

بررسی حساسیت لرزه‌های سدهای بتنی پشت بنددار

سید ژیان حسینی^۱، محمدتقی احمدی^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران، گرایش سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- استاد، دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

mahmadi@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۰/۲۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۶/۲۰

چکیده- بلندترین پایه‌ی سد بتنی پشتبنددار سفیدرود به صورت سه‌بعدی تحت اثر مولفه‌های طولی و قائم زلزله‌ی در دره‌ی ساختگاه سد تحلیل شده است. اندرکنش سد با پی و مخزن و جذب امواج هیدرودینامیک در کف و انتهای مخزن در نظر گرفته شده‌اند. شتاب‌نگاشت‌های اعمالی به سازه با توجه به شرایط ساختگاه سد سفیدرود مقیاس شده، و برای تعیین شرایط اولیه‌ی قبل از وقوع زلزله، یک سری تحلیل‌های استاتیکی تفصیلی انجام شده‌اند و سپس بارگذاری دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی ناشی از زلزله‌ی طولی و قائم در دره‌ی ساختگاه سد صورت گرفته و رفتار غیرخطی سد در برابر عوامل مختلف، مانند حالت‌های مختلف بارگذاری لرزه‌ای، مشخصات مصالح بدنه‌ی سد و پی، بررسی شده است. نتیجه تحلیل‌ها آن است که چهار منطقه‌ی اصلی از بدنه‌ی سد شامل محل تغییر شیب بدنه در پایاب از نظر کششی، پاشنه‌ی سد از نظر کششی، پنجه و لبه‌ی پشتبند سد به ویژه از نظر فشار و برش، مناطق حساس و آسیب‌پذیر سد می‌باشند. البته تحلیل‌ها نشان می‌دهد که احتمال شکست کششی در بیشتر نقاط حساس مذکور در بدنه با افزایش مقاومت فشاری بتن کاهش پیدا می‌کند. و در صورت نرمی زیاد پی، تنش‌های فشاری لرزه‌ای در پنجه‌ی سد افزایش زیادی دارند که گرچه معمولاً کمتر از مقاومت فشاری بتن باقی می‌ماند، ولی ممکن است منجر به شکست سنگ پی ضعیف شود. نکته قابل توجه دیگر این که هر قدر پی سد بتنی پشتبنددار، سخت‌تر باشد، در ساختگاه‌های لرزه‌خیز شکست موضعی در محل تغییر شیب پایاب، پاشنه و پنجه‌ی سد محتمل‌تر است. پس توصیه می‌شود در چنین شرایط از بتنی با مدول ارتجاعی بالاتر از حالات عادی برای بدنه‌ی سد استفاده شود.

واژگان کلیدی: سد بتنی پشتبنددار، تحلیل حساسیت، تحلیل دینامیکی غیرخطی، آسیب‌پذیری لرزه‌ای، سد سفیدرود.

۱- مقدمه

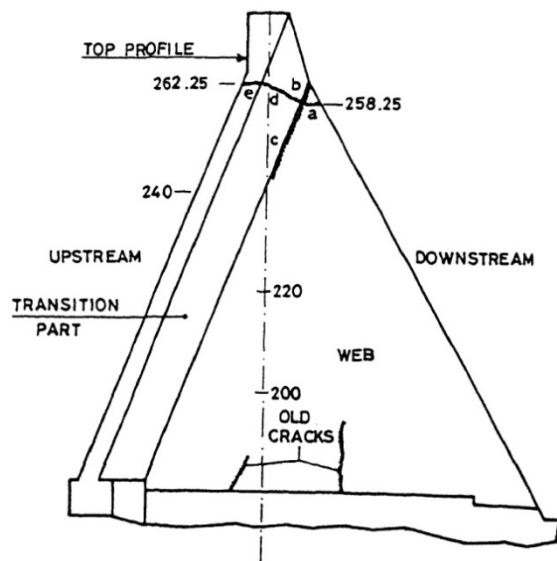
حساسیت این نوع از سدها نسبت به عوامل مختلف تأثیرگذار، مورد توجه قرار نگرفته است. سدهای پشتبنددار در مناطقی که بشر به ذخیره‌ی آب احتیاج داشت و در آنجا مصالح، کمیاب و یا گران‌قیمت و نیروی کار ارزان بود، پدیدار شدند [۱]. سدهای پشتبنددار برپایه ساختار سدهای بتنی حجیم با فضا‌های میانی خالی ساخته شده است. این

در کارهای انجام شده تاکنون، در مورد رفتار لرزه‌ای سدهای بتنی پشتبنددار^۱، فقط به بررسی نتایج آثار زلزله بر سدهای پشتبندداری مثل سفیدرود در ایران و هسینفن کیانگ^۲ در چین بسنده شده و مسئله‌ی سنجش

1- Concrete buttress dams

2- Hsinfengkiang

نشانه‌ای از چنین رفتاری در سد سفیدرود دیده نشده است [۵]. در سد سفیدرود از روی الگوی ترک می‌توان فهمید که تأثیر عمده در مکانیزم آسیب، ناشی از مؤلفه‌ی در راستای جریان^۴ زلزله بوده است و بنابراین اثر هیدرودینامیکی در خسارت ایجاد شده دخیل بوده است [۴].



شکل (۱) ترک‌های سمت چپ پشتبند شماره ۱۵ سد سفیدرود [۴]

پس از ترک‌خوردگی سد سفیدرود در اثر زلزله‌ی مذکور، مطالعات عددی و آزمایشگاهی جامعی بر روی این سد صورت گرفت. احمدی و همکاران [۴ و ۵] به بررسی رفتار سد با استفاده از مدل‌های عددی پرداختند و نشان دادند که الگوی ترک‌خوردگی در سد تحت اثر زلزله‌ی MCE، مشابه آنچه که در واقعیت رخ داده خواهد بود. مطالعات قائمیان و قائم‌مقامی [۷] روی مدل کوچک‌مقیاس سد سفیدرود بر روی میز لرزان^۵ نیز این الگوی ترک‌خوردگی را تأیید کرد. کارهای ترمیمی روی سازه‌ی سد پس از وقوع زلزله که بر اساس بازیابی مقاومت برشی درزهای اجرایی افقی

فضاهای خالی اجزای تراوش آب از پی سد را می‌دهند و با کاهش سطح قاعده‌ی سد، فشارهای برکنش^۱ را به میزان زیادی کاهش می‌دهند. وجود این فضاهای میانی خالی، آزاد شدن حرارت تولیدی حین فرآیند گیرش بتن را نیز آسان می‌کند، بنابراین اقدامات لازم برای خنک کردن بتن در ساخت این سدها به ندرت لازم خواهد بود [۲]. البته در کنار این مزایا، سدهای پشتبنددار معایبی مانند قالب‌بندی پیچیده و آسیب‌پذیری حرارتی دارند.

اجزای سازه‌ی اصلی یک سد پشتبنددار، دیواره‌ی سراب به عنوان نگهدارنده‌ی آب و تیغه‌های پشتبند است. انواع مختلفی از این سدها ساخته شده‌اند که تفاوت آنها در شکل دیواره‌ی سراب بوده و پشتبندها تفاوت‌های کمی دارند [۳].

یکی از مهمترین حوادث لرزه‌ای تجربه‌شده به وسیله‌ی سدهای بتنی پشتبنددار، مربوط به سد سفیدرود است. سد سفیدرود در ایران در ۲۱ ژوئن ۱۹۹۰ زلزله‌ی شدیدی را تجربه کرد. طبق پژوهش‌های انجام شده در سال ۱۹۹۱، بیشینه زلزله‌ی قابل باور^۲ (MCE) در محل، احتمالاً بزرگی ۷/۸ ریشتر دارد که این زلزله‌ی، تقریباً مشابه آن بوده است [۴]. می‌توان گفت که حادثه‌ی سد سفیدرود (در ۲۱ ژوئن ۱۹۹۰)، شدیدترین فعالیت لرزه‌ای تجربه‌شده به وسیله‌ی یک سد بتنی پشتبنددار است [۵].

در اثر این زلزله، بیشتر آسیب وارد بر سازه‌ی سد سفیدرود، در یک چهارم فوقانی پشتبندها متمرکز شده بود و بیشتر پشتبندهای مرکزی تحت تأثیر قرار گرفته بودند [۶]. برای نمونه، ترک‌های روی پشتبند شماره ۱۵ سد سفیدرود در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.

شبهه‌ی پشتبندها، مستعد آسیب ناشی از خمش زیاد حول محور ضعیفشان تحت مؤلفه‌ی عرضی زلزله^۳ است ولی با این وجود به خاطر ضخامت مناسب پشتبندها،

4- Stream direction
5- Shaking table

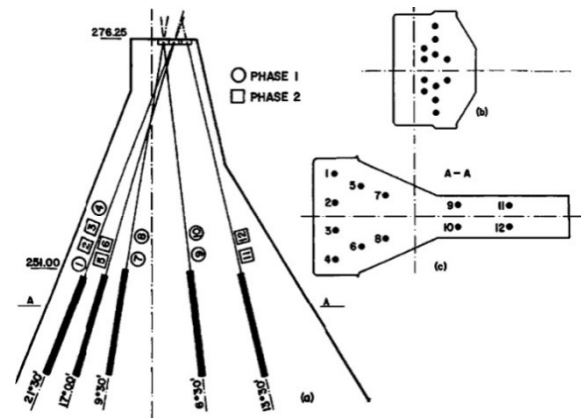
1- Uplift pressures
2- Maximum credible earthquake
3- Cross- canyon

سه‌بعدی و با در نظر گرفتن اثر پی و مخزن، به وسیله نرم‌افزار المان محدود Ansys12.0 مدل‌سازی شده است.

تحلیل سیستم با شبکه‌بندی مایع المان محدود با صفحه‌ی بالادست واقع در مسافتی به میزان حداقل سه برابر عمق آب مخزن از وجه بالادست سد صورت می‌گیرد. یک مدل پی که به اندازه‌ی ارتفاع سد در جهات بالادست و پایین‌دست، عرض جریان و به سمت پایین^۳ ادامه یابد کافی است. با این وجود، وقتی که نسبت مدول ارتجاعی سنگ پی به مدول ارتجاعی بتن کمتر از ۰/۵ باشد، مش پی با ابعادی به اندازه‌ی دو برابر ارتفاع سد یا بیشتر لازم خواهد بود [۹]. در تحلیل‌های صورت گرفته در این پژوهش، از مش پی با ابعادی به اندازه‌ی دو برابر ارتفاع سد استفاده شده است. با توجه به ملاحظات مهندسی بارگذاری لرزه‌ای وزن پی در تحلیل استاتیکی و جرم پی در تحلیل دینامیکی برابر صفر فرض شده است.

با توجه به آنکه در تحلیل‌های صورت گرفته، تحلیل حرارتی نیز انجام شده است و نتایج تحلیل حرارتی که در واقع توزیع تغییرات دمای محیطی در بدنه‌ی سد است در تحلیل‌های استاتیکی و نیز دینامیکی استفاده می‌شود؛ شبکه‌بندی^۴ باید به گونه‌ای انجام شود که المان‌های به کار رفته در تحلیل‌های حرارتی و سازه‌ای با هم سازگار باشند و به بیان دیگر، گره‌های آنها در هر دو حالت، یکسان و متناظر باشند. به همین منظور، در تحلیل حرارتی که فقط روی بدنه‌ی سد انجام می‌شود و نیازی به مدل کردن پی و مخزن نیست، برای شبکه‌بندی بدنه‌ی سد از المان solid87 استفاده شده است. این المان، المان حرارتی سه‌بعدی، چهار وجهی و ۱۰ گرهی است که یک درجه‌ی آزادی تحت عنوان حرارت دارد. المان‌های سازه‌ای متناسب و سازگار با این المان حرارتی، المان‌های solid92 و solid187 می‌باشند که با توجه به آنکه در ادامه‌ی

ترک‌خورده با استفاده از سیستم مهارهای پس‌کشیده^۱ با عبور از درزهای ترک‌خورده بود، در نوامبر ۱۹۹۰ شروع شد. مهارها در دو مرحله‌ی متفاوت در بدنه‌ی سد قرار داده شدند. یک الگوی جانمایی^۲ مهارها برای تمام پشتبندها مطابق شکل ۲ انتخاب شد که بر اساس آن مهارها به صورت مایل با زاویه‌ای بین ۶/۵ و ۲۱/۵ درجه در صفحات عمود بر محور سد قرار می‌گرفتند [۸].



شکل (۲) مهارهای پس‌کشیده در پشتبندهای ۲۳-۸ سد سفیدرود،

a: مقطع عرضی، b: نمای فوقانی و c: مقطع A-A [۸]

تحلیل‌های صورت گرفته به وسیله احمدی و همکاران [۵] و مطالعات قائمیان و قائم‌مقامی [۸] روی مدل کوچک مقیاس بهسازی شده‌ی سد سفیدرود بر روی میز لرزان نشان داد الگوی ترمیم و بهسازی برای بازیابی مقاومت‌های از دست‌رفته مناسب است.

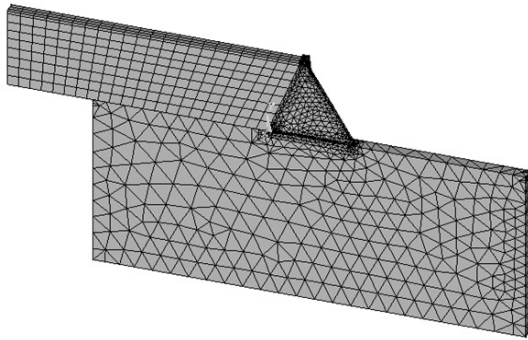
۲- مدل‌سازی عددی

مدل‌سازی عددی رفتار لرزه‌ای سازه‌های بزرگ نظیر سدها وسیله‌ای است که به وسیله آن عملکرد لرزه‌ای آنها با تلاش محدودی می‌تواند ارزیابی شود. در پژوهش حاضر، بلندترین پایه‌ی سد بتنی پشتبنددار سفیدرود به ارتفاع ۱۰۶ متر به صورت

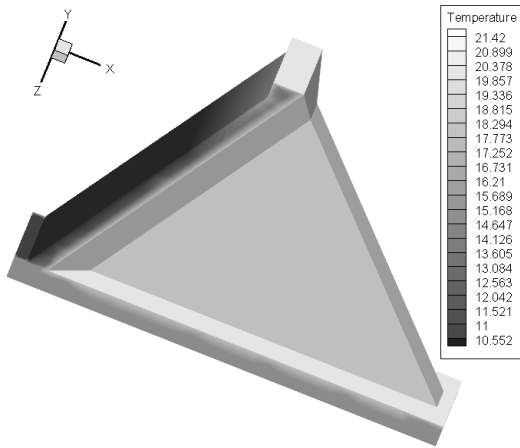
3- Downwards
4- Meshing

1- Post-tensioned anchors
2- Layout pattern

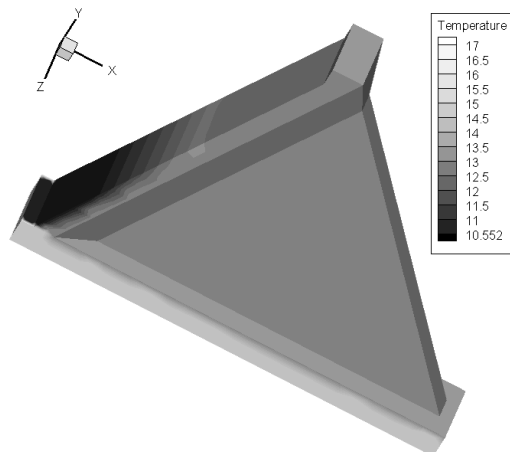
ترتیب در شکل ۴ و شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل (۳) نحوه‌ی شبکه‌بندی سیستم سد-مخزن-پی



شکل (۴) توزیع حرارت در بدنه‌ی سد در فصل تابستان (اواسط مرداد ماه)، برحسب درجه‌ی سلسیوس



شکل (۵) توزیع حرارت در بدنه‌ی سد در فصل زمستان (اواسط بهمن ماه)، برحسب درجه‌ی سلسیوس

تحلیل‌ها، رفتار غیرخطی بتن به وسیله‌ی مدل دراگر-پراگر^۱ تعریف خواهد شد و از بین این دو المان، فقط المان solid92 قابلیت تخصیص رفتار غیرخطی با مدل دراگر-پراگر را دارد، از این المان در شبکه‌بندی بدنه‌ی سد در تحلیل‌های سازه‌ای استفاده شده است. برای شبکه‌بندی پی سنگی سد نیز از همین المان استفاده شده است. المان solid92، المان سازه‌ای سه‌بعدی، چهار وجهی و ۱۰ گرهی است که دارای سه درجه‌ی آزادی انتقالی در جهت‌های x ، y و z است و قابلیت تخصیص رفتار غیرخطی با مدل دراگر-پراگر را دارد.

برای شبکه‌بندی مخزن، تنها گزینه‌ی موجود در نرم‌افزار برای هندسه‌ی سه‌بعدی، المان fluid30 است که المان آکوستیکی سه‌بعدی، شش وجهی و ۸ گرهی است که دارای چهار درجه‌ی آزادی، سه درجه‌ی آزادی انتقالی در جهت x ، y و z و یک درجه‌ی آزادی فشار است. مدل سد-پی-مخزن و همچنین نحوه‌ی شبکه‌بندی مورد استفاده در تحلیل‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است.

پس از شبکه‌بندی بدنه‌ی سد و پی، به منظور امکان دستیابی به اطلاعات تنش در فصل مشترک سد و پی برای بررسی احتمال رخداد شکست برشی بین سد و پی که یک موذ شایع شکست سدهای وزنی است؛ بین آن دو، سطح تماسی تعریف می‌کنیم. این کار با تعریف دو لایه المان contact و target که یک contact pair ایجاد می‌کنند صورت می‌گیرد. المان target استفاده شده، target170 و المان contact استفاده شده نیز المان conta174 است.

۳- تحلیل حرارتی

نتایج تحلیل‌های حرارتی بر اساس مشخصات حرارتی بتن و اطلاعات دمایی ناحیه سد سفیدرود که از مرجع [۱۰] اخذ شده، برای شرایط حرارت تابستانی و زمستانی به

1- Drucker- Prager

۵- شرایط مرزی در محیط سیال

با توجه به شکل ۶، برای محیط سیال، چهار شرط مرزی در بالادست مخزن، کف مخزن، سطح آزاد مخزن و فصل مشترک سد با مخزن، قابل تعریف است که در ادامه به توضیح هر کدام خواهیم پرداخت.

شرایط مرزی بالادست و کف مخزن که تماس با محیط نیمه بینهایت را بیان می‌کنند می‌توانند به صورت معادله‌ی زیر نمایش داده شوند:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = \frac{-1}{\beta v_s} \dot{p} \quad (1)$$

که در آن n جهت انتشار موج، v_s سرعت انتشار امواج فشار هیدرودینامیک در محیط سیال، p فشار هیدرودینامیک و β ضریب انکسار موج در بستر نامحدود مخزن است؛ به تعبیری دیگر اگر کمیت ρv را که حاصل ضرب جرم مخصوص ماده در سرعت انتشار موج است، امپدانس آکوستیکی محیط بنامیم، β نسبت امپدانس آکوستیکی محیط نامحدود مجاور مخزن به محیط سیال است و به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$\beta = \frac{1 + \varepsilon}{1 - \varepsilon} = \frac{\rho_b v_b}{\rho v_s} \quad (2)$$

که در آن اندیس b محیط نامحدود مجاور مخزن را نشان می‌دهد، ρ جرم مخصوص سیال، و ε نسبت دامنه‌ی موج پس‌رو به دامنه‌ی موج پیش‌رو (ضریب بازتاب موج از مرز) می‌باشد. اگر فرض کنیم که مخزن تا بی‌نهایت ادامه داشته باشد، در این صورت در مرز بالادست ($n=x$)، تنها موج پیش‌رو خواهیم داشت و ε مساوی صفر خواهد بود (و β مقداری برابر یک خواهد داشت) پس:

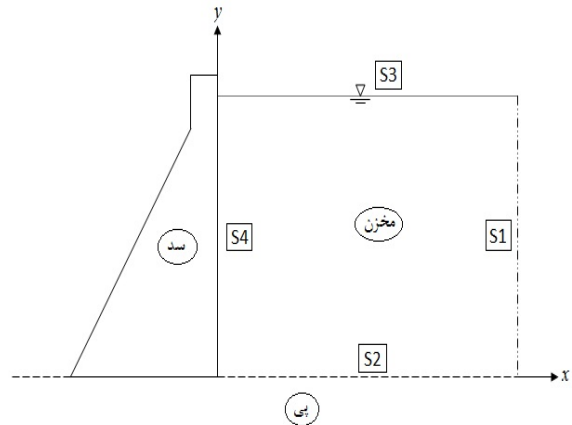
$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{-1}{v_s} \dot{p} \quad (3)$$

مطالعات عددی نشان می‌دهند که جذب کف مخزن میرایی

جدول (۱) مشخصات حرارتی بتن و اطلاعات دمایی ناحیه‌ی سد

سفیدرود

مدول ارتجاعی بتن	۲۰ گیگاپاسکال
ضریب پواسون بتن	۰/۱۷
جرم مخصوص بتن	۲۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب
ضریب انبساط حرارتی بتن	8×10^{-6} بر درجه‌ی سلسیوس
قابلیت هدایت گرمایی بتن	۲ کیلوکالری بر متر بر ساعت بر درجه‌ی سلسیوس
گرمای ویژه‌ی بتن	۰/۲۲ کیلوکالری بر کیلوگرم بر درجه‌ی سلسیوس
درجه حرارت مرجع	۱۴ درجه‌ی سلسیوس
میانگین دمای هوا در سردترین ماه سال	۱۲/۷ درجه‌ی سلسیوس
میانگین دمای هوا در گرم‌ترین ماه سال	۲۲/۴ درجه‌ی سلسیوس

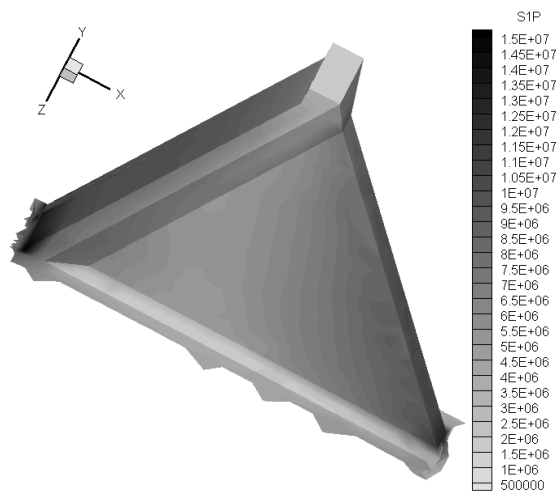


شکل (۶) سیستم سد-مخزن-پی و شرایط مرزی چهارگانه در مخزن

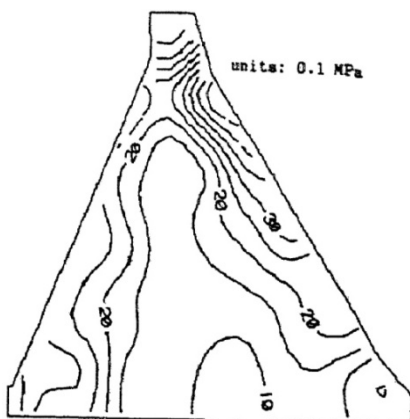
۴- تحلیل مقادیر ویژه

نتایج تحلیل مقادیر ویژه برای سیستم با مخزن پر، نشان از آن است که در مود هشتم با فرکانس $6/78$ هرتز، ۹۰ درصد جرم مودی در جهات افقی و قائم تأمین شده است. این مود به همراه مود اول که دارای فرکانس $2/51$ هرتز است در محاسبه‌ی ضرایب میرایی رایلی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

هیدرواستاتیکی آب، فشار برکنش و حرارت تابستانی و رکورد زلزله‌ی آب‌بر، که مؤلفه‌ی افقی آن به 0.714g مقیاس شده، صورت گرفته است و نتایج حاصل با نتایج ذکر شده در مرجع [۴] مقایسه شده‌اند. با توجه به شکل ۷، مقدار مورد تأکید در مجاورت بخش تغییر شیب پایین دست و نیز الگوی توزیع تنش‌ها با آنچه که در شکل ۸ آمده‌اند، هماهنگی قابل قبولی دارند و نشانگر صحت مدل‌سازی و تحلیل صورت گرفته است.



شکل (۷) کانتورهای تنش کششی بیشینه در بدنه‌ی سد برحسب پاسکال در تحلیل خطی تحت اثر بارهای استاتیکی (وزن، فشار هیدرواستاتیکی آب، فشار برکنش و حرارت تابستانی) و زلزله‌ی آب‌بر (مقیاس شده به 0.714g)



شکل (۸) تنش‌های کششی اصلی، تحت رکورد آب‌بر مقیاس شده [۴]

مؤثر سیستم را افزایش می‌دهد؛ بنابراین پاسخ سد به بارگذاری لرزه‌ای را کاهش می‌دهد. این کاهش^۱ پاسخ در تمام فرکانس‌های تحریک رخ می‌دهد اما در فرکانس‌های اساسی^۲ سد اهمیت بیشتری دارد و قابل توجه است [۹]. نحوه‌ی برخورد با این مرز شبیه مرز بالادست است، با این تفاوت که در این مرز ممکن است قسمتی از امواج که به کف مخزن برخورد می‌کند ($n=y$)، به دلیل لایه‌های نرم رسوبی و با توجه به جنس مصالح کف مخزن که نامحدود است، جذب آن شده و قسمتی از آن منعکس شود. به عبارت دیگر در این حالت ε بین صفر و یک بوده و در نتیجه β نیز کوچکتر از یک است. پس در مرز کف خواهیم داشت:

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{-1}{\beta v_s} \dot{p} - \rho \ddot{u}_{gn} \quad (۴)$$

که در آن \ddot{u}_{gn} شتاب زمین در جهت عمود بر کف مخزن است. با چشم پوشی کردن از امواج سطحی در سطح مخزن می‌توان با تقریب خوبی شرط مرزی سطح آزاد را این گونه گفت [۱۱]:

$$p = 0 \quad (۵)$$

اگر a_{ns} شتاب وجه بالادست سد در جهت عمود بر سطح سد و n بردار عمود بر سطح تماس سد با مخزن باشد، بدین ترتیب شرط مرزی بین سد و مخزن به شکل زیر به دست می‌آید [۱۱]:

$$\rho a_{ns} = -grad p \cdot n = -\frac{\partial p}{\partial n} \quad (۶)$$

۶- صحت‌سنجی مدل مورد استفاده

برای سنجش صحت مدل به کار رفته در تحلیل‌ها، تحلیل خطی مدل تحت اثر بارهای استاتیکی وزن، فشار

1- Reduction
2- Fundamental

۷- مطالعات حساسیت سنجی

به منظور مطالعه‌ی میزان حساسیت سدهای بتنی پشتبنددار به نوع بتن مصرفی در بدنه‌ی سد، نسبت مدول ارتجاعی بتن به کار رفته در بدنه‌ی سد به سنگ پی و نوع زلزله‌ی وارد بر سازه، سه نوع بتن با مقاومت‌های فشاری ۱۷، ۲۵ و ۳۵ مگاپاسکال، سه حالت مدول نرمی پی (نسبت مدول‌های ارتجاعی بتن بدنه‌ی سد و سنگ پی) با مقادیر ۱، ۵ و ۱۰ و سه زلزله‌ی ثبت‌شده روی سنگ، شامل: زلزله‌ی کولینگا، ثبت‌شده در ایستگاه Anticline Ridge، زلزله‌ی نورتریج، ثبت‌شده در ایستگاه Pacoima Dam (downstream) و زلزله‌ی منجیل، ثبت‌شده در ایستگاه آب‌بر مورد استفاده قرار گرفتند. در تحلیل‌ها از مؤلفه‌های طولی و قائم شتاب‌نگاشت‌ها استفاده کرده‌ایم و اثر مؤلفه‌ی عرضی زلزله‌ها را نادیده گرفته‌ایم. دلایلی مانند عدم مشاهده موارد قابل توجه خسارت لرزه‌ای تحت زلزله‌ی عرضی، و یا با فرض مقید کردن مونولیت‌ها در جهت عرضی (عمودبر جریان)، این مطلب را توجیه پذیر می‌سازد؛ علاوه بر این، در پژوهش‌های دیگران و مطالعات انجام‌شده در گذشته نیز اثر مؤلفه‌ی عرضی زلزله لحاظ نشده است. از ترکیب حالات ذکر شده برای هر کدام از موارد فوق، ۲۷ حالت مختلف (مطابق جدول ۲) را می‌توان در نظر گرفت. برای ساختگاه سد سفیدرود، بیشینه شتاب افقی مبنای طرح حرکت زمین برابر 0.32g برآورد شده است و این شتابی است که رویداد آن در عمر مفید سد، بسیار قابل انتظار است [۱۲]. بر این اساس، مؤلفه‌ی افقی این شتاب‌نگاشت‌ها به این مقدار مقیاس شده و برای مقیاس کردن مؤلفه‌های قائم آنها نیز از همان نسبت تعدیل مؤلفه‌ی افقی شتاب‌نگاشت استفاده شده است. با توجه به طولانی بودن رکوردها و نیز اثر ناچیز مقادیر شتاب کوچکتر از 0.05g+ و 0.05g-، از محدوده‌ای از مؤلفه‌ی افقی شتاب‌نگاشت‌ها که در آن شتاب‌ها بیش از مقادیر ذکر شده هستند استفاده شده است و مؤلفه‌های قائم آنها نیز در

همان محدوده‌ی زمانی استفاده شده است. طیف‌های پاسخ ساختگاه سد سفیدرود با احتمال رویداد ۰/۰۱، ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۵ در سال، به همراه طیف پاسخ زلزله‌های مقیاس‌شده برای ضریب میرایی ۵ درصد در شکل ۹ نشان داده شده‌اند.

جدول (۲) حالت‌های موردنظر برای انجام مطالعات پارامتریک

ردیف	مدول نرمی			مقاومت فشاری بتن (مگاپاسکال)			شتاب‌نگاشت		
	۱	۵	۱۰	۱۷	۲۵	۳۵	۱	۲	۳
۱	*			*			*		
۲	*				*		*		
۳	*					*	*		
۴		*		*			*		
۵		*			*		*		
۶		*				*	*		
۷			*	*			*		
۸			*		*		*		
۹			*			*	*		
۱۰	*			*			*		
۱۱	*				*		*		
۱۲	*					*	*		
۱۳	*	*		*			*		
۱۴	*	*			*		*		
۱۵	*	*				*	*		
۱۶		*	*	*			*		
۱۷		*	*		*		*		
۱۸		*	*			*	*		
۱۹	*			*			*		
۲۰	*				*		*		
۲۱	*					*	*		
۲۲	*	*		*			*		
۲۳	*	*			*		*		
۲۴	*	*			*		*		
۲۵	*	*		*			*		
۲۶	*	*		*			*		
۲۷	*	*		*			*		

برای محاسبه‌ی مدول ارتجاعی بتن از روی مقاومت فشاری و وزن مخصوص آن روابط مختلفی وجود دارند که در مرجع [۱۳] برای بتن با مقاومت‌های فشاری در محدوده‌ی ۲۱ تا ۸۳ مگاپاسکال، رابطه‌ی (۸) و در مرجع [۱۴] رابطه‌ی (۹) به نقل از مؤسسه‌ی معماری ژاپن (AIJ) ارائه شده است.

$$E_c = 3320\sqrt{f'_c} + 6900 \quad (8)$$

$$E_c = 2.1 \times 10^5 \left(\frac{\gamma}{2300}\right)^{1.5} \sqrt{\frac{f'_c}{2000}} \quad (9)$$

در این دو رابطه، f'_c مقاومت فشاری بتن برحسب مگاپاسکال و γ وزن مخصوص بتن بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب است و از آنجا E_c برحسب مگاپاسکال به دست خواهد آمد. در محاسبات انجام شده، با توجه به اینکه رابطه‌ی (۸) برای بتن حجیم^۱ ارائه شده، بیشتر این رابطه مورد توجه قرار گرفته (برای مقاومت‌های فشاری ۲۵ و ۳۵ مگاپاسکال) و فقط در حالت مقاومت فشاری ۱۷ مگاپاسکال از رابطه‌ی (۹) استفاده شده است. با تغییر تحلیل از حالت استاتیکی به دینامیکی، مقادیر مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول ارتجاعی (در بتن و سنگ) به ترتیب ۳۰، ۵۰ و ۲۵ درصد افزایش داده شد. با توجه به در نظر گرفتن رفتار غیرخطی برای بتن بدنه‌ی سد با استفاده از معیار دراکر-پراگر، با معلوم بودن مقادیر مقاومت فشاری (f'_c) و مقاومت کششی (f'_t) بتن، پارامترهای چسبندگی (c) و زاویه‌ی اصطکاک داخلی (ϕ) با استفاده از روابط (۱۰) و (۱۱)، ارائه شده در مرجع [۱۵] محاسبه شده‌اند.

$$f'_c = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (10)$$

$$f'_t = \frac{2c \cos \phi}{1 + \sin \phi} \quad (11)$$

همان‌گونه که از نمودار طیف پاسخ زلزله‌های مورد استفاده قابل مشاهده است، مقدار بیشینه شتاب در طیف پاسخ زلزله‌ی نورتریج منطبق بر دوره‌ی تناوب اصلی (مود اول) سیستم سد-پی-مخزن بوده و مقدار قابل توجهی نیز دارد. در مورد طیف پاسخ زلزله‌ی آب‌بر، این هماهنگی در دوره‌ی تناوب مود هشتم (تأمین کننده‌ی ۹۰ درصد جرم مودی) سیستم رخ می‌دهد. در کل، در مجاورت دوره‌ی تناوب مودهای پایین (مودهای اول تا سوم) سیستم، زلزله‌ی نورتریج شتاب بیشتری دارد و زلزله‌های آب‌بر و کولینگا در رده‌های بعدی قرار می‌گیرند. بحرانی‌تر بودن شرایط، تحت زلزله‌ی نورتریج و پس از آن، زلزله‌ی منجیل (رکورد آب‌بر) و با شدت بسیار کمتر در زلزله‌ی کولینگا با توجه به این مطالب، قابل توجه است. در تمام ۲۷ حالت تحلیل، ابتدا بارهای استاتیکی (شامل بار وزن، فشار هیدرواستاتیک مخزن، برکنش و حرارت تابستانی) بر سازه اعمال و نتیجه‌ی حاصل، به عنوان شرایط اولیه در تحلیل دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی که در ادامه‌ی آن صورت می‌گیرد در نظر گرفته شده‌اند. علت استفاده از شرایط حرارت تابستانی در تحلیل‌ها آن است که تحلیل‌های انجام شده برای مقایسه‌ی اثر حرارت تابستانی و زمستانی، نشانگر بحرانی‌تر بودن شرایط تنش در بدنه‌ی سد در حالت حرارت تابستانی نسبت به حرارت زمستانی بود؛ البته بالاتر بودن تراز آب مخزن در شرایط تابستانی، (در حدود ۴۴ متر) نسبت به شرایط زمستانی نیز اثر چشمگیری در افزایش تنش‌های هیدرواستاتیک و هیدرودینامیک و در نتیجه در بحرانی‌تر شدن شرایط در فصل تابستان دارد. با معلوم بودن مقدار مقاومت فشاری بتن (f'_c)، با استفاده از رابطه‌ی رافائل (رابطه‌ی (۷))، مقدار مقاومت کششی بتن (f'_t) محاسبه شده است.

$$f'_t = 0.33 \left(f'_c\right)^{\frac{2}{3}} \quad (7)$$

1- Mass concrete

زاویه‌ی اتساع^۱ که دیگر پارامتر لازم در تحلیل غیرخطی در نرم‌افزار با استفاده از معیار دراکر-پراگر است در تمامی حالات برابر ۱۰ درجه در نظر گرفته شده است.

مطابق با طیف‌های پاسخ رسم شده برای ساختگاه سد سفیدرود و زلزله‌های مقیاس شده، می‌توان گفت که زلزله‌های نورتریج و آبربر در بیشینه سطح طراحی (MDL) قرار می‌گیرند، هرچند به 0.32g مقیاس شده‌اند. ولی زلزله‌ی کولینگا در سطح مبنای طراحی (DBL) است؛ بنابراین سازه تحت اثر این دو گروه زلزله رفتار متفاوتی خواهد داشت و کمتر بودن تنش‌های ایجاد شده در سازه تحت اثر زلزله‌ی کولینگا نسبت به زلزله‌های نورتریج و آبربر، علاوه بر کمتر بودن شتاب این زلزله نسبت به دو زلزله‌ی دیگر (به ویژه در کنار دوره‌ی تناوب مودهای پایین سیستم)، به تفاوت سطوح حرکتی زمین در این زلزله‌ها نیز مربوط می‌شود و انتظار می‌رود که سازه تحت اثر زلزله‌ی بیشینه سطح طراحی (نظیر زلزله‌های نورتریج و آبربر) نسبت به زلزله‌ی سطح مبنای طراحی (نظیر زلزله‌ی کولینگا) شرایط بحرانی تری را تجربه کند؛ این مطلب در نتایج به دست آمده به روشنی دیده می‌شود.

در ادامه، کانتورهای بیشینه مقادیر تنش کل و جا به جایی کل تجربه شده به وسیله‌ی گره‌های مختلف شبکه‌ی بدنه‌ی سد در کل مدت زمان اعمال شتاب‌نگاشت در بین ۲۷ حالت تحلیل شده، نشان داده می‌شوند. نرم‌افزار مورد استفاده (Ansys12.0) چنین کانتورهایی را به عنوان خروجی نمی‌دهد و فقط قادر است در یک گام زمانی خاص از زمان اعمال شتاب‌نگاشت، نتایج را نشان دهد. این برنامه هر چند ممکن است در یک گره خاص از شبکه، بیشینه مقادیر تجربه‌شده را نشان دهد ولی بیشینه مقادیر تجربه‌شده به وسیله‌ی گره‌های مختلف شبکه‌ی بدنه‌ی سد در یک گام زمانی خاص و به صورت هم‌زمان اتفاق نمی‌افتند؛ پس

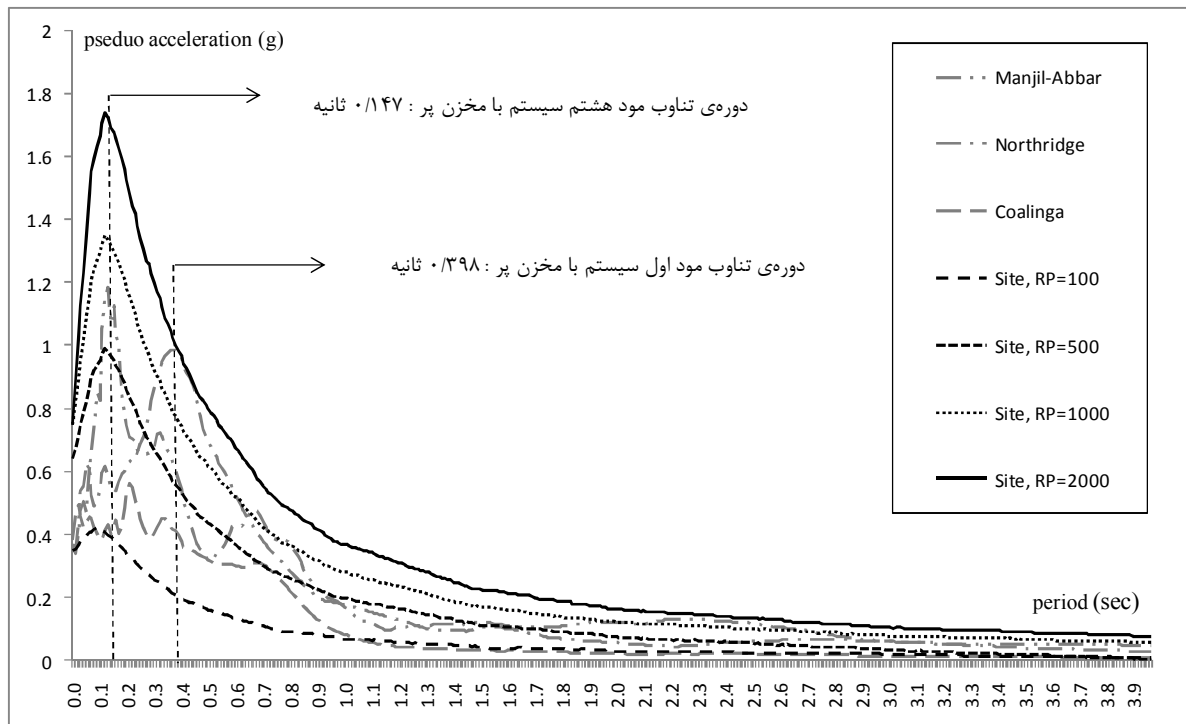
برای یافتن مقادیر بیشینه تجربه‌شده در هر گره در کل زمان اعمال شتاب‌نگاشت، برنامه‌ای (به زبان APDL) به فایل تحلیل شده در حالات مختلف بیان شده، اضافه شد. سپس خروجی حاصل از آن با نرم‌افزار Tecplot به صورت نشان داده شده رسم شد. همان‌گونه که از این شکل‌ها پیداست، بیشینه تنش‌های فشاری و برشی در محدوده‌ی پنجه و بیشینه تنش کششی در محدوده‌ی پاشنه‌ی سد رخ داده‌اند. به طور کلی می‌توان گفت که در بیشتر حالات ذکرشده، با افزایش مقاومت فشاری بتن، اندازه‌ی تنش‌ها و البته مقاومت‌های کششی و برشی نیز افزایش پیدا می‌کند؛ هر چند که در تعداد محدودی از حالت‌ها، با افزایش مقاومت فشاری بتن، تنش‌ها به صورت موضعی کاهش یافته‌اند. با نرم‌تر شدن پی، در سه موضع حساس از بدنه‌ی سد (گره‌های میانی قرار گرفته در محل تغییر شیب پایین‌دست، پاشنه و پنجه)، تنش‌های کششی کاهش پیدا کرده و در مقابل، تنش‌های فشاری در محل پنجه افزایش یافته است.

با افزایش مقاومت فشاری بتن، جا به جایی سد در جهت جریان و نیز به طرف پایین (نشست سد) کاهش پیدا کرده است. با افزایش نرمی پی، شاهد افزایش جا به جایی سد در جهت جریان و نیز به طرف پایین (نشست سد) بوده‌ایم.

با توجه به کانتورهای بیشینه تنش‌های کششی، فشاری و فون میزس (دو برابر تنش برشی حداکثر) رسم شده برای حالت‌های مختلف، می‌توان نتیجه گرفت که تنش‌های فشاری در بدنه‌ی سد بسیار کمتر از مقاومت فشاری بتن خواهند بود و در نتیجه احتمال شکست فشاری منتفی است. اما در مورد تنش‌های کششی و برشی وضعیت متفاوتی حاکم است و در مناطقی همچون محل تغییر شیب پایین‌دست، پاشنه و پنجه، تنش‌های بزرگی ایجاد می‌شود و احتمال آسیب بدنه‌ی سد و یا پی، تحت آن تنش‌ها در مناطق ذکر شده زیاد است.

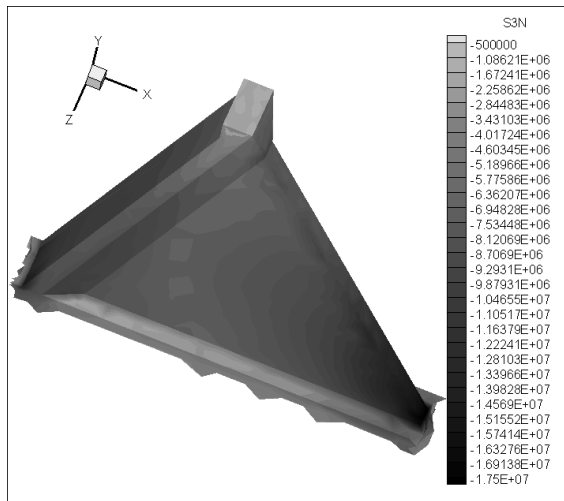
1- Dilatancy angle

2- Ansys Parametric Design Language

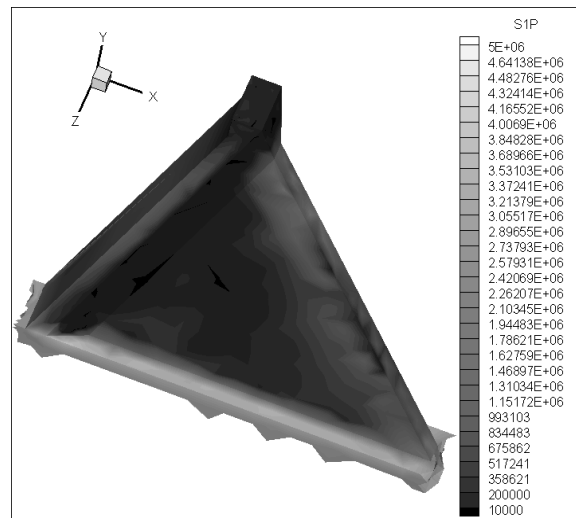


شکل (۹) طیف‌های پاسخ ساختگاه سد سفیدرود و زلزله‌های مقیاس شده

است؛ یکی مقادیر تنش‌ها در نقاط مختلف بدنه‌ی سد (که البته محدوده‌هایی مانند محل تغییر شیب پایین دست، پاشنه و پنجه‌ی سد مورد توجه اصلی قرار می‌گیرند)



شکل (۱۱) کانتورهای تنش فشاری بیشینه در بدنه‌ی سد برحسب پاسکال برای حالت زلزله‌ی نورتریج و مدول نرمی پی برابر ۵ و مقاومت فشاری بتن برابر ۳۵ مگاپاسکال (حالت شماره ۱۵)

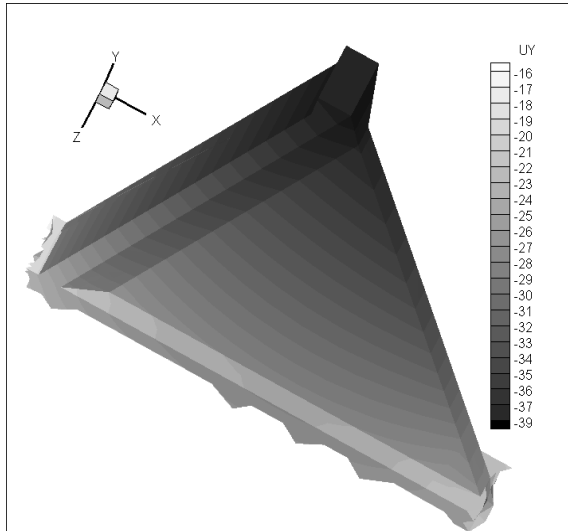


شکل (۱۰) کانتورهای تنش کششی بیشینه در بدنه‌ی سد برحسب پاسکال برای حالت زلزله‌ی نورتریج و مدول نرمی پی برابر ۵ و مقاومت فشاری بتن برابر ۳۵ مگاپاسکال (حالت شماره ۱۵)

۸- بحث روی نتایج تحلیل‌ها

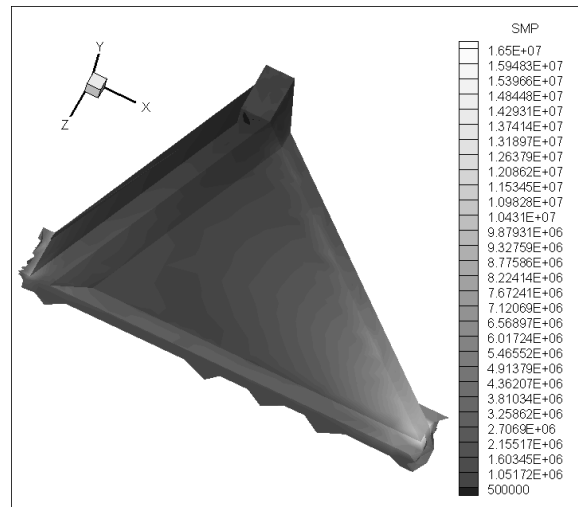
دو مسئله در تحلیل سدهای وزنی و پشتبنددار دارای اهمیت

که تعریف آن در مرجع [۱۶] آمده است به صورت تعمیم یافته؛ که در واقع نسبت تنش محاسبه شده به مقاومت موجود در بتن بدنه‌ی سد است، و دیگری، پارامتر F ، که پارامتر ایمنی برشی در سطح تماس سد و پی است.

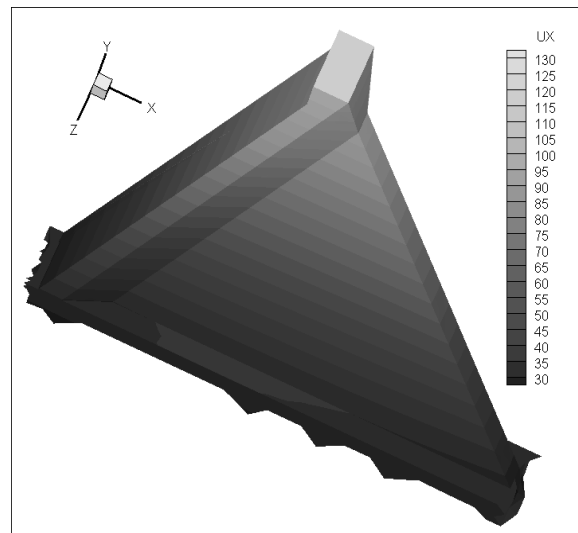


شکل (۱۴) کانتورهای جا به جایی قائم بیشینه بدنه‌ی سد برحسب میلی‌متر در حالت زلزله‌ی نورتریج و مدول نرمی پی برابر ۱۰ و مقاومت فشاری بتن برابر ۱۷ مگاپاسکال (حالت شماره ۱۶)

البته باید به این نکته اشاره کرد که از DCR در تحلیل‌های خطی استفاده می‌شود و استفاده از مفهوم آن در این بخش (که مربوط به تحلیل‌های غیرخطی است) با هدف شناسایی محل‌های خسارت (با مقادیر DCR نزدیک به یک) است. در واقع با استفاده از مقدار DCR در نقاط حساس بدنه‌ی سد احتمال شکست‌های کششی و فشاری بررسی می‌شود. از آنجا که در سطح بارگذاری لرزه‌ای در این پژوهش رفتار غیرخطی مصالح بتن، نه در کشش و نه در فشار یا برش در هیچ قسمت از بدنه سد رخ نداده است، مفهوم DCR به راحتی قابل استفاده خواهد بود. و با استفاده از حداقل مقدار پارامتر ایمنی برشی F ، احتمال رخداد شکست برشی در سطح تماس بین سد و پی سنگی آن که یک حالت شکست شایع در سدهای وزنی (که سدهای پشتبنددار نیز



شکل (۱۲) کانتورهای تنش فونمیزس بیشینه در بدنه‌ی سد برحسب پاسکال در حالت زلزله‌ی نورتریج و مدول نرمی پی برابر ۱۰ و مقاومت فشاری بتن برابر ۳۵ مگاپاسکال (حالت شماره ۱۸)



شکل (۱۳) کانتورهای جا به جایی افقی بیشینه بدنه‌ی سد برحسب میلی‌متر در حالت زلزله‌ی نورتریج و مدول نرمی پی برابر ۱۰ و مقاومت فشاری بتن برابر ۱۷ مگاپاسکال (حالت شماره ۱۶)

و لزوم عدم تجاوز از مقدار مقاومت بتن و دیگری احتمال بروز شکست برشی در محل تماس سد و پی. برای بررسی بهتر این دو مطلب، دو پارامتر تعریف کرده‌ایم؛ یکی پارامتری تحت عنوان نسبت نیاز به ظرفیت^۱ (DCR) تنش

1- Demand Capacity Ratio

حالت خاصی از آنها است) است ارزیابی می‌شود. پارامتر ایمنی برشی F به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F = \mu_c P_n + b - \tau \quad (12)$$

که در آن، μ_c ضریب اصطکاک، P_n فشار نرمال، b چسبندگی در سطح تماس سد و پی و τ تنش برشی ایجاد شده در سطح تماس سد و پی است. در صورتی که مقدار F کوچکتر و یا مساوی صفر باشد نشان‌دهنده‌ی بروز شکست برشی در سطح تماس سد و پی است و در مقابل، اگر F مثبت باشد سطح تماس سد و پی در برابر شکست برشی مقاوم محسوب می‌شود.

۸-۱- تنش کششی در محل تغییر شیب پایین دست

با افزایش مقاومت فشاری بتن، مقدار DCR کاهش می‌یابد و تنها استثنا، حالتی است که سد روی پی‌های خیلی نرم قرار گرفته و زلزله‌ی نورتریج بر سازه اعمال می‌شود؛ در این حالت با افزایش مقاومت فشاری بتن، مقدار DCR افزایش پیدا می‌کند. با افزایش نرمی پی، مقدار DCR کاهش می‌یابد؛ یعنی در شرایط پی‌های نرمتر، تنش کششی کمتری در این ناحیه رخ می‌دهد. به طور کلی در این ناحیه برای حالات مختلف، مقدار DCR کمتر از ۰/۶ است که نشانگر سطح ایمنی قابل قبولی است. بیشترین مقادیر تنش به ترتیب در زلزله‌های نورتریج، آب‌بر و کولینگا رخ می‌دهند.

۸-۲- تنش کششی در پاشنه‌ی سد

در این ناحیه چه با افزایش مقاومت فشاری بتن و چه با افزایش نرمی پی، مقدار DCR کاهش پیدا می‌کند. به طور کلی در این ناحیه برای حالات مختلف، مقدار DCR کمتر از ۰/۸ است که هر چند ایمن به نظر می‌رسد، اما شاید بتوان گفت که بیشترین احتمال شکست کششی مربوط به

این ناحیه است. بیشترین مقادیر تنش به ترتیب در زلزله‌های نورتریج، آب‌بر و کولینگا رخ می‌دهند.

۸-۳- تنش کششی در پنجه‌ی سد

برخلاف وضعیت پاشنه‌ی سد، در پنجه‌ی سد و در شرایط پی‌های انعطاف‌پذیرتر، افزایش مقاومت فشاری بتن موجب افزایش مقدار DCR می‌شود. البته در حالت پی بسیار سخت (مدول نرمی برابر واحد) نتایج برعکس است. در حالت کلی اگر مقاومت فشاری ثابت باشد، با افزایش مدول نرمی پی، مقدار DCR کاهش پیدا می‌کند. با توجه به اثر فرکانس‌های غالب تحریک، در صورتی که زلزله‌ی پیشینه سطح طراحی (زلزله‌ای نظیر نورتریج) بر سازه‌ای با بتن مقاومت بالا وارد شود، پی با سختی متوسط بدترین حالت را ایجاد می‌کند و اگر مدول نرمی پی بسیار بالا (مقداری نظیر ۱۰) یا بسیار پایین (مقداری نظیر یک) باشد شرایط بهتری ایجاد می‌کند. به طور کلی در این ناحیه برای حالات مختلف، مقدار DCR همواره کمتر از ۰/۵۵ باقی مانده است، که نشان دهنده‌ی سطح ایمنی قابل قبولی می‌باشد. بیشترین مقادیر تنش در زلزله‌ی نورتریج رخ می‌دهد و زلزله‌های آب‌بر و کولینگا اثرات مشابهی در این ناحیه داشته‌اند.

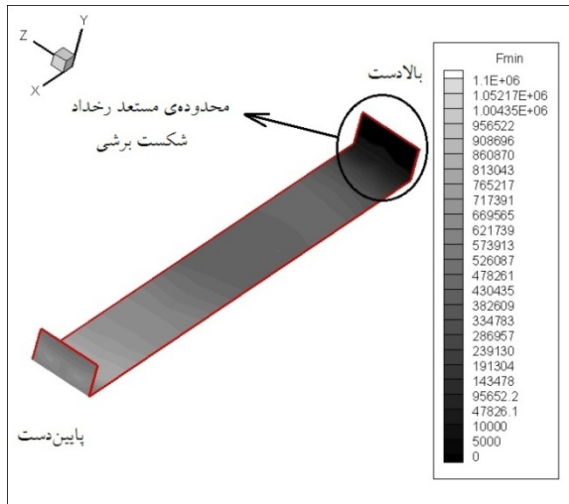
۸-۴- تنش فشاری در پنجه‌ی سد

در این ناحیه با افزایش مقاومت فشاری بتن، مقدار DCR کاهش پیدا می‌کند. اما این مطلب در مورد مدول نرمی پی برعکس است و با افزایش مدول نرمی پی، مقدار DCR افزایش می‌یابد. به هر حال برای حالات مختلف، مقدار DCR کمتر از ۰/۸ است که برای بتن بدنه ایمن به نظر می‌رسد.

۸-۵- پایداری در مقابل لغزش

در تحلیل‌های انجام شده مشخص شد که در محدوده‌ی

لرزه‌ای در بدنه‌ی سد در محدوده‌ی پاشنه و بیشینه تنش‌های فشاری و برشی لرزه‌ای در محدوده‌ی پنجه‌ی سد رخ داده‌اند. به طور کلی تنش‌های فشاری و برشی در بدنه‌ی سد، در حالت پی‌های با نرمی زیاد افزایش می‌یابند. این تنش‌ها در بیشتر نقاط بدنه با افزایش مقاومت فشاری بتن با کاهش مقدار روبرو می‌شوند.



شکل (۱۵) کانتورهای حاصل در سطح تماس سد و پی برای پارامتر ایمنی برشی F (بر حسب پاسکال) در بحرانی‌ترین حالت (برای حالت زلزله‌ی نورتریج و مدول نرمی برابر یک و مقاومت فشاری بتن برابر ۱۷ مگاپاسکال؛ (حالت شماره ۱۰)

نتایج تحلیل‌ها نشان از آن است که اگر چه تحت زلزله‌های سطح طراحی احتمال شکست فشاری در بدنه‌ی سد منتفی است، اما در مورد تنش‌های کششی و برشی وضعیت متفاوتی حاکم است. در واقع در مناطقی همچون محل تغییر شیب پایین‌دست، پاشنه و پنجه، تنش‌های بزرگی ایجاد می‌شود؛ پس احتمال آسیب برشی یا کششی به بدنه‌ی سد تحت آن تنش‌ها در این مناطق هنگام زلزله، زیاد است. بیشترین تنش‌های برشی لرزه‌ای در محدوده‌ی پنجه‌ی سد و نیز در لبه‌ی پایین‌دستی کمر پشتبند رخ می‌دهد. این تنش‌ها با شدت کمتری در پاشنه و محل تغییر شیب

سطح تماس قائم سد و پی، واقع در سمت بالادست، بیشترین احتمال رخداد شکست برشی بین سد و سنگ پی وجود دارد. در ناحیه‌ی کوچکی در سمت بالادست سطح تماس افقی سد و پی نیز ممکن است شکست برشی رخ دهد. در بقیه‌ی نقاط سطح تماس سد و پی، پارامتر ایمنی برشی F مقادیر بزرگی به خود می‌گیرد که نشان‌دهنده‌ی ایمنی در آن بخش از سطح تماس نسبت به شکست برشی است. البته به نظر می‌رسد که وجود دیواره‌های قائم در سطح تماس سد و پی که در نتیجه‌ی قرار گرفتن بخشی از مونولیت، درون پی سنگی است به پایداری در مقابل شکست برشی کمک می‌کند. تحلیل‌ها نشان می‌دهد که افزایش مقاومت فشاری بتن، اثر چندانی در کاهش محدوده‌ی در معرض شکست برشی (مناطق پی پارامتر ایمنی برشی F نزدیک به صفر) ندارد. در مقابل، افزایش مدول نرمی پی باعث کاهش این محدوده خواهد شد. بنابراین، با چشم‌پوشی از نوع زلزله‌ی وارد بر سازه، پی‌های نرمتر ایمنی بیشتری در برابر شکست برشی ایجاد می‌کنند. علاوه بر این موارد، مناطق محدودی از لبه‌های پایاب پشتبند در ترازهای میانی بدنه، و نیز در محل تماس با شالوده‌ی بدنه‌ی سد نیز آسیب‌پذیری تا حدودی مشابه ناحیه‌ی پنجه‌ی سد را در برابر تنش‌های فشاری و برشی از خود نشان داده‌اند.

۹- نتیجه‌گیری

در نتیجه‌ی تحلیل‌های صورت گرفته، مناطق حساس و آسیب‌پذیر در سدهای بتنی پشتبنددار تحت اثر زلزله، محدوده‌های پاشنه، پنجه، محل تغییر شیب پایین‌دست و همچنین مناطقی دیگر روی پشتبند سد و در محل اتصال پشتبند به پی بتنی مونولیت شناسایی شدند. در تمام حالات بررسی شده، بیشینه تنش کششی

- [4] Ahmadi, M.T., Khoshrang, Gh., Mokhtarzadeh, A. & Jalalzadeh, A., "Behaviour of a large concrete dam due to an actual maximum credible earthquake", Earthquake Engineering, Tenth World Conference, Balkema, Rotterdam, 1992, pp. 3995-4000.
- [5] Ahmadi, M.T. & Khoshrang, Gh., "SefidRud dam's dynamic response to the large near-field earthquake of June 1990", Dam Engineering, vol.3, Issue 2, 1992.
- [6] W. Indermaur, R.P. Brenner & T. Arasteh, "The effects of 1990 Manjil earthquake on SefidRud buttress dam", Dam Engineering, vol.2, Issue 4, 1992.
- [7] Ghaemmghami, A.R. & Ghaemian, M., "Experimental seismic investigation of Sefid-rud concrete buttress dam model on shaking table", Earthquake Engineering and structural dynamics, vol.37, 2008, pp. 809-823.
- [8] Ghaemmghami, A.R. & Ghaemian, M., "Short communication: Shaking table test on small-scale retrofitted model of Sefid-rud concrete buttress dam", Earthquake Engineering and structural dynamics, vol.39, 2010, pp. 109-118.
- [9] "Numerical Models for Seismic Evaluation of Concrete Dams, Review, Evaluation and Interpretation of Results", USSD, November 2008.

[۱۰] ذاکری، میرمنصور و احمدی، محمدتقی، "شناسایی ماهیت ترک پایه‌ی ۱۸ سد سفیدرود"، چهارمین کنفرانس سدسازی، دی ۱۳۷۹.

[۱۱] احمدی، محمدتقی و قره‌باغی، بهرام، "روش نوین تحلیل اندرکنش دینامیکی سد و مخزن به روش اویلر-لاگرانژی"، مؤسسه‌ی بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، پروژه‌ی تحقیقاتی شماره ۱۱۴، شهریور ۱۳۷۲.

[۱۲] "مطالعات طرح ترمیم سد سفیدرود، گزارش لرزه‌خیزی و خطر زمین‌لرزه در ساختگاه سد سفیدرود"، شرکت توسعه‌ی منابع آب و نیروی ایران (آب و نیرو)، شهریور ۱۳۷۰.

- [13] "State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete", ACI Committee 363, Reapproved 1997.
- [14] Nemati, K.M., P. Gardoni & T. Noguchi, "On Modulus of Elasticity of High-Strength Concrete", International Conference on Construction and Building Technology (ICCBT), pp. 159-172, 2008.

پایین دست سد نیز ایجاد می‌شوند.

نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهند که افزایش مقاومت فشاری بتن، اثر چندانی در کاهش احتمال شکست برشی (گستره‌ی پی با مقدار پارامتر ایمنی برشی F نزدیک به صفر) در سطح تماس سد و پی ندارد. در مقابل، افزایش مدول نرمی پی باعث کاهش این محدوده خواهد شد؛ یعنی پی‌های نرم‌تر، ایمنی بیشتری در برابر شکست برشی در سطح تماس سد و پی ایجاد می‌کنند.

تنش‌های فشاری لرزه‌ای در پنجه‌ی سد، با افزایش مدول نرمی پی شدید می‌شوند. اگرچه بتن بدنه‌ی سد توان تحمل این افزایش تنش فشاری را دارد، ولی این پدیده نگرانی شکست فشاری در پی را (که ضعیف نیز است) در پنجه‌ی سد تشدید خواهد کرد. در این موارد با تزریق‌های ویژه‌ی تحکیمی در پی، تا حدودی این نگرانی کاهش خواهد یافت.

همچنین وجود پی‌های نرم‌تر، سطح تنش‌های کششی زمان زلزله را در مناطق حساس بدنه‌ی سد، کاهش می‌دهد. ولی از آنجا که بتن غیرمسلح به کشش بسیار حساس است، می‌توان گفت که احداث سدهای بتنی پشتبنددار در شرایطی که پی سخت‌تر است، شرایط نامناسبی برای تنش‌های کششی لرزه‌ای در محل‌های تغییر شیب پایین دست، پاشنه و پنجه‌ی سد ایجاد می‌کند. پس برای کاهش این اثر لازم است بدنه‌ی سد پشتبنددار از بتنی با مدول ارتجاعی بالاتر از معمول ساخته شود.

۱۰- مراجع

- [1] Thomas, Henry H., "The engineering of large dams", Wiley, 1979.
- [2] Schnitter, Nicholas J., "A history of dams: the useful pyramids", A.A. Balkema, 1994.
- [3] "Lessons from dam incidents", ICOLD, 1974.

- [16] Ghanaat , Yusof, “Failure modes approach to safety evaluation of dams”, 13th world conference of earthquake engineering, Vancouver, Canada, paper no. 1115, 2004.
- [15] Chen, W.F. & Han, D.J.,” Plasticity for Structural Engineers”, Springer-Verlag, USA, 1988.