

# میان نظری ایمنی و طراحی سدهای بتنی قوسه

نورالدین صادقی

تابستان ۱۴۰۲

## چکیده:

از زمان‌های بسیار دور سدها و آب‌بندها برای تأمین نیازهای آبی بشر ساخته شده‌اند. سدها از ساختارهای بسیار ساده از قرون گذشته تکامل یافته و به تدریج پیچیده و ساختار جدیدی پیدا کرده‌اند. هنگامی که که آب ذخیره شده پشت بدنه سدها افزایش می‌یابد، طبیعتاً ارتفاع آنها نیز زیاد می‌شود. به تدریج نگرش مهندسين به عملکرد درونی سدها از درک کیفی و تجربی، به سمت توصیف کمی نیروهای وارد بر آنها تغییر یافت. در میان انواع سدهای ساخته شده، سدهای قوسی موقعیت ویژه‌ای را احراز می‌کنند. بیش از حجم مواد ساده‌ای که برای بستن دره بکار می‌رود، شکل این نوع سدها منعکس کننده دانش بروز در اندرکنش میان سازه و محیط اطراف سد می‌باشد. تفکر کامل در سازه‌های آنها و سادگی ظاهری شکل آنها تنها بخشی از اصالت پیدایش آنها را منعکس می‌کند. شکل‌های اصلی آنها به همراه مسائل زبانشناختی و استحکام ظاهری، از نظر مواد و مصالح اساساً عملکرد آنها را توجیه می‌کند که قرار است نیروهای بسیار بزرگی ناشی از جمع شدن آب را کنترل کنند. نکته بسیار حائز اهمیت، مسائلی است که در سدهای قوسی فوق بلند (بالای ۲۰۰ متر) مطرح می‌شود. نیروهای بسیار زیاد ناشی از فشار آب مخزن بایستی بر یک دیوار نازک وارد و توسط آن کنترل شود. موقعیت و جایگاه چنین سازه بلندی در یک دره بایستی نسبت به خطرات ناشی از حوادث طبیعی مخصوصاً زمین‌شناسی کاملاً هوشیارانه انتخاب شود. موقعیت محل سد بایستی برای تحمل نیروی بسیار زیاد طراحی شود. تمام این فاکتورها و محدودیت‌های انتخاب باهم جمع می‌شوند و مسئله را پیچیده می‌سازند. توجه به ایمنی لرزه‌ای سدهای بتنی در سال‌های اخیر رشد چشمگیری داشته است. بخشی از آن به دلیل نتایج ناشی از شکست سدهای بزرگ می‌باشد که خسارات جانی و مالی زیادی را به دنبال دارد. بخشی دیگر هم به دلیل اهمیت سازه‌های پائین دست سدهای بزرگ می‌باشد. همچنین می‌توان به کمبود آئین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای در زمانی که سدهای قدیمی ساخته شده‌اند هم اشاره نمود. هرچند که تاکنون هیچ سد بتنی در اثر تحریک زلزله دچار شکست نشده است، می‌توان تحلیل، طراحی و ارزیابی سدها را بخش مهمی از مهندسی زلزله دانست. شدت خسارات وارده در هر سه مورد در حدی بود که به تعمیرات کلی و مقاوم‌سازی سدها منجر شد؛ اما مخزن سد رها نشده و هیچ خسارتی از سیل به وجود نیامد. سد بتنی قوسی بلند Pacoima نیز تحت زلزله Sanfernando در سال ۱۹۷۱ خسارت دید، مخزن سد در زمان وقوع زلزله نیمه پر بود، اما این دلیل کافی برای خوش بین بوده به ایمنی لرزه‌ای سدها نمی‌شود. چون تاکنون این سازه‌ها با مخزن پر تحت زلزله شدید قرار نگرفته‌اند. به همین دلیل ضروری است که تمامی سدهای بتنی موجود در نواحی لرزه‌خیز برای اطمینان از اینکه در طول تحریکات شدید زلزله هستند، کنترل شوند. لذا در نوشتار حاضر، به دنبال ارائه ی مبانی نظری ایمنی و طراحی سدهای بتنی قوسی بوده ایم.

در اینجا بر خود لازم میدانیم از همراهی خانواده ی عزیزمان که ما را در تهیه این نوشتار یاری نمودند کمال تشکر و مراتب قدردانی خود را اعلام نماییم. از تمامی خوانندگان و صاحب نظران محترم خواهشمندیم، نظرات راهبردی و ارزشمند خود در جهت رفع نواقص احتمالی و بهبود سطح کیفی این نوشتار را مطرح نمایند.

نورالدین صادقی تابستان ۱۴۰۲

## فهرست مطالب

فصل اول: معرفی انواع سدهای بتنی و بارگذاری وارد بر آن.....	۳
۱-۱ مقدمه.....	۳
۱-۲ معرفی انواع سدهای بتنی.....	۳
۱-۳ خصوصیات ارتعاش طبیعی به همراه اندرکنش سد و فونداسیون.....	۴
۱-۴ بارگذاری سدهای بتنی قوسی.....	۵
۱-۵ ارزیابی ایمنی لرزه ای.....	۱۳
۱-۶ ترکیب بارها.....	۱۵
۱-۷ ضرایب اطمینان و معیارهای ارزیابی تنش.....	۱۷
فصل دوم: روش های تحلیل و طراحی سدهای قوسی.....	۱۹
۲-۱ تحلیل استاتیکی سدهای قوسی.....	۱۹
۲-۲ تحلیل لرزه ای سدهای بتنی قوسی.....	۲۲
فصل سوم: پارامترهای موثر در آنالیز لرزه ای سدهای بتنی قوسی.....	۲۹
۳-۱ مشخصات فنی مصالح.....	۲۹
۳-۲ خصوصیات مقاومتی بتن.....	۳۲
۳-۳ مدول تغییر شکل فونداسیون.....	۳۴
فصل چهارم: ارزیابی ایمنی سدهای بتنی قوسی.....	۴۵
۴-۱ بازنگری داده های موجود و بازرسی محل.....	۴۵
۴-۲ روش های آنالیز.....	۴۵
فصل پنجم: مدلسازی سدهای بتنی قوسی.....	۵۳
۵-۱ مدل سازی بدنه ی سد بتنی قوسی.....	۵۳
۵-۲ موقعیت محور سد.....	۵۳
۵-۳ تعیین شکل مقاطع قائم.....	۵۵
۵-۳ ضخامت طره ی مرکزی.....	۵۶
۵-۴ تعیین شکل مقاطع افقی.....	۵۶
۵-۵ مشخصات هندسی سازه ی سد و ساختگاه.....	۵۹
فصل ششم: نتیجه گیری و جمع بندی.....	۷۱

- ۶-۱ نتیجه گیری..... ۷۱
- ۶-۲ پیشنهادات..... ۷۳
- منابع و ماخذ:..... ۷۴

## فهرست شکل ها

- شکل ۱-۱. اعمال بار مرده بصورت مرحله‌ای در سدهای قوسی..... ۷
- شکل ۱-۲. اثر رسوب بر تغییر مکان سد در ارتفاع (U شکل)..... ۹
- شکل ۱-۳. اثر رسوب بر تغییر مکان سد در ارتفاع (V شکل)..... ۹
- شکل ۱-۴. شماتیک بارگذاری حرارتی ناشی از هوا و آب مخزن در سدهای قوسی..... ۱۲
- شکل ۱-۵. پیشنهاد USBR در مورد نحوه‌ی تحلیل سدها با توجه به ویژگی ساختگاه و بزرگی زلزله.. ۱۳
- شکل ۱-۶. مقایسه طیف پاسخ هموار و طیف اصلاح شده تاریخچه شتاب زمان با میرایی ۵٪..... ۱۴
- شکل ۱-۷. تولید طیف پاسخ ساختگاه..... ۱۵
- شکل ۱-۸: پوش شکست دو بعدی بتن..... ۱۸
- شکل ۱-۸: پوش شکست شبه دو بعدی بتن..... ۱۸
- شکل ۲-۱: جابجایی و چرخش خش‌های قوسی و طره‌ای..... ۲۱
- شکل ۲-۲: بخش‌های قوسی و طره‌ای در روش بار آزمون..... ۲۱
- شکل ۲-۳: تحلیل به روش ضریب لرزه ای..... ۲۳
- شکل ۲-۴: طیف پاسخ شتاب و نحوه به دست آوردن طیف شتاب از نسبت میرایی و پرپود معین..... ۲۶
- شکل ۳-۱: مفهوم مقاومت کششی ظاهری..... ۳۳
- شکل ۳-۲: نمودار گسیختگی برشی موهر کولمب بتن..... ۳۴
- شکل ۳-۳: تغییرات پنج مد اول سیستم سد-فونداسیون..... ۳۶
- شکل ۳-۴: جابجایی هیدرواستاتیک بخش مرکزی..... ۳۷
- شکل ۳-۵: تغییرات جابجایی هیدرواستاتیک تاج..... ۳۷
- شکل ۳-۶: تنش‌های قوسی هیدرواستاتیک در بلوک مرکزی سد..... ۳۸
- شکل ۳-۷: تنش‌های طره‌ای هیدرواستاتیک در بلوک مرکزی سد..... ۳۸
- شکل ۳-۸: تأثیر اختلاف مدول های تکیه‌گاه بر جابجایی‌های سطح تماس سد و فونداسیون..... ۳۹
- شکل ۳-۹: تنش‌های طره‌ای پایین‌دست برای مدول های تغییرشکل یکنواخت و متغیر در تکیه‌گاه ها ..... ۴۰
- شکل ۳-۱۰: تنش‌های قوسی هیدرواستاتیک..... ۴۰
- شکل ۳-۱۱: اثر تغییر مدول فونداسیون در ارتفاع بر روی جابجایی‌های هیدرواستاتیک بلوک مرکزی..... ۴۲
- شکل ۳-۱۲: اثر تغییر مدول فونداسیون در ارتفاع بر روی تنش‌های قوسی هیدرواستاتیک بلوک مرکزی..... ۴۲
- شکل ۳-۱۳: اثر تغییر مدول فونداسیون در ارتفاع بر روی تنش‌های طره‌ای هیدرواستاتیک بلوک مرکزی..... ۴۳
- شکل ۴-۱: درزهای عمودی، افقی و ترک‌های از پیش موجود در سد بتنی قوسی..... ۴۸
- شکل ۴-۲: مدل فونداسیون منشوری..... ۵۱

۵۴	شکل ۵-۱: موقعیت محور سد.....
۵۶	شکل ۵-۲: شکل سهموی بدنه سد.....
۶۱	شکل ۵-۳: مدل المان محدود سد - پی - دریاچه.....
۶۱	شکل ۵-۴: مدل المان محدود دریاچه.....
۶۲	شکل ۵-۵: مدل المان محدود بدنه ی U شکل.....
۶۲	شکل ۵-۶: مدل المان محدود بدنه ی V شکل.....
۶۴	شکل ۵-۷: بالادست بدنه و مخزن تحت اثر بار هیدرواستاتیک در شرایط نرمال دریاچه.....
۶۵	شکل ۵-۸: نمای شماتیک سد بتنی قوسی.....
۶۶	شکل ۵-۹: تنش اصلی حداکثر رویه بالادست بدنه.....
۶۶	شکل ۵-۱۰: تنش اصلی حداکثر رویه پایین دست بدنه.....
۶۷	شکل ۵-۱۱: تنش اصلی حداقل رویه بالادست بدنه.....
۶۷	شکل ۵-۱۲: تنش اصلی حداقل رویه پایین دست بدنه.....
۶۸	شکل ۵-۱۳: تنش اصلی حداکثر رویه بالادست بدنه.....
۶۹	شکل ۵-۱۴: تنش اصلی حداکثر رویه پایین دست بدنه.....
۶۹	شکل ۵-۱۵: تنش اصلی حداقل رویه بالادست بدنه.....
۷۰	شکل ۵-۱۶: تنش اصلی حداقل رویه پایین دست بدنه.....

## فهرست جدول ها

۱۷	جدول ۱-۱: ضرایب ایمنی برای سدهای موجود در ترکیب‌های مختلف بارگذاری بر اساس مرجع FERC
۵۹	جدول ۱-۵: مشخصات هندسی بدنه سد با ارتفاع ۲۵۰ متری.....
۵۹	جدول ۲-۵: مشخصات هندسی بدنه سد با ارتفاع ۱۵۰ متری.....

## فصل اول

### معرفی انواع سدهای بتنی و بارگذاری وارد بر آن

#### ۱-۱ مقدمه

در سال‌های اخیر طراحی، ساخت و باز تحلیل سدهای بتنی قوسی فوق بلند به‌عنوان یکی از دغدغه‌های کشورهای مختلف در زمینه سدسازی بوده است. توانایی ارزیابی اثرات تحریکات زمین‌لرزه بر سدهای بتنی برای ارزیابی ایمنی سدهای موجود ضروری است. پیش‌بینی پاسخ دینامیکی سدهای بتنی قوسی در طول زلزله یکی از مسائل پیچیده در دینامیک سازه‌ها می‌باشد و به عوامل متعددی از قبیل اندرکنش سد با فونداسیون و مخزن، فشار هیدرودینامیکی ناشی از مخزن، اثرات فونداسیون ناهمگن، وجود درزهای اجرایی در بدنه سد و ترک‌خوردگی بتن و رفتار غیر الاستیک غیرخطی مصالح بتن بستگی دارد. هم‌اکنون مدل‌های متنوعی برای شناخت رفتار سدهای بتنی قوسی در شرایط استاتیکی و دینامیکی ارائه شده است. در حال حاضر، موضوع مورد توجه مهندسان صنعت سدسازی، استفاده از مدل‌های خطی و غیرخطی حل معادلات سد- دریاچه- پی برای ارزیابی رفتار استاتیکی و لرزه‌ای می‌باشد. روش‌های مختلفی برای تحلیل سدهای بتنی تاکنون ارائه شده است. اولین بار در آغاز دهه نوزدهم برای طراحی و تحلیل سدهای بتنی قوسی اقداماتی صورت گرفت. طراحان اولیه این نوع سدها با بکار بردن تئوری مربوط به استوانه‌های جداره نازک با رفتار الاستیک، تنش‌های حاصل را به دست آوردند. این روش بعدها بهبود و توسعه یافت بطوریکه می‌توانست اثر تغییر شکل‌های پی و انطباق بین قوس‌های افقی و عمودی را نیز لحاظ کند. با پیدایش روش اجزای محدود، روش‌های تحلیل سدهای بتنی قوسی تحت تأثیر آن قرار گرفت. برای اولین بار این روش در اواخر دهه ۱۹۵۰ در سدهای قوسی استفاده شد. در ابتدای کار، تحلیل‌ها الاستیک خطی بودند و با پیشرفت در این زمینه، تحلیل غیرخطی سدهای بتنی قوسی نیز با استفاده از این روش انجام شد. با ابداع روش‌های نوین تحلیل سازه‌ها، استفاده از این روش‌ها در ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها مورد توجه قرار گرفته است.

#### ۱-۲ معرفی انواع سدهای بتنی

سدهای بتنی به سه گروه عمده وزنی، پایه‌دار و قوسی طبقه‌بندی می‌شوند. رفتار سدهای وزنی در برابر زلزله به پارامترهای زیادی بستگی دارد:

- ✓ بزرگی
- ✓ شدت حرکت زمین
- ✓ بتن سد و مقاومت کششی آن
- ✓ اندرکنش سد و دریاچه در طول مدت زلزله

بزرگی کف سد متعاقباً سبب ناپیوستگی و غیر همگونی در فونداسیون و دیواره‌ها شده و تأثیر زیادی بر روی رفتار دینامیکی سازه‌ای سدهای وزنی دارد. دره‌ها متداول‌ترین محل برای ساخت سدها می‌باشند و شکل توپوگرافی آن، انتشار امواج لرزه‌ای را به علت انعکاس آنها به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. تقسیم بدنه سدهای وزنی با درزهای عمودی، توصیه مهمی از نقطه نظر رفتار دینامیکی آن می‌باشد. در نتیجه سد که ترکیبی از المان‌های طره‌ای می‌شود، اثرات میرایی بالاتری خواهد داشت. صرف نظر از میزان تزریق در درزها، مقاومت برشی کمی مابین آنها وجود دارد که این موضوع می‌تواند سبب ارتعاش مستقل هر بلوک به‌طور جداگانه گردد. علاوه بر این، یک سد وزنی دارای فضاهای خالی بسیاری در داخل بدنه خود می‌باشد (گالری‌های بازرسی، گالری‌های زهکش و...) که پاسخ لرزه‌ای سازه را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

### ۳-۱ خصوصیات ارتعاش طبیعی به همراه اندرکنش سد و فونداسیون

تحقیقات تجربی انجام‌گرفته بر روی سدهای بتنی وزنی نشان می‌دهد که تغییر شکل ایجادشده ارتعاشی، ناشی از اثرات برشی و خمشی می‌باشد که با اندازه مقطع عرضی سد، تغییر می‌کند. همچنین نشان داده شده است که تأثیر اثرات برشی بر روی مقدار پریود پایه سد بسیار زیاد می‌باشد و نمی‌توان از آن در آنالیز صرف نظر نمود. برای سدهای وزنی با ارتفاع حدوداً ۱۵۰ متر و مخزن پر، پریود پایه طبیعی مابین  $0/4 - 0/15$  ثانیه می‌باشد. پاسخ لرزه‌ای سدهای بتنی وزنی، تحت تأثیر الاستیسیته فونداسیون قرار دارد. این تأثیر به‌ویژه در حالتی که فونداسیون ضعیف و سازه بلند است تشدید می‌شود. در فونداسیون انعطاف‌پذیر، فرکانس پایه در مقایسه با فونداسیون صلب کاهش می‌یابد [۱]. در نواحی که تنش‌های کششی از مقاومت کششی بتن به‌طور قابل ملاحظه‌ای تجاوز می‌کند، احتمال ترک خوردگی در بدنه سد وجود خواهد داشت. معمولاً تنش‌های دینامیکی بزرگ در بالای سد و در پنجه یا پاشنه آن، بسته به پر یا خالی بودن مخزن روی می‌دهد [۱].

رفتار ارتعاشی در جهت‌های داخل صفحه و عرض سدهای پایه‌دار متفاوت می‌باشد. تجارب موجود نشان می‌دهد که رفتار لرزه‌ای عرضی اهمیت بیشتری از رفتار لرزه‌ای داخل صفحه دارد. به علت باریکی نسبی پایه‌ها، مودهای پایه لرزه‌ای در جهت نرمال بر صفحه پایه‌ها

می‌باشد. این مسئله در سدهای بتنی وزنی به علت اینکه ارتعاش در جهت عرضی به وسیله مونولیت های مجاور تاندازه‌ای جلوگیری می‌شود، وجود ندارد. در نتیجه پریود پایه ارتعاش در جهت عرضی پایه‌ها بیش از پریود پایه ارتعاش در جهت داخل صفحه می‌باشد [۲ و ۱]. پریود ارتعاشی یک سد پایه‌دار پارامترهای زیادی نظیر نوع پایه‌ها، ارتفاع پایه‌ها و همچنین مدول الاستیسیته بتن و فونداسیون می‌باشد. پریود طبیعی می‌تواند در دامنه وسیعی متغیر باشد. برای ارتفاع پایه‌ها مابین ۳۳ تا ۱۲۰ متر، پریودهای پایه در محدوده  $0.3 - 0.75$  ثانیه برای ارتعاش در جهت طولی و  $0.2 - 0.25$  ثانیه برای ارتعاش در جهت عرضی می‌باشد. به‌طور کلی عوامل مؤثر در رفتار یک سد بتنی قوسی در برابر بارهای دینامیکی ناشی از زلزله به شرح زیر می‌باشد:

- ✓ تغییرات شدت و مشخصات تحریک زمین در امتداد پی سد.
- ✓ اندرکنش بدنه سد و مخزن.
- ✓ اندرکنش بدنه سد و مخزن با پی.
- ✓ تغییر مشخصات مصالح بدنه سد و پی در اثر بارهای دینامیکی.
- ✓ ترک خوردن و باز و بسته شدن درزهای بدنه سد.
- ✓ هندسه سد و دریاچه.

#### ۴-۱ بارگذاری سدهای بتنی قوسی

سدهای بتنی قوسی تحت انواع بارگذاری‌ها قرار می‌گیرند. بارگذاری‌ها را می‌توان به دو دسته اساسی بارهای استاتیکی و دینامیکی طبقه بندی نمود.

**بارگذاری استاتیکی** ادامه‌دار بوده و تغییر نمی‌کند و یا در مقایسه با پریود طبیعی سازه دارای تغییرات بسیار کندی می‌باشد. پاسخ سد به بارهای استاتیکی بر اساس سختی آن می‌باشد. بارهای استاتیکی شامل بار مرده، بار هیدرولیکی، فشار برخاستی، تنش‌های داخلی ناشی از تغییرات دما و غیره می‌باشد.

**بارگذاری دینامیکی** به‌طور طبیعی زودگذر و ناپایدار است. مدت این بارگذاری معمولاً در حد چند ثانیه و یا کمتر می‌باشد. به علت سرعت این نوع بارگذاری، خصوصیات اینرسی و میرایی سد نیز علاوه بر سختی بر پاسخ سد تأثیر می‌گذارد. مهمترین بارگذاری دینامیکی شامل نیروهای ناشی از زلزله و نیروهای ناشی از انفجار می‌باشند.

بار مرده در سدهای قوسی شامل وزن بتن بعلاوه سازه‌های جانبی نظیر دریچه‌ها، پل‌ها و تجهیزات خروجی می‌باشد. وزن مخصوص بتن بر اساس نتایج تست‌های آزمایشگاهی در



هنگام طراحی و یا نمونه های گرفته شده از بتن بدست می آید. وزن مخصوص توده بتن شامل شن و ماسه طبیعی و یا با دانه بندی سنگ شکسته شده، در حدود ۲۴ کیلونیوتن بر متر مکعب می باشد. در مقایسه با وزن خود سد، وزن تجهیزات آن معمولاً ناچیز بوده و می تواند در آنالیز صرف نظر شود؛ اما اگر وزن سرریزها و تجهیزات خروجی اثر قابل ملاحظه ای بر پاسخ استاتیکی و دینامیکی داشته باشد، باید در نظر گرفته شود [۳]. وزن مخصوص بتن از نتایج آزمایشگاهی و در صورت فقدان اطلاعات اندازه گیری برابر با 150pcfpc در نظر گرفته می شود [۴].

#### ۱-۴-۱- نحوه اعمال بار مرده

فرایند ساخت سد، در نحوه ی اعمال بار مرده در سد قوسی مؤثر می باشد. در حالت کلی سه روش برای اعمال بار مرده در سد قوسی وجود دارد:

در سدهای قوسی با قوس کم، که عملکرد سد به صورت دو بعدی است، بار هر طره روی خودش اعمال می گردد. چون در این مرحله به علت وجود درزهای قائم عملکرد قوسی وجود ندارد، تحلیل بار مرده در دو مرحله انجام می گردد.

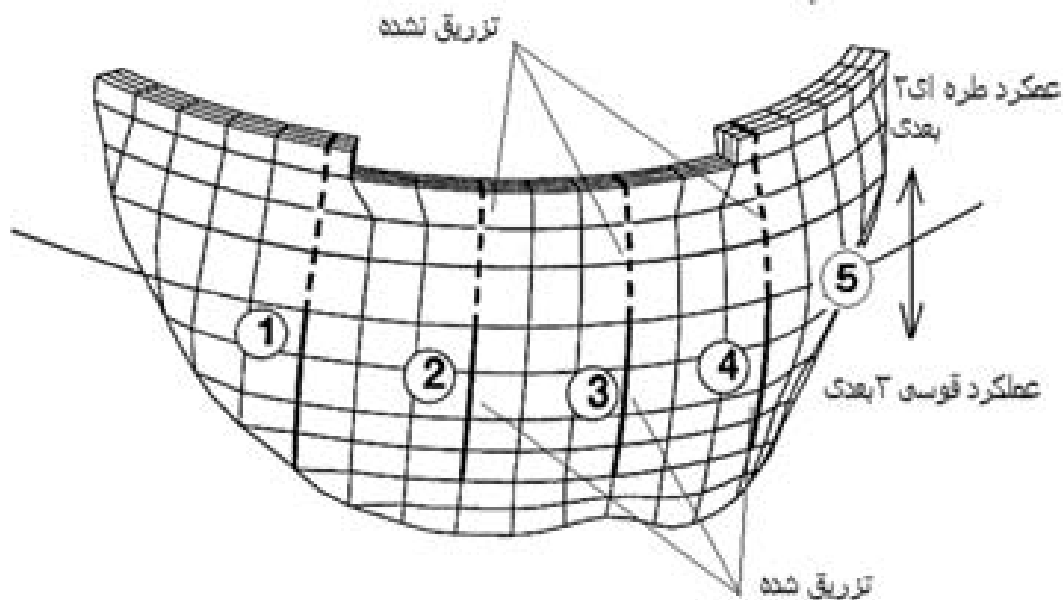
✓ مرحله اول: بار مرده برای بلوک های زوج در نظر گرفته شده و مدول الاستیسیته بلوک های فرد صفر فرض می شود.

✓ مرحله دوم: عکس این عمل تکرار می شود. در نهایت تأثیر کل طره ها را به صورت برهم کنش<sup>۱</sup> بر روی پی بررسی می کنند.

در سدهای قوسی با قوس زیاد، در مراحل از ساخت، تزریق در درزها و آبگیری بخشی از مخزن صورت می گیرد. معمولاً ۳ تا ۵ مرتبه تزریق صورت می گیرد و باعث می شود که قسمت تزریق شده عملکرد قوسی سه بعدی داشته باشد، در صورتی که قسمت های بالایی بدون تزریق عملکرد طره ای دارند (شکل ۱-۱).

بارگذاری سه بعدی یکپارچه برای سدهایی مناسب است که اثر درزهای عمودی بر بار وزن در نظر گرفته نمی شود (مانند سدهای RCC).

<sup>1</sup> Super-position



شکل ۱-۱. اعمال بار مرده بصورت مرحله‌ای در سدهای قوسی

#### ۱-۴-۲- بار تراز نرمال آب

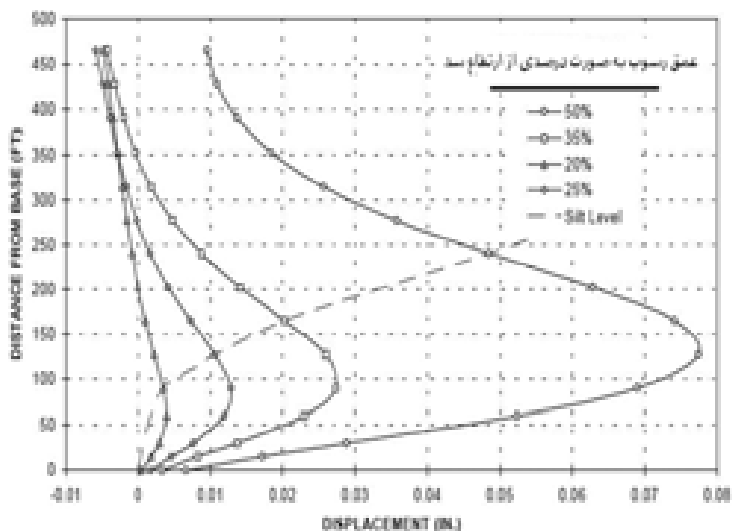
بارگذاری تراز نرمال آب شامل فشار هیدرواستاتیک بر روی رویه های سد ناشی از تراز آب مخزن و تراز آب پایین دست در طول عملکرد سد می باشد. معمولاً تراز تاج سرریز برای سرریزهای بدون دریچه و تراز بالای دریچه های سرریز برای سرریزهای دریچه دار می تواند به عنوان تراز نرمال آب مخزن در نظر گرفته شود. تراز نرمال آب پایین دست سد نیز می تواند از روی رکوردهای بهره برداری به دست آید. برای محاسبه بارگذاری تراز نرمال آب، تغییرات فشار سراب و پایاب با عمق به صورت خطی در نظر گرفته شده و فشار آب در جهت عمود بر سطوح سد وارد می شود. علاوه بر سطوح سد، فشار آب سراب باید همچنین بر کف فونداسیون نیز وارد شود زیرا سبب تغییر شکل فونداسیون و تولید جابجایی ها و تنش های اضافی در سد می گردد. برای محاسبه بار آب می توان از وزن مخصوص  $9/8$  برای آب استفاده نمود. به علت وارد شدن بار آب پایاب در جهت مخالف آب سراب، تنش های تولید شده ناشی از آن معمولاً دارای علامت مخالف با تنش های ناشی از آب سراب می باشند. در نظر گرفتن تراز آب پایین دست سبب کاهش تنش های فشاری و کششی در زیر تراز آن می گردد. این اثرات هنگامی که ارتفاع آب پایین دست سد کمتر از  $20\%$  ارتفاع کل سد باشد، بسیار ناچیز است. به این دلیل معمولاً در جهت اطمینان از آب پایین دست سد در آنالیز سدهای قوسی صرف نظر می شود [۳].

### ۱-۴-۳- بار(فشار) آب منفذی

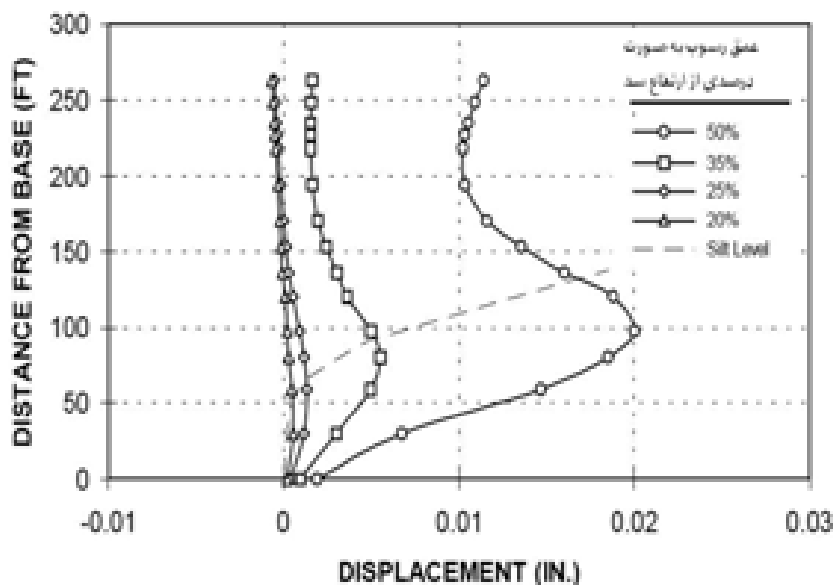
برکنش یا فشار آب منفذی هنگامی توسعه می‌یابد که آب وارد فضای خالی در مجاورت سد قوسی، مانند درزه‌های پی، ترک‌ها و رگه‌ها می‌شود. در شرایط بارگذاری استاتیکی فشار آب منفذی باعث کاهش تنش‌های قائم فشاری در درون بتن شده و تنش‌های قائم کششی را افزایش می‌دهد [۵]. در صورت وجود ترک در فصل مشترک سد قوسی ضخیم با پی، ترک‌های کششی توسعه یافته و باید نیروی برکنش را به صورت بارهای خارجی بر هر دو وجه ترک اعمال نمود. البته نیازی به در نظر گرفتن نیروی برکنش در تحلیل تنش سدهای قوسی باریک نمی‌باشد. در صورت نیاز، توزیع فشار برکنش در سطح تماس بین سد قوسی و پی را می‌توان از خواندن فشارسنج‌ها در محل یا انجام تحلیل‌های تراوشی آب به دست آورد. در صورت نبود اطلاعات، می‌توان برکنش را به صورت قراردادی به صورت خطی یا دوخطی تقریب زد.

### ۱-۴-۴- بار رسوب

سدهای قوسی معمولاً تحت فشار رسوب ناشی از ته نشین شدن مصالح در دریاچه سد در طول سالیان دراز قرار دارند. قابل توجه بودن فشار رسوب به صورت یک بار استاتیکی به عمق رسوب بستگی دارد. برای سدهای قوسی U شکل با پایه گسترده، عمق رسوب کمتر از ۰,۲۵ ارتفاع سد، تولید تغییر شکل‌های قابل اغماض می‌کند (شکل ۱-۲). همچنین این مقدار رسوب تولید تنش‌های ناچیز (10-15 psi) می‌کند که ممکن است نادیده گرفته شود [۴]. برای سدهای V شکل تأثیر فشار رسوب کمتر بوده و در صورت کمتر بودن عمق رسوب از ۰,۳۳ ارتفاع سد، می‌توان از آن صرف نظر کرد (شکل ۱-۳). هر دو شکل مذکور همچنین نشانگر حداکثر تغییر شکل بدنه در اثر بارگذاری رسوب بوده که در زیر تراز رسوب (مشخص شده با خط چین) رخ می‌دهد.



شکل ۱-۲. اثر رسوب بر تغییر مکان سد در ارتفاع (U شکل)



شکل ۱-۳. اثر رسوب بر تغییر مکان سد در ارتفاع (V شکل)

#### ۱-۴-۵- بار یخ

یخ می‌تواند نیروی زیادی بر وجه سد قوسی اعمال کند. هنگامی که امکان یخ زدن وجود داشته باشد نیروی یخ به دو صورت استاتیکی و دینامیکی در نظر گرفته می‌شود. بار استاتیکی یخ ناشی از تماس آن با بدنه سد می‌باشد. این نوع بار از انبساط حرارتی یخ ایجاد شده که فشار حاصل از انبساط به دما و ویژگی‌های یخ وابسته است. بار یخ به ضخامت یخ هم بستگی دارد.

در صورت فقدان اندازه‌گیری واقعی، بار یخ را میتوان  $5 \text{Kips/ft}^2$  در امتداد سطح تماس با سد در نظر گرفت [۲]. برای سدهای بتنی قوسی باریک و بلند توزیع شعاعی فشار یخ مهم می‌باشد. چون در طراحی سدهای قوسی فرض می‌گردد که بارها به صورت یکنواخت شعاعی هستند، اگر این حالت برقرار نباشد تنش‌های خمشی بزرگی در جهت قوس ایجاد می‌شود. تغییرات شعاعی بار یخ می‌تواند به علت گرم شدن ناهمگن، اختلاف در ضخامت‌ها یا فقدان یخ در مجاورت خروجی نیروگاه باشد. نوع دیگری از بارگذاری یخ، ضربه حاصل از برخورد یخ با بدنه سد می‌باشد. این پدیده در فصل بهار تحت دبی زیاد رودخانه رخ می‌دهد. نیروی حاصل از این برخورد را میتوان به صورت تقریبی با برابر قرار دادن انرژی جنبشی ورق یخ متحرک با انرژی مستهلک شده در اثر خرد شدن آن محاسبه کرد [۲].

#### ۱-۴-۶- بار باد

به طور کلی باد به دو صورت برخورد مستقیم با سازه و تولید امواج می‌تواند به بدنه سد نیرو وارد کند ولی معمولاً از اثر باد در سدهای بتنی قوسی بلند صرف نظر می‌شود. وزش باد در مخازن با گستردگی سطح زیاد، باعث تغییر در تراز آب مخزن در مجاورت دیواره می‌گردد (پدیده‌ی wind set up). این پدیده در دریاچه‌های با طول بیش از ۶۰ تا ۷۰ کیلومتر اهمیت دارد. با گستردگی دریاچه سد، امواج ناشی از بار باد ارتفاع بیشتری پیدا می‌کنند. حداکثر ارتفاع موج تا ۲ متر می‌باشد که این تغییر ارتفاع به تغییر ارتفاع ناشی از wind set up اضافه می‌شود. حدود ۲ تا ۳ متر افزایش ارتفاع در تراز مخزن، تنش‌ها را تا ۱۵ درصد افزایش می‌دهد. ارتفاع موج یا از روابط تجربی یا از روی سری آماری موجود در سدهای مناطق نزدیک ساختگاه به دست می‌آید [۴۱].

#### ۱-۴-۷- بار حرارتی

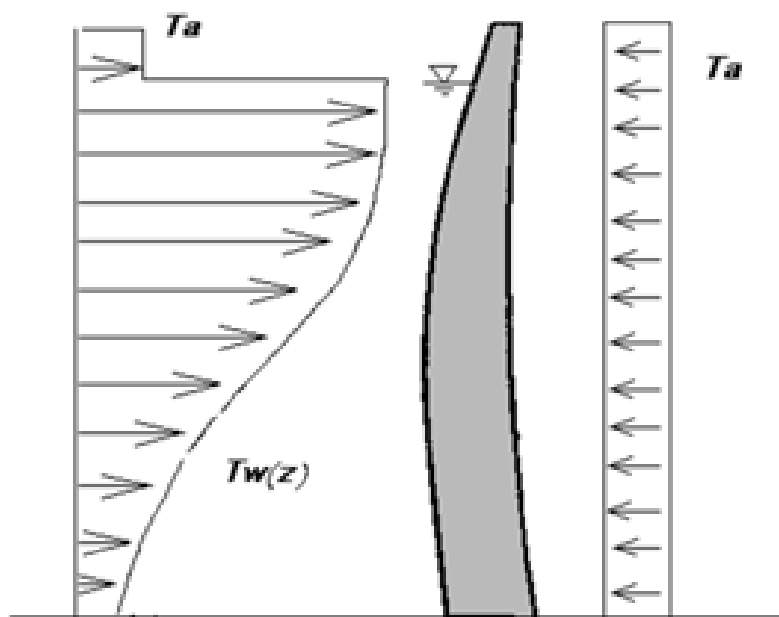
بارهای حرارتی در سدهای قوسی در نتیجه اختلاف دمای خاتمه دوغاب‌ریزی یا بتن‌ریزی درزهای انقباض بین مونولیت‌های کنسولی و دماهای بتن در زمان بهره‌برداری سد می‌باشد. در یک سد موجود مقادیر واقعی این پارامترها می‌تواند از روی رکوردهای طراحی و ساخت به دست آید. در صورت عدم دسترسی به این رکوردها این مقدار می‌تواند به صورت متوسط دمای سالیانه بتن و یا متوسط دمای سالیانه هوا در محل سد فرض گردد. درجه حرارت بتن می‌تواند هم از روی توزیع دما در داخل سد ناشی از اختلاف دمای بین دو سطح آن و هم از روی ابزارهای نصب شده در بدنه سد به دست آید. دمای خاتمه یا دمای بدون تنش به نحوی انتخاب می‌شود که تنش‌های کششی ناشی از حرارت در سد حداقل گردد [۶]. انتقال حرارت

به چهار صورت انتقال هدایتی، انتقال همرفتی، انتقال در اثر تغییر حالت و انتقال از طریق تابش صورت می‌گیرد [۷].

تغییرات دما در ضخامت یک سد قوسی، در اصل به ضخامت سد بستگی دارد. برای سدهای قوسی نسبتاً نازک، در نظر گرفتن یک توزیع خطی از دمای مخزن در بالادست و دمای هوا در پایین دست دقت مناسبی را فراهم می‌آورد. در سدهای با ضخامت نسبتاً زیاد، توزیع دما به صورت غیرخطی در نظر گرفته می‌شود. در این حالت دما در نزدیکی دو وجه به سرعت تغییر کرده ولی دما در مرکز مقطع در حدود دمای مرجع با کمی نوسان باقی می‌ماند. برای سدهای با ابزار دقیق داخلی گسترده باید از دمای واقعی جهت محاسبه ی توزیع تنش حرارتی استفاده کرد. توزیع دمای بتن همچنین می‌تواند با استفاده از روش المان محدود و با شرایط مرزی دمای آب و هوای مجاور رویه های سد تعیین گردد [۶].

تخمین دمای هوا در ساختگاه بر مبنای اندازه‌گیری‌های گذشته دما در محل سد و در صورت فقدان اندازه‌گیری، استعلام از اداره هواشناسی و استفاده از داده‌های هواشناسی در ایستگاه‌های متعدد موجود می‌باشد. ثبت دماهای هوا در یک دوره حداقل ۵ ساله جهت تشکیل نمودار مقدار میانگین دما لازم است [۶]. بارگذاری حرارتی ناشی از دمای هوا روی سد قوسی به صورت یک بار با توزیع یکنواخت بر وجه پایین دست سد قوسی و همچنین قسمت بالای مخزن در وجه بالادست اعمال می‌شود.

دمای آب مخزن نسبت به عمق و فصل تغییر می‌کند. تخمین دمای آب مخزن به وسیله اندازه‌گیری متغیر دمای آب در ارتفاع‌های مختلف در مجاورت سد به دست می‌آید. در مواقعی که اطلاعات مستقیم موجود نباشد، برای تخمین می‌توان از دریاچه‌های مجاور و یا مخازن با عمق و شرایط ورود و خروج مشابه استفاده کرد. سپس از این داده‌ها جهت تخمین تغییرات دمای مخزن که نشانگر حداکثر متوسط سالیانه و حداقل متوسط سالیانه می‌باشد، استفاده کرد [۶]. به‌طور کلی و در مراحل اولیه طراحی می‌توان بارگذاری ناشی از دمای آب مخزن را به صورت دو منحنی با شیب بیشتر در نزدیکی سطح مخزن (تا ارتفاع حدود ۱۵۰ فوت از سطح مخزن) و با شیب نزدیک به صفر در قسمت‌های پایین سد قوسی بر وجه بالادست سد اعمال کرد (شکل ۱-۴).

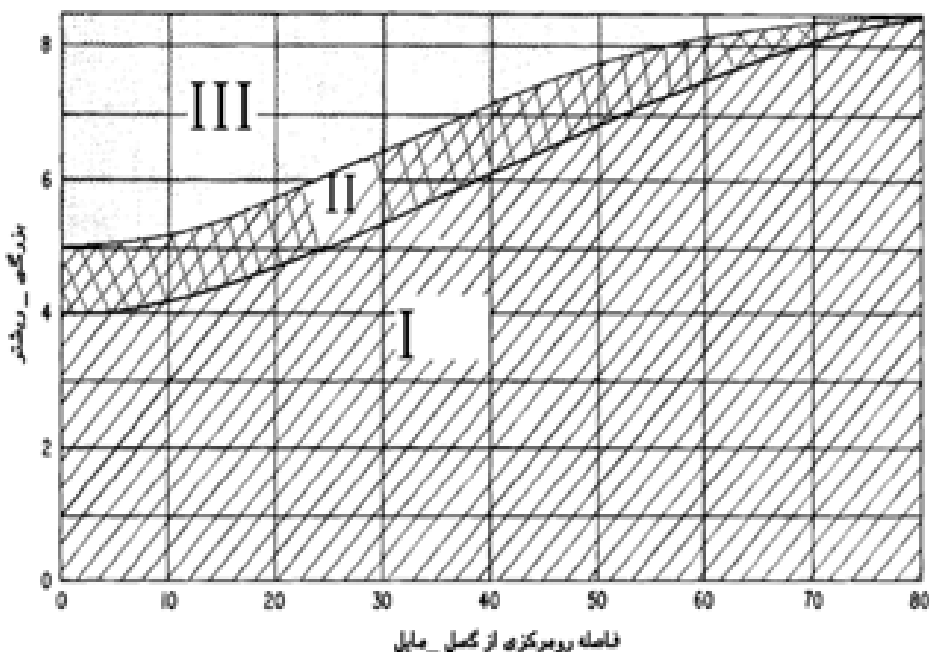


شکل ۱-۴. شماتیک بارگذاری حرارتی ناشی از هوا و آب مخزن در سدهای قوسی

تابش آفتاب بر وجوهی از سازه که در معرض آن قرار دارند، سبب افزایش دمای سازه می‌شود. پس تابش آفتاب باعث کاهش بارهای حرارتی در زمستان و افزایش بارهای حرارتی در تابستان می‌گردد [۶]. دمای میانگین بتن باید با توجه به اثر تابش خورشید به وجه پایین دست و قسمت بیرون از آب و وجه بالادست اصلاح گردد. مقدار افزایش دما در نتیجه تابش خورشید به شیب و موقعیت سطح در معرض آفتاب و عرض جغرافیایی وابسته است. با دانستن شیب، موقعیت یک نقطه در سد و عرض جغرافیایی می‌توان افزایش دمای ناشی از تابش خورشید را به دست آورد. این افزایش دما برای سدهای قوسی بلند و با زوایای متغیر بنظر مهم می‌رسد که باید برای نقاط مختلف از جمله نقاط یک چهارم میانی به دست آورد [۸].

#### ۱-۴-۸- بار لرزه ای

مطابق شکل (۱-۵) بارگذاری زلزله مورد بحث در این نوشتار، برای سدهای قوسی واقع در ناحیه لرزه‌ای ۳ و یا بیشتر موردنیاز می‌باشد. در مواردی ممکن است سدهای قوسی واقع در ناحیه لرزه‌ای ۲ نیز به تحلیل بارگذاری زمین لرزه نیاز داشته باشند [۸].



شکل ۱-۵. پیشنهاد USBR در مورد نحوه‌ی تحلیل سدها با توجه به ویژگی ساختگاه و بزرگی زلزله

### ۱-۵-۱ ارزیابی ایمنی لوزه ای

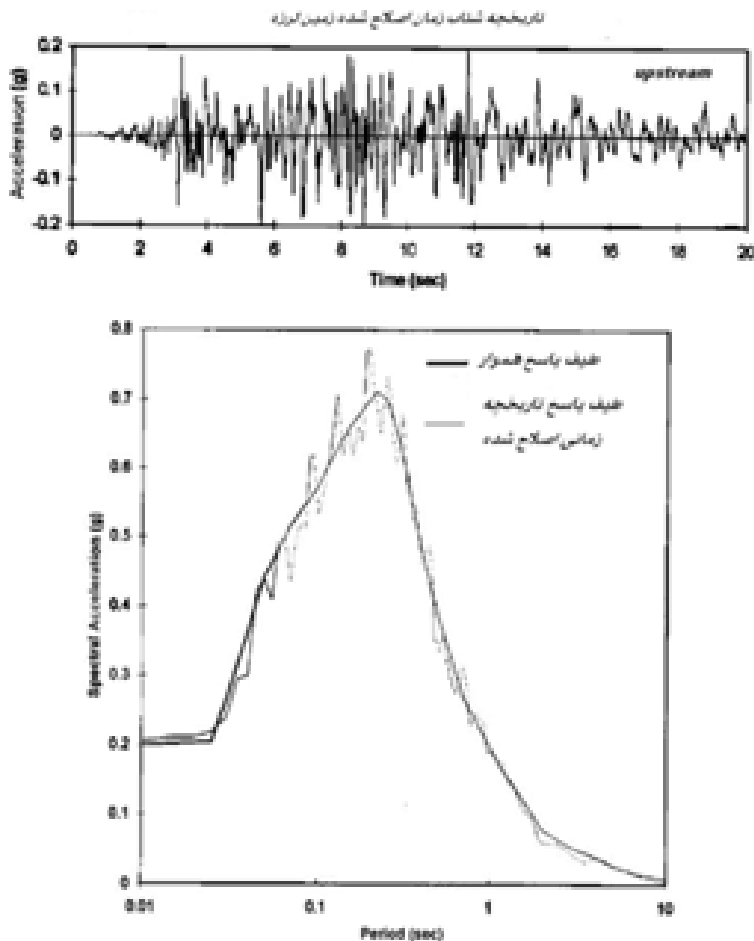
برای ارزیابی ایمنی سدهای قوسی موجود در مقابل زمین‌لرزه نیاز به بارگذاری زلزله در سطح حداکثر زلزله محتمل یا  $MCE^2$  می‌باشد [۴]. آسیب‌های عمده و اختلال طولانی در بهره‌برداری و فرار آب مخزن به صورت تدریجی و کنترل شده در این سطح از زمین‌لرزه از شرایط مورد قبول رفتار سازه می‌باشد.

#### ۱-۵-۱-۱ ورودی طیف پاسخ زمین‌لرزه

طیف پاسخ باید به صورت هموار درآید تا از احتمال بریدگی‌های کوچک انرژی در طیف پاسخ منطبق بر فرکانس‌های طبیعی سد اجتناب شود. طیف پاسخ باید برای هر دو جهت افقی و قائم حرکات زمین با میرایی ۵ درصد فراهم گردد. (در صورت نیاز می‌توان تا ۱۰ درصد هم افزایش داد). این روابط یا ضوابط ممکن است برپایه مدارک مستند از مطالعات انجام‌شده مربوط به ساختگاه سد بوده و یا از روابط ارائه شده توسط (Newmark and Hall (1982 استفاده شود [۹].

<sup>2</sup> Maximum Credible Earthquake

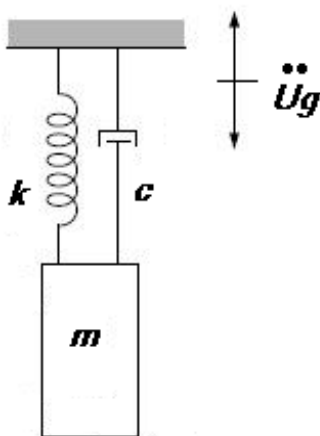
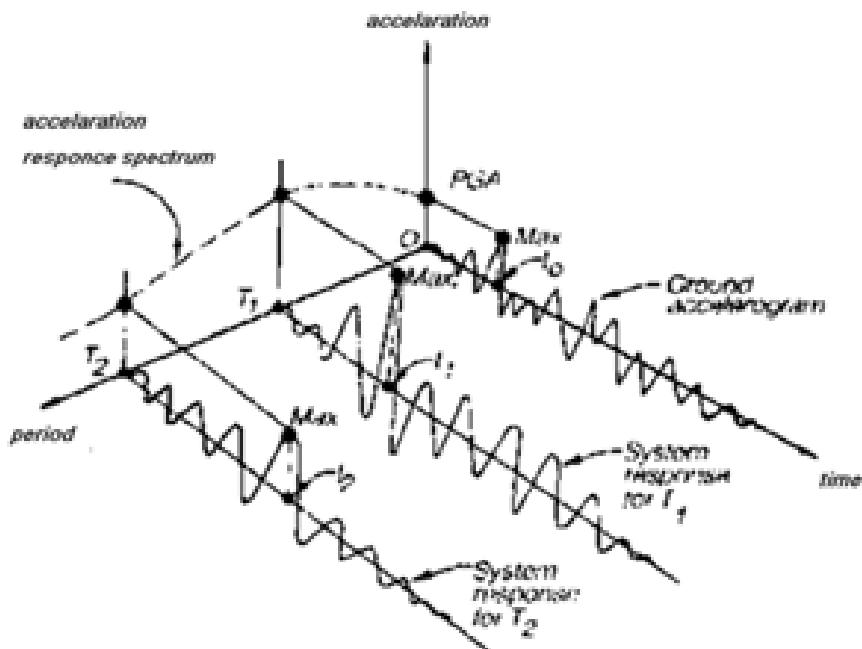




شکل ۱-۶. مقایسه طیف پاسخ هموار و طیف اصلاح شده تاریخچه شتاب زمان با میرایی ۵٪.

### ۱-۵-۲- نحوه تولید طیف پاسخ ساختگاه

برای این کار رایج است که شتاب نگاشت‌های موجود در ساختگاه را به عنوان ورودی به یک سیستم یک درجه آزادی وارد می‌کنند و حداکثر شتاب پاسخ سیستم را به دست می‌آورند. با تغییر پریود و تکرار این عمل طیف پاسخ به دست می‌آید (شکل ۱-۷). با رسم این طیف برای ساختگاه می‌توان تشخیص داد که در چه محدوده‌ای از پریودهای ارتعاشی انتظار خرابی شدید وجود دارد.



**SDOF system**

شکل ۱-۷. تولید طیف پاسخ ساختگاه

### ۶-۱- ترکیب بارها<sup>۳</sup>

عملکرد سدهای قوسی تحت تمام شرایط بارگذاری محتمل باید با توجه به ضرایب اطمینان مربوطه مورد بررسی قرار گیرد. برای ارزیابی ایمنی و آنالیز دینامیکی باید ترکیب بارگذاری

<sup>3</sup> Load combination

سخت که شامل بارگذاری عادی بعلاوه زلزله MCE می‌باشد، در نظر گرفته شود. هنگامی که بیش از یک زلزله MCE در نظر باشد، اثرات هر زلزله باید به‌طور جداگانه در نظر گرفته شود [۹]. دو ترکیب بارگذاری برای شرایط تابستان و زمستان می‌توان در نظر گرفت. تراز آب مخزن فرض می‌شود که در تراز نرمال قرار دارد مگر آنکه تراز آب محتمل در زمان درجه حرارت در نظر گرفته شده، بتواند برآورد شود [۹]. ترکیبات بار براساس آیین نامه<sup>۴</sup> FERC به شرح زیر قابل بیان است [۴]:

#### ۱-۶-۱- ترکیب بارگذاری عادی<sup>۵</sup>

شرایط تابستانی (Summer Condition)

حداکثر دمای میانگین بتن + تراز نرمال آب (NHWL) یا محتمل‌ترین تراز آب در زمان حداکثر دمای میانگین + بار مرده + بار رسوب در صورت لزوم + بار پایاب (تراز آب پایین دست سد در صورت لزوم)

شرایط زمستانی (Winter Condition)

حداقل دمای میانگین بتن + تراز نرمال آب (NHWL) یا محتمل‌ترین تراز آب در زمان حداقل دمای میانگین + بار مرده + بار رسوب در صورت لزوم + بار پایاب (تراز آب پایین دست سد در صورت لزوم) + بار یخ در صورت لزوم

#### ۱-۶-۲- ترکیب بارگذاری غیرعادی<sup>۶</sup>

سیلاب تابستانی (Summer Flooding)

تراز آب سیلاب + حداکثر دمای میانگین بتن یا دمای متوسط بتن در هنگام سیلاب + بار مرده + بار رسوب در صورت لزوم + بار پایاب (تراز آب پایین دست سد در صورت لزوم)

سیلاب زمستانی (Winter Flooding)

تراز آب سیلاب + حداقل دمای میانگین بتن یا دمای متوسط بتن در هنگام سیلاب + بار مرده + بار رسوب در صورت لزوم + بار پایاب (تراز آب پایین دست سد در صورت لزوم) + بار یخ در صورت لزوم

<sup>4</sup> Federal Energy Regulatory Commission

<sup>5</sup> Usual load condition

<sup>6</sup> Unusual load condition

۱-۶-۳- ترکیب بارگذاری فوق‌العاده<sup>۷</sup>

ترکیب بارگذاری عادی تابستانی + MCE

ترکیب بارگذاری عادی زمستانی + MCE

## ۱-۷- ضرایب اطمینان و معیارهای ارزیابی تنش

ضرایب اطمینان برای سدهای موجود در شرایط مختلف بارگذاری در جدول (۱-۱) ارائه شده است [۴].

جدول ۱-۱: ضرایب ایمنی برای سدهای موجود در ترکیب‌های مختلف بارگذاری بر اساس مرجع

## FERC

Loading Combination	Compressive Stresses	Tensile Stresse	Internal Shear Stresses	Sliding Stability
Usual (normal operating)	2.0	1.0	2.0	1.5
Unusual (flood condition)	1.5	1.0	1.5	1.5
Extreme (seismic)	1.1	1.0	1.1	1.1

برای ارزیابی نتایج تنش، دو معیار کلی زیر در نظر گرفته شده است:

✓ مقایسه تنش‌های فشاری و کششی اصلی با مقاومت مجاز فشاری و کششی بتن به صورت تک محوره<sup>۸</sup>

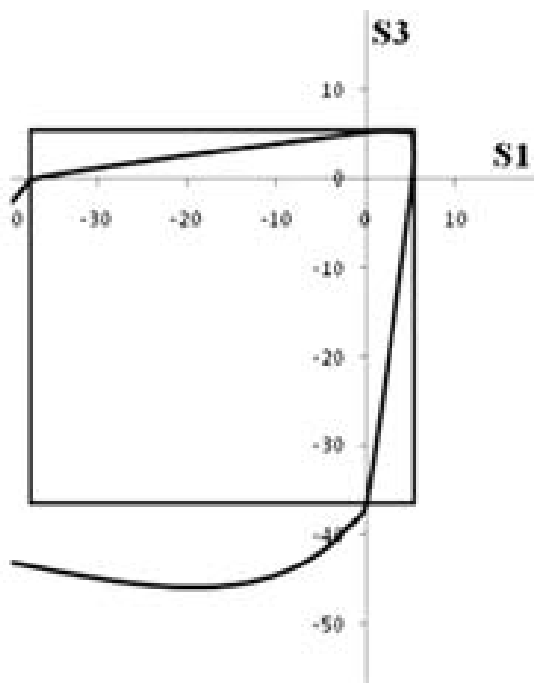
✓ مقایسه تنش‌های فشاری و کششی اصلی با پوش شکست دو بعدی بتن

برای رسم پوش شکست دو بعدی بتن معمولاً از روابط اصلاح شده Kupfer & Gerstle استفاده می‌شود [۱۰]. حداکثر مقاومت کششی بتن در شرایط بارگذاری دو محوری کششی، معادل مقاومت کششی تک محوری بتن در نظر گرفته می‌شود. با توجه به شرایط تنش‌های دو بعدی وارد بر بتن، پوش شکست دو بعدی بتن به چهار ناحیه تقسیم می‌گردد که در شکل ۱-۸ نشان داده شده است. همچنین در شکل ۱-۹ پوش شکست شبه دو بعدی<sup>۹</sup> بتن که در مطالعه ی حاضر استفاده شده، نمایش داده شده است.

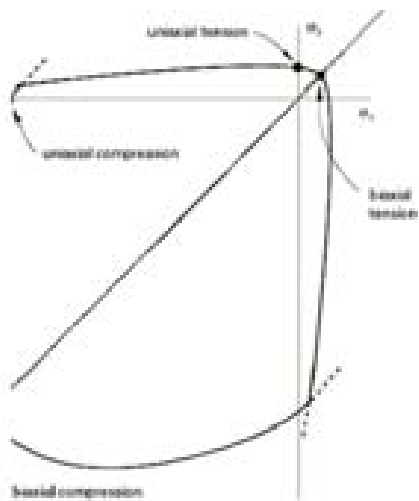
<sup>7</sup> Extreme load condition

<sup>8</sup> Uniaxial cracking

<sup>9</sup> Nearby Biaxial cracking



شکل ۸-۱: پوش شکست شبه دو بعدی بتن



شکل ۸-۱: پوش شکست دو بعدی بتن