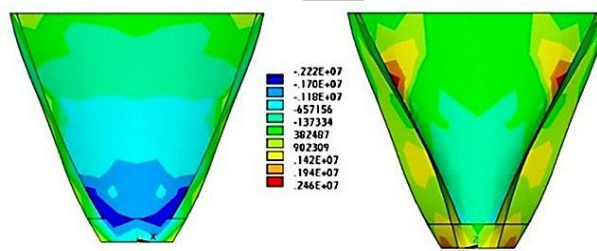


Fig. 9. dam with pulvino, uniform convenient foundation, maximum principal stress

شکل (۱۰) سد با پولینو، پی یکنواخت مناسب، تنش اصلی کمینه

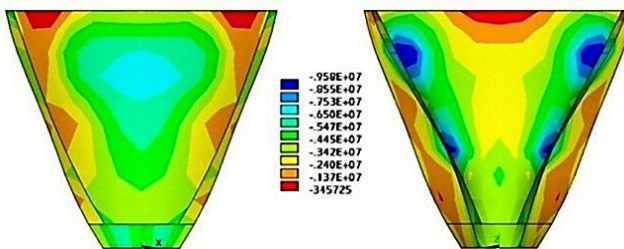


Fig. 10. dam with pulvino, uniform convenient foundation, minimum principal stress

در تحلیل سدهای قرارگرفته در ساختگاه دارای لایه نرم، در سد با پولینو، مطابق شکل (۱۱) بیشترین تنش کششی حدود ۴/۲ مگاپاسکال در تماس پولینو با سطح پی، در برخورد با لایه‌ی نرم و در منطقه‌ی نه چندان وسیعی رخ داده و در بدنه‌ی اصلی سد که وضعیت تنش‌ها اهمیت بیشتری دارد بیشترین تنش کششی حدود ۲/۷ مگاپاسکال بوده، توزیع تنش در بدنه با وجود لایه‌ی نرم نامتقارن در پی، متقارن و یکنواخت است. بیشترین تنش فشاری هم در حدود ۱۰/۷ مگاپاسکال است.

متفاوت است. در اثر باز توزیع تنش‌های ناشی از باز شدن درز محیطی، تنش فشاری مقداری افزایش می‌یابد. به دلیل فعال بودن درز محیطی و باز و بسته شدن مداوم این درز، بدنه دارای جابه‌جایی‌های بیشتری است و درزها ممکن است دچار آسیب شوند.

۴. نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد:

- ساخت پولینو و درز محیطی، توزیع تنش‌ها در بدنه اصلی را متقارن می‌کند، حتی اگر لایه‌های نرم در پی به صورت نامتقارن وجود داشته باشند.
- پولینو یک فونداسیون مصنوعی برای بدنه سد فراهم می‌کند و به همین دلیل می‌توان بدنه سدهای دارای پولینو را لاغرتر و کم حجم‌تر از سدهای معمولی طراحی کرد. در این مطالعه، برای به دست آوردن تنش‌های برابر در سد شاهد، حجم بدنه‌ی این سد ۴۰ درصد بیشتر از سد با پولینو شد.
- با وجود لایه‌های نرم در پی، تنش‌های کششی بیشینه از درز محیطی عبور نکرده و فقط در پولینو این تنش‌ها به بیشترین مقادیر خود می‌رسند. این عملکرد در لایه‌ی نرم‌تر هم صادق است و در این شرایط هم سدهای دارای پولینو با وجود تنش‌های کششی بیشتر، عملکرد بهتری دارند، زیرا بیشینه‌ی کشش در سدهای معمولی در بدنه رخ می‌دهد در حالی که بدنه‌ی سدهای دارای پولینو از مقادیر بیشینه‌ی تنش مصون می‌ماند.
- گرچه سدهای دارای پولینو از نظر روش و زمان ساخت، گران‌تر تمام می‌شود اما حجم کم‌تر این‌گونه از سدها تا حدودی هزینه‌های اضافی را جبران می‌کند.

۵. سپاس‌گزاری

از آقای دکتر میرزابزرگ بخاطر در اختیار گذاشتن اطلاعات هندسه بدنه سد دز کمال تشکر را داریم.

شکل (۱۳) سد معمولی، لایه ی نرم مورب، تنش اصلی بیشینه

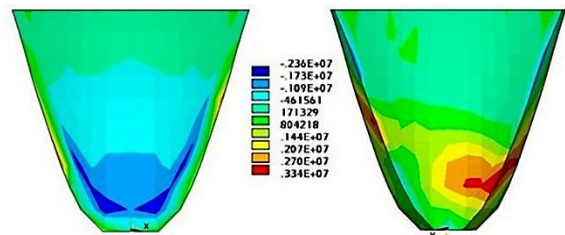


Fig. 13. conventional dam, foundation with weak layer, maximum principal stress

شکل (۱۴) سد معمولی، لایه ی نرم مورب، تنش اصلی کمینه

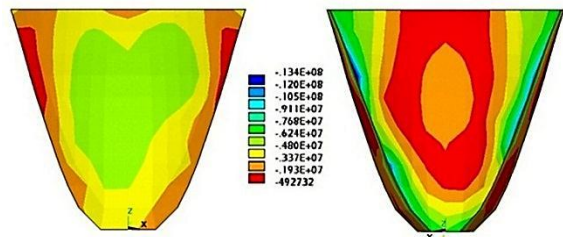


Fig. 14. conventional dam, foundation with weak layer, minimum principal stress

حجم سد معمولی ۴۰ درصد از حجم سد با پولینو بیشتر است، در حالی که هر دو سد تنش‌هایی با مقادیر مشابه را نتیجه داده‌اند. با بیشتر نرم شدن لایه‌ی ضعیف پی، تنش‌های کششی بازهم افزایش می‌یابند. این تنش‌ها در سد معمولی در بدنه‌ی اصلی سد و در قسمت وسیعی رخ می‌دهد در حالی که در سد دارای پولینو بیشینه‌ی تنش کششی همواره در پولینو بوده و این تنش‌ها قادر به عبور از درز محیطی نبوده و به بدنه‌ی سد آسیب نمی‌رسانند، اما باید برای تقویت موضعی پولینو در مقابل تنش‌های کششی بیشینه چاره‌اندیشی کرد. نتایج تنش‌ها در جدول (۴) آمده است. اگر لایه‌ی نرم در پی و زیر بدنه‌ی سد باشد، با طراحی ویژه‌ی پولینو می‌توان مشکل لایه‌ی نرم را حل شده دانست. طراحی ویژه می‌تواند شامل طراحی عریض‌تر پولینو، استفاده از بتن مقاوم‌تر در ساخت پولینو و یا مسلح‌سازی بتن پولینو در ناحیه‌ی مستعد کشش باشد. البته هر یک از این روش‌ها باید ارزیابی شوند و کاراترین و اقتصادی‌ترین راه را انتخاب کرد. ساخت پولینو معایب و محدودیت‌هایی را نیز به همراه دارد. بتن پولینو نیاز به مسلح‌سازی دارد. تکنیک طراحی و اجرای سدهای دارای پولینو

جدول (۴) تنش‌های بیشینه

| Case name | maximum stresses (MPa) | | | | | | | |
|-------------------------------------------------|------------------------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|
| | compressive | | | | tensile | | | |
| | Dam body | | pulvino | | Dam body | | pulvino | |
| | upstream | downstream | upstream | downstream | upstream | downstream | upstream | downstream |
| conventional dam, uniform convenient foundation | 5.6 | 7.8 | - | - | 0.8 | 2 | - | - |
| dam with pulvino, uniform convenient foundation | 7 | 9.6 | 6 | 7 | 0.65 | 2.5 | 0.65 | 1.65 |
| conventional dam, foundation with weak layer | 5.5 | 9.7 | - | - | 1.7 | 3.3 | - | - |
| dam with pulvino, foundation with weak layer | 7.8 | 10.7 | 5.4 | 8.9 | 0.9 | 2.3 | 2.3 | 4.2 |

table (4) maximum principal stresses

6. Mirzabozorg H; Hariri MA; Amirpour A; "Perimetral Joint Effects on Stress Distribution and Seismic Behaviour of Arch Dams"; IABSE Symposium Repor, International Association for Bridge and Structural Engineering, 2010.

7. Meghella M; " Study of the influence of perimetral joint on behavior of the dams: Extension to seasonal thermal loads "; Rapporto ENELHydro Polo Idraulico Strutturale, 2003. "(in Italian)"

8. Naihua R; "Arch Dam Upslide-Failure & Safety Criterion"; Proceeding of International Workshop on Arch Dams Colombia, Portugal, 1987.

9. Alexander M.G.; Beushausen H.-D.; Dehn F; Moyo P.; "Concrete repair, Rehabilitation and Retrofitting III"; CRC Press, 2013.

10. Fenves GL; Mojtahedi S; Reimer RB; "ADAP-88: A computer program for nonlinear earthquake analysis of concrete arch dams"; Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California at Berkeley, 1989.

References

۶. مراجع

1. Novak P; Moffat AIB; Nalluri C; R.Narayanan; Hydraulic Structures; CRC Press, 2007.
2. Kurts j; Dictionary of Civil Engineering; Springer press, 2004.
3. Meghella M.; " Study of the influence of perimetral joint on static and dynamic behavior of dams "; Rapporto Enel Hydro PISn; 6215 Protocollo CESI, 2001."(in Italian)"
4. Dolcetta M; Marazio A; Bavestrello F; "The peripheral joint at the arch dams: design, behaviour and constructive aspects"; 39th Geomechanic-Colloquy, Salzburg, 1990.
5. Semenza C; "Arch Dams: Development In Italy"; Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1960, 125(1):954-73.

Perimetral joint and pulvino effects on the behavior of arch dam built on weak rock foundation

Mobin Mansoori¹, Mohammad T. Ahmadi^{2*}

1- M.Sc. Of Hydraulic Structures, Faculty Of Civil And Environmental Eng., Tarbit Modares University

2- Prof. Of Hydraulic Structures, Faculty Of Civil And Environmental Eng., Tarbiat Modares University

*mahmadi@modares.ac.ir

Abstract:

Design and construction of a concrete arch dam needs two essential conditions: these are good rock foundation and convenient topography. When these two conditions are satisfied, arch dams would be the most desirable and the most economical types of dams. Sometimes the geometry of the valley is good, but the rock foundation is not appropriate or the rock has good material but the geometry of valley is poor. One important factor in safe design of an arch dam is the rock foundation stability problem when a large part of the external loads is transferred to the foundation by the arches. In arch dams, these forces are much larger than similar forces as compared with other dams. Moreover, the stability of an arch dam also depends on bearing capacity of the rock foundation. The idea of construction of arch dams with perimetral joint and pulvino was introduced by Italian engineers in the 40s to improve stress conditions. It was gradually expanded in the following decades. Pulvino is a thick concrete pad built between the arch dam body and the rock foundation as a strip foundation. Use of this structural component, reduces the uncertainties of the rock foundation, enabling a thinner body for the dam. Thus providing perimetral joints between the pulvino and the dam body; ensures more symmetrical distribution of stresses within the dam body. It also reduces potential tensile stresses at the boundaries of the dam body. In this study, the effect of pulvino is investigated on the behavior of a concrete arch dam body built in a valley with weak rock layers. The results are compared with the case of a conventional concrete arch dam (Control Dam); i.e., without pulvino in the same valley conditions. In order to maintain the same concrete design properties, the volume of the Control Dam had to increase by 40% in respect to the total volume of the dam with pulvino. The foundation has a weak layer in different situations identically for both dams. The only nonlinearity accounted for, corresponds to the perimetral joints. Applied loads include the weight and the hydrostatic pressure load. The dam weight is applied step by step to simulate the staged-construction of a concrete arch dam. The ANSYS 12.1 program is used to create the finite element models of the objective arch dam and its foundation. Results of this study show that use of pulvino causes symmetric and uniform distribution of stresses in the dam body even if the rock layers are weak and asymmetric. Contrary to the Control Dam case, higher tensile stresses occur only inside the pulvino and thus the main body of the dam is protected against such stresses. As pulvino is usually reinforced, the dam with pulvino and its perimetral joint remain acceptable. Thus, despite a rather expensive and harder construction job for such dams with pulvino and perimetral joints, their considerably lower concrete volume may well compensate the problem. Thus this type of concrete arch dams remains still economic and competitive for the future designs.

Keywords: Concrete Arch dam, Pulvino, Perimetral joint, Rock foundation, Weak layer