

## تحلیل گسترش ترک در سدهای بتنی وزنی به روش ترک مجزا

رضا عطارنژاد ، استادیار دانشکده فنی ، دانشگاه تهران

علیرضا لهراسبی ، کارشناسی ارشد سازه های هیدرولیکی ، دانشکده فنی دانشگاه تهران

تلفن: ۶۱۱۲۲۷۳-۰۲۱ ، پست الکترونیکی: [ar\\_lohrasbi@yahoo.com](mailto:ar_lohrasbi@yahoo.com)

### چکیده:

در سازه‌ها ترک‌هایی وجود دارند که می‌توانند باعث ایجاد معایبی در سازه و یا کاهش عمر مفید آن گردند. طراحی دست بالا باعث صرف هزینه زیادی می‌شود و همچنین طراحی دست پایین پیامد شکست فاجعه انگیزی را به دنبال دارد. از جمله سازه‌های که بررسی ترک و ایمنی در آنها از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است، سدهای بتنی می‌باشد. بنابراین ما به روش‌هایی نیاز داریم که قابلیت نشان دادن ترک‌ها در سدهای بتنی را داشته باشد و همچنین بتواند در جهت پیشرفت ترک به کمک تئوری مکانیک شکست حرکت کند.

برای بررسی رخداد ترک و چگونگی گسترش آن دو روش اصلی وجود دارد که عبارتند از: روش ترک مجزا و روش ترک پخشی. در این مقاله مساله گسترش ترک در سدهای بتنی وزنی به روش ترک مجزا، مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین از برنامه‌ی اجزاء محدودی که جهت مدل سازی گسترش ترک بروش ترک مجزا در سدهای بتنی وزنی تهیه شده استفاده می‌شود.

**کلید واژه ها:** سد بتنی وزنی، شکست، گسترش ترک، ترک مجزا، ترک پخشی

### ۱- مقدمه

در سازه‌ها ترک‌هایی وجود دارند که می‌توانند باعث ایجاد معایبی در سازه و یا کاهش عمر مفید آن گردند. طراحی دست بالا باعث صرف هزینه زیادی می‌شود و همچنین طراحی دست پایین پیامد شکست فاجعه انگیزی را به دنبال دارد. پدیده شکست - بصورت ترک‌های مخرب در سازه‌ها - منشاء مسائلی در طراحی و آنالیز در زمینه های زیادی از مهندسی گردیده است. یکی از قسمت‌هایی که این شکست‌ها در آن اهمیت زیادی دارد مهندسی عمران بوده که ایمنی در ساخت و سازه‌های آن از اهمیت بسیاری برخوردار است. در سازه‌ها بر اثر پدیده شکست، ترک‌هایی رخ می‌دهند که می‌توانند

مقدمه‌ای برای ایجاد معایی در سازه و یا کاهش عمر مفید آن گردند. بنابراین تئوری مکانیک شکست بعنوان ابزاری برای تخمین پایداری بعضی از ترک‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش‌های معمول، بصورت طراحی دست‌بالا، جهت سهولت در طراحی، بالا باعث صرف هزینه زیادی می‌شود و همچنین طراحی دست‌پایین پیامد شکست فاجعه‌انگیزی را بدنبال دارد. در سال‌ها اخیر تلاش‌های زیادی برای توسعه مدل‌های عددی با رفتار مکانیکی سازه‌های مهندسی عمران و مصالح ترد صورت گرفته است. واضح است که پیچیدگی این مدل در یافتن مسیر ترک و گسترش آن می‌باشد.

## ۲- مدل سازی ترک

شکست یک شکل مهم از تغییر شکل و خرابی در پهنه سازه‌های بتنی است. در جهت دقت در پیش‌بینی رفتار شکست، اغلب لازم است تا تحلیل المان محدود صورت گیرد. از مهم‌ترین آیین‌نامه‌ها در زمینه تحلیل المان محدود در شکست بتن، آیین‌نامه شماره ۴۴۶ انجمن بتن آمریکا [6] می‌باشد. در این گزارش، دو روش عمده در تحلیل المان محدود مورد بررسی قرار می‌گیرد: روش پخشی و روش مجزا.

### ۲-۱- ترک پخشی:

ترک پخشی بر پایه دو گام اساسی استوار است: گام اول تعیین محل رخداد ترک اولیه بوده و گام بعدی تخمین مسیر ترک و جایگزینی آن با یک المان نرم تر است. روش ترک پخشی بر پایه یک مش المان محدود ثابت استوار است. در روش ترک پخشی، ترک خوردگی متناسب با رفتار مصالح بتون می‌باشد. در این روش ترک زمانی رخ می‌دهد که تنش به حد تنش خرابی برسد. وقتی اولین ترک رخ داد، مکان ترک ذخیره می‌شود و بعد به دنبال آن مسیر ترک پیش‌بینی می‌گردد. با داشتن مسیر ترک، بجای قرار دادن سختی واقعی مصالح در مسیر ترک خورده، از المان‌هایی با سختی کمتر (نرم‌تر) استفاده می‌شود.

### ۲-۲- ترک مجزا:

روش ترک مجزا به مدل طبیعی ترک معروف است. روش‌هایی که به روش ترک مجزا وابسته هستند برای هر ترک به صورت منفرد، از مش‌بندی المان محدود خاصی استفاده می‌کنند. بعد از این، هر ترک مسیر خود را در راستای ماکزیمم تنش ادامه می‌دهد. بعد دوباره عمل مش‌بندی برای تطابق با پیشرفت ترک تغییر می‌یابد. در قدیم این مش‌بندی ملال آور و سخت بود. در حال حاضر نرم افزارهای جدید با انجام مش‌بندی اتوماتیک، این مساله را مرتفع کرده‌اند (حداقل در دامنه دوبعدی). در این گام در هر جای مدل بغیر از نوک آن رفتار الاستیک در نظر گرفته می‌شود. در سازه‌های بزرگ از جمله سدهای بتنی وزنی، این ناحیه نوک ترک که زون پروسه شکست در آن رخ می‌دهد، بسیار ناچیز بوده، قابل چشم‌پوشی است و می‌توان از روش الاستیک استفاده کرد.

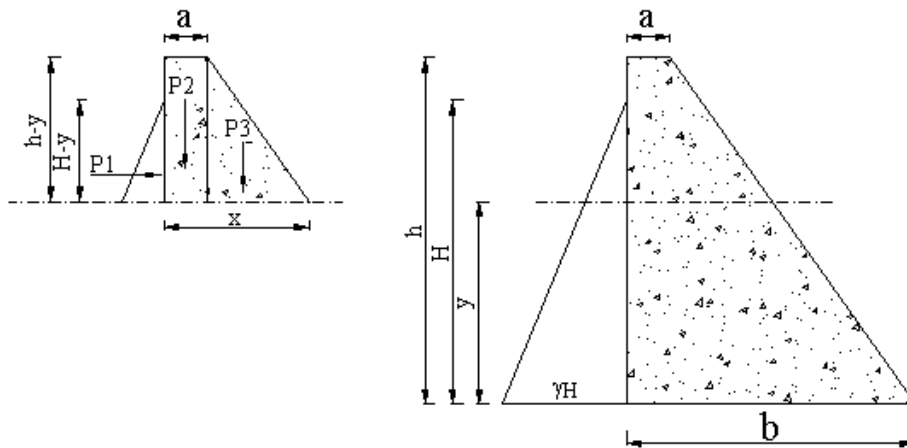
### ۳- الگوریتم برنامه

در این بخش، یک برنامه‌ی کامپیوتری جهت پیش‌بینی شکست در جامداتی که تابع شرایط تنش مسطح یا کرنش مسطح می‌باشند ارائه می‌گردد.

الگوریتم این برنامه بصورت زیر می‌باشد:

۳-۱- تشخیص محل اولیه ترک.

گام اولیه در بررسی پیشرفت ترک، یافتن محل شروع ترک خوردگی است. در مدل‌سازی ترک فرض می‌شود که ترک از جایی شروع می‌شود که تنش اصلی از حد تنش کششی بتن که حدود ۱۰ درصد تنش فشاری آن می‌باشد، تجاوز نماید. وقتی که ترک در یک نقطه از مصالح رخ می‌دهد، محل آن ذخیره می‌شود، سپس ترک بعدی از آن نقطه از مصالح که انتهای نوک ترک می‌باشد شروع می‌گردد.



شکل ۱ یافتن محل ترک خوردگی

در این زیر برنامه مقطع  $y$  متغیر بوده و با کاهش از  $H$  تا صفر، تنش‌ها را در آن مقطع محاسبه می‌کند و هر جا که تنش از حد تنش کششی کمتر شد، محل رخداد اولین ترک است. بارهای وارده به مقطع سد بصورت رابطه (۱) می‌باشند:

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= \frac{\gamma(H-y)^2}{2} \\ P_2 &= \gamma_c A_2 = 2.4\gamma a(h-y) \\ P_3 &= \gamma_c A_3 = \frac{2.4\gamma(x-a)(h-y)}{2} \\ \sigma &= \frac{P}{A} - \frac{Mc}{I} \\ M &= P_1 \times \frac{H-y}{3} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \sigma = \frac{P_2 + P_3}{x} - \frac{P_1 \times \frac{H-y}{3} \times \frac{x}{2}}{\frac{x^3}{12}} \quad (1)$$

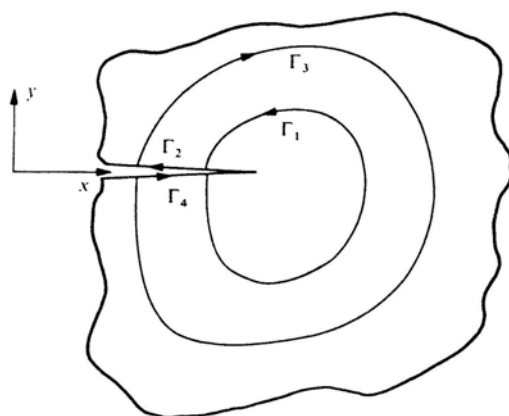
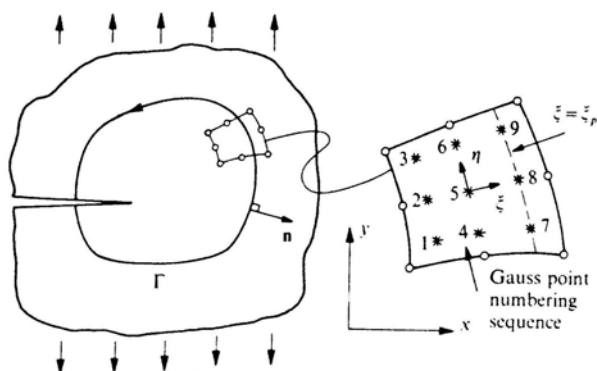
۲-۳- یک مش بندی اولیه صورت می گیرد .

با توجه به روش ترک مجزا و لزوم مش بندی دوباره ، مراحل نظیر المان بندی ، یافتن مختصات گره ها ، توزیع بار بر وجه سد و مسیر انتگرال گیری حول ترک باید در هر گام پیشرفت ترک انجام گردد و کار ملال آوری است . در این برنامه با توجه به اینکه موضوع مورد مطالعه ، مقطعی از یک سد بتنی است ، زیربرنامه هایی جهت انجام اتوماتیک مراحل فوق پیش بینی شده است .

۳-۲- ضریب بار از عدد کوچکی آغاز می شود .

۴-۳- با ضریب بار انتخاب شده یک تحلیل اولیه صورت می گیرد .

۵-۳- برای یافتن نقطه پلاستیک حول ترک از انتگرال  $J$  استفاده شده است . انتگرال  $J$  مستقل از مسیر انتخابی است و به نقطه ابتدا و انتهای مسیر  $\Gamma$  که آنهم برخلاف وجه ترک بوده و شامل نوک ترک هم می گردد ، بستگی دارد .



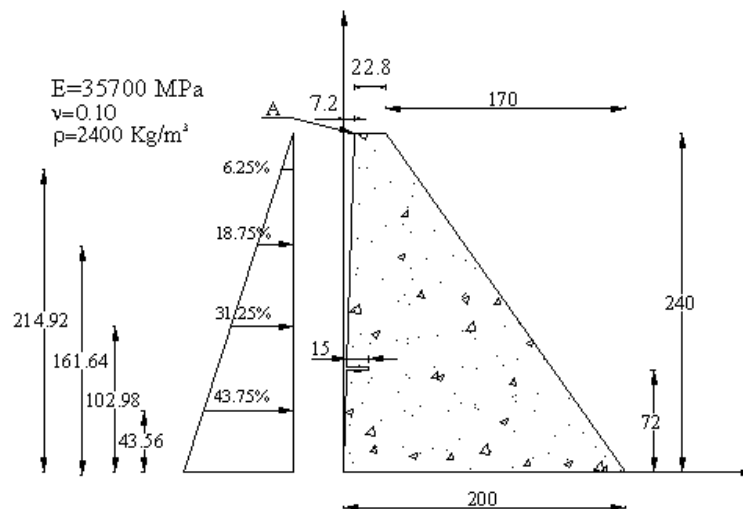
شکل ۲ مسیر انتگرال  $J$  [3]

اگر در مسیر انتگرال  $J$  ، حول نوک ترک ، یک نقطه پلاستیک پیدا شد ، مفهوم آن این است که ترک به

- آن سمت حرکت می کند و به مرحله بعدی می رویم . اگر نقطه پلاستیک پیدا نشد ، مفهوم آن این است با این ضریب بار ترک رخ نمی دهد و باید بار افزایش یافته تا ترک پیش رود ، لذا به مرحله ۸-۳ می رویم .
- ۳-۶- ترک گسترش می یابد و به محل نقطه پلاستیک می رود .
- ۳-۷- بعثت پیشرفت ترک ، یک مش بندی جدید انجام می شود .
- ۳-۸- ضریب بار افزایش می یابد .
- ۳-۹- برنامه به مرحله ۳-۴ فرستاده می شود .

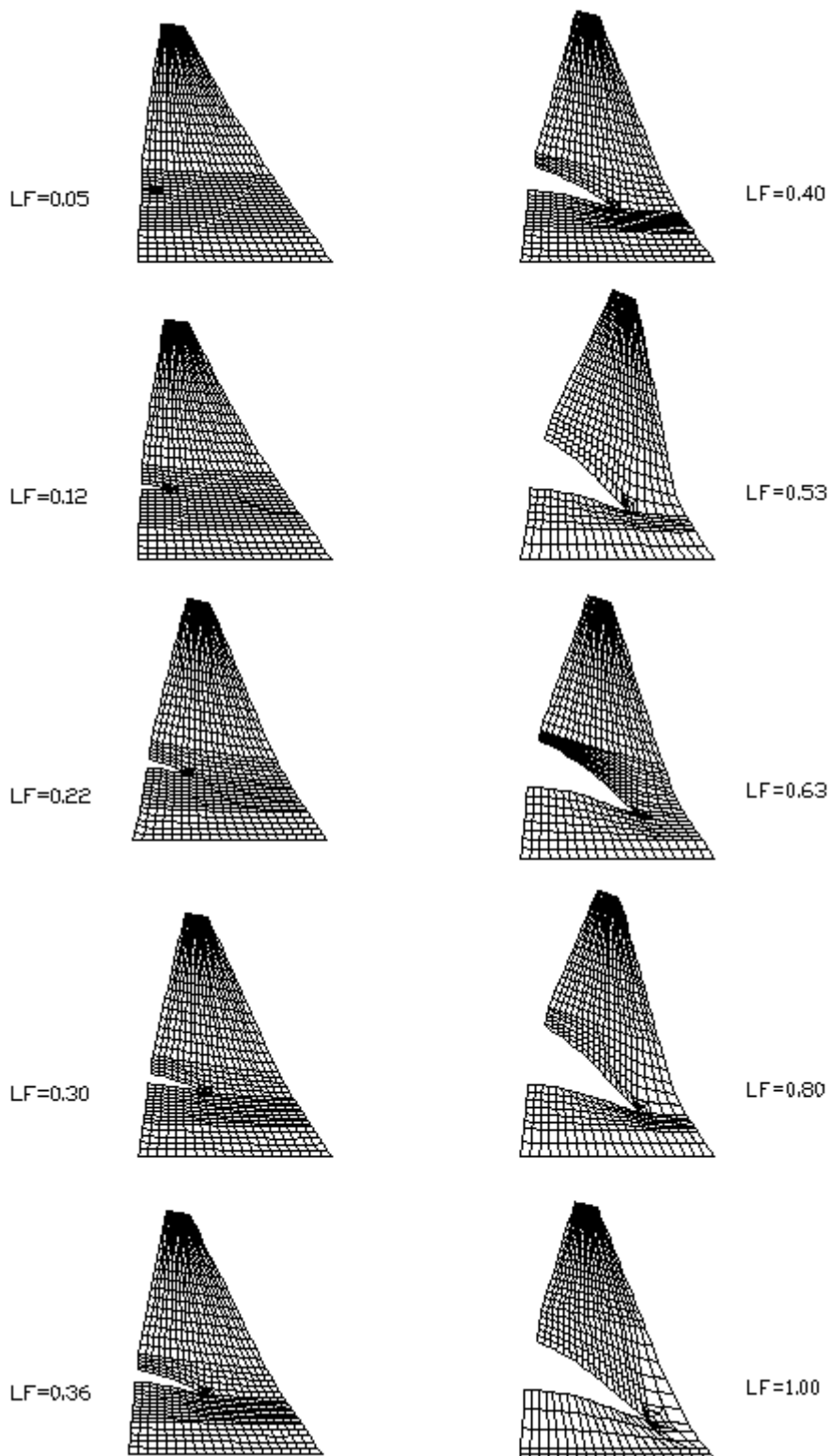
#### ۴- مثال عددی

در این فصل مدلی که توسط کارپینتری و همکارانش (۱۹۹۲) مدل گردیده ، مورد بررسی قرار گرفته و نتایج با خروجی برنامه موجود مقایسه می گردد . ابعاد سد در شکل ۳ آمده است . این مدل فقط تحت بارهای استاتیکی بوده و بارهای دینامیکی بر آن وارد نشده اند . مدل آزمایشگاهی که آقای کارپینتری و همکارانش روی آن کار انجام دادند ، بدین صورت بود که فشار هیدروستاتیکی وارده بر وجه بالادست سد توسط سیستم خودکاری بشکل نیروهای متمرکز در چهار نقطه از سد مطابق شکل ۳ وارد می شدند . ضخامت نمونه ۳۰ سانتیمتر است . برای اینکه پیشرفت ترک از محل مشخصی باشد ، در ارتفاع ۷۲ سانتیمتری مدل ، شکافی به طول ۱۵ سانتیمتر تعبیه گردیده است .



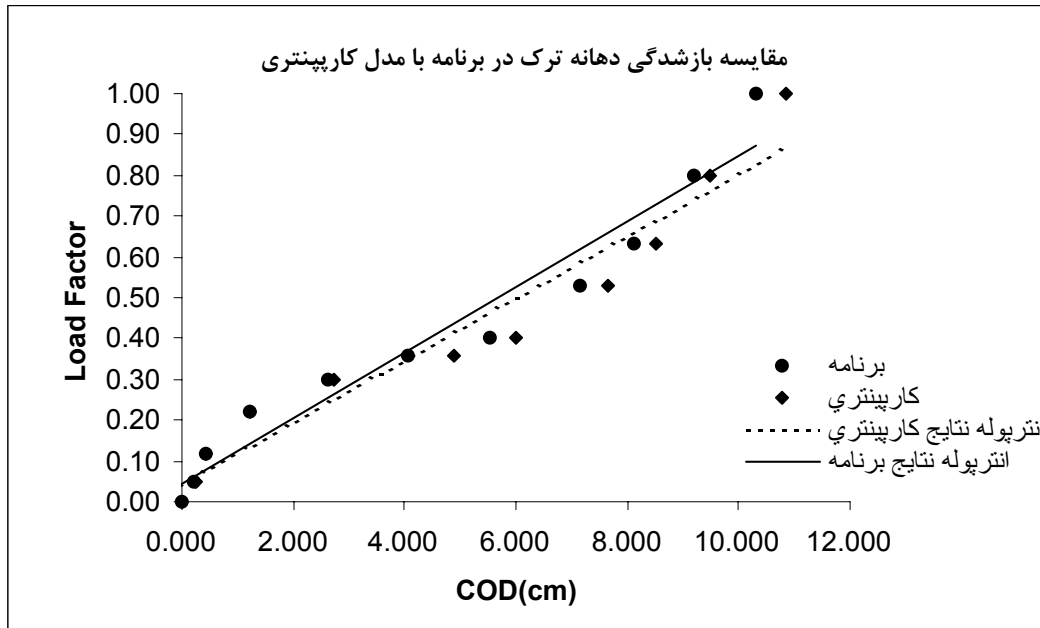
شکل ۳ مدل مورد مطالعه (ابعاد به سانتیمتر) [7]

مدل فوق توسط برنامه نوشته شده، تحت بارهای استاتیکی وارده مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که در فصل قبل بیان شد، بار از ضریب کوچکی آغاز شده و افزایش می یابد و ترک هم همزمان رشد می کند. در شکل ۴ این گسترش ترک دیده می شود.

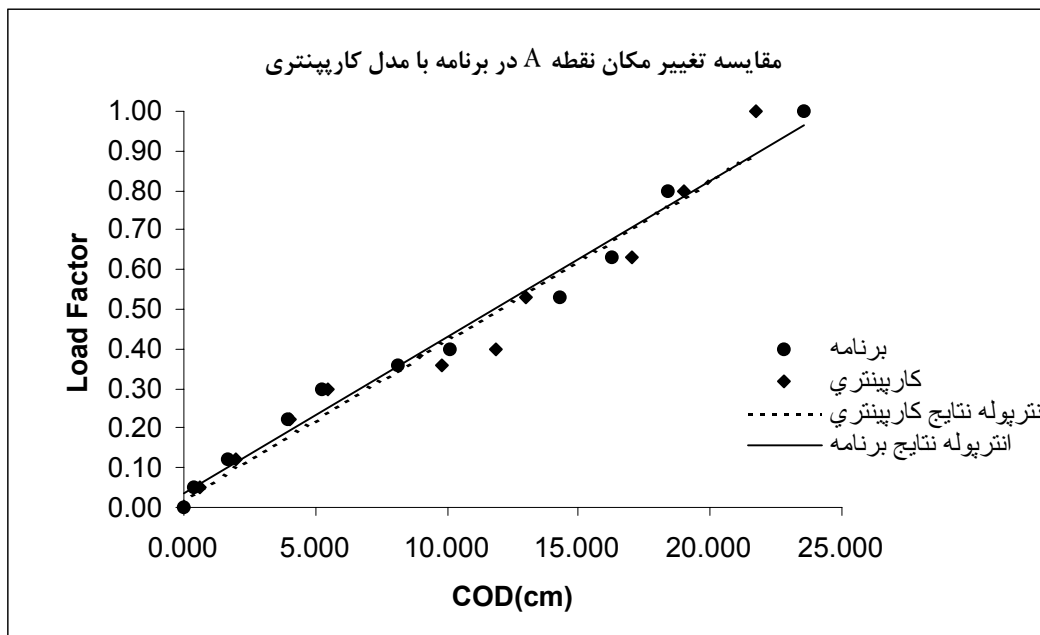


شکل ۴ رشد ترک در حالت بزرگ نمایی شده

برای کنترل صحت برنامه ، میزان بازشدگی دهانه ترک و همچنین تغییر مکان نقطه A واقع در شکل ۳ ، در مدل واقعی ، با خروجی برنامه مقایسه می گردد .



شکل ۵ مقایسه بازشدگی دهانه ترک در برنامه با مدل کارپینتری



شکل ۶ مقایسه تغییر مکان نقطه A در برنامه با مدل کارپینتری

مقایسه نتایج برنامه با مدل کارپینتری نشان می دهد که تطابق قابل قبولی بین بارهای وارد شده و میزان بازشدگی ترک وجود دارد .

## ۵- مقایسه و نتیجه گیری :

مزیت روش ترک مجزا ، نمایش واقعی ترک و بازشدن آن می باشد . عیب این روش ، صرف زمان و هزینه محاسباتی فراوان به علت تغییر مداوم شبکه اجزاء محدود است . در مقایسه با روش ترک مجزا ، روش ترک پخشی ساده بوده و از لحاظ زمان و هزینه های محاسباتی به صرفه است . لذا پیشنهاد می شود که همین تحلیل با استفاده از روش ترک پخشی صورت گرفته و نتایج با روش ترک مجزا مقایسه گردد . مقایسه نتایج برنامه با مدل کارپینتری نشان می دهد که تطابق قابل قبولی بین بارهای وارد شده و میزان باز شدگی ترک وجود دارد . همین تطابق ، بین بارهای وارد شده و تغییر مکان نقطه A نیز دیده می شود . در نتیجه می توان با اعمال بارهای وارد شده ( نظیر تغییرات سطح آب مخزن ، نیروی وزن ، درجه حرارت، لای ، یخ ، سیلاب و زمین لرزه ) بصورت ضرایب بار ، اطلاعات خوبی را در طراحی سدهای جدید و یا طراحی مجدد سدهای احداث شده متناسب با وضعیت تنش ها و پایداری آنها به دست آورد . همچنین با توجه به اینکه دقت محاسبات با اندازه مش بندی متناسب است ، پیشنهاد می شود برای کسب دقت هر چه بیشتر ، از المان های ریزتری در نوک ترک استفاده شود . این کار در پیش بینی هر چه بهتر رفتار سازه سد در برابر بارهای وارده ، تاثیر بسیاری دارد .

## ۶- مراجع :

- [۱] طاحونی ، شاپور ، طراحی سازه های بتن مسلح - جلد دوم ، انتشارات دهخدا ، ۱۳۷۴
- [2] Owen J., Hinton E. "Finite element programming", Academic Press Inc. London Ltd., U.K., 1977.
- [3] Owen J., Fawkes A. J. "Engineering fracture mechanics: numerical methods and applications", Pineridge Press Ltd., Swansea, U.K., 1983.
- [4] Owen J., Hinton E. "Finite element in plasticity", Pineridge Press Ltd., Swansea, U.K., 1983.
- [5] Owen J., Hinton E. "An introduction to finite element computations", Pineridge Press Ltd., Swansea, U.K., 1979.
- [6] Finite element analysis of Fracture in Concrete Structures: State-of-the-Art. Reported by ACI committee 446.
- [7] Barpi F., Valente S., "Numerical simulation of prenotched gravity dam models", Journal of engineering mechanics, June 2000.