



Civil and Project Journal
<http://www.cpjournals.com/>

Research Article

Technical and Economic Comparison of Roller-Compacted Concrete Dams with Concrete and Earth Dams

Ebrahim Asadi¹, Neda Beirami², Ebrahim Salami^{3*}, Hossein Jahani⁴

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

2-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-Master's Student, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University Tabriz Branch, Tabriz, Iran.

Received: 23 February 2026; Revised: 09 March 2026; Accepted: 19 March 2026; Published: 21 March 2026

Abstract

Dams must resist various forces and remain economically viable. In this study, two dam types, a conventional concrete gravity dam and a roller-compacted concrete (RCC) dam, were designed, modeled, and analyzed under identical topographic conditions in Meshginshahr, where an earthfill dam already exists. A realistic cost estimation and comparative assessment were conducted for all three alternatives under equivalent site conditions. Cost differences were calculated using the 1404 national schedule of rates with quantity surveying and estimation software. Results showed that the RCC dam cost 49.58% less than the gravity dam, substantially reducing total project expenditure. The earthfill dam was 78% cheaper than the gravity dam because concrete works dominate gravity dam costs. Although the earthfill dam was 57% cheaper than the RCC dam, it is more vulnerable to seepage and offers lower stability than RCC structures. Therefore, from technical and economic perspectives, the RCC dam is the optimal option. Its advantages include lower cement consumption, minimal formwork, use of common road-construction equipment, faster execution, and reduced mobilization and project duration costs. Moreover, its favorable structural performance compared with earthfill dams makes RCC dams a more justifiable choice for future water infrastructure projects in similar terrains with constrained budgets and demanding safety requirements especially where rapid construction schedules durable materials limited maintenance needs and reliable long-term service life are essential priorities for planners and owners worldwide in many regions today globally.

Keywords: *Dam, Dam Strength, Economic Justification, Roller Compacted Concrete, Structural Stability.*

Cite this article as Asadi,E , Beirami,N , Salami,E and Jahnai,H . (2026). Technical and Economic Comparison of Roller-Compacted Concrete Dams with Concrete and Earth Dams. (e247260). Civil and Project, 8(1), e247260 doi:<https://doi.org/10.22034/cpj.2026.588517.1456>

ISSN: 2676-511X / **Copyright:** © 2026 by the authors.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

. *Corresponding author E-mail address: ebsalami@pnu.ac.ir



نشریه عمران و پروژه
<http://www.cpjournals.com/>

بررسی فنی و اقتصادی سدهای بتنی غلتکی نسبت به سدهای بتنی وزنی و خاکی

ابراهیم اسدی^۱، ندا بیرامی^۲، ابراهیم سلامی^{۳*}، حسین جهانی^۴

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

۲-کارشناس ارشد، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

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

۴-کارشناس ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، ایران.

تاریخ دریافت: ۰۴ اسفند ۱۴۰۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۸ اسفند ۱۴۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۲۸ اسفند ۱۴۰۴؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ فروردین ۱۴۰۵

چکیده

سدها علاوه بر دارا بودن مقاومت لازمه در برابر نیروهای مختلف باید از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه باشند. دو سد، بتنی وزنی و بتنی غلتکی در یک توپوگرافی مشخص در مشکین شهر اردبیل که سد خاکی در آن مکان اجرا شده است با ارتفاع یکسان توسط نرم افزارهای مربوطه طراحی، ترسیم و مورد تحلیل قرار گرفتند. برآورد عینی و مقایسه در قیاس واقعی برای سد سد در نظر گرفته شده است. اختلاف در هزینه سه روش، بر اساس فهرست بهای سال ۱۴۰۴ با استفاده از نرم افزار متره و برآورد مربوطه و با در نظر گرفتن کلیه شرایط ارائه شده است. نتایج نشان داد که برآورد هزینه سد بتنی غلتکی ۴۹,۵۸٪ کمتر از سد بتنی وزنی است که این نسبت در هزینه اجرای پروژه رقم قابل توجهی است. همچنین، ساخت سد خاکی ۷۸٪ ارزان تر از سد بتنی وزنی است زیرا کارهای بتنی هزینه زیادی را در ساخت سدهای بتنی وزنی به خود اختصاص می دهد. در حالی که ساخت سد خاکی ۵۷٪ کمتر از سد بتنی غلتکی است اما این نوع سدها در معرض ترواش بوده و پایداری آنها قابل قیاس با سدهای بتنی غلتکی نمی باشد. بنابراین سد بتنی غلتکی نسبت به دو سد دیگر از نظر فنی و اقتصادی بهینه است. این برتری عمدتاً ناشی از کاهش حجم سیمان مصرفی، حذف بخش عمده قالب بندی، استفاده از ماشین آلات متداول راهسازی، سرعت اجرای بیشتر و کاهش هزینه های تجهیز کارگاه و زمان پروژه می باشد. همچنین، مقاومت سازه ای مناسب در مقایسه با سدهای خاکی، کاربرد این نوع سد را در پروژه های آینده توجیه پذیرتر می سازد.

کلمات کلیدی: سد، توجیه اقتصادی، مقاومت سد، بتنی غلتکی، پایداری سازه ای.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: ebssalami@pnu.ac.ir

۱- مقدمه

از حدود سال ۱۹۵۰ ساخت سدهای بتنی به علت هزینه اجرای بالای آن در سراسر جهان کاهش یافت و به جای آن استفاده از سدهای خاکی بیشتر از قبل متداول شد. استفاده از سدهای خاکی علیرغم اقتصادی بودن و سرعت بالای اجرای آن، مشکلاتی را برای بهره‌برداران ایجاد می‌کرد و علت آن استحکام پایین این نوع سدها بود. بتن غلتکی طبق تعریف انجمن بتن آمریکا (ACI^۱) (بتن تراکم شده با تراکم غلتکی است که در حالت سخت نشده تحمل بار غلتک را تا دستیابی به تراکم بالا داراست. پروژه‌های بتن غلتکی شامل نواحی وسیع بتن‌ریزی با حداقل و یا بدون نیاز به مسلح سازی با آرماتور و با حداقل و یا بدون نیاز به کارهای فلزی جاسازی شده است. بتن غلتکی در نواحی روسازی شده، فونداسیون‌های حجیم، سکوها، پرتاب موشک، حفاظت ساحل رودخانه‌ها، ساخت محوطه کارخانه‌ها و همچنین جایگزینی برای بتن‌های وزنی در ساخت سدهای وزنی و قوسی وزنی مورد استفاده قرار گرفته است از طرف دیگر خطرات ناشی از شکست سد که غالباً هم در سدهای خاکی اتفاق می‌افتد، خسارات جانی و مالی غیر قابل جبرانی را به جای می‌گذارد، آمار این شکست‌ها طراحان و مجریان را به سمت طراحی و اجرای انواعی از سدها که از قابلیت اطمینان بیشتری برخوردار باشند سوق می‌دهد. از میان انواع مختلف سد، سدهای بتن غلتکی^۲ را می‌توان از لحاظ قابلیت اطمینان، زمان اجرا و هزینه احداث بهترین حالت دانست.

در سدهای بتن غلتکی با تاکید بر مزایای اقتصادی، سرعت اجرا، و سازگاری با شرایط ساختگاه‌های مختلف، این نوع سدها به عنوان جایگزینی مناسب برای سدهای بتنی وزنی متعارف و خاکی معرفی شده‌اند (Asadi et al., 2023; Asadi et al., 2025). بتن غلتکی اصولاً به علت کاهش قالب‌بندی، کاهش در هزینه‌های بتن‌ریزی، تراکم و کاهش زمان لازم برای ساخت و ساز می‌باشد (Program and Budget Organization of Iran, 2001). سرعت ساخت یک سد بتن غلتکی بالا می‌باشد به طوری که می‌توان با نرخ عمودی ۴ متر در هفته یک سد بتن غلتکی ساخت. بنابراین یک سد ۱۰۰ متری طی ۶ ماه احداث می‌گردد (Ehsani Zoonuz et al., 2008). اوجها و همکاران (۲۰۲۲) بیان کردند که بتن غلتکی به دلیل سرعت بالای اجرا، هزینه کمتر، کاهش گرمای ناشی از هیدراتاسیون سیمان و امکان استفاده از مقادیر زیاد خاکستر بادی، به یکی از مناسب‌ترین گزینه‌ها برای پروژه‌های بتن‌ریزی حجیم از جمله سدها تبدیل شده است. همچنین استفاده از خاکستر بادی ضمن کاهش مصرف سیمان، موجب کاهش هزینه‌های ساخت و بهبود عملکرد حرارتی بتن می‌شود که این موضوع در پروژه‌های سدسازی اهمیت ویژه‌ای دارد (ojha et al., 2022).

هر سد باید بتواند سیلاب طراحی را بدون آسیب جدی تخلیه نماید و همچنین توان تحمل سیلاب‌های شدیدتر را نیز با رعایت ضریب اطمینان کافی داشته باشد. با توجه به تفاوت‌های سازه‌ای و عملکردی میان انواع سدها، از جمله تفاوت در ارتفاع آزاد، نوع سرریز و حساسیت به تخریب، بررسی مقایسه‌ای سدهای بتن غلتکی نسبت به سایر انواع رایج، می‌تواند در بهینه‌سازی فنی و اقتصادی پروژه‌های آبی نقش مهمی ایفا کند (Mirzaei and Heidari, 2014). تحلیل و مقایسه این الزامات در انواع سدها، به‌ویژه در حوزه فنی و اقتصادی، می‌تواند زمینه‌ساز تصمیم‌گیری بهینه در انتخاب نوع سد در پروژه‌های آبی باشد (Office of Water and Wastewater Engineering Standards, Ministry of Energy, 2014).

سدهای بتنی وزنی به‌عنوان یکی از متداول‌ترین انواع سدهای سنگین، با بهره‌گیری از وزن خود برای مقابله با فشار آب، در مکان‌هایی با پی مقاوم و شرایط زمین‌شناسی خاص مورد استفاده قرار می‌گیرند. این نوع سدها اگرچه از نظر پایداری سازه‌ای عملکرد مناسبی دارند، اما معمولاً با هزینه‌های بالای اجرا، مصرف بالای مصالح و مدت‌زمان طولانی ساخت مواجه‌اند. به همین دلیل، در دهه‌های اخیر گرایش به استفاده از انواع جدیدتر مانند سدهای بتن غلتکی که با کاهش قابل توجه زمان و هزینه ساخت، همراه با عملکرد مناسب هیدرولیکی و سازه‌ای ارائه شده‌اند، افزایش یافته است (Supervisory Deputy for Technical Systems, 2013). در راستای ارزیابی بهینه‌سازی طراحی و ساخت سدها، بهره‌گیری از معیارهای بازرسی و

¹ American Concrete Institute

² Roller-Compacted Concrete Dam (R.C.C)

نگهداری نیز اهمیت ویژه‌ای دارد. بر اساس راهنمای بازرسی سدها، انتخاب نوع سازه سد باید به گونه‌ای باشد که علاوه بر کارایی هیدرولیکی و پایداری سازه‌ای، شرایط بازرسی، ایمنی و نگهداری نیز در آن به طور مؤثر قابل تأمین باشد (Plizzari, 1998).

فاتحی پور و آرام در سال ۲۰۲۲ به مطالعه پدیده‌ی نفوذ و نشست در سدهای خاکی با استفاده از ابزارهای دقیق پرداختند. این پدیده‌ها یکی از عوامل تاثیرگذار بر پایداری سدهای خاکی هستند. در سدهای خاکی، تراوش امری اجتناب ناپذیر است اما اگر این پدیده در شرایطی رخ دهد که موجب شسته شدن ذرات خاک شود، ایمنی و پایداری سد به خطر می‌افتد. با استفاده از ابزارهای دقیق و شبیه‌سازی‌های عددی می‌توان حرکت و جریان آب، میزان فرار آب و مسیر نشست را شبیه سازی کرد (Fatehipour, and Aram, 2022).

در سال ۲۰۱۱ شیردل و همکاران رفتار دینامیکی سدهای خاکی را در زمان‌های مختلف ارتفاع آب مخزن مطالعه کردند. در این مطالعه سد مسجد سلیمان با روش اجزا محدود شبیه سازی شده و نتایج نشان‌دهنده تاثیرگذاری کم، تراز آب مخزن بر بیشینه شتاب و بیشینه جابه جایی رخ داده است. همچنین در گوه محتمل گسیختگی واقع در پایین دست سد هم زمان با افزایش سطح تراز آب مخزن، مقادیر ضریب اطمینان دینامیکی و ضریب اطمینان کمینه رخ داده در حوزه زمان، روند صعودی داشته است (Shirdel, et al., 2011). افریشم و همکاران در سال ۲۰۲۴ به بررسی نحوه‌ی سد بتن غلتکی برای جلوگیری از درزهای ساخت پرداخته‌اند. سیمان در سازه‌های حجیم مانند سد به علت گیرش سریع اولیه، ایجاد درزهای سرد در سد می‌کند. بنابراین، زمان برنامه ریزی ساخت، طراحی سازه‌های وابسته و مقاوم سازی درزها باید مد نظر قرار گیرد (Afrisham et al., 2024).

در سال‌های اخیر، مطالعات بین‌المللی نشان داده‌اند که ارزیابی گزینه‌های مبتنی بر بتن غلتکی تنها بر پایه هزینه اولیه ساخت انجام نمی‌شود، بلکه معیارهایی مانند ارزیابی چرخه عمر^۳ و پایداری زیست‌محیطی نیز به عنوان شاخص‌های مهم تصمیم‌گیری مورد توجه قرار گرفته‌اند. به‌ویژه، تلفورد و همکاران (۲۰۲۵) نشان دادند که کاهش مصرف سیمان و استفاده از مواد جایگزین سیمان می‌تواند ضمن کاهش اثرات زیست‌محیطی، به بهبود پایداری کلی پروژه‌های بتن غلتکی کمک کند (Telford et al., 2025). اگرچه مطالعات متعددی به بررسی رفتار حرارتی، لرزه‌ای و مدل‌سازی عددی سدهای بتن غلتکی پرداخته‌اند، بیشتر این پژوهش‌ها بر عملکرد سازه‌ای این نوع سد متمرکز بوده‌اند و مقایسه هم‌زمان گزینه‌های مختلف سدسازی از دیدگاه فنی و اقتصادی در یک ساختگاه واحد کمتر مورد توجه قرار گرفته است. (Habib et al., 2021)

وضعیت کشور ایران چه از لحاظ داشتن شرایط لازم جهت اجرای پروژه‌های مشابه و چه از لحاظ شرایط اقتصادی، مناسب جایگزینی روش سدسازی بتن غلتکی به جای روش‌های متعارف در پروژه‌ها است. این تحقیق در راستای نیل به این هدف مهم و تلاش در ارائه تصویری شفاف‌تر و آشنایی با مزیت‌های فنی و اقتصادی استفاده از این روش صورت گرفته است.

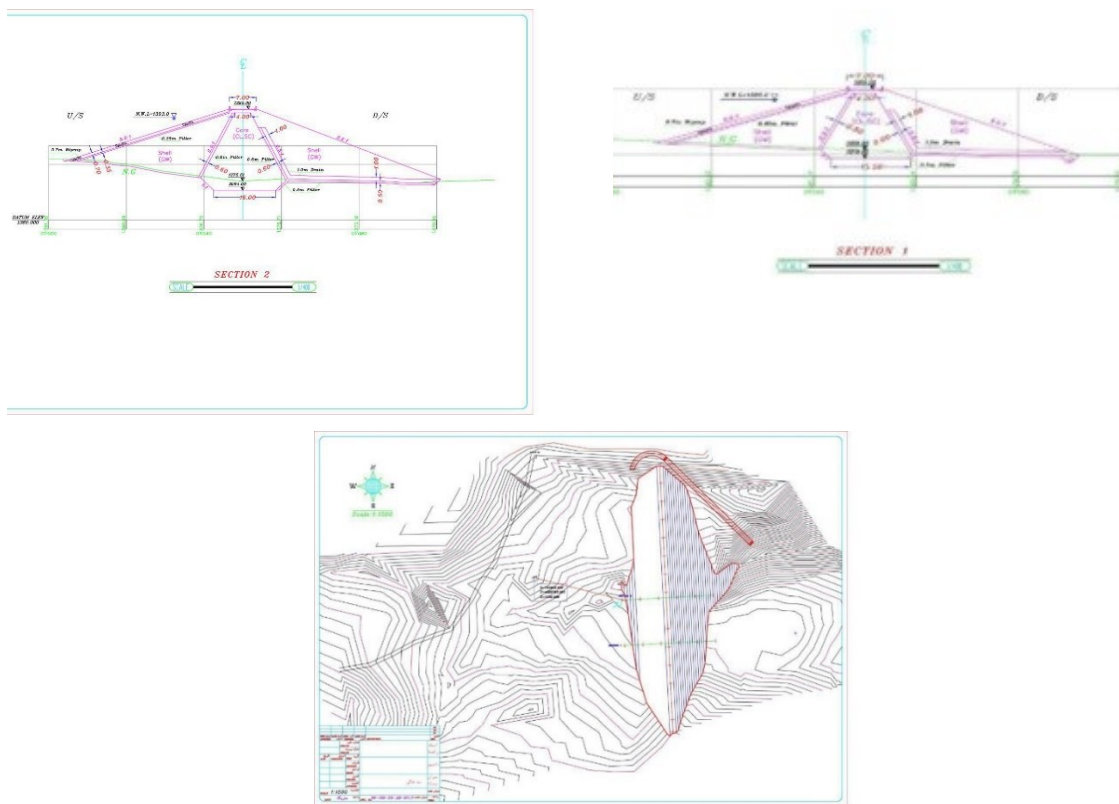
با وجود مطالعات متعدد در زمینه طراحی، تحلیل و ارزیابی اقتصادی انواع سدها، اغلب پژوهش‌های پیشین بر یک نوع سد یا صرفاً یکی از جنبه‌های فنی یا اقتصادی تمرکز داشته‌اند. همچنین در مطالعات موجود، مقایسه هم‌زمان سد خاکی، سد بتنی وزنی و سد بتن غلتکی در یک ساختگاه واقعی با شرایط توپوگرافی و ارتفاع یکسان و بر پایه آخرین فهرست بهای کشور، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا، نوآوری پژوهش حاضر در ارائه یک چارچوب مقایسه‌ای واقع‌بینانه برای ارزیابی هم‌زمان عملکرد فنی و اقتصادی این سه نوع سد در شرایط یکسان است. این رویکرد امکان مقایسه منصفانه گزینه‌های مختلف را فراهم کرده و می‌تواند به عنوان ابزاری برای تصمیم‌گیری در انتخاب نوع مناسب سد در پروژه‌های مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

۲- روش تحقیق

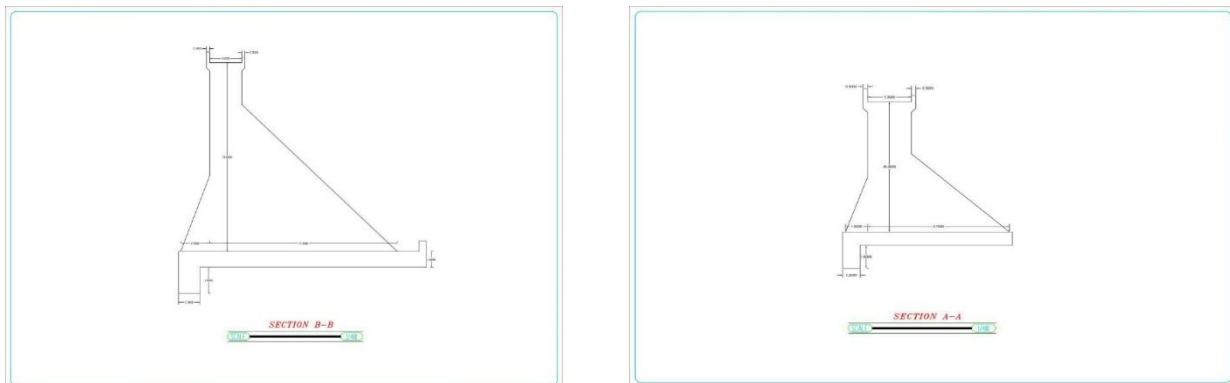
در این پژوهش، محل احداث سد در نزدیکی شهر مشکین شهر در استان اردبیل با سه سناریوی سد خاکی، بتنی وزنی و بتن غلتکی مورد مطالعه قرار گرفته که سد خاکی در همان محل و مشخصات توپوگرافی با ارتفاع در نظر گرفته شده در این

³ Life Cycle Assessment

پژوهش، اجرا شده است. این ساختگاه به دلیل وجود سد خاکی اجراشده، در دسترس بودن اطلاعات توپوگرافی، امکان طراحی سه گزینه مختلف تحت شرایط یکسان و مناسب بودن شرایط زمین‌شناسی برای انجام مطالعه مقایسه‌ای انتخاب شد. بنابراین در این پژوهش برای قیاس واقعی سه نوع سد با یکدیگر در واقعیت، سدها در همان منطقه‌ی خاص و توپوگرافی منحصر به فرد با ارتفاع‌های یکسان توسط نرم‌افزار تحلیل، طراحی شده و شکل‌های مربوطه ترسیم و نقشه‌ها برآورد عینی شده‌اند. به منظور دستیابی به یک مقایسه منصفانه، هر سه گزینه شامل سد خاکی، سد بتنی وزنی و سد بتن غلتکی با ارتفاع یکسان، شرایط توپوگرافی یکسان و هدف بهره‌برداری مشابه طراحی شدند. در تمامی گزینه‌ها، شرایط هندسی ساختگاه، تراز مخزن و الزامات عملکردی ثابت در نظر گرفته شد تا اختلاف نتایج صرفاً ناشی از تفاوت نوع سازه باشد و اثر سایر عوامل در مقایسه حذف گردد. در شکل ۱، پلان سد خاکی، نشان داده شده است. در شکل ۲، پلان و مقاطع سطح سد بتن وزنی با ارتفاع یکسان در محل مشخص نشان داده شده است. شکل ۳ نشان‌دهنده مقاطع و پلان سد بتن غلتکی در توپوگرافی و ارتفاع یکسان می‌باشد.

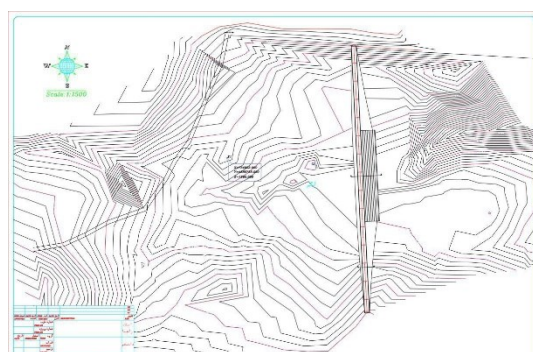
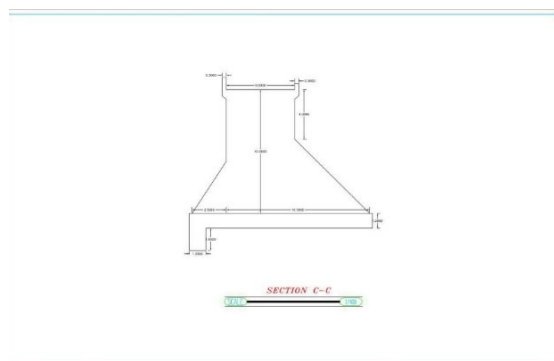
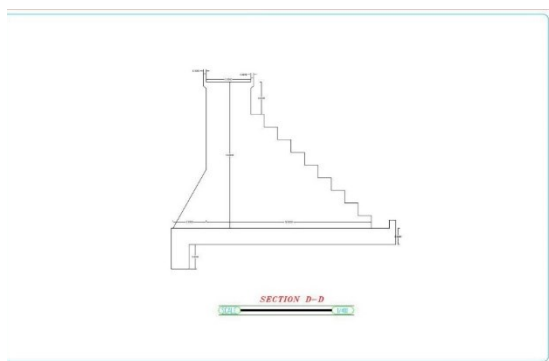


شکل ۱: پلان سد خاکی.





شکل ۲: پلان سد بتن وزنی.



شکل ۳: پلان سد بتن غلتکی.

امروزه با توجه به افزایش ساخت و ساز در دنیا در راستای افزایش جمعیت، مصرف مصالح ساختمانی افزایش چشمگیری داشته است. در این بین، بتن با توجه به مزایای بسیاری که دارد به عنوان یکی از مصالح مهم ساختمانی همواره مورد توجه بوده است. با توجه به هزینه‌های بالای ساخت و همچنین کمبود منابع از یک سو و مشکلات و مسائل زیست محیطی از سوی دیگر، محققین همواره به دنبال راهکارهایی جهت استفاده از مصالح ارزان و بی مصرف در ساخت بتن بوده اند. (Yilmaz et al., 2021). مصالح جدید می‌توانند در بتن به عنوان جایگزین سنگدانه و یا به عنوان جایگزین سیمان استفاده شوند. با توجه به اینکه گرانترین ماده‌ی استفاده شده در بتن سیمان است و از سوی دیگر تولید سیمان به عنوان یک عامل آلوده‌کننده‌ی محیط‌زیست شناخته می‌شود، مواد جایگزین سیمان از جایگاه ویژه‌ای برخوردارند. آنچه که در ترکیب بتن غلتکی بیشتر اهمیت دارد، استفاده از پوزولان به عنوان جایگزین بخشی از سیمان مورد استفاده در بتن است. که در مناطق مختلف ایران انواع

پوزولان‌ها با کیفیت‌های بالا موجود می‌باشد و در هر منطقه می‌توان بعد از انجام آزمایشات و بررسی‌های لازم، از این پوزولان‌ها در ساخت بتن غلتکی استفاده کنیم.

همچنین جهت اجرای پروژه در یک منطقه، نمونه‌های بتن غلتکی با استفاده از مصالح سنگی موجود تهیه و مورد آزمایش قرار می‌گیرد تا ترکیب اختلاط مناسب بتن با مصالح موجود به دست آمده و در اجرای سد مورد استفاده قرار گیرد. استفاده از پوزولان‌ها در بتن باعث کاهش تمایل مخلوط به آب انداختن و پدیده‌ی جدایی دانه‌ها و بهبود مشخصات پرداخت‌پذیری سطح و کاهش ابعاد لوله‌های مویینه در بتن می‌شوند. انتخاب صحیح نسبت‌های اختلاط بتن غلتکی حجیم یا سازه‌ای یک مرحله مهم در دستیابی به بتنی اقتصادی و بادوام است و باید در آزمایشگاه تحت نظر یک مهندس مواد با تجربیات آزمایشگاهی متعدد در مورد طرح‌های اختلاط بتن غلتکی و همچنین تجربیات کارگاهی صورت گیرد. طرح اختلاط بتن غلتکی به طور عمده‌ای تحت تاثیر عواملی چون دسترسی به مواد و مصالح، روش‌های حمل و نقل، سیستم تسمه نقاله، تجهیزات پخش و تراکم بتن قرار دارند. برای برآورد هزینه‌های سدها و مقایسه آن‌ها با هم، از فهرست بهای سدسازی سال ۱۴۰۴ استفاده شده است.

مفروضات برآورد هزینه‌ها

برآورد هزینه‌های اجرایی بر اساس فهرست بهای رشته سدسازی سال ۱۴۰۴ و با استفاده از مقادیر واقعی عملیات اجرایی استخراج‌شده از طراحی هر گزینه انجام شد. در تمامی برآوردها، نرخ‌های واحد، ضرایب مربوط به فهرست بها، هزینه تجهیز و برچیدن کارگاه، هزینه حمل مصالح و سایر ضرایب مورد نیاز مطابق ضوابط یکسان در نظر گرفته شد تا امکان مقایسه اقتصادی مستقیم بین گزینه‌ها فراهم شود. در ارزیابی اقتصادی، هزینه‌های مستقیم اجرای پروژه شامل عملیات خاکی، بتن‌ریزی، قالب‌بندی، حمل مصالح، چال‌زنی، تزریق، زهکشی و سایر عملیات اجرایی مطابق فهرست بها مورد بررسی قرار گرفت. مبنای مقایسه، هزینه کل اجرای هر گزینه بود و تمامی هزینه‌ها بر اساس قیمت‌های سال ۱۴۰۴ محاسبه شدند.

مقایسه هزینه بر اساس فهرست بهای سال ۱۴۰۴

در راستای مقایسه هزینه تمام شده پروژه‌های سدسازی با نگاهی واقع‌گرایانه و بر اساس واقعیت‌ها و شرایط حاکم در منطقه مورد مطالعه، در منطقه‌ای از شهرستان مشکین شهر واقع در استان اردبیل بعد از انجام تحقیق و بررسی‌های لازم برای مهار روان آب سطحی موجود در محل، سه نوع سد به صورت خاکی، بتنی وزنی و بتنی غلتکی طراحی و برای هر سه حالت ممکن، هزینه اجرای پروژه با فهرست بهای سدسازی سال ۱۴۰۴ در جداول ۱، ۲ و ۳ مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت (Heidari et al., 2013). در این برآورد کلیه احجام، فواصل حمل و سایر موارد موجود کاملاً منطبق بر واقعیت موجود در محل مورد نظر می‌باشد. در این پژوهش به علت حجم زیاد از ارائه ریز متره خودداری شده است. با توجه به جدول‌های فهرست بها، اعمال ضرایب بالاسری و منطقه‌ای و هزینه‌ی تجهیز و برچیدن کارگاه، نتایج نشان داد که سد خاکی ۵۷ درصد ارزان‌تر از سد بتن غلتکی و سد بتنی وزنی ۴۹،۵۸ درصد گران‌تر از سد بتن غلتکی است. با توجه به جدول شماره ۱، جمع کل فصل‌های به کار رفته در نوزده آیت از فهرست بها برای سد خاکی برای شش فصل، عملیات خاکی و تخریب، چال‌زنی، تزریق و دیوار آب‌بند، قالب‌بندی، کارهای بتنی، کارهای متفرقه و حمل، برابر با ۷۹۸،۳۰۳،۴۶۰ ریال می‌باشد.

جدول ۱: برگ مالی - (سد بتن خاکی).

فهرست بها	شرح عملیات	واحد	مقادیر کار انجام شده	بهای واحد (ریال)	مبلغ کل (ریال)
فصل اول: عملیات خاکی و تخریب					
۰۱۱۶۰۱	تهیه مصالح و اجرای پوسته از مصالح سنگی حاصل از معدن سنگ (Rock Fill)	مترمکعب	۱۳،۵۴۶،۹۸	۲،۴۱۳،۰۰۰	۴۶،۲۳۵،۸۴۲،۷۴۰
۰۱۱۷۰۲	تهیه مصالح و اجرای رس تماسی در تماس با بستر سنگی سد	مترمکعب	۲،۶۴۱،۹۳	۲،۱۳۲،۰۰۰	۵،۶۳۲،۵۹۴،۷۶۰

۴۳,۹۶۶,۲۶۶,۹۶۰	۱,۵۶۹,۰۰۰	۲۸,۰۲۱,۸۴	مترمکعب	تهیه مصالح و اجرای هسته رسی و بلانکت افقی سد	۰۱۱۷۰۳
۴,۴۷۴,۱۰۵,۰۹۰	۱۵۵,۵۰۰	۲۸,۷۷۲,۳۸	مترمکعب	کرت بندی و سایر تمهیدات لازم برای عمل آوری رس	۰۱۱۷۰۴
۱,۴۸۴,۶۵۴,۸۰۸	۵۱,۶۰۰	۲۸,۷۷۲,۳۸	مترمکعب	اضافه بها به ردیفهای ۰۱۱۷۰۱ تا ۰۱۱۷۰۳ در صورتی که برای کندن رس نیاز به استفاده از ریپر بولدوزر به قدرت بیش از ۲۵۱ اسب بخار باشد	۰۱۱۷۰۵
۱,۳۸۸,۲۷۷,۸۲۵۰	۲,۵۲۵,۰۰۰	۵,۴۹۸,۱۳	مترمکعب	تهیه مصالح و اجرای صافی (فیلتر) ریز دانه از مصالح رودخانه‌ای، با حداکثر اندازه دانه ۱۵ میلی‌متر.	۰۱۱۸۰۱
۱۱۵,۶۷۶,۲۴۲,۶۰۸	جمع فصل:				
فصل چهارم: چالزنی، تزریق و دیوار آب‌بند					
۱۲,۸۱۵,۷۱۴,۲۸۰	۳۹,۵۶۲,۰۰۰	۳۲۳,۹۴	تن	تهیه، نگهداری، عمل آوری و مصرف بنتونیت (برحسب وزن بنتونیت خشک)	۰۴۳۵۰۱
۱۲,۸۱۵,۷۱۴,۲۸۰	جمع فصل:				
فصل ششم: قالب‌بندی					
۱۶,۶۱۵,۱۳۴,۳۰۰	۵,۰۹۰,۰۰۰	۳,۲۶۴,۲۷	مترمربع	تهیه مصالح و قالب بندی از نوع F۱	۰۶۰۱۰۱
۱۶,۶۱۵,۱۳۴,۳۰۰	جمع فصل:				
فصل هفتم: کارهای بتنی					
۱۰,۹۳۱,۴۱۲,۶۰۰	۱۲,۳۹۶,۰۰۰	۸۸۱,۸۵	مترمکعب	تهیه مصالح و اجرای بتن رده I	۰۷۰۱۰۱
۱,۶۶۴,۶۷۱,۴۰۰	۱۰,۳۴۶,۰۰۰	۱۶۰,۹	مترمکعب	تهیه مصالح و اجرای بتن رده III	۰۷۰۳۰۱
۶۱۳,۳۵۹,۱۵۰	۴,۳۳۵,۰۰۰	۱۴۱,۴۹	مترمکعب	تهیه مصالح و اجرای بتن رده VII	۰۷۰۷۰۱
۲۸۴,۲۴۶,۶۰۰	۹۴۰,۰۰۰	۳۰۲,۳۹	مترمکعب	اضافه بها به ردیفهای اجرای انواع بتن اگر مصالح سنگی بتن از شکستن سنگ کوهی تهیه شود	۰۷۱۴۰۲
۲۸۴,۶۷۰,۷۵۰	۲۷۳,۰۰۰	۱,۰۴۲,۷۵	مترمکعب	اضافه بها به ردیفهای تهیه و اجرای بتن در صورت مصرف بتن در بتن مسلح	۰۷۲۲۰۱
۶,۱۳۱,۵۵۳,۶۰۰	۱۵,۸۵۲,۰۰۰	۳۸۶,۸	تن	تهیه سیمان نوع دو	۰۷۲۶۰۲
۳۷۹,۶۱۲,۸۰۰	۳۱۵,۰۰۰	۱,۲۰۵,۱۲	مترمربع	پرداخت نهایی سطوح بتنی از نوع U1	۰۷۲۷۰۱
۳۳۰,۸۴۹,۴۵۰	۲۳۵,۰۰۰	۱,۴۰۷,۸۷	مترمربع	تمیز کردن و آماده سازی سطوح حفاری شده برای بتن ریزی	۰۷۲۸۰۱
۲۰,۶۲۰,۳۷۶,۳۵۰	جمع فصل:				
فصل نهم: کارهای متفرقه					
۱۲۹,۰۰۰,۰۰۰	۱,۰۷۵,۰۰۰	۱۲۰	متر طول	تهیه و اجرای زهکش با لوله PVC مشبک به قطر تا ۲۰۰ میلی‌متر	۰۹۰۴۰۱
۵,۹۸۳,۵۷۶,۰۰۰	۱۱۳,۰۰۰	۵۲,۹۵۲	کیلو وات ساعت	تخلیه آب از محل‌های اجرای کار به وسیله انواع پمپ با هر توان	۰۹۰۸۰۱
۶,۱۱۲,۵۷۶,۰۰۰	جمع فصل:				
فصل دهم: حمل					
۷۹۸,۳۰۳,۴۶۰	۲۱,۴۰۰	۳۷,۳۰۳,۹	تن- کیلومتر	حمل انواع آهن‌آلات، سیمان و بنتونیت	۱۰۱۸۰۳-۰۵-۰۴
۷۹۸,۳۰۳,۴۶۰	جمع فصل:				
۱,۷۲۶۳۸۵۱۱	جمع کل:				

در جدول (۲)، با توجه به فهرست بهای سال ۱۴۰۴، هزینه‌ی کل ساخت سد بتن وزنی، با توجه به ۱۶ آیت از چهار فصل، قالب‌بندی، کارهای بتنی، کارهای متفرقه و حمل، از فهرست بهای سال ۱۴۰۴ برابر با ۷۹۸,۴۹۷,۰۰۰,۰۰۰ است.

جدول ۲: برگ مالی - (سد بتنی وزنی).

فهرست بها	شرح عملیات	واحد	مقادیر کار انجام شده	بهای واحد (ریال)	مبلغ کل (ریال)
فصل ششم: قالب‌بندی					
۰۶۰۱۰۲	تهیه مصالح و قالب‌بندی از نوع F۲	مترمربع	۱۰,۸۴۱	۴,۷۸۰,۰۰۰	۵۱,۸۱۹,۹۸۰,۰۰۰
۰۶۰۵۰۱	اضافه‌بها به ردیف‌های قالب‌بندی، اگر سطح قالب در یک محور دارای انحنا باشد	مترمربع	۹,۳۷۶	۲,۱۵۸,۰۰۰	۲۰,۲۳۳,۴۰۸,۰۰۰
۰۶۰۶۰۱	اضافه‌بها به ردیف‌های قالب‌بندی در صورتی که برای اجرای سازه‌هایی با شکل‌های خاص (مانند ترانزیشتنها، دیوارهای میانی سرریز، برجهای آبگیر و ...) استفاده از قالب‌های چوبی با قطعاتی با عرض کمتر از ۱۱ سانتی‌متر الزامی باشد	مترمربع	۹۳۷,۶	۳,۰۵۵,۰۰۰	۲,۸۶۴,۳۶۸,۰۰۰
۰۶۰۹۰۱		مترمربع	۱,۱۲۵,۱۲	۳۲۳,۰۰۰	۳۶۳,۴۱۳,۷۶۰
جمع فصل:					۷۵,۲۸۱,۱۶۹,۷۶۰
فصل هفتم: کارهای بتنی					
۰۷۰۱۰۱	تهیه مصالح و اجرای بتن رده I	مترمکعب	۱۴۶,۵	۱۲,۳۹۶,۰۰۰	۱,۸۱۶,۰۱۴,۰۰۰
۰۷۰۲۰۱	تهیه مصالح و اجرای بتن رده II	مترمکعب	۵,۳۹۷,۶	۸,۶۸۸,۰۰۰	۴۶,۸۹۴,۳۴۸,۸۰۰
۰۷۰۷۰۱	تهیه مصالح و اجرای بتن رده VII	مترمکعب	۴۰۵,۸۱	۴,۳۳۵,۰۰۰	۱,۷۵۹,۱۸۶,۳۵۰
۰۷۱۴۰۱	تهیه مصالح و اجرای بتن رده IV	مترمکعب	۴۴,۴۳۵,۷۹	۸,۴۲۱,۰۰۰	۳۷۴,۱۹۳,۷۸۷,۵۹۰
۰۷۱۴۰۲	اضافه‌بها به ردیف‌های اجرای انواع بتن اگر مصالح سنگی بتن از شکستن سنگ کوهی تهیه شود	مترمکعب	۵۰,۳۸۵,۱۶	۹۴۰,۰۰۰	۴۷,۳۶۲,۰۵۰,۴۰۰
۰۷۲۲۰۱	اضافه‌بها به ردیف‌های تهیه و اجرای بتن در صورت مصرف بتن در بتن مسلح	مترمکعب	۵,۵۴۳,۵۶	۲۷۳,۰۰۰	۱,۵۱۳,۳۹۱,۸۸۰
۰۷۲۶۰۲	تهیه سیمان نوع دو	تن	۱۵,۳۳۱,۸۶	۱۵,۸۵۲,۰۰۰	۲۴۳,۰۴۰,۶۴۴,۷۲۰
۰۷۲۷۰۲	پرداخت نهایی سطوح بتنی از نوع U2	مترمربع	۵۸۶	۴۱۵,۰۰۰	۲۴۳,۱۹۰,۰۰۰
۰۷۲۸۰۱	تمیز کردن و آماده سازی سطوح حفاری شده برای بتن ریزی	مترمربع	۱۴۸,۰۸	۲۳۵,۰۰۰	۳۴,۷۹۸,۸۰۰
جمع فصل:					۷۱۶,۸۵۷,۴۱۲,۵۴۰
فصل نهم: کارهای متفرقه					
۰۹۰۴۰۱	تهیه و اجرای زهکش با لوله PVC مشبک به قطر تا ۲۰۰ میلی‌متر	متر طول	۱۸	۱,۰۷۵,۰۰۰	۱,۹۳۵۰,۰۰۰
۰۹۰۸۰۱	تخلیه آب از محل‌های اجرای کار به وسیله انواع پمپ با هر توان	کیلو وات ساعت	۵۲,۹۵۲	۱۱۳,۰۰۰	۵,۹۸۳,۵۷۶,۰۰۰
جمع فصل:					۶,۰۰۲,۹۲۶,۰۰۰
فصل دهم: حمل					
۱۰۱۸۰۳-۰۵-۰۴	حمل انواع آهن‌آلات، سیمان و بنتونیت	تن- کیلومتر	۱۶,۵۹۹,۶	۲۱,۴۰۰	۳۵۵,۲۳۱,۴۴۰
جمع فصل:					۳۵۵,۲۳۱,۴۴۰
جمع کل:					۷,۹۸۴۹۷۵۱۱

با توجه به جدول (۳)، هزینه‌ی کل ساخت سد بتن غلتکی، با توجه به ۱۵ آیت از چهار فصل، قالب‌بندی، کارهای بتنی، کارهای متفرقه و حمل، از فهرست بهای سال ۱۴۰۴ برابر با ۴۰۲,۵۴۳,۰۰۰,۰۰۰ است.

جدول ۳: برگ مالی - (سد بتن غلتکی).

فهرست بها	شرح عملیات	واحد	مقادیر کار انجام شده	بهای واحد (ریال)	مبلغ کل (ریال)
فصل ششم: قالب‌بندی					
۰۶۰۱۰۲	تهیه مصالح و قالب‌بندی از نوع F۲	مترمربع	۲,۱۶۸,۲	۴,۷۸۰,۰۰۰	۱۰,۳۶۳,۹۹۶,۰۰۰
جمع فصل:					۱۰,۳۶۳,۹۹۶,۰۰۰
فصل هفتم: کارهای بتنی					
۰۷۰۱۰۱	تهیه مصالح و اجرای بتن رده I	مترمکعب	۱۴۶,۵	۱۲,۳۹۶,۰۰۰	۱,۸۱۶,۰۱۴,۰۰۰
۰۷۰۷۰۱	تهیه مصالح و اجرای بتن رده VII	مترمکعب	۴۳۰,۷۱	۴,۳۳۵,۰۰۰	۱,۸۶۷,۱۲۷,۸۵۰
۰۷۰۹۰۱	تهیه مصالح و اجرای بتن رده IX	مترمکعب	۲۸,۲۵۷,۷۶	۵۶۴۵,۰۰۰	۱۵۹,۵۱۵,۰۵۵,۲۰۰
۰۷۰۹۰۲	تهیه مصالح و اجرای بتن رده X	مترمکعب	۷,۱۹۹,۴۳	۶,۷۸۶,۰۰۰	۴۸,۸۵۵,۳۳۱,۹۸۰
۰۷۱۴۰۲	اضافه‌بها به ردیف‌های اجرای انواع بتن اگر مصالح سنگی بتن از شکستن سنگ کوهی تهیه شود	مترمکعب	۷,۳۴۵,۹۳	۹۴۰,۰۰۰	۶,۹۰۵,۱۷۴,۲۰۰
۰۷۱۵۰۲	اضافه‌بها به ردیف‌های تهیه و اجرای بتن برای مصرف پوزولان و خاکستر بادی	مترمکعب	۳۵,۴۵۷,۱۹	۲۲۳,۰۰۰	۷,۹۰۶,۹۵۳,۳۷۰
۰۷۱۷۰۱	اضافه‌بها به ردیف‌های تهیه و اجرای بتن در صورتی که MSA بزرگتر از ۳۸ میلی‌متر باشد برای MSA تا ۷۶ میلی‌متر یکبار، تا ۱۲۰ میلی‌متر ۲ بار و تا ۱۵۰ میلی‌متر ۳ بار	مترمکعب	۳,۵۴۵,۱۹	۲۹۷,۰۰۰	۱,۰۵۲,۹۲۱,۴۳۰
۰۷۲۲۰۱	اضافه‌بها به ردیف‌های تهیه و اجرای بتن در صورت مصرف بتن در بتن مسلح	مترمکعب	۳,۸۸۵,۱۸	۲۷۳,۰۰۰	۱,۰۶۰,۶۵۴,۱۴۰
۰۷۲۶۰۲	تهیه سیمان نوع دو	تن	۵,۳۹۵,۰۳	۱۵,۸۵۲,۰۰۰	۸۵,۵۲۲,۰۱۵,۵۶۰
۰۷۲۷۰۲	پرداخت نهایی سطوح بتنی از نوع U2	مترمربع	۵۸۶	۴۱۵,۰۰۰	۲۴۳,۱۹۰,۰۰۰
۰۷۲۸۰۱	تمیز کردن و آماده سازی سطوح حفاری شده برای بتن ریزی	مترمربع	۴,۳۰۷,۱	۲۳۵,۰۰۰	۱,۰۱۲,۱۶۸,۵۰۰
جمع فصل:					۳۱۵,۷۵۶,۶۰۶,۲۳۰
فصل نهم: کارهای متفرقه					
۰۹۰۴۰۱	تهیه و اجرای زهکش با لوله PVC مشبک به قطر تا ۲۰۰ میلی‌متر	متر طول	۲۰	۱,۰۷۵,۰۰۰	۲۱,۵۰۰,۰۰۰
۰۹۰۸۰۱	تخلیه آب از محل‌های اجرای کار به وسیله انواع پمپ با هر توان	کیلو وات ساعت	۵۲,۹۵۲	۱۱۳,۰۰۰	۵,۹۸۳,۵۷۶,۰۰۰
جمع فصل:					۶,۰۰۵,۰۷۶,۰۰۰
فصل دهم: حمل					
۱۰۱۸۰۳-۰۵-۰۴	حمل انواع آهن‌آلات، سیمان و بنتونیت	تن- کیلومتر	۳۲۹,۰۵۴۳	۲۱,۴۰۰	۷۰,۴۱۷,۶۱۰,۵۷۰
جمع فصل:					۷۰,۴۱۷,۶۱۰,۵۷۰

۳- نتایج و بحث

مزایای استفاده از بتن غلتکی

ویژگی کلیدی سد بتن غلتکی که آن را منحصر به فرد و مناسب جهت سدسازی می‌کند اقتصاد، عملکرد و سرعت بالای ساخت و ساز است. به طور کلی عمده این مزایا را می‌توان به شرح زیر بیان کرد.

هزینه‌ها

آمار تاریخی از هزینه اجرای سدهای بتن غلتکی، حاکی از هزینه واحد بسیار پایین این سازه‌ها در هر یارد مکعب در مقایسه با سدهای بتن وزنی می‌باشد. این تفاوت در درصد صرفه جویی به قیمت مصالح سنگی و مواد سیمانی، پیچیدگی عملیات بتن‌ریزی و حجم کلی بتن‌ریزی بستگی دارد. در سد بتن غلتکی امکان استفاده از پوزولان به جای قسمتی از سیمان وجود دارد و کاهش سیمان باعث کاهش حرارت هیدراسیون شده که باعث حذف لوله‌های خنک‌کننده بتن می‌گردد. در یک مقایسه ساده مقدار صرفه‌جویی در هزینه سیمان مصرفی در سدهای ساخته شده به روش بتن غلتکی با بتن وزنی قابل محاسبه و بررسی است. هزینه تخریب سنگ‌های هوازده، نوع و حجم سیمان مصرفی و دقت در اجرای شیب آب^۴ در سدهای بتنی وزنی هزینه‌بر است.

سرعت ساخت

سرعت ساخت مهم‌ترین عاملی است که باعث صرفه جویی در هزینه ساخت سد بتن غلتکی می‌گردد. سد گرینداستون با ارتفاع ۴۲ متر طی ۱۰ هفته کامل گردید. سد ویلوکریک با ۵۲ متر ارتفاع و ۵۴۳ متر طول با ۳۳۰۰۰۰ مترمکعب بتن‌ریزی در حدود یک سوم زمان تخمینی و هزینه‌ای معادل نصف دیگر سدهای بتنی مشابه به اتمام رسید. اساساً اجرای سدهای بتن غلتکی از هر جنبه‌ای که مربوط به مدت زمان اجرا شود، منجر به مزایای اقتصادی می‌گردد. در سدهای بتن غلتکی مصالح یکدست اجرا می‌شوند و نیازی به پوسته، فیلتر و زهکش نیست. در اجرای پروژه‌های بزرگ در داخل کشور ایران، هزینه‌ای که از بابت مبلغ تعدیل به پروژه پرداخت می‌شود درصد قابل ملاحظه‌ای از مبلغ صورت وضعیت پروژه با فهرست بهای پایه مورد توافق می‌باشد و این مبلغ در برخی از موارد که مدت اجرای پروژه افزایش می‌یابد برابر و یا حتی بیشتر از مبلغ خود صورت وضعیت با فهرست بهای پایه نیز می‌تواند باشد. مواردی که علاوه بر مسائل فنی اجرای پروژه، مشکلات عدم تامین مالی به موقع پروژه نیز می‌تواند به آن دامن بزند بدیهی است که با در نظر گرفتن این مسئله ضرورت توجه به سرعت عمل در اجرای پروژه‌ها امری اجتناب‌ناپذیر است که می‌تواند هزینه تمام شده پروژه‌ها را به طرز قابل توجهی پایین بیاورد. از دیدگاه اقتصادی، کاهش زمان ساخت تنها محدود به کاهش هزینه‌های مستقیم نیست، بلکه باعث کاهش ریسک تورم، تعدیل قراردادها، خواب سرمایه و هزینه‌های مدیریتی پروژه نیز می‌شود. بنابراین مزیت زمانی سدهای بتن غلتکی می‌تواند در اقتصاد کلان پروژه بسیار فراتر از هزینه‌های اولیه باشد. نتایج این بخش با گزارش‌های منتشرشده درباره سدهای بتن غلتکی در سطح بین‌المللی نیز همخوانی دارد. در بسیاری از پروژه‌های اجراشده، کاهش زمان اجرا به عنوان یکی از مهم‌ترین مزایای این نوع سد معرفی شده است. علت اصلی این موضوع، حذف بخش عمده قالب‌بندی، امکان اجرای لایه‌ای بتن و استفاده از ماشین‌آلات متداول راهسازی است که در پژوهش حاضر نیز به عنوان عوامل اصلی کاهش هزینه و زمان ساخت شناسایی شدند.

سادگی اجرا

هر کدام از لایه‌هایی که روزانه به صورت افقی ریخته می‌شوند شبیه به هم بوده، بنابراین روش ساخت تکراری و ساده می‌گردد. در اجرای سد به روش بتن غلتکی، امکان استفاده از ماشین‌آلاتی از قبیل بولدوزر و غلتک‌های لرزاننده فراهم می‌باشد.

⁴ Water slope

لذا تعداد کارگران ماهر کاهش یافته و روش ساخت تکراری است. برای اجرای سدهای بتن وزنی، نیاز به کابل کشی برای حمل بتن، قالب بندی، لوله گذاری برای خنک کاری بتن حجیم و نیروی متخصص است. همچنین در سدهای بتنی وزنی، باید از ابزارهای دقیق بیشتری برای جلوگیری از درزها و نشست بلوکها نسبت به هم استفاده شود. در سدهای خاکی از دو فیلتر با دانه بندی های مختلف استفاده می شود که دقت در آزمایش های دانه بندی هر لایه و اجرای آنها مورد نیاز می باشد.

کاهش سدهای انحرافی و فرازبندها

سدهای بتن غلتکی مزایای اقتصادی فراوانی را در انحراف مسیر رودخانه در حین اجرای سد ارائه می دهند و نیز آسیب های ناشی از مغروق شدن و روگذری سیلاب در فرازبندها را به حداقل می رسانند. با کوتاه تر شدن دوره اجرا، احتمال وقوع سیلاب های بزرگتر کمتر شده و بنابراین اندازه تونل انحراف و ارتفاع فرازبندها در مقایسه با سدهای خاکی و سدهای اجرا شده با بتن وزنی کاهش می یابد. این سازه ها ممکن است به جای اینکه برای سیلاب طرح سالیانه طراحی شوند برای سیلاب طرح فصلی طراحی شوند.

دوام

دوام بتن غلتکی به عواملی همچون مقاومت، مقدار موادمسیمانی، کیفیت سنگدانه ها و درصد تراکم بستگی دارد. در صورت استفاده از سنگدانه های سخت و متراکم و انتخاب مناسب نوع و مقدار مواد سیمانی، بتن غلتکی مقاومت بالایی را در برابر سایش⁵ و فرسایش⁶، واکنش قلیایی سنگدانه ها⁷ و تهاجم سولفاته از خود نشان می دهد. با این وجود، مقاومت بتن غلتکی در برابر آب های مهاجم، مواد شیمیایی، گازها و آبشستگی⁸ مولفه های محلول در آب اصولاً تابعی از نفوذپذیری بتن است و نظر به اینکه مخلوط های بتن غلتکی کم سیمان با مقدار مواد سیمانی پایین طراحی و اجرا می شوند، نسبتاً نفوذپذیر خواهند بود. اغلب برای دوام مخلوط های بتن غلتکی کم سیمان که در بدنه داخلی سد مورد استفاده قرار گرفته اند، از مخلوط های پر سیمان در نواحی خارجی بدنه سد، اتصال رویه های بتن وزنی، غشاهای آب بند⁹ و گاه اجرای مقاطع عرضی بزرگتر از مقطع طراحی شده¹⁰ (که در این حالت تخریب قسمتی از مقطع عرضی سازه مجاز شناخته می شود) استفاده می شود.

یافته های این پژوهش با نتایج ایلماز و کارتال در سال ۲۰۲۱ نیز همسو است. آنان نشان دادند که عملکرد مناسب بتن غلتکی در برابر عوامل محیطی و دوام قابل قبول آن، این نوع سد را به گزینه ای مناسب برای پروژه های بلندمدت تبدیل می کند. نتایج پژوهش حاضر نیز نشان می دهد که علاوه بر مزیت اقتصادی، ویژگی های فنی و دوام مناسب، استفاده از سدهای بتن غلتکی را نسبت به گزینه های متداول توجیه پذیرتر می سازد.

امکان ساخت سرریز و سایر سازه های جنبی پیوسته با بدنه سد

همانند سدهای اجرا شده با بتن وزنی، احداث سرریزها در بدنه سدهای بتن غلتکی امکان پذیر می باشد. بر این اساس یک طرح نوعی، امکان تخلیه جریان از بالای تاج سد و هدایت آن از طریق رویه پایین دست سدهای بتن غلتکی میسر می باشد. از سوی دیگر سرریز سدهای خاکی عموماً در یک انتهای سد و در نزدیکی یکی از تکیه گاه های جانبی آن و یا در مجاورت یک گردنه زین اسبی طبیعی ساخته می شود. برای پروژه هایی که جهت کنترل کیفیت آب یا رسوب گذاری مخزن به آبیگر چند ترازه نیاز دارند، سازه آبیگر به آسانی می تواند به وجه بالادست سد بتن غلتکی مهار شود. در حالیکه در سدهای خاکی مجرای آبیگر بصورت یک برج مستقل خود ایستا خواهد بود که در مخزن سد و یا کناره های مخزن احداث می شود.

مقایسه اقتصادی انواع سدها

⁵ Abrasion

⁶ Erosion

⁷ Alkali-aggregate reactivity

⁸ Leaching

⁹ Membrane

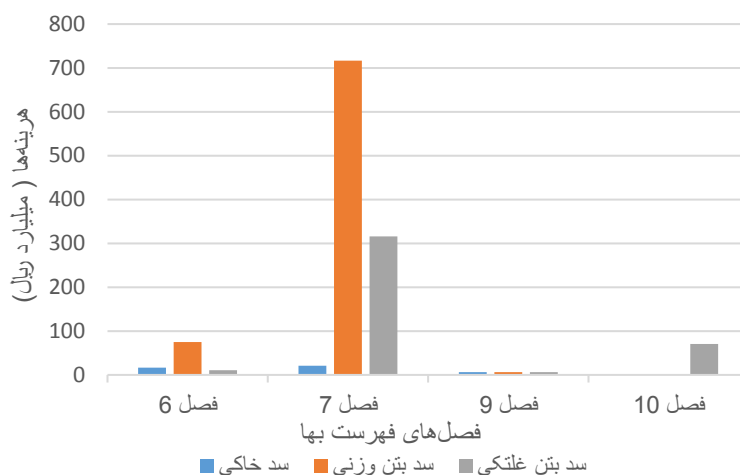
¹⁰ Oversized section

به منظور ارزیابی اقتصادی سه گزینه مورد مطالعه، نتایج برآورد هزینه‌های اجرایی سد خاکی، سد بتنی وزنی و سد بتن غلتکی بر اساس فهرست بهای سال ۱۴۰۴ مورد مقایسه قرار گرفت. خلاصه هزینه‌های اجرایی در جدول (۴) ارائه شده است. همچنین توزیع هزینه‌ها در فصل‌های مختلف فهرست‌بها در شکل (۴) و مقایسه هزینه کل ساخت سه نوع سد در شکل (۵) نشان داده شده است. مطابق جدول (۴)، هزینه اجرای سد بتن غلتکی برابر ۴۰۲,۵۴۳ میلیارد ریال و هزینه اجرای سد بتنی وزنی برابر ۷۹۸,۴۹۷ میلیارد ریال برآورد شد. نتایج نشان داد که استفاده از سد بتن غلتکی موجب ۴۹,۵۸ درصد صرفه‌جویی اقتصادی نسبت به سد بتنی وزنی گردید. همچنین هزینه اجرای سد خاکی برابر ۱۷۲,۶۳۸ میلیارد ریال بود که به ترتیب ۵۷ و ۷۸ درصد کمتر از سد بتن غلتکی و سد بتنی وزنی برآورد شد.

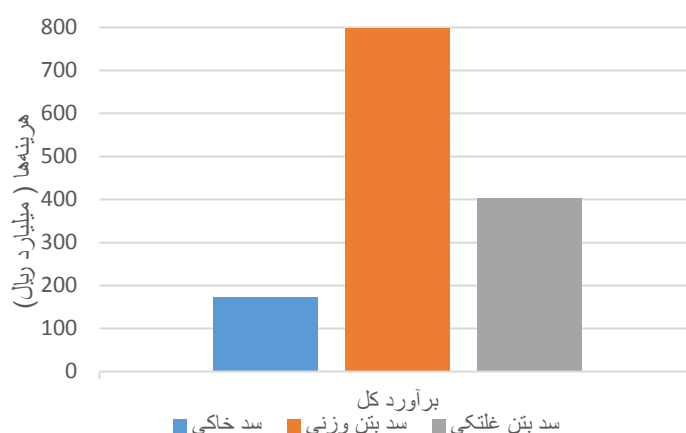
این نتایج با مطالعات میرزایی و حیدری (۲۰۱۴)، حبیب و همکاران (۲۰۲۱) و تلفورد و همکاران (۲۰۲۵) نیز همخوانی دارد. مطالعه میرزایی و حیدری در سال ۲۰۱۴ نیز نشان داد که استفاده از بتن غلتکی به دلیل کاهش حجم سیمان، حذف بخش عمده قالب‌بندی و افزایش سرعت اجرا، موجب کاهش قابل توجه هزینه‌های ساخت نسبت به سدهای بتنی متعارف می‌شود (Mirzaei and Heidari (2014). همچنین نتایج ارائه‌شده توسط راهنمای طراحی سدهای بتن غلتکی سازمان برنامه و بودجه نیز بر اقتصادی بودن این نوع سدها در پروژه‌های بزرگ تأکید دارد (Program and Budget Organization of Iran, 2001). با این حال، در پژوهش حاضر مقایسه در یک ساختگاه واقعی و تحت شرایط یکسان برای هر سه گزینه انجام شده است که امکان ارزیابی منصفانه‌تری نسبت به مطالعات پیشین فراهم می‌کند.

جدول ۴: خلاصه برگ مالی - رشته سدسازی سال ۱۴۰۴.

شرح فصول	سد خاکی	سد بتنی وزنی	سد بتنی غلتکی
فصل اول: عملیات خاکی و تخریب	۱۱,۵۶۷,۶۲۴۲,۶۰۸	-	-
فصل چهارم: چالزنی، تزریق و دیوار آب‌بند	۱۲,۸۱۵,۷۱۴,۲۸۰	-	-
فصل ششم: قالب‌بندی	۱۶,۶۱۵,۱۳۴,۳۰۰	۷۵,۲۸۱,۱۶۹,۷۶۰	۱۰,۳۶۳,۹۹۶,۰۰۰
فصل هفتم: کارهای بتنی	۲۰,۶۲۰,۳۷۶,۳۵۰	۷۱۶,۸۵۷,۴۱۲,۵۴۰	۳۱۵,۷۵۶,۶۰۶,۲۳۰
فصل نهم: کارهای متفرقه	۶,۱۱۲,۵۷۶,۰۰۰	۶,۰۰۲,۹۲۶,۰۰۰	۶,۰۰۵,۰۷۶,۰۰۰
فصل دهم: حمل	۷۹۸,۳۰۳,۴۶۰	۳۵۵,۲۳۱,۴۴۰	۷۰,۴۱۷,۶۱۰,۵۷۰
جمع فصول	۱۷۲,۶۳۸,۰۰۰,۰۰۰	۷۹۸,۴۹۷,۰۰۰,۰۰۰	۴۰۲,۵۴۳,۰۰۰,۰۰۰
مقدار صرفه‌جویی اقتصادی سد خاکی نسبت به سد بتن غلتکی		٪۵۷	
مقدار صرفه‌جویی اقتصادی سد بتن غلتکی نسبت به سد بتنی		٪۴۹,۵۸	
مقدار صرفه‌جویی اقتصادی سد خاکی نسبت به سد بتنی		٪۷۸	



شکل ۴: مقایسه هزینه ساخت سدها با توجه به فصل های فهرست بها.



شکل ۵: مقایسه هزینه ساخت سدها.

۴- نتیجه گیری

- در محل مورد مطالعه شهرستان مشگین شهر، هزینه اجرای سد بتن غلتکی برابر ۴۰۲,۵۴۳ میلیارد ریال و هزینه اجرای سد بتنی وزنی برابر ۷۹۸,۴۹۷ میلیارد ریال برآورد شد. بنابراین در شرایط این مطالعه، استفاده از سد بتن غلتکی موجب ۴۹,۵۸ درصد صرفه جویی اقتصادی نسبت به سد بتنی وزنی گردید.
- هزینه اجرای سد خاکی برابر ۱۷۲,۶۳۸ میلیارد ریال برآورد شد که ۵۷ درصد کمتر از سد بتن غلتکی و ۷۸ درصد کمتر از سد بتنی وزنی بود. با این حال، در شرایط بررسی شده در این تحقیق، سد بتن غلتکی از نظر شاخص های فنی عملکرد مناسب تری نسبت به سد خاکی داشت.
- نتایج این پژوهش با مطالعات داخلی و بین المللی همخوانی دارد؛ با این حال، میزان صرفه جویی اقتصادی و برتری فنی سدهای بتن غلتکی به شرایط زمین شناسی، توپوگرافی، مشخصات هندسی و شرایط اجرایی هر پروژه وابسته است و نتایج این مطالعه باید در چارچوب ساختگاه مورد بررسی تفسیر شود.
- استفاده از پوزولان و کاهش مصرف سیمان در بتن غلتکی موجب کاهش هزینه اجرا و افزایش توجیه اقتصادی این نوع سد گردید.
- نتایج نشان داد استفاده از ماشین آلات راهسازی و کاهش عملیات قالب بندی موجب افزایش سرعت اجرای سدهای بتن غلتکی در مقایسه با سدهای بتنی وزنی شد.

- ارزش افزوده این پژوهش ارائه یک روش مقایسه‌ای مبتنی بر شرایط واقعی اجرا است که امکان ارزیابی همزمان عملکرد فنی و اقتصادی سه گزینه اصلی سدسازی را فراهم می‌کند. برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین که تنها یک نوع سد یا صرفاً جنبه‌های سازه‌ای یا اقتصادی را بررسی کرده‌اند، در این پژوهش تمامی گزینه‌ها در یک ساختگاه واحد، با شرایط هندسی و توپوگرافی یکسان و بر اساس آخرین فهرست بهای کشور ارزیابی شدند.
- نتایج این پژوهش می‌تواند به عنوان یک مرجع اولیه در مطالعات امکان‌سنجی و انتخاب نوع سد در پروژه‌هایی با شرایط توپوگرافی، زمین‌شناسی و اقتصادی مشابه مورد استفاده قرار گیرد.
- لازم به ذکر است که نتایج این پژوهش بر اساس شرایط یک ساختگاه مشخص، مشخصات هندسی انتخاب‌شده و پارامترهای اقتصادی مبتنی بر فهرست بهای سال ۱۴۰۴ به دست آمده است. بنابراین، تغییر در عواملی نظیر شرایط زمین‌شناسی، ارتفاع سد، ویژگی‌های هیدرولوژیکی، فاصله حمل مصالح، قیمت مصالح و سیاست‌های اجرایی می‌تواند بر نتایج اقتصادی و حتی انتخاب گزینه بهینه تأثیرگذار باشد. از این‌رو، تعمیم نتایج این مطالعه به سایر پروژه‌ها باید با در نظر گرفتن شرایط هر ساختگاه و انجام مطالعات اختصاصی صورت گیرد.
- این پژوهش دارای محدودیت‌هایی است که باید در تفسیر نتایج مورد توجه قرار گیرد. نخست، مقایسه سه گزینه سدسازی تنها برای یک ساختگاه مشخص با شرایط توپوگرافی، زمین‌شناسی و هیدرولوژیکی معین انجام شده است؛ بنابراین نتایج ممکن است برای سایر مناطق با شرایط متفاوت قابل تعمیم مستقیم نباشد. همچنین، ارزیابی اقتصادی بر اساس فهرست بهای سال ۱۴۰۴ انجام شده است و تغییر قیمت مصالح، هزینه حمل، نرخ تورم و سایر شرایط اقتصادی می‌تواند بر نتایج مقایسه اقتصادی تأثیر بگذارد. علاوه بر این، در این پژوهش تمرکز بر هزینه‌های اجرای پروژه بوده و هزینه‌های بهره‌برداری، نگهداری، تعمیرات و هزینه‌های چرخه عمر سازه مورد بررسی قرار نگرفته است.
- پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، این مقایسه برای ساختگاه‌هایی با شرایط زمین‌شناسی، توپوگرافی و اقلیمی متفاوت نیز انجام شود تا قابلیت تعمیم نتایج افزایش یابد. همچنین، بررسی اثر ارتفاع سد، نوع مصالح در دسترس، فاصله حمل مصالح، تغییرات قیمت در دوره‌های زمانی مختلف و تحلیل هزینه‌های چرخه عمر (شامل بهره‌برداری، نگهداری و تعمیرات) می‌تواند دیدگاه جامع‌تری در انتخاب نوع مناسب سد ارائه دهد. استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و تحلیل حساسیت اقتصادی نیز می‌تواند به افزایش دقت ارزیابی‌ها در مطالعات آینده کمک کند.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

مراجع

- Afrisham, A. H., Saeedi-Amrollah, J., & Tajdini, M. (2024). The role of materials in the structural foundation of roller-compacted concrete dams. *25th National Conference on Civil Engineering, Architecture, and Urban Development*, Shirvan, Iran. <https://civilica.com/doc/2198570> (In Persian)
- Asadi, E., Beirami, N., Salami, E., & Gahremannezhad Alanjaghi, R. (2023). Numerical analysis of the optimal cross-section with various shapes in roller-compacted concrete dams by comparing stress and strain by ABAQUS software. *Iranian Water Engineering Research*, Vol 3, Issue 3. <https://civilica.com/doc/2417740> (In Persian)
- Asadi, E., Beirami, N., Salami, E., & Gahremannezhad Alanjaghi, R. (2025). Numerical Analysis of the Optimized Cross-Section of Roller-Compacted Concrete Dams Using the Finite Element Method. *The Journal of Hydraulics and Water Science*, Vol 35, Issue 2, <https://civilica.com/doc/2489259> (In Persian)
- Ehsani Zoonuz, E., & Motavalli Kohneshahri, A. (2008). Roller-compacted concrete in dam construction: Based on the U.S. Army Corps of Engineers guidelines. (In Persian)
- Fatehipour, A., & Aram, A. (2022). Two- and three-dimensional settlement modeling using instrumentation data in earth dams. *Environmental Sciences and Geography*, 3(1), 110–124. <https://civilica.com/doc/1871455> (In Persian)

Habib, A., Al Hour, A., Habib, M., Elzokra, A. A., & Yıldırım, U. (2021). Structural Performance and Finite Element Modeling of Roller Compacted Concrete Dams: A Review. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 18(4). <https://doi.org/10.1590/1679-78256467>

Heidari, A., Tavakoli, D., & Hayati Pileh Roud, S. (2013). Investigation of using Tabriz pumice as a partial replacement for cement in concrete. *1st National Conference on Building Materials and New Technologies in Construction*, Yazd, Iran. <https://civilica.com/doc/252108> (In Persian)

Ministry of Energy. (2025). *Basic unit price list for dam construction (Year 1404)*. (In Persian)

Mirzaei, M., & Heidari, Z. (2014). A study of construction methods and cost comparison of roller-compacted concrete dams with earth dams. *1st National Congress on Construction Engineering and Project Evaluation*, Gorgan, Iran. <https://civilica.com/doc/256677> (In Persian)

Office of Water and Wastewater Engineering Standards, Ministry of Energy. (2014). Criteria for selection of design flood for large dams of Iran (Publication No. 378). (In Persian)

Ojhaa, P. N., Singh, B., Prakash, S., Singh, P., Mandre, M. K., & Kumar, S. (2022). Effect of high ratio fly ash on roller compacted concrete for dam construction. *Research on Engineering Structures and Materials*, 8(2), 233–251. <https://doi.org/10.17515/resm2022.374ma1216>

Plizzari, G. A. (1998). On the influence of uplift pressure in concrete gravity dams. *Engineering Fracture Mechanics*, 52(3), 253–267.

Program and Budget Organization of Iran. (2001). Inspection guidelines for large dams (Publication No. 216). (In Persian)

Program and Budget Organization of Iran. (2016). Design guidelines for roller-compacted concrete gravity dams (Regulation No. 723). (In Persian)

Shirdel, M., Ghanbari, A., & Davoudi, M. (2011). Effect of reservoir water level on the seismic behavior of earth dams (Case study: Masjed Soleyman Dam). *1st National Conference on Civil Engineering, Architecture, and Urban Development*, Iran. <https://civilica.com/doc/2180293> (In Persian)

Supervisory Deputy for Technical Systems. (2013). Technical specifications for dams (Publication No. 399). Ministry of Energy, Office of Water and Wastewater Technical Standards. (In Persian)

Telford, A., Rengaraju, S., Mohammed, H., Nassar, A. I. M., & Al-Tabbaa, A. (2025). Life Cycle Analysis of Low Carbon Roller Compacted Concrete Pavements. In C. McNally, P. Carroll, B. Martinez-Pastor, B. Ghosh, M. Efthymiou, & N. Valantasis-Kanellos (Eds.), *Transport Transitions: Advancing Sustainable and Inclusive Mobility* (Lecture Notes in Mobility, pp. 747–753). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-95284-5_104

Yilmaz, D., & Kartal, M. E. (2021). Structural response and damage evaluation of Melen RCC dam considering creep effects. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(23), Article 2616.