

## بررسی عددی اثرات زاویه تمایل درز در فونداسیون بر رفتار دینامیکی غیرخطی سد بتنی وزنی

فرهود کلاته\*<sup>۱</sup>

میثم صابری<sup>۲</sup>

### چکیده

پایداری سد بتنی وزنی واقع بر فونداسیون صخره‌ای درزه‌دار می‌تواند به دلیل امکان لغزش در امتداد صفحات ضعیف درزه تحت بارگذاری لرزه‌ای دستخوش تغییرات فراوانی گردد. با توجه به مطالعات اندک صورت پذیرفته در این زمینه در مقاله حاضر با استفاده از مدلسازی عددی به بررسی اثرات درزه در فونداسیون بر پایداری لرزه‌ای سد بتنی وزنی پرداخته شده است. در این راستا سد بتنی وزنی PineFlat با در نظر گرفتن درزه در توده سنگ بستر با هفت زاویه گسترش مختلف در نرم افزار ABAQUS بصورت دوبعدی مدل گردیده و تأثیر شیب و امتداد این درزه‌ها بر پاسخ لرزه‌ای سازه سد، مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مدلسازی اثرات اندرکنشی مخزن و فونداسیون در نظر گرفته شده و تحلیل دینامیکی به روش ضمنی، با اعمال مؤلفه‌های افقی شتاب‌نگاشت زمین‌لرزه El-Centro صورت گرفته است. نتایج بدست آمده مبین آن هستند که وجود درزه در فونداسیون در حالت کلی پاسخ دینامیکی سد بتنی وزنی را افزایش داده و درجه زاویه درزه و جهت شیب آن در فونداسیون نیز بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

### واژه‌های کلیدی:

سد بتنی وزنی، المان درز، تحلیل دینامیکی غیرخطی، اندرکنش سد-مخزن

\*۱. استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز fkalateh@tabrizu.ac.ir

۲. کارشناس ارشد مهندسی عمران سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه تبریز

## مقدمه

گزارش شده بود (مارن برچر<sup>۴</sup>، ۱۹۸۴). به عنوان نمونه دیگر از سدی که آسیب جدی در زلزله دیده است می‌توان به سد پاکویما<sup>۵</sup> در آمریکا اشاره نمود. در زلزله شدید سن‌فرناندو<sup>۶</sup> در سال ۱۹۷۱، زلزله باعث ایجاد ترک بین تکیه‌گاه سد و جناح چپ سد شد که بازشدگی حدود ۱ سانتی‌متری و گستردگی ۱۵ متری را از تاج سد تا پایین به همراه داشت. از موارد مشابه دیگر می‌توان به سد کوروبه<sup>۷</sup> اشاره کرد که در اثر زلزله ۲۷ فوریه ۱۹۶۱ در ژاپن توده سنگ زیر پی دچار لغزش و ترک گردید، که به علت طراحی مناسب، سد پایداری خود را حفظ نمود (پریسکو<sup>۸</sup>، ۱۹۸۰). با توجه به ضرورت ایمنی در سدها و هزینه هنگفت ساخت سد و سازه‌های جانبی آن‌ها بررسی کامل این سازه‌ها در برابر هر گونه مخاطره اعم از بارهای استاتیکی و لرزه‌ای ضروری می‌باشد. با بررسی اثر در نظر گرفتن درزه در فونداسیون بر پایداری و پاسخ دینامیکی سد می‌توان از خطرات جبران‌ناپذیر ناشی از خرابی در اثر زمین‌لرزه‌های احتمالی جلوگیری کرد. اولین تحلیل‌های سه بعدی مربوط به تکیه‌گاه‌های سنگی را می‌توان به لوند<sup>۹</sup> نسبت داد. وی در سال ۱۹۸۷ خرابی سد قوسی Malpasset را مورد بررسی قرار داد. وی در این تحقیق نشان داد که بر اثر فشردگی ناحیه پایین دست سد، زهکشی مناسب آب در این ناحیه انجام نشده و فشار آب در گسل‌های پی سد افزایش یافته که همین مسأله موجب تشکیل یک بلوک ناپایدار سنگی و لغزش آن در تکیه‌گاه چپ و در نتیجه فروپاشی کل جناح چپ سد و دوران کل سازه سد حول تکیه‌گاه راست را سبب شده است (لوند<sup>۱۰</sup>،

اصطلاح درزه بیانگر یک ترک یا شکستگی و یا به طور کلی یک ناپیوستگی در سنگ است که در آن، حرکت نسبی قابل توجهی به موازات صفحه شکستگی وجود ندارد (روبرت<sup>۱</sup> و همکاران، ۱۹۹۷). مقاومت سنگ سالم در توده سنگ و رفتار ناپیوستگی‌ها (به طور عام درزه‌ها) و امتداد آن‌ها نسبت به بارهای اعمال شده در تحلیل‌های دینامیکی اهمیت بسزایی دارند و در نظر نگرفتن این عوامل در تحلیل‌ها ممکن است خرابی‌هایی در سد بوجود آورد. بانگاهی کوتاه به تاریخ می‌توان دریافت که یکی از شایع‌ترین دلایل شکست سدها، مسائل مرتبط به پی و تکیه‌گاه‌ها می‌باشد (سرافیم<sup>۲</sup>، ۱۹۸۴). براساس آمار کمیته بین‌المللی سدهای بزرگ جهان در سال ۱۹۷۳ دلایل شکست سدهای بتنی، به میزان ۲۹٪ ناشی از سرریز سیلاب از تاج سد، ۵۳٪ ناشی از مسائل پی و ۱۸٪ به علت اشکالات ساخت و سایر عوامل، گزارش شده است، مشاهده می‌شود بیشترین درصد دلیل شکست در سدهای بتنی، ناشی از مسائل پی بوده است. این شکست‌ها به یکباره رخ نمی‌دهند و شرایط تحقق آن‌ها به تدریج مهیا می‌شود. از این رو با اندازه‌گیری‌های به موقع و مداوم، روند شکست سد قابل شناسایی و تشخیص بوده و با اقدام به موقع بهسازی، می‌توان این روند را پایش و از بروز شکست سد جلوگیری نمود و یا حداقل خسارت وارده را کاهش داد (حریت، ۱۳۸۸). از جمله این خرابی‌ها می‌توان به سد مالپاست<sup>۳</sup> در جنوب فرانسه اشاره کرد. این سد در سال ۱۹۵۴ ساخته شده و در سال ۱۹۵۹ به دنبال بارش‌های جوی و تغییر ناگهانی سطح آب مخزن و کاهش مقاومت برشی پی، سد تخریب گردید و باعث مرگ ۳۴۰ نفر شد. گسلی که در زیر پی قرار داشت علت اصلی خرابی سد

<sup>۴</sup>Maurenbrecher

<sup>۵</sup>Pacoima

<sup>۶</sup>Sanfernando

<sup>۷</sup>kurobe

<sup>۸</sup>Priscu

<sup>۹</sup>Londe

<sup>۱۰</sup>Londe

<sup>۱</sup>Robert

<sup>۲</sup>Serafim

<sup>۳</sup>Malpasset

هیدرومکانیکی توده سنگ مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش از سه شاخص ماکزیمم مقادیر لغزش، بازشدگی و دبی عبوری از محل ناپیوستگی‌ها جهت تخمین ایمنی تکیه‌گاه سد استفاده گردید. نتایج نشان می‌دهد که نادیده انگاشتن جریان آب درون ناپیوستگی‌ها منجر به درک نادرست از مکانیزم گسیختگی تکیه‌گاه سدهای بتنی قوسی خواهد شد. ضمن اینکه پدیده هیدرومکانیکی در فشارهای بالا بر روی پایداری تکیه‌گاه چنین سدهایی تأثیرگذار است. خردرنجبر (۱۳۹۰) با تغییر در پارامترهای ژئومکانیک توده سنگ در تکیه‌گاه‌ها و مطالعه اثرات آن بر روی سدهای قوسی، با ارائه نمودارهایی، میزان تأثیرپذیری در پی و جناحین و مقدار حداکثر تغییر مکان بدنه سد را مورد بررسی قرار داد. نتایج تحلیل‌های وی نشاد می‌دهد که با تغییر ارتفاع سد و افزایش آن در حالت پی ضعیف بر اثر تزریق در جناحین با یک درصد ثابت، فاکتور حساسیت پایداری، تأثیرپذیری بیشتری دارد. همچنین تغییر مکان بدست آمده از تحلیل بر اثر تزریق در پی سدهای کوتاه در حالت نرم بسیار اغراق‌آمیز می‌باشد این مطلب بیانگر این است که احداث سدهای قوسی روی پی نرم مناسب نمی‌باشد و سدهای کوتاه حداکثر نیرو را بر پی وارد می‌کنند. یزدانی و همکاران (۱۳۹۰) با استفاده از نرم افزارهای مختلف تأثیر درزه‌ها، شامل جهت و اندازه شکاف اولیه آن‌ها بر ایمنی تکیه‌گاه سدهای بتنی قوسی را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها برای اینکار با تمرکز روی تکیه‌گاه (بدون شبیه‌سازی بدنه سد)، مدلی دو بعدی با اعمال نیروهای وارد شده از طرف بدنه سد و مخزن، شبیه‌سازی شده و ضمن لحاظ کردن جریان درون درزه‌ها، از سه شاخص بیشینه بازشدگی، لغزش درزه‌ها و بیشینه دبی عبوری از آن‌ها برای تشخیص گسیختگی استفاده نمودند. نتایج این تحلیل‌ها نشان داد که الگوی هندسی دسته درزه‌ها (شیب و جهت شیب) و اندازه شکاف اولیه آن‌ها، عوامل بسیار تأثیرگذار بر روی ایمنی تکیه‌گاه سدهای بتنی قوسی می‌باشند. فهیمی‌فر و همکاران (۱۳۹۲) پس از انجام مطالعاتی روی توده سنگ پی سد صفا در استان کرمان، ظرفیت باربری

مگابولوف<sup>۱</sup> (۱۹۹۵) در مطالعات خود بر روی تکیه‌گاه سه بعدی سد بتنی قوسی، نشان داد که یک ناحیه خطرناک و ضعیف کششی در بالادست سد وجود دارد که بیشترین میزان نشت آب از آن قسمت رخ می‌دهد که این نشان از اهمیت نقش مسائل هیدرولیکی تکیه‌گاه بر ایمنی و پایداری سد دارد. صدقیانی و همکاران (۱۳۷۹) تأثیر پارامترهای ژئوتکنیکی بر اندرکنش سد دو قوسی با تکیه‌گاه سنگی را مورد بررسی قرار دادند، این پارامترها عبارتند از زاویه ناپیوستگی، فاصله لایه‌ها و تعداد درزه‌ها، که متغیر سوم بدلیل پیچیدگی در مدل کردن بصورت یک حالت خاص بررسی شده است. در کلیه حالت‌ها امتداد سه لایه موازی با محور رودخانه بود و کلیه زاویه‌های لایه‌بندی ممکن با این امتداد، با گام ۱۵ درجه مورد بررسی قرار گرفت. برای تحلیل مدل‌ها از برنامه ANSYS استفاده شده است. نتایج بدست آمده، اطلاعات ارزشمندی را در زمینه لایه‌بندی مناسب و نامناسب در تکیه‌گاه مشخص می‌سازند که کلیه این نتایج، منطقی و قابل انتظار و منطبق بر اصول مکانیک سنگ هستند. خرقانی و همکار (۱۳۸۶)، با ارائه مقاله‌ای به بررسی تأثیر پارامترهای ژئومکانیک، خصوصاً مدول الاستیسیته خاک و سنگ در پی و جناحین، بر تغییر مکان‌های بدنه سد و پایداری سد پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نسبت مدول الاستیسیته پی و تکیه‌گاههای کناری میزان تأثیرپذیری پاسخ سد از این پارامتر افزایش می‌یابد بطورکلی حساسیت سدهای بلند نسبت به پارامترهای ژئومکانیکی نسبت به سدهای کوتاه بیشتر می‌باشد. با توجه به دیاگرام‌های توزیع تنش ارائه شده در این مقاله در نقاط تحتانی بدنه سد میزان تنش بیشتر است لذا این نقاط نسبت به تفاوت مدول الاستیسیته حساسیت بیشتری دارند. یزدانی و همکاران (۱۳۸۶) با استفاده از نرم افزار UDEC که برای مدل‌سازی محیط‌های ناپیوسته تهیه شده است، پاسخ تکیه‌گاه سدهای بتنی قوسی را تحت تأثیر رفتار

<sup>۱</sup>Mgabelov

بدنه سد می‌شود. اثر همزمان گسل و توده ضعیف باعث افزایش ترک خوردگی و تغییر محدوده ترک خوردگی بدنه سد و همچنین باعث افزایش کرنش پلاستیک پی می‌گردد. شریف‌پور و فرخ (۱۳۹۵) در پژوهش خود به روش کاهش مقاومت با استفاده از تحلیل اجزای محدود نشان دادند که عواملی مانند هندسه کف سد و ناپیوستگی‌های موجود در فونداسیون و پارامترهای ژئوتکنیکی باعث می‌شود تا ضرایب اطمینان متفاوتی داشته باشیم و ساده سازی آن‌ها در طراحی موجب خطا در تحلیل پایداری سدهای بتنی وزنی می‌گردد. علیجانی و همکاران (۱۳۹۵) در تحقیقی به تحلیل غیرخطی سدهای بتنی وزنی با احتساب تغییرمکان ناشی از حرکت نرمال ریزگسل‌ها واقع در پی سد پرداختند. بدین منظور سیستم سد-پی- مخزن را با روش لاگرانژی مدلسازی و تحلیل را به روش المان محدود انجام دادند و در آن برای مدلسازی ترک در سد و پی بر مبنای مکانیک شکست غیرخطی از مدل ترک اندود چرخان استفاده نمودند. برای مدلسازی حرکت ریزگسل‌ها از روش گره‌های مجزا و دو روش دیگر متکی بر المان تماسی شامل روش میان لایه و تکتونیک استفاده نموده و تأثیر موقعیت و زاویه قرارگیری آن رامورد بررسی قرار دادند. به منظور بررسی نتایج، پاسخ‌های تغییرمکان تاج سد و نیز پروفیل ترک خوردگی در جسم یک سد بتنی وزنی به عنوان نمونه ارائه گردید. نتایج نشان می‌دهد که حتی تغییرمکان کم ریزگسل‌ها سبب ایجاد ترک در بدنه سد شده و می‌تواند پایداری و ایمنی سدهای بتنی را تا حدود زیادی به مخاطره اندازد. علاوه بر این، روش میان لایه نسبت به دو روش دیگر مناسب‌تر بوده و ضعف روش گره‌های مجزا در مدلسازی ناپیوستگی پی را برطرف نموده و همچنین رفتار دینامیکی سدهای بتنی مورد مطالعه واقع نگرندیده است لذا هدف از تحقیق حاضر در مدلسازی درزه‌ها و ترک‌های موجود در تکیه‌گاه‌های سنگی زمین، جهت اعمال شرایط نسبتاً واقعی فونداسیون در مدل المان محدود سیستم سد- مخزن- تکیه‌گاه، با در نظر گرفتن اثرات

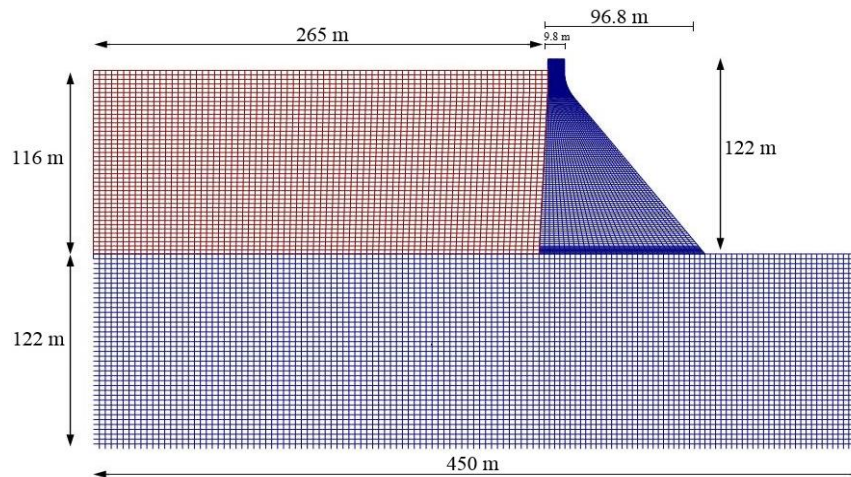
تکیه‌گاه سنگی را در دو حالت مورد ارزیابی قرار دادند که در حالت اول، با فرض محیط پیوسته برای تکیه‌گاه، آنالیز را با در نظر گرفتن پارامترهای ژئوتکنیکی توده سنگ و در حالت دوم، تحلیل را با در نظر گرفتن دو دسته درزه و با لحاظ پارامترهای ژئوتکنیکی سنگ بکر برای تکیه‌گاه، انجام دادند. برای هر دو حالت مقادیر تنش و ضریب اطمینان فشاری و کششی و در نتیجه ظرفیت باربری نهایی و مجاز با استفاده از روش‌های آیین‌نامه‌ای، تجربی و تحلیلی بدست آمده است. در نهایت مقادیر ظرفیت باربری نهایی و مجاز بدست آمده از روش‌های مختلف با هم مورد مقایسه قرار گرفته که اختلاف بین مقادیر ظرفیت باربری مجاز بدست آمده در دو حالت فوق حاکی از تأثیر قابل توجه شرایط درزه و ترک‌ها در ظرفیت باربری پی در این گونه پروژه است. آقازادگان و همکاران (۱۳۹۲) در مقاله‌ای پاسخ لرزه‌ای سد بتنی قوسی مالپاسه را با در نظر گرفتن ضعف موجود در پی آن که شامل یک توده ضعیف در تکیه‌گاه چپ و یک گسل غیرفعال در پایین دست سد است را مورد بررسی قرار دادند. تحلیل‌ها تحت سه بارگذاری مؤلفه زلزله میدان نزدیک منجیل-آبر انجام شده است. در این تحقیق از مدل ترک پخشی ثابت برای بررسی رفتار غیرخطی بدنه‌ی سد استفاده گردیده است. در تحلیل‌ها اندرکنش دینامیکی سد و مخزن با احتساب تراکم‌پذیری سیال مخزن و شرایط مرزی جاذب مخزن لحاظ شده و معادلات آن با استفاده از مدل نوسانی حل شده است. اندرکنش خاک و سازه در نظر گرفته شده و همچنین رفتار غیرخطی پی با مدل دراگر-پراگر مدل گردیده است. نتایج نشان می‌دهند لحاظ توده ضعیف به تنهایی باعث افزایش بیشینه جابجایی تاج سد، بیشینه تنش‌های فشاری بدنه سد و موجب افزایش ترک خوردگی نسبت به روش تکتونیک مکانیسم واقع بینانه‌تری از اعمال حرکت ریزگسل در پی را ارائه می‌دهد. با توجه به مطالعات پیشین صورت گرفته در اغلب این مطالعات وجود درزه و یا ناپیوستگی در فونداسیون سدهای بتنی بطور مستقیم مدلسازی نشده و تأثیر مشخصات هندسی این درزه‌ها بر

۱۵ متر و یک مونولیت با عرض ۱۲ متر تشکیل شده است. طول تاج سد ۵۵۰ متر و ارتفاع بلندترین بخش بدنه سد ۱۲۲ متر می‌باشد. مدل المان محدود دو بعدی بلندترین مقطع غیر سرریز سد که برای تحلیل استفاده شده به همراه مشخصات هندسی آن در شکل (۱) ارائه شده است.

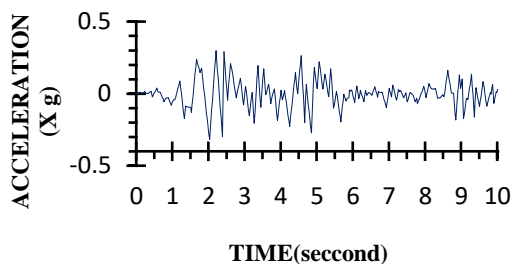
اندرکنشی محیط‌های درگیر در مدل المان محدود می‌باشد.

### مدل المان محدود سد بتنی وزنی، مخزن و فونداسیون

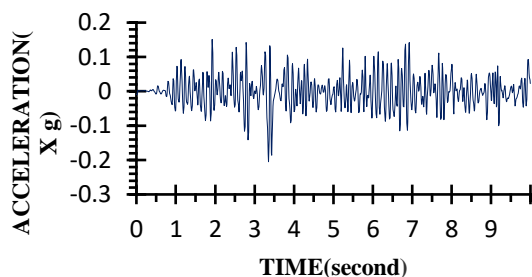
در تحقیق حاضر، سد بتنی وزنی PineFlat بعنوان مطالعه موردی انتخاب گردیده است. این سد در ایالات متحده آمریکا بر روی رودخانه Kings در ایالت کالیفرنیا قرار گرفته است، بطوریکه بدنه سد از ۳۶ بلوک مکعبی با عرض



شکل (۱): ابعاد هندسی و مدل المان محدود سیستم سد- مخزن - فونداسیون سد پایین فلت



شکل (۲): تاریخچه زمانی شتاب نگاشت افقی زلزله ال سنترو



شکل (۳): تاریخچه زمانی شتاب نگاشت قائم زلزله ال سنترو

با توجه به شرایط حاکم بر رفتار سد بتنی وزنی و شکل هندسی مخزن، مسأله به صورت دو بعدی در نرم‌افزار آباکوس مدل گردیده، این نرم‌افزار قابلیت آنالیز لرزه‌ای با در نظر گرفتن هندسه نامنظم دامنه‌ها و آثار اندرکنش مخزن و پی را دارا است. بدین منظور عناصر مناسبی که رفتار تراکم‌پذیری سیال را نمایش دهد، پیش‌بینی شده است. همچنین برای مرز دوردست قطع شده نیز از شرط مرزی Sommerfeld استفاده شده است. تحریک لرزه‌ای مدل با مؤلفه شتاب نگاشت ثبت شده در ایستگاه El-Centro، در اثر زلزله ۱۹ می ۱۹۴۰ در دره امپریال ایالت کالیفرنیا، که مؤلفه‌های افقی و قائم آن به ترتیب به صورت شکل‌های (۲) و (۳) می‌باشد در قسمت کف سد اعمال شده است.

CPS4R	سد
CPE4R	فونداسیون
AC2D4	مخزن

### رفتار غیرخطی مصالح و حل آن

مسئله سازه‌ای غیرخطی، مسأله‌ای است که در آن سختی سازه با تغییر شکل آن تغییر می‌کند. در تحلیل غیرخطی ضمنی، ماتریس سختی سازه در طول تحلیل باید دفعات زیادی تشکیل شده و معکوس شود که سبب می‌شود هزینه تحلیل غیرخطی نسبت به تحلیل خطی بسیار بالاتر باشد. در یک تحلیل غیرخطی صریح، این افزایش هزینه به علت کاهش بازه زمانی پایدار می‌باشد.

### مدل‌سازی رفتار غیرخطی بتن در آباکوس

سه مدل ساختاری مختلف برای تحلیل رفتار غیرخطی مصالح بتن و ترک خوردگی آن، تحت فشار محصور کنندگی کم، در نرم‌افزار آباکوس وجود دارد. این مدل‌ها وابسته به محصول انتخابی برای تحلیل می‌باشند. مدل ترک خوردگی آغشته‌ای بتن در آباکوس - استاندارد و مدل ترک خوردگی شکننده بتن در آباکوس - صریح موجود است. مدل پلاستیسته خرابی بتن در هر دو مورد قابل استفاده می‌باشد. و برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی بتن در این پژوهش از این مدل استفاده خواهد شد. مدل پلاستیسته خرابی بتن در آباکوس توانایی مدل‌سازی بتن و سایر مصالح شبه ترد در همه انواع سازه‌ها اعم از تیرها، پوسته‌ها و جامدها را دارد. این مدل متشکل از ترکیب پلاستیسته چند سختی غیر هم بسته و الاستیسته خرابی اسکالر برای توصیف خرابی برگشت‌ناپذیر که در طی پروسه‌های شکست رخ می‌دهد، می‌باشد.

### رفتار مکانیکی

مدل، یک مدل خرابی پیوسته براساس پلاستیسته برای بتن می‌باشد. در این مدل دو مکانیزم اصلی شکست، ترک خوردگی کششی و خرد شدگی فشاری مصالح بتن

از آن جایی که نداشت زلزله‌ها در عمق ۱۲۲ متری در کف پی مدل اعمال می‌شود لازم است با انجام تحلیل دکانولوشن<sup>۱</sup> شتاب نداشت زلزله آنها را اصلاح کرد تا پس از اعمال به کف پی در مدل، به بیشینه شتاب افقی و قائم زلزله هدف در سطح زمین دست یابیم. اینکار با کمک نرم‌افزار SHAKE2000 صورت گرفت. مش‌بندی مناسب و انتخاب صحیح المان‌ها از مهمترین مراحل در تحلیل عددی المان محدود می‌باشد. ابعاد و نوع مش‌بندی وابسته به نوع تحلیل و مدل‌سازی و دقت نتایج خروجی است. در تحلیل‌های المان محدود معمولاً با ریزتر کردن اندازه المان‌ها دقت نتایج بدست آمده افزایش می‌یابد. اما با ریزتر کردن المان‌ها زمان تحلیل نیز به شکل تصاعدی دچار افزایش می‌گردد. بهتر است تعادلی ما بین دقت نتایج خروجی و ابعاد المان‌ها برقرار شود، به نحوی که مدت زمان تحلیل در بازه قابل قبولی قرار گیرد. در این پژوهش انتخاب مش برای سیستم سد- مخزن- تکیه‌گاه، با سعی و خطا، دو مش‌بندی متوالی با اختلاف نتایج کمتر از یک درصد، که بیانگر همگرا شدن مش می‌باشد صورت گرفته است. تعداد المان‌ها و گره‌های مربوط به این مش‌بندی در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول (۱): تعداد المان‌ها و گره‌های سیستم سد- مخزن- پی

مدل	تعداد المان‌ها	تعداد گره‌ها
سد	۵۴۴۰	۵۶۴۳
فونداسیون	۵۴۸۰	۵۶۵۸
مخزن	۳۲۲۵	۳۳۴۴

نوع المان‌های بکارگرفته شده در مدل‌سازی سیستم سد- مخزن- تکیه‌گاه از کتابخانه المان نرم‌افزار آباکوس در جدول (۲) آورده شده است.

جدول (۲): نوع المان‌های سیستم سد- مخزن- تکیه‌گاه

مدل	نوع المان
-----	-----------

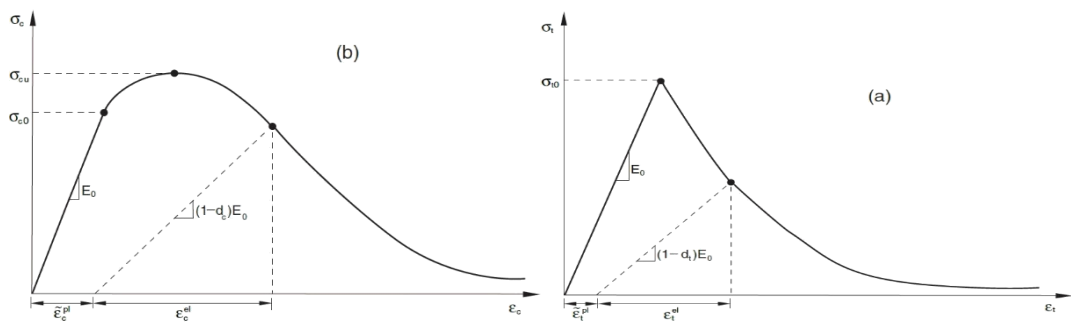
<sup>۱</sup>Deconvolution

می‌باشد.

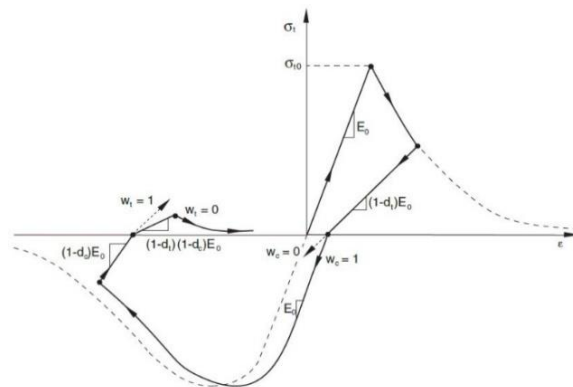
اثر تک سویه، یک جنبه مهمی از رفتار بتن تحت بارگذاری دوره‌ای می‌باشد. اثر تغییر بارگذاری از کشش به فشار، معمولاً موجب بسته شدن ترک‌های کششی گردیده و منجر به بازیابی سختی فشاری می‌شود. شکل (۴) چرخه بارگذاری تک محوره را نشان می‌دهد (حداد، ۱۳۸۷).

### رفتار چرخه‌ای تک محوره

تحت شرایط بارگذاری دوره‌ای تک محوره، مکانیزم بازیافت مقاومت کاملاً پیچیده می‌باشد، که شامل بازشدگی و بسته شدگی ریز ترک‌های توزیع شده در جسم می‌باشد، که باید به خوبی اثرات متقابل آن لحاظ شود. آزمایش تنها راهی است که بتوان رفتار باز آفرینی سختی الاستیک با تغییرات بارگذاری به وجود آمده در طول بارگذاری سیکلی تک محوره را مورد بررسی قرار داد. اثر بازیابی سختی، مشابه



شکل (۴): چرخه بارگذاری تک محوره (کشش - فشار - کشش) برای فاکتورهای بازیابی سختی



شکل (۵): چرخه بارگذاری تک محوره (کشش - فشار - کشش) برای فاکتورهای بازیابی سختی

### رفتار فشاری و کششی تک محوره

از مدل پلاستیسته خرابی تبعیت می‌کند (بهاتاچارجی<sup>۱</sup> و

در این مدل فرض می‌شود که پاسخ کششی و فشاری تک محوره بتن همانگونه که در شکل (۵) نشان داده شده است

۲/۱۳	-	-	مدول بالک $Gpa$
------	---	---	-----------------

لاگر<sup>۲</sup>، (۱۹۹۴).

### نرم افزار Abaqus

با توجه به انتخاب و استفاده از مدل آسیب پلاستیک بتن به خاطر توانمندی‌های این مدل در رفتار واقعی بتن در کشش و فشار، در ادامه پارامترهای الاستیسیته و پلاستیسیته، تنش کرنش‌ها در کشش، در حالت باگذاری دینامیکی برای این مدل در جداول (۴) و (۵) جهت ورودی نرم‌افزار ارائه شده است (ونگ و همکاران، ۲۰۱۵).

جدول (۴): مشخصات پلاستیسیته بتن

پارامتر	اندازه
زاویه اتساع	۳۶
برون محوری	۰/۱
$\sigma_{b0}/\sigma_{c0}$	۱/۱۶
K	۰/۶۶۷
پارامتر ویسکوزیته	۰

رفتار سخت شوندگی و خرابی بتن تحت تنش های فشاری		
خرابی	کرنش خوردشدگی	تنش (MPa)
۰	۰	۱۳
۰	۰/۰۰۰۱۶	۲۴/۱
۰/۲۴۴	۰/۰۰۰۵۴	۲۰/۶۴
۰/۵۴۱	۰/۰۰۱۳۲	۱۲/۶۶
۰/۷۵۶	۰/۰۰۲۸۸	۶/۴۵
۰/۸۷۶	۰/۰۰۵۹۹	۳/۱۵
۰/۹۳۸	۰/۰۱۲۲۱	۱/۵۴
۰/۹۶۹	۰/۰۲۴۶۴	۰/۷۶
رفتار نرم شوندگی و خرابی بتن تحت تنش های کششی		
خرابی	کرنش ترک خوردگی	تنش (MPa)
۰	۰	۲/۹
۰/۰۶۸	۰/۰۰۰۰۱۲	۲/۷۶
۰/۲۱۹	۰/۰۰۰۰۳۶	۲/۳۰
۰/۴۲۵	۰/۰۰۰۰۸۵	۱/۵۷
۰/۶۴۰	۰/۰۰۰۱۸۱	۰/۹۴
۰/۷۸۷	۰/۰۰۰۳۷۵	۰/۵۴
۰/۸۷۸	۰/۰۰۰۷۶۱	۰/۳۱
۰/۹۶۱	۰/۰۰۱۵۳۵	۰/۱۹

آباکوس یک نرم‌افزار شبیه‌سازی بسیار قدرتمند جهت تحلیل مسائل مهندسی می‌باشد. اساس کار این نرم‌افزار روش اجزاءمحدود بوده و محدوده وسیعی از مسائل مهندسی را می‌توان با استفاده از آن تحلیل کرد. در آباکوس مجموعه کاملی از المان‌های مختلف وجود دارد. این المان‌ها شبیه‌سازی بیشتر مواد و سازه‌های مهندسی را در این نرم‌افزار ممکن می‌سازند. آباکوس از دو فرآیند تحلیلی اصلی تشکیل شده است: آباکوس-استاندارد و آباکوس-صریح. آباکوس-استاندارد یک فرآیند تحلیلی کلی می‌باشد که توانایی حل محدوده وسیعی از تحلیل‌های خطی و غیرخطی، استاتیکی و دینامیکی را دارد. این فرآیند سیستم معادلات حاکم بر مسأله را به شکل ضمنی در هر بازه تحلیل حل می‌کند. در مقابل آباکوس-صریح تحلیل را در طی زمان با استفاده از بازه‌های زمانی بسیار کوچک، بدون حل سیستم درگیر، معادلات در هر بازه به جلو می‌برد.

### مشخصات مکانیکی مصالح

مصالح در نظر گرفته شده برای بتن توده سد، توده تکیه‌گاه و آب مخزن در مدلسازی مطابق جدول (۳) می‌باشد.

جدول (۳): مشخصات مصالح بتن سد، سنگ پی و آب مخزن

پارامتر	بتن	پی	آب
چگالی $kg/m^3$	۲۴۰۰	۲۶۰۰	۱۰۰۰
مدول الاستیسیته دینامیکی $Gpa$	۳۰	۱۰	-
مدول الاستیسیته استاتیکی $Gpa$	۲۴	-	-
ضریب پواسون	۰/۲	۰/۳	-

<sup>۱</sup>Bhattacharjee

<sup>۲</sup>Lager



تماس توده‌های سنگی مجاور آن به بررسی تاثیر درز اقدام می‌شود. توده‌های سنگی درزه‌دار دارای دو خصوصیت مهم می‌باشند یکی ناپیوستگی به دلیل وجود درزه‌ها و ترک‌ها و دیگری امکان تغییر مکان در امتداد این ناپیوستگی‌ها می‌باشد بنابراین روش‌هایی که برای تحلیل رفتار چنین مجموعه‌هایی بکار برده می‌شوند باید این دو خصوصیت مهم را دارا باشند. روش‌های محیط ناپیوسته حوزه مسأله را به عنوان مجموعه‌ای از اجسام یا بلوک‌های مجزا و متعامد (با اثرات متقابل با هم) تعریف می‌کنند که تحت بارهای خارجی قرار دارند و انتظار می‌رود با زمان، جابجایی قابل توجه داشته باشند. با توجه به اهداف این پژوهش و توضیحات موجود در این بخش، جهت رسیدن به نتایج منطقی، مدلسازی درزه‌های موجود در تکیه‌گاه در نرم‌افزار آباکوس با استفاده از مدلسازی صریح و مستقیم درز صورت گرفته بطوری که مدل فونداسیون از دو بخش مجزا با مشخصات مکانیکی یکسان تشکیل شده و فصل مشترک آن‌ها که محل درزه‌ها می‌باشد مطابق مشخصات مکانیکی موجود در جدول (۶) در نظر گرفته شده است.

جدول (۶): مشخصات مکانیکی درزه‌ها (ایزدی نیا و احمدی،

(۲۰۰۱)

اندازه	پارامتر
$K_n = 2 \times 10^9 \text{ } pa/m$	سختی نرمال
$K_s = 1 \times 10^9 \text{ } pa/m$	سختی مماسی
$F_t = 1 \times 10^6 \text{ } pa$	مقاومت کششی
$\mu = 0.9$	ضریب اصطکاک

### صحت سنجی

#### صحت سنجی تحلیل دینامیکی غیرخطی

در این بخش ابتدا به صحت سنجی نرم‌افزار آباکوس، جهت مدلسازی غیر خطی سد بتنی وزنی پرداخته می‌شود. بدین منظور سد کوینا را که مشخصات هندسی آن در شکل (۸) آورده شده است به صورت غیر خطی در نرم‌افزار آباکوس به صورت شکل (۹) مدلسازی شده و جابجایی

جدول (۵): مشخصات تنش- کرنش بتن و آسیب پلاستیک در جدول (۴)  $\sigma_{b0}/\sigma_{c0}$  نسبت عملکرد تنش اولیه فشاری دو محوری به تنش اولیه فشاری تک محوری و K نسبت تنش کششی به فشاری می‌باشد. لازم به ذکر است که مصالح بدنه سد به شکل انعطاف‌پذیر، همگن و ایزوتروپ در نظر گرفته شده و رفتار بتن به صورت غیرخطی مدل شده است و آب مخزن، محیطی همگن و ایزوتروپ، غیر لزج، غیر چرخشی و با تغییر مکان‌های کوچک و تراکم‌پذیر فرض می‌شود.

### مدل درزه در فونداسیون

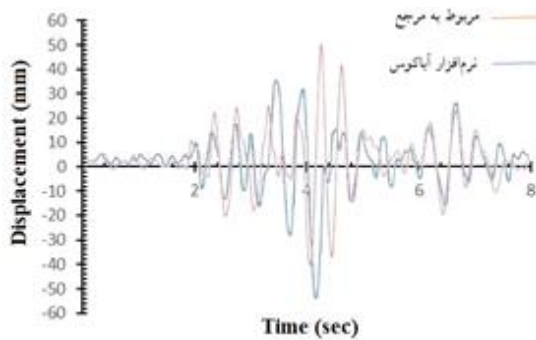
به دلیل تنوع چیدمان ناپیوستگی‌های موجود در توده‌های سنگی، نحوه رفتار مکانیکی و عملکرد توده سنگ بسیار پیچیده است. به منظور مدلسازی رفتار توده سنگ‌ها از روش‌های مختلفی می‌توان استفاده کرد. به طور کلی این روش‌ها را می‌توان به دو دسته پیوسته و ناپیوسته تقسیم کرد. در روش پیوسته، توده سنگ به شکل مجموعه‌ای پیوسته در نظر گرفته شده و اثر ناپیوستگی‌ها به طور ضمنی و غیر مستقیم با استفاده از مدل‌های رفتاری مناسب نظیر موهر-کولمب<sup>۱</sup>، دراگر-پراگر<sup>۲</sup> و چند سطحی<sup>۳</sup> لحاظ می‌شود. مدلسازی محیط پیوسته برای آنالیز، سنگ‌های ضعیف و توده سنگ‌های بسیار درزه‌دار یا خاک مانند مناسب می‌باشد. اگر توده سنگ از چندین دسته درزه که مکانیزم گسیختگی را کنترل می‌کنند تشکیل شده باشد، یک شیوه مدلسازی محیط پیوسته می‌تواند مناسب‌تر باشد. در روش‌های ناپیوسته به مدلسازی مستقیم درز در محیط سنگی فونداسیون پرداخته می‌شود بطوری که چند درز مهم با معرفی المان درز در توده سنگی و مدلسازی نحوه

<sup>۱</sup>Mohr – Coulomb

<sup>۲</sup>Drucker – Prager

<sup>۳</sup>Multi Laminate Model

شکل (۹): مدل سد کوینا در نرم افزار آباکوس



شکل (۱۰): جابجایی نسبی تاج سد کوینا

همانطوری که مشخص است جابجایی نسبی تاج سد در مدل سازی صورت گرفته تقریباً منطبق بر جابجایی نسبی مرجع می باشد. بنابراین می توان نتیجه مدل سازی را قابل قبول ارزیابی نمود.

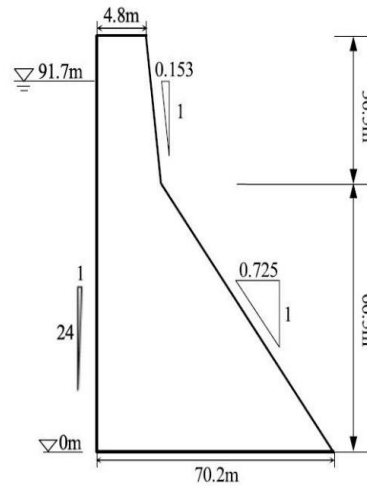
#### صحت سنجی مدل سازی درز

حال جهت تایید روند صحیح مدل سازی درزه در نرم افزار آباکوس، سازه مکعبی منشوری شکل ارائه شده در مرجع هوهبرگ<sup>۳</sup> (۱۹۹۰) شامل درزه مورب تحت فشار قائم مطابق شکل (۱۱)، در نرم افزار آباکوس به صورت شکل (۱۲) مدل سازی گردید. مشخصات مصالح و درزه در این مثال مطابق جدول (۷) می باشد.

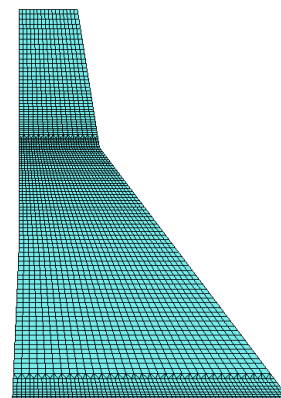
جدول (۷): مشخصات مکانیکی مدل منشوری درزه دار

اندازه	پارامتر
$K_c = 1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$	مدول الاستیسیته
$\theta = 0$	ضریب پواسون
$c = 0$	چسبندگی
$\mu = 1$	ضریب اصطکاک
$F_t = 0$	مقاومت کششی
$q = 1640 \text{ N/m}^2$	بارگسترده
$K_n = 1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$	ضریب سختی نرمال

نسبی حاصل از تحلیل این سد با مرجع (کالایر<sup>۱</sup> و کاراتون<sup>۲</sup>، ۲۰۰۵) مورد مقایسه قرار گرفته است. لازم به ذکر است، با توجه به این که مشخصات مصالح و نوع مدل سازی انجام شده با مشخصات موجود در مرجع یکسان نمی باشد بدیهی است که دو نمودار جابجایی نسبی نمی تواند کاملاً بر هم منطبق باشد، تنها هدف از این مدل سازی بررسی صحت و سقم کلیات مدل سازی می باشد. جابجایی نسبی مربوط به مدل سازی و مرجع در شکل (۱۰) ارائه و مورد مقایسه قرار گرفته است.



شکل (۸): مشخصات هندسی سد کوینا



تطابق بسیار خوبی با یکدیگر دارند. بنابراین می‌توان گفت نرم‌افزار آباکوس برای مدلسازی درزه مناسب بوده و نتایج حاصل از آن قابل استناد می‌باشد.

ضریب سختی مماسی	$K_s = 5 \times 10^3 \text{ N/m}^2$
-----------------	-------------------------------------

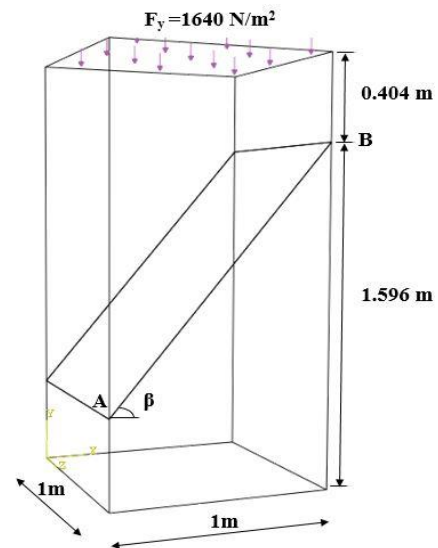
جدول (۸): مقایسه نتایج مدل عددی و مدل تحلیلی

مدل عددی	مرجع	پارامتر
-۰/۰۵۲۹۸	-۰/۰۵۱۸۹	$\delta_x \text{ (cm)}$
۸۰۳/۴۸	۸۰۷/۲۳	$\sigma_n \text{ (N/m}^2\text{)}$
۶۷۲/۹۸	۶۷۷/۳۴	$\tau_s \text{ (N/m}^2\text{)}$

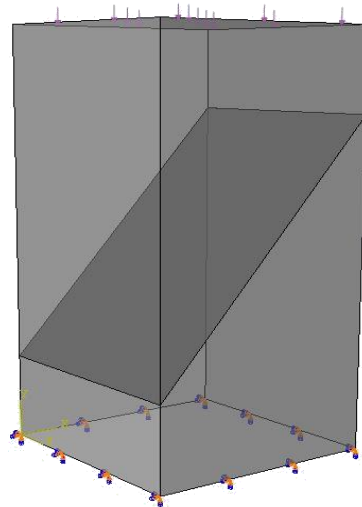
در مطالعه حاضر، نامگذاری مدل‌ها، جهت تفکیک و سهولت در شناسایی، مدلی را که در آن درزه به صورت قائم مدل گردیده مدل ۹۰ درجه نامیده و مدل‌هایی که درزه‌های آن‌ها در سمت چپ درزه قائم با شیب‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه قرار دارد را به ترتیب با نام‌های مدل منفی ۱۵ درجه، مدل منفی ۳۰ درجه و مدل منفی ۴۵ درجه شناخته می‌شود و در سه مدل دیگر که درزه آن‌ها در سمت راست درزه قائم، با شیب‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه نسبت به این درزه قرار دارد، به ترتیب بصورت مدل مثبت ۱۵ درجه، مدل مثبت ۳۰ درجه و مدل مثبت ۴۵ درجه نامگذاری شده است.

### نتایج تحلیل

در این بخش به بررسی تأثیر وجود درزه و ترک در لایه‌های سنگی واقع در تکیه‌گاه سیستم سد- مخزن- فونداسیون بر پاسخ لرزه‌ای سازه سد بتنی وزنی پرداخته می‌شود. به عنوان مطالعه موردی سد پایین‌فالت با نرم افزار آباکوس بصورت دوبعدی مدل گردیده و تحلیل دینامیکی به روش ضمنی با اعمال مؤلفه‌های افقی شتاب‌نگاشت زمین‌لرزه سنترو و با در نظر گرفتن اثرات بارگذاری‌های استاتیکی، شامل نیروی وزن سد و نیروی هیدرواستاتیک مخزن تحلیل با در نظر گرفتن اندرکنش



شکل (۱۱): هندسه‌المان منشوری درزه‌دار

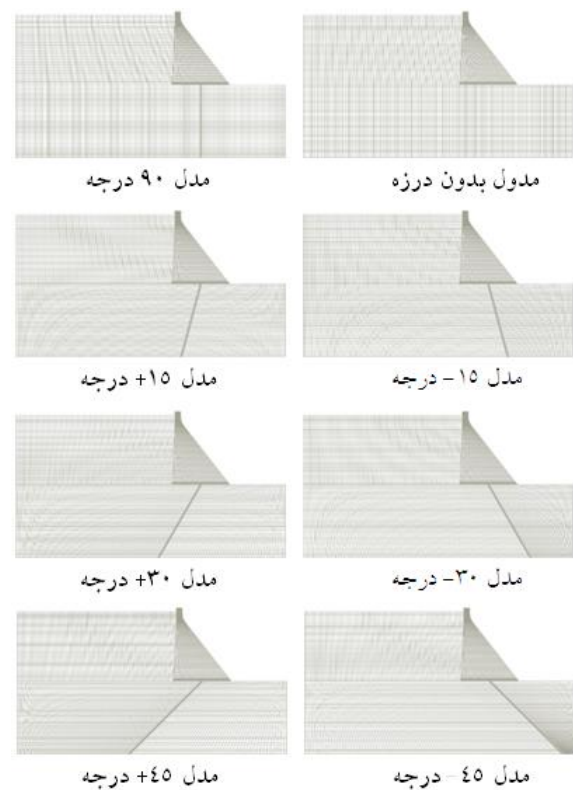


شکل (۱۲): مدل المان محدود مثال صحت‌سنجی در نرم‌افزار آباکوس

نتایج حاصل از مدل عددی با نتایج حل تحلیلی ارائه شده در مرجع در جدول (۸) مقایسه گردیده است. در این جدول  $\sigma_n$  و  $\tau_s$  به ترتیب متوسط تنش‌های نرمال و برشی در نقاط گوس و  $\delta_x$  جابجایی نسبی نقاط A و B در امتداد محور X می‌باشد. همانطوری که ملاحظه می‌گردد نتایج

ندارد. تصور بر این است که نیروی وزن مخزن دلیل اصلی این اتفاق بوده و این نیرو مانع باز و بسته شدن شدید درزه‌ها می‌شود. ولی وجود درزه‌های منفی تأثیرهای متفاوتی بر جابجایی نسبی تاج سد دارد به طوری که وجود درزه ۱۵- درجه سبب کاهش جابجایی نسبی تاج سد شده و با افزایش شیب، مقدار جابجایی نیز افزایش یافته بطوریکه در درزه ۴۵- درجه مقدار جابجایی ماکزیمم تاج سد بشدت افزایش یافته و عدد مشخصی حاصل نگردید، بطوریکه حاکی از ناپایداری و گسیختگی کلی سازه سد در این حالت می‌باشد. با توجه به بررسی تأثیر تغییر زاویه امتداد درز بر پاسخ دینامیکی غیرخطی سد بتنی در تحقیق حاضر و نتایج حاصل برای جابه‌جایی ماکزیمم تاج سد، که در جداول (۹) ارائه گردیده است، می‌توان گفت تغییر امتداد درز از حالت مثبت (تمایل درز به سمت بالادست) نسبت به حالت عدم وجود درز در فونداسیون تأثیر قابل ملاحظه‌ای نداشته و حتی موجب کاهش جزئی در تغییرمکان تاج سد گردیده است، این شاید به دلیل امکان جابه‌جایی دو بخش درز و افزایش میرایی سیستم بدلیل این ایجاد امکان چنین جابه‌جایی می‌باشد ولی از طرفی بدلیل اینکه برآیند نیروهای وارده در جهت عمود بر درز می‌باشند افزایش زاویه تمایل درز موجب ناپایداری کلی سیستم نگردیده است. ولی در زاویه‌های تمایل به حالت منفی (امتداد درز به سمت پایین دست) وجود درز موجب کاهش بیشتر تغییرمکان تاج سد گردیده است، که این موضوع به همان دلیل ایجاد مکانیزمی در جهت استهلاک انرژی در مدل عددی با معرفی درز می‌باشد و لی چون در این حالت جابه‌جایی درز بیشتر است تأثیر بیشتری در کاهش تغییرمکان تاج سد داشته است، ولی با افزایش امتداد درز به ۴۵- درجه گسیختگی ناگهانی سد و ناپایداری کلی حاصل گردیده است، که این پدیده بدلیل همراستایی برآیند نیروهای وارده از بخش فوقانی به سطح درز می‌تواند قابل توجیه باشد.

میحط‌های درگیر صورت گرفته است. جهت بررسی تأثیر درزه‌های موجود در تکیه‌گاه بر پاسخ لرزه‌ای سد بتنی وزنی، هشت نوع مدل‌سازی مطابق شکل (۱۳) صورت گرفته است. همانطوری که ملاحظه می‌گردد هفت مدل دارای درزه در تکیه‌گاه بوده و یک مورد به صورت بدون درزه مدل‌سازی شده است که در همه مدل‌های درزه‌دار محل شروع درزه‌ها در تکیه‌گاه، از وسط کف سد می‌باشد.

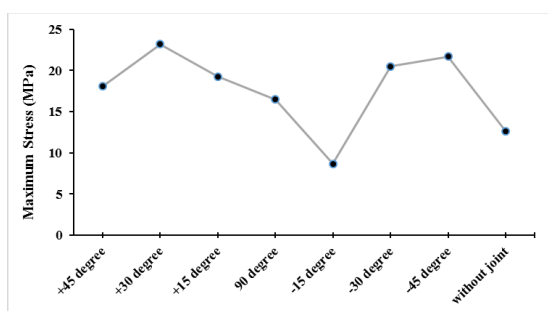


شکل (۱۳): مدل‌های مختلف فونداسیون‌های مدل‌سازی شده

#### مقایسه تغییرمکان تاج سد

جهت بررسی و مطالعه دقیق‌تر تأثیر وجود درزه و شیب آن در تکیه‌گاه بر جابجایی نسبی تاج سد، ماکزیمم مقدار آن برای مدل‌های مختلف در جدول (۹) نیز ارائه گردیده است. همانطوری که ملاحظه می‌گردد وجود درزه‌های مثبت و نود درجه در حالت کلی تأثیری بر جابجایی نسبی تاج سد

سد شروع به کاهش می‌کند و برای درزه‌های منفی در ابتدا وجود درزه با زاویه ۱۵- درجه سبب کاهش تنش ماکزیمم گردیده، سپس با افزایش زاویه، مقدار تنش ماکزیمم نیز افزایش یافته است.



شکل (۱۴): مقایسه ماکزیمم تنش اصلی کششی ایجاد شده در بدنه سد برای شرایط مختلف درزه در فونداسیون

#### بررسی گسیختگی المان های بدنه سد

در شکل (۱۵) کانتورهای آسیب کششی بدنه سد برای مدل‌های مختلف ارائه شده است. این کانتورها نشان می‌دهند که وجود درزه‌های مثبت، تأثیر چندانی در شدت و محل ایجاد ترک نسبت به مدل بدون درزه را ندارند و در تمام این حالت‌ها اثری از ترک در ناحیه گردن سد، که حساس‌ترین قسمت به لحاظ خرابی و گسترش ترک می‌باشد، مشاهده نشده است این در حالی است که در درزه‌های منفی این چنین نبوده و کانتورهای توزیع ترک، نسبت به حالت بدون درزه بسیار متفاوت می‌باشند بطوری که در مدل درزه ۱۵- درجه، ترک در قسمت تحتانی سد نسبت به مدل بدون درزه به شدت افزایش یافته ولی همچنان در ناحیه گردن سد هیچ‌گونه ترکی مشاهده نمی‌گردد این در حالی است که در مدل‌های ۳۰- و ۴۵- درجه بدنه سد از ناحیه گردن به شدت دچار ترک خوردگی شده است.

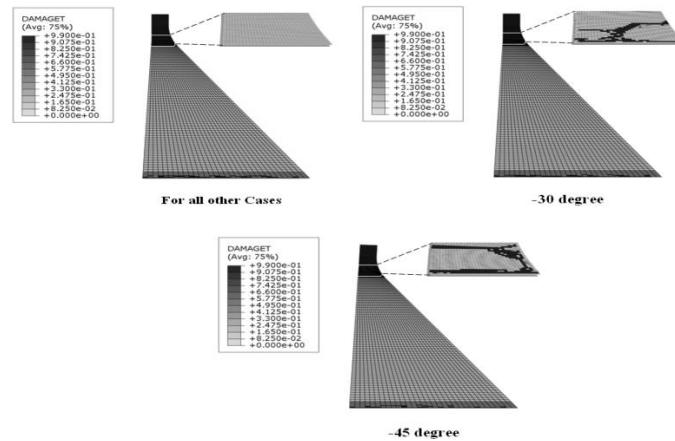
#### بررسی وضعیت توزیع تنش در بدنه سد

در این بخش به بررسی تأثیر زاویه درزه‌های موجود در فونداسیون، بر ماکزیمم تنش ایجاد شده در بدنه سد پرداخته می‌شود.

جدول (۹): ماکزیمم تغییر مکان تاج سد برای مدل‌های مختلف

شرایط درزه در فونداسیون	ماکزیمم تغییر مکان تاج سد (cm)
بدون درزه	۵/۱۲
+۴۵	۵/۰۳
+۳۰	۵/۰۷
+۱۵	۵/۰۹
۹۰	۵/۲۴
-۱۵	۳/۲۴
-۳۰	۴/۵۲
-۴۵	-

در شکل (۱۴) ماکزیمم تنش اصلی کششی ایجاد شده در بدنه سد در تمامی مدل‌ها با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته شده است. همانطوری که ملاحظه می‌گردد در حالت کلی تأثیر درزه‌های مثبت در افزایش مقدار تنش ماکزیمم در بدنه سد بیشتر از درزه‌های منفی می‌باشد. همچنین شکل و نحوه تأثیر درزه‌های مثبت و منفی، بر ماکزیمم تنش ایجاد شده در بدنه سد با یکدیگر متفاوت می‌باشد. با توجه به شکل می‌توان گفت که وجود درزه‌های مثبت و نود درجه در فونداسیون در حالت کلی سبب افزایش تنش ماکزیمم نسبت به حالت بدون درزه می‌شود، به طوری که با افزایش زاویه درزه، مقدار تنش ماکزیمم نیز افزایش می‌یابد. ولی همانطوری که مشخص است این افزایش بعد از زاویه ۳۰+ درجه متوقف شده و تنش ماکزیمم در بدنه



شکل (۱۵): بررسی چگونگی توزیع المان های گسیخته شده در بدنه سد برای شرایط مختلف درزه در فونداسیون

### جمع بندی و نتیجه گیری

در مقاله حاضر با بکارگیری مدل عددی و نرم افزار آباکوس به بررسی اثرات وجود درزه و ناپیوستگی در فونداسیون سنگی بر رفتار دینامیکی سدهای بتنی وزنی پرداخته شده است. برخی از اهم نتایج حاصل از تحقیق حاضر را می توان بشرح زیر خلاصه نمود:

- ۱- کانتورهای آسیب کششی بدنه سد نشان می دهند که وجود درزه های مثبت، تأثیر چندانی در شدت و محل ایجاد ترک نسبت به مدل بدون درزه را ندارند و در تمام این حالت ها اثری از ترک در ناحیه گردن سد، که حساس ترین قسمت به لحاظ خرابی و گسترش ترک می باشد، مشاهده نشده است در حالی که در درزه های منفی این چنین نبوده و کانتورهای توزیع ترک، نسبت به حالت بدون درزه بسیار متفاوت می باشند بطوری که در مدل ۱۵- درجه، ترک خوردگی در قسمت تحتانی سد نسبت به مدل بدون درزه به شدت افزایش یافته ولی همچنان در ناحیه گردن سد هیچ گونه اثری از ترک خوردگی وجود ندارد در حالی که در هر دو مدل ۳۰- و ۴۵- درجه، بدنه سد از ناحیه گردن به شدت دچار ترک خوردگی شده است. نحوه گسترش ترک در ناحیه گردن سد برای این دو مدل متفاوت می باشد بطوریکه در مدل ۳۰- درجه محل ترک خوردگی از قسمت پایین دست

گردن سد در ثانیه ۱۱/۲۴ شروع شده و به سمت بالا دست ادامه می یابد این در حالی است که در مدل ۴۵- درجه، محل شروع ترک در ثانیه ۶/۵۰ از سمت بالا دست به سمت پایین دست گسترش یافته و شدت آن نسبت به مدل ۳۰- درجه به مراتب بیشتر است.

۲- در حالت کلی تأثیر درزه های مثبت در افزایش مقدار تنش ماکزیمم در بدنه سد بیشتر از درزه های منفی می باشد و وجود درزه های مثبت و نود درجه در فونداسیون سبب افزایش تنش ماکزیمم نسبت به حالت بدون درزه می شود، به طوری که با افزایش زاویه درزه، مقدار تنش ماکزیمم نیز افزایش می یابد. ولی این افزایش بعد از زاویه ۳۰+ درجه متوقف شده و تنش ماکزیمم در بدنه سد شروع به کاهش می نماید. در درزه های منفی تغییرات مقدار تنش ماکزیمم نسب به تغییر زاویه منظم نمی باشد بطوریکه وجود درزه با زاویه ۱۵- درجه سبب کاهش تنش ماکزیمم گردیده، سپس با افزایش زاویه، مقدار تنش ماکزیمم نیز افزایش می یابد.

۳- نتایج نشان می دهند که وجود درزه های مثبت و نود درجه در حالت کلی تأثیری بر جابجایی نسبی تاج سد ندارند. تصور بر این است که نیروی وزن مخزن دلیل اصلی این اتفاق بوده و این نیرو مانع از باز و بسته شدن شدید درزه ها می شود. ولی وجود درزه های منفی تأثیرهای

قوسی، "مجله علمی-پژوهشی عمران مدرس، دوره یازدهم، شماره ۱.  
۱۱- یزدانی، م.، یزدانی، س.، احمدی، م.ت.، (۱۳۸۶)، " بررسی تأثیر رفتار هیدرومکانیکی بر پایداری توده سنگ درزه دار تکیه‌گاه‌های سدهای بتنی قوسی"، سومین کنفرانس مکانیک سنگ ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

12- Bhattacharjee, S.S., Lager, P., (1994), "Application of NLFM Models to Predict Cracking in Concrete Gravity Dams", Engineering ASCE, PP. 1255-1271.

13- Calayir, Y., Karaton, M., (2005), "A Continuum Damage Concrete Model for Earthquake Analysis of Concrete Gravity Dam-Reservoir Systems", Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, PP. 857-869.

14- Hohberg, J.M., (1990), "A Note on Squirious Oscillations in FEM Joint Elements", Earthquake Engineering and Structure Dynamics, Vol. 19, PP. 349-358.

15- Izadinia, M., Ahmadi, T., (2001), "Vertical Contraction Joint Models for Nonlinear Dynamic Analysis of Concrete Arch Dam", Journal of Esteglal, Vol. 19, No. 2, PP. 79-96.

16- Londe, P., (1987), "The Malpasset Dam Failure", Engineering Geology, 24 (1), pp. 295-329.

17- Maurenbrecher, M., (2008), "Analysing the Analysis of the Malpasset Arch Dam Failure of 1959", Geomechanics international, Reprinted from Newsletter, PP. 58-62.

18- Mgalobelov, Yu, B., (1995), "Computational Studies of Rock Foundation of Arch Dams", Proceeding International Conference Rock Mechanics, Tokyo, Japan, PP. 75-87.

19- Priscu, R., Popvici, A., Stematiu, D., Stere, C., (1980), "Earthquake Engineering for Large Dams", John Wiley & Sons.

20- Robert, V., Proctor, M.E., Thomas, L., White, P.E., (1997), "Rock Tunneling with Steel Supports", Chapter 2.  
21- Serafim, J.L., (1984), "Safety of Dams", Balkema.

22- Wang G., Wang Y., Lu W., Zhou W., Zhou C., (2015) "Integrated duration effects on seismic performance of concrete gravity dams using linear and nonlinear evaluation methods", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 79, PP. 223-236

متفاوتی بر جابجایی نسبی تاج سد دارد بطوری که وجود درزه ۱۵- درجه سبب کاهش جابجایی نسبی تاج سد شده و با افزایش شیب، مقدار جابجایی نیز افزایش می‌یابد بطوری که در درزه ۴۵- درجه مقدار جابجایی بشدت افزایش یافته و بطوریکه حاکی از ناپایداری سازه سد در این حالت می‌باشد.

## مراجع

۱- آقازادگان، الف.، مرادلو، ج.، جوانمرد، م.، (۱۳۹۳)، " بررسی رفتار لرزه‌ای سدهای بتنی قوسی با احتساب ضعف موضعی در تکیه‌گاه"، هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، ۱۷-۱۸ اردیبهشت، بابل.

۲- حداد، م.، (۱۳۸۷)، " بررسی تاثیر CFRP در ناحیه مستعد تشکیل مفصل پلاستیک در پایه پل‌های بتن آرمه تحت بارگذاری یکنواخت"، چهاردهمین کنفرانس دانشجویان مهندسی عمران سراسر کشور، دانشگاه سمنان، سمنان.

۳- حریت، آ.، (۱۳۸۸)، "آنالیز رفتارنگاری سداینده رود در دوران بهره برداری با استفاده از نتایج ابزار دقیق"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان.

۴- خردرنجبر، م.، (۱۳۹۰)، " تحلیل پایداری سدهای قوسی بتنی نسبت به تغییرات مدول الاستیسیته در اثر تزریق بتن در پی و جناحین" سومین همایش ملی عمران.

۵- خرقانی، س.، خردرنجبر، م.، (۱۳۸۶)، " تحلیل اثر تغییرات پارامترهای رفتاری توده سنگ پی بر پایداری سدهای قوسی بتنی"، کنگره مهندسی عمران دانشگاه تبریز.

۶- صدقیانی، م.ح.، حبیبیان، ک.، (۱۳۷۹)، " بررسی اثر وضعیت ناپیوستگی‌ها بر اندرکنش سد قوسی با پی سنگی"، چهارمین کنفرانس سدسازی ایران، تهران.

۷- شریف‌پور، ه.، فرخ، م.، (۱۳۹۵)، " بررسی پایداری سدهای بتنی وزنی با استفاده از اجزاء محدود به روش کاهش مقاومت"، فصلنامه سد و نیروگاه برقابی ایران، دوره ۳، شماره ۹.

۸- علیجانی اردشیر، م.، نوایی‌نیا، ب.، احمدی، م.ت.، (۱۳۹۵)، " تحلیل غیر خطی سدهای بتنی وزنی تحت حرکت نرمال ریز گسل ساختگاه"، نشریه مهندسی سازه و ساخت، دوره ۳، شماره ۲، صفحه ۱۳۳-۱۵۵.

۹- فهیمی‌فر، الف.، احمدوند، م.، عبدالمالکی، آ.، قدمی، ح.، (۱۳۹۲)، " بررسی دقیق اثر درزه‌داری بر روی ظرفیت باربری پی سنگی تحت اثر بار سدهای وزنی"، اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل.

۱۰- یزدانی، س.، یزدانی، م.، احمدی، م.ت.، (۱۳۹۰)، " اهمیت مشخصات هندسی درزه‌ها در میزان ایمنی تکیه‌گاه سدهای بتنی