ارزیابی خرابی لرزه ای سد بتنی دوقوسی با استفاده از روش المان محدود توسعه یافته و مدل ترک چسبنده بتن (مطالعه موردی: سد کارون III)

فصلنامه علمی تخصصی
مهندسی و مدیریت ساخت
سال اول، شماره دوم، تابستان ۱۳۹۵

سجاد پیربوداقی *
دانشجوی دکتری مهندسی عمران دانشگاه تبریز
رضا تاری نژاد
دانشیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تبریز
محمدتقی اعلمی
استاد دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تبریز

نویسنده مسئول: **سجاد پیربوداقی**
آدرس ایمیل:
S.pirboudaghi@gmail.com

چکیده:

برای شبیه سازی آسیب و خرابی سد بتنی دوقوسی تحت خطرات طبیعی مانند زلزله، نیاز به روش های دقیق عددی است تا اثرات آن به صورت صحیح و بهینه اعمال شود. بعبارت دیگر تهیه مدل عددی غیرخطی از سازه که بتواند رفتار آن را توجیه کند بسیار با اهمیت خواهد بود. در این تحقیق ارزیابی خرابی لرزه‌ای سد بتنی دوقوسی کارون III با استفاده از روش المان محدود توسعه یافته و مدل ترک چسبنده بتن تحت تحریک لرزه ای قوی انجام می گیرد و با روش المان محدود مرسوم مقایسه می شود. نتایج نشان می دهد رفتار سد سالم و آسیب‌دیده تا قبل از ایجاد ترک بسیار شبیه به هم می‌باشد. ولی پس از گسترش ترک متفاوت خواهد بود. در حالت کلی ترک‌خوردگی باعث افزایش تغییرمکان های سد و کاهش تنش در بدنه به خصوص اطراف ترک می شود. همچنین الگوی ترک‌خوردگی کلی بدنه سد حین زلزله پیش‌بینی شده و قابل بررسی است تا نقاط ضعف آن تقویت شود.

کلمات کلیدی: *سد بتنی، ترک چسبنده، روش المان محدود توسعه یافته، خرابی، الگوی ترک خوردگی.*

Seismic Damage Assessment Of Concrete Dam Two Arch With Using Developed The Finite Element Method And Leave The Sticky Concrete Model (Case Study: Karun III)

V. 01 No. 02 - Summer 2016

Sajjad Pirboudaghi*
P.HD. Student, Department of Civil Engineering, Tabriz University, Iran
Reza Tarinejad
professor, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tabriz University, Iran
Mohammad Taghi Aalami
professor, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tabriz University, Iran

Corresponding author:
Sajjad pirboudaghi

Email address:
S.pirboudaghi@gmail.com

۱- مقدمه

خرابی در مقایسه‌ی دو وضعیت متفاوت از یک سیستم معنا خواهد داشت که یک وضعیت به عنوان حالت بدون نقص و وضعیت دیگر به عنوان حالت آسیب‌دیده و غیر سالم خواهد بود. از این رو، برای تشخیص اثرات آسیب در یک سازه بزرگ و پیچیده، نیاز به مدلسازی دقیق عددی است تا نتایج بدست آمده از این مدل غیرخطی، با حالت بدون نقص مورد مقایسه و ارزیابی قرار گیرند. برای مدلسازی عددی سازه ترک خورده نیاز به روش های دقیقی است تا اثرات آن به صورت صحیح و بهینه اعمال شود. بعبارت دیگر تهیه مدل عددی از سازه که بتواند رفتار آن را توجیه کند بسیار با اهمیت خواهد بود. روش های گوناگونی در این زمینه وجود دارد که محبوب‌ترین آنها المان محدود می‌باشد. اما مدلسازی ناپیوستگی ها و از جمله ترک همواره از مشکلات موجود در آن بوده است.

بنابراین براي حل این مشکل بلیتسکو و همکارانش (۱۹۹۴)روش «بدون المان » را که در آن فقط گره در محیط مدل درنظر گرفته مي‌شد، بنیانگذاري کردند [۱, ۲]. استفاده از مفهوم «تفکیك پیوستگي » که ملنک و بابوسکا [۳] و دات و اودن [۴] در سال ۱۹۹۶ ارائه کردند چشم‌انداز جدیدي براي مدل کردن ترك بوجود آورد و در سال ۱۹۹۹، موئس و همکارانش روشي بر پایهٔ المان محدود که نیاز به مش‌بندي مجدد نداشت را براساس مفهوم تفکیك پیوستگي بنیانگذاري کردند [۵].

در سال ۲۰۰۰ داکس و همکارانش با تکمیل روش موئس، روشي به نام المان محدود توسعه یافته را بنا نهادند [۶]. براي اولین بار کاربرد روش المان محدود توسعه یافته در مدل کردن ترك هاي سه بعدي توسط سوکومار و همکارانش ارائه شد [۷]. پن و همکاران کارایی روش های المان محدود توسعه یافته چسبنده، المان محدود با روابط خرابی پلاستیک و المان محدود با رابطه الاستوپلاستیک دراگرپراگر را برای ترک خوردگی لرزه ای سدهای بتنی بررسی کردند [۸].

ژانگ و همکاران در سال ۲۰۱۳ با اجرای روش المان محدود توسعه‌یافته توسط نرم افزار آباکوس، ترک خوردگی لرزه ای سدهای بتنی با ترک اولیه مثل سد کوینا را در حالت های مختلف ترک یکطرفه و دوطرفه بررسی کردند. نتایج تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد [۹]. پیربوداقی و همکاران در سال ۲۰۱۶ با ترکیب روش المان محدود توسعه یافته و تبدیل موجک، الگویی کارآمد برای پایش سلامت سازه ای سد بتنی وزنی کوینا ارائه کردند [۱۰].

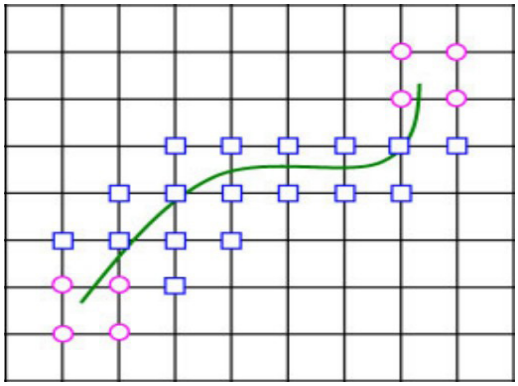
در این تحقیق ارزیابی آسیب و خرابی لرزه ای سد بتنی دوقوسی کارون III به عنوان یکی از سدهای بلند کشور در حالت سه بعدی با استفاده از روش المان محدود توسعه یافته بر مبنای مدل ترک چسبنده بتن انجام می گیرد. در واقع با استفاده از این روش اثرات غیرخطی بودن سازه به صورت صحیح و بهینه در نظر گرفته می شود تا بتوان مدل عددی کارآمدی برای شبیه سازی رفتار آن تحت تحریک قوی لرزه ای ارائه کرد.

۲- روش المان محدود توسعه یافته

در روش المان محدود توسعه یافته با استفاده از دسته ای از توابع غنی‌سازی که با توجه به هندسه و فیزیک مساله انتخاب می شوند، توابع شکل عادی المان محدود غنی سازی می شوند. در واقع تنها توابع خاصي بر مبناي نوع ناپیوستگي به حل عددي استاندارد اضافه مي‌شوند. براي مدل کردن ترك، از يك تابع براي ایجاد ناپیوستگي در امتداد طول ترك و از تابع دیگري براي ایجاد شرایط تکینه در المان نوك ترك استفاده مي‌گردد. در نتیجهٔ اعمال توابع، درجهٔ آزادي گره‌هاي اطراف المان نوك ترك و گره‌هاي اطراف طول ترك افزایش مي‌یابد، که به آن غني‌سازي گرهي مطابق رابطه ۱ گفته مي‌شود:

$$u = \sum_{I=1}^{N} N_I \left(\sum_{J=1}^{M} \psi_I a_J \right) \qquad (۱)$$

در رابطه ۱، u جابجایي گره ، و NI تابع شکل در روش المان محدود استاندارد، توابع غني‌ساز و aJ ضرایب مجهول مرتبط با توابع غني‌ساز است که در نهایت توسط این روابط، ضرایب مجهول aJ به درجات آزادي گره‌هاي اطراف ترك اضافه مي‌شوند. مطابق شکل ۱، براي تعیین نوع تابع مناسب جهت غني‌سازي، محل برخورد ترك با اضلاع المان ها مشخص مي‌گردد اگر ترك در دو ناحیه اضلاع يك المان را ببرد از تابع پله‌اي واحد جهت غني‌سازي گره‌هاي اطراف آن المان استفاده خواهد شد (گره‌های مربعی) و اگر ترك تنها يكي از اضلاع المان را قطع کند یا به عبارت دیگر نوك ترك داخل المان باشد براي گره‌هاي اطراف آن المان غني‌سازي به روش تابع تکینه انجام خواهد گردید (گره های دایره ای).

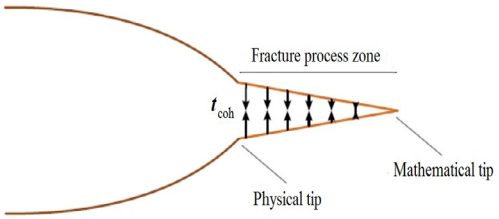


شکل ۱ – نمایش نحوه غنی سازی گره ها در روش المان محدود توسعه یافته

برای یافتن ماتریس سختی هر المان، فقط باید با توجه به معیار غنی‌سازی ارائه شده، تأثیر درجات آزادی افزوده شده به هر گره در ابعاد ماتریس [B] در نظر گرفته شود. بنابراین سهم هر سه نوع کلی گره به طور جداگانه در روش المان محدود توسعه یافته، درون ماتریس [B] به دست آورده می–شود که با توجه به نوع گره‌های اطراف، روی مرز یا داخل هر المان می‌توان ماتریس کلی [B] را برای آن المان بدست آورد. سپس ماتریس سختی مربوط به آن المان مشخص می‌گردد که در ماتریس سختی کل مدل مونتاژ می‌شود. بدیهی است ابعاد ماتریس سختی المان که وابسته به ابعاد ماتریس [B] می‌باشد، متفاوت خواهد بود، اما از لحاظ ریاضی به راحتی قابل اثبات است که همواره ماتریس سختی برای هر نوع المان متقارن خواهد بود که در نتیجه ماتریس سختی کل سازه نیز متقارن می‌شود. بنابراین با روش المان محدود توسعه یافته، ترک به صورت مجازی و مستقل از مش مدل می‌شود و نیاز به استفاده از مش ریز، المان تکینه در اطراف نوک ترک و ایجاد مش مجدد در بررسی رشد ترک نخواهد بود [۱۱].

۳- مدل ترک چسبنده

در حالتی که ناحیه فرآیند شکست در مقایسه با طول ترک و ابعاد مسئله قابل صرفنظر کردن نباشد، مثل مصالح نیمه ترد نظیر مصالح خاکی و بتن، استفاده از مدل مکانیک شکست الاستیک خطی منطقی نیست. بمنظور توصیف فرآیندهای غیرخطی که در محدوده نوک ترک رخ می دهد، بارنبلات در سال ۱۹۶۲ [۱۲] و داگدایل در سال ۱۹۶۰ [۱۳] مدل ترک چسبنده را به عنوان جایگزینی برای مدل مکانیک شکست خطی مطرح نمودند. مدل ترک چسبنده، رفتار غیرخطی در ناحیه نوک ترک را به حساب آورده و تکینگی میدان تنش در نوک ترک را که یک فرض غیر واقعی مکانیک شکست الاستیک خطی می باشد اصلاح می کند. مطابق شکل ۲، نوک ترک در مدل ترک چسبنده به دو صورت تعریف می شود: یکی نوک ترک ریاضی که محلی است که در آن ناپیوستگی میدان جابجایی در مدل المان محدود توسعه‌یافته از بین می رود و دیگری نوک ترک واقعی که محلی است که در آن نیروی چسبنده در نوک ترک از بین می رود. در این راستا، معیار کشش جدایش بر مبنای مفهوم ترک چسبنده که در آن رفتار ماده تحت اعمال کشش و برش، به دو بخش قبل از جوانه زنی و آغاز شکست کامل ماده تقسیم می شود، همخوانی خوبی با رفتار مواد شبه ترد از جمله سنگ ها و مواد مصنوعی مانند بتن از خود نشان می دهد.



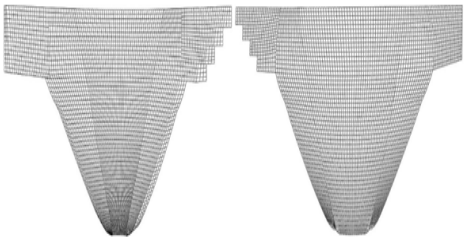
شکل ۲ – نوک ترک در مدل ترک چسبنده

۴- مدلسازی خرابی و رشد ترک سد کارون III

سد کارون III به عنوان یکی از بلندترین سدهای بتنی دوقوسی در حال بهره برداری کشور از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد. عملکرد مطابق انتظار این سازه و اطمینان از این مسئله، جایگاه ویژه ای در صنعت سدسازی کشور دارد. سد کارون III از نوع بتنی دوقوسی با طول تاج ۴۶۲ متر، عرض تاج ۵٫۵ متر، ارتفاع از پی ۲۰۵ متر و ضخامت در پی ۲۹٫۵ متر می باشد. نمایی از بدنه سد، مخزن و سازه‌های جنبی در شکل ۳ ارائه شده است.

شکل ۳ – نمایی از بدنه سد کارون III، مخزن و سازه‌های جنبی

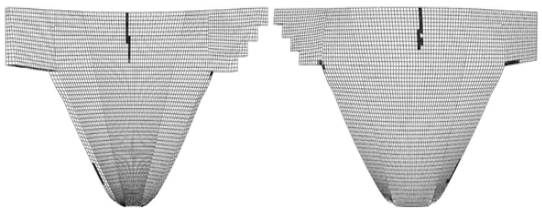
برای تحلیل سد از پارامترهای قبلاً بدست آمده که مبنای طراحی سد کارون III می باشند استفاده می شود. مدول الاستیسیته ۲۹٫۵ گیگاپاسگال، ضریب پواسون ۰٫۲، دانسیته بتن ۲۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و مقاومت نهایی فشاری بتن ۳۵ مگاپاسگال می باشد. میرایی سد به روش رایلی با نسبت میرایی بحرانی ۳ درصد با استفاده از فرکانس طبیعی اول و سوم سازه بدست آمده است. رفتار سد با استفاده از نرم افزار آباکوس ابتدا به صورت الاستیک خطی با المان C3D8R، گام زمانی ۰٫۰۱ و بطول ۱۰ ثانیه در نظر گرفته می شود. مدل المان محدود و مش بندی مناسب آن پس از حساسیت سنجی، بطوریکه الگوی ترک با مش ریزتر تفاوتی نکند و همچنین بررسی همگرایی نتایج در شکل ۴ ارائه شده است. شتابنگاشت اعمال شده براساس مولفه های افقی و قائم زلزله کوینا می باشد که با بزرگنمایی ۳ برابر وارد شده است. برای مولفه طولی و قائم از مولفه افقی و برای مولفه عرضی از مولفه قائم زلزله کوینا استفاده شده است. اعمال مولفه های زلزله و بزرگنمایی آن به صورتی بوده است که در نهایت ترک در داخل بدنه سد به دور از تکیه گاه اتفاق افتد. بدیهی است ترک میانی و در داخل بدنه نزدیک به تاج نسبت به ترک های دیگر خطرناک تر می باشد. لذا با سعی و خطا و اعمال مولفه های زلزله کوینا با بزرگنمایی و تغییر جهت اعمالی به بدنه سد کارون III این امر میسر شده است که نتیجه نهایی مطابق موارد اشاره شده اخیر است. بارهای استاتیکی شامل وزن و فشار آب هیدرواستاتیک است. برای آسیب و گسترش ترک از روش المان محدود توسعه یافته مطابق با مش بندی شکل ۴ استفاده می‌شود. مدل المان محدود توسعه یافته سد با توجه به مدل ترک چسبنده بر پایه خواص بتن آن ساخته می شود. با توجه به مقاومت مجاز کششی بتن بدنه، ماکزیمم تنش اصلی مطابق با معیار کشش جدایش، برابر ۳٫۷۶ مگاپاسگال می‌باشد. برآورد خرابی از نوع انرژی با انرژی شکست ۳۰۰ نیوتن بر متر در نظر گرفته شده است. ضریب ویسکوزیته برای چسبندگی پایدارسازی آسیب بمنظور همگرا کردن آنالیز غیرخطی برابر ۱۰-۶ است. در صورتی که در محلی از سد مقادیر تنش کششی به مقدار ماکزیمم تنش اصلی برسد، از آن ناحیه ترک‌خوردگی شروع شده و با نرخ برآورد خرابی گسترش پیدا خواهد کرد.



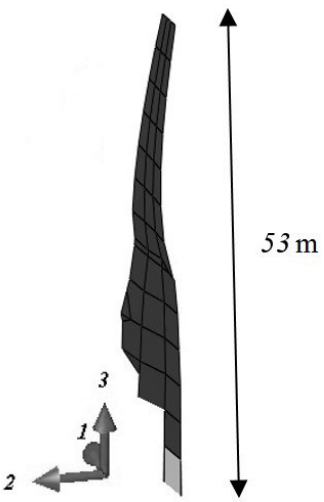
شکل ۴- مدل المان محدود سد کارون III

۵ – نتایج تحلیل سد سالم و روش اجزای چسبنده ترک توسعه یافته

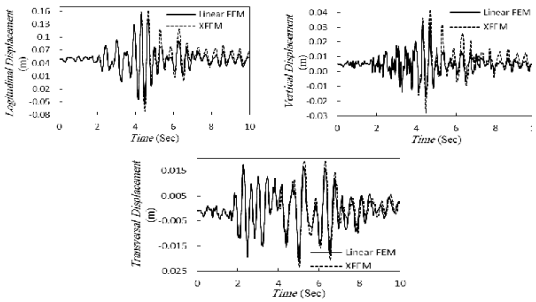
زلزله کوینا یکی از شدیدترین رکوردهای گزارش شده در سطح دنیا می‌باشد که باعث ایجاد ترک های شدید در سد بتنی وزنی کوینا شده است. مطابق شکل ۵، شتابنگاشت زلزله کوینا باعث ترک خوردگی بدنه سد و همچنین آسیب دیدگی موضعی در نواحی تکیه گاهی سد کارون III شده است. بنابراین با استفاده از تحلیل مدل المان محدود توسعه یافته سد، نواحی مستعد آسیب، ترک خورده و در داخل بدنه گسترش پیدا خواهد کرد و حتی ممکن است کل سازه دچار شکست و گسیختگی شود. لازم به ذکر است که اثر درزهای اجرایی در نظر گرفته نشده است. ترک خوردگی از ثانیه ۴٫۰۹ شروع شده و تا ثانیه ۴٫۱۴ منجر به رشد ترک ۵۳ متری در داخل بدنه سد می‌شود. در شکل ۶، هندسه سه بعدی ترک عمیق ایجاد شده در بدنه نشان داده شده است. بنابراین الگوی ترک‌خوردگی کلی بدنه سد کارون III حین زلزله پیش‌بینی شده و قابل بررسی است تا نقاط ضعف آن تقویت شود. در شکل ۷ مقایسه تغییرمکان عرضی، طولی و قائم نقطه وسط تاج سد تحت زلزله آورده شده است.



شکل ۵ – ترک های سد کارون III در رویه پایین دست و بالادست

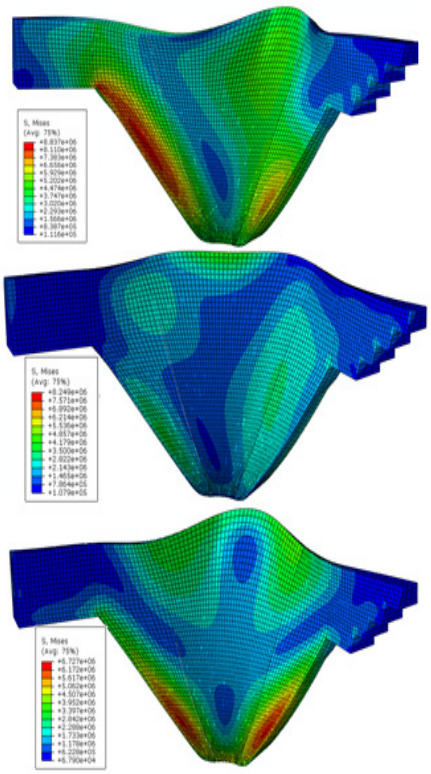


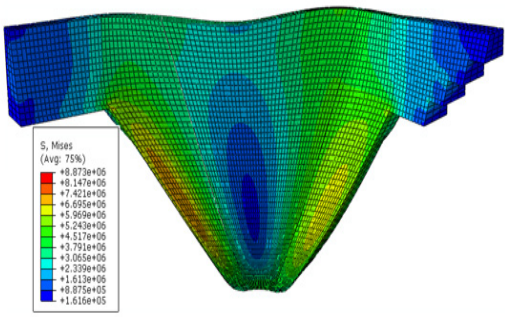
شکل ۶- هندسه سه بعدی ترک مرکزی سد کارون III



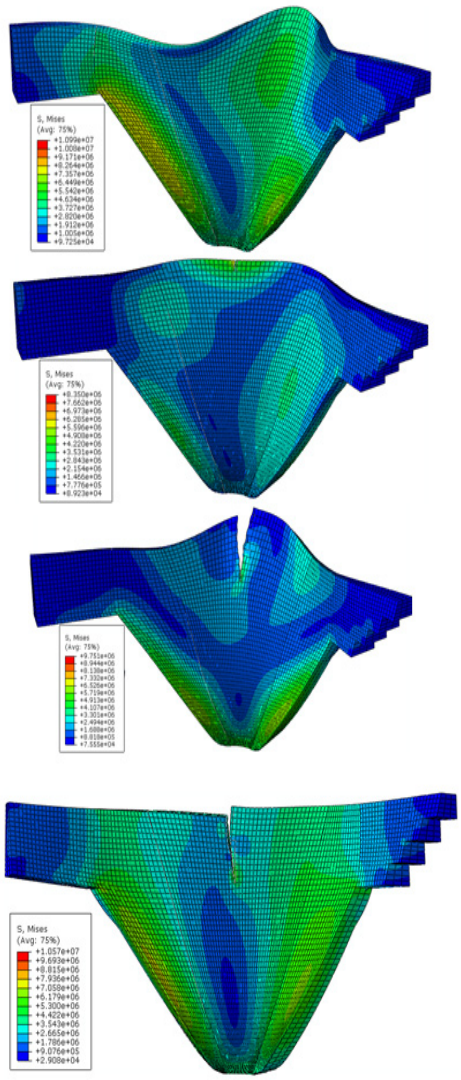
شکل ۷- مقایسه تغییرمکان نقطه وسط تاج سد

بیشترین محدوده تغییرمکان مربوط به حالت طولی می باشد در حالیکه محدوده تغییرمکان عرضی و قائم یکسان است. همچنین الگوی تغییرمکان طولی و قائم شبیه بهم می باشد، چراکه شتابنگاشت اعمالی زلزله در جهت طولی و قائم یکسان است. در حالیکه الگوی تغییرمکان عرضی متفاوت با دو تغییرمکان دیگر است. ماکزیمم تغییرمکان طولی، عرضی و قائم به ترتیب با تحلیل المان محدود، برابر ۰٫۱۵۱، ۰٫۰۲۱- و ۰٫۰۳۳ و با تحلیل المان محدود توسعه یافته بر مبنای مدل ترک چسبنده بتن، برابر ۰٫۱۶۳، ۰٫۰۲۳- و ۰٫۰۴۲ می باشد. ملاحظه می‌شود که رفتار سد سالم و آسیب‌دیده تا قبل از ایجاد ترک بسیار شبیه به هم می‌باشد. ولی پس از گسترش ترک متفاوت خواهد بود. در حالت کلی ترک‌خوردگی باعث افزایش تغییرمکان های سد شده است. در شکل ۸ و۹، به ترتیب مقایسه تنش در بدنه سد به روش المان محدود خطی و المان محدود توسعه یافته در لحظات ۲٫۲۹، ۴٫۱۴، ۴٫۵۵ و ۱۰ ثانیه ارائه شده است.





شکل ۸- مقایسه تنش در بدنه سد به روش المان محدود خطی به ترتیب در لحظات ۲٫۲۹، ۴٫۱۴، ۴٫۵۵ و ۱۰ ثانیه



شکل ۹- مقایسه تنش در بدنه سد به روش المان محدود توسعه یافته به ترتیب در لحظات ۲٫۲۹، ۴٫۱۴، ۴٫۵۵ و ۱۰ ثانیه

مطابق شکل ۸ و ۹، با استفاده از مدل المان محدود توسعه یافته سد، نواحی مستعد آسیب، ترک خورده و در داخل بدنه گسترش پیدا خواهد کرد تا اینکه سازه دچار ترک عمیق در قسمت میانی تاج شود. ملاحظه می شود مقادیر بیشینه تنش در حالت خطی بیشتر از حالت غیرخطی است. تنش پس از شروع آسیب و گسترش ترک تغییر می‌کند بطوریکه تنش کششی پس از آن به صورت کامل در اطراف ترک حذف می شود. بنابراین گسترش ترک باعث تغییر تنش در بدنه و کاهش آن می شود به نحوی که میزان تنش با توجه به آزاد شدن انرژی، در اطراف ترک نسبت

به بدنه بیشتر کاهش پیدا می‌کند. بعلاوه الگوی ترک‌خوردگی کلی بدنه سد حین زلزله پیش بینی شده و قابل بررسی است تا نقاط ضعف آن تقویت شود.

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق ارزیابی خرابی لرزه‌ای سد بتنی دوقوسی کارون III با استفاده از روش المان محدود توسعه یافته و مدل ترک چسبنده بتن تحت تحریک لرزه ای قوی انجام گرفت و با روش المان محدود مرسوم مقایسه شد. نتایج نشان می دهد مدلسازی ناپیوستگی ها و از جمله ترک از مشکلات موجود المان محدود می‌باشد. با وجود اینکه رفتار سد سالم (المان محدود) و آسیب‌دیده (المان محدود توسعه یافته) تا قبل از ایجاد ترک بسیار شبیه به هم می‌باشد، ولی پس از گسترش ترک کاملاً متفاوت خواهد بود. بطوریکه ترکی به عمیقی به ارتفاع ۵۳ متر در میانه سد ایجاد می شود. در حالت کلی ترک‌خوردگی باعث افزایش تغییرمکان های سد شده است که با توجه به ترک خوردگی و کاهش طلبیت سازه مورد انتظار است. همچنین کاهش تنش در بدنه به خصوص در اطراف ترک با توجه به آزاد شدن انرژی می شود. با استفاده از تحلیل مدل المان محدود توسعه یافته سد، رفتار سد حین زلزله قوی شبیه سازی می شود و الگوی ترک‌خوردگی کلی بدنه ناشی از زلزله بدست می آید که در این صورت می توان به تمهیدات بعدی برای تعمیر و بهسازی سازه اندیشید.

مراجع

[1] Belytschko, T., Y.Y. Lu, and L. Gu, Element free Galerkin methods. International journal for numerical methods in engineering, 1994. 37(2): p. 229-256.

[2] Fleming, M., et al., Enriched element-free Galerkin methods for crack tip fields. International journal for numerical methods in engineering, 1997. 40(8): p. 1483-1504.

[3] Melenk, J.M. and I. Babu ka, The partition of unity finite element method: basic theory and applications. Computer methods in applied mechanics and engineering, 1996. 139(1): p. 289-314.

[4] Duarte, C.A. and J.T. Oden, An h-p adaptive method using clouds. Computer methods in applied mechanics and engineering, 1996. 139(1): p. 237-262.

[5] Moes, N., J. Dolbow, and T. Belytschko, A Fnite Element Method for Crack Growth Without Remeshing. International Journal for Numerical Methods in engineering, 1999. 46(1): p. 131-150.

[6] C., D., et al., Arbitrary Cracks and Holes with the Extended Finite Element Method. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2000. 48(12): p. 1741-1760.

[7] Sukumar, N., et al., Extended finite element method for three dimensional crack modelling. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2000. 48(11): p. 1549-1570.

[8] Pan, J., et al., A comparative study of the different prop cedures for seismic cracking analysis of concrete dams. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011. 31(11): p. 1594-1606.

[9] Zhang, S., G. Wang, and X. Yu, Seismic cracking analysis of concrete gravity dams with initial cracks using the extended finite element method. Engineering Structures, 2013. 56: p. 528-543.

[10] S. Pirboudaghi, R.T., M. T. Alami,, 2D Seismic Cracking Identification of Concrete Gravity Dams Based on Extended Finite Element Method and Wavelet Transform. Modares Mechanical Engineering, 2016. 16(9): p. 1-11.

[11] Mohammadi, S., Extended finite element method: for fracture analysis of structures. 2008: John Wiley & Sons.

[12] Barenblatt, G.I., The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture. Advances in applied mechanics, 1962. 7(1): p. 55-129.

[13] Dugdale, D., Yielding of steel sheets containing slits. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1960. 8(2): p. 100-104.