



## بررسی تاثیر طول ترک بر فرکانس‌های طبیعی سدهای بتنی وزنی

حمیدرضا ترابی<sup>۱</sup> و مهدی یزدانی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> ایران، اراک، میدان بسیج، بلوار کربلا، دانشگاه اراک، دانشکده فنی مهندسی، ۳۸۴۸۱۷۷۵۷۴، کارشناسی ارشد مهندسی سازه

<sup>۲</sup> ایران، اراک، میدان بسیج، بلوار کربلا، دانشگاه اراک، دانشکده فنی و مهندسی، ۳۸۴۸۱۷۷۵۷۴، استادیار مهندسی سازه

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [m-yazdani@araku.ac.ir](mailto:m-yazdani@araku.ac.ir)

### چکیده

سدهای بتنی وزنی، بخش مهمی از فراسازه‌های هر کشوری را تشکیل می‌دهند. بنابراین بررسی ایمنی این فراسازه‌ها تحت اثر مخاطرات موجود بسیار حائز اهمیت است. بسیاری از این سازه‌های بزرگ بتنی، قبل از بهره‌برداری و بعد از آن، به دلایل مختلف، دچار ترک خوردگی می‌شوند. از جمله این دلایل، می‌توان به نشست در پی سد، تغییرات ناهمگن دمای بدنه سد، انقباض بتن و زلزله‌های قبلی اشاره نمود. این ترک‌ها نه تنها منجر به کاهش سختی سازه می‌شوند، بلکه می‌توانند، رفتار کلی سازه را تحت اثر بارهای دینامیکی تغییر دهند و طراحی‌های لرزه‌ای سازه را با خطا روبرو نمایند. در پژوهش حاضر، سد بتنی وزنی پائین‌فالت در حالت بدون نقص، با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس مدل‌سازی شده است، سپس با استفاده از تحلیل مودال، ابتدا فرکانس‌های پنج مود اول سازه استخراج شده است و بعد از اعتبارسنجی مدل عددی، در گام دوم اثر ترک در حالات مختلف بر فرکانس‌های پنج مود اول و شکل مودها بررسی شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که وجود ترک باعث کاهش سختی و متعاقباً کاهش فرکانس‌های اصلی سازه می‌شود. همچنین از نتایج بدست آمده می‌توان نتیجه گرفت که نه تنها در تحلیل و طراحی سدهای بتنی تحت اثر بارهای دینامیکی بایستی اثر ترک لحاظ شود، بلکه در ارزیابی لرزه‌ای این سازه‌ها نیز در نظر گرفتن اثر ترک ضروری است.

کلمات کلیدی: مدل اجزای محدود؛ سدهای بتنی وزنی؛ تحلیل مودال؛ سازه‌های ترک‌خورده

## ۱- مقدمه

بسیاری از سازه‌های مهندسی، قبل از بهره‌برداری و بعد از آن، تحت شرایط مختلف بارگذاری، ممکن است که دچار آسیب و همچنین ترک خوردگی شوند. وجود ترک در این سازه‌های مهندسی، باعث تغییرات موضعی در سختی سازه شده که مقدار آن عمدتاً به موقعیت و طول این ترک‌ها وابسته است. تغییر در سختی سازه، باعث تغییر فرکانس‌های طبیعی سازه و متعاقباً تغییر رفتار دینامیکی سازه می‌شود که این موضوع در ارزیابی، عملکرد و ایمنی سازه بسیار تاثیرگذار است.

رفتار ارتعاشی سازه‌های ترک‌خورده، توسط بسیاری از پژوهشگران بررسی شده است. تاروزی و همکاران به ارزیابی ظرفیت حمل باقیمانده از یک پل در مقیاس بزرگ از طریق تغییر فرکانس پرداختند [۱]. ما و همکاران به تجزیه و تحلیل مودال یک تیر با ترک های مایل تنفسی دو طرفه پرداختند [۲]. لیو و همکاران به تحلیل ارتعاش تیر بتنی T شکل در دماهای بالا بر اساس مدل اجزای محدود اصلاح شده پرداختند [۳]. استاچویز و کرازوک، روشی برای تجزیه و تحلیل اثر دو ترک باز را بر فرکانس طبیعی خمشی در یک تیر کنسول ارائه نمودند [۴]. آنها بخش ترک را با یک فنر جایگزین نموده و سپس با استفاده از تطبیق مناسب، تحلیل مودال را برای هر قسمت از تیر انجام دادند. دیماراگوناز مروری بر موضوع ارتعاش سازه‌های ترک‌خورده ارائه نمود [۵]. بررسی او شامل ارتعاش روتورهای ترک‌خورده، میله‌ها، تیرها، صفحات، لوله‌ها، تیغه‌ها و پوسته‌ها می‌شد. ساودرا و همکاران انعطاف‌پذیری اضافی ایجاد شده در مجاورت ترک را با استفاده از نظریه مکانیک شکست ارزیابی نمودند [۶]. ژنگ و همکاران فرکانس‌های طبیعی و اشکال مودی یک تیر ترک‌خورده را با استفاده از روش اجزای محدود بررسی نمودند [۷]. یون و همکاران تأثیر دو ترک باز را بر روی رفتار دینامیکی یک تیر با تکیه‌گاه ساده به صورت تحلیلی و تجربی بررسی نمودند [۸]. رضایی و همکاران روش تحلیلی جدیدی برای بررسی رفتار ارتعاش آزاد سازه، تحت تأثیر یک ترک به عنوان جایگزینی برای روش‌های عددی ایجاد نمودند [۹]. شیفرین یک تکنیک جدید برای محاسبه فرکانس‌های طبیعی یک تیر با تعداد محدودی ترک دلخواه ارائه نموده است [۱۰]. یزدانی و همکاران اثرات ترک را در پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح بررسی نموده‌اند [۱۱]. بیشتر این پژوهش‌ها، بر روی ارتعاش یک تیر ساده و با در نظر گرفتن فقط یک ترک متمرکز شده است و در این میان به سازه‌هایی مانند سدهای بتنی وزنی، که ترک خوردگی نقش مهمی در رفتار آنها دارد، کمتر توجه شده است. بنابراین لزوم یک پژوهش که نحوه تغییر فرکانس‌های طبیعی سازه را تحت ترک‌هایی با طول متفاوت بررسی نماید، ضروری به نظر می‌رسد.

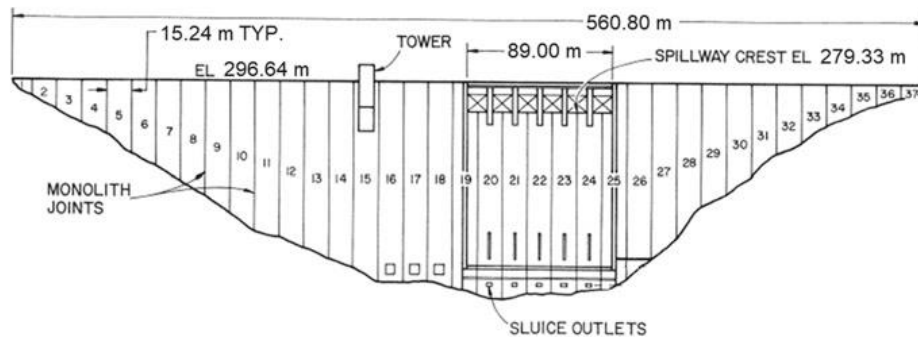
در این پژوهش، با استفاده از تحلیل مودال فرکانس‌های طبیعی پنج مود اول سد پایین‌فالت در حالت بدون نقص با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس، با فرض بستر صلب و صرف نظر کردن از اندرکنش سازه و مخزن استخراج شده است و نتایج بدست آمده در این پژوهش، با سایر پژوهش‌ها مقایسه و اعتبارسنجی شده است. در ادامه در وجه بالادست و پایین‌دست مدل اعتبارسنجی شده، ترک‌هایی با طول‌های مختلف و در دو ارتفاع متفاوت انتخاب شده است. جهت مدل‌سازی ترک در سد بتنی وزنی پایین‌فالت، از روش کانتور انتگرال در آباکوس استفاده شده است [۱۲]. در نهایت نتایج حاصل از ۱۵ مدل عددی ایجاد شده با المان‌بندی تقریباً یکسانی با یکدیگر مقایسه شده است.

## ۲- سد پایین‌فالت

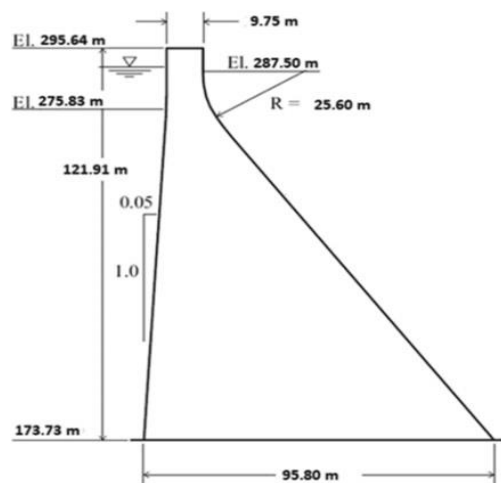
در پژوهش حاضر به منظور بررسی رفتار دینامیکی سدهای بتنی وزنی ترک‌خورده، به مطالعه سد وزنی پایین‌فالت پرداخته شده است. شکل (۱). سد پایین‌فالت در طول دهه‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ در دانشگاه کالیفرنیا در برکلی به صورت گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفت [۱۳-۱۵]. هدف اولیه این سد برای مهار سیلاب و هدف‌های ثانویه آن جهت آبیاری و تفریحی است. این سد بر روی رودخانه کینگز در ایالت کالیفرنیا قرار گرفته است و از ۳۶ مونولیت با عرض ۱۵ متر و یک مونولیت با عرض ۱۲ متر تشکیل شده است. مشخصات هندسی سازه سد در شکل (۲) ارائه شده است. همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است طول تاج این سد تقریباً ۵۶۰ متر و ارتفاع بزرگترین مونولیت آن ۱۲۲ متر است. عرض سد در تراز پایه تقریباً ۹۷ متر و در تراز تاج تقریباً ۱۰ متر است. وجه بالادست سد عمودی نبوده و از پایه تا تراز ۱۰۲ متر، دارای شیب ۵ درصد است.



شکل ۱. نمای پایین دست بدنه سد پایین فلت.



(الف)



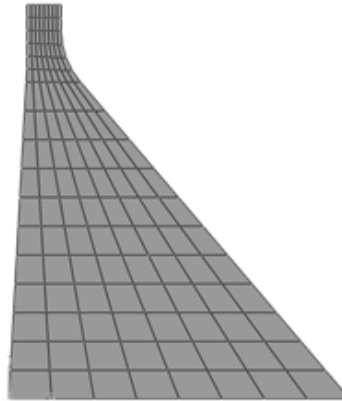
(ب)

شکل ۲. جزئیات هندسی سد پایین فلات. (الف) مشخصات مونولیت‌های بدنه سد و (ب) مشخصات هندسی مقطع سد.

### ۳- مدل سازی عددی

جهت مدل سازی عددی مقطع سد پایین فلت از نرم افزار اجزای محدود آباکوس، نسخه ۲۰۲۰ استفاده شده است. مدل دوبعدی این سد از ۱۶۲ نقطه گرهی و ۱۳۶ المان چهارگرهی از نوع کرنش مسطح تشکیل شده است. در نتیجه مدل عددی دارای ۳۲۴ درجه

آزادی است. در شکل (۴) مدل اجزای محدود سد پایین فلات نشان داده شده است. مشخصات مکانیکی مصالح جهت انجام تحلیل مودال به صورت خطی فرض شده است و مقادیر آن در جدول (۱) ارائه شده است [۱۴].



شکل ۴. مدل عددی سد پایین فلت.

جدول ۱. مشخصات مصالح بدنه سد پایین فلت.

وزن مخصوص ( $Kg/m^3$ )	نسبت پواسون	مدول الاستیسیته ( $GPa$ )
۲۴۸۳	۰/۲	۲۲/۴۱

پس از تهیه مدل عددی اولیه در گام بعدی تحلیل مودال انجام شده است. نرم افزار آباکوس روش های مختلفی جهت استخراج مقدار ویژه ارائه می دهد. برای مسئله مقدار ویژه متقارن دو رویکرد ارائه می شود: روش های تکرار لانگزوس و زیرفضا. در این پژوهش، از روش لانگزوس برای استخراج فرکانس پنج مود اول و تغییر شکل مودی سازه استفاده شده است. پس از انجام تحلیل مودال و بهنگام کردن مدل عددی نتایج بدست آمده جهت اعتبارسنجی مدل عددی با سایر نتایج موجود مقایسه شده و در جدول (۲) ارائه شده است. همان طور که مشخص است نتایج بدست آمده از پژوهش حاضر با مرجع [۱۴]، تطابق نسبتاً خوبی داشته و بیشترین خطا مربوط به مود شماره ۲ است (۰/۱۲٪).

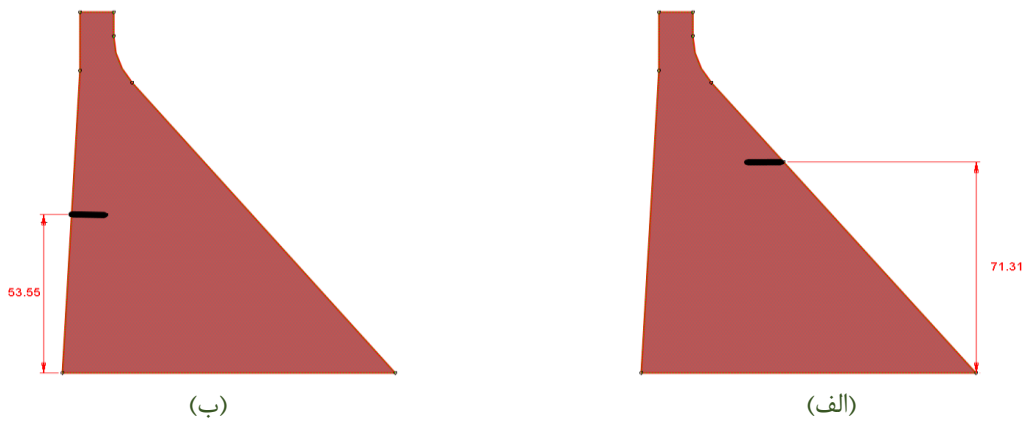
جدول ۲. مقادیر فرکانس پنج مود اول سد بدون نقص.

مود	تحلیل حاضر ( $Hz$ )	تحلیل سایر پژوهشگران ( $Hz$ ) [۱۴]	درصد خطا (%)
اول	۳/۵۵۹	۳/۵۹۲	۰/۹۴
دوم	۷/۳۱۹	۷/۴۱	۱/۲
سوم	۹/۸۱۵	۹/۸۲۱	۰/۰۷
چهارم	۱۲/۵۴۵	۱۲/۷۳۲	۱/۱۵
پنجم	۱۸/۷۵۶	۱۸/۹۶۶	۱/۱۱

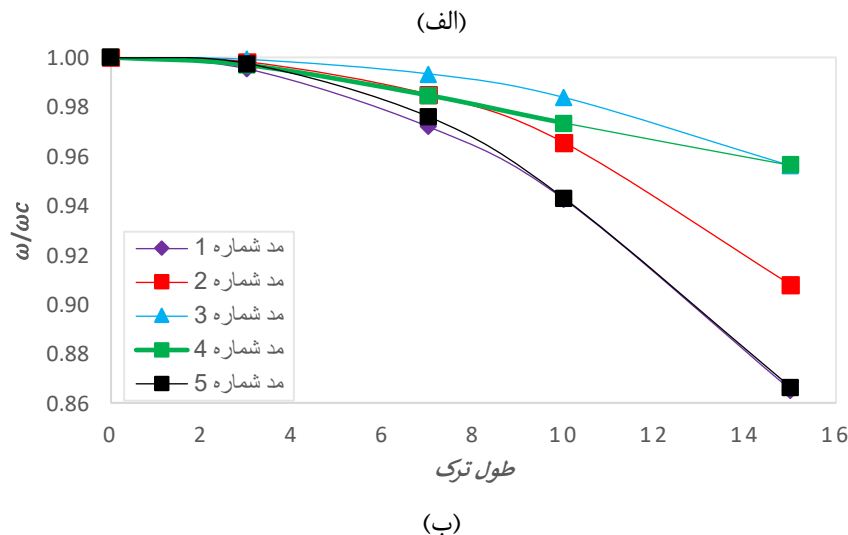
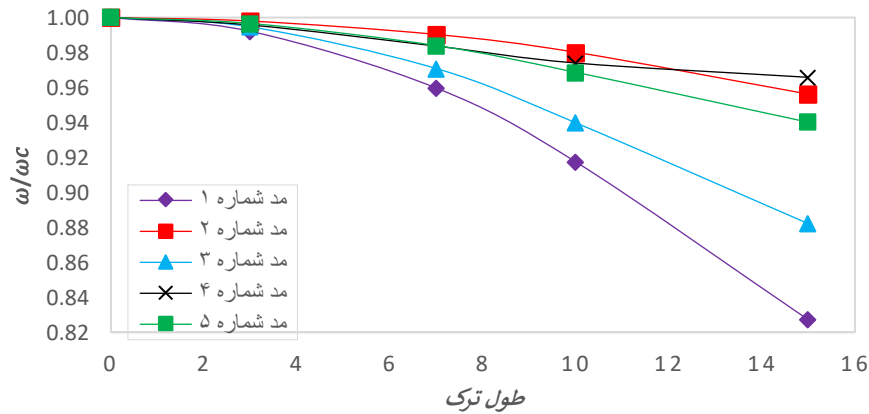
#### ۴- مدل سازی ترک

در این پژوهش، جهت مدل سازی ترک در سد پایین فلات، در محیط نرم افزار آباکوس از روش کانتور انتگرال استفاده شده است. در این روش، از المان نوک ترک یا تکین جهت مدل سازی استفاده شده است. مطابق شکل (۵) برای سد ترک خورده پایین فلت، ترک هایی به طول ۳، ۷، ۱۰ و ۱۵ متر در ارتفاع ۵۳/۵۵ متر در بالادست بدنه سد و در ارتفاع ۷۱/۳۱ از پایین دست بدنه سد از روی تراز پایه در نظر گرفته شده است. پس از مدل سازی ترک های اولیه، در مجموع بر روی ۱۰ مدل عددی ترک خورده تحلیل مودال انجام شده است و فرکانس های ۵ مود اول استخراج شد و نتایج بدست آمده در شکل (۶) ارائه شده است. لازم به ذکر است جهت مقایسه فرکانس های

مدل های ترک خورده با مدل بدون نقص، فرکانس های مدل های ترک خورده به فرکانس مدل بدون نقص (فرکانس پایه) مقیاس شده است  $(\omega/\omega_c)$ .



شکل ۵. موقعیت ترک های اولیه: (الف) ترک پایین دست و (ب) ترک بالادست.



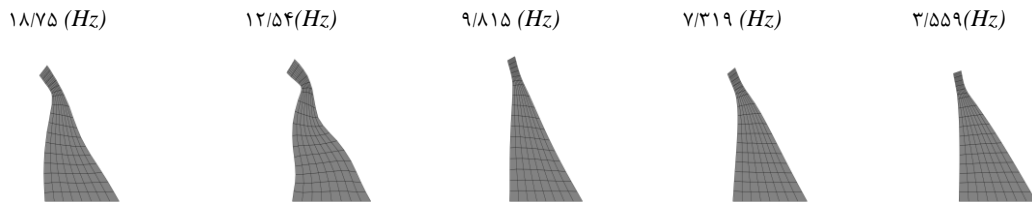
شکل ۶. نسبت فرکانس برای مدهای مختلف به طول ترک برای (الف) ترک بالادست و (ب) ترک پایین دست.

با بررسی شکل (۶) مشاهده می شود که به طور کلی با افزایش طول ترک در بالادست بدنه سد، پارامتر نسبت فرکانس برای همه مدهای سازه کاهش می یابد که این موضوع با توجه به وابستگی فرکانس اصلی سازه به جرم و سختی، به معنای کاهش سختی سازه با افزایش طول ترک است. مود اول سازه دارای بیشترین اثر کاهش و در مقابل مود دوم سازه دارای کمترین اثر کاهش در فرکانس های طبیعی

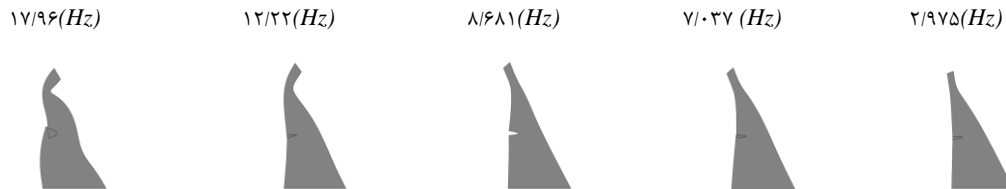
سازه است. برای ترک پایین دست نتایج اندکی متفاوت است. در پایین دست بدنه سد مشابه ترک بالادست، به طور کلی با افزایش طول ترک نسبت فرکانس برای همه مدهای سازه کاهش یافته است و همچنین این نسبت با رشد ترک، بیشترین اثر کاهشی را بر روی فرکانس های مود اول داشته است و این به معنای غالب بودن مود اول سازه، برای هر دو ترک بالادست و پایین دست است. برای ترک پایین دست، مود اول، بیشترین تاثیر و مود سوم کمترین تاثیر را در کاهش فرکانس های اصلی سازه داشته است. از طرفی مود پنجم سازه نیز مشابه با مود اول، بیشترین تاثیر را بر روی کاهش فرکانس های سازه داشته است. اضافه بر این، به مانند ترک بالادست، با افزایش طول ترک، اثر مدهای بالاتر سازه بر روی کاهش فرکانس های طبیعی بیشتر شده است.

علاوه بر فرکانس های اصلی، شکل مودی مدل های ترک خورده و ترک نخورده با یکدیگر مقایسه شده اند و نتایج آن برای حالت ترک با طول ۱۵ متر در بالادست و پایین دست مطابق شکل (۷) ارائه شده است. همان طور که در شکل (۷) نشان داده شده است شکل مودی به وجود ترک اولیه کاملاً وابسته است. جهت بررسی دقیق تر اثر ترک بر روی شکل مودی و رفتار دینامیکی سد، مشارکت مودی پنج مود اول همه مدل ها محاسبه شده است. نتایج بدست آمده نشان می دهد که در مدل بدون نقص، ترک در پایین دست و ترک در بالادست به ترتیب مشارکت مودی در جهت  $X$  برابر  $۸۳/۸$ ،  $۷۹/۶$  و  $۸۴/۳$  درصد است. این موضوع تاکید دارد که در حدود  $۴/۲$  درصد مشارکت مودی مدل دارای ترک در پایین دست را کاهش می دهد و متعاقباً موجب تغییر رفتار سازه در برابر بارهای دینامیکی می شود که این موضوع می تواند تحلیل و طراحی لرزه ای سدها را با خطا مواجه نماید.

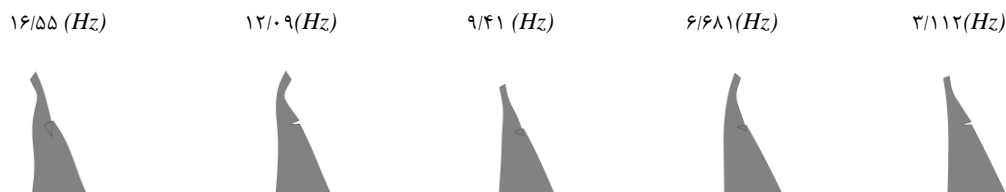
#### سازه بدون نقص



#### ترک بالادست



#### ترک پایین دست



شکل ۷. مقایسه شکل مود سد بدون نقص و سد ترک خورده برای ترک با طول ۱۵ متر در بالادست و پایین دست بدنه سد.

## ۶- نتیجه گیری

در این پژوهش، رفتار دینامیکی سد بتنی وزنی پایین فلات با استفاده از تحلیل مودال در حالت بدون نقص و دارای نقص، بر روی بستر صلب، با در نظر گرفتن دو ترک در بالادست و پایین دست بدنه سد بررسی شد. برای مدل سازی ترک در این مساله از روش کانتور انتگرال در مدل اجزای محدود استفاده شد. در مطالعه حاضر، پنج فرکانس اصلی سد بدون نقص پایین فلت استخراج شد و با مقایسه نتایج آن

با سایر نتایج، مدل عددی اعتبارسنجی شد. سپس تأثیر طول ترک، بر روی فرکانس‌های طبیعی در پنج مود اول ارتعاشی سد ترک‌خورده بررسی و نتایج آن با نتایج حاصل از سد بدون نقص مقایسه و نتایج زیر حاصل شد:

- فرکانس‌های طبیعی سازه سد در صورت وجود ترک کاهش می‌یابد که مقدار آن به محل و طول ترک وابسته است.
- نرخ کاهش فرکانس‌های طبیعی سازه سد با افزایش طول ترک، افزایش می‌یابد که دلیل آن کاهش ممان اینرسی مقطع بدنه سد است.
- ترک‌خوردگی باعث کاهش فرکانس‌های اصلی سازه شده و منجر به کاهش موضعی سختی سازه می‌شود.
- وجود ترک باعث کاهش مشارکت مودی پنج فرکانس اول سد می‌شود که این موضوع موجب تغییر رفتار دینامیکی سد می‌شود. بنابراین بایستی در تحلیل و ارزیابی‌های لرزه‌ای سدها اثر ترک‌خوردگی لحاظ شود.

## مراجع:

1. Tarozzi M, Pignagnoli G, Benedetti A. Evaluation of the residual carrying capacity of a large-scale model bridge through frequency shifts. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. 2022:1-11.
2. Ma Y, Wu J, Qian D, Ren P, Li Y, Li H. Modal analysis of a beam with bilateral breathing oblique cracks. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2022:09544062221091751.
3. Liu C, Huang X, Zhao Y, Miao J. Vibration analysis of concrete T-beam at elevated temperatures based on modified finite element model. *Journal of Building Engineering*. 2022;52:104381.
4. Ostachowicz, W. and M. Krawczuk, Analysis of the effect of cracks on the natural frequencies of a cantilever beam. *Journal of sound and vibration*, 1991. **150**(2): p. 191-201.
5. Dimarogonas, A.D., Vibration of cracked structures: a state of the art review. *Engineering fracture mechanics*, 1996. **55**(5): p. 831-857.
6. Saavedra, P. and L. Cuitino, Crack detection and vibration behavior of cracked beams. *Computers & Structures*, 2001. **79**(16): p. 1451-1459.
7. Zheng, D.Y. and N. Kessissoglou, Free vibration analysis of a cracked beam by finite element method. *Journal of Sound and vibration*, 2004. **273**(3): p. 457-475.
8. Yoon, H.-I., I.-S. Son, and S.-J. Ahn, Free vibration analysis of Euler-Bernoulli beam with double cracks. *Journal of mechanical science and technology*, 2007. **21**(3): p. 476-485.
9. Rezaee, M. and R. Hassannejad, Free vibration analysis of simply supported beam with breathing crack using perturbation method. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2010. **23**(5): p. 459-470.
10. Shifrin, E. and R. Ruotolo, Natural frequencies of a beam with an arbitrary number of cracks. *Journal of Sound and vibration*, 1999. **222**(3): p. 409-423.
11. Marefat, M., M. Yazdani, and M. Jafari, Seismic assessment of small to medium spans plain concrete arch bridges. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2019. **23**(7): p. 894-915.
12. Abacqus Analysis User's Manual. Version 2020.
13. Chavez, J.W. and G.L. Fenves, Earthquake analysis and response of concrete gravity dams including base sliding. 1993: Earthquake Engineering Research Center, University of California.
14. Fenves, G. and A.K. Chopra, EAGD-84: A computer program for earthquake analysis of concrete gravity dams. 1984: University of California, Earthquake Engineering Research Center.
15. Rea, D., C. Liaw, and A.K. Chopra, Dynamic properties of pine flat dam. 1972, California Univ Berkeley Earthquake Engineering Research Center.