بررسی رفتار سد بتن غلتکی ژاوه تحت بارهای استاتیکی و دینامیکی

آرش مظلومی [i]، محسن قائمیان [ii]

چکیده

روش های تحلیلی به منظور ارزیابی رفتار سدهای بتنی تحت بارهای استاتیکی و دینامیکی، متناسب با سطح طراحی، نوع و شکل سد به کار گرفته می شوند. میزان تنش های کششی به وجود آمده در بدنه سد ناشی از زلزله، جهت بررسی ایمنی این گونه سازه ها از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در این تحقیق، مدل المان محدود دوبعدی بلندترین مقطع سد بتن غلتکی ژاوه تهیه شد. اثر فشار هیدرودینامیکی آب مخزن با حل معادله موج در محیط دریاچه با درنظر گرفتن فرضیاتی همچون تراکم پذیری آب و تغییرشکل سازه در تحلیل اعمال گردید. پی سنگی واقع در زیر سد و دریاچه آن به صورت یک نیم صفحه ویسکوالاستیک، ایزوتروپیک و همگن مدل شد. نتایج تحلیل استاتیکی نشان می دهد که کل بدنه سد تحت تنش های فشاری می باشد. در تحلیل دینامیکی درمعرض زلزله های بیشینه، تعدادی از المان های واقع در پایین دست سد دارای تنش های کششی اصلی بزرگتری نسبت به تنش کششی مجاز بتن غلتکی می باشند. تنش های کششی قائم به وجود آمده در بدنه سد از مقاومت کششی لایه های بتن غلتکی کوچکتر است.

کلمات کلیدی: سد بتن غلتکی ژاوه، تنش های کششی اصلی و قایم

تاریخ دریافت مقاله: ۹۱/۳/۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۱/۶/۱۰

[i] نویسنده مسئول، کارشناس طراحی، پروژه سد مخزنی ژاوه، شرکت سهامی خدمات مهندسی برق (مشانیر)، تهران، ایران، پست الکترونیکی: mazloumi.arash@gmail.com

[ii] دانشیار، گروه سازه، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران: پست الکترونیکی: ghaemian@sharif.edu

Archive of SID

۱- مقدمه

سدها جهت اهداف مختلفی از جمله تامین آب شرب و کشاورزی ، انرژی برق و... ساخته می شوند. این سازه ها به سرعت از لحاظ تکنولوژی طرح و اجرا رشد نمودند. با توسعه ساخت سدها، اهمیت ایمنی آنها مطرح شد، زیرا که هزینه های زیاد ساخت و خسارات فراوان ناشی از شکست سد از اهمیت بالایی برخوردار است. بنابراین شناخت نوع و آسیب های وارده به این سازه ها بسیار مهم می باشد. بر اثر بارگذاری دینامیکی ممکن است تنش های کششی بزرگی درقیاس با استحکام کششی بتن در بدنه سد بوجود آید که زمینه ساز شکل گیری آسیب و توسعه آن در سازه باشد. با ارتقاء توانایی تحلیل و ایمن سازی این گونه سازه ها، تکنولوژی ساخت سدها با جهت گیری اقتصادی طرح در کاهش هزینه های احداث، نوع مصالح مصرفی و نیز سرعت اجرای آن پیشرفت نموده است. ساخت سدهای بتنی وزنی به علت هزینه های بالای ناشی از بتن ریزی حجیم، زمان زیاد اجرا آن، کاهش یافته است. همچنین خطر روگذری آب از بدنه و فرسایش مصالح خاکریز در سدهای خاکی حائز اهمیت می باشد.

www.SID.ir

لذا طرح سازه ای جدیدی در دهه های اخیر تحت عنوان سدهای بتن غلتکی مطرح شده و به سرعت گسترش یافته است. سدهای بتن غلتکی از نظر شکل ظاهری بسیار شبیه سدهای بتنی وزنی بوده ولی دارای تفاوت هایی در خواص مقاومتی بتن مصرفی و به ویژه نوع اجرای آن است [۴]، [۷]. با حدود یک دهه تجربه درخصوص ساخت چنین سدهایی در کشور عزیز ما ایران و نیز رشد فزاینده به کارگیری این تکنولوژی در کشور، اهمیت بررسی دقیق و مناسب ایمنی این گونه سازه ها را ایجاب می کند.

با توجه به سطح طراحی، نوع و شکل سد، روش های تحلیلی ساده تقریبی یا روش المان محدود به منظور ارزیابی رفتار سدهای بتنی تحت بارهای استاتیکی و دینامیکی به کار گرفته می شود. برای طراحی اولیه در تحلیل های دو بعدی، روش های ساده ای چون مدل های تیر کانتلیور (Cantilever Beam) که در راهنما USBR شرح داده شده، مناسب می باشد. در مراحل ویژه و طراحی نهایی، عمدتاً از روش المان محدود استفاده می شود. به طور کلی تحلیل المان محدود دو بعدی برای سدهای بتنی وزنی مناسب است و برای سدهای بتنی طویل با درزهای انقباض عرضی (Transverse Contraction Joints) و فاقد درزهای کلید شده (Keyed Joints) به طور معقولانه ای صحیح می باشد. در شرایطی چون قرارگیری این سازه ها در دره های باریک میان تکیه گاه های با شیب تند و مدول های الاستیسیته مختلف سنگ در سرتاسر دره بایستی از مدل سازی سه بعدی استفاده نمود [۲]، [۶].

هدف از این تحقیق، بررسی رفتار استاتیکی و دینامیکی سد بتن غلتکی ژاوه می باشد، از این رو مدل المان محدود دوبعدی بزرگترین مقطع غیرسرریز شونده سد تهیه و نیز اندرکنش سیستم سد با پی و دریاچه آن مدل سازی می گردد. مدل مزبور در حالات بارگذاری مختلف استاتیکی تحت وزن سازه و فشار هیدرواستاتیکی مخزن تحلیل می شود. تحلیل های دینامیکی تحت بارهای مختلفی در سطوح طراحی و بیشینه لرزه ای انجام می شود. نتایج به صورت جابجایی افقی و قائم تاج سد و پوش بیشینه تنش های کششی اصلی در مقطع ارایه می شود. به منظور آگاهی از وضعیت تنش های عمود بر لایه های بتن غلتکی، توزیع تنش های قائم ماکزیمم در بدنه، نمایش و بررسی می گردد. در نهایت میزان تنش های کششی اصلی و قائم حاصله با مقادیر مجاز استحکام کششی بتن غلتکی و لایه ها مقایسه می شود.

۲- پارامترهای موثر در تحلیل

بررسی رفتار سد حین بارهای استاتیکی براساس روش های تحلیلی متداول انجام می شود. بارهای استاتیکی اصلی وارده به سد شامل بار ناشی از وزن سازه و فشار آب مخزن سد در ترازهای نرمال و سیلابی می باشد. عملکرد کلی سازه با ترکیب نتایج حاصل از تحلیل های استاتیکی و دینامیکی تعیین می شود. درخصوص پارامترهای مهم موثر در تحلیل دینامیکی سازه، توضیحات ذیل ارایه شده است.

۲-۱- سطوح لرزه ای

سطوح لرزه ای در طراحی و ارزیابی رفتار سازه های هیدرولیکی بتنی بر اساس راهنمای انجمن مهندسین ارتش آمریکا (USACE) شامل زلزله مبنا بهره برداری (OBE) و زلزله حداکثر طراحی (MDE) می باشد. از آن جا که سد جزء سازه های مهم و حیاتی محسوب می شود که نتایج خرابی آن می تواند خسارات فراوانی را برجا گذارد لذا در تحلیل ها از بارهای دینامیکی در سطوح لرزه ای طراحی (DBE) و بیشینه (MCE) استفاده شده است. بر اساس آیین نامه های معتبر سد سازی، سد بتنی وزنی تحت بارهای دینامیکی طراحی، می بایست دارای رفتار الاستیک بوده و با حفظ عملکرد، نیازمند بازسازی نباشد. در سطح زلزله بیشینه، ایجاد آسیب در سد معقول و منطقی بوده و می بایست قابلیت کنترل زلزله را دارا بوده و دچار شکست به نحوی که باعث خروج ناگهانی آب از مخزن سد نشود [۳]، [۵]، [۸].

۲-۲- میرایی

دو خصوصیت پی سنگی که تاثیر چشمگیری در پاسخ دینامیکی سازه سد دارد همان ضریب میرایی و مدول تغییر شکل پذیری (Deformation Modulus) می باشد. دو منشاء برای میرایی پی سنگی موجود است که به صورت میرایی مصالح (هیسترتیک) و تشعشعی (Material (Hysteretic) and Radiation) می باشد. بر اساس آیین نامه انجمن مهندسین ارتش آمریکا، روشی توسط Fenves و Chopra به سال ۱۹۸۶ بر پایه مد ارتعاش اصلی سازه (وقتی دریاچه سد خالی است) ارایه شده که در آن برای تعیین میرایی ناشی از اندرکنش سد

www.SID.ir
Archive of SID

با پی ξ_f، عامل میرایی هیسترتیک ثابت پی η_f لازم بوده که بهتر است از آزمایش های روی نمونه های سنگ پی تحت تغییرات هارمونیک تنش و کرنش حاصل شود که به پیشنهاد آیین نامه فوق در صورت نامشخص بودن آن برای پی سنگی، مقدار محافظه کارانه $\eta_f = 0.1$ فرض می شود. برای سازه های بتنی چون سدهای بتن غلتکی وزنی، ضریب میرایی ویسکوز سازه سد ξ_f برای سطوح طراحی و بیشینه لرزه ای به ترتیب معادل با ۵ و ۷ درصد میرایی بحرانی (Critical Damping) لحاظ می گردد [۵].

۲-۳- ضریب انعکاس امواج از کف مخزن

از آنجا که در کف مخزن سد همواره رسوب وجود دارد، جذب مقداری از امواج هیدرودینامیکی امکان‌پذیر است. اگر مواد تشکیل‌دهنده کف دریاچه به نسبه نرم باشند، مقدار ضریب انعکاس موج (α) کوچک می‌شود. درنتیجه کسر مهمی از انرژی آب دریاچه جذب می‌شود که تاثیر چشم‌گیری در پاسخ دینامیکی سد دارد. بنابراین مقادیر α جهت طراحی و بررسی ایمنی سدها تحت بارگذاری‌های لرزه‌ای باید اندازه‌گیری شده و یا محافظه‌کارانه انتخاب شود. مطالعه میزان حساسیت پارامتر (Parameter Sensitivity Study) برای زمانی که مقدار α کمتر از ۰/۸ فرض شده، لازم بوده و باید مقادیر محافظه‌کارانه برای این پارامتر در نظر گرفته شود از این رو در تحلیل انجام شده مقدار پارامتر مذکور برابر ۰/۸ فرض گردیده است [۳].

۳- مشخصات سد، بتن بدنه و پی سنگی

سد بتن غلتکی ژاوه در استان کردستان به منظور کنترل منابع آبی این استان بر روی رودخانه ژاوه در دست احداث می باشد. شکل۱ بزرگترین مقطع غیر سرریز شونده سد و جدول۱ مقاومت فشاری مورد نظر بتن غلتکی سد و سایر پارامترهای حاصله مطابق روابط ارایه شده در آیین نامه USACE را نشان می دهد. تنش کششی مجاز متناظر بتن و لایه ها با توجه به سطح لرزه ای و مقاومت کششی دینامیکی (Dynamic Tensile Strength) بدست آمده که علت آن سرعت بالای کرنش حین بارگذاری لرزه ای نسبت به نرخ تغییرات بسیار پایین آن در آزمایش کشش مستقیم است. مشخصات بستر سنگی نیز بر اساس مطالعات مکانیک سنگ ساختگاه سد حاصل شده است [۱]، [۴]، [۵]، [۷].

٤- مدل سازی سیستم سد- پی و دریاچه

سیستم مرکب سد- پی سنگی و دریاچه آن مطابق شکل۲ مدل سازی شده است. در مدل سازی بدنه سد از المان های چهار وجهی استفاده شده که خواص الاستیک مصالح همچون مدول الاستیسیته، نسبت پواسون و جرم حجمی برای هر یک تعریف شده است. مدل سازی بستر سنگی زیر سد و دریاچه به صورت یک نیم صفحه ویسکوالاستیک، ایزوتروپیک و همگن (Homogeneous, Isotropic, Viscoelastic Half-plane) انجام شده است که برای اعمال اندرکنش بین سد و بستر سنگی آن، ماتریس سختی دینامیکی پی سنگی در معادلات حرکت وارد می شود، این ماتریس تابع فرکانس (Frequency-Dependent Matrix) نسبت به درجات آزادی نقاط گره ای موجود در کف سد تعیین می شود. بنابراین خواص مصالح سنگی پی انعطاف پذیر، همچون مدول الاستیسیته، جرم حجمی و نسبت پواسون همچنین ضریب میرایی هیسترتیک ثابت مصالح (Constant Hysteretic Damping) در مدل سازی وارد می شود. برای درنظر گیری اندرکنش دریاچه و بستر سنگی، شرایط مرزی در کف دریاچه لحاظ گردیده که پاره ای از امواج فشاری هیدرودینامیکی حادث جذب شود. دریاچه به صورت سیالی با عمق ثابت و طولی نامحدود در راستای بالادست در نظر گرفته می شود که آثار هیدرودینامیکی آب مخزن با حل معادله موج دو بعدی با فرض تراکم پذیری آب، مدل سازی می گردد. تحریکات لرزه ای سیستم سد- پی و دریاچه بر اساس مولفه های شتاب میدان آزاد (Free-field Acceleration) زمین در راستای افقی متقاطع با محور سد و قائم بر مقطع عرضی به صورت برابر در تمامی نقاط کف سد اعمال گردیده است [۲].

۵- حالات بارگذاری

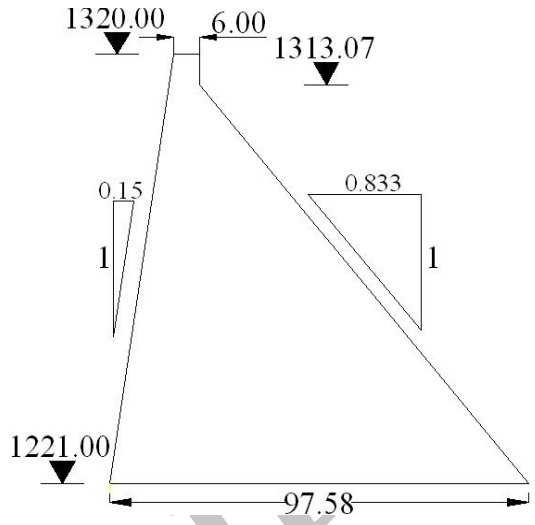
بارگذاری استاتیکی شامل حالات: ۱- سازه سد(دریاچه خالی)، ۲- سازه سد و دریاچه در تراز نرمال و ۳- سازه سد و دریاچه پر (در تراز تاج) می باشد.

بارگذاری دینامیکی شامل حالات:۱- سازه سد با دریاچه در تراز نرمال و بارگذاری لرزه ای در سطح زلزله طراحی (DBE) (۳ رکورد زلزله با مولفه های شتاب افقی و قائم) و ۲- سازه سد با دریاچه در تراز نرمال و بارگذاری

Archive of SID

www.SID.ir

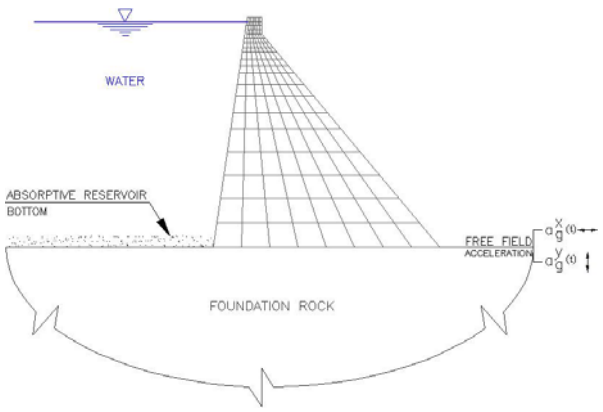
لرزه ای در سطح زلزله حداکثر (MCE) (۳ رکورد زلزله با مولفه های شتاب افقی و قائم) می باشد.



شکل (۱): بزرگترین مقطع غیرسرریز شونده سد ژاوه

جدول (۱): پارامترهای مقاومتی بتن سد و پی سنگی آن

مقاومت فشاری ۱۸۰ روزه نمونه استوانه ای بتن f_c' :	۱۲ مگاپاسکال
مدول الاستیسیته استاتیکی E :	۱۶ گیگاپاسکال
ضریب پواسون υ :	۰/۲
جرم حجمی ρ :	۲۴۰۰ کیلوگرم برمترمکعب
مقاومت کششی بتن (آزمایش کشش مستقیم) (Parent) f_t' :	۱/۱۳ مگاپاسکال
مقاومت کششی لایه ها در آزمایش کشش مستقیم (Lift) f_t' :	۰/۷۲ مگاپاسکال
تنش کششی مجاز بتن در سطح زلزله DBE (Parent) f_t :	۱/۵۲ مگاپاسکال
تنش کششی مجاز لایه ها در سطح زلزله DBE (Lift) f_t :	۰/۹۷ مگاپاسکال
تنش کششی مجاز بتن در سطح زلزله MCE (Parent) f_t :	۲/۲۵ مگاپاسکال
تنش کششی مجاز لایه ها در سطح زلزله MCE (Lift) f_t :	۱/۴۴ مگاپاسکال
مدول الاستیسیته دینامیکی E_d :	۱۸/۵ گیگاپاسکال
مدول تغییرشکل پذیری سنگ پی	۸ گیگاپاسکال
جرم حجمی سنگ پی	۲۷۵۰ کیلوگرم برمترمکعب
ضریب پواسون سنگ پی	۰/۲۶



شکل (۲): مدل سیستم مرکب سد-پی و دریاچه آن

۶- نتایج تحلیل ها

جدول۲ نتایج مربوط به تغییر مکان افقی تاج سد ژاوه در تحلیل استاتیکی بزرگترین مقطع سد برای حالات مختلف بارگذاری شامل مخزن خالی و پر را نشان می دهد.
شکل۳ پوش تنش های اصلی بدنه سد ژاوه در تحلیل استاتیکی بزرگترین مقطع سد برای حالات مختلف بارگذاری شامل مخزن خالی و پر را نشان می دهد.

جدول (۲) : تغییر مکان افقی تاج سد در تحلیل استاتیکی

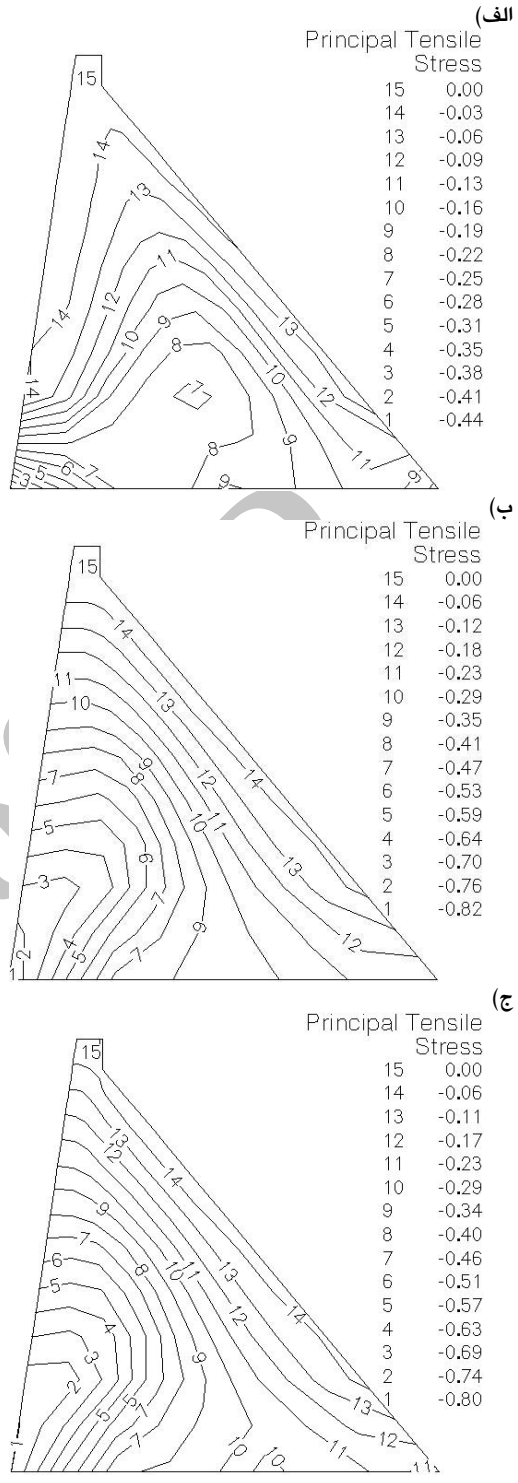
مقطع سد	حالت بارگذاری	تغییر مکان تاج
بزرگ ترین مقطع غیر سرریز شونده	مخزن سد خالی	۰/۱۹- سانتیمتر*
	مخزن سد در تراز نرمال	۰/۴۰ سانتیمتر*
	مخزن سد در تراز حداکثر (کاملاً پر)	۰/۶۶ سانتیمتر*

*راستای مثبت محور X مختصات از منتهی الیه پاشنه سد به سمت پایین دست می باشد.

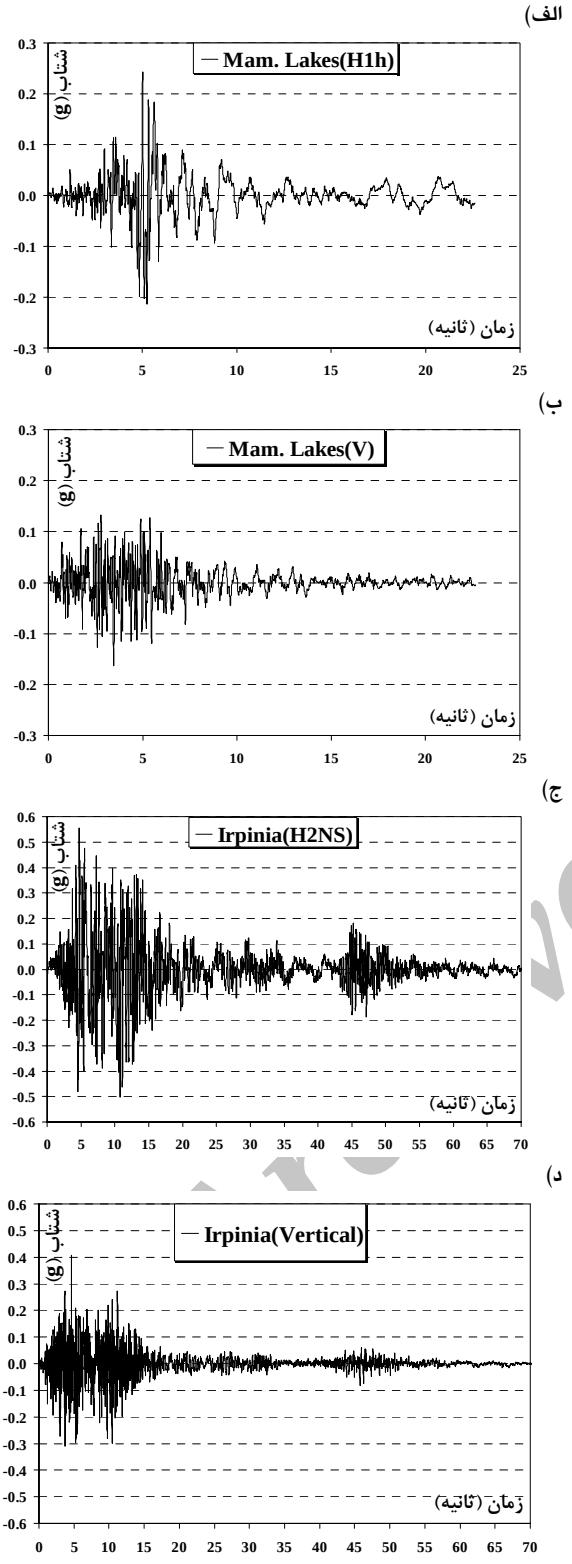
بر اساس تحلیل های دینامیکی انجام شده، شتاب نگاشت رکوردهای زلزله های Mamoth lake و Irpinia که به ترتیب در سطوح طراحی و بیشینه لرزه ای، بالاترین تنش ها را در مقطع سد ایجاد می کنند، مطابق شکل۴ نشان داده شده است.
شکل۵ تاریخچه زمانی تغییرمکان های افقی و قائم تاج سد ژاوه تحت زلزله های فوق را نشان می دهد. پوش بیشینه تنش های کششی اصلی بدنه سد ژاوه در سطح زلزله های طراحی و بیشینه، مطابق شکل۶ ترسیم شده است.

Archive of SID

www.SID.ir



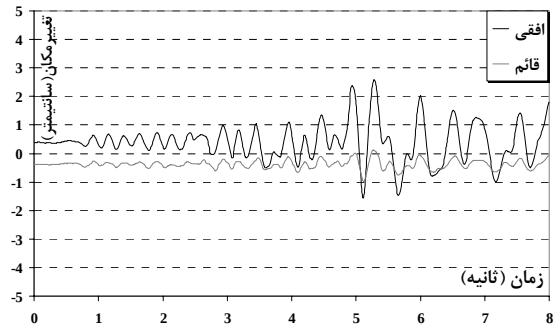
شکل (۳): پوش تنش های اصلی (مگاپاسکال) در تحلیل استاتیکی بزرگترین مقطع سد ژاوه : (الف) دریاچه خالی (ب) آب دریاچه در تراز نرمال (ج) آب دریاچه در تراز تاج سد (مخزن سد کاملاً پر)



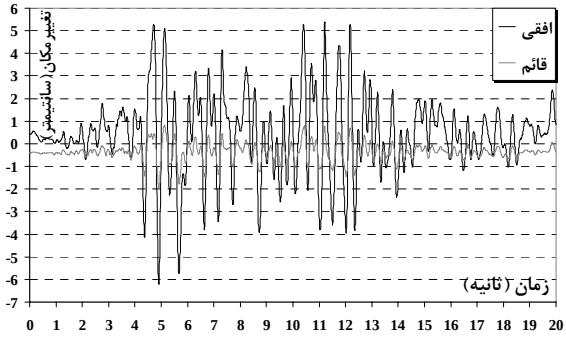
شکل (۴) : شتاب نگاشت های منتخب سطح DBE شامل : شتاب (الف) افقی (ب) قائم و سطح MCE شامل شتاب (ج) افقی (د) قائم

www.SID.ir

الف)

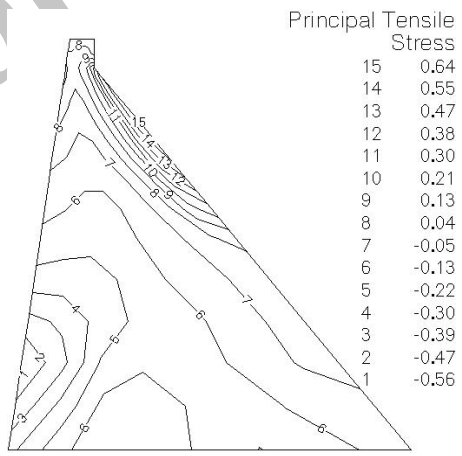


ب)

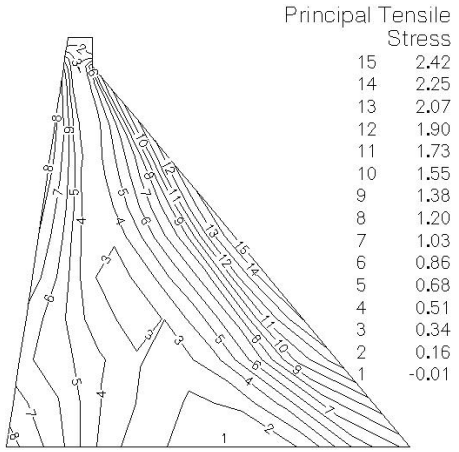


شکل (۵) : تغییر مکان های تاج سد : (الف) در سطح زلزله DBE (ب) در سطح زلزله MCE

الف)



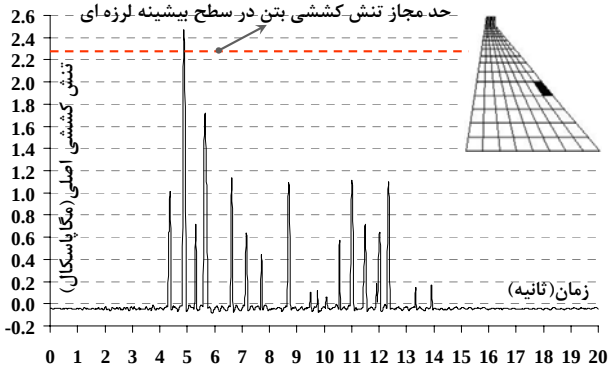
ب)



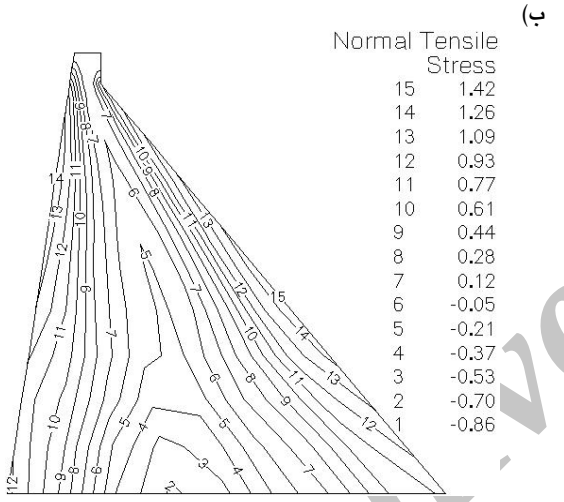
شکل (۶) : پوش بیشینه تنش های کششی اصلی (مگاپاسکال) مقطع سد ژاوه تحت : (الف) زلزله سطح DBE (ب) ژلزله سطح MCE

تاریخچه زمانی تنش های کششی اصلی در بحرانی ترین المان بدنه سد که در زلزله Irpinia مربوط به سطح بیشینه لرزه ای اتفاق می افتد و نیز توزیع حداکثر تنش های قائم در بزرگ ترین مقطع سد مطابق شکل۷ ارایه شده است.

الف)



ب)



شکل۷ : (الف) تاریخچه زمانی تنش های کششی اصلی بحرانی ترین المان مقطع سد ژاوه در تحلیل دینامیکی (ب) حداکثر تنشهای قائم (مگا پاسکال) در تحلیل دینامیکی بزرگترین مقطع سد ژاوه

۷- نتیجه گیری

پوش تنش های اصلی در تحلیل استاتیکی بدنه سد ژاوه، نشان دهنده در فشار بودن کامل مقطع سد می باشد. حداکثر تنش کششی اصلی در مقطع سد برای سطح زلزله طراحی در محدوده مجاز می باشد که در سطح زلزله بیشینه در قسمت هایی از رویه مقطع از میزان مجاز فراتر رفته است، لذا مطابق با معیارهای رفتار لرزه ای سد در سطح زلزله حداکثر و با توجه به تاریخچه زمانی تنش های اصلی بحرانی ترین المان ها که نشان می دهد در کل زمان بارگذاری دینامیکی حداکثر، فقط یک مرتبه افزایش میزان تنش نسبت به سطح مجاز اتفاق افتاده، بنابراین این امر محتمل و قابل پذیرش می باشد. پوش

Archive of SID

www.SID.ir

حداکثر تنش های کششی قائم مقطع، نشانگر در محدوده مجاز بودن این تنش ها در سطح بارگذاری دینامیکی حداکثری می باشد. لذا ارزیابی می شود که طرح بدنه سد ژاوه تحت بارگذاری های استاتیکی و دینامیکی، ایمن بوده و عملکرد مناسبی خواهد داشت.

۸- مراجع

[۱] گروه تخصصی ژئوتکنیک؛ **گزارش نهایی مکانیک سنگ ساختگاه سد مخزنی ژاوه**، شرکت سهامی خدمات مهندسی برق (مشانیر)، تهران، ۱۳۹۰.

[۲] Fenves, G.; Chopra, A. K.; "*EAGD-84: A Computer Program for Earthquake Analysis of Concrete Gravity Dams*", Report No. UCB/EERC 84/11, University of California, Berkeley, 1984.

[۳] Federal Energy Regulatory Commission (FERC); "*Engineering Guide Lines for the Evaluation of Hydropower Projects*", Division of Dam Safety and Inspections, Chapter 3&11, 2000.

[۴] US Army Corps of Engineers; "*Structural Design Using the Roller- Compacted Concrete (RCC) Construction Process*", Engineer Technical Letter (ETL), No. 1110-2-343, 1993.

[۵] US Army Corps of Engineers; "*Seismic Design Provisions for Roller Compacted Concrete Dams*", Engineer Pamphlet (EP), No.1110-2-12, 1995.

[۶] US Army Corps of Engineers; "*Gravity Dam Design*", Engineer Manual (EM), No.1110-2-2200, 1995.

[۷] US Army Corps of Engineers; "*Roller-Compacted Concrete*", Engineer Manual (EM), No. 1110-2-2006, 2000.

[۸] US Army Corps of Engineers; "*Earthquake Design and Evaluation of Concrete Hydraulic Structures*", Engineer Manual (EM), No. 1110-2-6053, 2007.

Archive of SID

www.SID.ir