



بررسی آنالیزهای تراوش، استاتیکی و دینامیکی سد خاکی سنگ سیاه

ارسلان قهرمانی، استاد بخش مهندسی راه و ساختمان، دانشگاه شیراز*

کیوان صاحب زاده، کارشناس ارشد خاک و پی، شرکت مهندسی مشاور پار آب فارس**

*: تلفن: ۰۹۱۷۱۱۷۰۱۰۱، پست الکترونیکی: ghahraman@shirazu.ac.ir

**: پست الکترونیکی: k_sahebzadeh@yahoo.com

چکیده

سد خاکی سنگ سیاه بر روی رودخانه سنگ سیاه به منظور ذخیره و نگهداری آب رودخانه برای تأمین آب کشاورزی منطقه، و نیز تأمین آب شرب شهردهگلان و روستاهای اطراف، در بخش دهگلان شهرستان قروه در استان کردستان واقع گردیده است. در این مقاله به ارائه بسیار مختصر نتایج محاسبات تحلیل های تراوش، استاتیکی و دینامیکی سد سنگ سیاه پرداخته شده است، و رفتار سد در شرایط مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است.

کلید واژه‌ها: تحلیل تراوش، تحلیل استاتیکی، تحلیل دینامیکی، روانگرایی، سدسنگ سیاه، Geo-Slope.

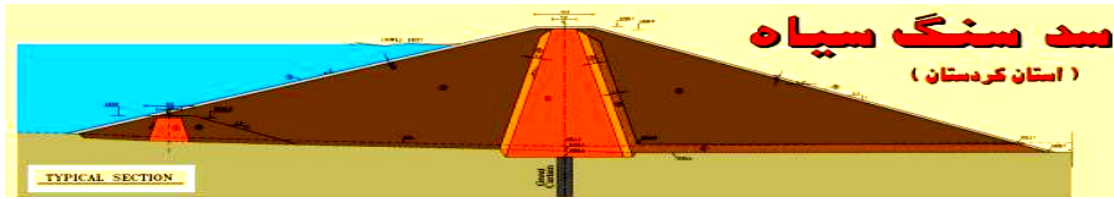
۱- مقدمه

شاید هیچ نوع سازه ای که توسط انسان ساخته شود به اندازه سد بزرگی که دارای دریاچه وسیعی بوده و در پائین دست آن منطقه پر جمعیتی وجود دارد زمینه خطر برای جان و مال افراد نباشد. سدهای خاکی در مرحله حین ساخت و در طول زمان بهره برداری در معرض انواع تنش های متفاوت از جمله تنش های حاصل از نشست سد و تنش های حاصل از بدنه سد، فشار استاتیکی آب و نیروی دینامیکی امواج، زلزله و... قرار دارد، که به منظور مقاومت در مقابل آنها باید تمامی ملاحظات لازم صورت پذیرفته و طرح ایمنی اجرا گردد. با توسعه روش اجزاء محدود و پیشرفت علوم نرم افزاری کامپیوترها، امکان تعیین جابجایی ها، تنش ها و فشارهای حفره ای در محیط های پیوسته مقدور گردید. به کمک این روش ها می توان تغییرات کمیت های دیگر در محیط های خاکی مانند محاسبه مقدار اتلاف آب در سد، کنترل گرادیان خروجی بحرانی، ترسیم گرافیکی شدت، بزرگی و مسیر حرکت

جریان از بدنه یا شالوده سد، محاسبه نوع و ابعاد سیستم های زهکشی و آب بند، تعیین تغییر شکل های دائمی و کنترل روانگرایی ناشی از زلزله و... برای رفتار کوتاه مدت (زهکشی نشده) یا دراز مدت (زهکشی شده) را مورد تحلیل قرار داد. برای انجام آنالیزهای فوق از برنامه های plaxis و Geo-slope office کمک گرفته شده است.

۲- مشخصات مصالح سد، ذکر نکات مورد استفاده، و ارائه برخی نتایج آنالیزها

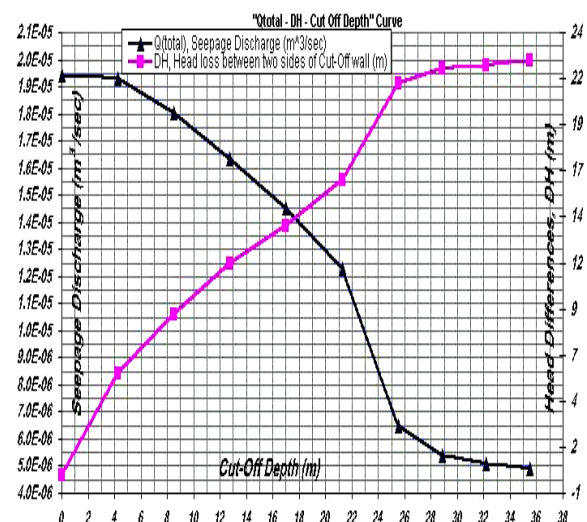
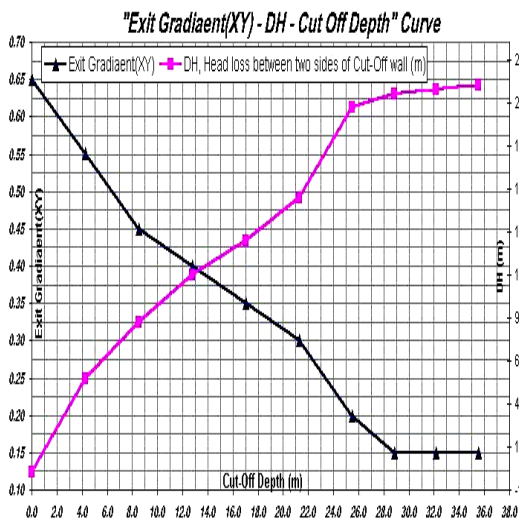
در شکل (۱) مقطع نمونه سد سنگ سیاه نشان داده شده است. بحرانی ترین مقطع عرضی بدنه سد دارای تراز کف ۱۸۰۹ متر، تراز تاج ۱۸۴۰/۵ متر، تراز نرمال آب ۱۸۳۷ متر، تراز حداقل آب ۱۸۱۷ متر و حجم نرمال مخزن ۳۲ میلیون متر مکعب می باشد. ضخامت پرده تزریقی آب بند شالوده سد مورد استفاده در آنالیز (که با بررسی از بین گزینه های متعدد با توجه به نوع مصالح، منطقه و... انتخاب شده است) ۲ متر در نظر گرفته شده است. از جمله نکات اولیه که در هنگام تحلیل سد، لازم به بررسی آن است انتخاب نوع تحلیل 2D یا 3D برای آنالیزهای مختلف می باشد که بسته به شکل، موقعیت سد و توپوگرافی منطقه ممکن است نتایج تحلیل 2D غیر قابل قبول باشد، انجام تحلیل 3D ضمن بالا بردن دقت نتایج، می تواند ما را از برخی مسائل مشکل ساز آگاه کند. اصولاً در دره های تنگ و نسبتاً تنگ انجام آنالیز 3D توصیه می گردد، که با توجه به عریض بودن سد سنگ سیاه در مقایسه با ارتفاع آن، نتایج تحلیل 2D تقریباً محافظه کارانه می باشد. از آنجایی که ضخامت کم آبرفت در کف سد موجود در شالوده سد تا رسیدن به بستر سنگی (با خرد شدگی متوسط) برداشته می شود، برای آنالیزهای استاتیکی و دینامیکی فقط بدنه سد در نظر گرفته شده است. با توجه به نتایج ژئوتکنیک گمانه ها به در نظر گرفتن مصالح به ضخامت تقریبی ۴۷/۵ متری شالوده سد تا رسیدن به لایه با نفوذ ناپذیری بسیار بالا برای آنالیز تراوش اقدام شده است. در شکل (۲) مقادیر دبی کل خروجی از بدنه و شالوده سد، گرادیان خروجی (XY) در نقطه شروع زهکش افقی (بلافاصله بعد از کف هسته رسی، به عنوان بحرانی ترین موقعیت) و اختلاف هد دو طرف پرده آب بند به منظور کنترل کارایی آن، برای عمق های مختلف پرده آب بند ۰، ۴/۲۵، ۸/۵، ۱۲/۷۵، ۱۷/۰، ۲۱/۲۵، ۲۵/۵، ۲۸/۸۳، ۳۲/۱۷ و ۳۵/۵ متر مشاهده می شود. با مشاهده این منحنی ها عمق بهینه برای انجام عملیات تزریق ۲۸ متر می باشد. زیرا این عمق ضمن کاستن از دبی خروجی، مقدار گرادیان خروجی را به کمتر از مقدار مجاز (→ 4 $i_{cr}=1, F.S.=i_{cr}/i_{ex} \geq 3, i_{ex}=0/25$) برساند. ضمن آنکه توصیه آئین نامه روسیه به کار برده شده توسط شرکت IIGH در سد بتنی کوثر واقع در استان خوزستان مبنی بر کوچکتر بودن نسبت اختلاف هد دو طرف پرده آب بند به ضخامت آن از عدد ۲۵، در تحلیل لحاظ شده است. در شکل (۳) مسیر حرکت آب و بزرگی شدت جریان، و خط آزاد آب در بدنه و شالوده سد نشان داده شده است. با توجه به این شکل، به علت نفوذ ناپذیری نسبتاً بالا در پوسته سد، افت تراز آب در پوسته بالادست مشابه عملکرد هسته می باشد. در جدول (۲) ضرایب اطمینان پایداری استاتیکی و شبه استاتیکی شیب ها ارائه شده است. ضرایب اطمینان بدست آمده در حالت استاتیکی از مقدار توصیه شده عدد ۱٫۵، و نیز برای حالت شبه استاتیکی از مقدار توصیه شده عدد ۱ بیشتر می باشند.



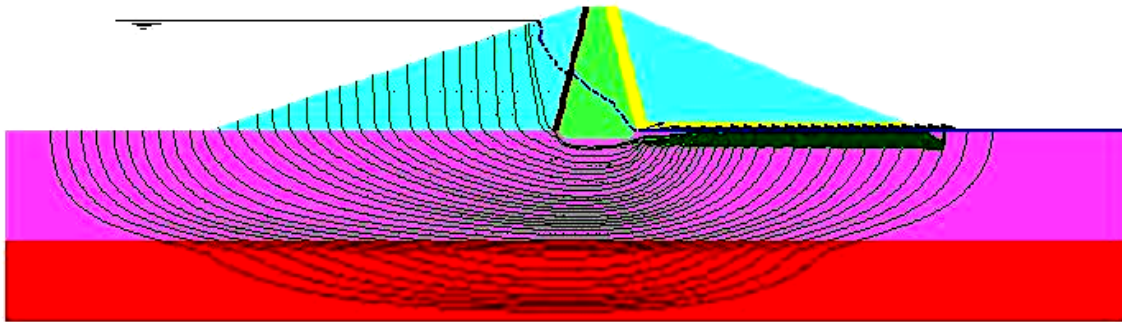
شکل ۱: مقطع نمونه سد سنگ سیاه

جدول ۱: خصوصیات مصالح نواحی مختلف سد سنگ سیاه

پرده آب بند تزیقی	پوسته	فیلتر و زهکش	هسته	لایه فوقانی شالوده سد (۲۷/۵ متر)	لایه تحتانی شالوده سد (۲۰ متر)	مصالح
-	۱۸	۱۸	۱۶	-	-	$\gamma_d (kPa)$
1×10^{-8}	$9/26 \times 10^{-8}$	2×10^{-6}	$1/16 \times 10^{-9}$	$1/9 \times 10^{-6}$	$1/5 \times 10^{-7}$	$K_{eq} (m/s)$
۱	۹	۹	۹	۱	۱	$\frac{K_H}{K_V}$
-	۱۵۰۰۰	۱۰۰۰۰	۵۰۰۰	-	-	$E (kPa)$
-	۰/۳۵	۰/۳	۰/۴	-	-	ν
-	۳/۵	۱	۱۵ (CD)	-	-	$C (kPa)$
-	۳۶	۳۴	۳۰ (CD)	-	-	$\phi (^{\circ})$
-	۲/۶۹	۲/۶	۲/۶۵	-	-	G_s
-	۱۱	۰	۱۸	-	-	PI
-	۲۲۲۲۳	۱۵۳۸۵	۷۱۴۳	-	-	$G_{max} (kPa)$
-	۰/۵	۰/۵	۰/۵	-	-	توان تنش (n)
-	۰/۱	۰/۱	۰/۱	-	-	ضریب میرایی



شکل ۲: مقادیر دبی خروجی از بدنه و شالوده سد، گرادیان خروجی، و اختلاف هد دو طرف پرده آب بند در عمق های مختلف پرده آب بند



شکل ۳: نمایی از مسیر حرکت آب، بزرگی شدت جریان، و خط آزاد آب در بدنه و شالوده سد در حالت بدون پرده آب بند

جدول ۲: ضرایب اطمینان پایداری شیب ها در شرایط مختلف

وضعیت سد	پایان ساخت	بهره برداری	تخلیه سریع	مخزن نیمه پر
شیب بالادست	۲/۲۸	۲/۶۲	۲/۱۳	۲/۱۰
شیب پایین دست	۱/۹۹	۲/۱۲	-	-
شیب بالادست (شبه استاتیک)	۱/۴۲	۱/۳۷	-	۱/۱۸
شیب پایین دست (شبه استاتیک)	۱/۳۱	۱/۲۵	-	-

۲-۱- آنالیز استاتیکی تنش-تغییر مکان های بدنه سد

در این آنالیز از مدل الاستیک خطی برای تحلیل مراحل حین ساخت، پایان ساخت، بهره برداری و تخلیه سریع استفاده شده است. شبیه سازی اثر تحکیم با ساخت ۳۱ لایه و تعریف گام ۶ روزه برای هر لایه تا رسیدن به انتهای ساخت ۱۸۶ روزه صورت گرفته است. در جدول (۳) برخی مقادیر ماکزیمم پارامترهای تحلیلی مهم چند مرحله حین ساخت، انتهای ساخت و مدتی پس از ساخت، بهره برداری و تخلیه سریع ارائه شده است.

جدول ۳: مقادیر ماکزیمم برخی پارامترهای تحلیلی مهم حاصل از آنالیز، برای حالت های مختلف مدل سد سنگ سیاه

وضعیت سد	تغییر شکل قائم (mm)	تغییر شکل افقی (mm)	تنش کل X (kPa)	تنش کل Y (kPa)	تنش مؤثر X (kPa)	تنش مؤثر Y (kPa)	فشار آب حفره ای (kPa)	تنش برشی X-Y (kPa)
حین ساخت (۰/۲۵H)	۰/۰۴	۰/۰۰۷	۱۱۱	۱۵۷	۹۲	۱۴۰	۱۴	۲۰
حین ساخت (۰/۵H)	۰/۱۲	۰/۰۲۶	۲۰۱	۳۳۸	۱۷۱	۳۰۷	۳۰	۴۴
حین ساخت (۰/۷۵H)	۰/۲۲	۰/۰۵	۲۹۱	۵۰۳	۲۴۷	۴۵۸	۴۵	۴۶
پایان ساخت (H)	۰/۳۵	۰/۰۸	۳۶۰	۶۲۶	۳۰۹	۵۷۴	۵۱	۶۴
یک ماه پس از ساخت	۰/۳۵	۰/۰۸	۳۶۰	۶۲۵	۳۱۰	۵۷۶	۵۰	۶۵
نه ماه پس از ساخت	۰/۳۵	۰/۰۸	۳۵۷	۶۲۵	۳۱۲	۵۸۱	۴۵	۶۵
بهره برداری	۰/۵۸	۰/۱۲	۳۶۸	۶۸۲	۴۰۱	۵۴۷	۲۸۳	۶۹
تخلیه سریع	۰/۵۹	۰/۰۸۳	۳۵۱	۶۵۲	۴۰۱	۵۴۹	۳۰۱	۷۲

در صورت پایداری سد در مراحل حین ساخت و اولین آنگیری، در طول مدت بهره برداری نیز مشکلی نخواهد داشت [۱]. بنابراین کنترل مراحل فوق از اهمیت بیشتری برخوردار است. شکست هیدرولیکی و فرسایش داخلی متعاقب آن، وقتی در هسته رسی یک سد خاکی رخ می دهد که تنش قائم کل کمتر از فشار حفره ای

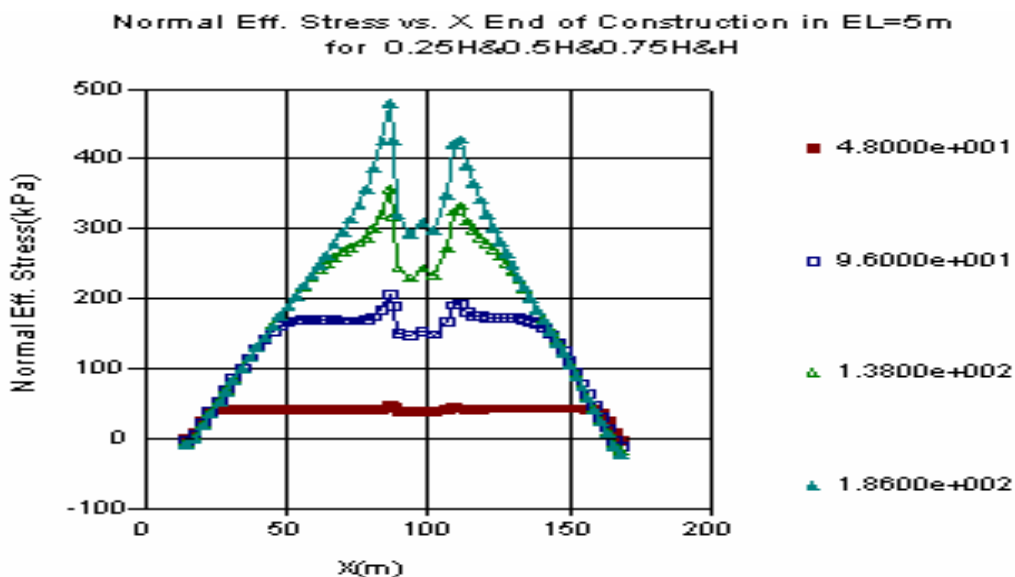
گردد. کاهش تنش قائم کل به واسطه انتقال وزن هسته به وسیله عمل قوسی به پوسته های جناحین می باشد، در چنین حالتی مقاومت برشی رس هسته، باعث انتقال وزن آن به پوسته ها می شود. اگر فشار آب حفره ای بزرگتر از تنش قائم کل گردد ترک افقی، و اگر بزرگتر از تنش افقی کل گردد ترک قائم در هسته رسی به وجود می آید، با انتخاب چند نقطه بحرانی تر مربوط به مراحل انتهایی ساخت که بیشتر در هسته رسی قرار دارد، به محاسبه ضریب اطمینان در برابر شکست هیدرولیکی پرداخته شده است. که فقط در چند نقطه محدود، مقدار متوسطی دارد ولی در سایر نقاط بسیار بیشتر است.

ضریب اطمینان در برابر ترک افقی: $F.S.(H)$ ضریب اطمینان در برابر ترک قائم: $F.S.(V)$

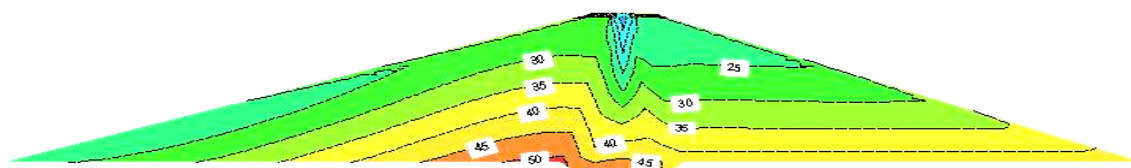
نقطه شماره ۱ واقع در هسته: $F.S.(H)=256/51=5$ $F.S.(V)=406/51=8$

نقطه شماره ۲ واقع در هسته: $F.S.(H)=431/48=9$ $F.S.(V)=303/48=6$

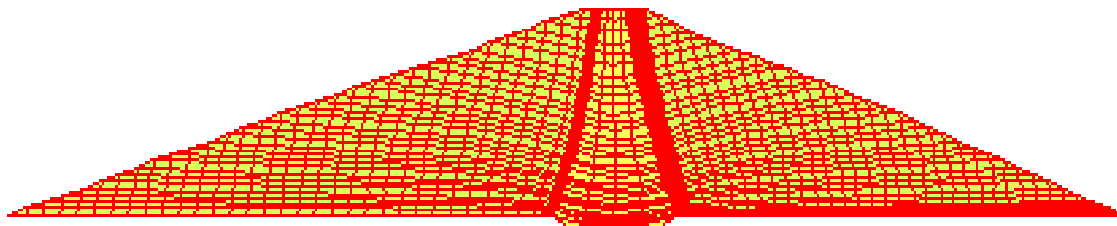
در شکل (۴) تنش های مؤثر نرمال بدنه سد، برای سه مرحله حین ساخت و مرحله پایان ساخت در تراز ۵ متر را نشان می دهد، که در آن همه تنش ها فشاری (غیرکششی) می باشند، و کاهش تنش های هسته نسبت به پوسته شدید نمی باشند. بنابراین بدنه سد از نظر عمل قوسی و ناپایداری مشکلی ندارد.



شکل ۴: تنش های مؤثر نرمال بدنه سد برای مراحل مختلف ساخت، در تراز ۵ متر



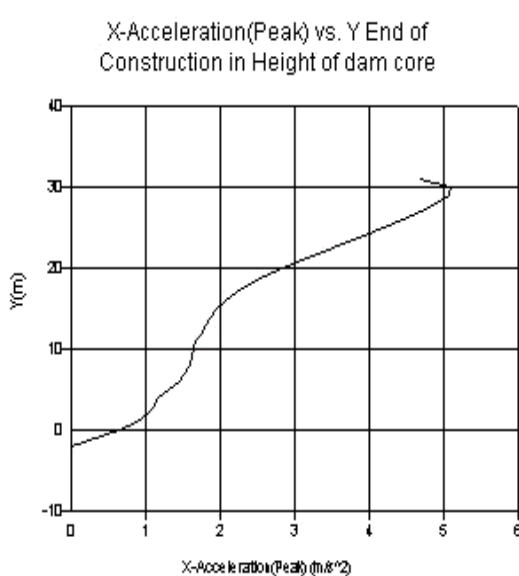
شکل ۵: خطوط هم تراز فشار آب حفره ای در مرحله انتهایی ساخت سد



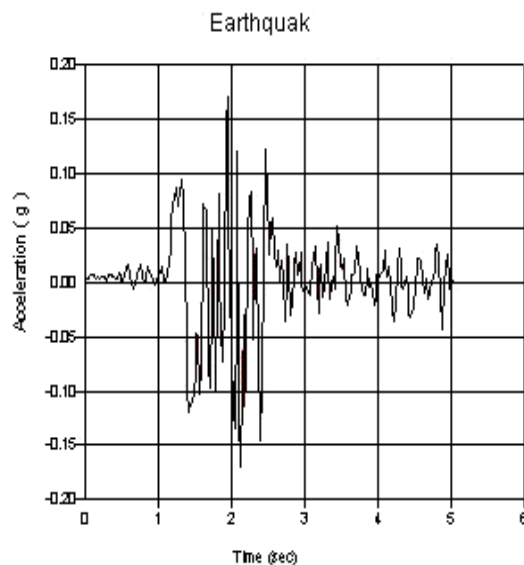
شکل ۶: تغییر شکل ایجاد شده در مرحله انتهای ساخت سد

۲-۲- آنالیز دینامیکی بدنه سد در حالت وقوع زلزله طرح

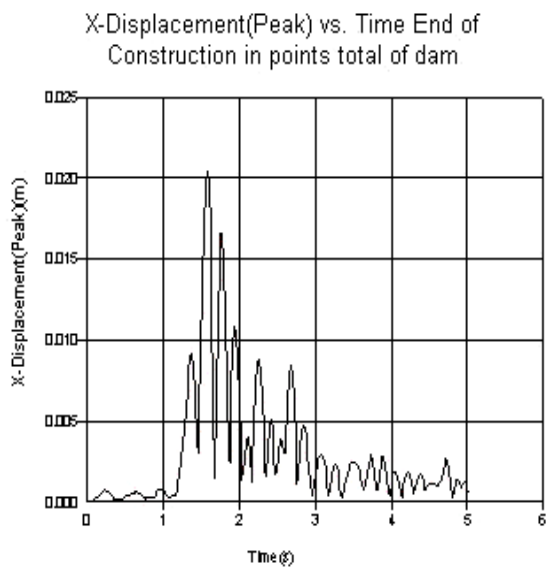
این نوع تحلیل که در واقع محاسبه عکس العمل لرزه ای سد به ارتعاشات ناشی از زلزله می باشد، به روش خطی معادل (Equivalent Linear) صورت گرفته است. انتخاب این روش برای در نظر گرفتن رفتار غیر خطی و غیرالاستیک مصالح جهت پیش بینی دقیق تر رفتار این سازه ها تحت اثر تکان های لرزه ای می باشد [۲ و ۳]. از جمله نکات مهم در بررسی آنالیز دینامیکی سدهای خاکی، کنترل پتانسیل روانگرایی و محاسبه تغییر شکل دائمی ایجاد شده در سد می باشد [۴]. برای انجام تحلیل از منحنی شتاب نگاشت زلزله ناغان که مشابه با شرایط منطقه سد سنگ سیاه می باشد، با شتاب مبنای طرح $0.17g$ در مدت پنج ثانیه استفاده شده است، که در شکل (۷) نشان داده شده است. در شکل های (۸) الی (۱۴) برخی نتایج آنالیزهای دینامیکی سد نشان داده شده است.



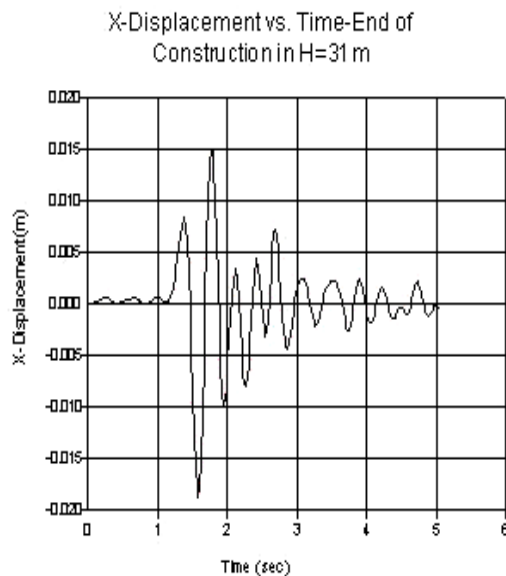
شکل ۸: مقادیر شتاب ماکزیمم پاسخ دینامیکی سد



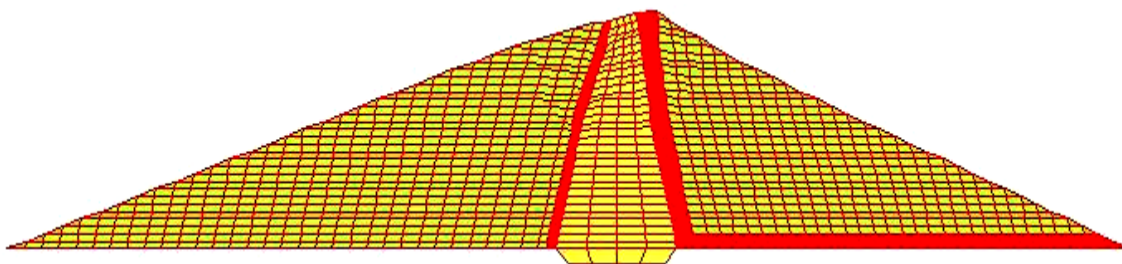
شکل ۷: شتاب نگاشت مورد استفاده در آنالیز سد در نقاط واقع در ارتفاع محوری سد در مرحله انتهای ساخت



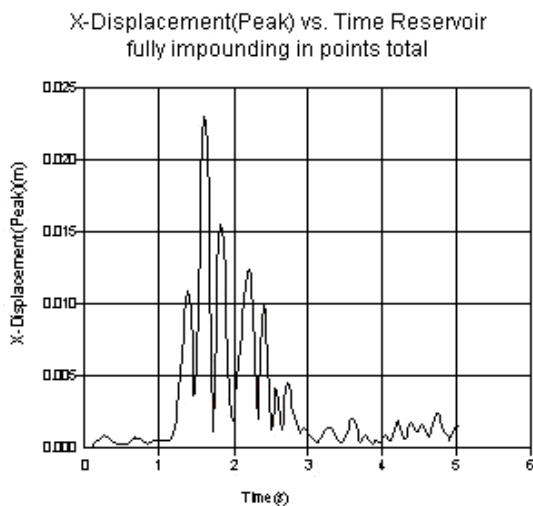
منحنی ۱۰: مقادیر ماکزیمم جابجایی افقی در کل نقاط سد در مدت اثر زلزله در مرحله انتهای ساخت



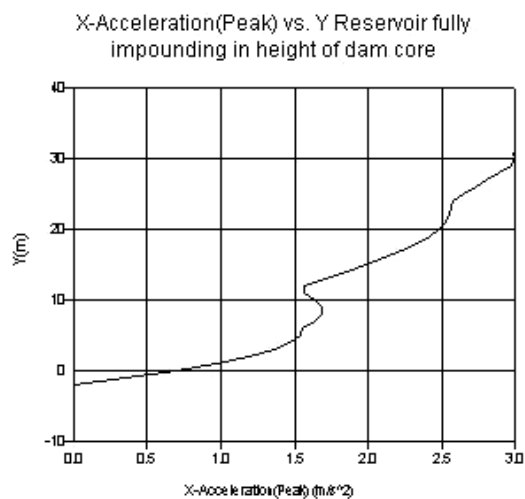
شکل ۹: مقادیر جابجایی افقی در تاج سد در مدت اثر زلزله در مرحله انتهای ساخت



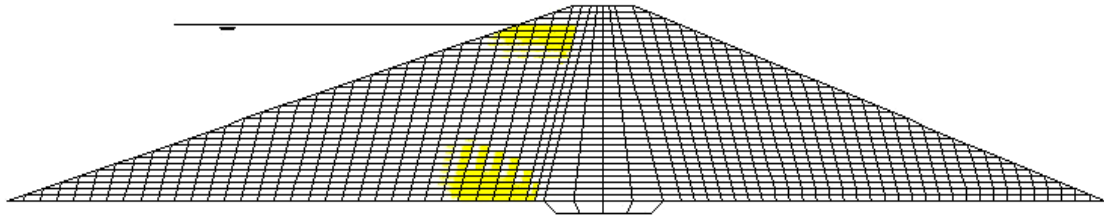
شکل ۱۱: تغییر شکل ایجاد شده در ثانیه ۲/۱۲ از مدت اثر زلزله در مرحله انتهای ساخت



شکل ۱۳: مقادیر ماکزیمم جابجایی افقی در کل نقاط سد در مدت اثر زلزله در مخزن پر



شکل ۱۲: مقادیر شتاب ماکزیمم پاسخ دینامیکی سددر نقاط واقع در ارتفاع محوری سد در مخزن پر



شکل ۱۴: نواحی محدود وقوع پدیده روانگرایی در وضعیت مخزن پر

۳- نتیجه گیری

- ۱- برپایه نتایج آنالیزهای تراوش، میزان مجازدبی خروجی از بدنه و شالوده کنترل گردیده است. و برای کاستن از میزان گرادیان خروجی (XY) برای جلوگیری از پدیده مخرب رگاب، عمق بهینه پرده آب بند ۲۸ متر تعیین شده است.
- ۲- مقادیر ضریب اطمینان سد برای وضعیت های مختلف، جهت کنترل پایداری سد، بیشتر از مقادیر توصیه شده می باشند.
- ۳- مقادیر تغییر مکان های محاسبه شده برای تمامی وضعیت های سد در تحلیل های استاتیکی و دینامیکی در حد قابل قبول می باشند.
- ۴- با ملاحظه ی تنش ها و فشارهای آب حفره ای ایجاد شده خصوصاً در حالت پایان ساخت، بدنه سد از نظر جلوگیری از پدیده های خطرناک رگاب و شکست هیدرولیکی مشکلی ندارد.
- ۵- با ملاحظه مقادیر پارامترهای مختلف در حالت تخلیه سریع (۱۵ روزه)، به علت پایین بودن نفوذپذیری پوسته سد، تغییرات بسیار کم می باشد.
- ۶- نواحی روانگرا شده در پوسته بالادست در حالت مخزن پر، محدود می باشد. جابجایی ماکزیمم ۱/۵ سانتیمتری ایجاد شده در قسمت آزاد شیب، کم می باشد، و ناحیه روانگرا شده محصور در درون بدنه سد نیز مشکلی در پایداری آن بوجود نمی آورد.

۴- مراجع

- [۱] جعفرزاده، فردین، "ارزیابی رفتار سدهای سنگریزه‌ای با هسته رسی غیراشباع در حین ساخت"، سومین همایش بین‌المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران، آذر ۱۳۸۱.
- [۲] جعفرزاده، فردین، "مقایسه نتایج تحلیل دینامیکی الاستو پلاستیک و خطی معادل یک سد سنگریز"، سومین همایش بین‌المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران، آذر ۱۳۸۱.
- [۳] مجتبی، آذری دهکردی، "آنالیز دینامیکی سازه های خاکی با اصلاح روش میرایی متغیر"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز، اسفند ۱۳۷۲.

[۴] حسن، احمدی، "روش های بررسی پایداری سدهای خاکی در شرایط زلزله"، مجموعه مقالات نخستین همایش سدخاکی، تهران، مهر ۱۳۷۶.