

Numerical Study of the Effect of No Injection and Joint Thickness on The Stresses in The Arched Concrete Dam with Shrinkage Joints

Mohammadreza Kiaei Jamali

Master of Civil Engineering, Islamic Azad University, Lahijan Branch, Lahijan, Iran

Alireza Mardookhpour*

Assistant Professor of Civil Engineering, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran

Alireza.mardookhpour@liau.ac.ir

Abstract

Considering the important and vital role of dams in the industry and economy of countries and the catastrophic nature of their possible failure, the safety of these huge structures is of special importance. Arched, Karun 4 double arched concrete dam has been selected as a case study. ABAQUS 6.12 finite element software was used for numerical analysis of Karun 4 dam. In this research, three numerical models were modeled and analyzed so that in the linear model, the dam body was completely integrated and homogeneous, and in two nonlinear models, the contraction joints in the dam body with two different and widely used types were considered. The results show that the lack of injection of the joint has caused a significant increase in the maximum stresses upstream of the dam so that most of the upstream of the dam, which was initially working under pressure, has been stretched. Tensile stresses in the upstream support and downstream canopy of the dam have also increased. On the other hand, the amount of vertical compressive stresses between the contact surfaces in the absence of seam injection has increased significantly that these stresses in the vicinity of the injection stop level has almost doubled to the original level. Blocks zero and one, the maximum of which in full injection is 13.5 MPa, has increased to 11.3 MPa at this point without injection. The results show that by increasing the joint thickness and if the joint is not injected, the values of maximum stresses, minimum stresses, barrier displacements and vertical compressive force between the contact surfaces are significantly increased.

Keywords: No Injection, Joint Thickness, Stress, Arched Concrete Dam, Shrinkage Joint

* Corresponding Author

Kiaei Jamali, M., Mardookhpour, A. Numerical Study of the Effect of No Injection and Joint Thickness on the Stresses in the Arched Concrete Dam with Shrinkage Joints. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 2021; 6(2): 172-201. <http://doi.org/10.30478/jcsm.2022.312913.1231>

2538-5828/ © 2021 The Authors. Published by Iranian Concrete Society

This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

بررسی عددی اثر عدم تزریق و ضخامت درز بر تنش های وارده در سد بتنی قوسی همراه با درزهای انقباضی

دریافت مقاله: ۱۵-۰۸-۱۴۰۰

پذیرش مقاله: ۱۷-۰۱-۱۴۰۰

محمد رضا کیایی جمالی

کارشناس ارشد گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان، لاهیجان، ایران

علیرضا مردوخ پور*

استادیار گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان، لاهیجان، ایران

Alireza.mardookhpour@liau.ac.ir

(نویسنده مسئول)

چکیده

با توجه به نقش مهم و حیاتی سدها در صنعت و اقتصاد کشورها و فاجعه آمیز بودن شکست احتمالی آنها بررسی ایمنی این سازه های عظیم از اهمیت خاصی برخوردار می باشد. لذا در تحقیق حاضر که موضوع آن بررسی اثر تزریق ناقص درزهای انقباض بر روی سدهای بتنی دو قوسی کارون ۴ به عنوان مورد مطالعاتی بوده است. برای تحلیل عددی سد کارون ۴ از نرم افزار المان محدود ABAQUS ۶.۱۲ استفاده گردید. در این تحقیق سه مدل عددی مدلسازی و مورد تحلیل قرار گرفت بطوریکه در مدل خطی، بدنه سد به صورت کاملاً یکپارچه و همگن بوده است و در دو مدل غیرخطی، درزهای انقباضی موجود در بدنه سد با دو نوع متفاوت و پرکاربرد در نظر گرفته شده است. نتایج نشان داد که عدم تزریق درز باعث افزایش قابل توجه تنش های حداکثر اصلی در بالادست سد شده است به طوریکه قسمت اعظمی از بالادست سد که در ابتدا به فشار کار می کرد به کشش افتاده است. تنش های کششی در تکیه گاه بالادست و تاج پایین دست سد نیز افزایش یافته است. از طرفی میزان تنش های فشاری عمودی بین سطوح تماس در صورت عدم تزریق درز به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است که این تنش ها در مجاورت تراز قطع تزریق تقریباً به دو برابر اولیه افزایش پیدا کرده است بطوریکه تنش ها در بین بلوکهای صفر و یک که حداکثر آن در تزریق کامل برابر با ۵/۱۳ مگاپاسگال می باشد با عدم تزریق به ۱۱/۳ مگاپاسگال در این نقطه افزایش پیدا کرده است. نتایج نشان داد که با افزایش ضخامت درز و در صورت عدم تزریق درز بر مقادیر تنش های حداکثر اصلی، تنش های حداقل اصلی، جابجایی های سد و نیروی فشاری عمودی بین سطوح تماس به مقدار قابل توجهی افزوده می شود. همچنین مدل کردن درزها در تحلیل غیرخطی باعث افزایش جابجایی هایی سد به میزان ۶ میلی متر در مدل درز بدون کلید برشی و به میزان ۳ میلی متر در مدل درز با کلید برشی نسبت به تحلیل خطی شده است. بطور کلی می توان بیان کرد که عدم تزریق درز در سطوح فوقانی سد، در صورتی که ارتفاع تزریقات ناقص و همچنین ضخامت سطوح درز کم باشد ایمنی سد تحت بارهای استاتیکی زیاد تحت تاثیر قرار نمیگیرد ولی زمانی که ارتفاع این تزریقات ناقص و همچنین میزان فاصله بلوکهای مجاور افزایش یابد ممکن است ایمنی سد در برابر بارهای استاتیکی به خطر بیافتد. بنابراین لازم است، در تزریق درزهای انقباضی سدهای بتنی قوسی دقت کافی به عمل آید.

واژه کلیدی: عدم تزریق، ضخامت درز، تنش، سد بتنی قوسی، درز انقباضی

یکی از ضروری ترین و حیاتی ترین نیازهای بشر آب است که به خصوص با افزایش جمعیت و ضرورت رشد کشاورزی و صنعت از یک طرف و محدودیت مخازن و منابع آبی از طرف دیگر، حساسیت آن روز به روز بیشتر شده و پیش بینی می گردد در آینده ای نه چندان دور بحران کمبود آب مهم ترین مسئله کشورها، به خصوص مناطق خشک و نیمه خشک گردد. از طرفی نوسان شدت جریان آب در رودخانه ها و نیاز به ذخیره آب در روزهای پر آبی برای مصرف در مواقع کم آبی و همچنین نیاز به استفاده از انرژی پتانسیل آب جهت تبدیل به انرژی الکتریکی و ... لازم است با ساخت موانعی در مسیر جریان به عنوان سد به این اهداف دسترسی پیدا کنند [۱] در این میان سدهای بتنی قوسی از نظر فناوری طراحی و ساخت از ظرافت و حساسیت ویژه ای برخوردار هستند و با توجه به اهمیت این نوع سدها و فاجعه آمیز بودن شکست احتمالی آنها، ارزیابی مستمر ایمنی این نوع سدها ضرورت دارد.

چوبان و همکاران (۲۰۰۹) سد بتنی قوسی داگانگشان را با ارتفاع ۲۱۰ متر با دو مدل متفاوت پی بدون جرم و پی جرم دار با قیده های فنری ویسکوز برای در نظر گرفتن استهلاک انرژی امواج با نرم افزار المان محدود ABAQUS مورد تحلیل قرار دادند. نتیجه گرفته شد که ماکزیمم تنش های کششی و جابجایی های تاج سد در تحلیل غیر خطی ۱۰ تا ۲۵ درصد به دلیل آزاد شدن جزئی عملکرد قوس نسبت به تحلیل خطی افزایش یافته است. در نظر گرفتن پی جرم دار با فنرهای ویسکوز باعث کاهش تنش های کششی و جابجایی حداکثر تاج سد در هر دو مدل خطی و غیر خطی نسبت به پی بدون جرم با میرایی ۵ درصد شده است. [۲]

یائو و همکاران (۲۰۱۲) پاسخ لرزه ای یک سد بتنی قوسی به ارتفاع ۳۰۵ متر را با استفاده از نرم افزار ABAQUS مورد بررسی قرار دادند. از المان های شش وجهی ۸ گرهی برای مدلسازی پی و سد استفاده شده است. نتایج نشان دادند که با افزایش حداکثر شتاب زلزله در یک رکورد مشخص میزان لغزش و باز شدگی درزها افزایش می یابد که حداکثر این لغزش و باز شدگی بطور همزمان نبوده و مستقل از یکدیگر می باشند. [۳]

حریری اردبیلی و همکاران (۲۰۱۳) رفتار غیر خطی لرزه ای سدهای بتنی قوسی را در ترازهای مختلف بهره برداری با در نظر گرفتن درزهای انقباضی و محیطی بررسی کردند. در این تحقیق، سد بتنی دو قوسی دز با ارتفاع ۲۰۳ متر به عنوان مورد مطالعاتی انتخاب شد. بارهای وارده بر سد شامل بار وزن سد و تحریکات دینامیکی سد-مخزن-پی تحت زلزله طمس می باشد. درزهای مدل شده با المان های تماسی گره به گره قابلیت باز و بسته شدن و حرکت های مماسی را دارند. با بررسی تحلیل ها نتیجه گرفته شد که ایمنی سد در برابر حداکثر زلزله محتمل با افزایش تراز آب مخزن سد افزایش می یابد. [۴]

فردوسی و همکاران (۱۳۹۰) تاثیر اعمال ناپیوستگی های بخش تکیه گاه های سنگی و شرایط مرزی مناسب را بر روی رفتار سد بتنی دو قوسی کارون ۴ با استفاده از نرم افزار المان محدود ANSYS مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه پی سد به صورت جرم دار مدل گشته است و همچنین رفتار غیر خطی مصالح سنگی و بتن نیز لحاظ شده است. نتایج تحلیل نشان دادند که در نظر گرفتن ناپیوستگی های سنگی تاثیر قابل توجهی در توزیع تنش های بدنه سد داشته و ارزیابی دقیق تری از رفتار واقعی سد حاصل می شود. [۵]

احمدی و احمدی (۱۳۹۱) سد بتنی قوسی مالپاسه را با لحاظ رفتار غیر خطی هندسی و غیرخطی مادی تحت بار وزن و فشار هیدرو استاتیک تا تراز تاج سد مورد تحلیل قرار دادند. برای المان بندی بدنه ی سد از المان های ۲۰ گرهی غیرخطی در دو لایه استفاده شده است. نتایج نشان دادند که با کاهش پارامترهای درز میزان جابجایی بیشینه سد افزایش می یابد. در تغییر مکان های کوچکتر پاسخ ها بیشتر به یکدیگر نزدیک بوده و هر چه تغییر مکان ها بزرگتر می شوند، اختلاف معیارها آشکارتر می شود. در کل مدل های پلاستیسیته استفاده شده پاسخهای بزرگتری از مکانیک شکست به دست می دهند. [۶]

مصطفایی و بهنام فر (۲۰۲۲) به بررسی پایداری لرزه‌ای گوه‌های سنگی در پی سدهای قوسی بتنی با استفاده از روش حالت حدی و المان محدود پرداخته‌اند که برای این منظور یک سد قوسی دو انحنا (سد بختیاری) در نظر گرفته شده و اثرات کارایی پرده دوغاب، سطح خطر و انعطاف‌پذیری پی بر رفتار غیرخطی سد قوسی با فونداسیون یکپارچه و فونداسیون با اتصالات مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان دهنده تأثیر قابل توجه اتصالات در نظر گرفته شده در فونداسیون بر رفتار سد است. [۷]

گزارش و همکاران (۲۰۱۸) در دانشگاه شریبروک آزمایش‌های ارتعاشی اجباری را بر روی سد دانیل-جانسون انجام دادند که در این مقاله ارائه شده‌اند. این آزمایش‌ها با هدف تعیین خواص دینامیکی سیستم سد-مخزن-فونداسیون به عنوان پایه ای برای به روز رسانی یک مدل المان محدود ۳ بعدی از سیستم استفاده شده است. این آزمایش‌ها نشان داد که اندازه‌گیری سیگنال‌های مفید در امتداد کل تاج یک سد بتنی بسیار بزرگ و عظیم و تا آنجا که در گالری‌های بازرسی بسیار پایین‌تر، حتی با نیروی تحریک نسبتاً کمی امکان‌پذیر است. روند تجزیه و تحلیل داده‌های تجربی به دلیل حالت‌های متعدد محلی و جهانی نزدیک سد چند قوسی و جفت شدن آنها کاملاً پیچیده بود. بیست و دو حالت ارتعاش به وضوح شناسایی شد. [۸]

کادری (۲۰۱۹) به ارائه پاسخ لرزه‌ای غیرخطی سه بعدی سدهای ثقلی بتنی با در نظر گرفتن عناصر تماس در فصل مشترک اندرکنش سد و مخزن پرداخته است که بررسی عددی اثر اندرکنش هیدرودینامیکی و لغزش آب در طول فصل مشترک سد-مخزن انجام شده است. حداکثر جابجایی‌های افقی و تنش‌های اصلی در مقاطع مختلف سد ارائه شده و همچنین رفتار لرزه‌ای سد در حالت‌های خالی و پر مخزن بررسی و محل آسیب در سد بتنی ارزیابی شده است. [۹]

تاتسو (۲۰۱۷) به ارزیابی رفتار استاتیکی و مقاومت مکانیکی سد قوسی در قالب مدل تحلیل عددی برای اتصالات عرضی (مفاصل انقباضی) سد قوسی با در نظر گرفتن رفتارهای جدایی، لغزشی و تماس مجدد مفاصل انقباضی پرداخته است. نتایج حاکی از تخمین مناسب برای تغییر شکل سد یک سد قوسی موجود ناشی از آن بارهاست. علاوه بر این، منطقه قوس موثر تحت مفاصل انقباضی متوالی تشکیل و ماهیت مکانیسم ظرفیت بار شناسایی شد. با استفاده از این نتایج محاسبه‌شده، پیش‌بینی عددی در جابجایی یک سد قوسی موجود برای مدیریت روزانه پیشنهاد شد. [۱۰]

ژانگ و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی کامل مقاومت لرزه‌ای سدهای ثقلی با اتصالات طولی در قالب مدل تماسی بر اساس روش تابع محدودیت برای شبیه‌سازی کلیدهای برشی درون درزها و مدل ترک بتن لکه دار برای ارائه خصوصیات ترک خوردگی مصالح بتن پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که پاسخ‌های لرزه‌ای کلیدهای برشی به شکل‌هایی طراحی شده است. گرفتگی و جابجایی کلیدهای برشی در درزهای طولی بر مقاومت لرزه‌ای سدهای ثقلی تأثیر دارد. [۱۱]

در تحقیق حاضر که موضوع آن بررسی اثر تزییق ناقص درزهای انقباض بر روی سدهای بتنی دو قوسی می باشد، سد بتنی دو قوسی کارون ۴ به عنوان مورد مطالعاتی انتخاب شده است. برای تحلیل عددی سد کارون ۴ از نرم افزار المان محدود ABAQUS ۶.۱۲ استفاده می‌گردد. در این فصل ضمن آشنایی با نرم افزار و روند مدل‌سازی، نحوه اعمال بارهای وارده بر سد و شرایط مرزی تماس در سطوح درز توضیح داده شده و در آخر نیز صحت سنجی مدل عددی صورت می‌پذیرد.

۲- مواد و روش‌ها

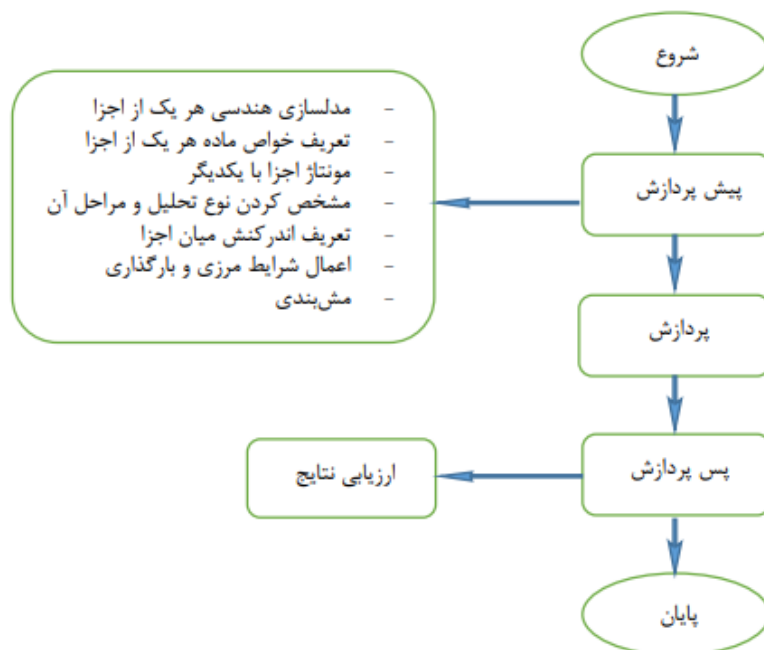
روش المان محدود (FEM) یک روش عددی است که می‌توان آن را برای حل مسائل متعدد و متنوع مهندسی در حالت مختلف پایدار، گذرا، خطی یا غیر خطی بکار گرفت. این روش که ریشه‌های آن به سالهای اولیه قرن نوزده

میلاادی برمی گردد، بدون شک تحولی در صنعت جهان و نحوه نگرش به طراحی و آنالیز به وجود آورد. قابلیت مدلسازی پروسه های واقعی صنعتی با کم ترین ساده سازیها، توانمندی روش در ارائه نتایج قابل اطمینان، کاهش هزینه های سنگین تست های علمی در پروسه های طراحی و بالاخره افزایش ایمنی در طراحی باعث گردیده تا این روش به عنوان جزء جدایی ناپذیر پیشرفت صنعتی در آید. [۲۹]

در تحقیق حاضر که موضوع آن بررسی اثر تزریق ناقص درزهای انقباض بر روی سدهای بتنی دو قوسی می باشد، سد بتنی دو قوسی کارون ۴ به عنوان مورد مطالعاتی انتخاب شده است. برای تحلیل عددی سد کارون ۴ از نرم افزار المان محدود ABAQUS ۶.۱۲ استفاده می گردد. در این فصل ضمن آشنایی با نرم افزار و روند مدلسازی، نحوه اعمال بارهای وارده بر سد و شرایط مرزی تماس در سطوح درز توضیح داده شده و در آخر نیز صحت سنجی مدل عددی صورت می پذیرد.

در میان نرم افزارهایی که از روش المان محدود برای آنالیز مسائل مهندسی استفاده می نمایند، نرم افزار آباکوس با قابلیت های منحصر به فرد خود، به عنوان یک نرم افزار بسیار دقیق تحقیقاتی و کاربردی در صنعت و دانشگاه شناخته شده است. سهولت در دستیابی و فهم نحوه کارکرد زیر برنامه های این نرم افزار و نیز دارا بودن مثال های معتبر علمی موجب گشته است که این نرم افزار به عنوان یکی از نرم افزارهای پیشرو در بین نرم افزارهای CAE انتخاب شود.

مراحل مدلسازی و تحلیل در نرم افزار آباکوس و سایر نرم افزارهای المان محدود را می توان به صورت شکل زیر نشان داد.



شکل: مراحل مدلسازی و تحلیل مسائل در نرم افزارهای المان محدود

۲-۱ مشخصات سد کارون ۴

سد کارون ۴ در جنوب غربی ایران و بر روی رودخانه کارون، بلافاصله در بالادست تقاطع رودخانه های منج و کارون واقع شده است. تراز بستر رودخانه ۸۴۰ متر بالاتر از سطح دریا بوده و عرض آن در حدود ۳۰ تا ۶۰ متر است. دره ساختگاه سد، یک دره ۷ شکل نامتقارن با شیب عمومی تندتر در جناح چپ بوده و عرض آن در تراز تاج سد، در حدود ۳۵۰ متر است. بر این اساس نسبت عرض به ارتفاع دره ۱/۸ به دست می آید که برای یک سد بتنی قوسی ایده آل می باشد. مشخصات سد کارون ۴ در جدول های زیر آمده است [۷]

جدول ۱: مشخصات بدنه سد

مشخصه	مقدار	مشخصه	مقدار
نوع سد	بتنی دو قوس	عرض در پی	۳۷ تا ۵۲ متر
ارتفاع از پی	۲۳۰ متر	ارتفاع از کف	۱۹۰ متر
طول تاج	۴۴۰ متر	حجم کل بتن ریزی	۱/۶۵ میلیون متر مکعب
عرض تاج	۷ متر	عرض دره در تراز تاج	۳۵۰ متر

جدول ۲: مشخصات مخزن سد در تراز ۱۰۲۵

مشخصه	مقدار
حجم کل مخزن	۲۱۹۰ میلیون متر مکعب
مساحت مخزن	۲۹ کیلومتر مربع
طول دریاچه	۴۱ کیلومتر در شاخه ارمند و ۲۸ کیلومتر در شاخه بازیافت
عرض دریاچه	متغیر

جدول ۳: ترازهای آب مخزن (از سطح آزاد آب دریا)

مشخصه	مقدار	مشخصه	مقدار
تراز نرمال	۱۰۲۵	تراز رسوب	۸۷۰
تراز حداقل بهره برداری	۹۹۶	تراز پایاب عادی	۸۴۵
تراز آب هنگام وقوع سیلاب PMF	۱۰۳۳/۳	تراز پایاب در هنگام وقوع سیل PMF	۸۶۰

در تحلیل های عددی سازه های مهم، نظیر سدهای بزرگ، همواره تاکید بر در نظر گرفتن مشخصات مصالح خاص مورد استفاده در سازه می باشد. اهمیت این امر به دلیل تفاوت طبیعی مشخصات مصالح در سازه های مختلف است که ممکن است ناشی از تجهیزات و پیمانکار تهیه و تولید مصالح، تاثیرات زمان اجراء تفاوت موقعیت مکانی و عوامل متعدد دیگر باشد.

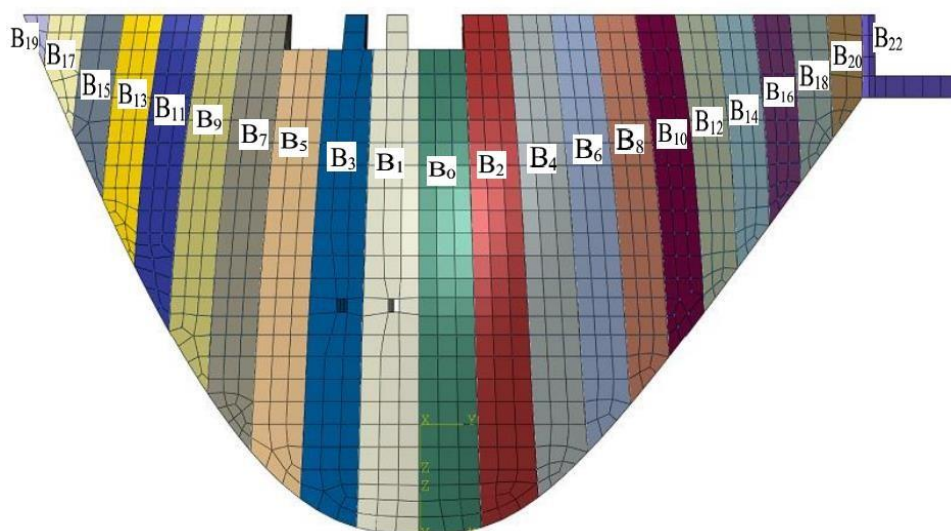
جدول ۴: مشخصات مکانیکی و حرارتی بتن استفاده شده در سد

متغیر	واحد	مقدار
چگالی بتن (ρ)	kg/m^3	۲۴۰۰
مدول الاستیسیته بتن (E_c)	Gpa	۲۵
ضریب پواسون (ν)	-	۰/۲
ضریب انبساط حرارتی (α)	$1/^\circ\text{k}$	11×10^{-6}
ضریب هدایت حرارتی (k)	$\text{w}/(\text{m}^\circ\text{k})$	۱/۴۷-۴/۳۸ (۲/۵)
گرمای ویژه (Q)	$\text{J}/\text{kg}^\circ\text{k}$	۸۷۰-۱۰۸۰ (۹۰۰)

در ساخت سد کارون ۴ از دو نوع بتن با دانه بندی متفاوت استفاده شده است. بتن نوع اول جهت بتن ریزی داخل بدنه و بتن نوع دوم به عنوان بتن سطحی روی سطح بتن نوع اول استفاده شده است. بتن نوع اول که توده اصلی بدنه سد را تشکیل می دهد به عنوان معیار کنترل تنش ها و تغییر مکان ها در نظر گرفته شده است که مشخصات آن مطابق با جدول ۴ می باشد [۱۴]

۲-۲ مشخصات المان محدود

برای مش بندی بدنه سد کارون ۴ از ۳۸۵۲ المان خطی مکعبی ۸ گرهی استفاده شده است. بزرگترین بعد المانها ۱۶/۵ متر و کوچکترین بعد آنها ۵/۳ متر می باشد. همچنین با توجه به اینکه تحلیل ها در دو حالت حرارتی و استاتیکی انجام می شود از دو نوع المان متفاوت استفاده شده است. برای تحلیل حرارتی از المان DC3D8 و برای آنالیز تنش-کرنش از المان C3D8R استفاده شده است. تفاوت این دو المان در فرمولاسیون به کار رفته در آنها می باشد. در این مدل پی سد صلب در نظر گرفته شده و از رفتار غیر خطی مصالح صرفنظر شده است. مدل مش بندی شده سد که دارای ۲۲ بلوک مجزا و ۲۱ درز انقباضی میباشد در شکل زیر نشان داده شده است.



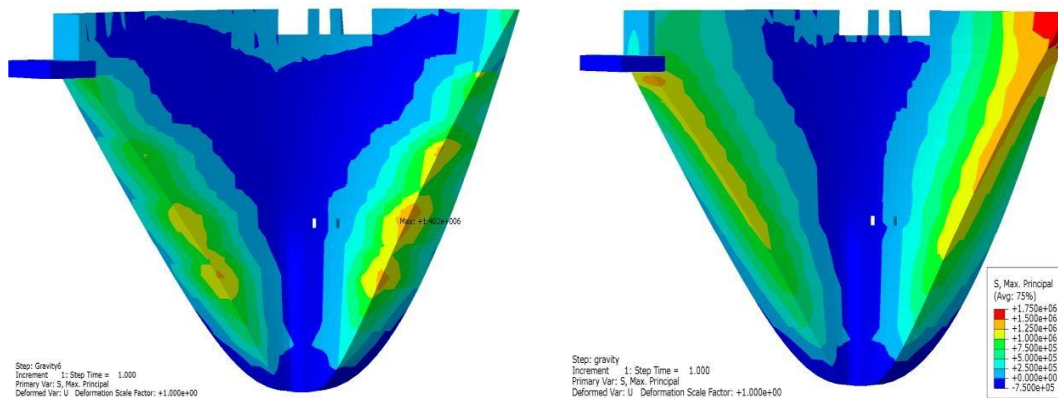
شکل ۱- مدل المان محدود سد کارون ۴

۲-۳ بارگذاری ها

بار وزن سد و بارهای ناشی از مخزن سد و همچنین بار حرارتی به عنوان بارهای اعمالی به سد در نظر گرفته شده است.

اعمال یکباره بار وزن به مدل تحلیلی یکپارچه بدنه سد سبب آویزان شدن بدنه سد از تکیه گاهها و در نتیجه ایجاد تنش های کششی بسیار بالا (در راستای تقریباً موازی سطح پی و یا نزدیک به افقی) در بدنه سد، به خصوص در قسمتهای فوقانی می گردد. این تنش ها به دلیل وجود درزهای انقباضی در بدنه سد و بتن ریزی تدریجی بلوک های بدنه سد، وجود خارجی ندارند. بنابراین بار وزن سد در چند مرحله به سد وارد شده است.

جهت مدلسازی وزن مرحله ای سد، با استفاده از ابزار ویرایش کلیدی در نرم افزار آباکوس، در هر مرحله از بارگذاری ثقلی سختی قسمتهای فوقانی حذف گردید، همچنین جهت اطمینان از صحت عملکرد بارگذاری مرحله ای، بارگذاری وزنی با ۳، ۴، ۶ و ۱۲ مرحله در ۵ مدل استاتیکی ساخته شده و تحلیل گردید. مشاهده شد که مدل دارای ۶ مرحله بارگذاری وزنی علاوه بر شرایط مناسب تنش در تکیه گاهها دارای تعداد المان مناسب نیز می باشد [۸]



شکل ۲- تنش های حداکثر اصلی الف) بارگذاری یک مرحله ای؛ ب) بارگذاری ۶ مرحله ای

در شکل (۲) تفاوت تنشهای حداکثر اصلی کششی در هر دو بارگذاری وزنی سد نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود اعمال یکباره وزن سد باعث افزایش تنش های حداکثر اصلی کششی در تکیه گاه سد به خصوص در قسمت فوقانی سد شده است که این تنش های کششی به موازات پی می باشند ولی با اعمال بار مرحله ای وزن، این تنش های کششی در پی و به خصوص در قسمت فوقانی آن کاهش یافته است.

برای اعمال فشار آب مخزن به بدنه سد ابتدا سطوحی که قرار است نیرو به آنها وارد شود را انتخاب کرده و سپس در ماژول Load، نوع بار از نوع Pressure و نوع توزیع بار از نوع Hydrostatic انتخاب می شود و سپس ارتفاع فشار صفر (سطح آزاد آب) و ارتفاع فشار مرجع و میزان بزرگی فشار در نقطه مرجع به نرم افزار معرفی می گردد. اگر سطحی که فشار هیدرو استاتیکی به آن وارد می شود به صورت عمودی باشد می توانیم ارتفاع نقطه مرجع و بزرگی فشار را به سطح اعمال شود ولی چون سطح سد بتنی قوسی انحنا دارد و همچنین ارتفاع سد در تمام عرض تاج یکسان نمی باشد این کار امکان پذیر نمی باشد. ولی با فرض اینکه در ارتفاع کوچکی از سطح می توان سطح منحنی را به صورت صاف در نظر گرفت می توان فشار مرجع را بالاتر از نقطه مورد نظر تعریف کرد که در این صورت نرم افزار میزان فشار آب را در هر نقطه از سطح اعمالی در زیر ارتفاع فشار مرجع به صورت عمود بر سطح محاسبه می کند.

برای انجام تحلیل های حرارتی بر روی سد، دماهای موجود به عنوان شرایط مرزی به گره های روی بدنه سد اختصاص داده شده و سپس یک تحلیل حرارتی با استفاده از المان حرارتی DC3D8 انجام گردیده است. با استفاده از این تحلیل، دمای تمامی گره های موجود در سد استخراج شده و به عنوان دمای ثانویه به تحلیل های استاتیکی وارد می گردد. دمای اولیه (دمای تزریق) سد برابر با ۱۷ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که هر دو مدل آنالیز حرارتی و آنالیز تنش- کرنش باید دارای مش بندی یکسان باشند.

۲-۴ شرایط مرزی تماس

نرم افزار آباکوس یک ابزار مناسب جهت اعمال رفتار متقابل بین نقاط با نام تماس در اختیار طراحان المان محدود قرار می دهد. در رفتار مذکور امکان محدود کردن حرکت نقاط مشخصی نسبت به نقاط مشخص دیگری وجود دارد. نقاط مشخص در این رفتار می توانند به یک صفحه یا مجموعه ای از نقاط در فضای سه بعدی و یا حتی یک نقطه محدود شوند.

برای مدل کردن درزهای انقباضی از تماس سطح به سطح با گسسته سازی تماس گره به سطحه و لغزش محدود استفاده شده است. این نوع سطح تماس قابلیت مدل سازی فشار تماسی، لغزش اصطکاکی، چسبندگی و شکست را دارد.

مدل مرزی تماس شامل یک سطح مبنا و یک سطح پیرو می باشد که در آن هر گره از سطح پیرو بر روی سطح تماس در یک طرف با تصویر آن نقطه بر روی سطح تماس مبنا در طرف دیگر مانند شکل فوق در ارتباط می باشد. بنابراین هر گره از سطح پیرو با مجموعه ای از گرهها در سطح مبنا در تماس می باشد. د بیانگر میزان لغزش نسبی سطوح نسبت به هم می باشد.

۲-۵ رفتار متقابل درزها بر اساس مدل‌های تعریف شده

در جهت عمود بر سطوح تماس، رفتار فشار تماسی و چسبندگی در رژیم های متفاوت می باشند. اگر مدل آسیب برای سختیهای چسبندگی تعریف نشود، از مدل اصطکاکی کلمب در جهت برشی صرفنظر خواهد شد. در این حالت هر لغزش مماسی کاملاً به صورت الاستیک بوده و برآیند نیروهای برشی تنها حاصل از مقاومت چسبندگی پیوندها خواهد بود. با تعریف مدل آسیب، سهم چسبندگی در تنشهای برشی شروع به کاهش کرده و مدل اصطکاکی در سطوح درز فعال شده و در توزیع تنش های برشی نقش خواهد داشت، بنابراین قبل از شکست کامل پیوندهای چسبندگی و در مسیر تکامل آسیب تنشهای برشی حاصل از چسبندگی و اصطکاک خواهد بود و بعد از شکست کامل پیوندها، تنش های برشی تنها در اثر اصطکاک ایجاد می شوند.

۲-۶ تنظیم فاصله سطوح درز

برای تنظیم فاصله سطوح درز در آباکوس از روش مجازی استفاده می گردد. در روش مجازی برای تنظیم فاصله اولیه سطوح درز بعد از اینکه سطوح تماس مبنا و پیرو در ماژول Interaction مشخص شد در زیر برنامه Contact interaction editor با انتخاب Specify tolerance for adjustment zone مقدار a را انتخاب می کنیم. با انتخاب این مقدار هر نقطه ای از سطح پیرو که در این محدوده از سطح مبنا قرار دارد یا در آن نفوذ کرده است بدون ایجاد تنش و کرنشی در مدل کاملاً بر سطح مبنا مماس می شود. با انتخاب مقدار صفر نقاطی از سطح پیرو که در سطح مبنا فرو رفته اند، مماس بر سطح مبنا می شوند ولی نقاطی که از سطح مبنا فاصله دارند به همان صورت باقی می مانند.

۲-۷ پارامترهای عددی

درزها دو نوع درز صاف (با امکان لغزش بلوک های مجاور نسبت به هم) و درز زبر (عدم لغزش نسبی بلوکهای مجاور نسبت به هم) مدلسازی می شوند. در هر دو مدل درز، فاصله اولیه بلوک های مجاور از هم ۳ میلی متر در نظر گرفته می شود و سپس با فرض اینکه کرنش محوری ملات سیمان تزریق شده در درزهای انقباض تحت فشار ۲۵ مگاپاسگال ۰/۰۰۲ باشد

۳- آنالیز و تحلیل نتایج

این بخش که مربوط به بررسی نتایج حاصل از مدلسازی عددی سد میباشد، سه مدل عددی متفاوت با استفاده از نرم افزار المان محدود آباکوس تحلیل شده است، یک مدل عددی خطی که در آن بدنه سد به صورت کاملاً یکپارچه و بدون هیچ درزی مدل گشته و دو مدل غیرخطی با درز نظر گرفتن درزهای انقباضی که یکی به صورت درز صاف (با فرض عدم وجود کلید برشی) و دیگری به صورت درز زبر (و فرض وجود کلید برشی در درز) می باشد. برای اینکه تاثیر افزایش ضخامت اولیه درز بر رفتار سد در صورت عدم تزریق درزها مشخص شود به عنوان نمونه تحلیل هایی بر روی درز صاف انجام شده و با نتایج حاصل از تحلیلهای قبلی مقایسه شده است. قابل توضیح می باشد که به دلیل زیاد بودن حجم نتایج حاصل از تحلیل های سد تحت ترازهای مختلف بهره برداری و بارهای حرارتی زمستان و

تابستان، و همچنین با توجه به اینکه نتایج نشان می دهند که عدم تزریق درز باعث میشود تا سد تحت ترازهای مختلف بهره برداری رفتار مشابهی را از خود نشان دهد

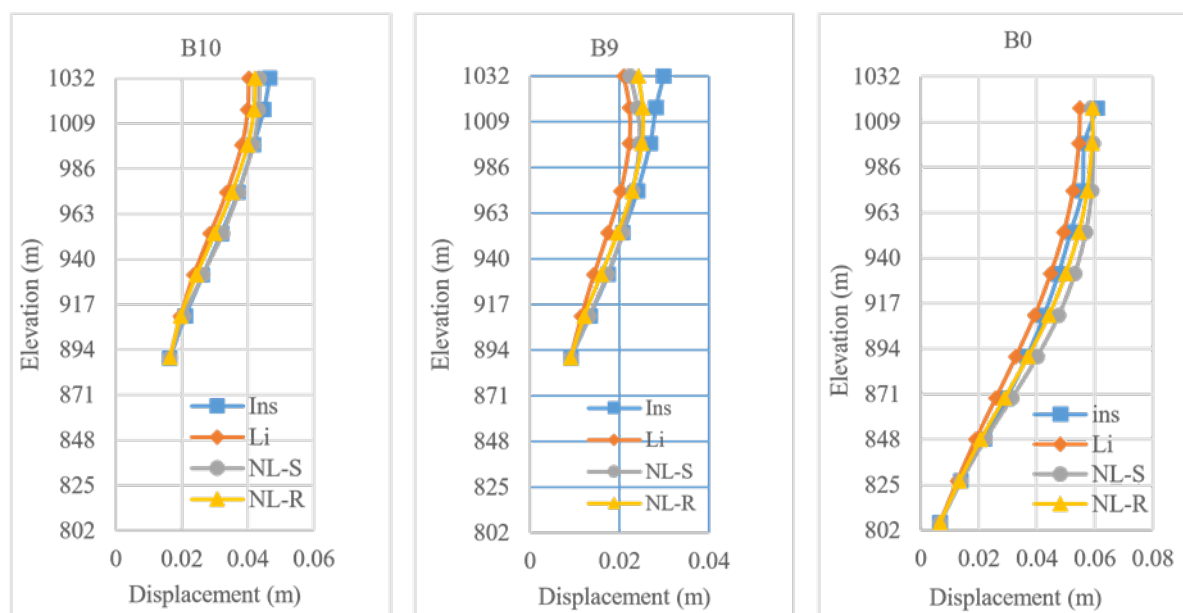
۳-۱ صحت سنجی مدل

برای اطمینان از صحت مدل سازی عددی و نتایج به دست آمده، چهار تحلیل استاتیکی در دو تراز متفاوت آب مخزن مطابق جدول جدول (۴) انجام شده و با نتایج حاصل از رفتارنگاری سد [۹] و گزارش تحلیلهای تکمیلی بدنه سد [۷] مقایسه میگردد.

جدول ۴- تحلیل های انجام شده برای صحت سنجی

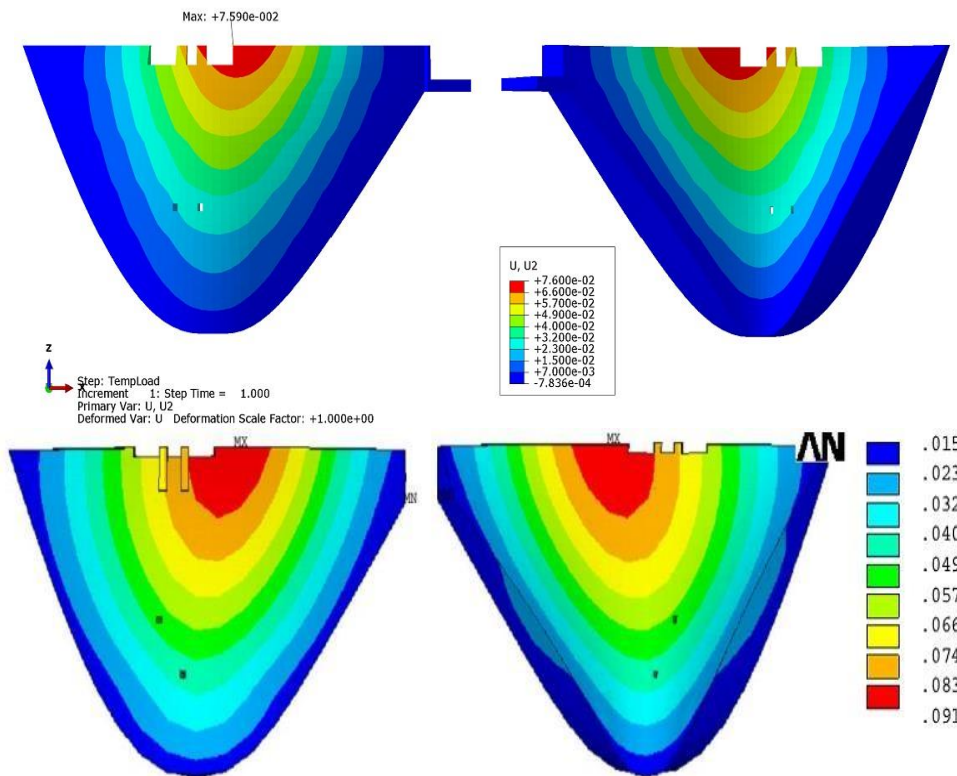
شماره تحلیل	تراز سطح آب	نوع تحلیل	مراحل تحلیل		
			بار وزن	بار مخزن	بار حرارتی
۱	۳۳/۳۰۱	الاستیک خطی (Li)	۶ مرحله	تمام بارهای هیدرو استاتیک	زمستان
۲	۲۳/۹۹۰۱	الاستیک خطی (LI)	۶ مرحله	بدون رسوب	زمستان
۳	۲۳/۹۹۰۱	غیرخطی با درز صاف (NL-S)	۶ مرحله	بدون رسوب	زمستان
۴	۲۳/۹۹۰۱	غیرخطی با درز زیر (NL-R)	۶ مرحله	بدون رسوب	زمستان

نتایج جابجایی در بلوکهای صفر، نه و ده که هر کدام به ترتیب نماینده بلوکهای مرکزی، بلوکهای سمت چپ و بلوک های سمت راست بدنه سد میباشدند در تحلیلهای شماره ۲، ۳ و ۴ استخراج شده و با نتایج حاصل از رفتارنگاری سد مقایسه شدند. شکل زیر جابجایی های سد را در بلوکهای ذکر شده نشان می دهد.



شکل ۳- نمودار تغییر مکان در بلوکهای ۱، ۹ و ۱۱ در تحلیلهای انجام شده و ابزار دقیق

با نگاهی به نمودارهای شکل (۳) مشاهده می شود که نتایج تحلیلهای غیرخطی نسبت به تحلیل خطی مطابقت بهتری با نتایج حاصل از ابزار دقیق دارند و این نشان میدهد که مدل کردن درزهای انقباضی باعث شده است تا رفتار سد واقعتر شود. همچنین از آنجایی که نتایج حاصل از تحلیلهای غیرخطی به یکدیگر نزدیک میباشدند، نشان میدهد که مقادیر انتخاب شده برای پارامترهای درز در هر دو مدل درز صاف و زیر مناسب میباشد و میتوان از صحت مدل سازی انجام شده اطمینان حاصل کرد.



شکل ۴- جابجاییهای بدنه سد در تراز ۱۰۳۳/۳ (الف) تحلیل خطی؛ (ب) گزارش تحلیل های تکمیلی بدنه سد و تکیه گاه ها

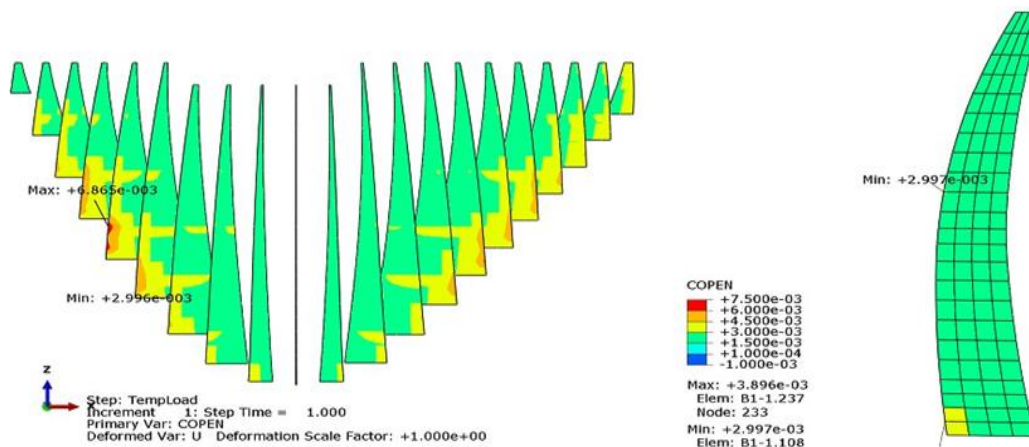
همانطور که مشاهده می شود نحوه توزیع جابجایی در هر دو مدل نزدیک به هم می باشد ولی میزان جابجایی در مدل خطی، کمتر از مدل موجود در مرحله نهایی مطالعات سد می باشد و چنانچه بیان شد آن به خاطر صلب بودن پی در مدلسازی عددی می باشد که در صورت اضافه کردن حرکت پی به میزان ۱/۱۱۵ متر به جابجایی های مدلسازی عددی، مقادیر جابجایی ها به خصوص در تاج سد بسیار به یکدیگر نزدیک می گردند که نشان دهنده مدلسازی مناسب سد می باشد.

در یک نتیجه گیری کلی می توان گفت که بدنه سد و همچنین درزهای موجود در آن به خوبی در نرم افزار المان محدود مدل گشته و همچنین پارامترهای انتخاب شده برای درز نیز مناسب می باشد بنابراین می توان از این مدل با اطمینان خاطر در تحلیل ها استفاده کرد. همچنین با توجه به اینکه نتایج هر دو مدل غیرخطی به یکدیگر نزدیک می باشند نتایج هر دو مدل در صورت عدم تزریق درزها بررسی می شود.

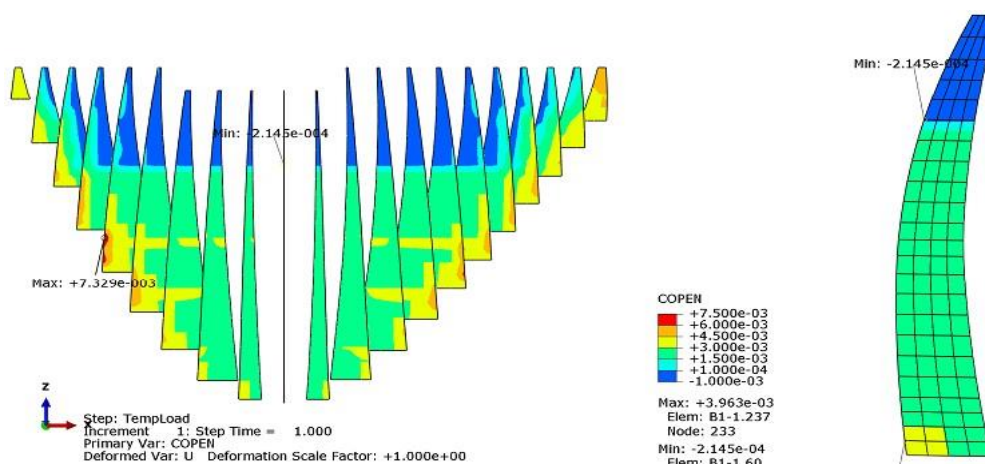
۲-۳ تاثیر عدم تزریق درز بر باز شدگی درزهای انقباض

برای در نظر گرفتن اثرات درزهای انقباض، بلوکهای مجاور به فاصله ۳ میلیمتر از هم قرار داده شده و سپس رابطه فشار تماسی عمودی به آن اعمال شده است. این ۳ میلیمتر به عنوان فاصله اولیه سطوح درز در نظر گرفته میشود و چنانچه بعد از بارگذاری فاصله سطوح درز بیش از ۳ میلیمتر گردد به عنوان باز شدگی درز و در صورتی که کمتر از این مقدار باشد به عنوان بسته شدن درز در نظر گرفته می شود. لازم به ذکر می باشد که در تزریق کامل درز و در نواحی تزریق شده، رابطه فشار تماسی عمودی به صورتی تعریف شده که نیروی فشاری عمودی از همان ابتدا در درز به وجود می آید ولی در نواحی تزریق نشده این رابطه طوری تعریف شده که بلوکهای مجاور تا قبل از فاصله ۱/۱ میلیمتر از یکدیگر هیچ نیروی فشاری عمودی را تحمل نمی کنند ولی بعد از آن نیروی فشاری عمودی بین بلوکهای مجاور ایجاد می شود.

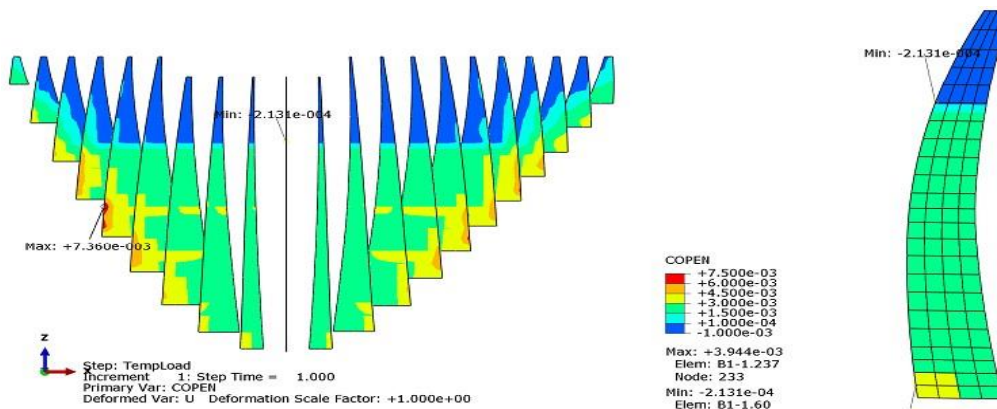
برای اینکه اثر عدم تزریق درز بر باز شدگی درزهای انقباض بررسی شود، میزان بازشدگی سطوح درز در تزریق کامل و عدم تزریق درز، تحت بارگذاری حرارتی زمستان در شکل‌های زیر آمده است. با توجه به اینکه وضعیت باز شدگی درز مابین دو بلوک مجاور صفر و یک در شکل سمت چپ مشخص نیست وضعیت بازشدگی این سطح درز به صورت جداگانه در سمت راست شکل نشان داده شده است .



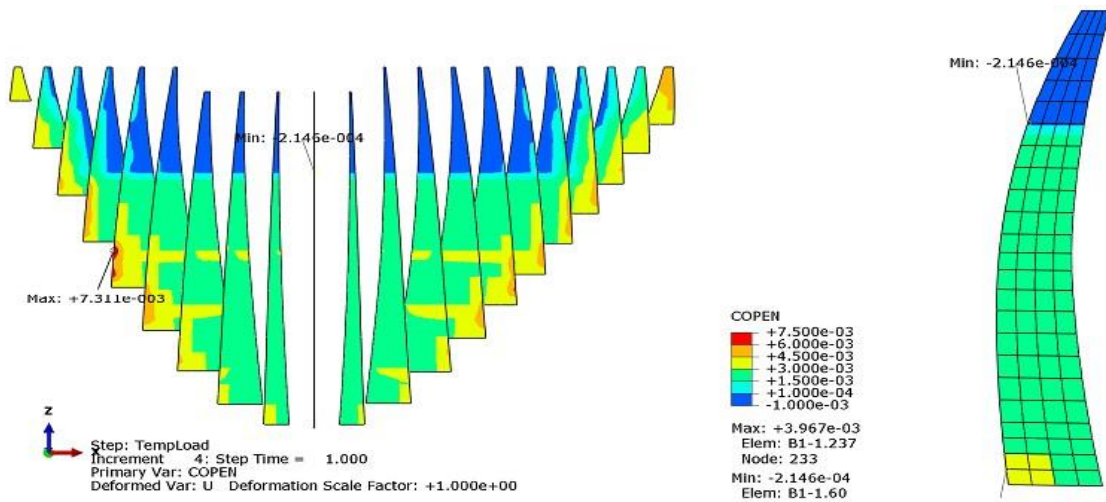
شکل ۵- باز شدگی سطوح درز در تراز نرمال و بار حرارتی زمستان با تزریق کامل درز صاف و ضریب اصطکاک یک



الف) ضریب اصطکاک یک

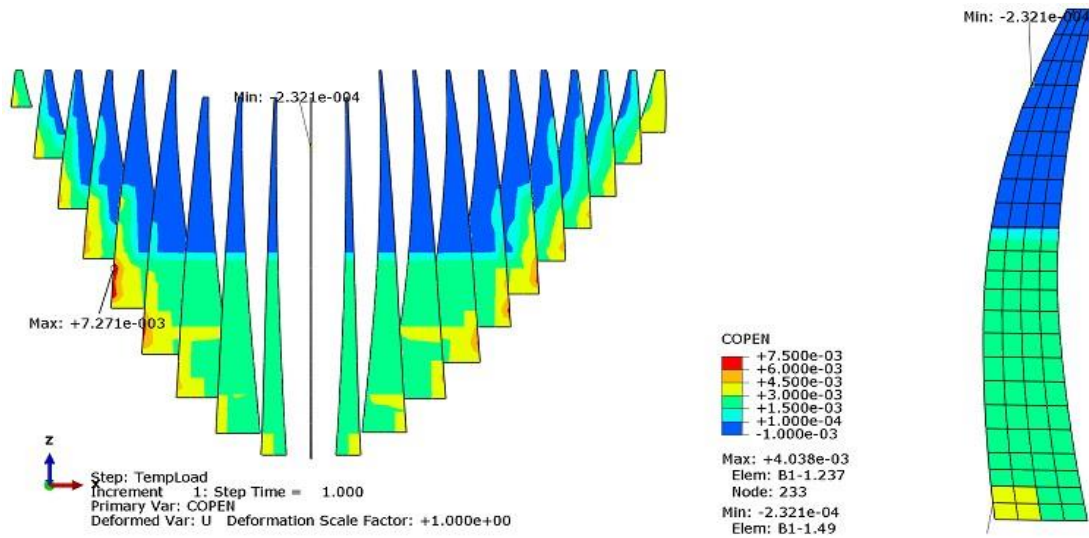


ب) ضریب اصطکاک صفر

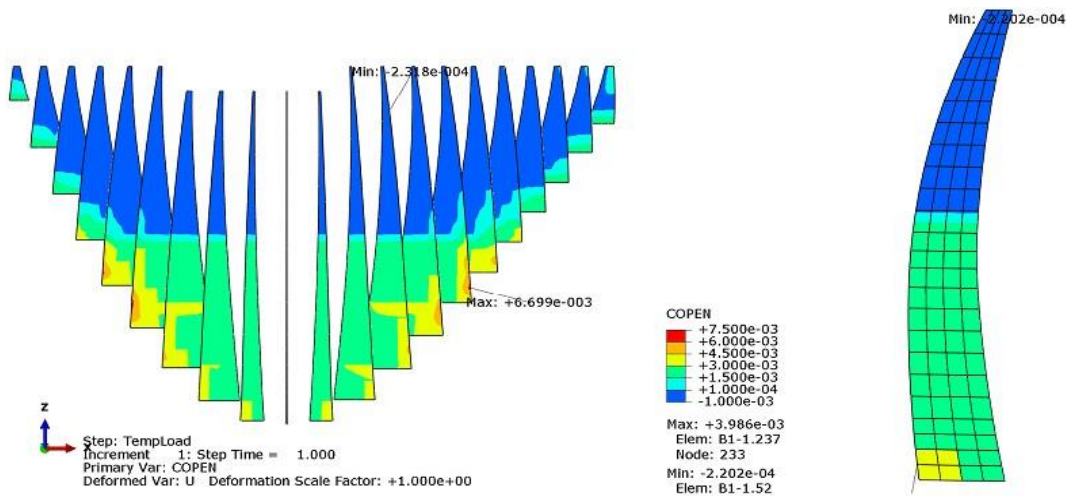


ج) ضریب اصطکاک ده

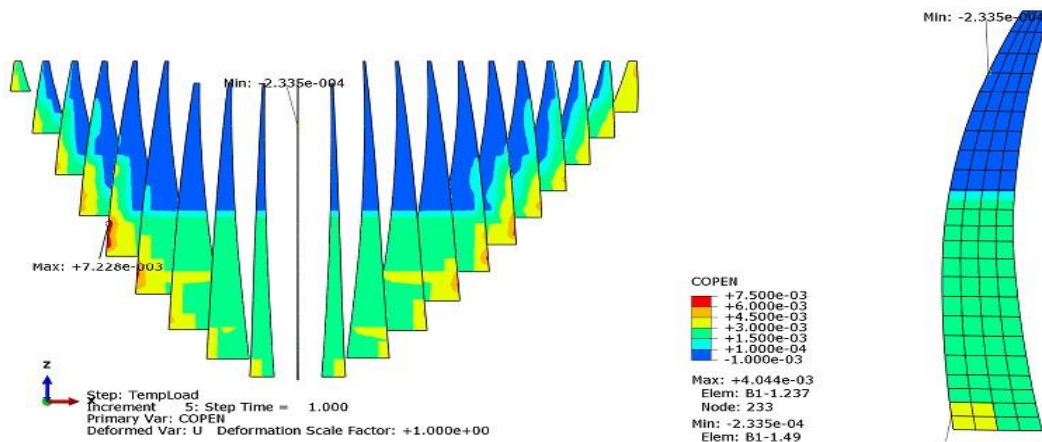
شکل ۶- باز شدگی سطوح درز در تراز نرمال و بار حرارتی زمستان با درز صاف در صورت عدم تزریق درز از تراز ۹۵۵ متر به بالا با ضرایب اصطکاک متفاوت



الف) ضریب اصطکاک یک



ب) ضریب اصطکاک صفر



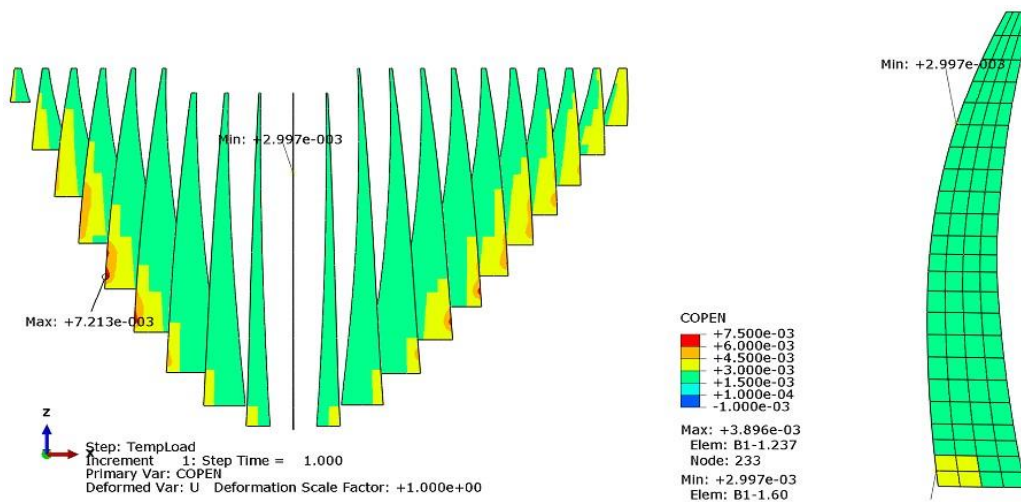
ج) ضریب اصطکاک ده

شکل ۷- باز شدگی سطوح درز در تراز نرمال و بار حرارتی زمستان با درز صاف در صورت عدم تزریق درز از تراز ۹۱۵ متر به بالا با ضرایب اصطکاک متفاوت

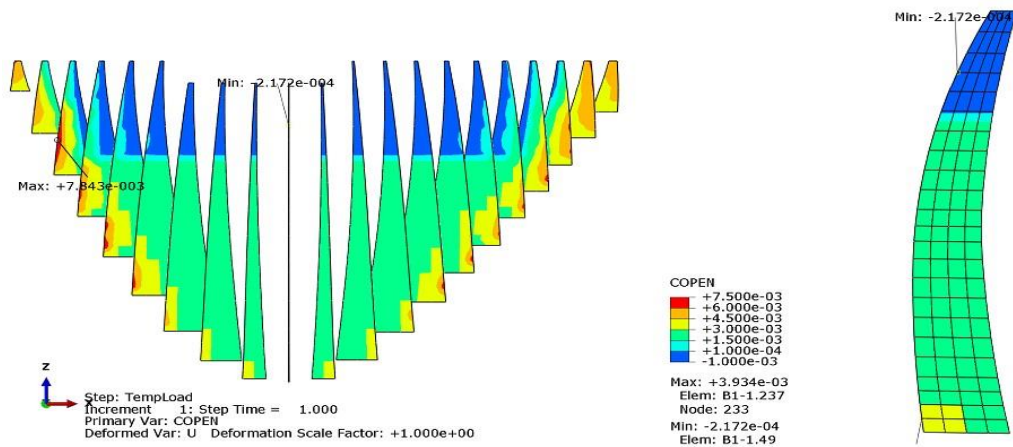
همانطور که در شکل (۵) مشاهده میشود در تزریق کامل، باز شدگی‌های درز در نزدیکی تکیه‌گاه بالادست سد اتفاق افتاده است. به دلیل اینکه حرکت سد تحت بارهای وارده به سمت پایین دست می‌باشد بلوک‌های بالادست سد که در نواحی نزدیک تکیه‌گاه به کشش افتاده، در وجه بالادست دچار تغییر طول شده و ضخامت بلوک در بالادست کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به جابجایی‌های سد مشاهده می‌شود که در قسمت‌هایی که باز شدگی درز وجود دارد، سد دچار تغییر شکل منفی شده که نشانگر پیچش بلوکها در این قسمت می‌باشد. بنابراین این دو علت، یعنی کوتاه شدن بلوک در وجه بالادست و پیچش بلوکها در این نواحی میتواند باز شدگی سطوح درز را در نزدیکی تکیه‌گاه‌های سد توجیه کند. علاوه بر این با توجه اینکه تحلیل در بار حرارتی زمستان انجام شده است این نوع بارگذاری نیز بر افزایش باز شدگی درز در اثر کاهش دما و جمع شدن بلوکهای سد تاثیر می‌گذارد.

با عدم تزریق درز با ضریب اصطکاک یک بر میزان باز شدگی‌های سطوح درز افزوده شده است که این باز شدگی‌ها در سطوح انتهایی سد، مابین بلوکهای مجاور ۲۱ و ۲۲ و همچنین مابین بلوکهای مجاور ۱۷ و ۱۹ کاملاً مشخص میباشد. بلوکهای انتهایی (بلوکهای ۱۹ و ۲۲) سد در اثر شرایط مرزی گیرداری و بار کمی که به آنها وارد می‌شود جابجایی کمتری نسبت به سایر بلوکها دارند، همچنین با توجه به اینکه قسمت‌هایی از درزها که تزریق نشدند به یکدیگر نزدیک شده و از بلوکهای کناری فاصله می‌گیرند. بنابراین میزان جداسازی این بلوکها از سایر بلوکها در قسمت فوقانی بیشتر می‌باشد. همچنین در بلوکهای میانی و در قسمت‌هایی که ملات تزریق نشده است به دلیل فشار زیاد، بلوکها به جز در قسمت محدودی بلافاصله بعد از محل قطع تزریق با یکدیگر تماس پیدا کردند.

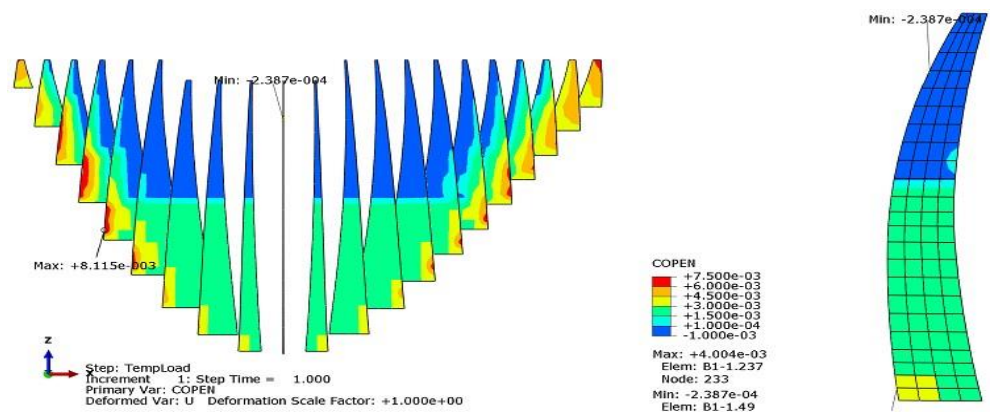
با کاهش ضریب اصطکاک از یک به صفر در شکل ۴-۴۱ میزان باز شدگی درزها در بلوکهای انتهایی در اثر حرکت بیشتر بلوکها به سمت پایین دست کاهش یافته است. با افزایش ضریب اصطکاک از یک به ده تفاوت چندانی در توزیع باز شدگی‌های درز به وجود نیامده است. شکل‌های زیر میزان باز شدگی سطوح درز را در صورت استفاده از کلید برشی (درز زبر) نشان میدهد.



شکل ۸- باز شدگی سطوح درز بر حسب متر در تراز نرمال و بار حرارتی زمستان با تزریق کامل درز زیر



شکل ۹- باز شدگی سطوح درز در تراز نرمال و بار حرارتی با درز زیر در صورت عدم تزریق درز از تراز ۹۵۵ متر به بالا



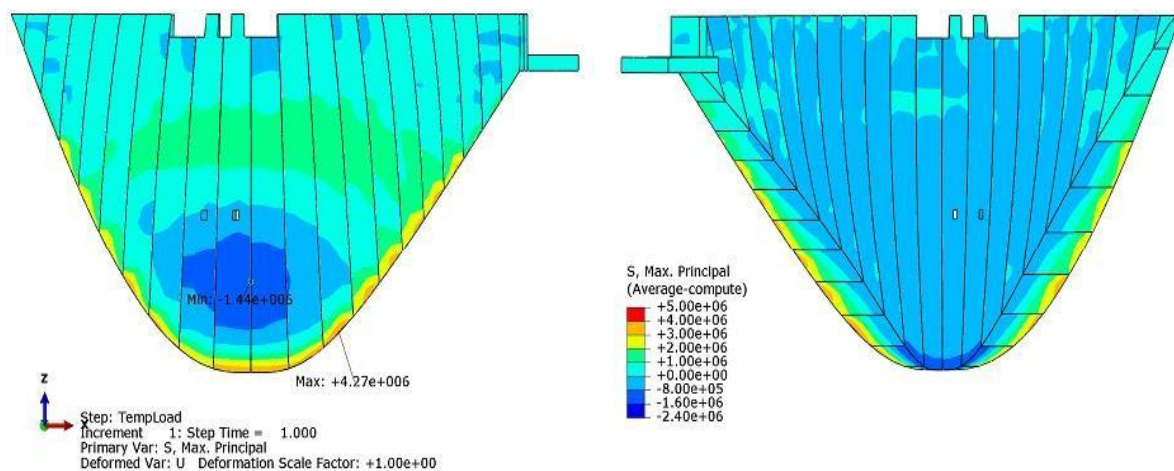
شکل ۱۰- باز شدگی سطوح درز در تراز نرمال و بار حرارتی با درز زیر در صورت عدم تزریق درز از تراز ۹۱۵ متر به بالا

همانطور که مشاهده می‌شود نحوه تغییرات باز شدگی سطوح درز در صورت عدم تزریق درز زیر (شکل ۸ تا شکل ۱۰) شبیه حالت درز صاف (شکل ۵ تا شکل ۷) می‌باشد ولی در این حالت، حداکثر باز شدگی سطوح درز بیش از حالت درز صاف می‌باشد. نتایج همچنین نشان می‌دهند که مقادیر حداکثر باز شدگی در نزدیکی تکیه‌گاه جناح

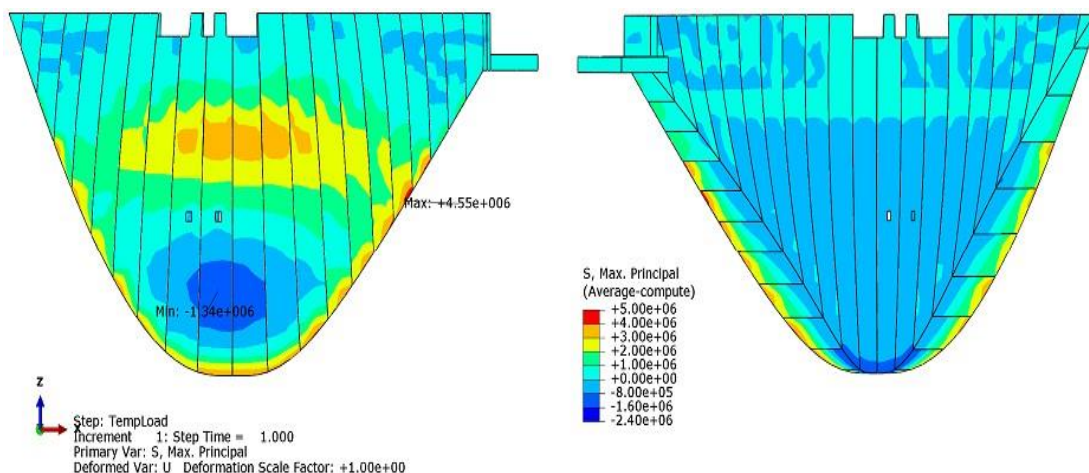
چپ سد رخ می‌دهد و باز شدگی‌های جناح چپ سد عمدتاً بیشتر از جناح راست سد می‌باشند و موقعیت نواحی با مقدار بازشدگی حداکثر در حالت درز زیر به ترازهای بالاتر سد (در هر دو وضعیت تزریق ناقص ۹۱۵ و ۹۵۵) کشیده می‌شود.

۳-۳ اثر افزایش ضخامت اولیه درز بر رفتار سد در صورت عدم تزریق درزها

برای اینکه اثر افزایش ضخامت اولیه درزها بر روی رفتار سد در صورت عدم تزریق درزها مشخص شود فاصله سطوح تماس که قبلاً ۳ میلیمتر فرض شده بودند افزایش داده شده، ولی بقیه پارامترهای درز (اصطکاک بین سطوح درز، نیروی فشاری عمودی تعریف شده بین بلوک‌های مجاور و برخورد بلوکهای مجاور هم در فاصله ۱/۱ میلیمتر در نواحی تزریق نشده) به صورت ثابت باقی ماندند بنابراین در صورت تزریق کامل درزه ای انقباضی تفاوتی در تنشها و جابجایی سد به وجود نیامده است. این تحلیل‌ها به عنوان نمونه فقط در مورد درز بدون کلید برشی با ضریب اصطکاک یک و افزایش ضخامت درزها به ۵ میلیمتر و ۱ سانتیمتر در دو تراز ۹۱۵ متر و ۹۵۵ متر انجام شده است. شکل‌های زیر توزیع تنشهای حداکثر اصلی را در وضعیت ۹۵۵ تزریق ناقص درزها نشان میدهد.



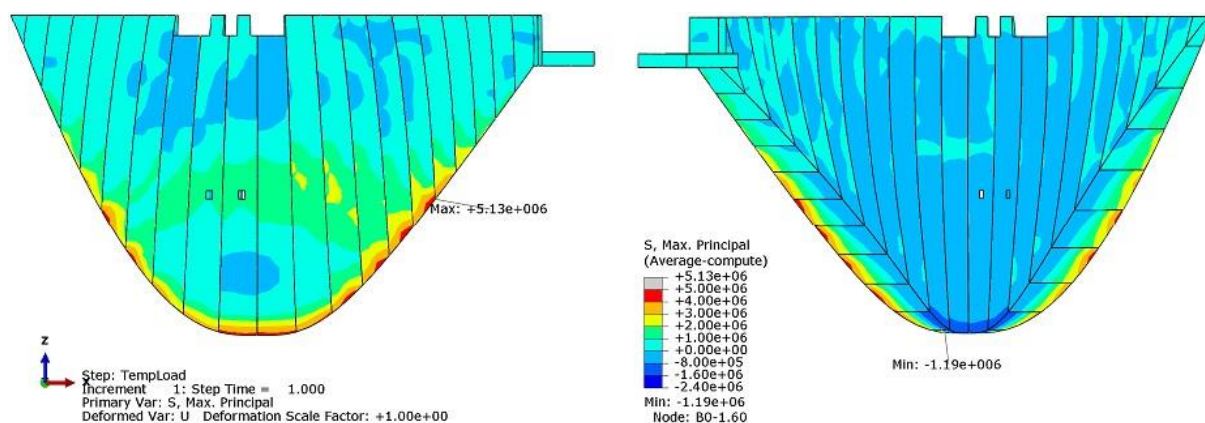
الف) ضخامت درز ۵ میلیمتر



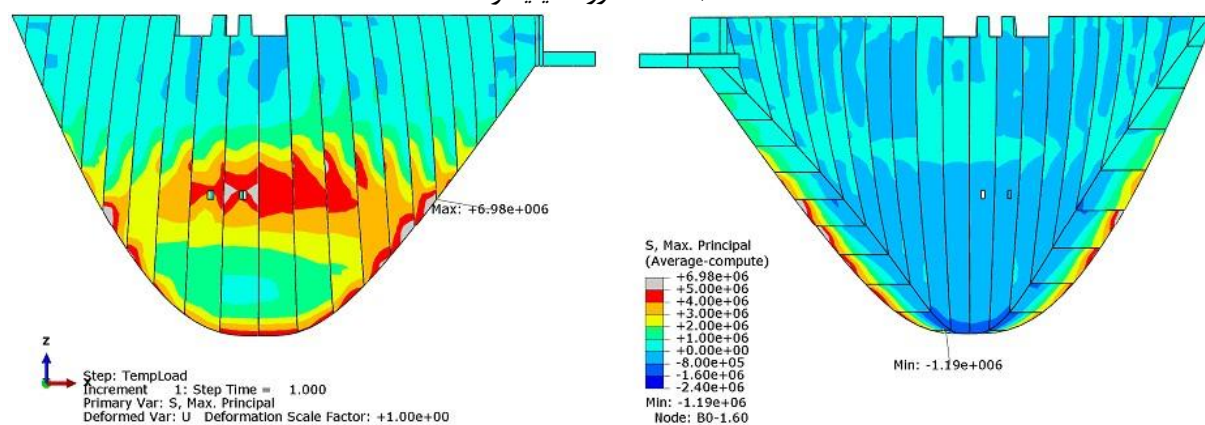
ب) ضخامت درز ۱ سانتیمتر

شکل ۱۱- توزیع تنشهای حداکثر اصلی در بالادست و پایین دست سد در تراز نرمال و بار حرارتی با درز صاف در صورت عدم تزریق درز از تراز ۹۵۵ متر به بالا و ضریب اصطکاک یک با ضخامت درز متفاوت

چنانچه در شکل‌های بالا مشاهده می‌شود افزایش ضخامت درز به ۵ میلیمتر باعث بالا رفتن تنش‌های کششی در بدنه سد نسبت به درز ۳ میلیمتر شده‌است که با افزایش این مقدار به ۱ سانتیمتر تنش‌های کششی بدنه سد در نزدیکی محل قطع تزریق و در ناحیه قابل توجهی از ۳ مگاپاسگال تجاوز کرده است در حالیکه این مقدار در ضخامت درز ۵ میلیمتر از ۲ مگاپاسگال و در ضخامت درز ۳ میلیمتر از ۱ مگاپاسگال کمتر می‌باشد .
برای اینکه اثر افزایش ارتفاع عدم تزریق درز در صورتی که ضخامت اولیه درز افزایش داده شود بر روی سد مشخص شود توزیع تنش‌های حداکثر اصلی در شکل زیر آمده است .



الف) ضخامت درز ۵ میلیمتر



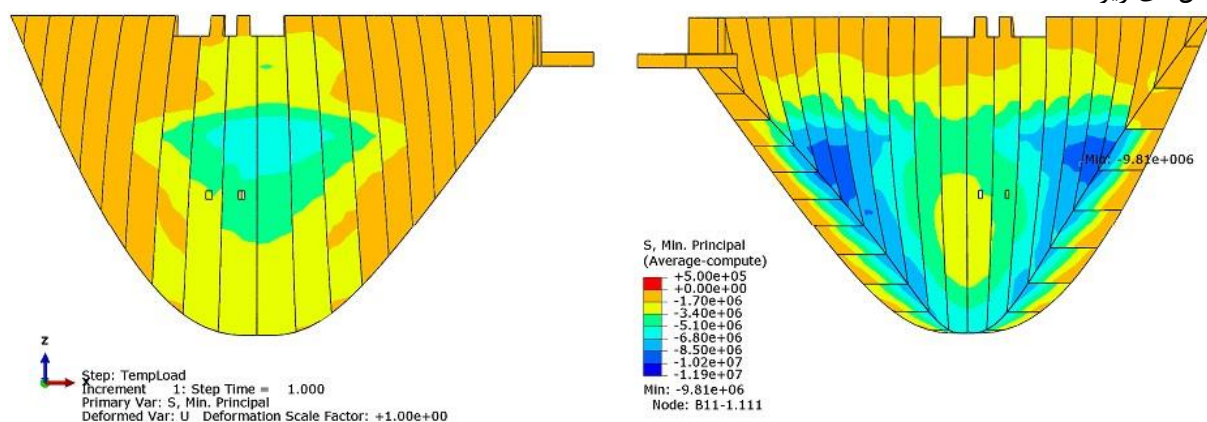
ب) ضخامت درز ۱ سانتیمتر

شکل ۱۲- توزیع تنش‌های حداکثر اصلی در بالادست و پایین‌دست سد در تراز نرمال و بار حرارتی با درز صاف در صورت عدم تزریق درز از تراز ۹۱۵ متر به بالا و ضریب اصطکاک یک با ضخامت درز متفاوت

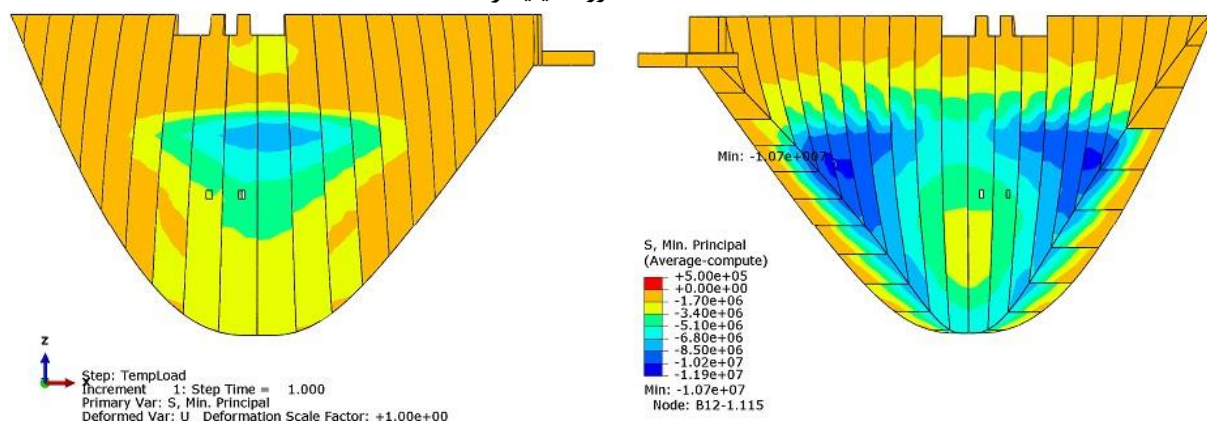
با توجه به شکل بالا مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع عدم تزریق درز، تنش‌های کششی در بدنه سد نسبت به وضعیت ۹۵۵ تزریق ناقص درزها (شکل ۹) دوباره افزایش پیدا کرده است به طوری که تمام سطح بالادست سد تقریباً در کشش می‌باشد که این افزایش تنشها در ضخامت درز ۱ سانتیمتر و در نزدیکی محل قطع تزریق از ۵ مگاپاسگال تجاوز کرده است .
با افزایش ضخامت اولیه درز، به جزء در وضعیت ۹۵۵ تزریق ناقص درز با ضخامت ۵ میلیمتر مقدار حداکثر تنش کششی در تکیه‌گاه سد نسبت به حالت درز با ضخامت ۳ میلیمتر به ترازهای بالا در تکیه‌گاه‌های سد کشیده شده است .

شرایط بازشدگی مورد مطالعه در این بخش از مطالعات برای نشان دادن حد بالای اثرات تزریق ناقص بر روی رفتار سد در نظر گرفته شده‌اند. بدیهی است در شرایط واقعی یک سد دو قوسی انتظار چنین رفتاری چندان واقع‌بینانه

نیست، با این حال نتایج به دست آمده در بالا به خوبی وضعیت احتمالی تنشها در حالتی که عملکرد قوسی افقی به شدت تضعیف شده باشد را نشان میدهند و علاوه بر تاکید بر اهمیت این نوع عملکرد در سدهای دو قوسی، به نوعی اهمیت تزریق‌های بدنه سد برای حفظ یکپارچگی و پایداری آن را مورد تایید قرار می‌دهند . همچنین این نتایج نشان می‌دهند که در یک سد دو قوسی در صورت عدم تزریق درزها و با فرض ضخامت اولیه نسبتاً کم درزها (در حد ۳ میلیمتر در این مطالعات)، طرح‌های سد در ناحیه تزریق نشده (یا تزریق ناقص) با حرکت به سمت پایین دست در برابر بارهای هیدرو استاتیکی وارد مجدداً عملکرد قوسی افقی را شکل خواهند داد که این عملکرد با اندکی تاخیر، در انتقال بارها مشارکت خواهند نمود. تاخیر به وجود آمده در شکل‌گیری عملکرد قوسی افقی تا حدودی توزیع تنش‌ها و به خصوص مقدار تغییر شکل‌های سد را تحت تاثیر قرار می‌دهد . برای بررسی تاثیر افزایش ضخامت اولیه درز بر روی تنش‌های فشاری سد، توزیع تنش‌های حداقل اصلی در شکل‌های زیر آمده است .



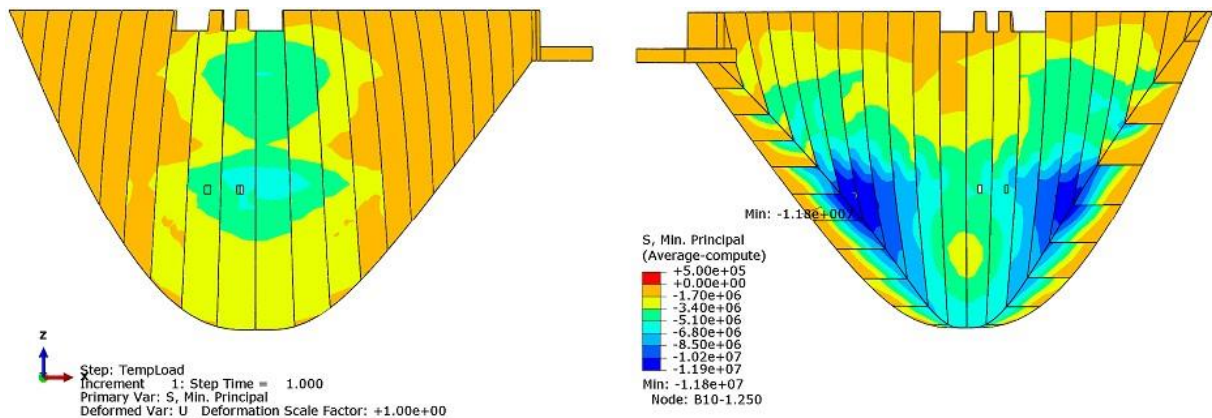
الف) ضخامت درز ۵ میلیمتر



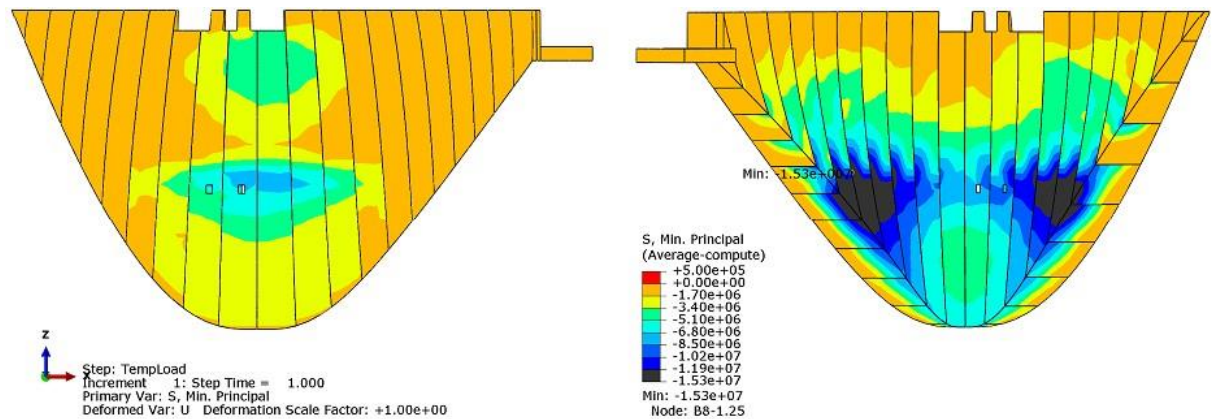
ب) ضخامت درز ۱ سانتیمتر

شکل ۱۳- توزیع تنش‌های حداقل اصلی در بالادست و پایین دست سد در تراز نرمال و بار حرارتی با درز صاف در صورت عدم تزریق درز از تراز ۹۵۵ متر به بالا و ضریب اصطکاک یک با ضخامت درز متفاوت

از شکل (۱۳) مشاهده می‌شود که افزایش ضخامت اولیه درز باعث کاهش تنش‌های فشاری در تاج بالادست و پایین دست سد شده است ولی تنش‌های فشاری در محل قطع تزریق بالادست و پایین دست سد و همچنین در تکیه‌گاه پایین دست سد تقریباً به موازات و پایین تر از محل قطع تزریق افزایش یافته است که این افزایش تنش فشاری در ضخامت درز ۱ سانتیمتر ۱/۷۹ مگاپاسگال نسبت به درز ۳ میلیمتر افزایش را نشان می‌دهد .



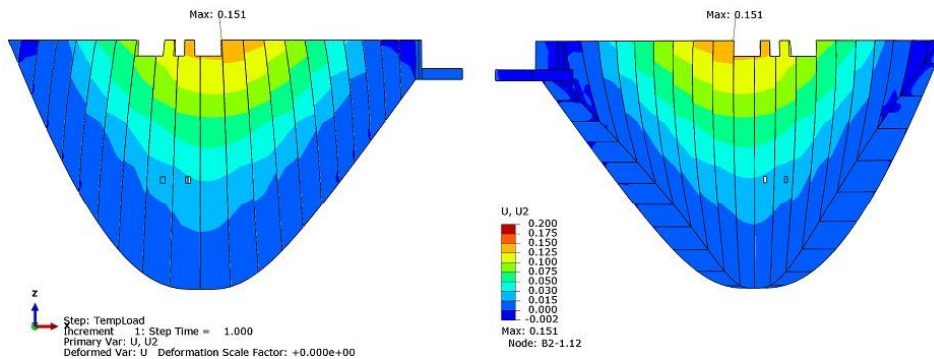
الف) ضخامت درز ۵ میلیمتر



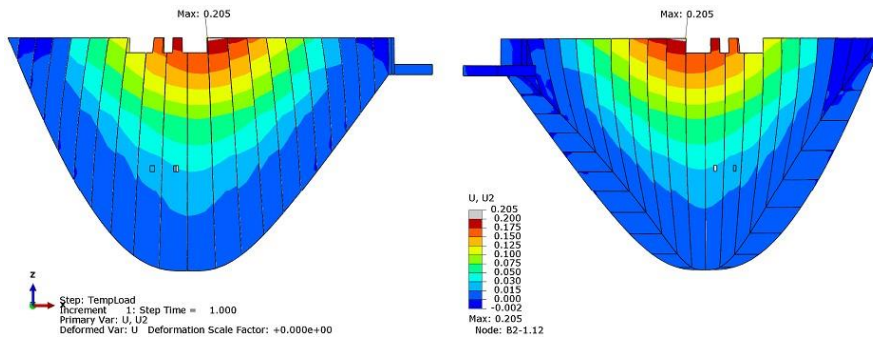
ب) ضخامت درز ۱ سانتیمتر

شکل ۱۴- توزیع تنشهای حداقل اصلی در بالادست و پایین دست سد در تراز نرمال و بار حرارتی با درز صاف در صورت عدم تزریق درز از تراز ۹۱۵ متر به بالا و ضریب اصطکاک یک با ضخامت درز متفاوت

چنانچه در شکل بالا مشاهده می شود با افزایش ارتفاع عدم تزریق درز، تنش های فشاری در قسمت فوقانی بالادست و پایین دست سد نسبت به عدم تزریق درز در وضعیت ۹۵۵ (شکل ۱۳) افزایش یافته است. تنش های فشاری نیز در تکیه گاه پایین دست سد به مقدار قابل ملاحظه ای به خصوص در سد با ضخامت درز ۱ سانتیمتر افزایش یافته است. با توجه به شکل های بالا مشاهده می شود که با افزایش ضخامت اولیه درز، موقعیت حداکثر تنش فشاری در تکیه گاه سد به جزء در وضعیت ۹۵۵ تزریق ناقص درز با ضخامت اولیه درز ۵ میلیمتر از سمت چپ تکیه گاه پایین دست به سمت راست تکیه گاه پایین دست نسبت به ضخامت اولیه درز ۳ میلیمتر کشیده شده است. شکل های زیر توزیع جابجایی های سد را در صورت افزایش ضخامت درز نشان می دهد.

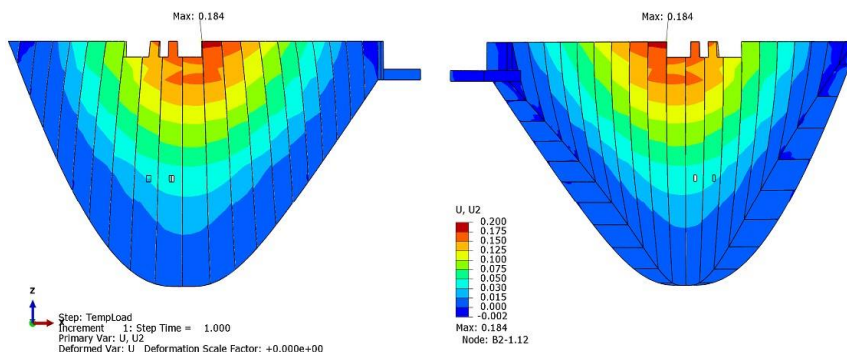


الف) ضخامت درز ۵ میلیمتر

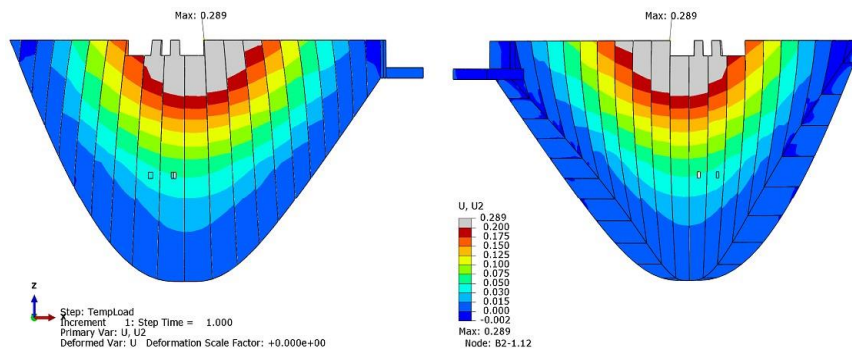


ب) ضخامت درز ۱ سانتیمتر

شکل ۱۵- توزیع جابجایی در راستای بالادست به پایین دست سد در تراز شمال و بار حرارتی با درز صاف در صورت عدم تزریق درز از تراز ۹۵۵ متر به بالا و ضریب اصطکاک یک با ضخامت درز متفاوت



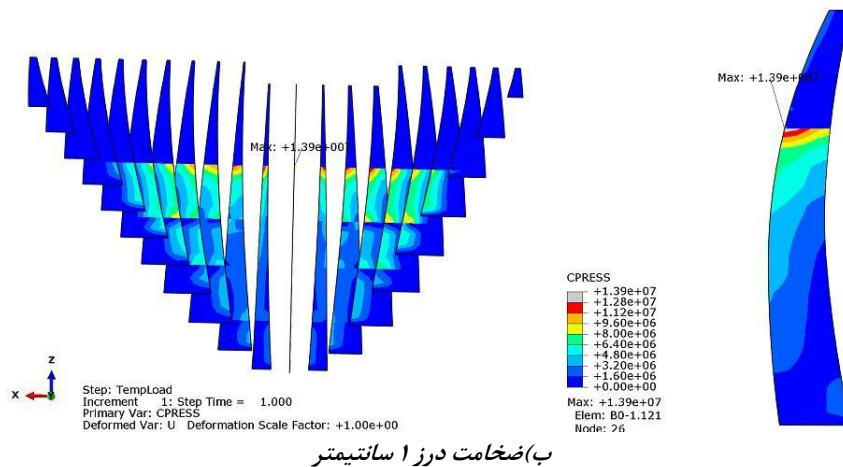
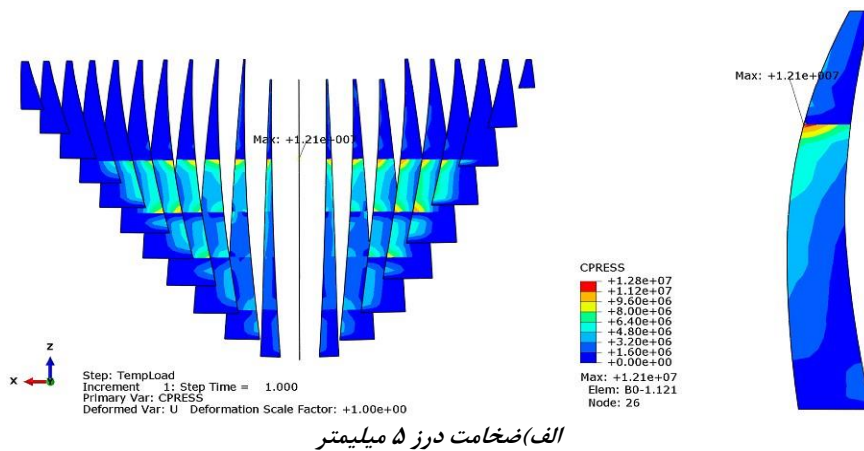
الف) ضخامت درز ۵ میلیمتر



ب) ضخامت درز ۱ سانتیمتر

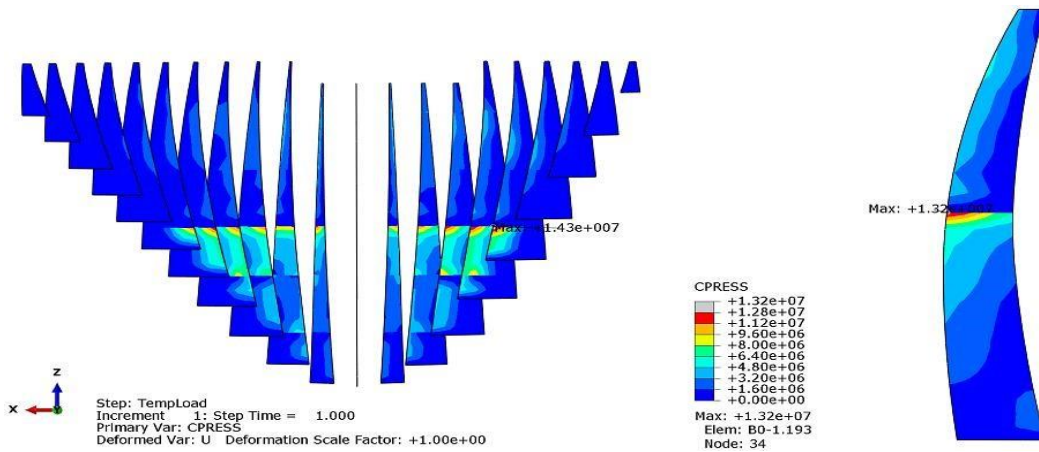
شکل ۱۶- توزیع جابجایی در راستای بالادست به پایین دست سد در تراز شمال و بار حرارتی زمستان با درز صاف در صورت عدم تزریق درز از تراز ۹۱۵ متر به بالا و ضریب اصطکاک یک با ضخامت درز متفاوت

با مقایسه دو شکل بالا با جابجایی‌های حاصل از تحلیلهای غیرخطی عدم تزریق درز بدون کلید برشی با ضخامت اولیه درز ۳ میلیمتر مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت اولیه درز جابجاییهای سد به طور قابل توجهی افزایش یافته است بطوریکه در وضعیت ۹۵۵ عدم تزریق درز با ضخامت اولیه درز ۵ میلیمتر به جابجایی سد ۲۴٪ و با ضخامت اولیه درز ۱ سانتیمتر ۶۸٪ و در وضعیت ۹۱۵ عدم تزریق درز با ضخامت اولیه درز ۵ میلیمتر ۳۴٪ و با ضخامت اولیه درز ۱ سانتیمتر ۱۱۱٪ نسبت به درز با ضخامت اولیه درز و در شرایط یکسان افزوده شده است . برای اینکه اثر افزایش ضخامت اولیه درز بر روی تنشهای عمودی به وجود آمده در سطوح درز در صورت عدم تزریق درز مشخص شود، توزیع تنشهای عمودی بین سطوح درز در شکل‌های زیر نشان داده شده است .

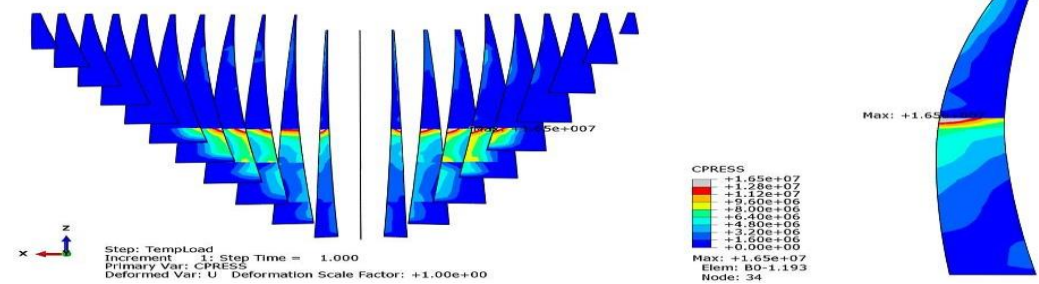


شکل ۱۷- توزیع تنش فشاری عمودی بر روی سطوح تماس و مابین بلوک‌های مجاور صفر و در تراز نرمال و بار حرارتی با درز صاف در صورت عدم تزریق درز از تراز ۹۵۵ متر به بالا با ضریب اصطکاک یک و ضخامت درز متفاوت

شکل بالا نشان می‌دهد که در صورت افزایش ضخامت اولیه درز در نواحی عمده‌ای از تزریق ناقص درزها (قسمت-های تزریق نشده) پس از بارگذاری تماسی بین سطوح درز به خصوص درز با ضخامت اولیه ۱ سانتی‌متر به وجود نمی‌آید و مقادیر فشار عمودی بین سطوح تماس در حد صفر یا کوچک باقی می‌مانند مگر در بلوک‌های میانی سد و آن هم بیشتر در درز با ضخامت اولیه ۵ میلیمتر. همچنین چنانچه مشاهده می‌شود مقادیر تنش فشاری عمودی در قسمتهای تزریق شده و به خصوص در محل قطع تزریق به میزان قابل توجهی نسبت به درز با ضخامت اولیه ۳ میلیمتر افزایش یافته است. بطوریکه میزان حداکثر تنش فشاری عمودی در درز با ضخامت اولیه ۱ سانتیمتر نسبت به درز با ضخامت اولیه ۳ میلیمتر ۲/۶ مگاپاسگال افزایش یافته است. توزیع تنشهای عمودی به وجود آمده بین سطوح درز در اثر افزایش ارتفاع عدم تزریق درز با ضخامت اولیه درز ۵ میلیمتر و ۱ سانتیمتر در شکل‌های زیر آمده است .



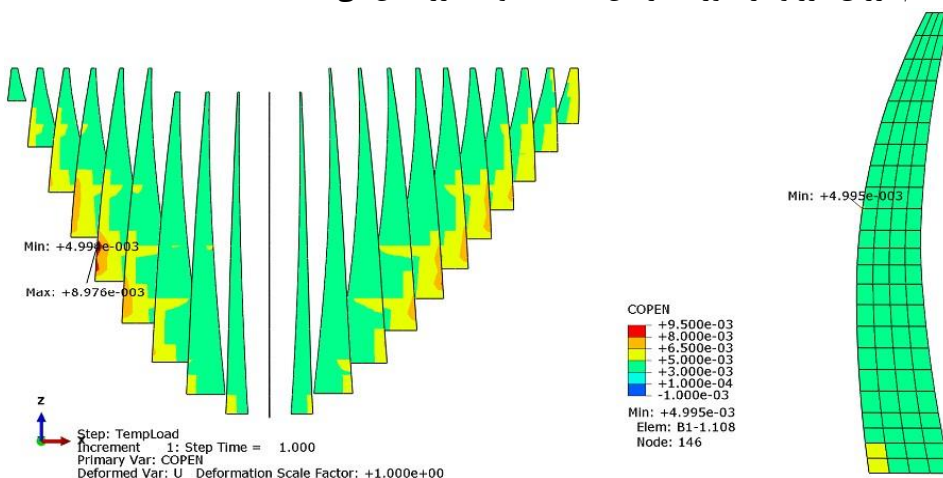
الف) ضخامت درز ۵ میلیمتر



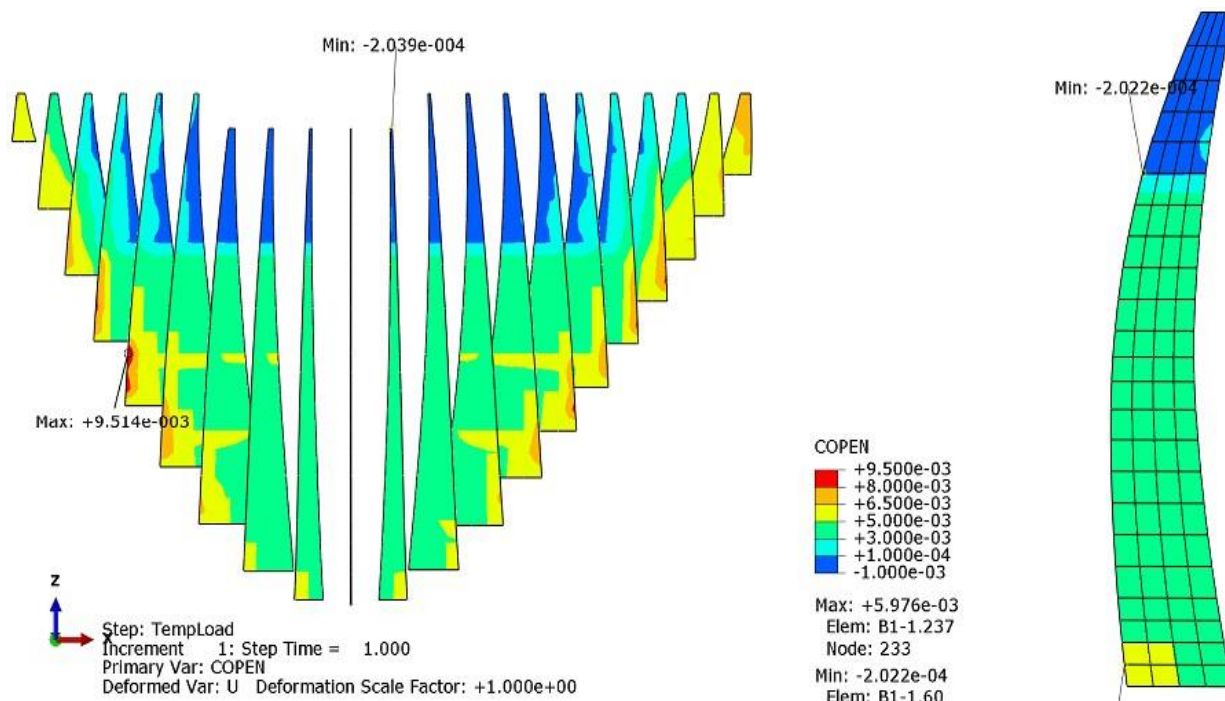
ب) ضخامت درز ۱ سانتیمتر

شکل ۱۸- توزیع تنش فشاری عمودی بر روی سطوح تماس و مابین بلوکهای مجاور صفر و یک در تراز شمال و بار حرارتی با درز صاف در صورت عدم تزریق درز از تراز ۹۱۵ متر به بالا با ضریب اصطکاک یک و ضخامت درز متفاوت

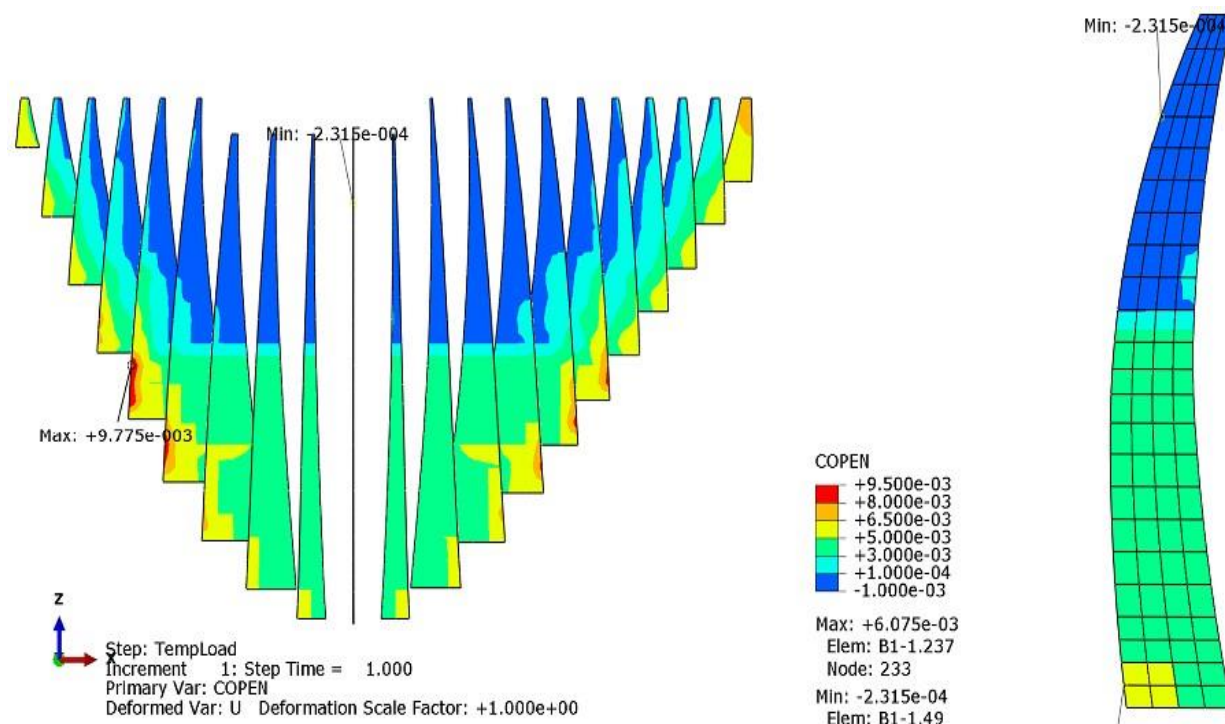
با مقایسه عدم تزریق وضعیت ۹۵۵ (شکل ۱۷) با شکل بالا مشاهده می‌شود که افزایش ارتفاع عدم تزریق درز باعث شده است تا تماس بیشتری بین بلوک‌های مجاور در نواحی تزریق نشده که همراه با تغییر شکل‌های قابل توجه می‌باشد صورت گیرد و به دنبال آن نیز تنش‌های فشاری عمودی در نواحی تزریق شده و در محل قطع تزریق نسبت به وضعیت ۹۵۵ عدم تزریق درز افزایش یافته است که این افزایش تنش، در درز با ضخامت اولیه ۱ سانتیمتر ۲/۶ مگاپاسگال و در ضخامت درز ۵ میلیمتر ۱/۱ مگاپاسگال می‌باشد. شکل‌های زیر توزیع باز شدگیهای درز را در دو تراز متفاوت عدم تزریق درز و در صورت افزایش ضخامت اولیه درز نشان می‌دهد.



شکل ۱۹- باز شدگی سطوح درز بر حسب متر در تراز شمال و بار حرارتی با تزریق کامل درز صاف و ضخامت درز ۵ میلیمتر

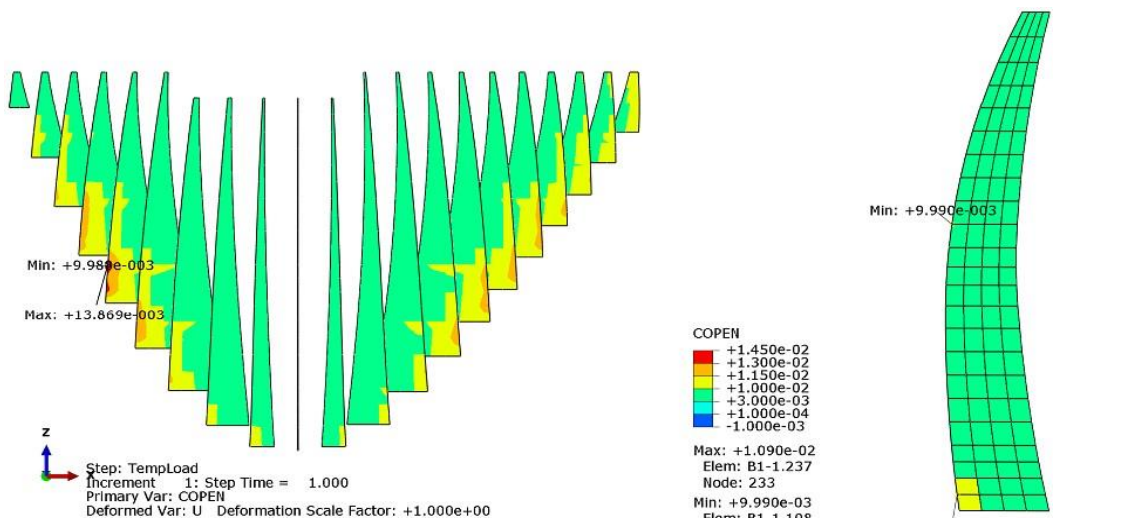


الف) عدم تزریق درز از تراز ۹۵۵ متر به بالا

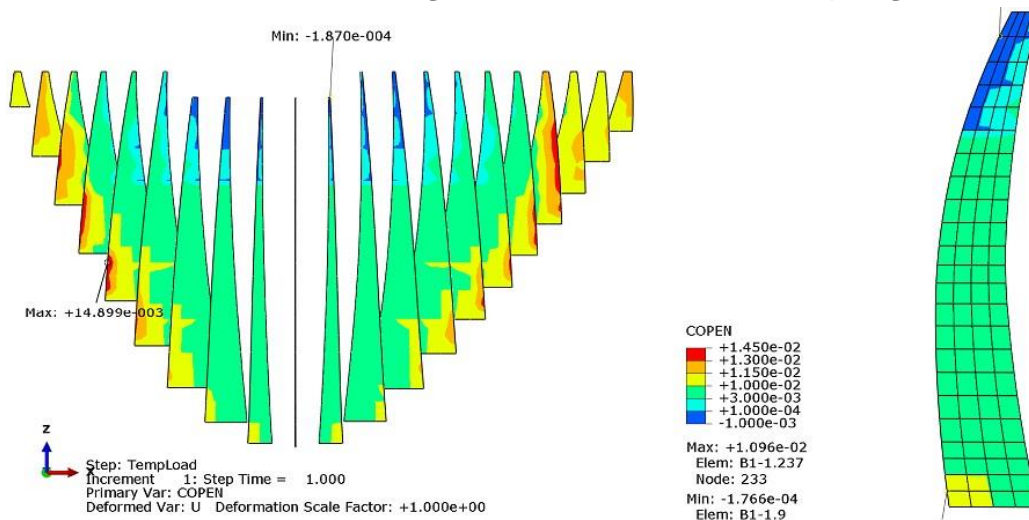


ب) عدم تزریق درز از تراز ۹۱۵ متر به بالا

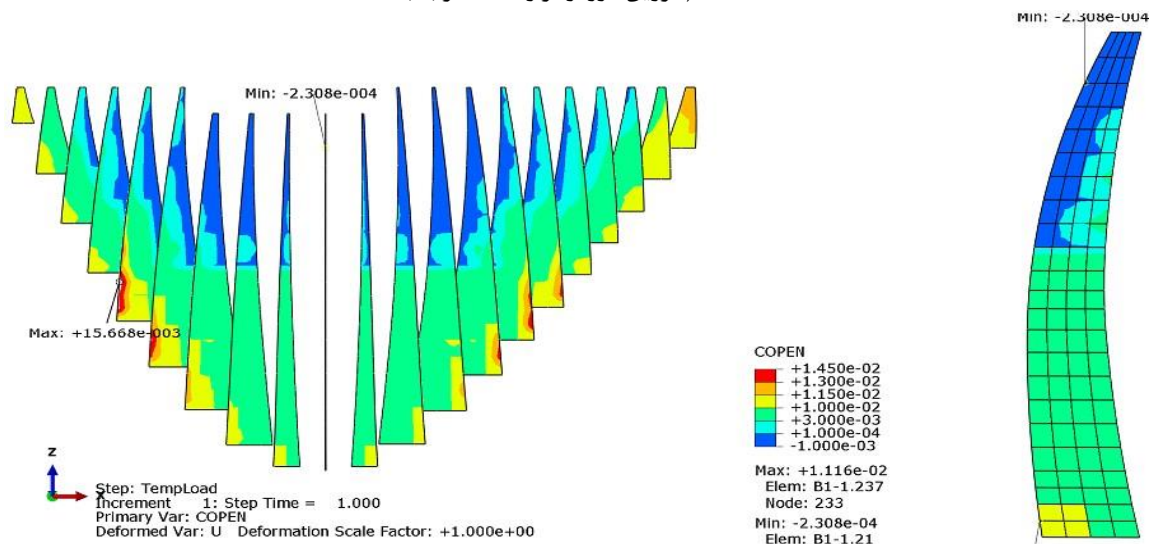
شکل ۲۰- باز شدگی سطوح درز بر حسب متر در تراز نرمال و بار حرارتی با درز صاف در صورت عدم تزریق درز از ترازهای مختلف با ضریب اصطکاک یک و ضخامت درز ۵ میلیمتر



شکل ۲۱- باز شدگی سطوح درز بر حسب متر در تراز نرمال و بار حرارتی با تزریق کامل درز صاف و ضخامت درز ۱ سانتیمتر



الف) عدم تزریق درز از تراز ۹۵۵ متر به بالا



ب) عدم تزریق درز از تراز ۹۱۵ متر به بالا

شکل ۲۲- باز شدگی سطوح درز بر حسب متر در تراز نرمال و بار حرارتی با درز صاف در صورت عدم تزریق درز از تراز مختلف با ضریب اصطکاک یک و ضخامت درز ۱ سانتیمتر

چنانچه مشاهده می‌شود نحوه تغییرات باز شدگی درزهای انقباض، با افزایش ضخامت درز شبیه به یکدیگر می‌باشد و فقط به میزان باز شدگی نسبی سطوح درز افزوده شده است که بیشترین مقدار آن در درز با ضخامت ۱ سانتیمتر و در ارتفاع عدم تزریق درز ۹۱۵ متر اتفاق افتاده است که نسبت به درز با ضخامت ۳ میلیمتر ۱/۴ میلیمتر افزایش باز شدگی نسبی درز را در نزدیکی تکیه‌گاه نشان می‌دهد. به دلیل فاصله زیاد بلوک‌ها از یکدیگر در ارتفاع عدم تزریق درز ۹۵۵ متر در ضخامت ۱ سانتیمتر بیشتر قسمتهای بلوک‌های فوقانی با یکدیگر تماس پیدا نکردند در حالی که در عدم تزریق درز با ضخامت اولیه ۳ میلیمتر در وضعیت ۹۵۵، بیشتر قسمتهای بلوک‌های فوقانی و در درز با ضخامت اولیه ۵ میلیمتر بلوک‌های میانی در انتهای بارگذاری با یکدیگر تماس پیدا کردند .

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق که هدف از آن بررسی اثر احتمالی تزریق ناقص درزهای انقباض بر روی سدهای بتنی دو قوسی تحت بارهای هیدرو استاتیکی بود، سه مدل عددی مدلسازی و مورد تحلیل قرار گرفت. یک مدل خطی که بدنه سد به صورت کاملاً یکپارچه و همگن بود و دو مدل غیرخطی با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی حاصل از درزهای انقباضی موجود در بدنه سد با دو نوع متفاوت درز که بیشترین کاربرد را در تحقیقات گذشته داشته است. نتایج به دست آمده از این تحقیق را میتوان در موارد زیر خلاصه نمود .

۱- عدم تزریق درز باعث افزایش قابل توجه تنش‌های حداکثر اصلی در بالادست سد شده است به طوری که قسمت اعظمی از بالادست سد که در ابتدا به فشار کار می‌کرد به کشش افتاده است. تنش‌های کششی در تکیه‌گاه بالادست و تاج پایین دست سد نیز افزایش یافته است .

۲- در صورت عدم تزریق درز تنش‌های حداقل اصلی در تاج سد کاهش یافته ولی در تکیه‌گاه پایین دست سد و همچنین در میانه بالادست و پایین دست بدنه سد بر میزان تنش‌های فشاری افزوده شده است.

۳- در صورت عدم تزریق درزهای انقباض، بر میزان جابجایی‌های سد به مقدار قابل توجهی افزوده شده است بطوریکه جابجایی‌های تاج سد در درز بدون کلید برشی دو برابر شده است. البته با افزایش ارتفاع عدم تزریق بر میزان جابجایی‌ها مجدداً افزوده شده است .

۴- میزان تنش‌های فشاری عمودی بین سطوح تماس در صورت عدم تزریق درز به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است که این تنش‌ها در مجاورت تراز قطع تزریق تقریباً به دو برابر اولیه افزایش پیدا کرده است. مثلاً این تنش‌ها در بین بلوک‌های صفر و یک که حداکثر آن در تزریق کامل برابر با ۵/۱۳ مگاپاسگال می‌باشد با عدم تزریق به ۱۱/۳ مگاپاسگال در این نقطه افزایش پیدا کرده است .

۵- نتایج نشان می‌دهند که حتی در صورت تزریق کامل درزهای انقباض، باز شدگی‌هایی در سطوح درز اتفاق می‌افتد که این باز شدگی‌ها بیشتر نزدیک به پی سد می‌باشد که در صورت عدم تزریق درز بر میزان این باز شدگی‌ها افزوده می‌شود که مقدار آن نسبت به تزریق کامل درزهای سد بسیار کم می‌باشد. میزان باز شدگی‌ها در سطوح بین بلوک‌های انتهایی سد نیز افزایش می‌یابد که مقدار آن در درز با کلید برشی بیشتر از درز بدون کلید برشی می‌باشد .

۶- نتایج نشان می‌دهند که با افزایش ضخامت درز و در صورت عدم تزریق درز بر مقادیر تنش‌های حداکثر اصلی، تنش‌های حداقل اصلی، جابجایی‌های سد و نیروی فشاری عمودی بین سطوح تماس به مقدار قابل توجهی افزوده میشود .

۷- به عنوان یک نتیجه‌گیری کلی میتوان بیان کرد که عدم تزریق درز در سطوح فوقانی سد، در صورتی که ارتفاع تزریقات ناقص و همچنین ضخامت سطوح درز کم باشد ایمنی سد تحت بارهای استاتیکی زیاد تحت تاثیر قرار نمی‌گیرد ولی زمانی که ارتفاع این تزریقات ناقص و همچنین میزان فاصله بلوک‌های مجاور افزایش یابد ممکن است

ایمنی سد در برابر بارهای استاتیکی به خطر بیافتد. بنابراین لازم است، در تزریق درزهای انقباضی سدهای بتنی قوسی دقت کافی به عمل آید .

۸- مدل کردن درزها در تحلیل غیرخطی باعث افزایش جابجایی‌هایی سد به میزان ۶ میلی‌متر در مدل درز بدون کلید برشی و به میزان ۳ میلی‌متر در مدل درز با کلید برشی نسبت به تحلیل خطی شده است .

۵- منابع

- 1- Abrishami, J., Wahab Rajaei, N. (2010), *Concrete dams design and construction. Fourth edition of Mashhad: Astan Quds Razavi Publications. (in persian)*
- 2- Chuhan, Z., Jianwen, P. & Jinting, W. (2009), "Influence of Seismic Input Mechanisms and Radiation Damping on Arch Dam Response", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Volume 29, pp. 1282-1283.*
- 3- Yao, X. W., Elnashai, A. S. & Jiang, J. Q. (2012), "Analytical Seismic Fragility Analysis of Concrete Arch Dams", *15 WCEE, Lisboa.*
- 4- Hariri-Ardebili, M. A., Mirzabozorg, H. & Kianoush, M. R. (2013), "Seismic Analysis of High Arch Dams Considering Contraction-Peripheral Joints Coupled Effects", *Central European Journal of Engineering, 3(3), pp. 549-564.*
- 5- Ferdowsi, A. Etc. (2011), "The effect of accurate modeling of rock support sections of arched dams on the interactive behavior of the reservoir dam system", *10th Iran Hydraulic Conference, November, University of Guilan, Guilan (in persian)*
- 6- Ahmadi, M. T., Ahmadi, T. (2012), "Analysis of concrete arch dam failure with large displacements", *9th International Congress of Civil Engineering, May 19-21, Isfahan University of Technology, Isfahan. (in persian)*
- 7- Mostafaei, H, Behnamfar, F (2022) *Wedge Movement Effects on the Nonlinear Behavior of an Arch Dam Subjected to Seismic Loading, International Journal of Geomechanics, 22(3)*
- 8- Gauron, O et al (2018) *Forced-Vibration Tests of the Daniel-Johnson Multiple-Arch Dam, International Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures ,DOI: 10.1007/978-3-319-67443-8_34*
- 9- Kadri, M (2019) *THREE-DIMENSIONAL NONLINEAR SEISMIC RESPONSE OF OUED FODDA CONCRETE GRAVITY DAM CONSIDERING CONTACT ELEMENTS AT DAM-RESERVOIR INTERACTION INTERFACE, Asian Journal of Civil Engineering, 18(6):977-992*
- 10- Tatsuo, N (2017) *THE STATIC BEHAVIORS AND NUMERICAL PREDICTION ON DISPLACEMENT OF AN EXISTING ARCH DAM, Proceedings of International Structural Engineering and Construction 4(1) , DOI: 10.14455/ISEC.res.2017.194*
- 11- Zhang, L, Hanyun, Zh., Hu, Sh (2014) *Failure patterns of shear keys and seismic resistance of a gravity dam with longitudinal joints , Journal of Earthquake and Tsunami 08(01), DOI: 10.1142/S1793431114500043*
- 12- Iran Water and Power Resources Development Company. (2004), "Final Stage Studies (Second Stage), Report on Supplementary Analysis of Dam Body and Abutments. (in persian)
- 13- Mr. Dehkordi, A. (2011), "The effect of executive joints on the seismic behavior of arched concrete dams", *Master Thesis, Urmia University. (in persian)*
- 14- Mahab Ghods Consulting Engineering Company. (2011), "Precision tools and behavior of Karun 4 dam and power plant", *Report No. 33. (in persian)*