

ارزیابی و تحلیل تغییرشکل‌های سد گتوند علیا به هنگام وقوع زلزله

لیلا شاهوردی طرخورانی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

سید مجدالدین میرمحمدحسینی* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مهندسی عمران شریف، پاییز ۱۳۹۸
دوری ۲ - ۳۵، شماره ۱/۳، ص. ۱۱-۹۹، (پادداشت فنی)

پایش و ارزیابی رفتار سدهای خاکی - سنگریزه‌یی در تمامی دوران عمر آن‌ها، مانند: ساخت، آبگیری و بهره‌برداری و همچنین تحت شرایط لرزه‌یی از دیدگاه پیشرفت شناخت رفتار بخش‌های مختلف سد و کنترل ایمنی و پایداری آن‌ها اهمیت خاصی دارد. بدین منظور در پژوهش حاضر، پس از مدل‌سازی بزرگ‌ترین مقطع سد گتوند علیا (مقطع ۴) به صورت دوبعدی در نرم‌افزار تفاضل محدود $FLAC4.0$ و انجام تحلیل‌های برگشتی جهت تدقیق خصوصیات مصالح، با اتخاذ مدل رفتاری غیرخطی مناسب موهر-کولمب به همراه قوانین میسینگ - فین، تحلیل‌های دینامیکی جهت پیش‌بینی تغییرمکان‌های سد گتوند علیا تحت زلزله‌ی قابل انتظار (MCE) انجام شده است. بیشینه‌ی نشست حاصل از تحلیل دینامیکی با زلزله‌ی منجیل برابر 1.94 متر در ترازهای فوقانی هسته و بیشینه‌ی تغییرمکان افقی برابر 1.3 و 1.19 متر به ترتیب در شیب‌های بالادست و پایین‌دست پیش‌بینی شده است. بررسی تأثیر نوع شتاب‌نگاشت و میزان شتاب ورودی در سطوح مختلف زلزله در تغییرمکان‌ها نشان داد که مقادیر و میزان افزایش تغییرمکان‌ها به شدت به محتوای شتاب‌نگاشت و میزان شتاب ورودی بستگی دارد.

واژگان کلیدی: سد گتوند علیا، تحلیل دینامیکی، نشست، زلزله‌ی MCE،

هیستریزیس.

leila.shahverdi2011@yahoo.com
mirh53@yahoo.com

۱. مقدمه

سدهای خاکی - سنگریزه‌یی، همان‌طور که از نامشان پیداست، متشکل از خاک و سنگ هستند. مصالح خاکی و سنگی طی فرایند طبیعی تولید می‌شوند و بشر بر روی آن‌ها کنترلی ندارد. بنابراین پیش‌بینی رفتار واقعی سازه‌های متشکل از مصالح خاکی و سنگی مشکل است و این احتمال وجود دارد که در هر پروژه‌یی، شرایط غیرمنتظره پیش آید. به خصوص که پیش‌بینی رفتار مصالح مورد بحث به لحاظ ماهیت سه فازه بودن آن (جامد، آب و هوا) بسیار مشکل است. بنابراین طراحی چنین سدهایی همواره با فرضیاتی همراه است. هر چند طراحی و ساخت سدهای خاکی - سنگریزه‌یی با ابهاماتی روبروست، اما مشاهدات بصری همراه با اندازه‌گیری‌های کمی حاصل از ابزارهای مناسب می‌تواند اطلاعاتی را برای مهندسان فراهم کند، تا فرضیات طراحی را بررسی کنند و صحت آن‌ها را بسنجند و همچنین عملکرد پی و بدنه‌ی سد و ایمنی آن را طی عملیات واقعی تحقیق کنند.

بررسی رفتار سدهای خاکی - سنگریزه‌یی تحت بارهای دینامیکی، مانند زلزله نیز حائز اهمیت است. زلزله در طول تاریخ، سرمنشأ بسیاری از خرابی‌ها و تلفات انسانی قابل توجه بوده است. عمده‌ی تلفات ذکر شده در مراکز جمعیتی و به واسطه‌ی

بسیاری از مهندسان در ابتدا عقیده داشتند که سدهای خاکریز در برابر زلزله پایداری دارند، اما پس از خرابی برخی از خاکریزها و بعضی سدهای خاکریز مانند سد شفیلد^۱ در سانتا باربارا^۲ در زلزله‌ی سال ۱۹۵۰ و سد سان فرناندو^۳ در اثر زلزله‌ی شمال لس‌آنجلس (۱۹۷۱) که باعث تخلیه‌ی سریع بیش از ۸۰ هزار نفر شد، تحلیل شدند و طراحی سدهای خاکی - سنگریزه‌یی، به گونه‌یی که در برابر بارهای زلزله مقاومت کنند، جایگاه مهم‌تری در بین مهندسان طراح پیدا کرد.^[۱،۲]

بیشتر مطالعه‌های آزمایشگاهی و عددی صورت گرفته نشان داده است که به هنگام وقوع زلزله، معمولاً بیشینه‌ی نشست در تراز تاج و بیشینه‌ی تغییرمکان افقی در شیب‌های بالادست یا پایین‌دست سد اتفاق می‌افتد که در ادامه، برخی از آن‌ها به تفکیک شرح داده شده‌اند. عوامل مختلفی در مقدار تغییرمکان‌های یک

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۳/۱۷، اصلاحیه ۱۳۹۶/۷/۱، پذیرش ۱۳۹۶/۷/۲۶.

DOI:10.24200/J30.2018.1915.2044

سد به هنگام زلزله تأثیرگذارند. تحلیل دینامیکی سد خاکی کرخه توسط بهرامی (۱۳۸۵) نشان داد اگر هسته از جنس رس خالص باشد، نشست بزرگ‌تری را نسبت به هسته با رس مخلوط تجربه خواهد کرد. اما پیشینه‌ی تغییرشکل‌های افقی در پوسته‌ی بالادست و پایین دست تفاوت زیادی با هسته‌ی مخلوط ندارند و فقط الگوی آن کمی متفاوت است. کم بودن اختلاف بین تغییرشکل‌های افقی در سد با هسته‌ی خالص و مخلوط شاید ناشی از این موضوع باشد که پارامتر اصلی تأثیرگذار در تغییرشکل‌های افقی، مشخصات پوسته‌ها هستند نه مشخصات هسته. [۳] کاربر شده، [۴] با تحلیل دینامیکی سد بیدواز نشان داد که مایل بودن هسته، نشست و تغییرشکل‌های افقی بزرگ‌تری را نسبت به سد با هسته‌ی قائم نتیجه می‌دهد. همچنین با افزایش مقدار شتاب ورودی، پیشینه‌ی نشست و تغییرشکل‌های افقی نیز افزایش می‌یابد.

ابراهیمیان (۱۳۹۱) تأثیر ارتفاع سد، شتاب ورودی، مقاومت مصالح سنگریزه‌ای، و شرایط مخزن را در رفتار دینامیکی سدها بررسی کرد. تغییرشکل‌های افقی و کرنش‌های برشی با افزایش ارتفاع سد، روندی صعودی دارند، زیرا رفتار سد انعطاف پذیرتر می‌شود. افزایش شتاب ورودی نیز باعث افزایش قابل توجه جابه‌جایی‌ها و کرنش‌های برشی خواهد شد. افزایش زاویه‌ی اصطکاک مصالح سنگریزه‌ای باعث کاهش انعطاف پذیری سد و در نتیجه کاهش جابه‌جایی‌های افقی و کرنش‌های برشی تاج سد در حین زلزله می‌شود. شرایط مخزن نیز در مقدار تغییرشکل‌ها به هنگام زلزله تأثیرگذار است. هنگامی که سد به حالت تراوش پایدار برسد، جابه‌جایی‌ها و کرنش‌های برشی به وجود آمده نسبت به حالت‌های سد در پایان ساخت و پس از آبیگری افزایش می‌یابد. قابل توجه است که پارامترهای مذکور در پایان آبیگری از سد، افزایش کمتری نسبت به حالت پایان ساخت نشان می‌دهند. [۵]

توزیع نشست محاسبه شده و اندازه‌گیری شده با آزمایش سانتریفوژ برای نمونه‌ی از سدهای سنگریزه‌ای ساخته شده در کره نشان داده است که مقدار نشست به هنگام زلزله با حرکت به سمت تاج افزایش می‌یابد، در نتیجه مقاومت در برابر حرکت ذرات خاک کاهش می‌یابد و ذرات آزادانه‌تر حرکت خواهند کرد. بنابراین روند تغییر شتاب بدنه‌ی سد با حرکت به سمت تاج مشابه روند نشست‌ها افزایشی است و تاج سد بیشترین شتاب را تجربه خواهد کرد. [۶]

تحلیل دینامیکی سد خاکی لنتینی^۴ تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی سنت لوسیا^۵، با برنامه‌های EERA و MATRA و نرم‌افزار المان محدود Plaxis، حاکی از افزایش شتاب بدنه‌ی سد با حرکت به سمت تاج است. [۷] نتایج تحلیل دینامیکی سد خاکی سن پیرتو^۶ تحت موج‌های ورودی در حالت‌های CLS^۷ و LLS^۸ با نرم‌افزار Flac2D نشان داده است که پوسته‌ی بالادست سد و تاج سد به ترتیب پیشینه‌ی تغییرشکل افقی و نشست را تجربه می‌کنند. [۸] مدل‌سازی دو عدد از بلندترین سدهای سنگریزه‌ای واقع در چین با میززلزله‌ی بزرگ مقیاس و آزمایش آن تحت زلزله با بزرگی‌های مختلف نشان داده است که آبیگری مخزن، پارامترهای دینامیکی سد سنگریزه‌ای را نسبت به سد سنگریزه‌ای با رویه‌ی بتنی بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهد و تاج سد سنگریزه‌ای، پیشینه‌ی شتاب را تجربه می‌کند. تغییرشکل ماندگار هر دو سد بسیار کوچک است و تحت زلزله‌های شدید تغییرشکل سد CFRD بسیار کوچک‌تر از سد سنگریزه‌ای است. [۹] تحلیل دینامیکی سد وایله^۹ تحت زلزله‌ی ون‌چوان^{۱۰} نشان داده است که بیشترین نشست در قسمتی از تاج به سمت پوسته‌ی پایین دست اتفاق افتاده و روند نشست با گذشت زمان، افزایشی بوده است. همچنین نتایج تحلیل دینامیکی سد وایله با نتایج واقعی حاصل از پایش آن در طول زلزله‌ی ون‌چوان مطابقت دارد. [۱۰]

برخلاف تحلیل‌های استاتیکی سدهای خاکی که امری کلاسیک و با روش‌هایی

کاملاً معمول قابل انجام و به صورت راهکارهای کلاسیک و متداول توسط مهندسان مشاور انجام می‌شود، تحلیل دینامیکی سدهای خاکی با چالش و ابهامات زیادی مواجه است و هنوز یک کار متداول و مشخص در عرف مهندسی نیست. از طرفی با توجه به دغدغه‌های موجود در خصوص رفتار لرزه‌ی سدهای خاکی - سنگریزه‌ی در هنگام رخداد زلزله‌ی طرح و عدم انجام کامل آزمایش‌های دینامیکی روی مصالح مختلف بدنه از یک سو و نیز ماهیت تصادفی و احتمالاتی زلزله‌های طراحی، مدل‌های رفتاری متنوع و مختلف مصالح خاکی و سنگی و نیز شرایط پیچیده‌ی مرزی و هندسی ساختگاهی، تصمیم‌گیری در خصوص نوع و نحوه‌ی تحلیل دینامیکی نیاز به مطالعه و بررسی‌های مختلف و قضاوت‌های گسترده‌ی دارد که در خصوص هر سد متفاوت از دیگری است و ارزش پژوهشی خاص خود را خواهد داشت. سد گتوند علیا نیز با توجه به اهمیت و ابعاد و ویژگی‌های ساختگاهی آن یکی از موارد مذکور است.

بدین منظور در پژوهش حاضر، یکی از بزرگ‌ترین سدهای سنگریزه‌ی ایران، سد گتوند علیا، به عنوان مطالعه‌ی موردی انتخاب شده و با مدل‌سازی بزرگ‌ترین مقطع آن (مقطع ۴) به صورت دوبعدی در نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC^{۴/۰} و انجام تحلیل‌های برگشتی و مقایسه‌ی نتایج حاصل با اطلاعات صحیح ابزار، خصوصیات مصالح تدقیق شده‌اند. سپس با اتخاذ مدل رفتاری غیرخطی موهر - کولمب به همراه قوانین میسینگ - فین که می‌تواند رفتار غیرخطی و هیستریزی مصالح خاکی و سنگریزه‌ی را طی بارگذاری زلزله شبیه‌سازی کند، تحلیل‌های دینامیکی جهت پیش‌بینی تغییرشکل‌های سد گتوند علیا به هنگام زلزله در سطح زلزله‌ی پیشینه‌ی قابل انتظار (MCE) انجام گرفته و تأثیر پیشینه‌ی شتاب ورودی و محتوای شتاب‌نگاشت در تغییرشکل‌ها در سطوح زلزله‌ی مبنا‌ی طراحی (DBE)^{۱۱}، زلزله‌ی پیشینه‌ی طراحی (MDE)^{۱۲} و زلزله‌ی پیشینه‌ی قابل انتظار (MCE)^{۱۳} بررسی شده است.

۲. معرفی سد گتوند علیا

۲.۱. موقعیت و اهداف سد گتوند علیا

سد گتوند علیا، یکی از بزرگ‌ترین سدهای ایران، دومین مخزن آبی ایران (پس از کرخه) و بزرگ‌ترین مخزن آبی بر رودخانه‌ی کارون است. موقعیت سد واقع بر غرب طول جغرافیایی ۱۸° ۵۶' ۱۰" و شمال طول جغرافیایی ۳۲° ۱۶' ۸" بین سد مسجدسلیمان و سد تنظیمی گتوند علیا در مهار ۳۸۲/۸ از مصب رودخانه‌ی کارون و در ۲۵ کیلومتری شمال شهر شوشتر است. اهداف پروژه شامل این موارد است:

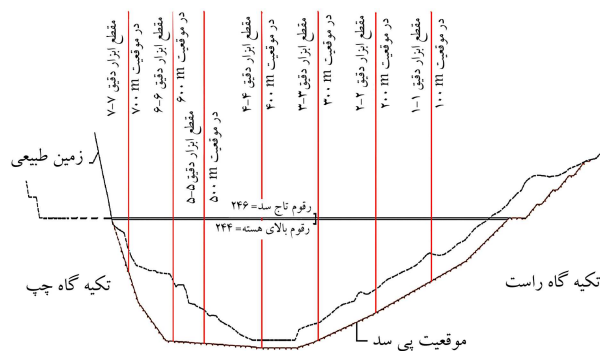
- کنترل سیلاب‌های فصلی و دبی جریان^{۱۵} سدهای بالادست،
- تولید انرژی برق سالیانه بالغ بر ۴۲۵۰ گیگاوات - ساعت. [۱۱]

۲.۲. شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی پی و تکیه‌گاه‌ها

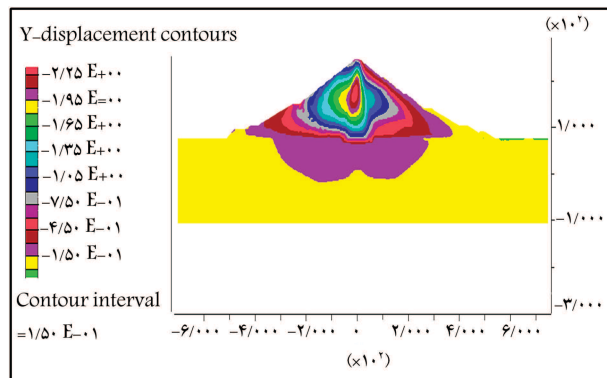
توده‌سنگ‌ها در محل سد، شامل رسوب‌های سازند آغاچاری همراه با سنگ رس، لای‌سنگ و ماسه‌سنگ خوابیده در میان چینه‌ها (AJn) و روی هم قرارگرفته توسط کنگلومرای سازند بختیاری (BKnn) است. [۱۱]

۳.۲. خصوصیات کلی سد گتوند علیا

ارتفاع پیشینه‌ی سد در مرکز دره، ۱۸۰ متر است. سد به صورت ناحیه‌بندی شده با یک هسته‌ی رسی قائم است. بستر رودخانه حدوداً در تراز ۶۶ متر



شکل ۱. پروفیل طولی سد گتوند علیا و موقعیت مقاطع اصلی سد. [۱۴]



شکل ۲. طرح ایده آل سازی شده ی مقطع ۴ در نرم افزار FLAC. [۱۴]

۴. پارامترهای رفتاری مصالح در تحلیل استاتیکی

براساس پژوهش های انجام شده مشخص شده است که دقت مدل سازی های عددی تا حد زیادی به مدل رفتاری مورد استفاده و انتخاب مقادیر مناسب برای پارامترهای مدل بستگی دارد. [۱۵] با توجه به طبیعت غیرخطی مصالح ژئومکانیک به ویژه خاک، لازم است مدل رفتاری غیرخطی مناسبی در تحلیل ها استفاده شود.

مدل موهر - کولمب، مدلی است غیرخطی، نیرومند و ساده که می تواند برای محاسبه ی بارهای نهایی واقعی و همچنین تعیین ضریب اطمینان استفاده شود. [۱۶] قانون جریان مدل موهر - کولمب در برش، غیرهمراه و در کشش، همراه است.

مدل سخت کرنشی - نرم کرنشی بر پایه ی مدل موهر - کولمب با قانون جریان برش غیرهمراه و قانون کشش همراه است. در مدل مذکور، این امکان وجود دارد که چسبندگی، زاویه ی اصطکاک، زاویه ی اتساع و مقاومت کششی پس از تسلیم و شروع کرنش های خمیری، سخت تر یا نرم تر شوند، [۱۴] که این امر با واقعیات رفتاری مصالح مورد استفاده در بدنه ی سد گتوند علیا انطباق بیشتری دارد. از این رو مدل های رفتاری موهر - کولمب و سخت کرنشی - نرم کرنشی به ترتیب جهت شبیه سازی رفتار مصالح پی و بدنه ی سد انتخاب شده اند. [۱۴]

۱.۴. مصالح پی

مدل رفتاری کشسان خمیری موهر - کولمب جهت شبیه سازی رفتار مصالح پی در نظر گرفته شده است. پارامترهای مورد نیاز در مدل رفتاری ذکر شده، مدول ارتجاعی، ضریب پواسون، زاویه ی اصطکاک داخلی و چسبندگی هستند. در جدول ۱، پارامترهای مورد نیاز برای تحلیل پی ارائه شده است. [۱۷]

از سطح دریا قرار دارد و تراز تاج سد ۲۴۶ متر و طول آن حدود ۷۰۰ متر است. فرازبند نیز به ارتفاع ۸۰ متر و تراز تاج ۱۵۰ متر از سطح دریا در بدنه ی سد تعبیه شده است. نواحی مختلف سد، شامل: هسته ی رسی مخلوط، رس تماسی، فیلترها و لایه های انتقالی بالادست و پایین دست هسته، بتوی زهکش پایین دست، پوسته های سنگریزه یی بالادست و پایین دست (۳C، ۳B، ۳A) است. تفاوت نواحی ۳C، ۳B، ۳A در دانه بندی و مقادیر ریزدانه ی آن هاست. [۱۸]

۴.۲. ابزار دقیق به کار رفته در سد گتوند علیا

در بدنه ی سد گتوند علیا، ۷ مقطع اصلی ابزار دقیق به همراه ۱۱ مقطع فرعی طراحی شده است. هر یک از مقاطع مذکور، خود شامل مجموعه یی از ابزارها، نظیر: پیزومترهای پی و خاک، پیزومترهای پنوماتیکی و لوله ی ایستا، سلول های اندازه گیری فشار، انحراف سنج و نشست سنج ها، اکستنسومترهای خاک و نقاط نقشه برداری هستند که با فواصل معینی از محور بدنه ی سد نصب شده اند. [۱۲]

۳. معرفی نرم افزار و مدل سازی عددی

مدل سازی عددی یکی از روش های مطالعه ی رفتار سازه های مختلف در مهندسی عمران است. به مرور زمان با توسعه ی روش های عددی و رایانه های با قدرت پردازش بالا، مدل سازی جایگاه واقعی خود را پیدا کرده است و نتایج حاصل از تحلیل عددی و ابزار دقیق می توانند با هم مقایسه شوند و برای اعتبارسنجی یکدیگر به کار روند. واژه ی FLAC ۱۶ به معنی تحلیل سریع لاگرانژی محیط پیوسته است. این برنامه یک برنامه ی تفاضل محدود صریح بر پایه ی تحلیل لاگرانژی برای انجام محاسبات مهندسی است. FLAC رفتار سازه های خاکی، سنگی و یا سایر مصالحی که پس از رسیدن به حد تسلیم، جریان خمیری را تحمل می کنند، مدل سازی می کند. پس از ساخت شبکه و تغییر و تنظیم آن به منظور دستیابی به شکل پروژه ی مورد نظر، خصوصیات مصالح به المان ها یا نواحی آن اختصاص داده می شود. هر المان یا ناحیه طبق قانون تنش - کرنش تعریف شده برای آن رفتار می کند. مصالح امکان رسیدن به حد تسلیم و جاری شدن را دارند و شبکه می تواند در حالت کرنش های بزرگ تغییر شکل دهد و با مصالح معرفشان حرکت کند. همچنین با استفاده از زبان برنامه نویسی Fish کاربر قادر است توابع و مدل های رفتاری دلخواه را در نرم افزار معرفی کند و امکان تحلیل مناسب برای مسائل خاص و دلخواه وجود دارد. [۱۳]

در پژوهش حاضر، مقطع ۴ سد گتوند علیا که بیشترین تراز خاکریزی را دارد (شکل ۱)، به صورت دوبعدی در نرم افزار FLAC ۴/۰ مدل سازی و در شرایط استاتیکی (ساخت و آبیگری) تحلیل و خصوصیات مصالح تدقیق شده اند. با توجه به اینکه زمان وقوع زلزله مشخص نیست و با گذر زمان، سد به حالت تراوش پایدار می رسد، این حالت در پژوهش، مدل سازی و دست کم در یک زمان ۵ ساله به مدل فرصت داده شده است تا چنین شرایطی در سد حاکم شود، سپس با اتخاذ مدل رفتاری غیرخطی مناسب موهر - کولمب به همراه قوانین میسینگ - فین، جهت شبیه سازی رفتار غیرخطی و هیستریزیسی مصالح خاکی و سنگریزه یی طی بارگذاری سیکلی، تحلیل های دینامیکی جهت پیش بینی رفتار سد گتوند علیا به هنگام زلزله انجام شده است. در شکل ۲، طرح ایده آل سازی شده ی مقطع ۴ جهت تحلیل مشاهده می شود. [۱۴]

جدول ۱. پارامترهای رفتاری مصالح پی. [۱۷]

ناحیه	γ (gr/cm^3)	E (GPa)	v	c (KPa)	φ (deg)	k (cm/s)
آغاجاری	۲٫۴	۲٫۰	۰٫۲۵	۲۱۰	۲۶	5×10^{-8}
بختیاری نابرجا	۲٫۴	۲٫۶	۰٫۲۵	۳۹۰	۴۰	10^{-2}

جدول ۲. پارامترهای رفتاری مصالح بدنه‌ی سد. [۱۸ و ۱۴]

ناحیه	γ (gr/cm^3)	E	v	c' (KPa)	φ' (deg)	ψ' (deg)	k (cm/s)
هسته	۱٫۹	$82 Pat (\frac{\sigma_r}{Pat})^{0.87}$	۰٫۳	۲۰	۲۶	-	10^{-7}
رس تماسی	۱٫۹	$70 Pat (\frac{\sigma_r}{Pat})^{0.8}$	۰٫۳	۲۰	۲۶	-	10^{-7}
پوسته ۳A, ۳B	۲٫۱۵	$1400 Pat (\frac{\sigma_r}{Pat})^{0.2}$	۰٫۱	۱۰	۴۳	$18 / (\frac{\sigma_r}{Pat})^{0.5}$	10^{-3}
پوسته ۳C	۲	$250 Pat (\frac{\sigma_r}{Pat})^{0.6}$	۰٫۲۵	۰	۳۵	-	10^{-2}
فیلاتر	۲	$150 Pat (\frac{\sigma_r}{Pat})^{0.7}$	۰٫۲۵	۰	۳۰	-	10^{-2}
لایه‌ی انتقالی و زهکش	۲	$200 Pat (\frac{\sigma_r}{Pat})^{0.7}$	۰٫۲۵	۰	۳۵	-	10^{-1}

هستند. شایان ذکر است تمامی وابستگی‌های یاد شده با نوشتن برنامه‌ی کمکی (Fish) در نرم‌افزار FLAC، امکان‌پذیر شده است. [۱۴]

۲.۴. مصالح بدنه سد

در مدل سخت کرنشی - نرم کرنشی استفاده شده در پژوهش حاضر، زاویه‌ی اصطکاک مصالح با افزایش کرنش خمیری، سخت‌تر شده است. با توجه به نتایج آزمایش‌های ژئوتکنیکی، مدول کشسانی مصالح بدنه‌ی سد تابعی از فشار محدودکننده است. در نواحی سنگریزه‌یی علاوه بر مدول کشسانی، زاویه‌ی اتساع نیز به مقدار فشار محدودکننده بستگی دارد. در جدول ۲، مشخصات مصالح بدنه‌ی سد ارائه شده است، [۱۸ و ۱۹] که در روابط ارائه شده در آن، $P_{at\tau_c}$ و $\gamma_c \sigma_m$ به ترتیب فشار اتسفر و فشار همه‌جانبه یا محدودکننده هستند.

جهت تخمینی صحیح از فشار آب حفره‌یی طی ساخت، مدول بالک آب به متوسط تنش المان وابسته شده است. در صورتی‌که درجه‌ی اشباع در مقدار ۱ ثابت شود، با تغییر در مدول بالک آب می‌توان اثر غیراشباع بودن محیط را شبیه‌سازی کرد. [۱۸ و ۱۹] توابع استفاده شده برای مدول بالک رس تماسی و نواحی دیگر هسته به ترتیب مطابق روابط ۱ و ۲ هستند:

$$K_w = Pat(\gamma_r + 22.5(\sigma_m/Pat)) \quad (1)$$

$$K_w = Pat(1.7 + 6.7(\sigma_m/Pat)) \quad (2)$$

که در آن‌ها، $P_{at\tau_c}$ و $\gamma_c \sigma_m$ به ترتیب فشار اتسفر و متوسط تنش المان هستند. پدیده‌ی رمیش اشباع به هنگام آبگیری با اعمال ضریب آزادسازی تنش (رابطه‌ی ۳) به المان‌های اشباع به آب، کاهش زاویه‌ی اصطکاک و استفاده از توابع جدید برای مدول کشسانی (رابطه‌ی ۴) و زاویه‌ی اتساع مصالح سنگریزه‌یی پوسته‌ی بالادست (رابطه‌ی ۵) شبیه‌سازی شده است. [۱۷]

$$C_{sr} = 0.1 \left(\frac{\sigma_r}{Pat} \right)^{0.54} \quad (3)$$

$$E = 450 Pat \left(\frac{\sigma_r}{Pat} \right)^{0.6} \quad (4)$$

$$\psi = 18 / \left(\frac{\sigma_r}{Pat} \right)^{0.5} \quad (5)$$

که در آن‌ها، C_{sr} ضریب آزادسازی تنش، σ_r تنش همه‌جانبه و $P_{at\tau_c}$ فشار اتسفر

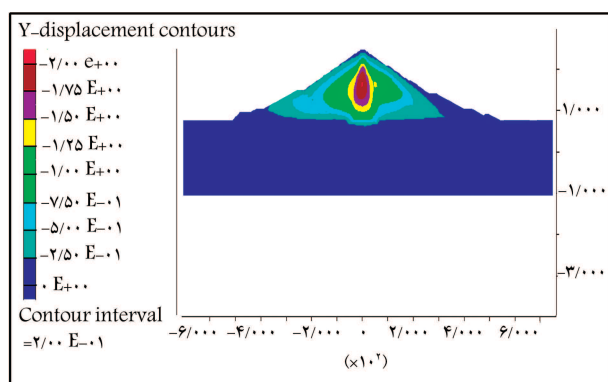
۵. نتایج تحلیل‌های استاتیکی

۱.۵. نشست

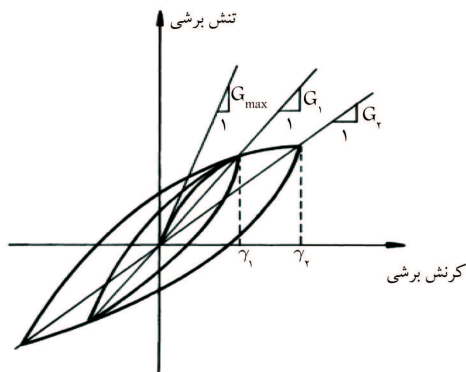
در شکل ۳، توزیع نشست حاصل از تحلیل عددی برگشتی در پایان ساخت مشاهده می‌شود، که مطابق آن به دلیل ساخت لایه‌لایه و اجازه‌ی نشست به مصالح در هر مرحله از خاکریزی، بیشینه‌ی نشست با مقدار $1.5/20$ سانتی‌متر در تراز 159.24 متر، کمی بالاتر از تراز میانی سد (152.85 متر) واقع شده است. با توجه به شکل ۴، نشست‌ها در پایان آبگیری نسبت به پایان ساخت افزایش پیدا کرده و موقعیت نشست بیشینه به ترازهای بالاتر منتقل شده است. بیشینه‌ی نشست برابر 240 سانتی‌متر واقع در تراز 173.4 متر است. [۱۴]

۲.۵. تغییرمکان افقی

شکل‌های ۵ و ۶، توزیع تغییرمکان‌های افقی را به ترتیب در پایان ساخت و پایان



شکل ۳. توزیع نشست سد در پایان ساخت. [۱۴]



شکل ۷. نمایش رفتار مصالح خاکی و سنگریزه‌یی تحت بارگذاری سیکلی متقارن. [۲۲]

تقریباً همانند الگوی حاضر برای نشست و تغییر مکان افقی بدنه‌ی سد ارائه شده است. [۲۰]

۶. رفتار مصالح خاکی - سنگریزه‌یی تحت بارگذاری

سیکلی

رفتار واقعی مصالح خاکی و سنگریزه‌یی تحت بارگذاری سیکلی غیرخطی و هیستریزیس است. هنگامی که مصالح خاکی و سنگریزه‌یی تحت بارگذاری سیکلی متقارن قرار می‌گیرند، حلقه‌های هیستریزیس^{۱۷} (مشابه شکل ۷) را به نمایش می‌گذارند. با تغییر دامنه‌ی کرنش، حلقه‌هایی با اندازه‌های مختلف تشکیل خواهد شد. [۲۶-۲۱] مهم‌ترین مشخصه‌های حلقه‌ی هیستریزیس، شیب و مساحت حلقه هستند. شیب حلقه به سختی خاک وابسته است که در هر نقطه طی بارگذاری با مدول برشی تانژانت (G_{tan}) بیان می‌شود. به دلیل تغییر G_{tan} در یک چرخه‌ی بارگذاری، یک مقدار میانگین به نام مدول برشی سکانت (رابطه‌ی ۶) برای آن در نظر گرفته می‌شود:

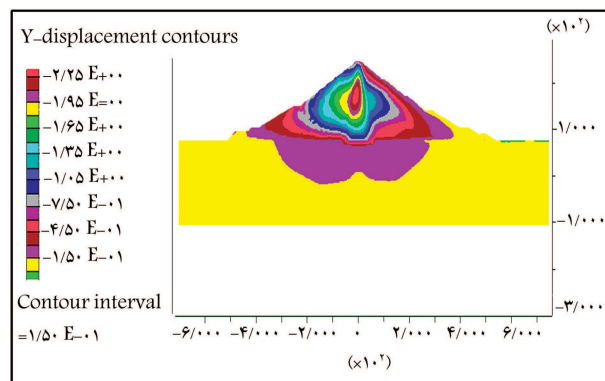
$$G_{sec} = \frac{\tau_c}{\gamma_c} \quad (6)$$

که در آن، τ_c و γ_c به ترتیب تنش برشی و کرنش برشی هستند. مساحت حلقه‌ی هیستریزیس مربوط به انرژی اتلاف شده است که با نسبت میرایی بیان می‌شود (رابطه‌ی ۷):

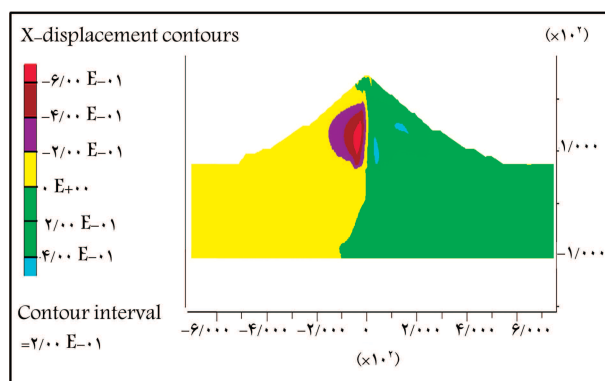
$$\xi = \frac{W_D}{4\pi W_S} = \frac{1}{2\pi} \frac{A_{loop}}{G_{sec} \gamma_c^2} \quad (7)$$

که در آن، W_D انرژی اتلاف شده، W_S انرژی کرنشی بیشینه و A_{loop} مساحت حلقه‌ی هیستریزیس هستند. [۲۳ و ۲۱]

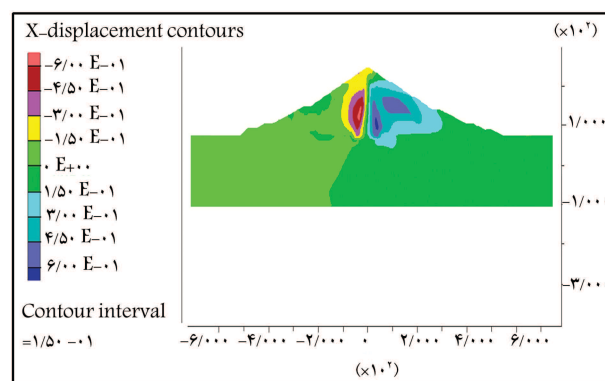
در روش غیرخطی، مسیر تنش - کرنش غیرخطی به صورت مستقیم توسط هر المان دنبال می‌شود. مدول برشی و نسبت میرایی مصالح به طور خودکار در سطوح کرنش مختلف محاسبه می‌شوند. علاوه بر در نظر گرفتن یک مدل غیرخطی مانند موهر - کولمب برای مصالح جهت تحلیل دینامیکی، می‌توان از قوانین میسینگ^{۱۸} (۱۹۲۶) و فین (۱۹۷۷) نیز استفاده کرد. این قوانین قابلیت بهتری را در شبیه‌سازی رفتار هیستریزیسی مصالح خاکی و سنگریزه‌یی تحت بارگذاری دینامیکی دارند. [۲۷]



شکل ۴. توزیع نشست در پایان آبگیری. [۱۴]



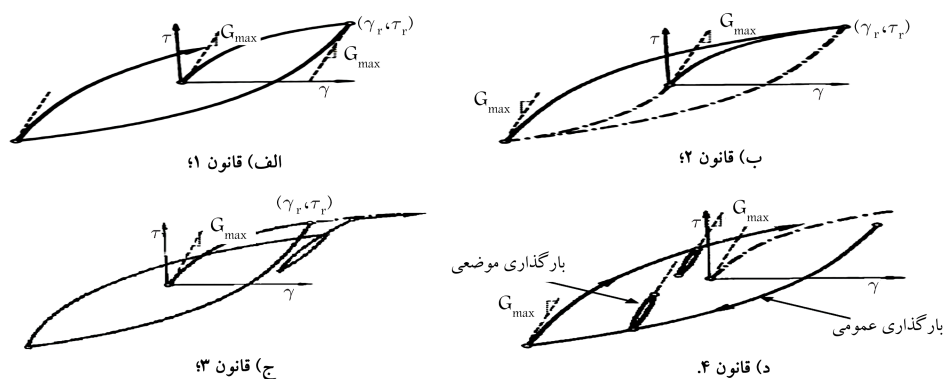
شکل ۵. توزیع جابه‌جایی افقی سد در پایان ساخت. [۱۴]



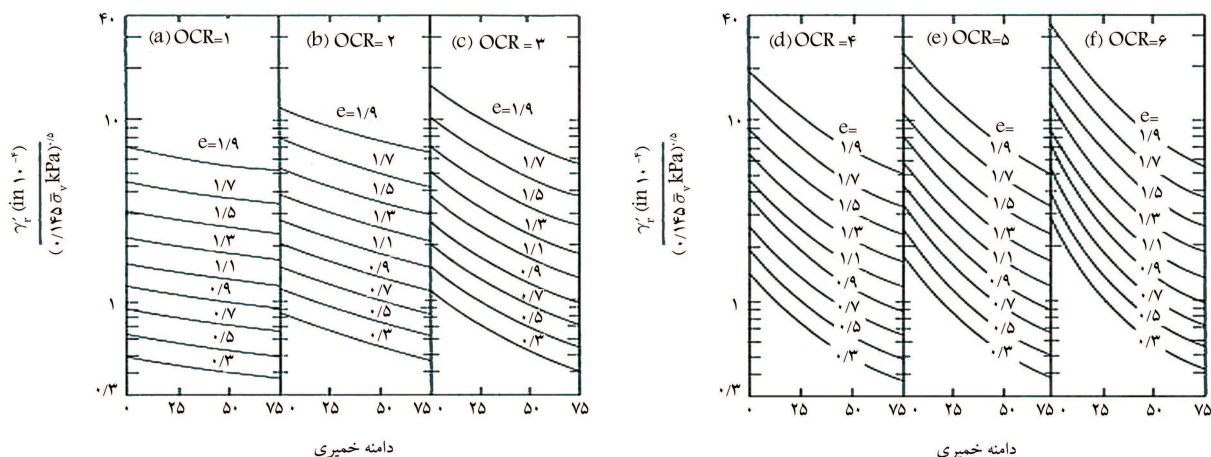
شکل ۶. توزیع تغییر مکان افقی سد در پایان آبگیری. [۱۴]

آبگیری ۲۴۶ متر (پایان ساخت) نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، تغییر شکل‌های افقی سد به هنگام ساخت، بیشتر به سمت بالادست است و این عدم تقارن موجود را می‌توان بیشتر به تفاوت در جنس مصالح نسبت داد. بیشینه‌ی تغییر مکان افقی حاصل از تحلیل برگشتی در پایان ساخت، برابر ۱۲/۸ سانتی‌متر به سمت بالادست سد است.

با توجه به شکل ۶، با ادامه‌ی آبگیری تا تراز نرمال (۲۳۰ متر)، تغییر شکل‌های افقی باز توزیع شده، نیمه‌ی فوقانی سد به سمت بالادست و نیمه‌ی تحتانی آن به سمت پایین دست جابه‌جا می‌شود. بیشینه‌ی تغییر مکان افقی محور سد به سمت بالادست برابر ۲۲/۶ سانتی‌متر و به سمت پایین دست برابر ۲۰/۱ سانتی‌متر است. [۱۴] شایان ذکر است نتایج تحلیل استاتیکی سد گتوند علیا توسط اسدی فرد



شکل ۸. قوانین رفتار دینامیکی مصالح خاکی و سنگریزه‌یی. [۲۷]



شکل ۹. کرنش مرجع در شرایط تنش استاتیکی. [۲۸]

۱.۶. قوانین میسینگ

بر اساس قوانین میسینگ، رفتار برشی خاک توسط منحنی اصلی^{۱۹} با رابطه‌ی ۸ بیان می‌شود:

$$F_{bb}(\gamma) = \frac{G_{max}\gamma}{1 + (G_{max}/\tau_{max})|\gamma|} \quad (8)$$

که در آن، $F_{bb}(\gamma)$ تابع منحنی اصلی، (γ) دامنه‌ی کرنش برشی، G_{max} مدول برشی بیشینه و τ_{max} تنش برشی بیشینه هستند. این منحنی بیانگر مسیر اولین بارگذاری است که در شکل ۸ الف مشاهده می‌شود. حال برای توصیف مسیر باربرداری - بارگذاری مجدد، رابطه‌ی ۸، باید اصلاح شود. اگر برگشت بار در نقطه‌ی (τ_r, γ_r) رخ دهد، منحنی تنش کرنش مسیری طبق رابطه‌ی ۹ را دنبال خواهد کرد (شکل ۸ ب).

$$\frac{\tau - \tau_r}{\tau} = F_{bb} \left[\frac{\gamma - \gamma_r}{\tau} \right] \quad (9)$$

که در آن، $F_{bb}(\gamma)$ تابع منحنی اصلی، τ تنش برشی، τ_r تنش برشی در نقطه‌ی برگشت بار، γ دامنه‌ی کرنش برشی و γ_r کرنش برشی در نقطه‌ی برگشت بار است. به عبارت دیگر، شکل منحنی باربرداری - بارگذاری مجدد شبیه منحنی اصلی با مبدائی خواهد بود که به سمت نقطه‌ی برگشت بار جابه‌جا شده است، لیکن با ضریب ۲ بزرگ‌تر شده است. [۲۷] مقدار γ_r وابسته به پارامترهای پوکی (e) ، تنش مؤثر قائم $(\bar{\sigma}_v)$ و شاخص خمیری خاک است که با استفاده از نمودارهای شکل ۹ قابل محاسبه است. [۲۸، ۱۶]

۲.۶. قوانین فین

قوانین میسینگ به طور جامع، پاسخ خاک را تحت بارگذاری سیکلی عمومی توصیف نمی‌کنند. فین و همکاران (۱۹۷۷)، قوانینی را برای توصیف بارگذاری نامنظم ارائه و قوانین میسینگ را کامل کردند. آنها پیشنهاد کردند که منحنی باربرداری - بارگذاری مجدد مصالح از این دو قانون پیروی می‌کند: اگر منحنی باربرداری - بارگذاری مجدد از آخرین کرنش بیشینه تجاوز کند و منحنی اصلی را قطع کند، آنگاه تا برگشت بعدی تنش، منحنی اصلی دنبال خواهد شد (شکل ۸ ج). اگر منحنی باربرداری - بارگذاری مجدد از منحنی باربرداری - بارگذاری قبلی عبور کند، منحنی تنش - کرنش منحنی سیکلی قبلی را دنبال خواهد کرد (شکل ۸ د). براساس قوانین ذکر شده، مدول برشی مماسی در هر نقطه روی منحنی اصلی و منحنی باربرداری - بارگذاری مجدد به ترتیب با روابط ۱۰ و ۱۱ بیان خواهد شد. [۲۷]

قوانین میسینگ - فین توسط برخی پژوهشگران مانند نصرالهی، پشنگ‌پیشه و ابراهیمیان ارزیابی و استفاده شده است. [۲۹، ۲۷، ۱۶]

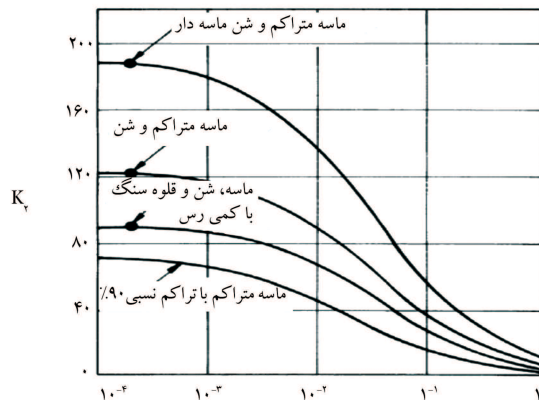
$$G_t = \frac{G_{max}}{\left[1 + \frac{G_{max}|\gamma|}{\tau_{max}}\right]^2} \quad (10)$$

$$G_t = \frac{G_{max}}{\left[1 + \frac{G_{max}}{\tau_{max}}|\gamma - \gamma_r|\right]^2} \quad (11)$$

که در آن، G_t مدول برشی مماسی، γ دامنه‌ی کرنش برشی، γ_r کرنش برشی در

جدول ۳. مقادیر $K_{\tau \max}$ مصالح با توجه به نسبت تخلخل و چگالی نسبی. [۲۱]

مصالح	K_{τ}
ماسه ی شل	۳۵
ماسه ی متراکم	۵۰
ماسه ی بسیار متراکم	۶۵
ماسه و شن بسیار متراکم	۱۰۰-۱۵۰
سنگریزه ی متراکم	۱۵۰-۲۰۰



شکل ۱۱. مقادیر K_{τ} در خاک های شنی (after Seed and Idriss, ۱۹۷۰) [۲۲]

G_{\max} در پی بر طبق رابطه ی ۱۲ تعیین می شود:

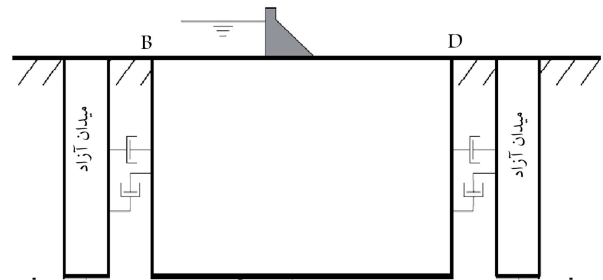
$$G_{\max} = \rho V_s^2 = 2.7 \times 10^4 (Pa) \quad (12)$$

که در آن، G_{\max} مدول برشی بیشینه، V_s سرعت موج برشی و ρ چگالی جرمی خاک است. نظر به اینکه آزمایش های دینامیکی جامع و کاملی که در ارتباط با تعیین خواص دینامیکی مصالح کلیه ی بخش های سد مورد نیاز است، انجام نشده و داده های آزمایشگاهی در این زمینه بسیار محدود بوده است، از اطلاعات آزمایشگاهی موجود در مراجع مختلف و همچنین سدهای مطالعه شده، جهت تخمین پارامترهای دینامیکی مورد نیاز استفاده شده است. سدهای کرخه و مатаهینا ۲۰ جهت تخمین $k_{\tau \max}$ هسته و سدهای رودبار لریستان و سیاه بیشه نیز جهت تخمین $k_{\tau \max}$ نواحی دیگر سد به کار رفته اند. [۳۱، ۳۲]

مقادیر G_{\max} مصالح بدنه ی سد گتوند علیا به این ترتیب تعیین شده است: هسته ی سد گتوند علیا مخلوطی از رس با درصد بالایی از مصالح دانه یی (حدود ۴۰٪ درشت دانه) است. به همین دلیل استفاده از رابطه ی تجربی مربوط به مصالح درشت دانه جهت تخمین G_{\max} ، نتایج مطلوب تری خواهد داد. از این رو برای محاسبه ی G_{\max} مصالح هسته از رابطه ی ۱۳ استفاده شد. [۳۳، ۳۴] با استفاده از نتایج مطالعات پارامتریک آزمایشگاهی انجام شده روی مصالح هسته ی سد کرخه، با همین نسبت از مصالح ریزدانه و درشت دانه، پارامتر $k_{\tau \max}$ برای مصالح هسته ی سد گتوند علیا نیز برابر ۴۰ تعیین شد. همچنین در پژوهش مشابهی که بر روی سد ماتاهاینا انجام شده بود، مقدار ۴۰ برای مصالح هسته ی رسی مخلوط به دست آمده است. [۱۶]

$$G_{\max} = 21.7 P_{at} K_{\tau \max} \left(\sigma'_m / P_{at} \right)^{0.5} (kPa) \quad (13)$$

که در آن، G_{\max} مدول برشی بیشینه، V_s سرعت موج برشی و ρ فشار اتمسفر هستند. همچنین $K_{\tau \max}$ ضریبی مربوط به مصالح است که به چگالی نسبی و تنش مؤثر میانگین بستگی دارد. [۳۲] با توجه به جدول ۳ و شکل ۱۱، مقدار $K_{\tau \max}$



شکل ۱۰. استفاده از مرزهای منطقه ی آزاد در مرزهای جانبی مدل. [۳۰]

نقطه ی برگشت بار، G_{\max} مدول برشی بیشینه و τ_{\max} تنش برشی بیشینه است. در بسیاری از مطالعات انجام شده، تحلیل دینامیکی غیرخطی نشان داده است که شکل پذیری مصالح (رسیدن به حالت خمیری) باید در ارزیابی پاسخ لرزه یی سدهای خاکی - سنگریزه یی در نظر گرفته شود. زیرا عامل شکل پذیری مصالح باعث کاهش شتاب در تاج سد، افزایش جابه جایی ها، و کرنش های برشی در بدنه ی سد و همچنین افزایش اتلاف انرژی خواهد شد که همه ی موارد ذکر شده می توانند به طور قابل توجه در پاسخ تحلیل لرزه یی سازه ها تأثیر بگذارد. [۳۷]

۷. شرایط مرزی

در تحلیل های دینامیکی، مرزهای گیردار موجب انعکاس امواج ارتعاشی می شوند و استهلاک انرژی مانند آنچه که در حالت واقعی رخ می دهد، اتفاق نمی افتد و مسئله را با خطا مواجه می کند (در حالت واقعی موج های مذکور از مرز سیستم عبور می کنند). بهترین روش برای جلوگیری از انعکاس ناخوشایند امواج به داخل مدل، استفاده از مرزهای آرام و جذب کننده ی انرژی است. بهترین حالت استفاده از مرزهای آرام زمانی است که منبع انرژی دینامیکی در داخل شبکه ی مش بندی شده باشد. اما هنگامی که منبع انرژی دینامیکی از قسمت تحتانی یا فوقانی محیط اعمال می شود، مرزهای جانبی نباید با استفاده از مرزهای آرام میرا شوند، به این دلیل که انرژی امواج از قسمت جانبی نشت پیدا می کند و هدر می رود. در این حالت برای مرزهای جانبی باید از مرزهای منطقه ی آزاد استفاده کرد. [۳۰] همانند شکل ۱۰، در تحلیل دینامیکی سد گتوند علیا، از مرزهای آزاد برای قسمت های جانبی پی استفاده شده است و چون بارگذاری زلزله از طریق شتاب است، نیازی به مرز آرام در قسمت زیرین پی نیست. [۳۴]

۸. پارامترهای رفتاری سد گتوند علیا جهت تحلیل

دینامیکی

۱.۸. تعیین G_{\max} مصالح

با توجه به در دسترس نبودن اطلاعات صحرایی انجام شده در منطقه و مشابهت های موجود، از اطلاعات مربوط به پی سد کرخه جهت تعیین پارامترهای دینامیکی پی سد گتوند علیا استفاده شد. این فرض با توجه به اینکه ساختگاه هر دو سد نزدیک به هم و شامل کنگلومرای بختیاری است، تقریباً قابل قبول است.

با توجه به اطلاعات زمین شناسی، خاک پروژه از نوع تیپ I ($V > 75 \text{ m/s}$) است، و سرعت موج برشی برابر ۱ کیلومتر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. پارامتر

که در آن‌ها، G_t مدول برشی مماسی، γ دامنه‌ی کرنش برشی، γ_r کرنش برشی در نقطه‌ی برگشت بار، G_{max} مدول برشی بیشینه، τ_{max} تنش برشی بیشینه و ν ضریب پواسون مصالح هستند.

۲.۸. تعیین نسبت میرایی مصالح

کاهش انرژی امواج زلزله در هنگام عبور از لایه‌های خاک به وسیله‌ی تعریف میرایی برای مصالح، مدل می‌شود. بدین ترتیب میرایی مصالح به عنوان جزء جدانشدنی از ذات مصالح ژئوتکنیکی تلقی می‌شود.^[۲۳] به طور کلی در یک تحلیل دینامیکی میرایی را می‌توان به میرایی مکانیکی و هیستریزس تقسیم‌بندی کرد. میرایی مکانیکی شامل میرایی ریلی^{۲۱} و موضعی^{۲۲} است. میرایی‌های ریلی و موضعی در طول تحلیل دینامیکی ثابت هستند و مقادیر آن‌ها تغییری نمی‌کنند. با این حال مقادیر میرایی در طول تحلیل وابسته به کرنش و برخلاف فرضیات ساده‌سازی شده‌ی دو میرایی مذکور است. با توجه به دلایل مطرح شده، میرایی دیگری با عنوان میرایی هیستریزس قابل استفاده است. این میرایی می‌تواند به تنهایی برای استهلاک انرژی به کار برده شود و یا آنکه به صورت ترکیبی از میرایی ریلی و موضعی درآید.^[۲۵،۲۳،۲۴] با توجه به اینکه در طی تحلیل دینامیکی سد گوند علیا، حلقه‌های هیستریزس به صورت خودکار مدل می‌شود، انرژی سیستم جذب و میرایی مصالح وابسته به مسیر خواهد شد. طبق مشاهدات تجربی مقداری اتلاف انرژی حتی در سطح کرنش‌های خیلی پایین نیز رخ می‌دهد و نسبت میرایی هیچگاه صفر نیست.^[۲۱] به همین دلیل از میرایی موضعی حدود ۵٪ نیز استفاده شده است، تا بتواند میرایی در سطح کرنش‌های کوچک را شبیه‌سازی و طی تحلیل دینامیکی جهت اتلاف انرژی به میرایی هیستریزس کمک کند.

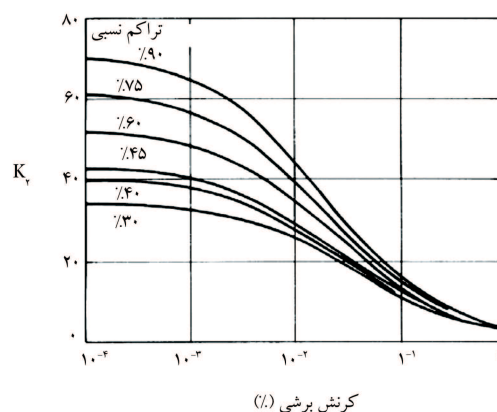
۹. موج ورودی

انتخاب موج ورودی، یکی از اقدام‌های مهم در فرایند ارزیابی لرزه‌ی است. در تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی، زلزله‌ی موردنظر باید به صورت مجموعه حرکات زمین نسبت به زمان بیان شود، به عبارتی می‌توان از تاریخچه‌ی زمانی سرعت یا شتاب به عنوان موج ورودی استفاده کرد. بدین منظور از شتاب‌نگاشت جهت معرفی موج ورودی در تحلیل‌های دینامیکی سد گوند علیا استفاده شده است.

مقدار بسامد اعمال شده بر محیط و سرعت موج در دقت عددی شرایط انتقال موج تأثیرگذار است. با توجه به ابعاد المان‌های به کار رفته در مدل‌سازی سد گوند علیا و همچنین پارامترهای رفتارکشان مصالح، بیشینه‌ی بسامد موجی که بالاتر از آن احتمال واگرایی و کاهش دقت تحلیل وجود دارد (شرط توصیه شده توسط کولیمیر و لیسمر) حدود ۴ هرتز است. بدین منظور ارتعاش‌های با بسامد بیش از ۴ هرتز فیلتر شده‌اند.^[۱۴] دومین اصلاح مربوط به خط پایه است، تا در مدل‌ها، تغییر مکان‌های اضافی در پایان زلزله مشاهده نشود.^[۲۵،۲۳]

بر مبنای مطالعات لرزه‌ی زمین‌ساخت انجام‌شده در گستره‌ی ساخت‌گاه سد گوند علیا، بیشینه‌ی شتاب افقی زلزله‌ی مبنای طراحی (DBE)، بیشینه‌ی زلزله‌ی طراحی (MDE) و بیشینه‌ی زلزله‌ی قابل انتظار (MCE) به ترتیب برابر ۰/۳۶g، ۰/۴۸g و ۰/۲۷g پیش‌بینی شده است.^[۲۶]

شتاب‌نگاشت زلزله‌ی منجیل (ایستگاه آب‌بر) جهت پیش‌بینی مقادیر تغییر مکان‌ها در سطح بیشینه‌ی زلزله‌ی قابل انتظار (MCE) به ۰/۴۸g مقیاس و اصلاح شد. جهت بررسی تأثیر محتوا و میزان شتاب ورودی در تغییر مکان‌ها، شتاب‌نگاشت



شکل ۱۲. مقادیر K_r ماسه‌ها، در چگالی نسبی‌های مختلف (after Seed, ۱۹۷۰ and Idriss [۲۲]).

مصالح سنگریزه‌ی بسیار متراکم (در کرنش برشی برابر $۱۰^{-۴}$) تقریباً در محدوده‌ی ۱۰۰ تا ۱۸۰ قرار دارد. بنابراین مقدار K_{rmax} مصالح سنگریزه‌ی $3A$ و $3B$ سد گوند علیا با توجه به محدوده‌ی ذکر شده و محدوده‌ی که در تحلیل دینامیکی سد رودبار لرستان به کار رفته بود (۹۰-۱۵۰) برابر ۱۴۰ تعیین می‌شود. مقدار K_{rmax} مصالح سنگریزه‌ی $3C$ نیز برابر ۱۱۵ انتخاب شده است.

فیلتر سد گوند علیا مخلوطی از ماسه‌ی ریزدانه و درشت‌دانه و ناحیه‌ی انتقالی آن، مخلوطی از شن ریزدانه و درشت‌دانه است که با مراجعه به جدول ۳، و شکل‌های ۱۱ و ۱۲ و همچنین محدوده‌ی در نظر گرفته شده برای سد رودبار لرستان (۴۵-۸۰)، مقدار K_{rmax} این دو ناحیه به ترتیب برابر ۵۵ و ۸۰ انتخاب شده است. با توجه به اینکه زهکش علاوه بر شن ریزدانه و درشت‌دانه، شامل مقداری تکه سنگ نیز است، مقدار K_{rmax} آن کمی بیشتر از ناحیه‌ی انتقالی، برابر ۹۰ در نظر گرفته شده است. در روابط ۱۴ الی ۱۸، پارامترهای دینامیکی و روابط حاکم بر مصالح بدنه‌ی سد در تحلیل دینامیکی ارائه شده است.^[۱۴] کرنش مرجع مصالح هسته:

$$15.7 \times 10^{-7} \sqrt{\sigma_v} \quad (14)$$

کرنش مرجع نواحی دیگر بدنه‌ی سد:

$$8.7 \times 10^{-7} \sqrt{\sigma_v} \quad (15)$$

که در آن‌ها، σ_v تنش قائم المان است. منحنی اصلی (G_t):

$$\frac{G_{max}}{\left[1 + \frac{G_{max}|\gamma|}{\tau_{max}}\right]^2} \quad (16)$$

منحنی باربرداری - بارگذاری:

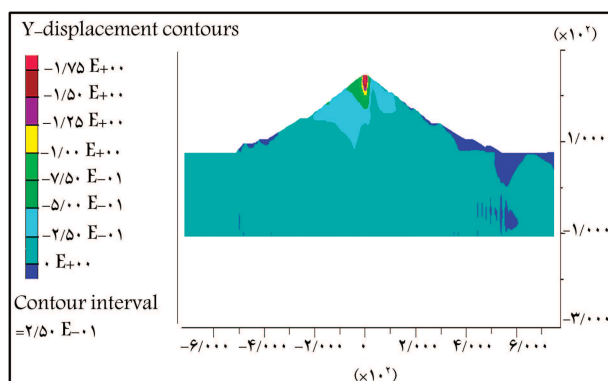
$$\frac{G_{max}}{\left[1 + \frac{G_{max}}{\tau_{max}}|\gamma - \gamma_r|\right]^2} \quad (17)$$

مدول حجمی مصالح:

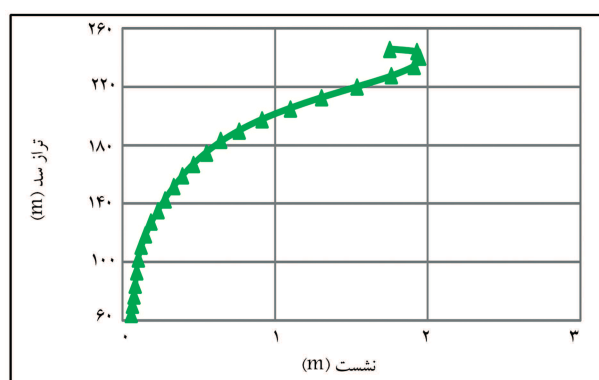
$$B_t = \frac{3(1+\nu)}{3(1-2\nu)} G_{max} \quad (18)$$

جدول ۴. مشخصات عمومی زلزله‌های استفاده شده در تحلیل دینامیکی. [۱۴]

نام زلزله	ایستگاه	بزرگی (ریشتر)	بیشینه‌ی شتاب افقی (PGA) (g)	مقیاس شده اصلی
اسپیتاک	گوکاسیان [۲۵]	۶٫۷۷	۰٫۲۷	۰٫۲۱
طیس	دهوک	۷٫۳۵	۰٫۳۶	۰٫۳۵
منجیل	آب‌بر	۷٫۳۷	۰٫۴۸	۰٫۵۱
لاندز	لوسرن [۲۶]	۷٫۲۸	۰٫۴۸	۰٫۷۳



شکل ۱۴. توزیع نشست سد در پایان زلزله‌ی منجیل. [۱۴]



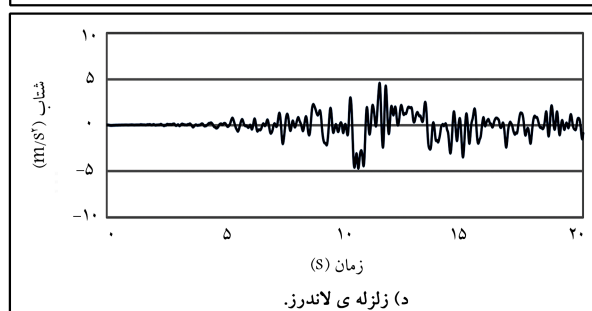
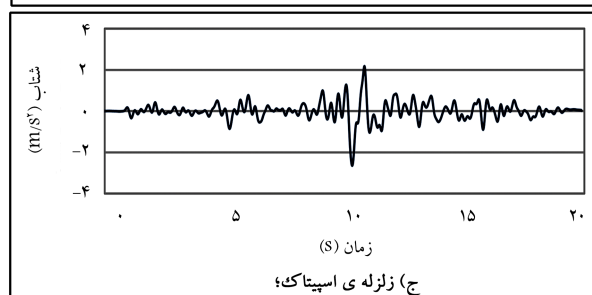
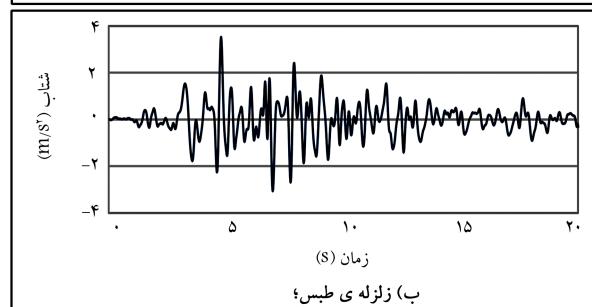
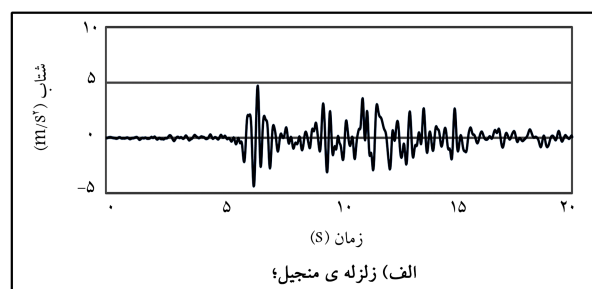
شکل ۱۵. توزیع نشست محور سد در پایان زلزله‌ی منجیل. [۱۴]

و رقوم نرمال، مشکل سرریز شدن^{۲۵} آب از تاج سد اتفاق نمی‌افتد و سازه‌ی سد در مقابل زلزله‌ی MCE، رفتار مناسبی را از خود نشان می‌دهد و گسیختگی کلی اتفاق نخواهد افتاد. تاریخچه‌ی زمانی نشان داده شده در شکل ۱۶، بیانگر افزایش نشست مرکز هسته در تراز ۲۴۰ متر با گذشت زمان است. [۱۴]

۲.۱۰. تغییرمکان افقی

با توجه به شکل ۱۷، در پایان زلزله، شیب بالادست بیشینه‌ی تغییرمکان افقی برابر ۱٫۳۰ متر (در فاصله‌ی ۳۰۳٫۲ متری از محور سد و در تراز ۱۳۴٫۱ متر)، شیب پایین‌دست بیشینه‌ی تغییرمکان افقی برابر ۱٫۱۹ متر (در فاصله‌ی ۷۵٫۶۲ متری از محور سد و در تراز ۲۷۱٫۰ متر) و تاج سد بیشینه‌ی تغییرمکان افقی برابر ۲۵٫۳ سانتی‌متر را تجربه کرده‌اند.

تاریخچه زمانی تغییرمکان افقی شیب‌های بالادست و پایین‌دست در نقاط یاد شده و تراز تاج، در شکل‌های ۱۸ الی ۲۰ مشاهده می‌شود. طبق نمودارهای



شکل ۱۳. شتاب‌نگاشت‌های مقیاس و اصلاح شده‌ی زلزله. [۱۴]

زلزله‌های اسپیتاک^{۲۳}، طیس و لاندز^{۲۴} به ترتیب در سطوح DBE و MDE و مقیاس شده‌اند. مشخصات عمومی زلزله‌های به کار رفته در تحلیل‌ها در جدول ۴ ارائه شده‌اند. در شکل ۱۳ نیز، شتاب‌نگاشت زلزله‌های مذکور مشاهده می‌شوند. [۱۴]

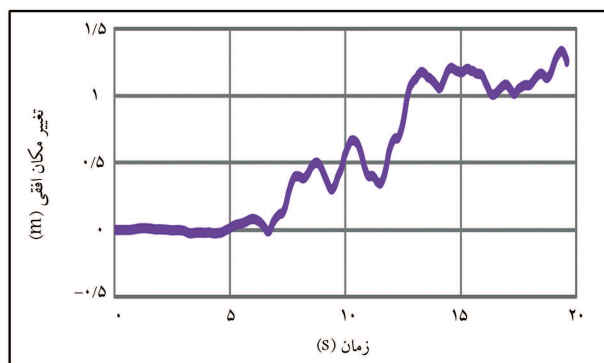
۱۰. نتایج

۱۰.۱۰. تغییرمکان قائم یا نشست

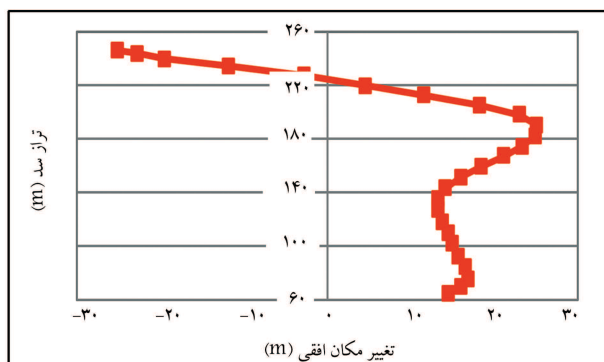
با توجه به شکل ۱۴، بیشینه‌ی نشست در پایان زلزله‌ی منجیل برابر ۱٫۹۴ متر در تراز ۲۴۴ متر، کمی پایین‌تر از تراز تاج سد رخ داده است. شکل ۱۵، نیز نشان‌دهنده‌ی افزایش نشست محور سد با حرکت به سمت تاج است. مقدار ارتفاع آزاد سد به حدی است که به علت زلزله در شرایط موجود (حدود ۵ سال پس از اتمام آبیگری)

ترسیم شده، مقادیر تغییر شکل افقی در هر سه موقعیت با گذشت زمان افزایش می‌یابد. شکل ۲۱، تغییر مکان‌های افقی محور سد را در پایان زلزله‌ی منجیل نشان می‌دهد. بیشینه‌ی تغییر مکان افقی محور سد برابر ۲۵/۳ سانتی متر در تراز تاج رخ داده است. [۱۴]

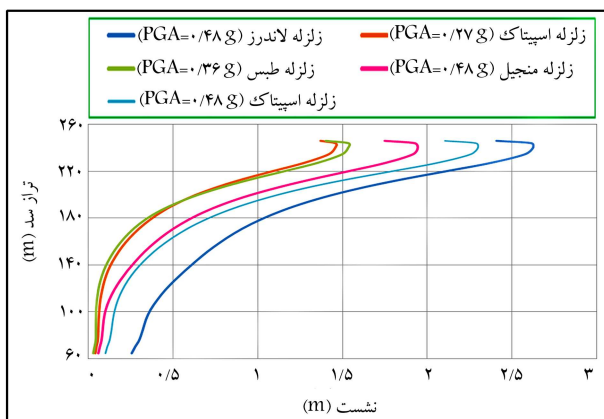
۳.۱۰. تأثیر نوع شتاب‌نگاشت و میزان شتاب ورودی در تغییر مکان‌ها
شکل‌های ۲۲ و ۲۳ بیانگر این موضوع هستند که مقادیر و میزان افزایش تغییر مکان‌ها به شدت به محتوای شتاب‌نگاشت و میزان شتاب ورودی بستگی دارد. به عبارتی میزان شتاب ورودی و نوع شتاب‌نگاشت، هر دو در رفتار سد به هنگام زلزله سهم هستند.



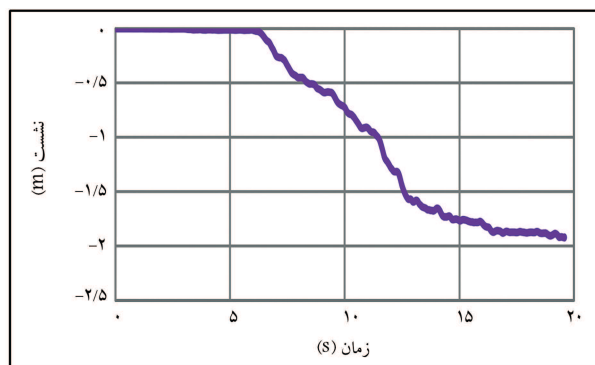
شکل ۲۰. تاریخچه‌ی زمانی تغییر مکان افقی شیب پایین دست سد طی زلزله‌ی منجیل. [۱۴]



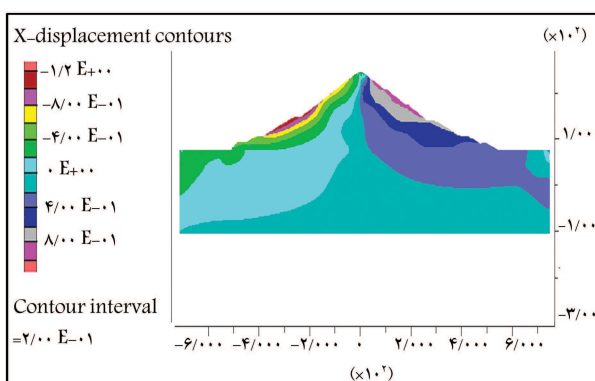
شکل ۲۱. توزیع تغییر مکان افقی محور سد در پایان زلزله‌ی منجیل. [۱۴]



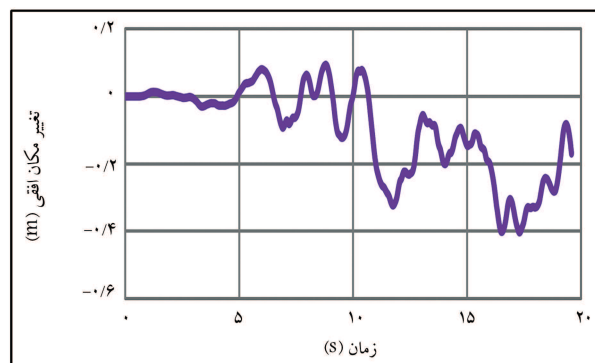
شکل ۲۲. نشست محور سد در پایان زلزله‌های منجیل، طیس، اسپیتاک، ولاندرز. [۱۴]



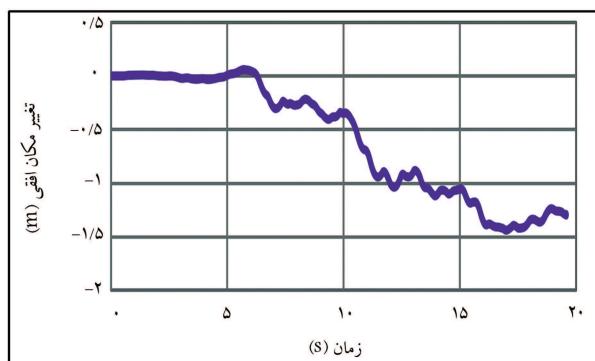
شکل ۱۶. تاریخچه‌ی زمانی نشست مرکز هسته در تراز ۲۴۰ متر طی زلزله‌ی منجیل. [۱۴]



شکل ۱۷. توزیع تغییر مکان افقی سد در پایان زلزله‌ی منجیل. [۱۴]



شکل ۱۸. تاریخچه‌ی زمانی تغییر مکان افقی تراز تاج سد طی زلزله‌ی منجیل. [۱۴]



شکل ۱۹. تاریخچه‌ی زمانی تغییر مکان افقی شیب بالادست سد طی زلزله‌ی منجیل. [۱۴]

و این امر در هر سدی با توجه به شرایط و هندسه سدی، انتظارات و ویژگی مدل رفتاری و خصوصیات مصالح ارزیابی می‌شوند.

۱۱. نتیجه‌گیری

طراحی و اجرای یک سد، فقط بخشی از مجموعه فعالیت‌های پروژه است و در کنار آن، کنترل ایمنی و پایداری اجزاء مختلف سد از جنبه‌های مختلف در دوران ساخت و بهره‌برداری از مهم‌ترین مسائل است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که سدها همواره باید تحت پایش و ارزیابی باشند. در پژوهش حاضر، پس از ارزیابی نتایج ابزار دقیق سد گتوند علیا، بزرگ‌ترین مقطع این سد (مقطع ۴-۴) به صورت دوبعدی در نرم‌افزار $\text{FLAC } 4.0$ مدل‌سازی شد. در تحلیل‌های عددی با توجه به طبیعت غیرخطی مصالح ژئومکانیک به ویژه خاک، از مدل‌های رفتاری موهر - کولمب و سخت کرنشی - نرم کرنشی به ترتیب جهت شبیه‌سازی رفتار مصالح پی و بدنه سد استفاده شد. از فرضیات اساسی در شرایط استاتیکی، سخت‌تر شدن زاویه اصطکاک مصالح بدنه سد با افزایش کرنش خمیری، وابستگی مدول کشسانی و زاویه‌ی اتساع این مصالح به فشار همه‌جانبه، وابسته کردن مدول بالک آب به متوسط تنش المان جهت تخمینی صحیح از فشار آب حفره‌ی طی ساخت و شبیه‌سازی پدیده رمیش اشباع به‌هنگام اولین آبیگری است. پس از انجام تحلیل با پارامترهای اولیه، تحلیل برگشتی به‌منظور تدقیق خصوصیات مصالح صورت گرفت.

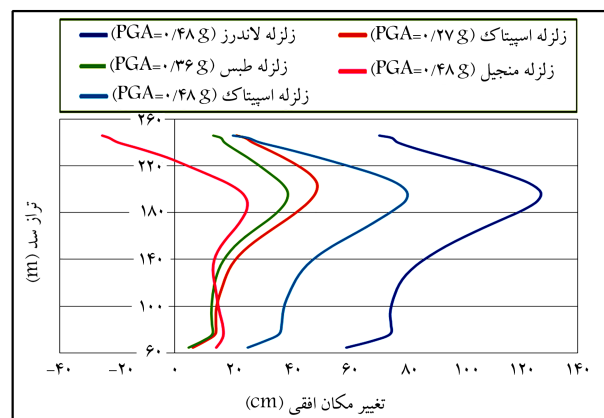
پس از پایان اولین آبیگری، حدود ۵ سال به مدول فرصت داده شد تا تقریباً به شرایط تراوش پایدار برسد، سپس با انتخاب مدول کشسان خمیری موهر-کولمب به همراه قوانین میسینگ - فین جهت شبیه‌سازی رفتار غیرخطی و هیستریزیسی مصالح به‌هنگام زلزله، تحلیل دینامیکی جهت پیش‌بینی تغییرمکان‌های سد گتوند علیا در سطح پیشینه‌ی زلزله‌ی قابل انتظار (MCE) انجام شد. سپس تأثیر نوع شتاب‌نگاشت و میزان شتاب ورودی در سطوح زلزله‌ی مبنای طراحی (DBE)، پیشینه‌ی زلزله‌ی طراحی (MDE) و پیشینه‌ی زلزله‌ی قابل انتظار (MCE) در تغییرمکان‌ها بررسی شد.

پیشینه‌ی نشست حاصل از تحلیل دینامیکی با زلزله‌ی منجیل برابر $1/94$ متر در ترازهای فوقانی هسته و پیشینه‌ی تغییرمکان افقی برابر $1/30$ و $1/19$ متر به ترتیب در شیب‌های بالادست و پایین‌دست پیش‌بینی شده است.

جهت بررسی تأثیر نوع شتاب‌نگاشت و پیشینه‌ی شتاب ورودی بر تغییرمکان‌ها، زلزله‌ی اسپیتاک به سطح $0/27g$ ، زلزله‌ی طیس به سطح $0/36g$ و زلزله‌های اسپیتاک و لاندروز به سطح $0/48g$ مقیاس و اصلاح شدند.

مقادیر و میزان افزایش تغییرمکان‌ها به شدت به محتوای شتاب‌نگاشت و میزان شتاب ورودی بستگی دارد. با افزایش پیشینه‌ی شتاب ورودی، نشست‌ها افزایش می‌یابند. در حالی که تغییرمکان افقی محور سد، بیشتر تحت تأثیر نوع شتاب‌نگاشت است. زیرا زلزله‌ی منجیل با PGA برابر $0/48g$ ، تغییرمکان‌های افقی کوچک‌تری را در محور سد نسبت به زلزله‌های طیس ($0/36g$) و اسپیتاک ($0/27g$) تجربه کرده است.

به‌منظور بررسی تأثیر نوع شتاب‌نگاشت و میزان شتاب ورودی به‌صورت جداگانه در نتایج، شتاب‌نگاشت زلزله‌ی اسپیتاک، شتاب‌نگاشت استفاده شده در مرحله طراحی در سطح MCL نیز مقیاس شد. نتایج نشان داد در PGA برابر $0/48g$ ، مقادیر پیشینه‌ی نشست و تغییرمکان افقی محور سد در تحلیل دینامیکی با زلزله‌ی اسپیتاک، به‌ترتیب بزرگ‌تر و کوچک‌تر از تحلیل با زلزله‌ی منجیل و لاندروز است.



شکل ۲۳. تغییرمکان افقی محور سد در پایان زلزله‌های منجیل، طیس، اسپیتاک و لاندروز.^[۱۴]

جدول ۵. مقایسه‌ی بین نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی با زلزله‌های مختلف.^[۱۴]

نام زلزله	پیشینه‌ی نشست (متر)		پیشینه‌ی تغییرمکان افقی (متر)	
	شتاب ورودی (g)	شیب بالادست	شیب پایین‌دست	
اسپیتاک	$0/27$	$1/46$	$0/45$	$1/05$
	$0/48$	$2/3$	$0/73$	$1/72$
طیس	$0/36$	$1/54$	$0/81$	$1/16$
منجیل	$0/48$	$1/94$	$1/30$	$1/19$
لاندروز	$0/48$	$2/62$	$0/96$	$2/21$

با توجه به شکل ۲۲، با افزایش پیشینه‌ی شتاب ورودی بر مقادیر نشست‌ها افزوده شده است. با توجه به شکل ۲۳، تغییرمکان افقی محور سد، بیشتر تحت تأثیر نوع شتاب‌نگاشت است. زیرا زلزله‌ی منجیل با PGA برابر $0/48g$ تغییرمکان‌های افقی کوچک‌تری را در محور سد نسبت به زلزله‌های طیس و اسپیتاک تجربه کرده است. به‌منظور بررسی تأثیر نوع شتاب‌نگاشت و میزان شتاب ورودی به‌صورت جداگانه در نتایج شتاب‌نگاشت زلزله‌ی اسپیتاک، شتاب‌نگاشت استفاده شده در مرحله طراحی در سطح MCE نیز مقیاس شد. همان‌طور که در شکل‌های ۲۲ و ۲۳ مشاهده می‌شود، در PGA برابر $0/48g$ ، مقادیر پیشینه‌ی نشست و تغییرمکان افقی محور سد در تحلیل دینامیکی با زلزله‌ی اسپیتاک، به‌ترتیب بزرگ‌تر و کوچک‌تر از تحلیل با زلزله‌ی منجیل و لاندروز است. بنابراین نوع شتاب‌نگاشت موجب تغییر نتایج تحت PGA ورودی یکسان می‌شود. با مقایسه‌ی پارامترهای مذکور در تحلیل با زلزله‌ی اسپیتاک در PGA ‌های برابر $0/27g$ و $0/48g$ ، نتیجه‌گیری می‌شود که افزایش میزان شتاب ورودی هم در افزایش تغییرمکان‌ها موثر است.

در جدول ۵، مقایسه‌ی بهتر و دقیق‌تری بین نتایج حاصل از تحلیل با زلزله‌های مختلف ارائه شده است. که با مراجعه به آن، مقادیر پیشینه‌ی تغییرمکان‌ها به‌هنگام وقوع زلزله در سطوح زلزله‌ی مبنای طراحی (DBE) و پیشینه‌ی زلزله‌ی طراحی (MDE) نیز مشخص خواهد شد.^[۱۴]

آیین‌نامه‌های معتبر معمولاً درخصوص تغییرمکان‌های مجاز سدهای خاکی مسکوت هستند و بعضاً توصیه‌های پراکنده‌ی توسط برخی از سازمان‌ها ذکر می‌شود، که چندان عمومیت ندارند و بیشتر کاربردهای موردی دارند. دلیل آن هم این است که سدهای خاکی اصولاً در شرایطی طراحی و انتخاب می‌شوند که نیاز به یک سازه‌ی انعطاف‌پذیر است و مرز تغییرشکل‌های قابل قبول را مدل‌های رفتاری مصالح خاکی تعیین می‌کنند، که اجازه‌ی رسیدن به شرایط گسیختگی را نمی‌دهند

لرزه‌ی تمام مقیاس روی یک سازه‌ی خاکی و انجام تحلیل‌های برگشتی برای حصول پارامترهای رفتاری سازه در شرایط دینامیکی و همچنین فیلتر شدن شتاب‌نگاشت‌ها جهت جلوگیری از کاهش دقت تحلیل اشاره کرد. شایان ذکر است که مش‌بندی خیلی ریز و افزایش تعداد المان‌ها آن هم برای سدی به ابعاد ذکر شده، زمان بسیار زیادی را جهت تحلیل می‌طلبد.

بنابراین نوع شتاب‌نگاشت موجب تغییر نتایج تحت PGA ورودی یکسان می‌شود. با مقایسه‌ی پارامترهای یادشده در تحلیل با زلزله‌ی اسپیتاک در PGAهای برابر $0.27g$ و $0.48g$ نتیجه‌گیری شد که افزایش میزان شتاب ورودی هم در افزایش تغییرمکان‌ها مؤثر است. از جمله محدودیت‌های پژوهش حاضر می‌توان به عدم انجام آزمایش‌های

پانوشته‌ها

1. Sheffield
2. SantaBarbara
3. Lower San Fernando
4. Lentini
5. St. Lucia
6. San Pietro
7. collapse limit state
8. life safety limit state
9. Yele
10. Wenchuan
11. design basis earthquake
12. maximum design earthquake
13. maximum credible earthquake
14. chainage
15. discharge
16. fast lagrangian analysis of continua
17. hysteresis loop
18. masing
19. backbone or skeleton curve
20. Matahina
21. rayleigh
22. local
23. Spitak
24. Landers
25. overtopping

منابع (References)

1. Castro, G., Poulos, S. and Leathers, F. "Re-examination of slide of lower san Fernando dam", *International of Geotechnical Engineering*, **111**(9), pp. 1093-1107 (1985).
2. Sica, S., Santucci de Magistris, F. and Vinale, F. "Seismic behaviour of geotechnical structures", *Annals of Geophysics*, **45**(6), pp. 799-815 (2002).
3. Bahrami, R. "Avaluation and comparison of deformations in earth dams with mixed clay core and pure clay core during earthquake (The case study of Karkhe dam)", MSc Thesis, Supervisor: Seyyed Majdeddin Mir Mohammad Hoseini, PhD, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran (2006).
4. Karbor-e-shyadeh, A.H. and Soroush, A. "A comparison between seismic behaviors of earth dams with inclined and vertical clay cores- a numerical analysis approach", *14th World Conference Earthquake Engineering*, Beijing, China, pp. 1-8 (2008).
5. Ebrahimian, B. "Numerical analysis of nonlinear dynamic behavior of earth dams", *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, Springer, China, **5**(1), pp. 38-39 (2011).
6. Kim, M.K., Lee, S.H., Choo, Y.W. and et al. "Seismic behaviors of earth-core and concrete-faced rock-fill dams by dynamic centrifuge tests", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, ELSEVIER, **31**(11), pp. 1579-1593 (2011).
7. Francesco, C., Valentina, L. and Carla Assunta, T. "1D seismic analysis of earth dams: the example of the Lentini site analysis of earth dams: the example of the Lentini site", *VI Italian Conference of Researchers in Geotechnical Engineering*, **158**, pp. 356-361 (2016).
8. Alibertia, D., Cascone, E. and Biondi, G. "Seismic performance of the San Pietro dam", *VI Italian Conference of Researchers in Geotechnical Engineering*, **158**, pp. 362-367 (2016).
9. Yuan, L., Liu, X., Wang, X. and et al. "Seismic performance of earth-core and concrete-faced rock-fill dams by large-scale shaking table tests", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **56**, pp. 1-12 (2014).
10. Han, B., Zdravkovic, L., Kontoe, S. and et al. "Numerical investigation of the response of the Yele rockfill dam during the 2008 Wenchuan earthquake", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **88**, pp. 124-142 (2016).
11. Upper Gotvand DAM & HEPP, Dam Body Design, Report NO. 3382030/10569311, Iran (2005).
12. Iran Water and Power Resources Development Company (I.W.P.C.), "Dam and hydroelectric power plant, Report of instrumentation of Gotvand dam body", Tehran, Iran (In Persian) (2009).
13. Itasca Consulting Group, "Fast lagrangian analysis of continua FLAC", Minnesota, USA (1998).
14. Shahverdi Tarkhorani, L. "Evaluation and analysis of deformations and settlements of Gotvand dam using instrumentation data", MSc Thesis, Supervisor: Seyyed Majdeddin Mir Mohammad Hoseini, PhD, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran (2014).
15. Majnooni, A., Ardakani, A. and Yazdani, M. "Comparison of mohr coulomb, hardening soil and HSS models in numerical simulating of nailing walls", 9th International Congress on Civil Engineering, Esfahan, Iran (2012).
16. Nasrollahi, M. "Avaluation and comparison of pore pressure in earth dams with mixed clay core and pure clay

- core during earthquake (the case study of Karkhe dam)", MSc Thesis, Supervisor: Seyyed Majdeddin Mir Mohammad Hoseini, PhD, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran (2005).
17. Iran Water and Power Resources Development Company (I.W.P.C.), "Stress-strain & seepage analysis report (Phase II) of Gotvand dam", Tehran, Iran (In Persian) (2008).
18. Iran Water and Power Resources Development Company (I.W.P.C.), "Back analysis report of construction and the effects of impounding rate of Gotvand dam", Tehran, Iran (In Persian) (2010).
19. Escuder, I., Andreu, J. and Rechea, M. "An analysis of stress-strain behavior and wetting effects on quarried rock shells", *Canadian Geotechnical Journal, NRC*, **42**(1), pp. 51-60 (2005).
20. Asadifard, M. "Monitoring of Gotvand dam behavior during construction using instrumentation data", MSc Thesis, Supervisor: Ali Asghar Mirghasemi, PhD, Tehran University, Tehran, Iran (2011).
21. Ordonez, I. "Influence of the boundary condition on the seismic response predictions of a rockfill dam by finite element", MSc Dissertation, University of Pavia, Italy (2009).
22. Ozakan, M. "A review of considerations on seismic safety of embankments and earth and rock-fill dams", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **17**(7-8), pp. 439-458 (1998).
23. Seed, H.B., Wong, R.T., Idriss, I.M. and et al. "Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils", *Journal of Geotechnical Engineering*, **112**(11), pp. 1016-1032 (1986).
24. Zhou, W., Chen, Y., Ma, G. and et al. "A modified dynamic shear modulus model for rockfill materials under a wide range of shear strain amplitudes", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **92**, pp. 229-238 (2016).
25. Rampello, S., Cascone, E. and Grosso, N. "Evaluation of the seismic response of a homogeneous earth dam", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **29**, pp. 782-798 (2009).
26. Zhou, W., Chen, Y., Ma, G. and et al. "A modified dynamic shear modulus model for rockfill materials under a wide range of shear strain amplitudes", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **92**, pp. 229-238 (2016).
27. Ebrahimian, B. "Advances in geotechnical earthquake engineering soil liquefaction and seismic safety of dams and monuments", *Soil Liquefaction and Seismic Safety of Dams and Monuments*, In Tech (2012).
28. Das, B.M. "Principles of soil dynamic", PWS-KENT Publishing Company, Boston (1992).
29. Pashang Pish, Y. "The Mechanism of soil deformations due to the liquefaction of sand double lenses and the determination of its unlimited depth", MSc Thesis, Supervisor: Seyyed Majdeddin Mir Mohammad Hoseini, PhD, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran (2005).
30. Zamiran, S. "Modelling and analysis of rock and soil structures in FLAC", Tehran, Noavar pub., (2012).
31. Rudbar Lorestan Dam, "Two-dimensional seismic analysis of dam body", Report No. 9A000009.33, Switzerland (2012).
32. Seed, H.B. and Idriss, I. "Soil moduli and damping factors for dynamic response analysis", *Earthquake Engineering Research Center (EERC)*, Berkely, California (1970).
33. The Planning and Supervision Department of the President, "Dynamic analysis and design of earth and rockfill dam", Publication No. 624 (2013).
34. Jafarzadeh F. and Javaheri H. "Dynamic analysis of rockfill dams considering elasto-plastic behavior and three dimensional canyon effects", *Proceedings of 23th World Congress in Large Dams (ICOLD)*, Montreal, Canada, pp. 109-130 (2003).
35. Shahbazi, R., Mir Ghasemi, A. and Mahin Roosta, R. "Comparison of the results of two-dimensional and three-dimensional dynamic Analysis in narrow valleys", 1st International and 3rd National Conference on Dams and Hydropower, Tehran, Iran (2011).
36. Sharifi Borujerdi, M., Salehi, D., Hazrati Aghchay, M. and et al. "Dynamic stability analysis of right abutment Gotvand on under earthquake force", *1st International and 3rd National Conference Dams and Hydropower*, Tehran, Iran (2011).