

# Numerical analysis of the optimal cross-section with various shapes in roller-compacted concrete dams by comparing stress and strain by ABAQUS software

Ebrahim Asadi<sup>1\*</sup> , Neda Beirami<sup>2</sup> , Ebrahim Salami<sup>3</sup> , Reza Ghahreman Nezhad Alanjaghi<sup>4</sup> 

<sup>1</sup>Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

<sup>2</sup>MSc Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

<sup>3</sup>Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Payame Noor University (PNU), Tehran, Iran

<sup>4</sup>MSc, Department of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

Corresponding Author's E-mail: [asadi47e@gmail.com](mailto:asadi47e@gmail.com)

Received: 21 Apr. 2025    Accepted: 02 Aug. 2025  
Revised: 08 July 2025    Published: 23 Srp. 2023



Homepage: [ijwer.uoz.ac.ir](http://ijwer.uoz.ac.ir)

**Abstract:** The most significant challenge for the dam construction industry is overcoming the existing technical limitations and proposing strategies to make dam construction more cost-effective. Roller-compacted concrete dams have gained attention due to their ease and speed of construction as well as lower costs compared to conventional concrete dams. In this study, the mechanical performance of RCC dams with different shapes was modeled using the ABAQUS software. After validating the numerical model, the results indicated that the maximum stress in the dams is related to their foundation, necessitating special measures to reinforce this area. Among the evaluated geometries, shape buttressed design, with columns having side walls without slopes, is an ideal option for optimizing the design of RCC dams due to its relatively low maximum stress. In addition to structural and functional criteria, this geometry increases the visual and architectural appeal of the dam.

**Keywords:** Roller-Compacted Concrete Dam, Finite Elements, Gravity Dam, ABAQUS

**Introduction:** A dam plays an important role in providing a wide range of economic, environmental, and social benefits. The roller-compacted concrete (RCC) dam refers to concrete that is constructed using the same cheap and fast construction techniques and machinery as earth dams, while it has the same strength and durability as concrete dams. These dams are well-known because of their fast construction process, low engineering cost, strong environmental compatibility, and good heat generation control (Hu et al., 2019, Huang & Wan, 2018, Zheng, et al. 2020). Finite element (FE) modeling is widely accepted as a powerful tool for conducting comprehensive studies and evaluating the behavior of structural elements under various loading conditions (Habib et al., 2020, Lampropoulos & Dritsos, 2011). The finite element method is an effective method for estimating the seismic, thermal, and structural behavior of roller concrete gravity dams when appropriate boundary conditions are available (Gharibdoust et al., 2019, Chen & Liu, 2019, Jia et al., 2010). In this research, the performance of RCC dams with different shapes was studied in Abaqus software using the finite element method, and the results were compared with Zheng et al.'s research (Zhang et al., 2019). Also, the results related to stress and strain were presented to them, and the best-optimized cross-section was selected.

**Methodology:** Considering the capabilities of Abaqus software in analyzing complex problems, as well as the ability of this software to provide regular and accurate meshing in a way that minimizes the error phenomenon, this software was chosen to perform finite element simulations. Fig. 1 demonstrates Zhang et al. (2019) research that considered as the selected paper to validate the finite element simulation process and also to continue research to investigate changes in the structure and model of the roller-compacted concrete dam. For the concrete part that

was modeled volumetrically, 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 volumetrically, the node spacing was set to 0.02 mm, which resulted in 15,375 eight-node 3D elements of type C3D8R.

**Results and Discussion:** The volume parameter was considered as the objective function, and the strain energy parameter was considered as the control function to optimize analysis. After performing the optimization analysis and reducing the model volume by approximately thirty percent by the software, under the same loading conditions, the maximum stress value was 6.98 MPa at the toe of the dam, which is shown in [Fig. 3](#). While before optimization, the maximum stress value at the same point was 10.68 MPa, which had a maximum stress value of 34.5 percent. Based on [Fig. 4](#), the displacement of the dam crest was 34.27 mm in the horizontal direction and 12.71 mm in the vertical direction. In the undeformed dam, the maximum displacement of the crest of the dam was 18.648 mm in the horizontal direction and 20.17 mm in the vertical direction. The reason for the reduction in displacement in the vertical direction was due to a thirty percent reduction in the volume of the model, which led to a reduction in weight and, as a result, a thirty-two percent reduction in the subsidence of the dam. In contrast, it was observed that by optimizing the shape of the dam structure to reduce the volume, the horizontal displacement of the dam had almost doubled, but it should be noted that this displacement was due to an increase in the flexibility of the dam against the applied forces and not a decrease in its resistance because an increase in the stresses created in the dam had not occurred. Based on the results obtained, which indicated a thirty percent reduction in the dam volume without loss of its resistance, several models were designed using Abaqus software and based on the optimized design. The maximum stress value was at the interface between the dam base and the foundation. The maximum horizontal displacement occurred at the dam crest, while the minimum displacement was observed at the connection to the foundation. The optimized design shape No. 4, due to its relatively low maximum stress, which is shown in [Fig. 5](#), can be considered a suitable option for the optimization of roller-compacted concrete dams.

**Conclusion:** The numerical model validation showed that the use of finite element simulation with Abaqus software to investigate the static behavior of RCC dams is generally appropriate and effective. The maximum stress in dams is related to their foundation, and special measures are required to strengthen this part. Buttressed design, with mechanical performance like the best options, is a suitable option for optimizing the design of RCC dams and increasing their architectural appeal. The evaluation of seven alternative designs for the optimal cross-section of concrete dams, focusing on cost-effectiveness as well as architectural and aesthetic considerations, demonstrated that Design No. 4 (D4) provides superior stress distribution performance and reduces the required concrete volume by approximately 30%. Therefore, it is proposed as an optimal option for roller-compacted concrete (RCC) dam design. Furthermore, this design enhances the dam's architectural appeal, supports tourism development, ensures the required structural resistance despite the reduced concrete volume, and offers suitable placement for the spillway downstream of the dam and the intake structure upstream.

© 2023 University of Zabol, Zabol, Iran.



This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

# تحلیل عددی مقطع بهینه با شکل‌های متفاوت در سد بتن غلتکی با مقایسه تنش و کرنش با استفاده از نرم‌افزار آباکوس

ابراهیم اسدی<sup>۱\*</sup>، ندا بیرامی<sup>۲</sup>، ابراهیم سلامی<sup>۳</sup>، رضا قهرمان نژاد النجفی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup>استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

<sup>۲</sup>دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده عمران و محیط‌زیست، دانشگاه پلی‌تکنیک امیرکبیر، تهران، ایران

<sup>۳</sup>استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

<sup>۴</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

پست الکترونیکی نگارنده مسئول: [asadi@azaruniv.ac.ir](mailto:asadi@azaruniv.ac.ir)

وبگاه نشریه: [ijwer.uoz.ac.ir](http://ijwer.uoz.ac.ir)



تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۱

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۷ تاریخ چاپ: ۱۴۰۲/۰۷/۰۱

**چکیده:** امروزه، سدهای بتن غلتکی به علت سهولت و سرعت اجرایی بالا و هزینه‌های کم‌تر نسبت به سدهای بتنی مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش عملکرد مکانیکی هفت طرح متفاوت سد بتنی غلتکی با استفاده از مدل‌های عددی اجزای محدود مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد، بیشینه تنش در سدها با شالوده آن‌ها مرتبط است و برای تقویت این قسمت، راه‌کارهای ویژه‌ای از جمله استفاده از لایه محافظ و شیب‌های بلند مورد نیاز است. همچنین، شکل هندسی مقطع سد نقش موثری در کاهش تمرکز تنش و افزایش ایمنی سازه ایفا می‌کند. از میان طرح‌ها، طرح D4، دارای پشت‌بند مورب و ستون‌های با دیواره‌های جانبی بدون شیب، به علت بیشینه تنش نه‌چندان زیاد و ۳۰ درصد کاهش حجم بتن گزینه ایده‌آلی در جهت بهینه‌سازی طراحی سدهای بتن غلتکی تشخیص داده شد. این طرح علاوه بر معیار سازه‌ای و عملکردی، موجب افزایش جذابیت بصری و تنوع معماری سد می‌شود که باعث افزایش رونق گردشگری می‌گردد. در این طرح با کاهش بتن مصرفی، مقاومت لازم سد نیز تأمین شده است. با کاهش سی‌درصدی بتن مصرفی در سد می‌توان هزینه‌ها را بدون کاهش مقاومت سد کاهش داد. مطالعات انجام‌شده می‌تواند به مهندسان و تصمیم‌گیران در زمینه طراحی و ساخت سدها کمک کند تا تصمیمات بهتری در مورد شکل هندسی مقطع سدها اتخاذ کنند که منجر به بهبود کارایی و ایمنی سدها می‌شود.

**کلیدواژه‌ها:** سد بتن غلتکی، اجزای محدود، سد وزنی، آباکوس.

## ۱- مقدمه

می‌کند. در نتیجه باید در طراحی، ارزیابی و اجرای سد دقت زیادی کرد تا از اثربخشی، ایمنی، پایداری و کاهش خطر خرابی‌های فاجعه‌آمیز اطمینان حاصل شود (Gharibdoust et al., 2019).

سد، به‌عنوان یک سازه زیربنایی، در طیف گسترده‌ای از مزایای اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی نقش مهمی ایفا

سهولت پیاده‌سازی و سرعت محاسبات این روش، استفاده از آن را در مدل‌سازی دوبعدی جریان در محیط‌های متخلخل رایج کرده است.

از روش احجام محدود برای شبیه‌سازی جریان‌های با مرزهای متغیر، جریان در کانال‌های باز، پیشروی جبهه سیلاب، مدل‌سازی هیدرولیکی سازه‌های آبی مثل سرریزها و دریچه‌ها و حتی محاسبه سرعت جریان در شبکه‌های آبی استفاده شده است (LeVeque, 2002; Busto & Dumbser, 2023). این روش برای تحلیل سازه‌های هیدرولیکی با هندسه‌های پیچیده و شبکه‌های محاسباتی غیرمنظم مناسب است.

روش المان محدود با استفاده از شکل‌های پایه<sup>۵</sup> امکان مدل‌سازی تنش، کرنش، نشست پی، نشت از بدنه سد، تحلیل تراکم‌پذیری خاک، مقاومت برشی زمین و پایداری سازه‌های نگهبان را با دقت بالا فراهم می‌کند (Zienkiewicz et al., 2005). استفاده از این روش در تحلیل سازه‌های هیدروتکنیکی و ژئوتکنیکی نظیر سدهای خاکی، پی سازه‌ها، شمع‌ها، دیوارهای نگهبان و تونل‌ها رایج است.

امروزه مدل‌سازی المان محدود به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان یک ابزار قدرتمند برای ارزیابی رفتار عناصر ساختاری تحت شرایط بارگذاری مختلف پذیرفته شده است (Habib et al., 2011; Lampropoulos & Dritsos, 2020). همچنین، روش المان محدود برای تخمین رفتار لرزه‌ای، حرارتی و سازه‌ای سدهای وزنی بتن غلتکی در زمانی که شرایط مرزی مناسب در دست باشد، موثر است (Gharibdoust et al., 2010; Chen & Liu, 2019; Jia et al., 2019).

در سال ۲۰۱۰ لی و همکاران به بررسی اثر بتن مخلوط با MgO بر تنش حرارتی سدهای بتن غلتکی پرداختند (Li et al., 2010). ژیا و همکاران به تحلیل سه‌بعدی میدان تنش حرارتی سدهای بتن غلتکی در طول فرایند ساخت پرداختند (Jia et al., 2010). ژانگ و همکاران به مطالعه اثر

سد بتنی متراکم شده با غلتک<sup>۱</sup> در واقع به سدی اطلاق می‌گردد که در فرایند ساخت و اجرای آن از تکنیک‌ها و ماشین‌آلات اجرایی ارزان و سریع سدهای خاکی استفاده می‌شود و از مقاومت و دوام مشابه با بتن متعارف برخوردار است. امروزه، به‌دلیل فرآیند ساخت سریع، هزینه مهندسی کم، سازگاری محیطی قوی و کنترل خوب تولید گرما، آینده امیدوارکننده‌ای دارد (Hu et al., 2019; Huang & Wan, 2018; Zheng, et al. 2020).

بتن متراکم شده با غلتک یک ماده قوی با خواص منحصربه‌فرد است که می‌تواند پایداری عملیات بتن‌ریزی سنگین و انبوه را در سازه‌ها و زیرساخت‌ها حفظ کند. این بتن اجزای مشابه بتن معمولی را دارد (Courard et al., 2010) و اهمیت آن ناشی از توانایی ایجاد مقاومتی مشابه با بتن معمولی (Harrington et al., 2010; Kokubu et al., 1996) دوام خوب و نیازهای نگهداری کم (Mohammed, 2018) با کاهش قابل توجه هزینه است (Courard et al., 2010; Nagayama & Jikan, 2003; Warren, 2013).

گرچه بتن متراکم شده با غلتک برای اولین بار به‌عنوان یک مصالح ساختمانی برای روسازی در سوئد در دهه ۱۹۳۰ استفاده شد، از اوایل دهه ۱۹۸۰، به‌عنوان یک ماده مناسب برای سدها پذیرفته شد و تا پایان سال ۲۰۱۲، بیش از ۵۵۰ سد بتنی متراکم شده با غلتک در سراسر جهان ساخته شد (Ashtankar & Chore, 2014).

در مهندسی آب‌و‌خاک، مدل‌سازی عددی ابزاری کلیدی برای تحلیل پدیده‌های پیچیده نظیر نشت، جریان، تنش و کرنش در سازه‌های هیدرولیکی و ژئوتکنیکی به‌شمار می‌رود. مهم‌ترین روش‌های محاسبات عددی که در این عرصه استفاده می‌شوند عبارت‌اند از روش تفاضل محدود<sup>۲</sup>، احجام محدود<sup>۳</sup> و المان محدود<sup>۴</sup>. روش تفاضل محدود، برای شبیه‌سازی جریان نشت از سدهای خاکی، پیش‌بینی توزیع فشار منفذی در بدنه سد، محاسبه تنش در سازه‌های نگهبان و تحلیل پایداری شیب استفاده شده است (Anderson, 1995; Versteeg & Malalasekera, 2007).

<sup>4</sup> Finite element method (FEM)

<sup>5</sup> Basis functions

<sup>1</sup> Roller compacted concrete (RCC)

<sup>2</sup> Finite difference method (FDM)

<sup>3</sup> Finite volume method (FVM)

فاصله شمع‌ها تاثیر قابل توجهی در ظرفیت باربری و الگوی گسیختگی دارند (Memarian et al., 2023). حق دوست و همکاران در مطالعه‌ای عددی با استفاده از اجزا محدود تاثیر زاویه شیب، تعداد و فاصله شمع‌های فولادی بر میزان نشت، فشار منفذی و سرعت جریان در سد خاکی با استفاده از اجزا محدود، در محیط نرم افزار SEEP/W، بررسی کردند (Haghdoust et al., 2024). نتایج آن‌ها نشان داد که تغییرات هندسی این عناصر می‌تواند تاثیر چشم‌گیری بر کاهش نرخ نشت و فشارهای هیدرولیکی وارد بر سازه داشته باشد، به طوری که با افزایش زاویه شمع تا ۱۰۵ درجه و یا افزایش تعداد شمع‌ها تا ۶ عدد، بیش از ۴۵ درصد کاهش در دبی نشت حاصل شد.

حق دوست و همکاران (Haghdoust et al., 2023) تاثیر عمق نفوذ، فاصله از ابتدای عرض تاج و زاویه شیب دیوار آب‌بند داخلی بر نشت سد خاکی را با استفاده از روش المان محدود بررسی کردند و نشان دادند که با افزایش عمق دیوار آب‌بند داخلی (تا ۲۴ متر)، دبی نشت حدود ۳۹/۷ درصد کاهش می‌یابد؛ در مقابل، گرادیان هیدرولیکی و افت کلی در فشار افزایش دارد. علاوه بر این، زاویه شیب ۴۵ درجه در عمق ۲۴ متر بهترین عملکرد را در کنترل نشت (حدود ۴۹/۷ درصد) از خود نشان داده است.

در این پژوهش، عملکرد سدهای بتن غلتکی با شکل‌های هندسی متفاوت در قالب یک مطالعه عددی با استفاده از روش اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس مورد بررسی قرار گرفته است. مقاطع مورد تحلیل با تنوع در پارامترهای هندسی طراحی شده و نتایج حاصل از توزیع تنش و کرنش در آن‌ها استخراج گردیده است. در نهایت، براساس معیارهای مکانیکی، مقطعی با عملکرد مطلوب‌تر به‌عنوان گزینه بهینه پیشنهاد شده است.

## ۲- روش‌شناسی

در این پژوهش، مقاله Zhang (Zhang et al., 2019) به‌عنوان مقاله منتخب جهت اعتبارسنجی روند شبیه‌سازی المان محدود و انجام تحقیقات برای بررسی تغییرات در ساختار و مدل سد بتن غلتکی، انتخاب گردید؛ زیرا با توجه

عایق سطحی بر روی تخته عایق پرداخته و متوجه شدند که این عایق می‌تواند ناحیه تنش کششی و عمق نزدیک سطح سد را کاهش داده و از ایجاد ترک در سطوح بالادست و پایین دست جلوگیری کند (Zhang et al., 2011).

تحلیل، دو و سه بعدی، دینامیکی غیرخطی سدهای بتن غلتکی آشکار ساخت که استفاده از بتن غلتکی با دوغاب با مقاومت بالاتر در سطوح بالادست و پایین دست سد برای به حداقل رساندن ترک‌های پایه سد مناسب است (Arici et al., 2014). تحلیل میدان تراوش سدهای ثقلی بتن غلتکی به صورت سه بعدی نشان داد که مقاومت تراوش لایه غیرقابل نفوذ در سه لایه RCC درجه بندی شده، برخلاف دو لایه RCC درجه بندی شده، ضعیف است و می‌تواند عملکرد مقاومت در برابر نشت را با وجود توسعه کانال تراوش بالقوه افزایش دهد (Li et al., 2015).

بررسی پایداری سد بتن غلتکی در برابر لغزش به صورت دوبعدی نشان داد که سنگ در مجاورت نوک پاشنه از شیب بالادست بیشترین کشش را در سد تجربه کرده است (Mughieda et al., 2018).

در زمینه بهینه‌سازی عملکرد سازه‌های هیدرولیکی، نوروزی و احدیان (Noruzi & Ahadiyan, 2016) با استفاده از مدل عددی FLOW-3D به بررسی اثر تیغه‌های گرداب‌شکن با آرایش‌های مختلف بر ضریب تخلیه سرریز نیلوفری پرداختند. آن‌ها نشان دادند که افزودن تیغه‌ها تا شش عدد با زاویه ۴۵ درجه می‌تواند موجب افزایش ضریب دبی تا ۴۰ درصد شود؛ یعنی تاثیر تغییرات هندسی در افزایش راندمان سازه‌های تخلیه آب چشم‌گیر است. سرکمریان و احدیان (Sarkamaryan & Ahadiyan, 2020) با استفاده از نرم‌افزار ANSYS-CFX تاثیر پارامترهای هندسی و هیدرولیکی مانند تعداد پله‌ها، شیب سرریز و دبی جریان بر افت انرژی در سرریزهای پلکانی را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که افزایش ارتفاع پله در یک سرریز می‌تواند تاثیر چشمگیری بر افزایش اتلاف انرژی داشته باشد.

بررسی تاثیر مسلح‌سازی شیب‌ها با شمع بر رفتار پی‌های قرار گرفته روی شیب، با بهره‌گیری از شبیه‌سازی‌های عددی و آزمایشگاهی، روشن ساخت که پارامترهایی مانند طول و

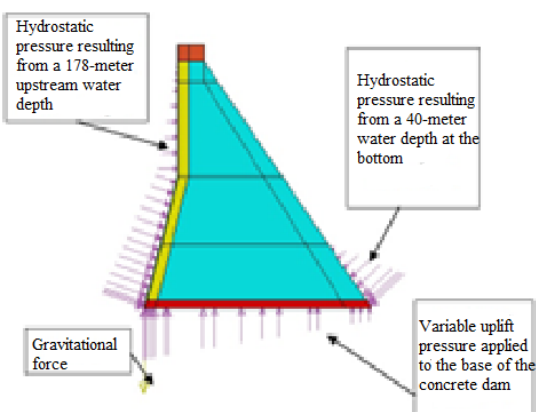


Fig. 2 Loading and boundary conditions of the dam

شکل ۲ شرایط بارگذاری و مرزی اعمال شده بر سد.

نرم‌افزار آباکوس یکی از نرم‌افزارهای قدرتمند مهندسی به‌کمک رایانه در زمینه تحلیل به روش اجزای محدود است. آباکوس قابلیت حل مسائل از یک تحلیل خطی ساده تا مدل‌سازی غیرخطی پیچیده را دارا است. برای انجام شبیه‌سازی‌ها از نسخه اصلاحی سوم ۲۰۱۹ نرم‌افزار آباکوس<sup>۳</sup> استفاده شده است.

به‌دلیل ماهیت استاتیکی فرآیند بارگذاری، بارگذاری بسیار بلندمدت و توانایی تحمل بدون شکست، روش تحلیلی استاتیک عمومی به‌عنوان روش تحلیلی شبیه‌سازی‌های المان محدود انتخاب شد. هدف اصلی در روش اجزای محدود، یافتن راه‌حل یک مساله پیچیده از طریق جایگزینی آن با یک مدل ساده‌تر است. در روش اجزای محدود، ناحیه حل به‌صورت مجموعه‌ای از زیر ناحیه‌های کوچک متصل به‌هم به نام المان‌های محدود در نظر گرفته می‌شود.

در روش اجزای محدود، مسائل فیزیکی به‌کمک معادله‌های دیفرانسیل حاکم بر مساله و یا کمینه نمودن انرژی پتانسیل حل می‌شوند. در این روش غالباً ناحیه مورد تحلیل به تعدادی اشکال ساده هندسی که اصطلاحاً جز یا المان<sup>۴</sup> نامیده می‌شوند، تقسیم می‌شود. هر المان دارای رفتاری است که به آن تابع شکل<sup>۵</sup> گویند و تعداد درجه آزادی در هر ناحیه از المان را مشخص می‌کند. تابع شکل مناسب برای هر المان تابعی است که شرایط مرزی را ارضا کند. تابع

به شباهت‌های فنی و ساختاری و نیز روش تحلیل مشابه، این مقاله بهترین گزینه برای اعتبارسنجی روند شبیه‌سازی المان محدود در تحقیق حاضر تشخیص داده شده است.

ابعاد به‌کار گرفته شده برای سد در این مقاله همانند مقاله ژانگ و همکاران در نظر گرفته شد تا اعتبارسنجی سد به‌درستی صورت گیرد. شکل ۱، پارامترهای مهم در بررسی ابعاد بهینه سد به‌صورت ترسیمی با توجه به مقاله منتخب نشان داده شده است. در شکل ۲، شرایط بارگذاری و مرزی اعمال شده بر روی سد نشان داده شده است.

با توجه به قابلیت‌های نرم‌افزار آباکوس در تحلیل مسائل پیچیده و قابلیت شبکه‌بندی منظم و دقیق آن به صورتی که پدیده خطای ناشی از قفل‌شدگی المان‌ها را به حداقل می‌رساند، این نرم‌افزار جهت انجام شبیه‌سازی‌های المان محدود انتخاب گردید. آباکوس در سال ۱۹۷۸ توسط دکتر دیوید هیبیت، دکتر بنگت کارلسون و دکتر پل سورنسن با نام اصلی (HKS<sup>۱</sup>) تاسیس شد. سپس، نام شرکت قبل از خرید توسط داسولت سیستمز<sup>۲</sup> در سال ۲۰۰۵ به آباکوس تغییر یافت.

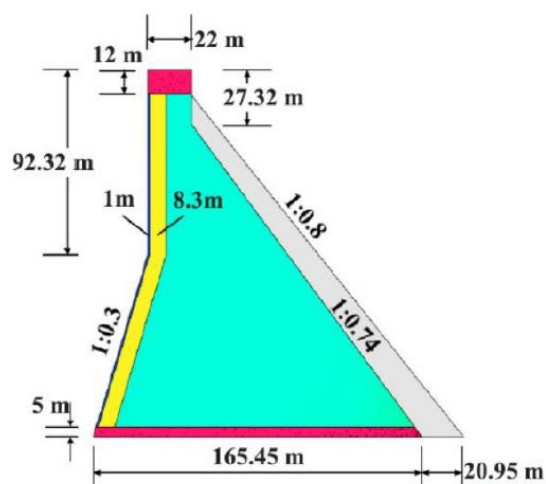


Fig. 1 Roller compacted concrete [Zhang et al 2019]

شکل ۱ سد بتن غلتکی در مقاله ژانگ و همکاران.

<sup>3</sup> Abaqus 2019 HF3

<sup>4</sup> Element

<sup>5</sup> Shape function

<sup>2</sup> Dassault Systèmes

جدول ۱ مدل‌های مورد تحلیل

Table 1 Models analyzed

Design code	Design configurations
D1	Inclined cylindrical columns
D2	Columns with sloped side walls
D3	Columns with vertical side walls
D4	Diagonal brace and columns with non-sloping side walls
D5	The honeycomb concept, consisting of interconnected hexagonal footings with inclined side walls
D6	The honeycomb concept, featuring interconnected hexagonal footings with an enlarged base section
D7	The application of the honeycomb concept with inclined side walls at an angle of $-19^\circ$

تنش‌های ناشی از مخازن بالادست و پایین‌دست سد مورد بررسی قرار گرفت. سپس اقدام به طراحی مدل‌هایی با هندسه‌های ایده‌آل و عملی از لحاظ اجرایی و مقایسه نتایج حاصل پرداخته شد.

### ۳-۱- اعتبارسنجی مدل عددی

به منظور اعتبارسنجی (صحت‌سنجی) مدل عددی تولید شده در مطالعه حاضر، مقادیر جابجایی تاج سد در راستاهای افقی و عمودی و همچنین توزیع تنش حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام گرفته در این مطالعه با نتایج مشابه در مقاله انتخاب شده، مقایسه و ارزیابی شد.

در مطالعه ژانگ و همکاران، بیشینه جابجایی افقی تاج سد به‌ازای تحلیل المان محدود غیرخطی با تعداد ۳۶ هزار المان برابر با  $18/08$  میلی‌متر به‌دست آمده است. این مقدار برای تحلیل اعتبارسنجی انجام شده در این مطالعه برابر با  $18/648$  میلی‌متر به‌دست آمد که بیشینه خطایی برابر با  $3/1$  درصد را دارد. همچنین، در مقاله ژانگ و همکاران بیشینه جابجایی عمودی تاج سد برابر با  $20/42$  میلی‌متر به‌دست آمده است. این مقدار برای تحلیل اعتبارسنجی انجام شده در این مطالعه برابر با  $20/17$  میلی‌متر است که بیشینه خطایی برابر با  $1/23$  درصد دارد.

نتایج حاصل مطابقت بسیار خوبی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های مقاله ژانگ و همکاران را دارد که در بیشترین مقدار دارای  $3/1$  درصد اختلاف است که نشان از صحت روش‌های انتخاب شده و مواد اعمالی در

شکل می‌تواند تابع درجه یک، درجه دو و یا هر تابع دیگری باشد. کدهای اجزای محدود غالباً از توابع چندجمله‌ای جهت تعریف تابع شکل استفاده می‌کنند. اندازه و تعداد المان‌ها در مدل اجزاء محدود به‌طور معکوس به یکدیگر وابسته‌اند، به طوری که با کاهش اندازه المان‌ها، تعداد المان افزایش یافته و دقت حل بالاتر می‌رود. در ضمن اگر تعداد اجزا از یک محدوده مشخصی تجاوز کند، نه تنها هزینه تحلیل بالا می‌رود بلکه تغییر محسوسی در دقت حل مساله نیز مشاهده نخواهد شد. در شکل ۳، مش‌بندی مورد استفاده در این پژوهش نشان داده شده است.

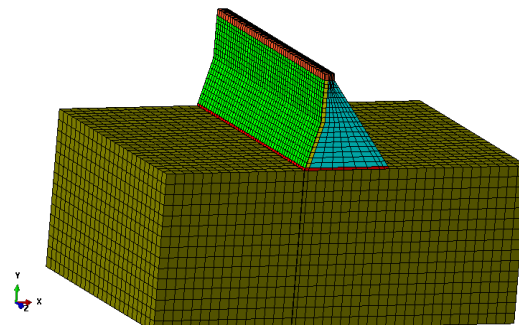


Fig. 3 Mesh display in the assembled model

شکل ۳ نمایش مش‌بندی در مدل مونتاژی

برای قسمت بتنی که به‌صورت حجمی مدل شده است، فاصله گره‌ها  $0/01$  میلی‌متر در نظر گرفته شد که تعداد  $20850$  عدد المان سه‌بعدی هشت‌گره‌ای از نوع C3D8R ایجاد شد. برای قسمت خاک که به‌صورت حجمی مدل شده است، فاصله گره‌ها  $0/02$  میلی‌متر در نظر گرفته شد که تعداد  $15375$  عدد المان سه‌بعدی هشت‌گره‌ای از نوع C3D8R ایجاد شد. با توجه به شکل سد و خاک (شکل ۱) نمی‌توان از روش‌های مدل‌سازی دوبعدی و تقارن محوری استفاده کرد و می‌بایست حتماً از روش مدل‌سازی سه‌بعدی استفاده نمود. سپس بارگذاری و شرایط مرزی مطابق با مقاله ژانگ و همکاران اعمال شد.

### ۳- نتایج و بحث

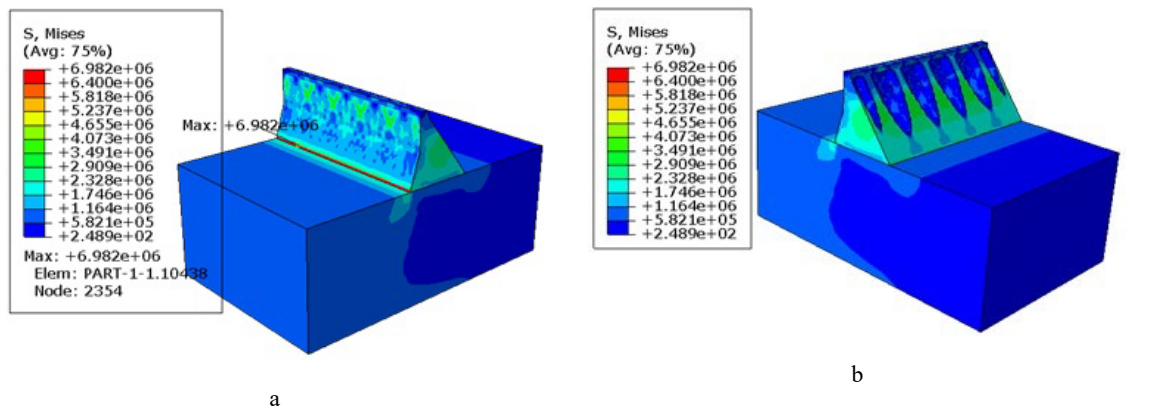
مدل‌سازی عددی در این مطالعه با استفاده از تحلیل المان محدود جهت بررسی رفتار سدهای بتن غلتکی مطابق مقاله ژانگ و همکاران در سال ۲۰۱۹ صورت گرفت و تأثیرات

شبه‌سازی‌های انجام‌یافته دارد.

### ۲-۳- بهینه‌سازی مدل عددی

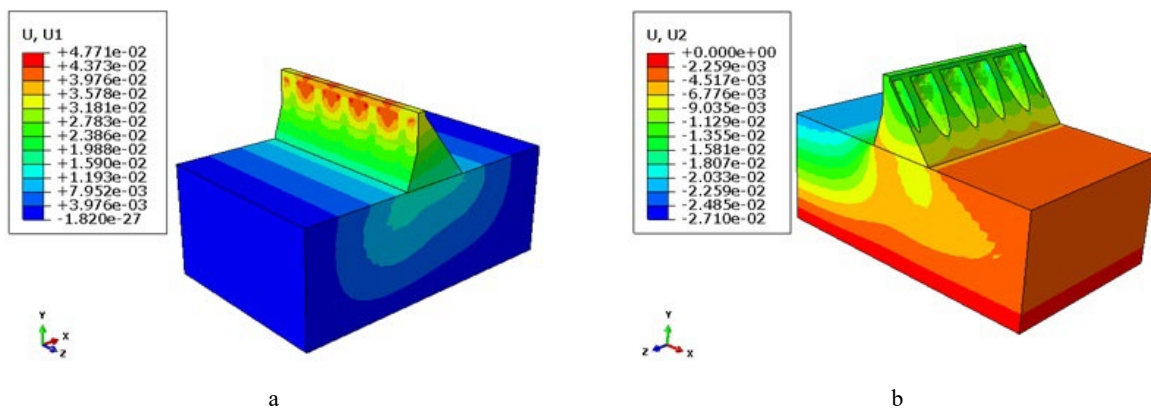
پارامتر حجم به‌عنوان تابع هدف و پارامتر انرژی کرنشی (ثابت بودن آن نشان از عدم‌تغییر در مقاومت سازه می‌باشد) به‌عنوان تابع کنترل جهت حل تحلیل بهینه‌سازی در نظر گرفته‌شده است. بعد از انجام تحلیل بهینه‌سازی و کاهش تقریباً سی‌درصدی حجم مدل توسط نرم‌افزار، در همان شرایط بارگذاری اعمال‌شده، بیشینه مقدار تنش برابر

با ۶/۹۸ مگاپاسکال در پای سد به‌دست‌آمده است. درحالی‌که قبل از بهینه‌سازی، مقدار بیشینه تنش که موقعیت آن در همان نقطه بود برابر با ۱۰/۶۸ مگاپاسکال است که مقدار بیشینه تنش کاهش ۳۴/۵ درصدی داشته است. مقادیر توزیع تنش در نقاط مختلف سد در حالت بهینه شده در **شکل ۴** نشان داده‌شده است. در **شکل ۵**، مقادیر جابجایی نقاط مختلف سد در حالت بهینه شده در راستای افقی و عمودی نشان داده‌شده است.



**Fig. 4** Stress distribution values at different points a) Upstream of the dam b) Downstream of the dam

**شکل ۴** مقادیر توزیع تنش در نقاط مختلف سد (الف) بالادست سد (ب) پایین‌دست سد



**Fig. 5** Displacement a) Horizontal direction b) Vertical direction

**شکل ۵** جابجایی (الف) راستای افقی (ب) راستای عمودی

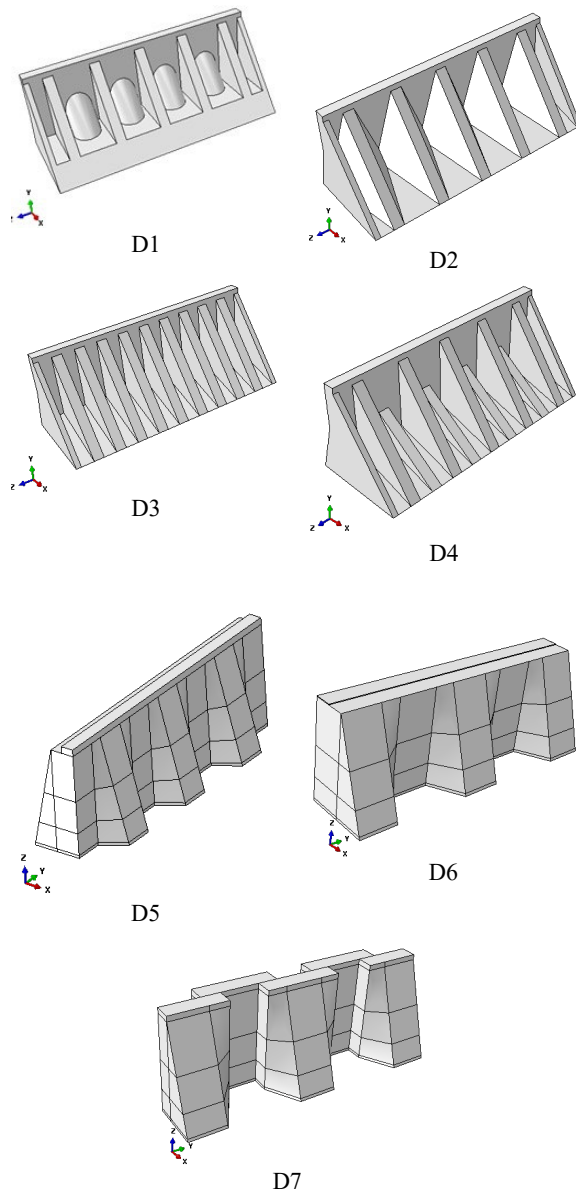


Fig. 6 Different dam designs

شکل ۶ طرح‌های مختلف سد

دارد. بیشینه جابجایی در راستای عمودی نیز در تمامی طرح‌ها در پایین‌دست سد است و در طرح شماره سه در بدنه سد به سمت بالادست است. با توجه به یکسان بودن تمامی بارگذاری‌ها و شرایط مرزی در تمامی تحلیل‌ها، جهت مقایسه بهتر، نتایج مدل‌های طراحی شده به همراه مدل بهینه‌سازی شده توسط نرم‌افزار و مدل مورد استفاده در مقاله ژانگ و همکاران در [جدول ۲](#) ارائه شده است.

بر اساس تحلیل بهینه‌سازی انجام‌یافته، بیشینه جابجایی تاج سد در راستای افقی (U1) برابر با  $34/27$  میلی‌متر و در راستای عمودی (U2) برابر با  $12/71$  میلی‌متر است. این در حالی است که در سد تغییرشکل نیافته، مقدار بیشینه جابجایی تاج سد در راستای افقی (U1) برابر با  $18/648$  میلی‌متر و در راستای عمودی (U2) برابر با  $20/17$  میلی‌متر است. علت کاهش جابجایی در راستای عمودی ناشی از کاهش سی‌درصدی حجم مدل است که منجر به کاهش وزن و در نتیجه کاهش سی‌ودو درصدی فرورفتن سد شده است. در مقابل مشاهده شد که با بهینه‌سازی شکل سازه سد جهت کاهش حجم، مقدار جابجایی افقی سد تقریباً دو برابر شده است؛ اما باید در نظر داشت که این جابجایی، ناشی از افزایش انعطاف‌پذیری سد در برابر نیروهای وارد شده است و نه کاهش مقاومت آن، زیرا افزایش تنش‌های ایجاد شده در سد رخ نداده است.

بر اساس نتایج به دست آمده که نشان‌دهنده سی‌درصدی حجم سد بدون افت مقاومت آن بود، چندین مدل با استفاده از نرم‌افزار آباکوس و بر پایه طرح بهینه‌شده طراحی گردید. طراحی‌های صورت گرفته برای شکل‌های مختلف در [شکل ۶](#) آورده شده است.

### ۳-۳- تنش در مقطع‌های بهینه‌شده مختلف

پس از طراحی شکل‌ها، اقدام به تحلیل مدل‌ها مطابق با مواد، بارگذاری‌ها و شرایط مرزی مقاله ژانگ و همکاران گردید. نتایج تنش به‌ازای مگاپاسکال برای طراحی‌های مختلف در [شکل‌های ۷ تا ۹](#) آورده شده است. در تصاویر مشخص شده، بیشینه مقدار تنش در محل اتصال پایه‌ها به خاستگاه سد است.

### ۳-۴- کرنش در مقطع‌های بهینه‌شده مختلف

[شکل ۷](#)، جابجایی در راستای افقی و عمودی را در واحد میلی‌متر نشان می‌دهد و بیشینه مقدار جابجایی در راستای افقی در تاج سد و کمینه مقدار آن در محل اتصال به فونداسیون سد است. طرح شماره هفت از میان طرح‌های ارائه شده دارای بیشینه مقدار جابجایی در راستای افقی را

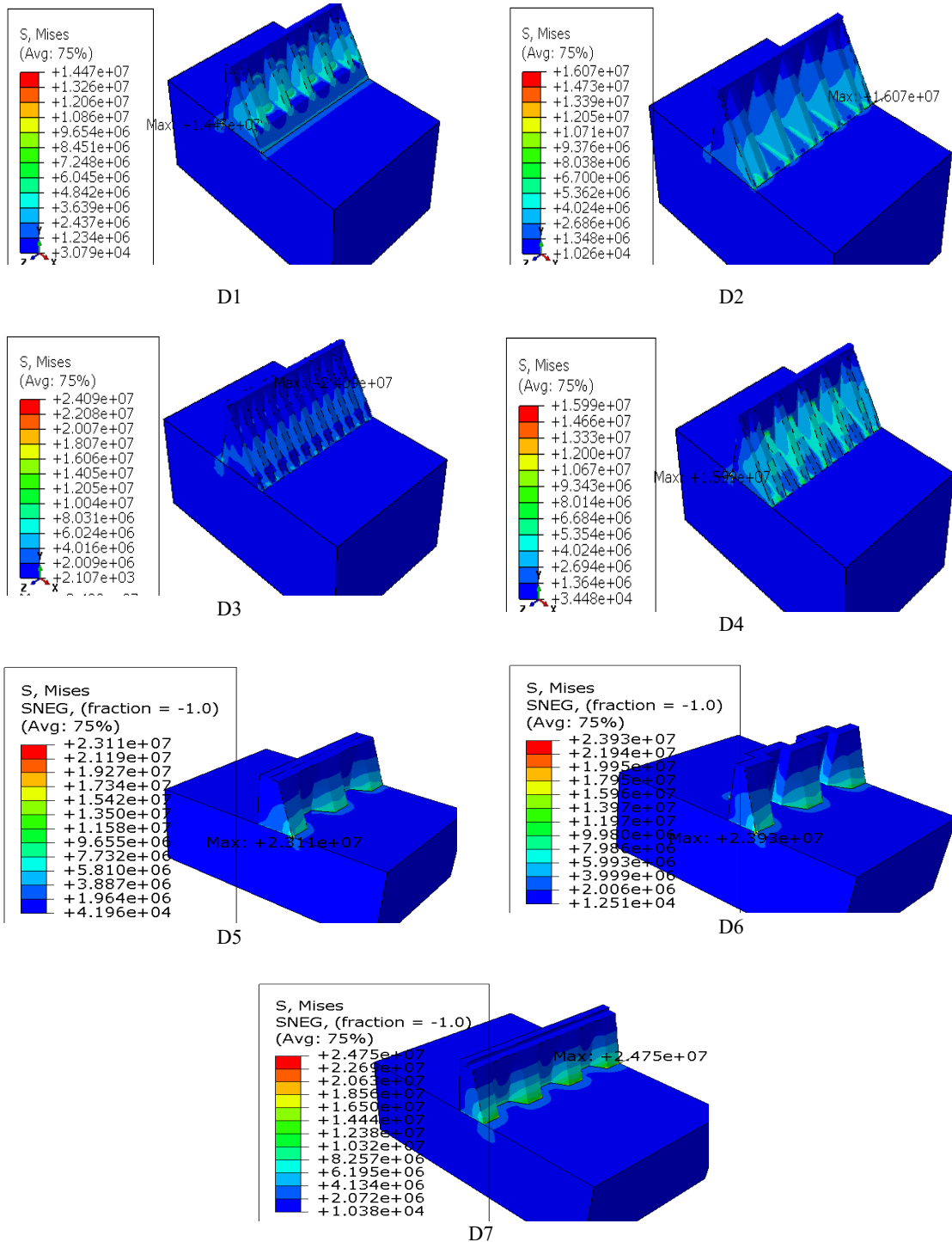


Fig. 7 Stress value for different Designs

شکل ۷ مقدار تنش در طرح‌های مختلف

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، طرح‌های اجرایی گوناگون از سدهای بتن غلتکی با سی درصد حجم کاهش یافته با استفاده از روش اجزای محدود و نرم‌افزار آباکوس مورد مطالعه قرار گرفت. واسنجی شبیه‌سازی با روش المان محدود توسط نرم‌افزار آباکوس و نتایج ژانگ مبین این است که روش المان محدود برای تخمین رفتار استاتیکی سدهای بتن غلتکی، به‌طور کلی، مناسب و موثر است. همچنین، بیشینه تنش در سدها در شالوده آن‌ها رخ می‌دهد؛ بنابراین تقویت این قسمت‌ها مثلاً با استفاده از لایه محافظ و شیب‌های بلند مورد نیاز است.

بررسی هفت طرح مختلف برای مقطع بهینه سدهای بتن که از لحاظ اقتصادی مقرون به‌صرفه‌تر و در طراحی معماری و زیبایی‌شناسی سد نیز تاثیرگذار هستند؛ نشان داد که طرح شماره چهار (D4) از عملکرد مناسب‌تری در توزیع تنش دارد و حجم بتن مصرفی را در حدود ۳۰ درصد کاهش می‌دهد؛ از این رو به‌عنوان گزینه‌ای بهینه در طراحی سدهای بتن غلتکی پیشنهاد می‌شود. همچنین این طرح باعث افزایش زیبایی و معماری سد، بهبود صنعت گردشگری، تأمین طرح مقاومت مورد نیاز سد در نتیجه کاهش حجم بتن مصرفی، جایابی مناسب برای سرریز در پایین دست محل سد و آبگیر در بالادست سد مهیا می‌شود.

با توجه به نتایج **جدول ۲**، مشاهده شد که در تمامی طراحی‌های بهینه انجام شده مقدار تنش بیشینه نسبت به حالت اعتبارسنجی شده افزایش یافته است. با در نظر گرفتن تمامی موارد مورد مقایسه می‌توان گفت که شکل بهینه طراحی شده شماره چهار (طرح با پشت‌بند مورب) به دلیل بیشینه تنش نه‌چندان زیاد (مخصوصاً در مقایسه با طرح شماره پنج) می‌تواند گزینه مناسبی جهت بهینه‌سازی سدهای بتن غلتکی باشد. طرح سد پشت‌بندهای مورب باعث ایجاد یک ریتم بصری منظم شده است که حس هارمونی و تعادل را ایجاد می‌کند. از منظر معماری، این طرح باعث ایجاد حس حرکت، پویایی و انرژی در طرح شده و ساختاری شبیه به معماری مدرن و خلاقانه دارد. همچنین، فضاهای بین پشت‌بندها برای جاگذاری نورپردازی‌های شبانه قابل استفاده است که باعث رونق صنعت گردشگری در کنار افزایش مقاومت سد و کاهش حجم بتن مصرفی شده است. در این طرح می‌توان محل مناسبی برای نصب برق‌آبی، سرریز و آبگیر در نظر گرفت.

از طرفی طرح شماره پنج به دلیل ارقام استحصال شده از نتیجه تحلیل با بیشینه مقدار ۲۴/۷۵ مگاپاسکال و جابجایی افقی ۱۱۲/۹ میلی‌متر در تاج سد و جابجایی عمودی ۲۲/۷۸ میلی‌متر دارای ضعیف‌ترین عملکرد بین هفت طرح است.

**جدول ۲** نتایج شبیه‌سازی‌های المان محدود

**Table 2** Finite element simulation results.

Models	MVD (mm)	MHD (mm)	Maximum stress (MPa)
Validated model	20.17	18.648	10.68
Model optimized by Abaqus	12.71	34.27	6.98
D1	19.44	43.61	14.47
D2	19.22	38.33	16.07
D3	17.60	53.39	24.09
D4	16.18	53.07	15.99
D5	22.78	112.9	24.75
D6	25.07	55.22	23.11
D7	23.65	63.57	23.39

MVD; Maximum vertical displacement of dam crest  
MHD; Maximum horizontal displacement of dam crest

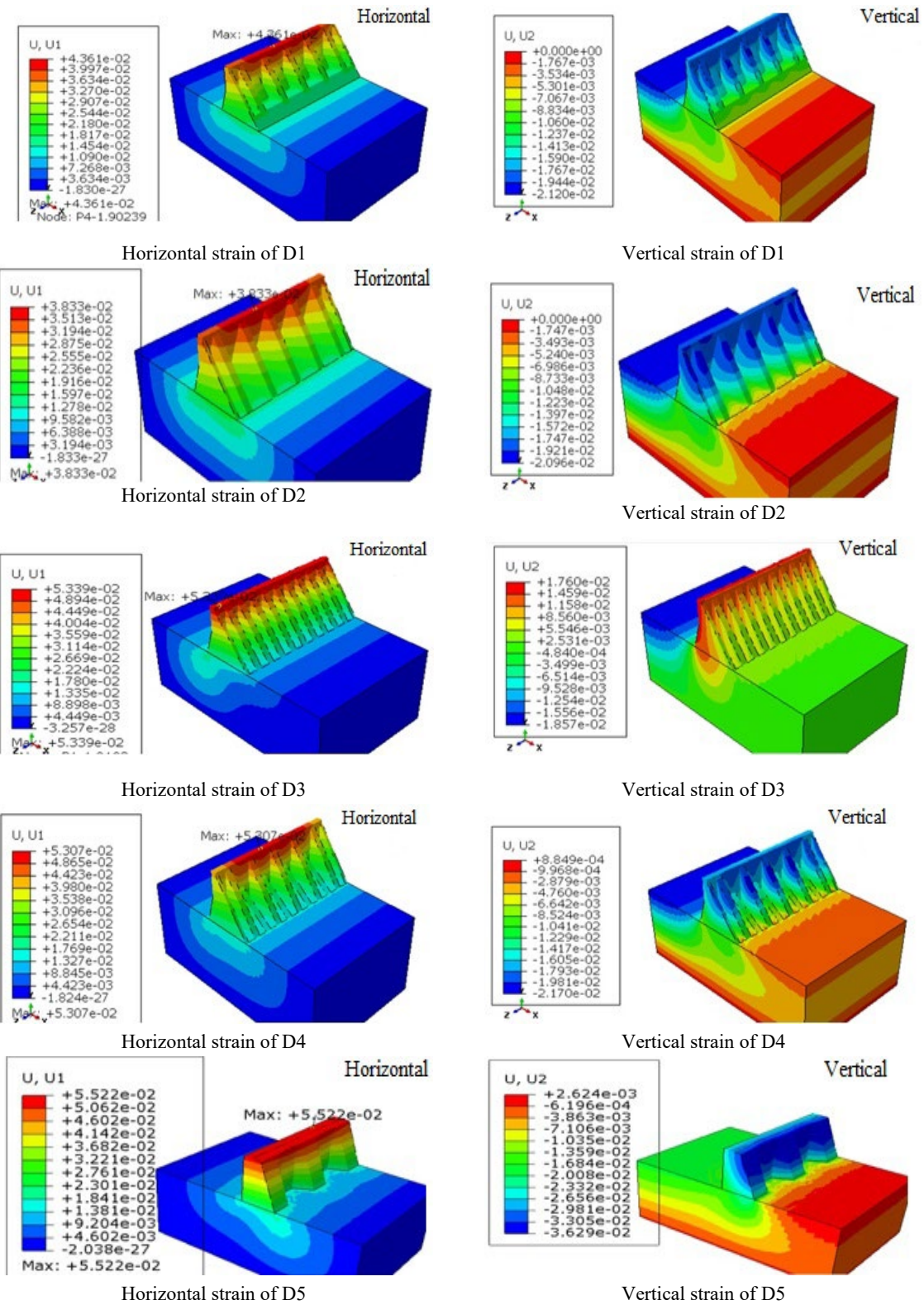


Fig. 8 Strain value for different Designs a) vertical strain b) horizontal strain

شکل ۸ توزیع کرنش در طرح‌های مختلف الف) کرنش قائم یک ب) کرنش افقی

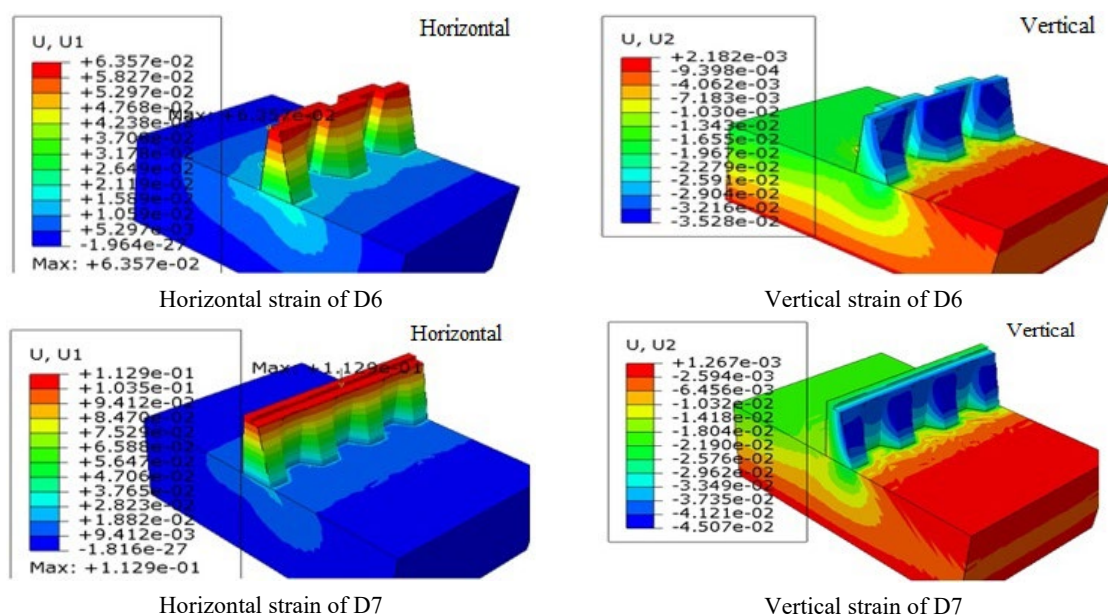


Fig. 9 Strain value for different Designs a) vertical strain b) horizontal strain

شکل ۹ توزیع کرنش در طرح‌های مختلف الف) کرنش قائم یک ب) کرنش افقی

## 5- List of symbols

U1 (mm)	Horizontal displacement of the dam crest
U2 (mm)	Vertical displacement of the dam crest
MHD (mm)	Maximum horizontal displacement of dam crest
MVD (mm)	Maximum vertical displacement of dam crest

## Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge the support of Azarbaijan Shahid Madani University for this research.

## Credit Authorship Contribution Statement.

Conceptualization, (E. A., and E.S); Methodology, (R. G. A); Software, (R. G. A.); data analysis, (E. A., N.B., E.S, and R. G. A); Writing-Original Draft Preparation, (N.B., and R. G. A); Writing-Review and Editing, (E. A, and N.B.); Supervision, (E. A., and E.S)

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

## Funding

The authors state that no financial support was received from any organization for this research.

## Data Availability Statement

Data access is available upon request.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

## References

- Anderson, J. D. (1995). *Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications*. McGraw Hill.
- Arici, Y. Binici, B. and Aldemir, A. (2014). Comparison of the expected damage patterns from two-and three-dimensional nonlinear dynamic analyses of a roller compacted concrete dam. *Structure and Infrastructure Engineering*, 10(3), 305-315.
- Ashtankar, V. B. and Chore, H. S. (2014). Development of design mix roller compacted concrete dam at Middle Vaitarana. *Advances in concrete construction*. 2(2), 125-144.
- Busto, S. and Dumbser, M. (2023). "High-order well-balanced FV-FE method for shallow water equations with bottom friction." *Journal of Computational Physics*.
- Chen, H. and Liu, Z. (2019). Temperature control and thermal-induced stress field analysis of GongGuoQiao RCC dam. *J. Thermal Analysis and Calorimetry*. 135(4), 2019-2029.
- Courard, L. Michel, F. and Delhez, P. (2010). Use of concrete road recycled aggregates for Roller Compacted Concrete. *Construction and Building Materials*. 24(3), 390-395.
- 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.
- 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.
- Haghdooost, M., Lakzian, E., Norouzi, R. Abraham, J., Sjjadi, S.M., and Ahadiyan, J. (2023). Numerical simulation using the finite element method to investigate the effect of internal cutoff walls on seepage and hydraulic gradients in homogeneous earth dams. *Model. Earth Syst. Environ.* 9, 3851–3864 (2023). <https://doi.org/10.1007/s40808-023-01755-w>.
- Haghdooost, M., Sajjadi, S. M., Ahadiyan, J., Norouzi, R., and Abraham, J. (2024). The effect of sheet piles' inclination angle, number, and distance on seepage through an earthfill dam. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(12), 103056. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.103056>.
- Harrington, D. Abdo, F. Adaska, W. Hazaree, C. V. Ceylan, H. and Bektas, F. (2010). Guide for roller-compacted concrete pavements. National Concrete Pavement Technology Center.
- Hu, W. Zhong, D. Wu, B. and Li, Z. (2019). Construction phase oriented dynamic simulation: taking RCC dam placement process as an example. *J. Civil Engineering and Management*. 25(7), 654-672.
- Huang, Y. and Wan, Z. (2018). Study on Viscoelastic Deformation Monitoring Index of an RCC Gravity Dam in an Alpine Region Using Orthogonal Test Design. *Mathematical Problems in Engineering*.
- 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, China.
- Kokubu, K. Cabrerab, J. G. and Uenoa, A. (1996). Compaction Properties of Roller Compacted Concrete.
- Lampropoulos, A. P. and Dritsos, S. E. (2011). Concrete shrinkage effect on the behavior of RC columns under monotonic and cyclic loading. *Construction and Building Materials*; 25(4), 1596-1602.
- LeVeque, R. (2002). *Finite Volume Methods for Hyperbolic Problems*. Cambridge University Press.
- Li, M. C. Guo, X. Y. Shi, J. and Zhu, Z. B. (2015). Seepage and stress analysis of anti-seepage structures constructed with different concrete materials in an RCC gravity dam. *Water Science and Engineering*, 8(4), 326-334.
- Li, S. Ren, J. Yang, T. and Chen, P. (2010). Analysis of the Influence of Concrete Mixed with MgO on the Mass Concrete Thermal Stress. In 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Chengdu, China.
- Memarian, S. Ahadiyan, J. and Karimi, R. H. (2023). Assessment of vertical pile reinforcement effect on behavior of foundations placed on Slopes: An experimental and numerical study. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(12), 102233. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102233>.
- Mohammed, H. A. (2018). Design and evaluation of two-layer roller compacted concrete. University of Nottingham.
- Mughieda, O. Hazirbaba, K. Bani-Hani, K. and Daoud, W. (2018). Numerical modelling of dynamic stability of RCC dam. In MATEC Web of Conferences, Solo Baru, Indonesia.
- Nagayama, I. and Jikan, S. (2003). 30 Years' History of Roller-compacted Concrete Dams in Japan. Fourth Int. Symp. on Roller Compacted Concrete Dams.
- Nouroozi, S. and Ahadiyan, J. (2017). Effect of Vortex Breaker Blades 45 Degree on Discharge Coefficient of Morning Glory Spillway Using Flow-3D, *Irrigation Sciences and Engineering*, 40(1), pp. 191-200. [doi: 10.22055/jise.2017.12677](https://doi.org/10.22055/jise.2017.12677).
- Sarkamaryan, S. and Ahadiyan, J. (2020). Mathematical modeling of energy loss on Stepped Spillway Using ANSYS-CFX Numerical Model, *Irrigation Sciences and Engineering*, 43(1), pp. 43-56. [doi: 10.22055/jise.2017.22269.1593](https://doi.org/10.22055/jise.2017.22269.1593).
- Versteeg, H. K. and Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Pearson.
- Warren, T. (2013). Roller-compacted concrete dams: a brief history and their advantages. *Dams and Reservoirs*, 22(2), 87-90.
- Zhang, X. F. Li, S. Y. Li, Y. L. Ge, Y. and Li, H. (2011). Effect of superficial insulation on roller-compacted concrete dams in cold regions. *Advances in Engineering Software*, 42(11), 939-943.
- Zhang, M. Mingchao, L. Yang, S. and Jinrui, Zh. (2019). Isogeometric shape optimization of high RCC gravity dams with functionally graded partition structure considering hydraulic fracturing.
- Zheng, X. Zhou, J. Chen, G. and Chen, S. (2020). Exposure Assessment for Roller Compacted Concrete Dam Construction Integrated Real-Time Location Information. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 24(3), 703-714.
- Zienkiewicz, O. C. Taylor, R. L. and Zhu, J. Z. (2005). *The Finite Element Method for Structural Analysis*. Butterworth-Heinemann.