



Journal of Hydraulics and Water Science

Online ISSN: 3092-6114
Journal homepage: <https://hws.tabrizu.ac.ir/?lang=en>



Research Article

Numerical Analysis of the Optimized Cross-Section of Roller-Compacted Concrete Dams Using the Finite Element Method

Ebrahim Asadi^{*1}, Neda Beirami², Ebrahim Salami³, Reza Ghahreman Nezhad Alanjaghi⁴

1-Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Azerbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.

2-Graduated Master's Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

3-Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Payame Noor University (PNU), Tehran, Iran.

4-Graduated Master's Student, Department of Civil Engineering, Shahid Madani University of Azerbaijan, Tabriz, Iran

Accepted: September 8, 2025

Received: April 7, 2025

Revised: September 6, 2025

Published online: September 21, 2025

*Corresponding Author's Email: asadi47e@gmail.com, asadi@azaruniv.ac.ir

ARTICLE INFO

Keywords:

Concrete Volume Reduction,
Finite Elements,
Optimal Cross-Section,
Roller-Compacted Concrete Dam
Climate Change,

ABSTRACT

Background and Objectives

People construct dams for various purposes, such as flood control, hydropower generation, and managing water for drinking and agriculture. One of the most effective ways to manage water is by using dams. However, constructing dams has some financial changes, and decreasing these costs helps governments diminish their financial issues. So, by combining the principles of engineering and economics, engineers can design structures at low cost. Nowadays, the stability of structures is not sufficient, and engineers have to design buildings with sufficient strength to withstand various loads and be economically optimal. Roller-compacted concrete (RCC) is used in hydraulic structures due to its higher strength and high execution speed. The history of using roller-compacted concrete versus conventional concrete shows that the cost per cubic meter of roller-compacted concrete is far less, with an average cost reduction ranging from 25 to 50%. This reduction in costs is due to the materials used, the amount of cement used, and the ease and simplicity of the implementation method. More studies focused on the mechanical behavior of roller-compacted concrete dams, such as thermal performance and seismic performance. However, there were not sufficient studies regarding the performance of these dams by reducing their volume in various geometric shapes. So, studies on the maximum amount of volume reduction possible for dams without reducing mechanical properties are essential.

Methodology

The study employed the finite element method (FEM) using ABAQUS software to model and analyze various cross-sectional designs of RCC dams. This software could simulate different structures under various loads, so it could solve complicated problems using static, dynamic, thermal, and large deformation

How to cite:

Asadi, E., Beirami, N., Salami, E., Ghahreman Nezhad Alanjaghi, R. *Numerical Analysis of the Optimized Cross-Section of Roller-Compacted Concrete Dams Using the Finite Element Method*. Journal of Hydraulics and Water Science, 35 (2):83-92.

https://hws.tabrizu.ac.ir/article_20759.html



This is an open-access article under the CC BY NC license
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/>)



analysis. In the finite element method for solving problems, the structures are divided into smaller components that are called elements. By increasing the number of elements, the accuracy of the model increases as well. Increasing the number of elements beyond a certain limit will not only increase the computational cost but also will not result in a significant improvement in the accuracy of the solution. In this project, for the concrete section that was modeled as a solid volume, the node spacing was set to 0.01 mm, which resulted in 20,850 eight-node 3D elements of type C3D8R. For the soil part that was modeled as a solid volume, the node spacing was set to 0.02 mm, which resulted in 15,375 eight-node 3D elements of type C3D8R. For validation of the simulation process, the article by Zhang et al. (2019) was selected as a reference and evaluation.

Findings

First of all, a topology optimization tool in Abaqus software was used for volumetric optimization (20% volume reduction without reducing resistance). Then, based on considering the result of optimization, models with ideal and practical geometries were designed in terms of implementation. After, selecting the appropriate meshing method for the model and other required parameters, the numerical model of the structure examined in this study (which was derived from the study by Zhang et al.) was created and the desired simulations were performed. For validation, the obtained results for the displacement of the dam crest in the horizontal and vertical directions were compared with the results obtained from the study of Zhang et al. The horizontal and vertical displacements of the dam crest were obtained to be 18.648 and 17.20, respectively, which had a maximum error of 1.3% and 1.23% compared to the prior study. Which indicated the accuracy of the selected methods and the materials applied in the simulations performed. For the optimization analysis, the volume parameter was considered as the objective function and the strain energy parameter as the control function. After performing optimization analysis and reducing the model volume by approximately 30% by the software, under the same loading conditions, the maximum stress value decreased by 34.5% and the maximum displacement of the dam crest in the vertical direction decreased. While the maximum displacement of the dam crest in the vertical direction doubled, it should be noted that due to the lack of increase in the stresses generated in the dam, this increase in displacement was due to the increase in the flexibility of the dam against the applied forces and did not indicate a decrease in the dam's resistance. Based on the optimization results, several models were designed for the application of construction conditions and structural aesthetics of the dam by Abaqus software. The model that had columns with non-sloping side walls and simple shapes, making it easy to use and can be displayed with long and short spans between the columns, was the best-designed one. The volume of this model was 5905911 cubic meters, which was an approximate reduction of 30.61 percent compared to the initial volume of the dam used in the Zhang et al. paper.

Conclusion

This paper demonstrated the optimization of RCC dams through geometric refinement. By using finite element method analysis by Abaqus software, engineers can design more efficient and cost-effective dam structures. The findings supported the reduction of almost 30% of concrete volume without decreasing the strength of the dam. The study's outcomes suggested that a well-designed RCC dam had columns with non-sloping side walls and simple shapes, making it easy to use and display with long and short spans between the columns. This choice was based on the largest amount of reduction in dam volume compared to the initial volume.



نشریه دانش آب و هیدرولیک

شاپا الکترونیکی: 2717-4107

درگاه نشریه: hws.tabrizu.ac.ir



مقاله پژوهشی

بررسی عددی مقطع بهینه سدهای بتن غلتکی به روش اجزا محدود

ابراهیم اسدی*^۱، ندا بیرامی^۲، ابراهیم سلامی^۳، رضا قهرمان نژاد النجفی^۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۹

تاریخ انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۶

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران.

۲- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه پلی تکنیک امیرکبیر، تهران، ایران.

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

۴- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران.

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: asadi47e@gmail.com, asadi@azaruniv.ac.ir

چکیده

کلمات کلیدی

امروزه سدهای بتن غلتکی به علت اجرای سریع، سهولت ساخت و صرفه جویی در هزینه ها، مورد توجه قرار گرفته اند. در این تحقیق، اشکال هندسی مختلف از سدهای بتنی غلتکی توسط نرم افزار آباکوس و با استفاده از روش عددی اجزای محدود، مدل سازی و ارزیابی شد. نتایج بدست آمده با مطالعه صورت گرفته توسط پژوهشگران دیگر مقایسه گردید که تطابق خوبی با یکدیگر داشته و نشان دهنده صحت مطالعه صورت گرفته است. با کاهش ۳۰ درصدی حجم بتن نسبت به حجم اولیه مقدار تنش و جابجایی در راستای عمودی به میزان ۳۴/۵ و ۳۷ درصد کاهش یافته است. در حالی که جابجایی در راستای افقی به علت افزایش انعطاف پذیری سد در مقابل نیروهای اعمالی تقریباً دو برابر شده است. از میان هفت طرح پیشنهادی، با توجه به قابلیت اجرایی، ساخت پذیری، زیبایی و کارایی سازه و بررسی های علمی، طرح هایی برگزیده شد؛ هرچند برخی از آنها از نظر اجرایی محدودیت هایی دارند. نتایج حاصل از شبیه سازی ها نشان داد که در شکل هندسی دارای ستون هایی با دیوارهای جانبی بدون شیب، بیشترین مقدار کاهش حجم سد نسبت به حجم اولیه (به میزان ۳۰ درصد) رخ داده است و به دلیل سهولت اجرا، این طرح می تواند گزینه مناسبی برای بهینه سازی سدهای بتنی غلتکی باشد. بنابراین کاهش حجم بدنه سد بتن غلتکی به میزان ۲۰ الی ۳۰ درصد حجم اولیه آن، ممکن و مطلوب بوده و از نظر مقاومت سد در برابر نیروهای وارده بدون اشکال است و مسلماً این کاهش حجم سد و مصالح مصرفی و حذف قالب بندی از نظر اقتصادی نیز در اجرای سد سودمند خواهد بود.

اجزای محدود،
سد بتن غلتکی،
کاهش حجم بتن،
مقطع بهینه

مقدمه

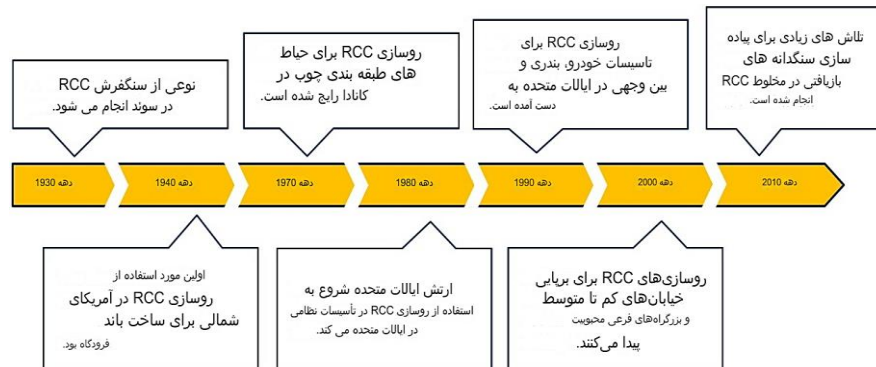
از دیرباز برای ذخیره، کنترل و مدیریت منابع آبی از سدها که مهم‌ترین سازه‌های هیدرولیکی هستند، استفاده شده است. با توجه به افزایش نیاز به منابع آب پایدار، سدها یکی از راهکارهای اساسی در مدیریت منابع آب مطرح شده‌اند. در حالی که ساخت و بهره‌برداری از سدها چالش‌های اقتصادی را به همراه دارد. در دنیای کنونی اقتصاد یکی از مسایل اصلی به شمار می‌آید، خسارات مالی که بعد از حوادث طبیعی چون زلزله به وجود می‌آید، ضربه شدیدی به اقتصاد محسوب می‌شود پس اگر بتوان از این خسارات کم کرد در واقع به اقتصاد کمک شده است. بنابراین باید بتوان با تجمیع رعایت اصول مهندسی و اقتصاد، یک سازه مستحکم با رعایت اصول مهندسی و با هزینه حداقل را طراحی نمود.

با گسترش دانش و شناخته شدن جنبه‌های بیشتری از رفتار سازه در مقابل نیروهای طبیعت، دیدگاه‌ها در مورد طراحی سازه‌ها تغییر کرده است. بدین معنی که دیگر تنها ایستادگی سازه کافی به نظر نمی‌رسد، بلکه باید سازه‌ای طراحی شود که هم مقاومت کافی برای ایستادگی را داشته و هم طراحی آن از لحاظ اقتصادی بهینه باشد. معمولاً بهینه بودن طراحی سازه یکی از اهداف عملکردی می‌باشد. بتن فشرده غلظتی^۱ به دلیل داشتن مقاومت زیاد و سرعت بالای اجرا، در سدسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. سرعت بالای ساخت و اجرای پروژه، دوام بالا در شرایط محیطی مختلف، مقاومت بالا در برابر نیروهای هیدرولیکی و لرزه‌ای، مصرف کم سیمان، امکان احداث سرریز و تونل‌های تحتانی در بدنه سد، کاهش درزهای اجرایی و نیاز کم به قالب‌بندی از مزایای استفاده از بتن غلظتی است (رمبابو و همکاران ۲۰۲۳، سالامون و هانسن ۲۰۱۸، کمیته ای سی آی، ۲۰۱۱). اگر از خواص بتن غلظتی و مزایای آن استفاده شود باید بتوان علاوه بر داشتن استحکام، یک سازه اقتصادی‌تر را با رعایت اصول مهندسی طراحی کرد. اصولاً اثر اقتصادی سازه هنگامی اهمیت بیشتری می‌یابد که سازه‌ها حجیم باشند و به ازای هر درصدی از کاهش

حجم، بار مالی و مدت زمان اجرا کاهش یابد. سدهای بتن غلظتی از نظر کارایی، مشابه سدهای بتن وزنی و از نظر مقطع، شبیه به سدهای خاکی با دو طرف شیب‌دار (با شیب کمتر) هستند. اهمیت این پژوهش از نظر اقتصاد پروژه که فاکتور مهم و تعیین‌کننده در سدسازی است بیشتر مد نظر قرار گرفته است. تاریخچه استفاده از بتن غلظتی در برابر بتن معمولی نشان از آن دارد که هزینه اجرای هر مترمکعب با بتن غلظتی به مراتب کمتر از بتن معمولی است بطور متوسط محدوده کاهش هزینه‌ها از ۲۵ تا ۵۰ درصد می‌باشد. این کاهش در هزینه‌ها بطور کلی به دلیل مصالح مصرفی، میزان سیمان مصرفی، سهولت و سادگی در روش اجرا می‌باشد. از دیگر دلایلی که باعث کاهش هزینه‌ها می‌گردد، کاهش زمان اجرای سازه‌های بتن غلظتی است. در شکل ۱، تاریخچه مربوط به بتن غلظتی فشرده آورده شده است. مصالح سیمانی، نوارهای آب‌بند، سنگدانه‌ها، آب و افزودنی‌های شیمیایی مصالح مصرفی در بتن غلظتی می‌باشند (هانسن ۲۰۱۷، کمیته ای سی آی، ۲۰۱۱، نشریه ۷۲۳، ۲۰۲۱). نمونه‌ای از سد بتن غلظتی اجرا شده در استان هرمزگان در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به خاستگاه و طیف انواع مختلف سدهای وزنی بتن غلظتی، دسته‌بندی‌ها غالباً بر اساس میزان مصرف مواد سیمانی در واحد حجم مصالح (بتن) بدنه سد بوده‌اند. البته باید توجه داشت عواملی نظیر هدف، طول عمر مفید، ارتفاع سد و نیز شرایط لرزه‌خیزی ساختگاه سد در دسته‌بندی و تنظیم مبانی طراحی سدهای وزنی بتن غلظتی تأثیرگذار هستند. یکی از ابزارهای پیشرفته برای تحلیل جامع و بررسی رفتار سازه‌ها تحت شرایط بارگذاری مختلف مدل‌سازی اجزای محدود (FEM^۲) است (حبيب و همکاران ۲۰۲۰، لامپروپولوس و دیریتسوس ۲۰۱۱). این روش امکان پیش‌بینی رفتار لرزه‌ای، حرارتی و سازه‌ای سدهای بتن غلظتی را مشروط بر تعریف شرایط مرزی دقیق فراهم می‌کند (غریب دوست ۲۰۱۹، چن و همکاران ۲۰۱۹، جیا و همکاران ۲۰۱۰). در جدول ۱، برخی مطالعات صورت گرفته

² Finite element method¹ Roller-Compacted concrete

مربوط به مدل سازی با روش اجزای محدود در سدهای بتن
غلطکی آورده شده است.



شکل ۱- تاریخچه بتن غلطکی فشرده (هرینگتون و همکاران ۲۰۱۰).



شکل ۲- سد جگین در استان هرمزگان.

جدول ۱- خلاصه ایی از مطالعات صورت گرفته در سدهای بتن غلطکی.

نویسنده	ابعاد	هدف مطالعه	ملاحظات
باواگوب ۲۰۱۹	دو بعدی	ارزیابی تناسب ساخت سدهای بتن غلطکی فشرده در مناطق خشک با در نظر گرفتن تأثیرگذارترین پارامترها، مانند دما.	استفاده از زمان بندی مناسب قرارگیری بتن غلطکی فشرده می تواند کاربرد سدهای بتن غلطکی فشرده را در مناطق خشک امکان پذیر سازد.
خان زایی و همکاران ۲۰۱۵	دو بعدی	بررسی پاسخ حرارتی و ساختاری سدهای بتن غلطکی فشرده در طول عمر مفید.	با افزایش دوره بهره برداری از سد، تنش های حرارتی در سد افزایش می یابد.
جیانگ و همکاران ۲۰۱۳	دو بعدی	برآورد توزیع دما در مکان های مختلف سدهای بتن غلطکی فشرده در حین ساخت.	تابش خورشیدی تأثیر زیادی بر تاریخچه دمایی گره های نواحی مرکزی و سطحی دارد و تأثیر کمتری بر اختلاف دمایی آنها نسبت به دمای ریزش دارد که تأثیر قابل توجهی دارد.

شمسایی و همکاران ۲۰۰۹	دو بعدی و سه بعدی	بررسی رفتار ترمو مکانیکی سد بتن غلتکی فشرده.	تنش تا حد زیادی تحت تأثیر فصل شروع و برنامه اجرایی است. حداکثر منطقه دما در اولین لایه بتن غلتکی فشرده وجود دارد.
کارتال ۲۰۱۲	سه بعدی	بررسی واکنش لرزه‌ای سدهای بتن غلتکی فشرده.	آنالیز مواد غیرخطی تنش‌های اصلی ایمن‌تری را در مقایسه با تحلیل خطی نشان داد. برآورد ضریب اصطکاک یک چالش است.
ژو و همکاران ۲۰۱۶	سه بعدی	معرفی رویکردی برای یافتن طرح مانیتور دمای بهینه سدهای بتن غلتکی فشرده با استفاده از روش المان محدود و رویکرد تحلیل حساسیت.	حداکثر دما و تنش کششی در سد به شدت تحت تأثیر دمای قرارگیری است (نمی‌تواند از ۱۵ درجه سانتیگراد تجاوز کند).
عبدالرزاق و همکاران ۲۰۱۴	سه بعدی	توسعه یک کد المان محدود سه بعدی برای تحلیل حرارتی و ساختاری سد قوسی بتن غلتکی فشرده.	تنش بالا در قسمت پایین و مرزهای تکیه‌گاه سد متمرکز است.
تبریزی و همکاران ۲۰۲۵	سه بعدی	بررسی رفتار هیدرولیکی سرریز سد نازلو شامل توزیع سرعت، فشار و شاخص کاویتاسیون تحت دبی مختلف	از نرم‌افزار فلو تری دی برای مدل‌سازی هندسه کامل سرریز شامل تاج اوجی، کانال همگرا، شوت با شیب تند و حوضچه آرامش استفاده شد.
دانشفراز و همکاران ۲۰۲۳	دو بعدی	حل عددی پدیده تراوش از زیر سد بتنی در حالت‌های پایا و گذرا	استفاده از روش RBF1 بدون شبکه و مقایسه با نتایج روش اجزای محدود که روش مورد استفاده دقت مناسبی در ترسیم خطوط هم‌پتانسیل و محاسبه هد هیدرولیکی با تعداد نقاط کم داشت.
روشنگر و همکاران ۲۰۲۳	دو بعدی	بررسی اثر سناریوهای ترکیبی کاهش نشست بر پایداری و عملکرد هیدرولیکی سد خاکی البرز در شرایط جریان پایا.	استفاده از روش اجزای محدود برای مدل‌سازی نشست و توزیع فشار آب منفذی در بدنه و پی سد

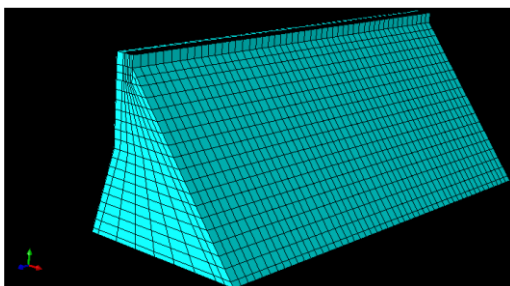
جامع برای بهینه‌سازی حجم بدنه سد با استفاده از تحلیل عددی وجود ندارد. بنابراین، اطلاعات بیشتری در مورد عملکرد این سدها با کاهش حجم آن‌ها در شکل‌های هندسی مختلف هنوز مورد نیاز است و باید به طور مفصل مورد بحث قرار گیرد تا نکاتی مانند امکان بیشینه مقدار کاهش حجم سدها بدون کاهش عملکرد مکانیکی و استراتژی‌های مختلف کاهش حجم برجسته شود. در این تحقیق، نرم‌افزار آباکوس^۲ ورد استفاده قرار گرفته است که نسبت به

مطالعات صورت گرفته در مورد مدل‌سازی عددی سدهای بتن غلتکی و بررسی رفتار مکانیکی آن‌ها محتوای غنی دارد و بررسی‌های جامعی در زمینه‌های مختلف این موضوع از جمله بررسی عملکرد حرارتی، عملکرد لرزه‌ای و غیره انجام گرفته است در حالی که تحلیل همزمان تغییرات هندسی و اثر آن بر مقاومت کلی سد کمتر بررسی شده است و همچنین صرفاً به شبیه‌سازی شرایط اجرایی یا ارزیابی عملکرد سد در بهره‌برداری پرداخته‌اند و تحقیقی

¹ Radial Basis Function Method

² Abaqus

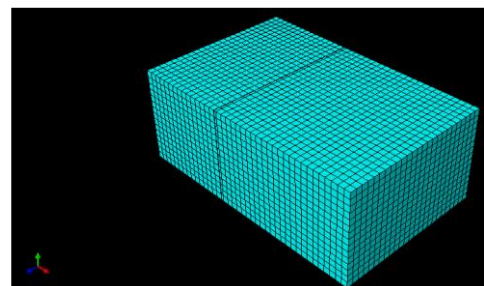
روش اجزای محدود، تکنیکی برای حل مسایل فیزیکی و مهندسی است که یک سازه یا دامنه پیوسته به اجزای کوچکتری به نام المان تقسیم می‌شوند. دامنه پیچیده هندسی مساله به صورت مجموعه‌ای از زیردامنه‌های ساده به نام اجزای محدود عرضه می‌شود. توابع تقریب برای هر جزء محدود با استفاده از نظریه ساده که هر تابع پیوسته را می‌توان به وسیله ترکیب خطی چندجمله‌ای‌های جبری بیان نمود، استخراج می‌شود. با کاهش ابعاد المان‌ها، تعداد آن‌ها افزایش یافته و دقت تحلیل بالا می‌رود. در حالی که افزایش بیش از حد معین تعداد المان‌ها، نه تنها هزینه محاسبات را بالا می‌برد بلکه بهبود قابل توجهی نیز در دقت حل پدیدار نخواهد شد. در روش اجزای محدود امکان استفاده از المان‌هایی با اندازه‌های مختلف وجود دارد، به طوری که در جاهایی با تغییرات سریع و ناگهانی در متغیرها، باید از المان‌های کوچکتر استفاده نمود و تغییر ناگهانی اندازه المان‌ها نباید رخ دهد. برای قسمت بتنی که بصورت حجمی مدل شده است، فاصله گره‌ها $0/1$ میلی‌متر در نظر گرفته شد که تعداد 20850 عدد المان سه‌بعدی هشت گرهی از نوع C3D8R ایجاد شد. برای قسمت خاک که بصورت حجمی مدل شده است، فاصله گره‌ها $0/2$ میلی‌متر در نظر گرفته شد که تعداد 15375 عدد المان سه‌بعدی هشت گرهی از نوع C3D8R ایجاد شد. شکل شماره ۳، شبکه‌بندی اجزای سد نشان داده شده است.



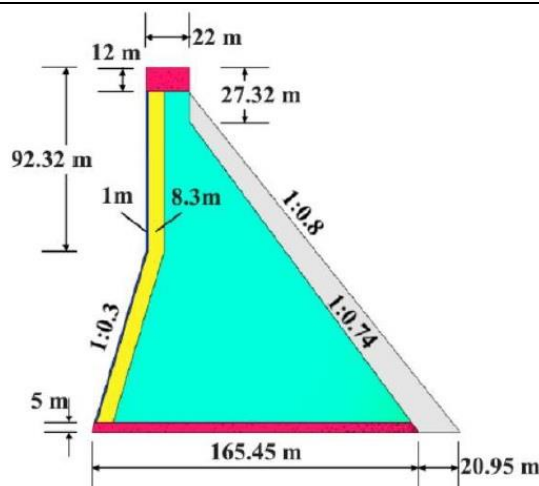
روش‌های سنتی طراحی، امکان بررسی دقیق‌تر توزیع تنش‌ها، تغییر مکان‌ها و نقاط بحرانی را فراهم می‌کند. برای نخستین بار، مقاطع مختلف سد با در نظر گرفتن تغییرات شیب دیواره‌ها و ستون‌های داخلی به صورت سیستماتیک ارزیابی و مقایسه شده‌اند. کاهش حجم سدها، از نظر اقتصادی صرفه‌جویی چشمگیری در مصالح و زمان ساخت دارد. چندین هندسه جدید ارزیابی شده‌اند و طرح بهینه بر اساس شاخص‌های فنی و اجرایی انتخاب گشته است. طرح ارائه شده علاوه بر جنبه‌های تحلیلی، امکان اجرای ساده‌تر سد و حذف قالب‌بندی را نیز در نظر گرفته و به کاربردی بودن نتایج برای مهندسان طراح کمک می‌کند.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش از نرم افزار آباکوس که یکی از قدرتمندترین نرم افزارهای تحلیل به روش اجزای محدود است استفاده شده است. این نرم‌افزار قادر به شبیه‌سازی رفتار سازه‌ها تحت بارهای مختلف و حل مسایل پیچیده از طریق تحلیل استاتیکی، دینامیکی، حرارتی و تغییر شکل‌های بزرگ می‌باشد. شبیه‌سازی‌ها در نسخه اصلاحی سوم نسخه 2019 نرم‌افزار آباکوس انجام گرفته است. مبانی روش المان محدود در این پژوهش ضمنی بوده و از روابط هیدرودینامیکی و هیدرولیکی بر اساس آیین نامه کشور هند در این نرم‌افزار استفاده شده است.



شکل ۳- شبکه‌بندی اجزای سد: الف) اجزای بدنه سد مدل ب) اجزای خاستگاه سد



شکل ۴- سد بتن غلتکی مورد بررسی در مقاله ژانگ و همکاران (۲۰۱۹).

گردید. سپس با استناد به نتایج تحلیل بهینه‌سازی حجمی به عنوان ایده و فرضیه اولیه، مدل‌هایی با هندسه‌های ایده-آل و عملی از منظر اجرایی طراحی شد. پس از انتخاب شبکه‌بندی مناسب مدل و تعیین سایر پارامترهای مورد نیاز، مدل عددی سازه مورد بررسی در این مطالعه (برگرفته از مطالعه ژانگ و همکاران (۲۰۱۹)، ایجاد و شبیه‌سازی‌های مورد نظر اجرا شد.

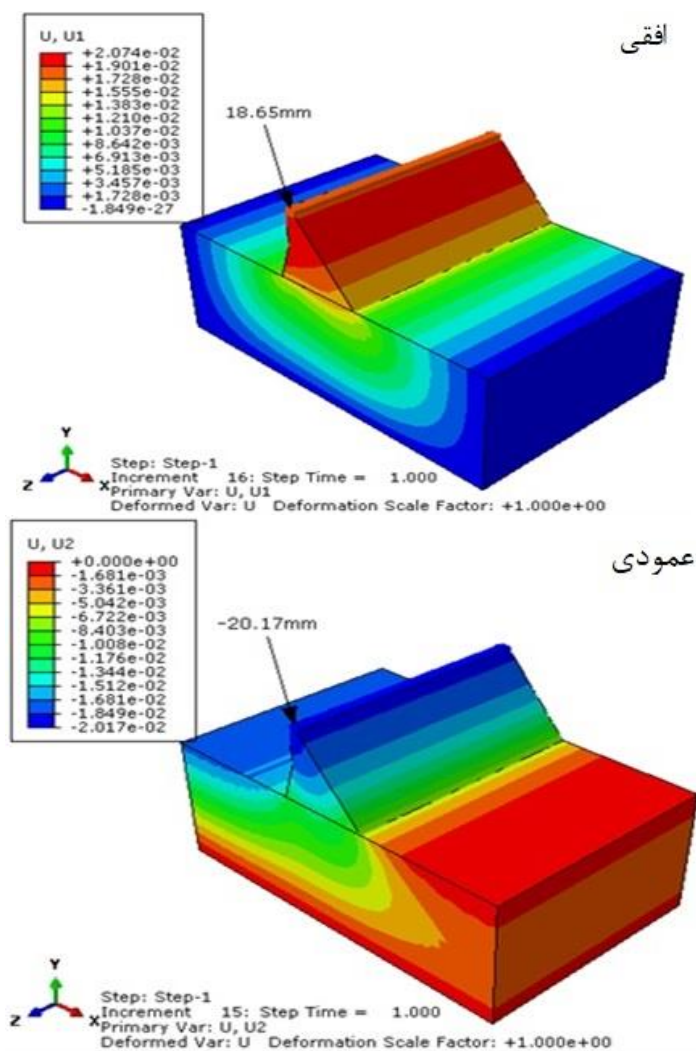
صحت‌سنجی مدل عددی

نتایج شبیه‌سازی شده در این مطالعه، با نتایج بدست آمده از مطالعه ژانگ و همکاران (۲۰۱۹) برای جابجایی تاج سد در راستای افقی و عمودی مقایسه شد. نوع بارگذاری در این پژوهش، مشابه بارگذاری انجام شده با مدل ژانگ و همکاران (۲۰۱۹) می‌باشد. نتایج مربوط به جابجایی‌ها در شکل ۵ آورده شده است. با توجه به شکل، جابجایی افقی و عمودی تاج سد به ترتیب برابر با ۱۸/۶۴۸ و ۲۰/۱۷ میلی‌متر بدست آمد که دارای بیشینه خطای ۳/۱ درصد و ۱/۲۳ درصد در مقایسه با مطالعه ژانگ و همکاران (۲۰۱۹) است. نتایج حاصل مطابقت بسیار خوبی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های مقاله ژانگ و همکاران (۲۰۱۹) را دارد که نشان از صحت روش‌های انتخاب شده و مواد اعمالی در شبیه‌سازی‌های انجام یافته دارد.

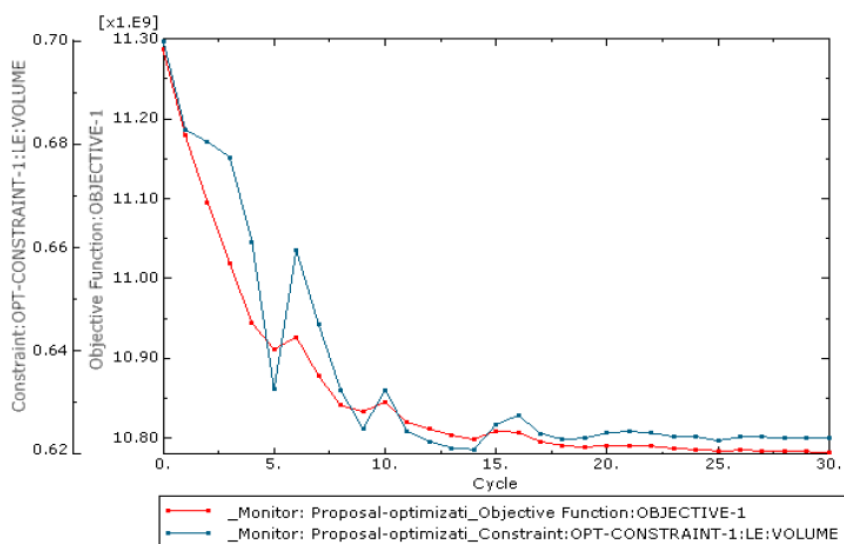
در این پژوهش، به منظور اعتبارسنجی فرآیند شبیه‌سازی اجزای محدود و ادامه تحقیقات در زمینه بررسی تغییرات ساختاری و مدلی سد بتن غلتکی، مقاله ژانگ و همکاران (۲۰۱۹) به عنوان مرجع انتخاب شد. با توجه به اینکه در این مطالعه از روش استاتیکی استفاده شده است، روش تحلیل استاتیک عمومی نیز به عنوان رویکرد تحلیلی برای شبیه‌سازی‌های اجزای محدود در این پژوهش در نظر گرفته شده است. بتن مورد استفاده در مطالعه ژانگ و همکاران (۲۰۱۹) شامل سیمان پرتلند، خاکستر بادی، سنگدانه‌های شکسته ریز و درشت با دانه‌بندی پیوسته، آب و کندگیرکننده است. خواص مکانیکی گزارش شده در این مطالعه شامل مقاومت فشاری ۲۸ روزه حدود ۲۵ تا ۳۰ مگاپاسکال، مدول الاستیسیته ۲۵ تا ۳۰ گیگاپاسکال و چگالی بتن حدود ۲۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب است. با توجه به شکل ۴، مدل‌سازی باید سه‌بعدی صورت گیرد و استفاده از مدل‌های تقارن محوری و دوبعدی امکان‌پذیر نمی‌باشد.

نتایج و بحث

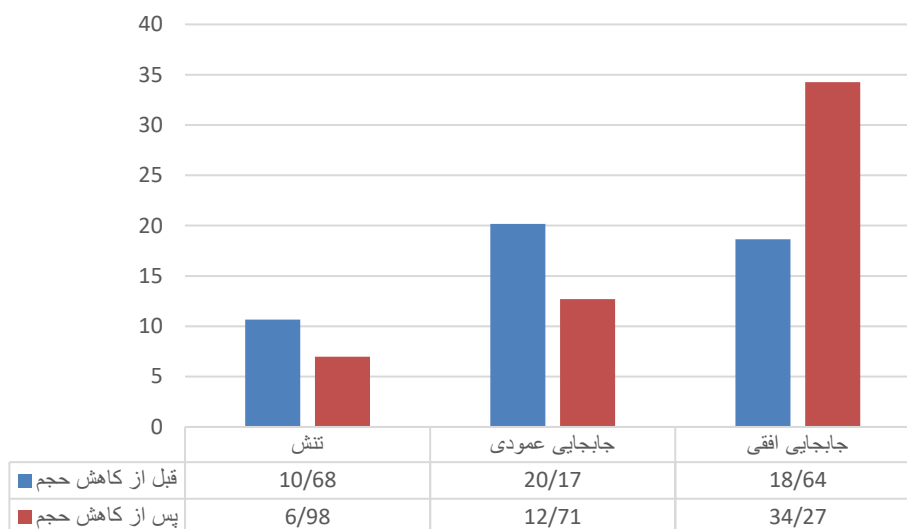
ابتدا با بهره‌گیری از ابزار بهینه‌سازی توپولوژی در نرم‌افزار آباکوس، بهینه‌سازی حجمی (کاهش ۲۰ درصدی حجم بدون کاهش مقاومت) سد اعتبارسنجی شده انجام شد. در این مرحله، ۲۰ درصد به عنوان حد مجاز انتخاب شد که طبق محدودیت‌های اجرایی، کاهش حجم بیشتر از این مقدار ممکن است به کاهش قابل توجه مقاومت یا افزایش پیچیدگی ساخت منجر شود و این حد از تحلیل نرم‌افزاری استخراج



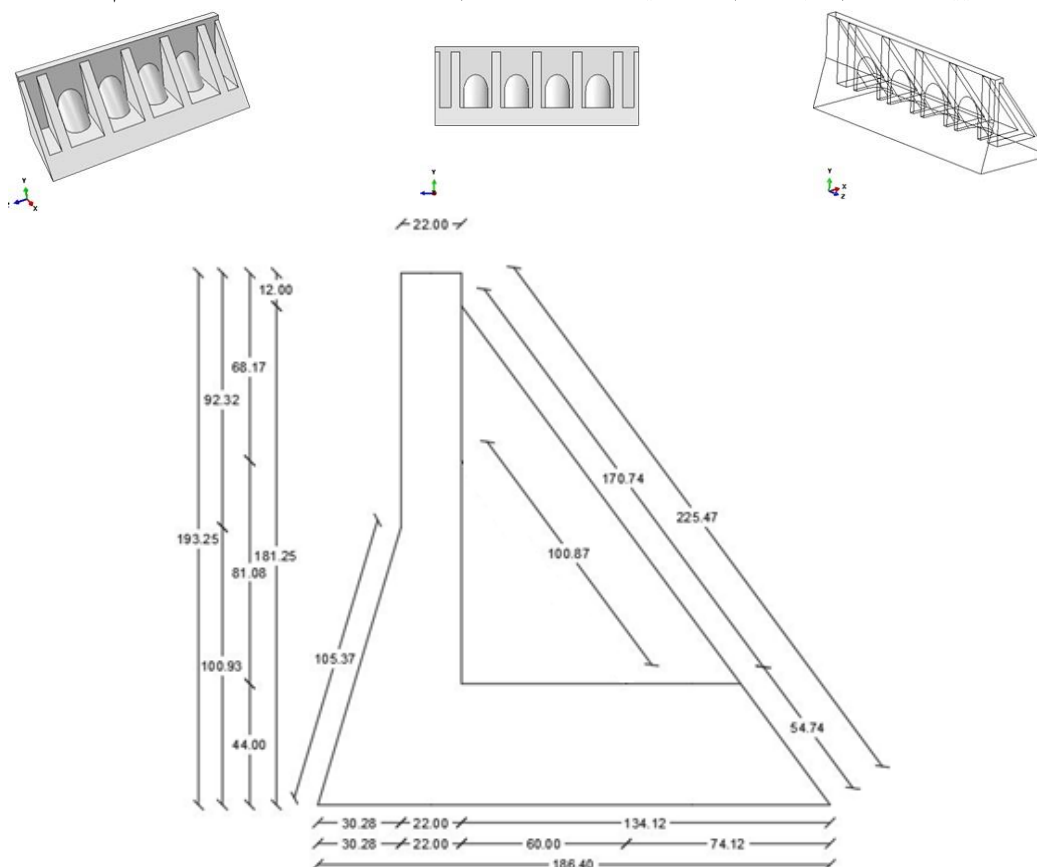
شکل ۵- جابجایی افقی و عمودی بدست آمده در تحلیل اعتبارسنجی.



شکل ۶- مقادیر درصد حجمی و انرژی کرنشی در چرخه های مختلف تحلیل بهینه سازی.



شکل ۷- تغییرات تنش (مگاپاسکال)، جابجایی افقی و عمودی (میلی‌متر) قبل و بعد از کاهش حجم ۳۰ درصدی.



شکل ۸- هندسه و مقطع اندازه‌گیری طرح شماره یک.

گرفته شد. در بهینه‌سازی هدف کاهش حجم با حداقل تغییر در رفتار سازه‌ای است. انرژی کرنشی بیانگر میزان انرژی ذخیره‌شده در ماده به دلیل تغییر شکل الاستیک تحت

بهینه‌سازی مدل عددی

جهت تحلیل بهینه‌سازی، پارامتر حجم به عنوان تابع هدف و پارامتر انرژی کرنشی به عنوان تابع کنترل در نظر

مقابل نیروهای اعمالی می‌باشد و نشان از کاهش مقاومتی سد نیست. این تغییرات در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به نتایج حاصل که نشان از بهینه‌سازی ۳۰ درصدی حجم سد بدون کاهش مقاومت آن بود اقدام به طراحی چند مدل مختلف بر مبنای طرح بهینه‌سازی شده توسط نرم‌افزار آباکوس شد. این طرح‌ها با معیار قابلیت اجرایی و ساخت‌پذیری، زیبایی و کارایی سازه و بررسی‌های علمی علیرغم عدم قابلیت اجرایی آن‌ها انتخاب شده‌اند.

طراحی دقیق برای بهینه‌سازی حجم سد

طراحی‌های مختلف با ایده‌های برگرفته از مدل بهینه‌سازی شده توسط نرم‌افزار آباکوس و اعمال شرایط ساخت و زیبایی سازه‌ای سد ارایه گردیده است. شکل ۸، هندسه طرح شماره ۱ را نشان می‌دهد. مدل شماره ۱، به دلیل استفاده از ستون‌های استوانه‌ای شکل مایل، نزدیک ترین طراحی را به مدل بهینه‌سازی شده آباکوس دارد. حجم این مدل برابر با ۶,۸۷۴,۶۴۸ متر مکعب است که در مقابل حجم اولیه سد مورد استفاده در مقاله ژانگ و همکاران (۲۰۱۹) که برابر با ۸,۵۱۱,۴۳۱ است کاهش تقریبی برابر با ۱۹/۲۳ درصدی را دارد. این مدل دارای صعوبت اجرا به دلیل شکل خاص منحنی است که با پیشرفت‌های رشته عمران و تکنیک‌های ساخت‌وساز دور از دسترس و غیرقابل اجرا نیست.

شکل ۹، مقطع اندازه‌گیری شده و هندسه طرح شماره ۲ را نشان می‌دهد. مدل شماره ۲، به سبب بهره‌گیری از ستون‌هایی با دیواره‌های جانبی شیب‌دار، از نظر ظاهری دارای ساختاری مدرن و دل‌انگیز است. حجم این مدل برابر با ۷,۰۰۰,۷۰۰ مترمکعب است که در مقایسه با حجم اولیه سد در پژوهش ژانگ و همکاران (۲۰۱۹) به میزان ۸,۵۱۱,۴۳۱ مترمکعب، کاهش تقریبی ۱۷/۷۵ درصدی را نشان می‌دهد.

شکل ۱۰، مقطع اندازه‌گیری شده و هندسه طرح شماره ۳ را نشان می‌دهد. مدل شماره ۳، به دلیل استفاده از

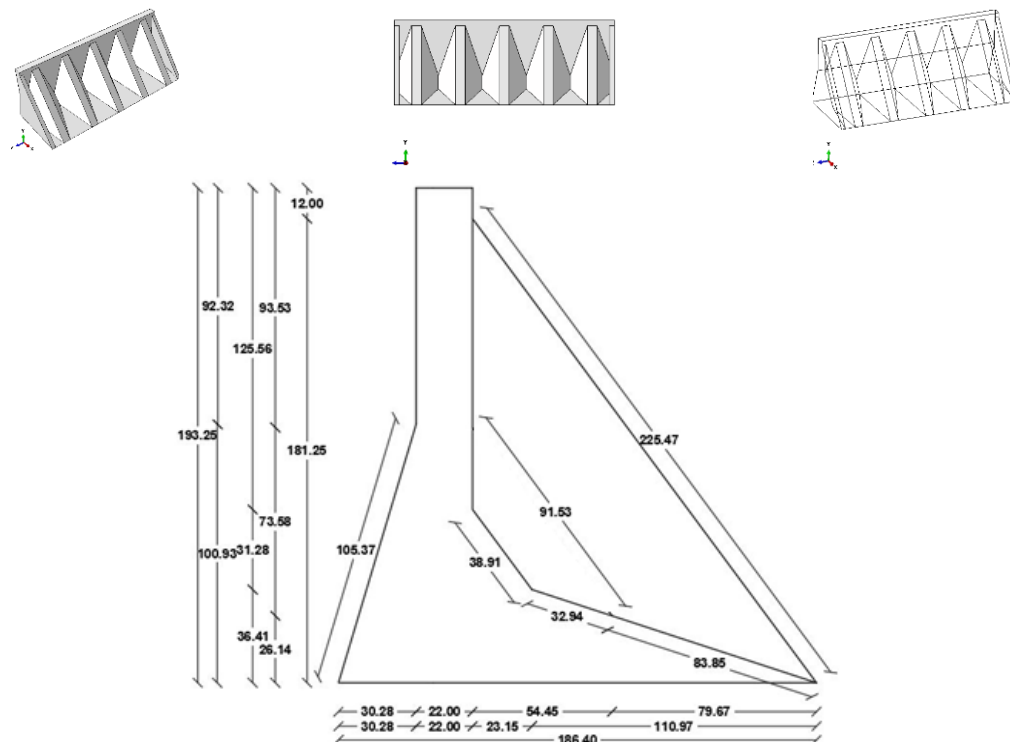
بارگذاری است و ارتباط مستقیم با سختی دارد. با کاهش حجم سازه میزان تغییر شکل تحت بارگذاری افزایش یافته و انرژی کرنشی افزایش می‌یابد. اگر کاهش حجم موجب افزایش چشمگیر انرژی کرنشی شود، طرح بیش از حد سبک شده و مقاومت کاهش می‌یابد. ۳۰ چرخه تکرار جهت انجام تحلیل بهینه‌سازی در نظر گرفته شد. با افزایش تعداد چرخه، مقادیر تغییر حجمی در هر چرخه کمتر شده ولی در مقابل دقت آن بالا می‌رود. در شکل شماره ۶، مقادیر درصد حجمی و انرژی کرنشی کل در چرخه‌های مختلف نشان داده شده است. با توجه به شکل ۶، تا چرخه ۱۸ همگرایی رخ نداده است ولی پس از چرخه ۲۰، همگرایی به شیب صفر رخ داده است و تغییرات حجم و انرژی کرنشی تقریباً ثابت مانده است که نشان‌دهنده تعداد مناسب چرخه در تحلیل بهینه‌سازی است. بررسی‌های اولیه نشان داد که پس از حدود ۳۰ چرخه، تغییرات قابل توجهی در حجم و انرژی کرنشی مشاهده نمی‌شود، بنابراین انجام چرخه‌های بیشتر اثر محسوسی نخواهد داشت. در این پژوهش، کاهش حدود ۳۰ درصدی حجم بدون افزایش قابل توجه انرژی کرنشی، نشان‌دهنده حفظ سختی و ایمنی سد پس از بهینه‌سازی است.

بعد از انجام تحلیل بهینه‌سازی و کاهش تقریباً ۳۰ درصدی حجم مدل توسط نرم‌افزار، در همان شرایط بارگذاری اعمال شده، مقدار بیشینه تنش از ۱۰/۶۸ (قبل از کاهش حجم) به ۶/۹۸ مگاپاسکال (پس از کاهش حجم) کاهش یافته است، که نشان‌دهنده کاهش ۳۴/۵ درصدی است. بیشینه جابجایی تاج سد در راستای عمودی قبل از اعمال کاهش حجم و پس از تغییرات به ترتیب برابر با ۲۰/۱۷ و ۱۲/۷۱ میلی‌متر است که نشان‌دهنده کاهش بیشینه جابجایی عمودی است. در حالی که بیشینه جابجایی تاج سد در راستای افقی تقریباً دو برابر شده است و از ۱۸/۶۴ به ۳۴/۲۷ میلی‌متر رسیده است ولی باید توجه داشت که بدلیل عدم افزایش تنش‌های بوجود آمده در سد، این افزایش جابجایی ناشی از افزایش انعطاف‌پذیری سد در

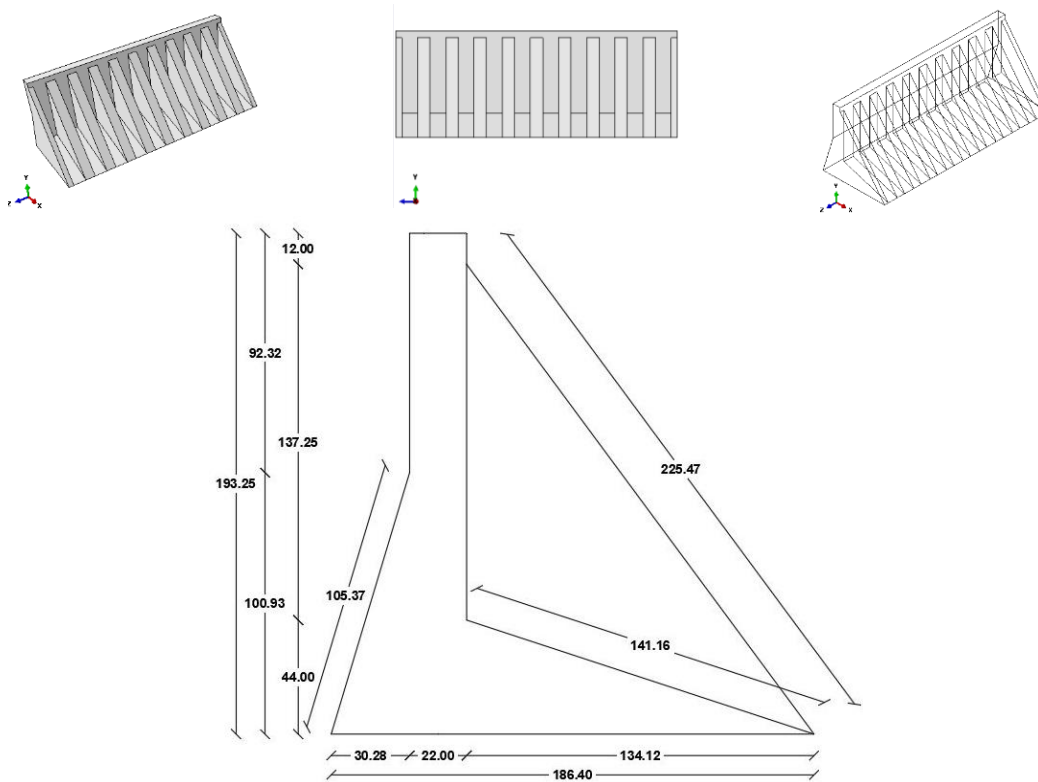
بود با ۸,۵۱۱,۴۳۱، کاهش تقریبی برابر با ۳۰/۶۱ درصدی را دارد که درمیان هر چهار مدل معرفی شده دارای کمترین مقدار حجمی می‌باشد. مقطع اندازه‌گیری شده و هندسه طرح شماره ۵، در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. این مدل با استفاده از ایده لانه زنبوری، بصورت پی‌های شش ضلعی چسبیده بهم و با دیواره‌های جانبی شیبدار طراحی شده است. حجم این مدل برابر با ۶,۱۷۸,۴۵۳ مترمکعب است که در مقابل حجم اولیه سد مورد استفاده در مقاله ژانگ و همکاران (۲۰۱۹) که برابر با ۸,۵۱۱,۴۳۱، کاهش تقریبی برابر با ۲۷/۴۰ درصدی را دارد. مقاطع این طرح به دلیل قرار گرفتن اعضای رو به داخل در قسمت فرورفتگی بالادست سد و فشار آب به نواحی مذکور به کشش افتاده و صرفاً جنبه تحقیقاتی داشته و قابلیت اجرا ندارد.

ستون‌هایی با دیواره‌های جانبی بدون شیب و همچنین شکل ساده، قابلیت اجرایی آسانی را دارد. حجم این مدل برابر با ۶,۳۸۹,۸۶۰ مترمکعب است که در مقابل حجم اولیه سد مورد استفاده در مقاله ژانگ و همکاران (۲۰۱۹) که برابر بود با ۸,۵۱۱,۴۳۱، کاهش تقریبی برابر با ۲۴/۹۲ درصدی را دارد.

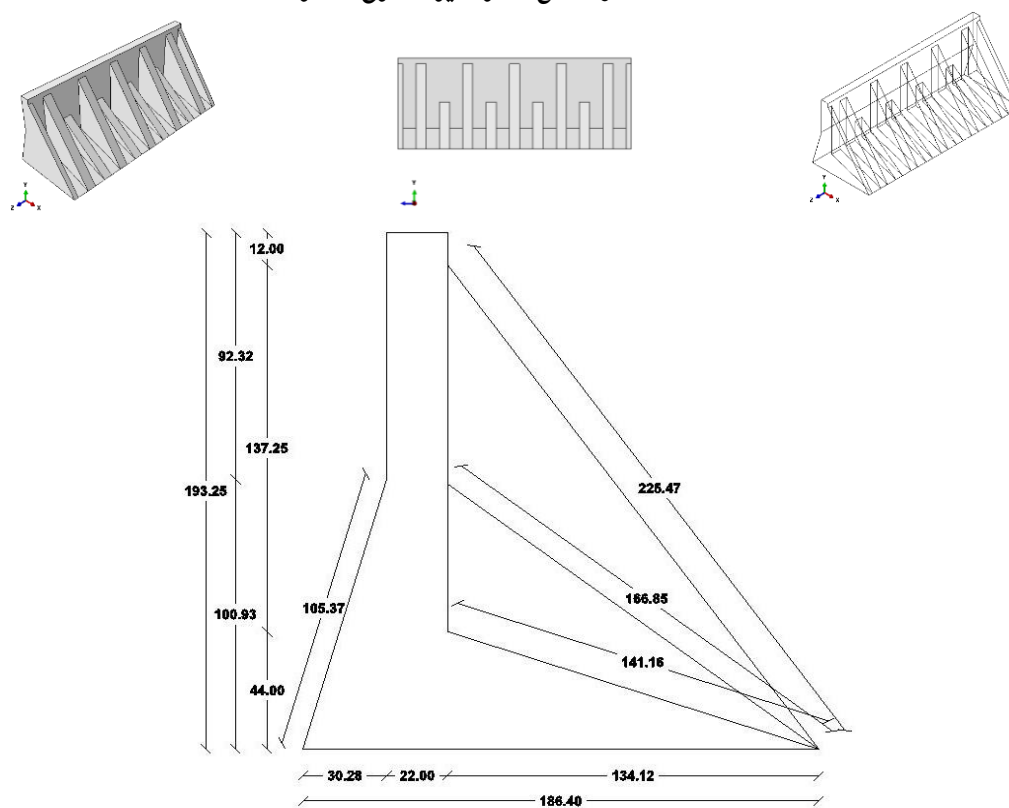
مقطع اندازه‌گیری شده و هندسه طرح شماره ۴، در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. این مدل همانند مدل شماره ۳، به دلیل استفاده از ستون‌هایی با دیواره‌های جانبی بدون شیب و همچنین شکل ساده، قابلیت اجرایی آسانی را دارد که علاوه بر آن با بلند و کوتاه کردن یک در میان ستون‌ها ظاهری مدرن به خود گرفته‌است. حجم این مدل برابر با ۵,۹۰۵,۹۱۱ مترمکعب است که در مقابل حجم اولیه سد مورد استفاده در مقاله ژانگ و همکاران (۲۰۱۹) که برابر



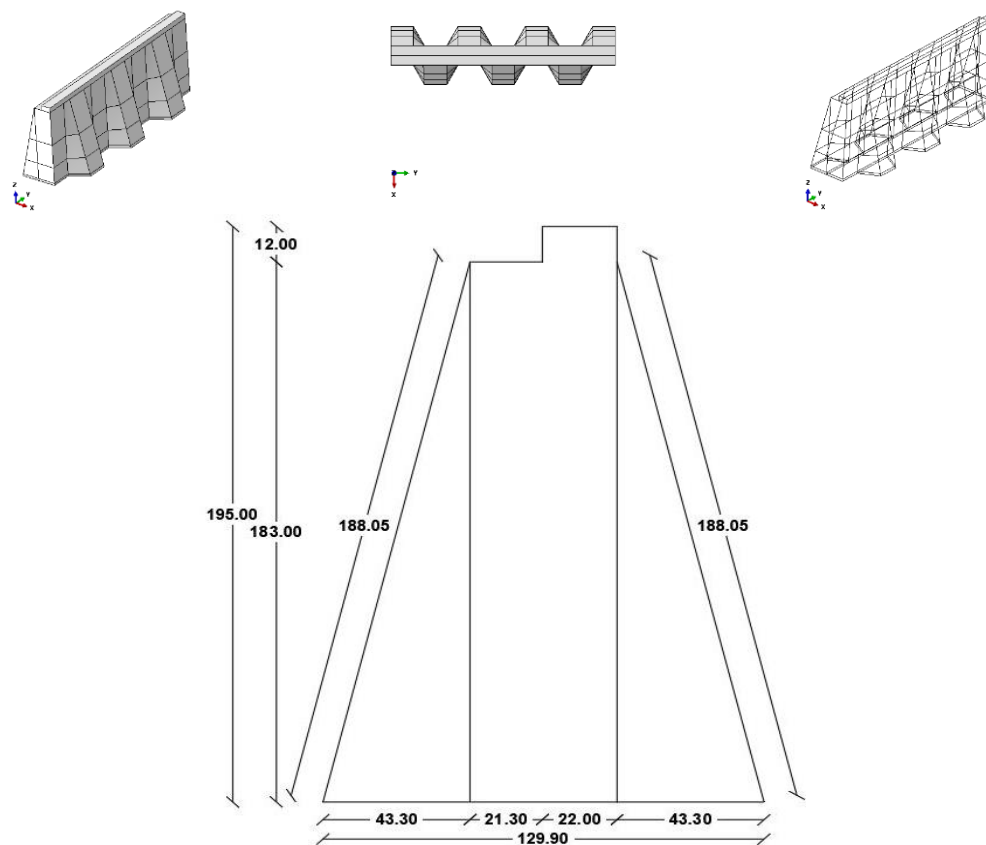
شکل ۹- هندسه و مقطع اندازه‌گیری طرح شماره ۲.



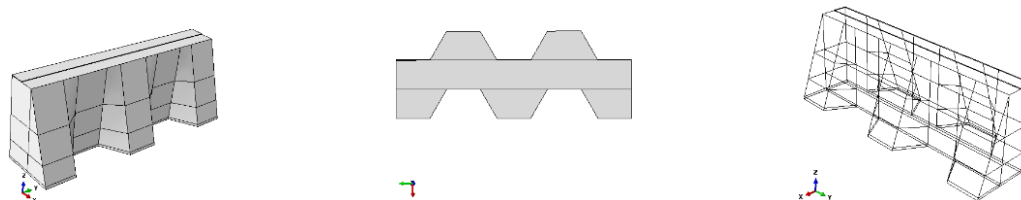
شکل ۱۰- هندسه و مقطع اندازه گیری طرح شماره سه.

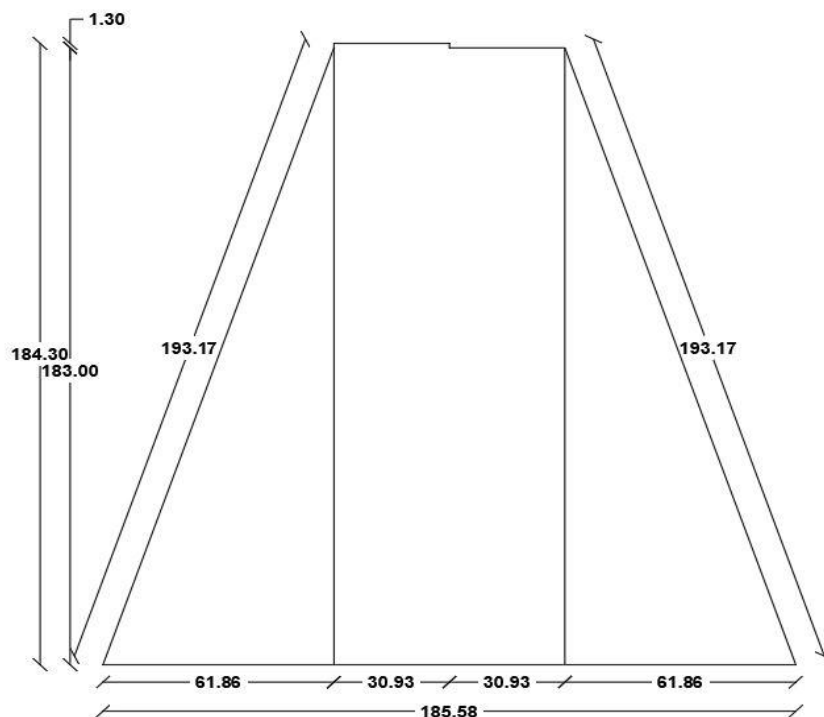


شکل ۱۱- هندسه و مقطع اندازه گیری طرح شماره ۴.

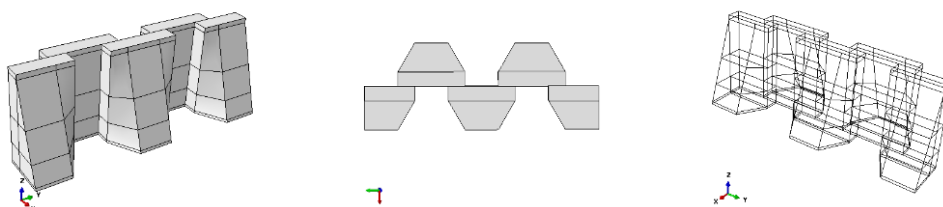


شکل ۱۲- هندسه و مقطع اندازه‌گیری طرح شماره ۵.





شکل ۱۳- هندسه و مقطع اندازه گیری طرح شماره شش.



شکل ۱۴- هندسه و مقطع اندازه گیری طرح شماره هفت.

جدول ۲- مشخصات طرح های ارائه شده.

شماره طرح	نوع هندسه	حجم سد (m^3)	کاهش نسبت به حجم اولیه (%)	توضیح عملکرد و ویژگی خاص
۱	ستون های استوانه ای مایل	۶,۸۷۴,۶۴۸	۱۹.۲۳	نزدیک به مدل بهینه Abaqus و جنبه تحقیقاتی
۲	ستون های با دیواره جانبی شیب دار	۷,۰۰۰,۷۰۰	۱۷.۷۵	ظاهر مدرن و چشم نواز
۳	ستون های با دیواره جانبی صاف	۶,۳۸۹,۸۶۰	۲۴.۹۲	ساده و اجرایی
۴	ستون های صاف و بلند/کوتاه متناوب	۵,۹۰۵,۹۱۱	۳۰.۶۱	بیشترین کاهش حجم، مدرن و اجرایی
۵	ایده لانه زنبوری با دیواره	۶,۱۷۸,۴۵۳	۲۷.۴۰	فشار آب به اعضای

شیبدار	داخلي، صرفا
تحقیقاتی	تحقیقاتی
۶	حجم تقریباً برابر با مدل ژانگ و همکاران (۲۰۱۹)، ساده و اجرایی
ایده لانه زنبوری با مقطع نشیمن گاه بزرگ	۸,۵۶۲,۱۸۷
۷	کاهش حجم مدل ۶ با دیواره شیبدار
۶,۷۳۳,۵۷۰	۲۰.۸۹
ساده، زیبا و اجرایی	

نتیجه‌گیری

سدها، سازه‌های مهندسی هستند که از گذشته تا کنون به منظور اهداف گوناگون همچون ذخیره و تنظیم جریان آب رودخانه‌ها احداث شده‌اند. طراحی این سازه‌ها به دلیل ماهیت پیچیده نیروهای وارد بر آن‌ها، نیازمند تحلیل‌های دقیق مهندسی است. امروزه سدهای بتن غلتکی به علت سهولت اجرا و مقاومت همانند سدهای بتنی مورد توجه مهندسين قرار گرفته است. این نوع سدها به علت کاهش هزینه‌های اجرایی که مستلزم طراحی بهینه در شکل هندسی مقطع سد با حفظ شرایط و الزامات ایمنی است، اقتصادی‌تر از سدهای بتنی هستند. در این پژوهش طرح‌های مختلف سد بتن غلتکی با تاکید بر کاهش حجم بتن، توسط نرم‌افزار آباکوس با روش اجزای محدود شبیه‌سازی و تحلیل گردیده است.

نتایج به‌دست آمده از مطالعه را می‌توان به صورت زیر جمع‌بندی کرد:

- نتایج اعتبارسنجی مدل عددی توسعه‌یافته در این پژوهش نشان داد که شبیه‌سازی رفتار سد بتن غلتکی در نرم‌افزار Abaqus با استفاده از روش اجزای محدود، با داده‌های مرجع همخوانی مناسبی دارد. این موضوع کارآمدی مدل عددی ارائه‌شده در این تحقیق را برای تحلیل و بهینه‌سازی مقاطع سدهای بتن غلتکی تأیید می‌کند.

شکل ۱۳، هندسه طرح شماره ۶ را نشان می‌دهد. مدل شماره ۶ نیز با استفاده از ایده لانه‌زنبوری، به صورت پی‌های شش‌ضلعی چسبیده بهم و با مقطع نشیمن‌گاه بزرگ‌تری نسبت به مدل قبلی با دیواره‌های جانبی شیبدار با زاویه ۱۹ درجه طراحی شده است. و همچنین شکل ساده و قابلیت اجرایی آسانی را دارد. حجم این مدل برابر با ۸,۵۶۲,۱۸۷ متر مکعب است که تقریباً برابر با مدل مقاله ژانگ و همکاران (۲۰۱۹)، ۸,۵۱۱,۴۳۱ متر مکعب، است.

شکل ۱۴، هندسه طرح شماره ۷ را نشان می‌دهد. مدل شماره ۷ نیز با استفاده از ایده لانه زنبوری و جهت کاهش حجم بتن مورد استفاده در مدل ۶ و با دیواره‌های جانبی شیبدار با زاویه ۱۹ درجه طراحی شده است. این مدل علاوه بر زیبایی، مانند مدل‌های ۵ و ۶ شکل ساده و قابلیت اجرایی آسانی را دارد. حجم این مدل برابر با ۶,۷۳۳,۵۷۰ متر مکعب است که در مقابل حجم اولیه سد مورد استفاده در مقاله ژانگ و همکاران (۲۰۱۹) که برابر بود با ۸,۵۱۱,۴۳۱ متر مکعب، کاهش تقریبی برابر با ۲۰/۸۹ درصدی را دارد.

در جدول ۲، خلاصه‌ای از مشخصات ۷ طرح پیشنهادی را نشان می‌دهد. این طرح‌ها با معیار قابلیت اجرایی و ساخت‌پذیری، زیبایی و کارایی سازه و بررسی‌های علمی برگزیده شدند؛ هرچند برخی از آن‌ها از نظر اجرایی محدودیت‌هایی دارند. نتایج بدست آمده از این مطالعه با مطالعه صورت گرفته توسط ژانگ و همکاران (۲۰۱۹)، بر روی سد بتن غلتکی مقایسه شده‌اند.

متناوب می‌باشد. ۴ طرح از ۷ طرح قابلیت اجرایی داشته و ۳ طرح صرفاً جنبه تحقیقاتی دارند.

- شکل هندسی دارای ستون‌هایی با دیواره‌های جانبی بدون شیب به صورت کوتاه و بلند متناوب، گزینه ایده‌آلی در جهت بهینه‌سازی طراحی سدهای بتن غلتکی در نظر گرفته شد زیرا بیشترین مقدار کاهش حجم سد نسبت به حجم اولیه و نتایج قابل قبول را دارا می‌باشد.

- یافته‌ها حاکی از آن است که مطالعات انجام شده می‌تواند به مهندسان و تصمیم‌گیرندگان در طراحی و ساخت سدها یاری رساند تا تصمیمات بهینه‌تری در مورد شکل هندسی مقطع سدها و کاهش حجم بدنه آن‌ها اتخاذ کنند. این اقدامات به بهبود کارایی، معماری، ایمنی سدها و همچنین بهبود اقتصادی طرح‌ها منجر خواهد شد. در ادامه این تحقیق، انجام مطالعات تکمیلی در چند محور می‌تواند به توسعه و ارتقای دانش در زمینه طراحی و بهینه‌سازی سدهای بتن غلتکی کمک کند. نخست، بررسی جامع اثرات تغییرات هندسی بر رفتار لرزه‌ای و دینامیکی سدهای بتن غلتکی می‌تواند نگرش دقیق‌تری نسبت به عملکرد این سازه‌ها در شرایط زلزله ارائه دهد. دوم، گسترش مدل‌سازی به سدهایی با ارتفاع‌های مختلف و شرایط اقلیمی گوناگون قابلیت تعمیم نتایج را افزایش خواهد داد.

- جابجایی تاج سد در جهت عمودی و افقی قبل از کاهش حجم بتن به ترتیب برابر با ۲۰/۱۷ و ۱۸/۶۴ میلی‌متر است که پس از کاهش ۳۰ درصدی حجم بتن این مقادیر به ترتیب برابر با ۱۲/۷۱ و ۳۴/۲۷ میلی‌متر شده است که نشان از کاهش جابجایی در جهت عمودی و افزایش در جهت افقی است. این افزایش جابجایی در جهت افقی ناشی از افزایش انعطاف‌پذیری سد در مقابل نیروهای اعمالی می‌باشد.

- ارزیابی نتایج به دست آمده در بررسی رفتار مکانیکی شکل‌های هندسی مختلف نسبت به طرح ابتدایی سد بتن غلتکی نشان داد که علیرغم این‌که کاهش وزن سدها می‌تواند به‌طور چشمگیری در کاهش میزان نشست آن‌ها در بلندمدت مؤثر باشد، سدهای بتن غلتکی قابلیت کاهش حجم بدون تغییر مواد مورد استفاده را تا ۳۰ درصد در بهینه‌ترین حالت ممکن دارند، و این کاهش حجم، تأثیری معنی‌دار در مقاومت آن‌ها ندارد.

- بیشترین و کم‌ترین مقدار کاهش حجم برای ۷ طرح مطرح شده به ترتیب مربوط به طرح لانه زنبوری با مقطع نشیمن‌گاه بزرگ و طرح با دارای ستون‌هایی با دیواره‌های جانبی بدون شیب به صورت کوتاه و بلند

منابع مورد استفاده

- Abdulrazeg AA, Noorzaei J, Jaafar MS, Khanezhazi P, and Mohamed TA, 2014. Thermal and structural analysis of RCC double-curvature arch dam, *Journal of Civil Engineering and Management*, 20(3), 434-445, [doi:10.3846/13923730.2013.801897](https://doi.org/10.3846/13923730.2013.801897).
- American Concrete Institute (ACI) Committee 207, 2011. Report on Roller-Compacted Mass Concrete (ACI 207.5R-11). ISBN 978-0-87031-277-9.
- Bayagoob KH, 2008. Thermal and Structural Analysis of RCC Dams. Ph.D. Thesis. University Putra Malaysia.
- Chen H, and Liu Z, 2019. Temperature control and thermal-induced stress field analysis of GongGuoQiao RCC dam. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 135(4), 2019-2029, [doi:10.1007/s10973-018-7450-1](https://doi.org/10.1007/s10973-018-7450-1).
- Daneshfaraz R, Sadeghfam S, Adami R, and Abbaszadeh H, 2023. Numerical Analysis of Seepage in Steady and Transient Flow State by the Radial Basis Function Method. *Numerical Methods in Civil Engineering*, 8-1, 58-68, [doi:10.61186/NMCE.2023.561](https://doi.org/10.61186/NMCE.2023.561).
- Gharibdoust A, Aldemir A, and Binici B, 2019. Seismic behaviour of roller compacted concrete dams under different base treatments. *Structure and Infrastructure Engineering*, 1-12, [doi:10.1080/15732479.2019.1661500](https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1661500).
- Habib A, Yildirim U, and Eren O, 2020. Column repair and strengthening using RC jacketing: a brief state-

- of-the-art review. *Innovative Infrastructure Solutions*, 5(3), 75, [doi: 10.1007/s41062-020-00329-4](https://doi.org/10.1007/s41062-020-00329-4).
- Harrington D, Abdo F, Adaska W, Hazaree CV, Ceylan H, and Bektas F, 2010. Guide for roller-compacted concrete pavements. National Concrete Pavement Technology Center.
- Jia C, Shao A, Li Y, and Ren Q, 2010. Analyses of thermal stress field of high concrete dams during the process of construction. In 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Chengdu, PEOPLES R CHINA, [doi:10.1109/APPEEC.2010.5449456](https://doi.org/10.1109/APPEEC.2010.5449456).
- Jiang S, Zhan SL, and Xiao N, 2013. Influence of casting temperature and solar radiation on the thermal field in roller compacted concrete during construction. *Applied Mechanics and Materials*, 405-408, 2550-2554.
- Kartal ME, 2012. Three-dimensional earthquake analysis of roller-compacted concrete dams. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(7), 2369-2388, [doi:10.5194/nhess-12-2369-2012](https://doi.org/10.5194/nhess-12-2369-2012).
- Khanzaei P, Abdulrazeg AA, Samali B, and Ghaedi K, 2015. Thermal and structural response of RCC dams during their service life. *Journal of Thermal Stresses*, 38(6), 591-609, [doi:10.1080/01495739.2015.1015862](https://doi.org/10.1080/01495739.2015.1015862).
- Lampropoulos AP, and Dritsos SE, 2011. Concrete shrinkage effect on the behavior of RC columns under monotonic and cyclic loading. *Construction and Building Materials*, 25(4), 1596-1602, [doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.10.001](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.10.001).
- Rambabu D, Sharma SH, and Akbar MA, 2023. Evaluation of roller compacted concrete for its application as high traffic resisting pavements with fatigue analysis, *Construction and Building Materials*, Volume 401, 132977, ISSN 0950-0618, [doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132977](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132977).
- Roushangar K, Aboueshagh F, and Abbaszadeh H, 2023. Numerical investigation of the influence of the combined seepage reduction scenarios on the hydraulic performance of the Alborz dam body. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54 (10), 1467-483, [doi:10.22059/ijswr.2023.365336.669573](https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.365336.669573). (In Persian with English Abstract).
- Salamon J, and Hansen KD, 2018. Advancement of roller-compacted concrete in building dams. *Cement Wapno Beton*. 195-205.
- Shamsai A, Ghaemian M, and Azimfar SM, 2009. Thermo-Mechanical Analysis of Roller Compacted Concrete (RCC) Dams (Jahgin Dam). In Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, [doi:10.4133/1.3176717](https://doi.org/10.4133/1.3176717).
- Tabrizchi M, Hassanzadeh Y, Aalami M, and Abbaszadeh H, 2025. Investigation of Flow Parameters in a Chute Spillway Using FLOW3D Software. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (2), 411-431. [doi:10.22059/ijswr.2024.385048.669829](https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.385048.669829). (In Persian with English Abstract).
- Zhang X, Zhang X, Yan T, Huang Y, Liu Q, and Wang X, 2019. Experimental analysis and numerical calculation on equivalent strength of induced joints of different ages and weakening degrees. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 127(9), [doi:642-650, 10.2109/jcersj2.18196](https://doi.org/10.2109/jcersj2.18196).
- Zhou H, Zhou Y, Zhao C, and Liang Z, 2016. Optimization of the temperature control scheme for roller compacted concrete dams based on finite element and sensitivity analysis methods. *Civil Engineering Journal-Stavebni Obzor*, 25(3), 1-16, [doi:10.14311/CEJ.2016.03.0014](https://doi.org/10.14311/CEJ.2016.03.0014).