Technical Strategies in Water Systems
https://sanad.iau.ir/journal/tsws
ISSN (Online): 2981-1449
Summer 2023: Vol 1, Issue 1
https://doi.org/10.30486/TSWS.2023.783213

Review Article

Reviewing methods of analysis and evaluation of seismic safety of arched concrete dams

Mohammadreza Fadaei-Tehrani[1*], Elham Ybarehpour[2]

[1] Niro Research Institute (NRI), Tehran, Iran.

[2] Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

**Corresponding Author email:* mfadaei@nri.ac.ir
© The Author(s) 2023

Received: 12 July 2023 Accepted: 05 Sept 2023 Published: 09 Sept 2023

Extended Abstract

Extended Abstract

Introduction

Concrete arch dams are three-dimensional structures that transfer the hydrostatic pressure of the reservoir to their rock abutments through their unique shell-like geometry. In addition to self-weight, hydrostatic pressure, and thermal stresses, these dams must withstand dynamic forces induced by earthquakes. During seismic events, nonlinear behavior may occur due to the opening of contraction joints, cracking, crushing of concrete, or nonlinear material behavior. Traditional dynamic time-history analyses, assuming the dam as a monolithic elastic structure, often predict significant tensile arch stresses in the upper sections of the dam, which do not align with real-world observations. Since arch dams are constructed as cantilever blocks, the opening and closing of contraction joints during earthquakes redistribute internal forces from arch action to cantilever action, reducing tensile stresses and dissipating energy. This study investigates the seismic behavior of concrete arch dams, focusing on the effects of contraction joints and nonlinear material behavior.

Materials and Method

The study employs advanced numerical modeling techniques to analyze the seismic response of concrete arch dams. The finite element method (FEM) is used to model the dam-reservoir-foundation system, incorporating nonlinear behavior of contraction joints and concrete. The dam is discretized using solid elements, while the reservoir is modeled using fluid elements to account for hydrodynamic effects. Contraction joints are simulated using interface elements capable of capturing opening, closing, and sliding behaviors. The analysis considers various seismic loading scenarios, including near-fault and far-field ground motions, to evaluate the dam's response under different conditions. Key parameters such as joint stiffness, friction coefficients, and concrete tensile strength are varied to assess their influence on the dam's seismic performance.

Technical Strategies in Water Systems
https://sanad.iau.ir/journal/tsws
ISSN (Online): 2981-1449
Summer 2023: Vol 1, Issue 1
https://doi.org/10.30486/TSWS.2023.783213

Results and Discussion

The results demonstrate that the opening of contraction joints significantly reduces tensile arch stresses in the upper sections of the dam. During seismic events, the redistribution of forces from arch action to cantilever action leads to a decrease in tensile stresses and an increase in compressive stresses at the joint interfaces. The energy dissipation due to joint opening and sliding contributes to the overall stability of the dam. The study also highlights the importance of joint stiffness and friction coefficients in controlling the dam's seismic response. Higher joint stiffness results in greater stress concentrations, while lower stiffness allows for more energy dissipation through joint movement. The analysis reveals that the dam's response is highly sensitive to the characteristics of the input ground motion, with near-fault earthquakes inducing more severe nonlinear behavior compared to far-field events.

Conclusion

The study concludes that the nonlinear behavior of contraction joints plays a critical role in the seismic performance of concrete arch dams. The opening and sliding of joints reduce tensile stresses and dissipate energy, enhancing the dam's ability to withstand seismic forces. The findings emphasize the need for accurate modeling of joint behavior in seismic analyses to ensure the safety and stability of arch dams. Future research should focus on refining joint models, investigating the effects of near-fault ground motions, and exploring the influence of material nonlinearity on the dam's response. These advancements will contribute to improved design and assessment practices for concrete arch dams in seismic regions.

Keywords*:* Seismic analysis, Arched concrete dam, Contraction seams, Earthquake

Extended Abstract

Technical Strategies in Water Systems
https://sanad.iau.ir/journal/tsws
ISSN (Online): 2981-1449
Summer 2023: Vol 1, Issue 1, 68-84
https://doi.org/10.30486/TSWS.2023.783213

Review Article

Reviewing methods of analysis and evaluation of seismic safety of arched concrete dams

Mohammadreza Fadaei-Tehrani[1*], Elham Ybarehpour[2]

[1] Niro Research Institute (NRI), Tehran, Iran.

[2] Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

**Corresponding Author email:* mfadaei@nri.ac.ir
© The Author(s)2023

Received: 12 July 2023 Accepted: 05 Sept 2023 Published: 09 Sept 2023

Abstract

Arched concrete dams are three-dimensional structures that, in terms of their special shape resembling a huge shell, transfer the water pressure from the tank to their stone supports. Besides the forces of weight, hydrostatic pressure and thermal stresses, another significant force that the dam's structural system must withstand is the dynamic forces generated by earthquakes. In such dams, there is a possibility of non-linear behavior due to the change in the location of the two faces of the contraction joints, cracking, corrosion, or non-linear behavior of the concrete of the dam body depending on the intensity of the earthquake. Dynamic analysis of time history, assuming that the dam body is an integrated structure with elastic behavior, usually leads to the creation of significant tensile arch stresses in the upper levels of the dam, which is not in accordance with reality. Since the arch dams are built as ridge blocks, due to the opening and closing of the contraction joints during the earthquake, the released tensile stresses and internal forces are redistributed from the arch performance mode to the ridge performance. As a result, by reducing the level of tensile stresses and energy consumption as a result of joint closure, the risk of concrete cracking and dam destruction is greatly reduced.

***Keywords*:** Seismic analysis, Arched concrete dam, Contraction seams, Earthquake.

مجله راهبردهای فنی در سامانه‌های آبی
https://sanad.iau.ir/journal/tsws
شاپا الکترونیکی: ۱۴۴۹-۲۹۸۱
تابستان۱۴۰۲، دوره یک، شماره۱، ۸۴-۶۸
https://doi.org/10.30486/TSWS.2023.783213

مقاله مروری

مرور روش‌های تحلیل و ارزیابی ایمنی لرزه‌ای سدهای بتنی قوسی

محمدرضا فدائی‌تهرانی[1*]، الهام یباره‌پور[2]

۱. پژوهشگاه نیرو، وزارت نیرو، تهران، ایران.

۲. دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران.

[*]ایمیل نویسنده مسئول: mfadaei@nri.ac.ir

© The Author(s) 2023

دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۲۱ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۴ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۱۸

چکیده

سدهای بتنی قوسی، سازه‌های سه بعدی بوده که به لحاظ شکل خاص خود به عنوان یک پوسته عظیم، فشار آب مخزن را به تکیه‌گاه‌های سنگی خود منتقل می‌نمایند. نیروی عمده دیگری که علاوه بر وزن، فشار هیدرواستاتیک و تنش‌های حرارتی باید توسط سیستم سازه‌ای یک سد تحمل گردد، نیروهای دینامیکی ناشی از زمین لرزه است. در این گونه سدها، امکان بروز رفتار غیرخطی ناشی از تغییر مکان دو وجه درزهای انقباض، ترک خوردگی، خوردشدگی و یا رفتار غیرخطی بتن بدنه سد بسته به شدت زمین‌لرزه وجود دارد. آنالیزهای دینامیکی تاریخچه زمانی با فرض اینکه بدنه سد، سازه‌ای یکپارچه با رفتار الاستیک باشد، معمولاً منجر به ایجاد تنش‌های قوسی کششی قابل توجهی در ترازهای فوقانی سد می‌گردد که منطبق بر واقعیت نیست. از آنجائیکه سدهای قوسی به صورت بلوک‌های طره‌ای ساخته می‌شوند، به لحاظ باز و بسته شدن درزهای انقباضی طی زلزله، تنش‌های کششی رها و نیروهای داخلی از حالت عملکرد قوسی به عملکرد طره‌ای بازتوزیع می‌گردند. در نتیجه، با کاهش سطح تنش‌های کششی و استهلاک انرژی در اثر باز و بسته شدن درز، ریسک ترک‌خوردگی بتن و تخریب سد تا حد زیادی کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل لرزه‌ای، سد بتنی قوسی، درزهای انقباض، زلزله.

۱- مقدمه

تأمین آب به‌عنوان مهمترین نیاز حیات، در هر عصر مورد توجه انسان بوده است. این مقوله در دوران کنونی به‌لحاظ وضعیت بحرانی تأمین آب برای نیازهای مختلف بشر در طرح سیاست زمامداران کشورهای مختلف، نمود برجسته‌تری پیدا کرده است. به طوری که متخصصین ژئوپلیتیک، جنگ‌های آینده را جنگ‌هایی برای دست‌یابی به منابع آب می‌دانند (Fadaei Tehrani, 2023a). سدها از جمله مهمترین سازه‌های آبی در زندگی صنعتی امروز است که به منظورهای مختلفی نظیر تولید انرژی برقابی، ذخیره‌سازی آب برای استفاده‌های کشاورزی، صنعتی، آشامیدنی، کنترل و مهار سیلاب‌ها احداث می‌شوند. بنابراین این سازه‌ها از اهمیت بسزایی در توسعه و آبادانی کشورها برخوردار بوده و روند احداث آنها در مناطق مختلف، از جمله کشور ما، همواره مورد توجه بوده است (Fadaei Tehrani & Rahimzade Rofooei, 2005a).

طبق گزارش بولتین آب کشور، متوسط بارندگی سالیانه در ایران در حدود **۲۵۲** میلی‌متر است که حدود یک چهارم متوسط بارندگی در جهان و یک سوم متوسط بارندگی در آسیا است، لذا ایران یکی از مناطق خشک در دنیا شناخته می‌شود (Fadaei Tehrani, 2023b). بنابراین گزارش، از **۱۳۷** میلیارد متر مکعب حجم آب روان کشور فقط **۳۹** میلیارد متر مکعب (**۲۸** درصد) قابل ذخیره‌سازی توسط سدهای موجود کشور است. لذا دولت در تدوین برنامه‌های توسعه کشور، سدسازی را به عنوان یکی از محورهای توسعه معرفی کرده و توجه خاصی به این بخش معطوف نموده است. به عنوان مثال، در سه رودخانه مهم کشور (کارون، دز و کرخه) بیست سد بزرگ در دست مطالعه و یا در فاز اجرا قرار گرفته که به همراه دو سد موجود در حوضه‌های کارون و دز جمعاً **۲۲** سد بر روی این سه رودخانه احداث خواهد شد که از این تعداد **۱٤** سد از نوع بتنی قوسی است. این موضوع به خوبی اهمیت و جایگاه تحقیقات بیشتر بر روی مقوله ایمنی سدهای بتنی قوسی را به عنوان یکی از نیازهای روز مهندسی کشور نشان می‌دهد (Fadaei Tehrani & Rahimzade Rofooei, 2005b).

سدهای بتنی قوسی به لحاظ مکانیزم انتقال بارها به تکیه‌گاه و همچنین نحوه عملکرد و اثرات درزهای انقباض بر پاسخ سد، یکی از مسائل پیچیده در مهندسی سازه است. در کنار هم بودن چند محیط مختلف که اثرات اندرکنشی زیاد و موثری را بر روی هم دارند، بررسی رفتار چنین سیستمی را پیچیده‌تر کرده است. در زمان وقوع زمین‌لرزه، اثرات متقابل و اندرکنش بدنه سد با سنگ بستر و مخزن به همراه غیریکنواختی موج ورودی زلزله، تشکیل چنان سیستم به هم پیوسته و پیچیده‌ای را می‌دهد که تاکنون حل کامل آن میسر نشده است (Buffi et al., 2020).

در حل هر مسئله، فرضیات ساده‌کننده‌ای در ابتدا مطرح بوده که در طی پیشرفت دانش بشری، به فرضیات منطقی‌تر و یا در مواردی به حذف فرضیات قبلی منجر شده است. بدیهی است که هرچه سیستم پیچیده‌تر باشد، به فرضیات بیشتری برای حل مهندسی آن نیاز است که سیستم سازه‌ای سدهای بتنی قوسی نیز از این امر مستثنی نیست. عوامل متعددی بر واکنش و رفتار سدهای بتنی قوسی تحت بارهای دینامیکی زلزله موثر است که از جمله این عوامل می‌توان به اندرکنش بین مخزن و

سد، اندرکنش بین پی و سد و اثر درزهای انقباض[1] اشاره کرد (Ahmadi et al., 2001; Alembagheri & Ghaemian, 2013).

در این پژوهش به روش‌های تحلیل و ارزیابی ایمنی سدهای بتنی قوسی پرداخته خواهد شد و ضمن بیان پارامترهای اصلی تأثیرگذار بر پاسخ لرزه‌ای این سازه عظیم به بررسی تأثیر اندرکنش مخزن-بدنه سد و پی-بدنه سد پرداخته خواهد شد. همچنین شرایط مرزی حاکم بر معادلات پاسخ لرزه‌ای مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در حقیقت سوال اصلی این پژوهش تعیین پارامترهای موثر و میزان تأثیر آنها در پاسخ لرزه‌ای سدهای بتنی قوسی است.

۲- مروری بر یافته‌های موجود

Niwa & Clough (1982) مجموعه‌ای آزمایش‌ها با استفاده از میز لرزان بر روی مدل فیزیکی قوسی متشکل از قطعات متصل به هم انجام داده‌اند. هدف از انجام این آزمایش‌ها بررسی اثر تغییر مکان نسبی در محل درزهای قائم سدهای بتنی قوسی بر پاسخ آنها در طی زلزله بود. در این مطالعه مشخص شد که با باز شدن درزهای قائم تنش‌های کششی در جهت قوس به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. علاوه بر این باز شدن این درزها باعث کاهش سختی قوس شده و در نتیجه باعث افزایش پریود طبیعی ارتعاشی آن می‌شود و ممکن است که پریود سازه را به بخش دیگری از طیف پاسخ منتقل کرده و لذا میزان پاسخ حداکثر را تغییر دهد. همچنین به علت باز شدن ناقص درزها، سطح تماس موثر بلوک‌ها با یکدیگر کاهش یافته و در نتیجه تنش‌های فشاری و قوسی به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. این تنش‌های فشاری بزرگ سبب خرد شدن بتن در محل تماس بلوک‌های مجاور شده و باعث ناپایداری و شکست قوس می‌گردد (Lotfollahi-Yaghin & Hesari, 2008).

Dowling & Hall (1987) در یک مطالعه مشابه، از مدل فوق الذکر برای بررسی اثر باز و بسته شدن درزهای انقباض قائم و درزهای اجرایی افقی بر رفتار یک سد بتنی قوسی استفاده کردند. در این مطالعه آب، تراکم ناپذیر و بی، بدون جرم فرض شده و درزهای اجرایی افقی به صورت صفحات ضعیفی که از قبل مشخص شده‌اند، در نظر گرفته شد. همچنین از اثرات غیر خطی ناشی از رفتار غیر خطی بتن در فشار و همچنین لغزش سطوح درز و ایجاد شدن ترک‌های مایل در بدنه سد صرف نظر شده و ترک‌ها فقط می‌توانند در محل‌های از پیش تعیین شده (درزهای اجرایی افقی و درزهای انقباضی قائم) ایجاد شوند. پس از تحلیل سد Pacoma با استفاده از این مدل، آنها نتیجه گرفتند که تنش‌های فشاری در سطوح باقیمانده تماس، پس از باز شدن ناقص درزهای قائم افزایش می‌یابند و این افزایش تنش فشاری ممکن است آنقدر بزرگ باشد که فرض رفتار الاستیک خطی بدنه سد را نقض کند. علاوه بر این بازشدگی‌های بزرگ در محل درزهای انقباض و درزهای افقی در تراز فوقانی سد می‌تواند فرض عدم لغزش در درزها را مخدوش نماید، بخصوص در درزهای فاقد کلید برشی که دارای مقاومت برشی کافی نیستند. حتی در درزهایی که دارای کلید برشی شیبدار هستند، در اثر جداشدگی کلی سطوح، احتمال لغزش وجود خواهد داشت. همچنین در اثر باز شدن درزهای انقباضی قائم و باز توزیع نیروها، نیروها به

[1] Contraction Joints

طره‌ها منتقل می‌شوند و اگر تنش‌های اضافی ایجاد شده در طره‌ها در اثر این بازتوزیع نیروها بیشتر از تحمل طره‌ها باشد، طره‌های سد دچار ترک خوردگی خواهند شد. به هرحال، عدم توانایی این مدل در ملاحظه لغزش درزها کاربرد نتایج این تحلیل را محدود می‌سازد (Lotfollahi-Yaghin & Hesari, 2008).

Taskov & Jurukovski (1988) رفتار طره مرکزی یک سد قوسی را که با دو طره مجاور محصور شده بود، مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه اصطکاک سطوح تماس در مدل در نظر گرفته شد. با استفاده از این مدل که نتایج آن با نتایج فیزیکی مطابقت داشته، چنین نتیجه‌گیری شد که لغزش در سطوح تماس، خرد شدن بتن در مناطق تماس و باز شدن درزها، بر پاسخ دینامیکی سد قوسی اثر قابل توجهی دارند. همچنین مطالعات انجام شده نشان دهنده آن بود که تنش‌های طره‌ای در ترازهای فوقانی سد ممکن است به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یابند که این امر خود می‌تواند باعث ترک خوردن طره‌ها شود.

Fenves et al. (1984-1992) با استفاده از المان درز میان لایه‌ای با ضخامت صفر، پدیده باز و بسته شدن درزهای انقباض را مدل کردند. در این مطالعات اثر لغزش در درزها و رفتار غیر خطی بتن در نظر گرفته نشده بود. در این تحقیق از روش پیشنهاد شده توسط Row & Schricker (1984) برای مدل کردن اثرات غیر خطی موضعی درزهای انقباض به‌وسیله روش زیر سازه‌ها استفاده شده است. لذا استفاده از این روش باعث کاهش چشمگیر حجم محاسبات تحلیلی گردید. در این تحلیل، پی سد انعطاف پذیر در نظر گرفته شده و به وسیله المان‌های ۸ گرهی تا عمق دلخواهی مدل شد، همچنین آب مخزن تراکم ناپذیر (با مفهوم جرم افزوده) و از اثر جذب انرژی توسط رسوب کف مخزن صرف نظر شده بود. بدنه سد توسط مجموعه‌ای از المان‌های حجمی ۸ گرهی، المان‌های پوسته ضخیم و المان‌های پوسته ضخیم سه بعدی مدل شده است. این تحقیق، درک خوبی از رفتار درزهای انقباض در سدهای قوسی ایجاد کرد و بعضی از مشاهدات انجام شده توسط محققین قبلی را مورد تایید قرار داد (Lotfollahi-Yaghin & Hesari, 2008).

Weber et al. (1991) رفتار غیر خطی سدهای قوسی به علت وجود درزها و ترک‌های از پیش تعیین شده را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه با فرض کلیدهای برشی در درزها از لغزش طره‌ها جلوگیری به عمل آمد. همچنین پی سد، صلب و مخزن خالی در نظر گرفته شد. در این تحلیل شتاب زلزله در راستای رودخانه اعمال گردید تا امکان واژگونی طره‌ها تحت اثر تحریکات زلزله بررسی شود. نتایج این تحلیل نشان داد که افزایش باز شدن درزها باعث می‌شود که طره‌ها تحت اثر خمش و پیچش قرار گیرند. به هر حال فرض وجود کلید برشی در درزها باعث جلوگیری از اختلاف فاز در حرکت طره‌ها و سبب پایدار شدن آنها و جلوگیری از ایجاد تنش‌های خمشی بحرانی شده است.

Hohberg (1992) در یک بررسی جداگانه، همان سد تحلیل شده توسط Weber را با فرضیاتی مشابه در مورد مخزن و پی، مورد مطالعه قرار داد. در این مطالعه، او از یک مدل درز نسبتاً مفصلی استفاده کرد که قادر به در نظر گرفتن لغزش اصطکاکی و لغزش ناشی از جدا شدگی سطوح بود. همچنین ناهمواری‌های سطوح تماس نیز در این مدل در نظر گرفته شد. سد به وسیله مجموعه‌ای از المان‌های حجمی ۲۰ گرهی مدل شده و کلیدهای برشی به وسیله افزایش ارتفاع ناهمواری-

های سطوح در مدل وارد شده بود. نتایج این مطالعه با نتایج مطالعات قبلی مبنی بر این که باز شدن درزها باعث کاهش تنش‌های کششی در جهت قوس می‌شود، تطبیق داشت (Hohberg, 1992).

Bolognini et al. (1992) یک مدل اصطکاکی را برای در نظر گرفتن اثر لغزش در درزها توسعه دادند. آنها از این مدل برای تحلیل یک سد قوسی با مخزن خالی استفاده کردند. در این تحلیل، تنها درزهای ترازهای پایین سد فعال در نظر گرفته شدند. به علت این فرض و صرف نظر کردن از اثر مخزن، آنها نتیجه گرفتند که اثر حرکت نسبی درزهای انقباض بر رفتار سد ناچیز است (Lotfollahi-Yaghin & Hesari, 2008).

Norozian (1995) پس از اصلاح و توسعه برنامه ADAP-88 ، رفتار غیرخطی ناشی از شکست کششی-برشی درزها در تحلیل اجزاء محدود سد قوسی را مورد بررسی قرار داد. او معیار شکست دو بعدی موهر-کلمب را برای شکست برشی و معیار مقاومت کششی را برای شکست کششی درزها استفاده کرده و اثرات متقابل جابجایی‌های برشی و نرمال درز را با توجه به ارتفاع کلیدهای برشی در مدل المان وارد نمود. در این مطالعه نتایج عددی برای مقادیر تنش قوسی و تنش طره‌ای در دو حالت استفاده از مقادیر ضرائب سختی مماسی و نرمال درز با اختلاف بزرگی ۱۰۰ برابر، مقایسه گردید. این مقایسه نشان داد، کاهش ضریب سختی به اندازه دو مرتبه بزرگی، اثر مهمی بر توزیع و مقدار تنش‌های حداکثر در سازه سد نداشته و از طرفی، روند همگرایی در محاسبات عددی را هموارتر می‌کند و نوسانات نادرستی که در محاسبه پاسخ درزها در تحقیقات متعدد مشاهده شده، منتفی می‌شود (Norozian, 1995).

کاربرد اولیه روش ترک گسترده در آنالیز دینامیکی غیر خطی سدهای بتنی قوسی به مدلسازی درزهای انقباض اختصاص دارد. در این مورد Kuo (1982) نسبت به ارائه یک مدل المان میان لایه‌ای دو بعدی (قابل تعمیم به سه بعدی) به نام مدل ترک گسترده میان لایه ای[۲] اقدام نموده است. همچنین Norozian (1995)، برای نواحی فشاری از مدل سطح مرزی[۳] و برای نواحی کششی از روش ترک گسترده استفاده کرده است. مدل ایشان بر اساس داده‌های جدید آزمایشگاهی، اصلاح شده و موارد جدیدی به منظور مدلسازی ترک خوردگی و بررسی رفتار پس از ترک خوردگی به مدل اضافه شده است. در وضعیت تنش‌های فشاری از یک رفتار نرم شوندگی کامل کرنش بصورت صرفنظر کردن از صلبیت مصالح در نقطه انتگرال گیری (گوس) و عدم تحمل تنش پس از رسیدن وضعیت تنش به سطح خرابی، استفاده شده است. همچنین ایشان با ترکیب مدل ترک گسترده و سطح مرزی، به یک نوع مدلسازی ترکیبی برای بتن دست یافت که قادر است رفتار مصالح را در وضعیت‌های مختلف تنش برآورد کند. ایشان در کاربرد این مدل‌ها در سدهای قوسی با انتخاب سد ماروپوینت نسبت به بررسی پاسخ لرزه‌ای آن اقدام کرد. نتایج بدست آمده حاکی از این است که ترک خوردگی در سدهای قوسی در رقوم بالای سازه ایجاد می‌گردد. همچنین توزیع مجدد تنش‌های فشاری بر کاهش تنش کششی بتن اثر مهمی دارد. لذا لازم است تنش‌های کششی و فشاری در چنین سازه‌ای تا حد ممکن دقیق حساب شود. احتمال انهدام بتن تحت تنش‌های فشاری در مناطق نزدیک به درزهای انقباض خیلی ناچیز است (Norozian, 1995).

[2] Interface Smeared Crack Model
[3] Boundary Surface

Karimi Shahi Farm (1996) رفتار غیر خطی سد بتنی قوسی کارون IV در ایران را مورد بررسی قرار دادند. برای انجام این مطالعه از برنامه PADAP (Persian ADAP[۴]) استفاده گردید. آنها از این مطالعه نتیجه گرفتند که با توجه به سطح تنش‌های کششی ایجاد شده در بدنه سد در آنالیز خطی، ترک خوردن بتن تحت اثر زلزله حتمی بوده و انجام آنالیز دینامیکی غیر خطی به منظور بررسی رفتار و واکنش سدهای بتنی قوسی در این حالت ضروری خواهد بود. به علاوه استفاده از تکنیک هائی نظیر افزایش مقاومت مجاز کششی و ضریب میرائی در آنالیز خطی، تنها تقریبی واقعی تر از واکنش حداکثر سازه بدست می‌دهد و ارزیابی پایداری بدنه سد تحت اثر بار زلزله بر اساس نتایج آنالیز خطی، بطور کامل و مطمئن امکان پذیر نخواهد بود. همچنین با توجه به نتایج آنالیزهای دینامیکی غیر خطی انجام شده در این تحقیق، مقادیر بازشدگی درزها و ترک‌های ایجاد شده در بدنه سد بطور کلی قابل توجه بوده و امکان وقوع لغزش نیز در امتداد درزها وجود خواهد داشت (Karimi Shahi Farm, 1996).

Dowling & Hall (1987) نسبت به استفاده از یک مدل ترک گسترده ساده به منظور مدلسازی درزهای انقباض و اجرایی اقدام کرد. در واقع در این کار تحقیقاتی درزهای انقباض بصورت المان‌های مستقل دیده نشده اند بلکه مدل ترک گسترده در دو جهت عمود بر هم، یکی جهت عمود بر مدلسازی درزهای انقباض و دیگری در جهت افقی به منظور مدلسازی درزهای اجرایی بکار گرفته شده است. لذا مدل ترک گسترده بکار رفته، مدلی با جهت‌های از پیش تعیین شده است که فقط قادر به ایجاد دو ترک در هر نقطه انتگرالگیری است. همچنین از نرم شوندگی کرنشی پس از ایجاد ترک صرفنظر شده است. بعبارت دیگر تنش کششی به یکباره از مقاومت کششی مصالح به صفر کاهش داده خواهد شد. گزینه‌ای در برنامه وجود دارد که می‌تواند درز قائم را برای المان‌های مشخص حذف کند. برای شبیه سازی کلیدهای برشی، گزینه دیگری تعبیه شده است که اجازه بازشدگی به ترک را می‌دهد ولی اجازه لغزش داده نخواهد شد. به جهت بررسی رشد ترک، پس از اینکه یکی از نقاط انتگرالگیری ترک خورد، مقاومت کششی نقاط دیگر انتگرالگیری یک المان به یک مقدار مشخص کاهش می‌یابد (Dowling & Hall, 1987).

Izadinia (2008)، با ارائه مدل بنیادی از المان درز سه بعدی با ضخامت صفر، با در نظر گیری پدیده‌های بـاز و بسته شدن و لغزش اصطکاکی، بـه بررسی اثرات شکست کششی-برشی درزها پرداخت. همچنین اثرات هیدرودینامیک سد و مخزن را با فرض آب تراکم پذیر بر اساس معادله انتشار امواج فشار در مخزن، مورد بررسی قرار داد. ایشان مطالعه خود را به بررسی پاسخ لرزه‌ای سد قوسی ماروپوینت تحت رکورد زلزله تفت متمرکز کرد. مدل بنیادی درز تدوین شده، قادر به در نظر گرفتن اثرات غیر خطی باز و بسته شدن درز، لغزش اصطکاکی در وضعیت بسته یا نیمه باز و لغزش آزاد در وضعیت کاملاً باز درز، اثرات کلیدهای برشی، درگیری جابجایی‌های برشی و نرمال و غیر همبسته بودن رفتار غیر خطی است. با توجه به نتایج پاسخ دینامیکی سد ماروپوینت و تحلیل پارامتریک آن، هر دو پدیده باز شدگی و لغزش درزهای انقباض قائم (متناظر مودهای اول و دوم شکست) تغییرات مهمی در میدان‌های جابجایی و تنش سد در مقایسه با تحلیل الاستیک خطی خواهند داشت و همچنین کلیدهای برشی با مقاومت کافی، نقش مهمی در یکپارچگی و پایداری سد در برابر زمین لرزه دارند،

[۴] نسخه اصلاح شده برنامه ADAP توسط شرکت مهندسین مشاور مهاب قدس ایران

بطوری که این عناصر، چسبندگی مربوط به درزهای انقباض را نیز تامین می‌کنند. درزهای انقباض بدون کلید برشی، قادر به تامین مقاومت برشی هنگام وقوع بازشدگی یا شکست کششی درز نبوده و مستعد لغزش برشی بیشتری در مقایسه با درزهای با کلیدهای برشی است. در این زمینه طراح سد، با شناخت میزان لغزش برشی و عواقب آن بر تنش‌ها و ایمنی سد، قادر به توجیه اقتصادی سد و هزینه‌های اجرای کلیدهای برشی در درزهای انقباض خواهد بود (Izadinia, 2008).

Lotfi (2000) ضمن تهیه برنامه کامپیوتری با عنوان MAP76 که با استفاده از روش اجزاء محدود قادر به مطالعه اثرات غیر خطی درزها و مصالح بتنی بدنه سد بر پاسخ لرزه‌ای سدهای بتنی قوسی است، با مطالعه جامع و پارامتریک بر روی سد شهید رجایی (تجن) نسبت به ارزیابی تغییرات سطح تنش و تغییر مکان‌ها در حالات مختلف اقدام کرد. برنامه ایشان قادر به در نظر گیری درزهای موجود در سد مشتمل به درزهای انقباض، درزهای اجرایی، درزهای پیرامونی سد است. اثرات مخزن بصورت جرم افزوده در نظر گرفته شده است. مدل درز ایشان قادر به مدلسازی رفتارهایی نظیر بازشدگی اولیه، باز و بسته شدن مکرر درز و در عین حال رفتار غیر خطی در برش برای درزهای پیرامونی بصورت ساده شده، است (Lotfi, 2000).

Radin (2008) ضمن تهیه برنامه کامپیوتری با نام SNAP که با استفاده از روش اجزاء محدود اثرات غیر خطی درزها و مصالح بتنی بدنه سد را بر پاسخ لرزه‌ای سد بتنی قوسی در نظر می‌گیرد. او با مطالعه موردی سد شهید رجایی (تجن)، نسبت به بررسی رفتار غیر خطی دینامیکی سدهای قوسی اقدام کرد. مدل درز او قادر به مدلسازی باز و بسته شدن درز با در نظر گیری مقاومت کششی اولیه است. ایشان مطالعات پارامتریک وسیعی نسبت به تعداد درزهای انقباض، وجود یا عدم وجود درزهای پیرامونی در مدل و مقادیر مختلف سختی درزها انجام داد. همچنین پی صلب فرض شده و برای اثرات مخزن از مفهوم جرم افزوده استفاده گردیده است (Radin, 2008).

Lotfi (2000) با استفاده از کاربرد المان حجمی **۲۰** گرهی با گزینه‌های رفتاری خطی، ترک گسترده تک راستا، ترک گسترده چند راستای غیر عمود و الاستوپلاستیک نسبت به بررسی پاسخ لرزه‌ای سد شهید رجایی (تجن) اقدام کردند. ایشان نتایج کار تحقیقاتی خویش را با مطالعه پارامتریک روی مدل‌های ترک گسترده و الاستوپلاستیک ارائه کرده‌اند (Lotfi, 2000).

Omidi & Rahimzadeh (2001) رفتار درزهای انقباض در پاسخ لرزه‌ای سدهای بتنی قوسی را مورد مطالعه قرار دادند. آنها با مطالعه موردی سد ماروپوینت دریافتند که وجود درزهای انقباض باعث کاهش مقادیر حداکثر تنش‌های کششی و فشاری در سدهای بتنی قوسی می‌گردد. همچنین طی این مطالعه آنها به این نتیجه رسیدند که برای مطالعه رفتار درز در سدهای بتنی قوسی نیاز به مدلسازی تمام درزها نخواهد بود و با مدلسازی سه درز، یکی در وسط و دوتا در کنار، می‌توان اثر درزها را در مدل ایجاد کرد. همچنین آنها دریافتند استفاده از المان‌های حجمی **۸** گرهی و **۲۰** گرهی در مدلسازی بدنه سدهای بتنی قوسی، به نتایج نسبتاً مشابهی منجر می‌گردد.

Rahimzadeh & Omidi (2002) در ادامه مطالعات خود با کاربرد مدل غیر خطی بتن در نرم افزار ANSYS، مبتنی بر معیار گسیختگی ویلیام و وارنکه (المان SOLID65 نرم افزار ANSYS) پاسخ لرزه‌ای سد بتنی قوسی کرج را مورد بررسی قرار دادند. کاهش سطح تنش‌های کششی به حد مقاومت کششی بتن بدلیل ترک خوردن نقاطی از بدنه سد که پتانسیل ترک خوردگی را داشته اند و همچنین عدم امکان شکست فشاری بتن در سطح تحریک زلزله، از نتایج این بررسی بوده است. در ضمن، ایشان با ترکیب مدل درز گسسته (CONTAC52) و مدل بتنی با معیار ویلامز و وارنکه (SOLID65) کارایی این مدل ترکیبی در کاهش سطح تنش‌های کششی که با کاهش سطح خرابی نسبت به کاربرد مدل بتنی بصورت تنها همراه است، را نشان دادند (Rahimzadeh & Omidi, 2002). این نتایج در مطالعات بعدی رحیم زاده و فدائی نیز مورد تائید قرار گرفت.

Sohrabi Gilani & Ghaemian (2004) اثر درزهای اجرائی قائم بر رفتار دینامیکی سدهای بتنی با احتساب اندرکنش سد و دریاچه را مورد مطالعه قرار دادند. آنها در مطالعه خود یک مدل ریاضی برای بیان رفتار درزهای قائم ارائه دادند و بر اساس آن یک زیربرنامه به برنامه جامع آنالیز سدهای بتنی NSAD-DRI اضافه نمودند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که ضرائب سختی المان درز بر مقدار و توزیع تنش‌ها در بدنه سد، تأثیر بسزائی دارد (Sohrabi Gilani & Ghaemian, 2004). این نتایج در مطالعات بعدی قائمیان و فدائی در محدوده رفتار غیرخطی نیز بررسی و مورد تائید قرار گرفت.

۳- مواد و روش‌ها

سدهای بتنی قوسی مانند گنبدها و سایر سازه‌های پوسته‌ای بلحاظ شکل هندسی خاص، مکانیزم انتقال بار مناسبی را برای بارهای اعمالی ناشی از عوامل خارجی ایجاد می‌کنند. بنابراین به نظر می‌رسد با توجه به اهمیت نیروهای غشایی و خمش در قسمت‌های مختلف آن، کاربرد المان‌های مناسب پوسته می‌تواند گزینه مناسبی برای بررسی رفتار سدهای بتنی قوسی باشد. این امر سبب شد تا محققینی نظیر Fenves et al. (1989)، Dowling و دیگران به سمت استفاده از این نوع المان برای مدلسازی بدنه سدهای قوسی بروند. Dowling بطور مستقیم المان‌های پوسته را بوسیله یک سری المان‌های درز با ضخامت صفر (شامل فنر چرخشی و انتقالی) به یکدیگر متصل نمود (Gomes & Lemos, 2020).

روش دیگر مدل کردن بدنه سدهای قوسی، استفاده از المان‌های سه بعدی حجمی است. در این حالت از یک یا چند ردیف المان سه بعدی ۸ گرهی و یا المان هایی با درجات آزادی بالاتر نظیر المان‌های حجمی **۲۰** گرهی، برای مدل کردن بدنه سد استفاده می‌شود. البته تعداد معادلات در المان **۲۰** گرهی نسبت به المان پوسته بیشتر بوده و همچنین در المان‌های حجمی، نیاز به ریز کردن مش در برخی مناطق نیز احساس می‌شود (Hesari et al., 2015).

٤- نتایج و بحث

مقوله تامین ایمنی سدها در برابر زلزله، با وجود اثرات عوامل مختلف، یکی از زمینه‌های تخصصی و پیچیده‌ای است که سالهای متمادی ذهن محققین را به خود مشغول کرده است. در دو دهه اخیر با توجه به بالا رفتن توانایی کامپیوترها و ابداع

و اصلاح روش‌های مکانیک محاسباتی، پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای در حل چنین سیستم‌های پیچیده‌ای حاصل شده است (Liang et al., 2020).

با توجه به اینکه آسیب دیدن سدها در اثر بروز زلزله، سیل، یا هر دلیل دیگری می‌تواند موجب بروز یا تشدید خسارت و زیان‌های جانی و مالی گسترده و جبران ناپذیر گردد، ضرورت توجه به روش‌های تحلیل، طراحی و مقاوم سازی سدها در برابر بارهای وارده بخصوص بارهای ناشی از زمین لرزه، مشخص می‌شود. به علاوه با توجه به واقع شدن کشور ایران در مناطق با پتانسیل زلزله خیزی بالا توجه به این موضوع اهمیت بیشتری می‌یابد. لذا بررسی مجدد رفتار این سازه‌ها با استفاده از دانش روز بشری لازم به نظر می‌رسد، چرا که مطالعات انجام شده نشان داده که روش‌های قبلی طراحی بر خلاف انتظار محافظه کارانه نبوده و علاوه بر این، تعداد زیادی از سدها در مناطق با زلزله خیزی بالا، بعلت دوره بازگشت طولانی زلزله‌های بزرگ، هنوز زمین لرزه‌های پیش بینی شده توسط مطالعات لرزه خیزی را تجربه نکرده اند (Rezaiee-Pajand et al., 2021; Sani & Lotfi, 2010; Xu et al., 2020).

٤-١- عوامل موثر بر رفتار دینامیکی سدهای قوسی

به‌طور کلی عوامل موثر در رفتار یک سد بتنی قوسی در برابر بارهای دینامیکی ناشی از زمین لرزه، به شرح زیر است (Dehghani & Aghajanzadeh, 2019; Monteiro Azevedo, 2015):

١. تغییرات شدت و مشخصات حرکت زمین در امتداد پی سد (در امتداد عرض دره)

٢. امواج ناشی از آب موجود در مخزن که سبب تشدید فشارهای وارد بر بدنه سد می‌شود.

٣. اندرکنش بدنه سد و مخزن

٤. اندرکنش بدنه سد و مخزن با پی

٥. تغییر مشخصات مصالح بدنه سد و پی در اثر بارهای دینامیکی

٦. ترک خوردن یا باز و بسته شدن درزهای بدنه سد

علاوه بر موارد فوق، با توجه به ویژگی‌های منحصر بفرد هر سد و ساختگاه آن، عوامل خاص دیگری نیز وجود دارند که بر رفتار سدهای بتنی قوسی تأثیر گذار هستند.

مکانیسم‌های خرابی یا انهدام یک سد بتنی قوسی در هنگام وقوع زلزله را بر اساس مشاهدات و تجربیات بدست آمده، می‌توان به صورت زیر تقسیم بندی نمود (شکل ١):

۱. باز شدن درزهای قائم بین بلوک‌های مجاور بدنه سد (و یا ترک خوردن بدنه سد)، که سبب از دست رفتن یکپارچگی بدنه سد و تشدید عملکرد وزنی بخش جدا شده آن می‌گردد و در صورتیکه ایـن بلوک‌های جدا شده تحمل بـارهای اضافـی وارد شده را نداشته باشند، دچار گسیختگی شده و می‌تواند موجب آسیب دیدگی کلی یا موضعی سد گردد.

شکل ۱. مکانیزم‌های خرابی سد بتنی قوسی (Rezaiee-Pajand et al., 2021)

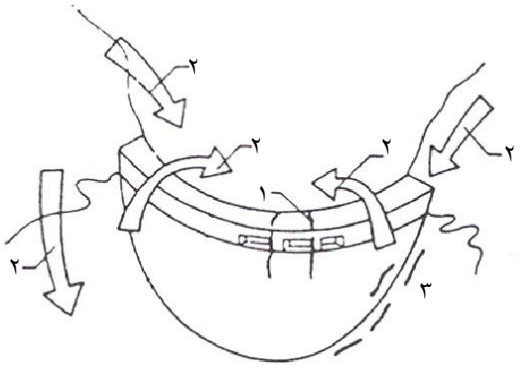

Fig 1. Failure mechanisms of arch concrete dam (Rezaiee-Pajand et al., 2021)

۲. لغزش توده‌های سنگ طرفین دره بر روی بدنه سد و یا داخل مخزن که می‌تواند موجب انهدام بخشی از بدنه سد، سرریز شدن آب مخزن از روی تاج سد، انهدام سرریزها و سایر سازه‌های کناری سد شده و در نهایت سبب انهدام کلی آن گردد.

۳. ترک خوردن و گسیختیگی پی سنگی سد که می‌تواند موجب صدمه دیدن بخشی از پرده تزریق و در نتیجه افزایش فشار آب منفذی در پی شده (افزایش فشار برکنش) و نهایتاً موجب لغزش و انهدام بدنه سد بدلیل عدم کفایت پی گردد.

تحت بارهای لرزه ای، تنش‌های کششی در بعضی از نقاط بدنه سد، بسیار فراتر از حدود مجاز و قابل تحمل بتن می‌رود و در نتیجه آن ترک هایی در بدنه سد ایجاد شده و یا درزهای افقی قائم موجود در بدنه سد باز می‌شوند. این فرایند می‌تواند موجب انهدام کلی و یا موضعی بدنه سد بشود (مکانیسم ۱). بررسی همه عوامل موثر بر واکنش سدهای بتنی قوسی در برابر بارهای دینامیکی ناشی از زلزله، نیازمند زمان و فرصت زیادی بوده و در این رساله به آن پرداخته نخواهد شد.

سدهای بتنی قوسی تحت اثر زمین لرزه‌های مختلف می‌توانند رفتاری غیرخطی داشته باشند. رفتار غیرخطی بدنه سد ناشی از تغییر مکان دو وجه درزهای انقباضی و یا رفتار غیرخطی بتن در کشش یا فشار است. آنالیز دینامیکی خطی با فرض اینکه سد، سازه‌ای یکپارچه با رفتار الاستیک باشد، معمولاً منجر به ایجاد تنش‌های قوسی کششی می‌گردد که مقدار آن از مقاومت کششی بتن فراتر می‌رود. از آنجائیکه سدهای قوسی بصورت بلوک‌های طره‌ای ساخته می‌شوند، درزهای بین بلوک‌ها نمی‌توانند تنش‌های کششی پیش‌بینی شده از آنالیز خطی را انتقال دهند. چرا که به لحاظ باز و بسته شدن درزهای انقباضی

در طی زلزله، تنش‌های قوسی کششی رها شده و نیروهای داخلی ناشی از عملکرد قوسی بدنه سد به نیروهایی متاثر از رفتار طره‌ای بلوک‌ها بازتوزیع می‌شوند.

نتایج مطالعات قبلی نشان می‌دهد که باز شدگی درزهای انقباض اثر قابل ملاحظه‌ای روی تغییر مکان و تنش‌های سد در پاسخ به حداکثر زلزله باور کردنی[5] دارد. بر پایه مطالعات انجام شده، وقتی درزها باز شده و بلوک‌های طره‌ای سد به سمت بالادست حرکت می‌کنند، رفتار قوسی سد از بین رفته و در اثر خم شدن طره‌ها بطرف بالادست شاهد کاهش تنش‌های کششی قوسی و افزایش تنش کششی طره‌ای در وجه پایین دست سد خواهیم بود (Alembagheri & Ghaemian, 2013; Fadaei Tehrani & Rahimzade Rofooei, 2005a).

٤-٢- درزهای اجرائی، درزهای انقباضی و درزهای طراحی شده در بدنه سد

به علت حرارت‌های ناشی از واکنش هیدراتاسیون سیمان، در ساعات اولیه پس از بتن ریزی، و نیز ملاحظات و محدودیت‌های اجرایی، امکان اجرای بتن ریزی و ساخت بدنه سد بصورت پیوسته و همگن وجود ندارد. بنابراین بتن ریزی بدنه سد در بلوک‌های قائم جداگانه، که عرض هر بلوک بطور معمول بین **۱۰** تا **۲۰** متر است، انجام می‌گیرد. بعلاوه در هر بلوک بدنه سد نیز در هر مرحله، به ضخامت مشخصی، معمولاً حدود **۱/۵** تا **۳** متر، عملیات بتن ریزی اجرا می‌گردد. بنابراین با توجه به نحوه اجرای عملیات بتن ریزی و ساخت بدنه سد، یک سری درزهای اجرائی افقی[6] و تعدادی درزهای انقباضی قائم[7] در بدنه سد وجود خواهند داشت. درزهای انقباضی قائم بدنه سد در حین ساخت بدنه سد و پس از اتمام آن، در چندین مرحله تزریق می‌شوند تا یکپارچگی نسبی بدنه سد تامین گردد (Gomes & Lemos, 2020).

در هنگام بروز هر یک از عوامل ایجاد ترک در بدنه سد، احتمال بازشدگی و ترک خوردن بتن در امتداد این درزهای افقی و قائم در بدنه سد، که بصورت صفحات ضعیف عمل می‌کنند، بسیار زیاد خواهد بود و با باز شدن این درزها، تنش‌های کششی موجود در آن محدوده از بدنه سد رها شده و در نتیجه باز توزیع تنش‌ها در بدنه سد صورت خواهد گرفت.

نکته قابل ذکر اینکه نتیجه بعضی تحقیقات انجام شده در مورد اثر درزهای بدنه در پاسخ لرزه‌ای نشان داده اند که باز شدن درزهای قائم و افقی (و یا ترک خوردن بتن بدنه سد) در حین وقوع زمین لرزه، بشرطی که پایداری کل سازه را تهدید نکند، می‌تواند با افزایش میرایی و شکل پذیری سازه، موجب افزایش قابلیت جذب انرژی و در نتیجه کاهش اثرات ایجاد شده در بدنه سد (تنش‌های بدنه سد) گردد. بعلاوه باز شدن درزهای بدنه سد از وقوع برخی ترک‌های احتمالی نامناسب که می‌تواند موجب انهدام کلی سد نیز گردد، جلوگیری می‌کند (MahinKhaki et al., 2015).

[5] MCE
[6] Construction Joint
[7] Constriction Joint

با توجه به مطالب فوق بعضی طراحان در شرایط معینی با در نظر گرفتن درزهای مناسب در بعضی قسمت‌های بدنه سد، رفتار سد را بطور دلخواه و مطلوب تغییر داده و ایمنی بیشتری را برای بدنه سد بوجود می‌آورند که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد (Fadaei Tehrani & Ghaemian, 2008):

الف) در بعضی سدها، بدلیل ضعیف بودن پی در قسمت‌های فوقانی دره، درزهای انقباضی بدنه سد در بخش فوقانی با نظم مشخصی باز باقی مانده و تزریق نمی شوند، این درزها هیچگونه نیرویی را در سطح خود انتقال نمی دهند و بنابراین از اعمال فشار به تکیه‌گاه‌های سد در بخش‌های مورد نظر جلوگیری بعمل می‌آید (مانند سد شهید رجائی).

ب) در بعضی سدهایی که از سرریز بر روی تاج سد استفاده شده، بمنظور کاهش تمرکز تنش در کناره‌های سرریز، درزهای انقباضی قائم سد در محدوده کناره‌های سرریز با نظم مشخصی تزریق نشده و باز باقی می‌مانند (مانند سد کارون III).

ج) نوع دیگری از درزهای طراحی شده در بدنه سد، درز پیرامونی[8] است. این نوع درزها سد را به دو قسمت تقسیم می‌کنند، یک قسمت بدنه سد اصلی سد و بخش دیگر زینچه سد[9] است (شکل**۲**). از جمله این سدها می‌توان سد دز در ایران، سد Osiglietta، سد Ponteracli و سد Vajont در ایتالیا را نام برد. این نوع درزها تأثیرات مفید و مهمی در رفتار سازه‌ای سد دارند که که در ادامه مورد بررسی و تحلیل قرار خواهد گرفت.

در این نوع سد، بدنه اصلی در محل این درزها، متکی بر زینچه بوده و در واقع زینچه سد را می‌توان به‌عنوان بخشی از پی سد به شمار آورد. این امر به طراح اجازه می‌دهد که سد را بدون توجه بـه مشکلاتی که معمولاً در حین حفاری پـی سد ایجاد می‌گردد (که موجب لزوم تغییر در طراحی بدنه سد می‌شود) طراحی کند. بعلاوه در مواردیکه شکل دره نامنظم و پیچیده است، می‌توان با استفاده از زینچه شکل دره را اصلاح نمود. کاربرد زینچه در مواردیکه ذکر گردید، این امکان را به‌وجود می‌آورد که با ایجاد تقارن، توزیع تنش‌ها در بدنه سد یکنواخت تر شده و در نتیجه از مقادیر حداکثر آنها کاسته شود (Fadaei Tehrani & Ghaemian, 2008).

شکل ۲. استفاده از درز پیرامونی به منظور ایجاد تقارن در سد Ponte Racli کشور ایتالیا (Fadaei Tehrani & Ghaemian, 2008)

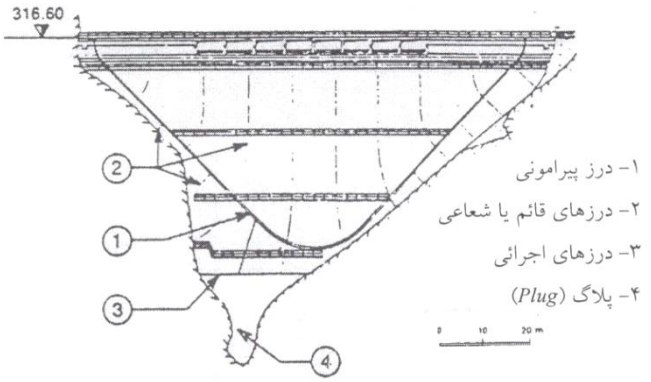

Fig 2. Utilizing surrounding joints to create symmetry in the Ponte Racli dam in Italy

[8] Peripheral Joint
[9] Pulvino

وجود درز پیرامونی علاوه بر اصلاح شکل سد و بهبود کلی توزیع تنش در بدنه سد، موجب رها شدن تنش‌های کششی ایجاد شده در مرزهای بدنه اصلی سد (بر اثر بارهای اعمال شده به سد و نیز نشست‌های تکیه گاهی) می‌شود و از بروز ترک‌های نامنظم در بدنه سد جلوگیری خواهد کرد.

مجموعه مطالب فوق بیانگر اهمیت درزهای طراحی شده و ترک‌های ایجاد شده در بدنه ناشی از رفتار طره‌ای سد است. در واقع در اثر وجود این درزها که به منزله عوامل کنترل کننده تنش در بدنه سد عمل می‌کنند، بدنه سد در محل این درزها بصورت موضعی رفتار غیر خطی داشته و قابلیت جذب انرژی به سبب افزایش انعطاف پذیری سازه، افزایش می‌یابد.

از دیدگاه آنالیز و مدلسازی بدنه سد، باید رفتارهای موضعی غیر خطی ناشی از باز و بسته شدن درزها و ترک‌های بدنه سد را در نظر گرفت. نکته قابل ذکر اینکه این رفتار غیر خطی فقط در بخش‌های محدودی از بدنه سد (محل درزها و یا ترک ها) وجود داشته و رفتار سایر قسمت**های** سازه خطی باقی می‌ماند و این امر بطور کلی موجب ساده تر شدن آنالیز و پرهیز از انجام آنالیزهای غیر خطی کلی که وقت و هزینه زیادی را نیاز دارد، می‌گردد.

٤-٣- روش‌های تحلیل سدهای بتنی قوسی

با نگاه گذرا به روند پیشرفت روش‌های آنالیز سدهای بتنی قوسی، چنین به نظر می‌رسد که در آغاز، آنالیزها با استفاده از روابط بسیار ساده محاسبه تنش برای یک رینگ تحت فشار و با در نظر گرفتن قوس**های** سد بصورت مستقل و منفرد انجام می‌شد و سپس با گذشت زمان روش**های** مناسب تری که عملکرد سه بعدی سد را با در نظر گرفتن توام قوس‌های افقی و طره**های** قائم سد و تامین شرایط سازگاری تغییر مکان**ها** برای آنها، در تحلیل وارد می‌کردند، مورد استفاده قرار گرفتند. از جمله این روش‌ها می‌توان روش معروف بار آزمون[10] را نام برد که توسط USBR نیز در سال **۱۹۷۷** توصیه و بسط داده شد. نتایج حاصل از این روش نسبت به روش**های** قبلی دقیق تر است. با پیشرفت روش اجزاء محدود[11] در آنالیز سازه‌ها و با توجه به توانایی**های** این روش در مدل کردن شکل‌های هندسی پیچیده و شرایط مرزی مختلف، از این روش‌ها در آنالیز سدهای بتنی قوسی نیز استفاده شد (Lotfollahi-Yaghin & Hesari, 2008). روش اجزاء محدود یک روش عددی است که می‌توان آنرا برای حل مسائل متعدد و متنوع مهندسی در حالات مختلف پایدار، گذرا، خطی و یا غیر خطی مانند تحلیل تنش، انتقال حرارت و جریان سیال بکار گرفت. این روش که ریشه‌های آن به سال‌های اولیه **۱۹۰۰** میلادی بر می‌گردد، عملاً در دهه **٦٠** میلادی به صورت کلاسیک مدون و داخل مباحث مهندسی بخصوص مهندسی عمران و مکانیک گردید و در دو دهه پایانی هزاره دوم همزمان با توسعه پردازشگرهای کامپیوتری، به طور شگفت آوری در مراکز علمی و صنعتی جهان رسوخ نمود. از جمله برنامه‌های اجزاء محدود برای آنالیز سدهای بتنی قوسی، می‌توان به برنامه ADAP[12] که توسط دانشگاه کالیفرنیا به درخواست موسسه USBR، تهیه شده است، اشاره کرد. روند توسعه و پیشرفت روش‌های آنالیز سدها، فاصله بین رفتار واقعی سازه و مدل‌های تحلیلی و محاسباتی مورد استفاده در آنالیز طراحی سدها را به تدریج کاهش داده

[10] Trial-load method
[11] Finite Element
[12] Arch Dam Analysis Program

است. ولی هنوز پدیده‌هایی وجود دارد که به طور مطلوب در مدل‌های تحلیلی آنالیز وارد نشده‌اند. از این جمله می‌توان به رفتار غیر خطی مصالح بدنه سد و پی (نظیر پدیده ترک خوردن بتن) و نیز تأثیرات متقابل اجزاء مختلف سازه (بدنه سد-پی و مخزن) اشاره کرد. از آنجا که روش المان محدود از قابلیت انعطاف پذیری لازم برای وارد کردن تمهیدات و تکنیک‌های جدید در آنالیز برخوردار است، می‌توان با استفاده از آن در مدلسازی سازه، ناپیوستگی هایی نظیر ترک خوردگی را در آنالیزها وارد کرد (Ahmadi et al., 2001; Monteiro Azevedo, 2015).

۵- نتیجه‌گیری

در خصوص تعیین پاسخ لرزه‌ای سدهای بتنی قوسی تاکنون مطالعات بسیار گسترده و متنوعی صورت گرفته است. اما به دلیل پیچیدگی و زیاد بودن متغیرهای تأثیر گذار بر رفتار این گونه سازه‌ها هنوز موضوعات متعدد دیگری باقی مانده که می‌تواند زمینه انجام مطالعات جدید در آینده باشند. از این جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- بررسی جامع تر پدیده ترک خوردن بتن بدنه سد تحت اثر تنش‌های کششی
- مطالعه و توسعه مدل‌های رفتار غیر خطی برای بتن با استفاده از تئوری مکانیک شکست
- بررسی لغزش در امتداد درزها یا ترک‌های باز شده بدنه سد
- مطالعه و بررسی اثر کلیدهای برشی بر رفتار المان درز
- تعیین ضرائب سختی نرمال و برشی المان درز با انجام مطالعات تجربی
- مطالعه میرائی مصالح و تأثیر آن بر پاسخ لرزه‌ای سد
- بررسی جامع تر رفتار سدهای بتنی قوسی تحت تأثیر انواع رکوردهای نزدیک گسل و دور از گسل و مقایسه نتایج

٦- تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافعی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

۷- منابع

Ahmadi, M., Izadinia, M., & Bachmann, H. (2001). Discrete crack joint model for nonlinear dynamic analysis of concrete arch dam. *Computers & Structures, 79*, 403-420. https://doi.org/10.1016/S0045-7949(00)00148-6

Alembagheri, M., & Ghaemian, M. (2013). Damage assessment of a concrete arch dam through nonlinear incremental dynamic analysis. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *44*, 127-137. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.09.010

Buffi, G., Manciola, P., De Lorenzis, L., Cavalagli, N., Comodini, F., Gusella, V., Mezzi, M., Niemeier, W., Tamagnini, C., & Gambi, A. (2020). Dynamic analysis of concrete arch-gravity dams: the case of Ridracoli.

Dowling, M. J. A. Hall., J.F. (1987). Nonlinear Seismic Analysis of Arch Dams, *Journal of Engineering Mechanics*. *ASCE*, *115*(4), 768-789.

Dehghani M., & Aghajanzadeh H. M. (2019). Seismic response of concrete arch dams due to different non-uniform ground motion models Document Type : Case study. *Numerical Methods in Civil Engineering*, *4*(2). https://doi.org/10.52547/NMCE.4.2.55

Dowling, M.J. & Hall, J.F. (1987). Nonlinear seismic analysis of arch dams, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE. 115(4): 768-789.

Fadaei Tehrani, M. R., & Rahimzade Rofooei, F. (2005a). Evaluation of the seismic response of concrete arch dam including the foundation mass. *ICOLD*.

Fadaei Tehrani, M. R., & Rahimzade Rofooei F. (2005b). Investigating the seismic response of the concrete arch dam subjected to near field earthquake. *ICOLD*.

Fadaei Tehrani, M. R., & Ghaemian M. (2008). Seismic analysis of arched concrete dams considering the foundation mass under the influence of earthquakes near the fault, PhD thesis., Sharif University of Technology, Faculty of Civil Engineering.

Fadaei Tehrani, M.R. (2023a). Analysis and evaluation of water governance in Iran based on the suggested principles of OECD. *Iranian Dam and Hydroelectric Poweplant*, Under press.

Fadaei Tehrani, M. R. (2023b). Analysis and stratification of hydropolitic challenges of Iran's border rivers. *Iranian Dam and Hydroelectric Poweplant*, Under press.

Fenves, G., & Chopra, A.K. (1984). Earthquake analysis of concrete gravity dams including reservoir bottom absorption and dam-water-foundation rock interaction. *Earthquake Engineering and Structured Dynamics*. 12(5): 663-680.

Fenves, G., & Chopra, A.K. (1985). EAGD-84 : A computer program for earthquake analysis of concrete gravity dams", Report No. UCB/EERC 84-11, *University of California, Berkeley*.

Fenves, G. L., Mojtahedi, S., & Reimer, R. B. (1989). ADAP88: A computer program for nonlinear earthquake analysis of concrete arch dams. Report No. EERC 89-12. Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA.

Fenves G.L., & Mojtahedi (1992). Effects of contraction joints on earthquake response of an arch dam. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 118(4).

Gomes, J., & Lemos, J. (2020). Characterization of the dynamic behavior of a concrete arch dam by means of forced vibration tests and numerical models. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, *49*. https://doi.org/10.1002/eqe.3259

Hesari, M., Ghaemian, M., & Shamsai, A. (2015). Advanced nonlinear dynamic analysis of arch dams considering joints effects. *Advances in Mechanical Engineering*, *6*, 587263-587263. https://doi.org/10.1155/2014/587263

Hohberg, J. M. (1992). A joint element for the nonlinear dynamic analysis of arch dams. *Report No. 186,* Institute of Structural Engineering, ETH Zurich, Switzerland.

Izadinia, M. (2008). Nonlinear dynamic analysis of arched concrete dam considering tensile-shear failure of joints. *Ph.D.* Thesis, Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University.

Karimi Shahi Farm, G. A. (1375). Dynamic analysis of arched concrete dams (Case study of Karoon III Dam). Sharif University of Technology, Faculty of Civil Engineering.

Kuo, J. S. H. (1982). Joint opening nonlinear mechanism: Interface smeared crack model. University of California, College of Engineering, Earthquake Engineering Research Center.

Liang, H., Tu, J., Guo, S., Liao, J., Li, D., & Peng, S. (2020). Seismic fragility analysis of a high arch dam-foundation system based on seismic instability failure mode. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *130*, 105981. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105981

Lotfi, V. (2000). Investigation of nonlinear dynamic behavior of arched concrete dams. Scientific Research Council of the country, National Research Program, Faculty of Civil Engineering, Amir Kabir University of Technology.

Lotfollahi-yaghin, M., & Hesari, M.A. (2008). Dynamic analysis of the arch concrete dam under earthquake force with ABAQUS. *Journal of Applied Sciences*, *8*. https://doi.org/10.3923/jas.2008.2648.2658

MahinKhaki, N., Hoseyni, S. M., & Fadaei Tehrani, M. R. (2015). Estimation of the sismic response of concerete dams using support vector machine [Research]. *Iranian Dam and Hydroelectric Powerplant*, *2*(6), 12-19.

Monteiro Azevedo, N. (2015). Dynamic analysis of concrete dams: fluid structure displacement based interaction models. *Dam Engineering*, *Vol XXV*, 1-20.

Norozian, B. (1995). Nonlinear seismic analysis of concrete arch dams. Ph.D. Thesis, Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University.

Niwa, A., & Clough, R.W. (1982). Non-linear seismic response of arch dams, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 10, 267-281.

Omidi O., & Rahimzadeh, F. (2008). Investigation of the behavior of contraction joints in the seismic response of arched concrete dams. Master's Thesis, Faculty of Civil Engineering, Sharif University of Technology.

Radin, E. (2008). Investigation of nonlinear dynamic behavior of arched concrete dams. PhD thesis, Faculty of Civil Engineering, Amir Kabir University of Technology.

Rahimzadeh, F., & Omidi, O. (2002). Investigation of the effects of non-linear behavior of concrete on the seismic response of arched concrete dams. The first conference on safety and improvement of structures, Tehran. https://civilica.com/doc/629

Rezaiee-Pajand, M., Kazemiyan, S., & Sani, A. (2021). A literature review on dynamic analysis of concrete gravity and arch dams. *Archives of Computational Methods in Engineering*, *28*. https://doi.org/10.1007/s11831-021-09564-z

Sani, A., & Lotfi, V. (2010). Dynamic analysis of concrete arch dams by ideal-coupled modal approach. *Engineering Structures, 32*, 1377-1383. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.01.016

Sohrabi Gilani., M. & Ghaemian, M.(2004). Effect of vertical joints on the dynamic behavior of concrete dams including dam-lake interaction. Sharif University of Technology, Faculty of Civil Engineering.

Taskov, L., & Jurukovski, D. (1988). Analytical studies of non-linear behaviour of arch dams using shaking table test results of an arch dam fragment. In *9th World Conference on Earthquake Engineering* (pp. 385-390).

Weber, B., Hohberg, J. M., & Bachmann, H. (1991). Earthquake analysis of arch dams including joint nonlinearity and fluid-structure interaction. In *International conference on earthquake resistant construction and design* (pp. 349-358).

Xu, Q., Xu, S., Chen, J., & Li, J. (2020). Investigation of stochastic seismic response and index correlation of an arch dam using endurance time analysis method. *Advances in Civil Engineering*, *2020*, 8862869. https://doi.org/10.1155/2020/8862869