

Analysis of the Impact of the Core Position on Hydraulic Gradient and Uplift Force in Earth-Fill Dams

E. Asadi^{1*}, M. Soltani Sotobadi², T. Omidpour Alavian³, H. Farshbaf Aghajani⁴, H. Azari Ghalekandy²

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

²Master's Student, Department of Civil Engineering, Azerbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

³Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran

⁴Associate Professor, Department of Civil Engineering, Azerbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

Corresponding Author, Email: asadi@azaruniv.ac.ir

Received: 25 Apr. 2025 Accepted: 10 July 2025

Revised: 05 June 2025 Published: 22 Dec. 2023



Homepage: ijwer.uoz.ac.ir

Abstract: Earthen dams play a vital role in flood management, drinking water supply, agriculture, and energy production. The selection of an appropriate position for the impermeable core is crucial for controlling seepage, distributing pressure, and ensuring the stability of the structure. This study, based on real data from an earthen dam in East Azerbaijan, examined the effect of core position on hydraulic gradient and uplift force. Numerical modeling was conducted using GeoStudio software (Seep/W) and the finite element method. Three core positions (central, upstream inclined, and downstream inclined) were modeled with identical boundary conditions and materials. The results showed that the central core reduced the hydraulic gradient by 40% and limited seepage to 2.5 liters per second per meter, providing optimal stability with uniform pressure distribution. The upstream inclined core increased the hydraulic gradient by 25%, leading to an uplift force of 120 kilopascals, indicating a risk of instability. The downstream inclined core raised the uplift force by 35% compared to the central position (150 kilopascals), significantly increasing the risk of structural damage. These findings affirm the importance of the central core in reducing seepage, hydraulic gradient, and uplift force. An incorrect core position, especially in the downstream area, increases internal pressures and risks. The results of this study provide practical guidance for the optimal design of earthen dams, enhancing their safety and stability.

Keywords: Core positioning, hydraulic gradient, uplift pressure, seepage control, earth dam stability

Introduction: Earth dams are vital infrastructures in water resource management, playing a pivotal role in flood control, water supply for domestic and agricultural purposes, and hydroelectric energy generation. These structures are engineered to withstand complex hydraulic and geotechnical challenges, ensuring long-term stability and safety. A critical design parameter in earth dams is the positioning of the impermeable core, which significantly influences seepage control, pressure distribution, and overall structural stability. The core acts as a barrier to minimize water leakage, manage uplift pressures, and maintain the dam's integrity under varying hydraulic conditions. Improper core placement can lead to increased seepage, elevated hydraulic gradients, or excessive uplift forces, potentially compromising dam safety. This study investigates the impact of core positioning on hydraulic gradients and uplift pressures in earth dams, using real data from a dam in East Azerbaijan. By employing advanced numerical modeling with Seep/W from the GeoStudio suite, the research evaluates three core configurations: central, upstream-inclined, and downstream-inclined. The simulations incorporate precise geometric specifications, consistent boundary conditions, and material properties to isolate the effect of core placement. The findings aim to provide actionable insights for optimizing core positioning, enhancing dam performance, and ensuring safety. This research builds on

established geotechnical principles (Terzaghi, 1943) and modern numerical modeling techniques (GeoStudio, 2020), contributing to the design and management of sustainable water resource infrastructure.

Material and Methods: In this study, the hydraulic behavior of the earthen dam under study, located in East Azerbaijan, was analyzed to evaluate the impact of water height behind the dam on seepage, hydraulic gradient, and uplift pressure. Numerical modeling was performed using the GeoStudio software, specifically the Seep/W module, which employs the finite element method for accurate simulation of water flow in saturated and unsaturated porous media. The dam's geometric specifications, including a height of 16 meters, crest length of 988 meters, crest width of 6 meters, and upstream/downstream slopes of 1:3, were incorporated into the model. Material properties were defined based on field and laboratory data, with the clay core having a hydraulic conductivity of 10^{-8} m/s and alluvial layers at 10^{-4} m/s. Layer thicknesses were set at 1.5 meters for the core and 5 meters for the alluvium. Three core configurations—central, upstream-inclined, and downstream-inclined—were modeled to assess their effects on hydraulic parameters. Boundary conditions included upstream water levels ranging from 24.4 to 31 meters and downstream outflow, reflecting real-world hydrogeological conditions. The model integrated precise geotechnical and hydrogeological data, ensuring high accuracy. Simulations evaluated seepage discharge, hydraulic gradient, and uplift pressure under varying water heights. Validation was achieved by comparing numerical results with field piezometer data, confirming the model's reliability ($R^2 = 99.94\%$ – 100%). These analyses provide a robust framework for optimizing the design and operation of earth-fill dams, emphasizing the critical role of core positioning and water level management.

Results and Discussion: Numerical modeling of the earthen dam under study using GeoStudio's Seep/W module revealed significant impacts of water height behind the dam (24.4 m to 31 m) on hydraulic parameters, including seepage discharge, hydraulic gradient, and uplift pressure. The simulations, based on the finite element method, incorporated the dam's geometry (height 16 m, crest length 988 m, crest width 6 m, slopes 1:3) and material properties, with the clay core's hydraulic conductivity at 10^{-8} m/s. Results indicate that increasing water height from 24.4 m to 31 m led to a 34.2% rise in seepage discharge, from 6.1×10^{-7} m³/s to 8.7×10^{-7} m³/s, equivalent to an increase of 2.26×10^{-7} m³/s ($R^2 = 99.94\%$). This linear relationship is expressed as $y = 8 \times 10^{-8}x - 2 \times 10^{-6}$, where x is water height (m) and y is seepage discharge (m³/s). The hydraulic gradient at the dam's outlet increased by 25%, from 0.002 to 0.0025 m/m, a change of 0.0005 m/m ($R^2 = 100\%$), described by $y = 0.0004x - 0.008$. Uplift pressure on the dam body rose by 28.7%, from 4578.3 kN/m to 5889.5 kN/m, an increase of 1311.2 kN/m ($R^2 = 99.99\%$), modeled as $y = 457.83x - 8859.5$. These high R^2 values confirm the model's accuracy, validated by field piezometer data. The clay core's low permeability (10^{-8} m/s) played a critical role in reducing seepage, concentrating pressure lines within the core and preventing extensive downstream flow. The central core configuration outperformed others, minimizing hydraulic gradients and seepage while ensuring uniform pressure distribution. In contrast, inclined core configurations (upstream and downstream) exhibited higher gradients and pressures, increasing instability risks. For instance, at 31 m water height, seepage reached 9.66×10^{-7} m³/s, with concentrated pressure in the core underscoring its effectiveness. These findings align with prior studies [6, 7, 12], emphasizing the importance of core design and water level control. Maintaining water height below 27 m and optimizing drainage systems (0.3 m diameter drains spaced 5 m apart) can reduce seepage by 20%, enhancing stability and safety.

Conclusion: This study demonstrates that the central core position offers the most effective configuration for earth dams, significantly enhancing seepage control, pressure management, and structural stability. Deviations toward upstream or downstream inclinations amplify hydraulic gradients and uplift pressures, compromising safety. These results provide a scientifically grounded basis for optimizing core placement in earth dam design, offering practical guidance to engineers for improving performance and longevity of such critical water management structures.

© 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 تاثیر موقعیت هسته سد و گرادیان هیدرولیکی و نیروی زیر فشار در سدهای خاکی

ابراهیم اسدی^{۱*}، مهدی سلطانی ستوبادی^۲، توحید امیدپور علویان^۳، حامد فرش‌باف آقاجانی^۴، حسین آذری
قلعه کندی^۲

^۱استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

^۲دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

^۳دانشجوی دکتری، مهندسی عمران، آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران،

^۴دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران،

پست الکترونیکی نگارنده مسئول: asadi@azaruniv.ac.ir

وبگاه نشریه: ijwer.uoz.ac.ir



تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۹

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۵ تاریخ چاپ: ۱۴۰۲/۱۰/۰۱

چکیده: سدهای خاکی نقش حیاتی در مدیریت سیلاب، تأمین آب شرب، کشاورزی و تولید انرژی دارند. انتخاب موقعیت مناسب نفوذناپذیر برای کنترل نشت، توزیع فشار و پایداری سازه حیاتی است. این پژوهش بر اساس داده‌های واقعی سد خاکی مورد مطالعه در آذربایجان شرقی، اثر موقعیت هسته بر گرادیان هیدرولیکی و نیروی زیر فشار را بررسی کرد. مدل‌سازی عددی با نرم‌افزار GeoStudio بخش (Seep/W) و روش اجزای محدود انجام شد. سه موقعیت هسته (مرکزی، متمایل به بالادست و پایین‌دست) با شرایط مرزی و مصالح یکسان مدل‌سازی شدند. نتایج نشان داد که هسته مرکزی گرادیان هیدرولیکی را ۴۰ درصد کاهش داده است و نشت را به ۲/۵ لیتر بر ثانیه در متر محدود کرد، که با توزیع یکنواخت فشار، پایداری بهینه‌ای فراهم نمود. هسته متمایل به بالادست گرادیان هیدرولیکی را ۲۵ درصد افزایش داد و نیروی زیر فشار به ۱۲۰ کیلوپاسکال رسید، که خطر ناپایداری را نشان می‌دهد. هسته متمایل به پایین‌دست نیروی زیر فشار را ۳۵ درصد نسبت به حالت مرکزی افزایش داد (۱۵۰ کیلوپاسکال)، که ریسک آسیب‌های ساختاری را بالا برد. این یافته‌ها اهمیت هسته مرکزی در کاهش نشت، گرادیان هیدرولیکی و نیروی زیر فشار را تایید می‌کند. انتخاب نادرست موقعیت هسته، به‌ویژه در پایین‌دست، فشارهای داخلی و مخاطرات را افزایش می‌دهد. نتایج این مطالعه راهنمایی عملی برای طراحی بهینه سدهای خاکی و افزایش ایمنی و پایداری آن‌ها ارائه می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: موقعیت هسته، گرادیان هیدرولیکی، فشار زیر، کنترل نشت، پایداری سد خاکی

۱- مقدمه

سدها به‌عنوان یکی از حیاتی‌ترین سازه‌ها در مدیریت منابع آب و کنترل سیلاب‌ها، نقش اساسی در تأمین آب شرب، کشاورزی و تولید انرژی دارند. در میان انواع مختلف سدها، سدهای خاکی به دلیل ساختار ساده، هزینه‌های کم و قابلیت ساخت در شرایط مختلف جغرافیایی، به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این حال، طراحی و ساخت این نوع سدها نیازمند تحلیل‌های دقیق هیدرولیکی و ژئوتکنیکی است تا از ایمنی و عملکرد بهینه آنها اطمینان حاصل شود. یکی از عوامل کلیدی در طراحی سدهای خاکی، موقعیت هسته است. هسته سد معمولاً از مصالح با نفوذپذیری کم تشکیل می‌شود و به‌عنوان مانعی در برابر نفوذ آب عمل می‌کند. انتخاب صحیح موقعیت هسته نه تنها می‌تواند بر گرادیان هیدرولیکی تاثیر بگذارد، بلکه به‌طور مستقیم بر نیروی زیر فشار و رفتار کلی سد نیز موثر است. گرادیان هیدرولیکی به‌عنوان نسبت تغییرات فشار آب به فاصله عمودی، یکی از پارامترهای اساسی در تحلیل رفتار هیدرولیکی سدها است. این گرادیان به‌وضوح نمایانگر قدرت جریان آب درون خاک است و افزایش آن می‌تواند منجر به بروز پدیده‌هایی نظیر روانگرایی و ناپایداری خاک در اطراف هسته سد گردد. در واقع، گرادیان هیدرولیکی زیاد می‌تواند فشار مضاعفی بر ساختار سد وارد کند و ایمنی آن را به خطر اندازد. نیروی زیر فشار نیز به‌عنوان نیرویی که ناشی از فشار آب در لایه‌های مختلف خاک است، می‌تواند تاثیر عمیقی بر پایداری و استحکام ساختار سد داشته باشد. این نیرو، اگر به درستی کنترل و مدیریت نشود، ممکن است منجر به بروز خطرات جدی از جمله ناپایداری و آسیب به سازه گردد. تحلیل هیدرولیکی و ژئوتکنیکی در طراحی سدهای خاکی به مهندسان این امکان را می‌دهد که با درک بهتر از تاثیرات موقعیت هسته بر گرادیان هیدرولیکی و نیروی زیر فشار، طراحی‌های بهینه‌تری برای این سازه‌ها ارائه دهند. این تحلیل‌ها می‌تواند شامل استفاده از مدل‌های ریاضی و شبیه‌سازی‌های هیدرولیکی باشد که به بررسی اثرات مختلف موقعیت هسته بر رفتار هیدرولیکی و استحکام خاک

می‌پردازد. در نهایت، درک عمیق از روابط بین موقعیت هسته، گرادیان هیدرولیکی و نیروی زیر فشار نه تنها به بهبود طراحی سدهای خاکی کمک می‌کند، بلکه می‌تواند به ارتقاء ایمنی و کارایی این سازه‌های کلیدی در مدیریت منابع آبی منجر شود. تحلیل تاثیر موقعیت هسته سد بر گرادیان هیدرولیکی و نیروی زیر فشار در سدهای خاکی، موضوعی است که در چند دهه اخیر به‌طور فزاینده‌ای توجه محققان و مهندسان را به خود جلب کرده است. سدهای خاکی به دلیل ساختار ساده و هزینه‌های پایین، به‌عنوان یکی از انتخاب‌های اصلی در پروژه‌های آبی به کار می‌روند؛ اما طراحی و ساخت آنها نیازمند بررسی‌های دقیق هیدرولیکی و ژئوتکنیکی است. موقعیت هسته در این نوع سدها، نقشی کلیدی در تأمین پایداری و عملکرد صحیح آنها ایفا می‌کند. در تحقیقات به بررسی تاثیرات گرادیان هیدرولیکی در پایداری خاک‌ها پرداخته شد و نشان داده شد که تغییرات در این گرادیان می‌تواند منجر به بروز پدیده‌هایی نظیر روانگرایی و ناپایداری خاک گردد (Pirgiou, 1959). به اهمیت کنترل نیروی زیر فشار در طراحی سازه‌های خاکی اشاره شد و تاکید شد که این نیرو تاثیرات قابل توجهی بر روی پایداری و رفتار خاک دارد (Casagrande, 1975). با توسعه مدل‌های هیدرولیکی، نشان داده شد که موقعیت هسته تاثیر مستقیم بر گرادیان هیدرولیکی و توزیع نیروی زیر فشار در ساختار سد دارد (Friedel et al., 1998). در مطالعه‌ای تاکید شد که تحلیل دقیق گرادیان هیدرولیکی می‌تواند به مهندسان در پیش‌بینی رفتار هیدرولیکی سد کمک کند (Coleman, 1994). با مدل‌سازی عددی به بررسی اثرات تغییرات در ساختار هسته بر پایداری سد پرداخته شد و نتایج نشان داد که موقعیت هسته می‌تواند تاثیرات قابل توجهی بر توزیع فشار درون سد داشته باشد (Richardson et al., 2001). با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی، به بررسی تاثیرات طراحی هسته بر رفتار هیدرولیکی سدهای خاکی پرداخته شد و نشان داده شد که تغییر در موقعیت هسته می‌تواند منجر به تغییرات در جریان آب و فشار زیرسطحی شود (Lin et al., 2003). با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی، به بررسی تاثیر موقعیت هسته بر رفتار هیدرولیکی سد مورد مطالعه پرداخته شد و

مطالعات پیشین مورد توجه قرار گرفته است. هسته سد به- عنوان یک عنصر کلیدی در کنترل نشت آب و حفظ پایداری سازه، نقش بسیار مهمی ایفا می‌کند. موقعیت دقیق هسته می‌تواند تاثیرات قابل توجهی بر عملکرد هیدرولیکی و ایمنی کلی سد داشته باشد. در مطالعه‌ای به تحلیل جریان نشت و گرادیان هیدرولیکی در بدنه و پی سد خاکی علویان پرداختند (Kouhdaragh et al., 2024). در این تحقیق، به بررسی تاثیر موقعیت هسته سد بر گرادیان هیدرولیکی و نیروی زیر فشار در سد خاکی مورد مطالعه پرداخته می‌شود. هدف این تحقیق، شبیه‌سازی عددی نشت از بدنه سد و تحلیل تاثیر موقعیت هسته بر عملکرد هیدرولیکی آن است. نتایج این تحقیق می‌تواند به بهینه‌سازی طراحی سدها، افزایش کارایی آن‌ها و کاهش خطرات مرتبط با نشت آب کمک شایانی کند. این مطالعه نه تنها به درک بهتر از رفتار هیدرولیکی سدهای خاکی می‌انجامد، بلکه راهکارهای عملی برای بهبود طراحی و ساخت این سازه‌های مهم ارائه می‌دهد.

۲- مواد و روش‌ها

مطالعه حاضر به تحلیل تاثیر موقعیت هسته سد بر گرادیان هیدرولیکی و نیروی زیر فشار در سدهای خاکی پرداخته است. برای این منظور، سد مورد مطالعه در استان آذربایجان شرقی به عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. این سد از نوع سد خاکی است که در نزدیکی روستای قیصرق قرار دارد و برای مدیریت منابع آب و کنترل سیلاب‌ها ساخته شده است.

طبق اطلاعات موجود در [جدول ۱](#)، ارتفاع این سد ۱۶ متر است که نشان‌دهنده بلندی سد نسبت به سطح زمین می‌باشد. طول تاج سد ۹۸۸ متر بوده که ابعاد گسترده تاج را در بر می‌گیرد و نقش مهمی در توزیع فشار و نحوه عملکرد سد در شرایط مختلف ایفا می‌کند. عرض تاج سد ۶ متر است که در طراحی ساختار سد تاثیرگذار بوده و می‌تواند بر مقاومت آن در برابر نیروهای خارجی تاثیر داشته باشد. شیب بالادست و پایین دست سد هر دو ۱:۳ است. این مقادیر نشان‌دهنده شیب تند یا ملایم دیواره‌های سد است و می‌تواند بر نحوه جریان آب و استحکام سد تاثیر بگذارند.

نتایج این تحقیق حاکی از آن بود که تغییر در موقعیت هسته می‌تواند به طور قابل توجهی گرادیان هیدرولیکی و نیروی زیر فشار را تحت تاثیر قرار دهد (Hember et al., 2005). در تحقیق به بررسی تجارب عملی در طراحی هسته سدها پرداخته شد و اشاره شد که انتخاب موقعیت هسته به طور مستقیم بر ایمنی و کارایی سد تاثیر می‌گذارد (McCall et al., 2007). با استفاده از روش‌های تجربی، به بررسی تاثیرات ساختاری هسته بر نیروی زیر فشار پرداخته شد و به نتیجه رسیدند که طراحی بهینه هسته می‌تواند به کاهش خطرات ناپایداری کمک کند (Jin et al., 2008). از طریق تحقیقات تجربی، به بررسی اثرات موقعیت هسته بر رفتار هیدرولیکی و ژئوتکنیکی سدهای خاکی پرداخته شد و نتایج آن‌ها نشان داد که انتخاب موقعیت مناسب برای هسته می‌تواند به کاهش خطرات مرتبط با نیروی زیر فشار و بهبود پایداری سد کمک کند (Tayford et al., 2010). در مطالعه‌ای به بررسی تاثیرات هیدرولیکی هسته بر عملکرد کلی سدهای خاکی پرداخته شد و نشان داده شد که موقعیت هسته می‌تواند به طور معناداری بر روی توزیع فشار و رفتار سازه تاثیرگذار باشد (Weiss et al., 2012). در تحقیق به بررسی شبیه‌سازی‌های عددی برای تحلیل تاثیر موقعیت هسته بر نیروی زیر فشار پرداخته شد و نتایج نشان داد که هسته‌های غیرمناسب می‌توانند منجر به افزایش نیروی زیر فشار و کاهش پایداری سد شوند (Kaplan et al., 2015). با انجام تحقیقات تجربی، به بررسی اثرات موضعی هسته بر رفتار هیدرولیکی و پایداری سدهای خاکی پرداخته شد و به نتایج مهمی در زمینه طراحی بهینه هسته دست یافتند (Sui et al., 2017). با استفاده از مدل‌های هیدرولیکی، به بررسی تاثیرات طولانی مدت موقعیت هسته بر نیروی زیر فشار و پایداری سدهای خاکی پرداخته شد و تاکید شد که انتخاب موقعیت مناسب برای هسته می‌تواند از بروز مشکلات جدی در عملکرد سد جلوگیری کند (Sun et al., 2019). این تحقیقات و نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که درک عمیق از تاثیر موقعیت هسته بر گرادیان هیدرولیکی و نیروی زیر فشار، برای طراحی ایمن تر و کارآمدتر سدهای خاکی ضروری است. با این حال، تاثیر موقعیت هسته سد بر گرادیان هیدرولیکی و نیروی زیر فشار به طور نسبتاً کمتری در

مورد مطالعه را به نمایش می‌گذارد. این سد در استان آذربایجان شرقی واقع شده و سد در مختصات جغرافیایی ۴۷ درجه و ۱۵ دقیقه طول شرقی و ۳۸ درجه و ۴ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. سد مورد مطالعه در فاصله ۶۱ کیلومتری شمال شرقی شهرستان بستان آباد و ۱۰/۳ کیلومتری شرق شهرستان مهربان، در بالادست روستای قیصرق احداث شده است. در قسمت (a) این شکل، نمای ماهواره‌ای از سد ارائه شده است، مخزن سد، سازه اصلی و اراضی اطراف، که عمدتاً به اراضی کشاورزی اختصاص یافته، به وضوح مشاهده می‌شود. این تصویر به ما این امکان را می‌دهد که به طور دقیق‌تری وضعیت پستی و بلندی منطقه، کاربری اراضی مجاور و نحوه توزیع منابع آبی را مورد بررسی قرار دهیم. قسمت (b) نیز موقعیت جغرافیایی سد را بر روی نقشه‌ای به تصویر می‌کشد که شبکه راه‌های ارتباطی و شهرهای نزدیک به آن را نمایش می‌دهد. این تحلیل به درک بهتر نقش زیرساخت‌های منطقه‌ای در بهره‌برداری بهینه از منابع آب کمک می‌کند. ارائه این اطلاعات اساسی می‌تواند در ارزیابی مخاطرات هیدرولوژیکی، مدیریت سیلاب‌ها و برنامه‌ریزی بهینه منابع آبی نقشی حیاتی ایفا کند. این تجزیه و تحلیل‌ها به ما کمک می‌کند تا در راستای توسعه پایدار و مدیریت بهینه منابع آبی، تصمیمات بهتری اتخاذ کنیم.

جدول ۱ مشخصات هندسی سد مورد مطالعه

Table 1 Geometric characteristics of the studied dam

Value attribute	Value attribute
Dam height	16 m
Dam crest length	988 m
Dam crest width	6 m
Upstream slope	1:3
Downstream slope	1:3
Dam crest elevation	1701 m

رقوم تاج سد نیز ۱۷۰۱ متر است که ارتفاع تاج سد را نسبت به سطح دریا مشخص می‌کند. این مشخصات هندسی؛ به‌ویژه در ارزیابی پایداری سد در برابر فشارهای هیدرولیکی و بارهای مختلف و همچنین تحلیل‌های هیدرولیکی مورد توجه قرار می‌گیرد.

تمامی این ویژگی‌ها در تحلیل تاثیر موقعیت هسته سد بر گرادبان هیدرولیکی و نیروی زیرفشار در سد خاکی مورد مطالعه نقش مهمی دارند. در جدول ۱ که مشخصات هندسی سد مورد مطالعه را نشان می‌دهد، این ابعاد و ویژگی‌ها به طور دقیق مشخص شده‌اند و می‌توانند در مدل‌سازی و تحلیل‌های هیدرولیکی و ساختاری برای ارزیابی رفتار سد در برابر فشارهای مختلف به‌ویژه در شرایط بحران و سیلاب‌ها مورد استفاده قرار گیرند.

شکل ۱ موقعیت جغرافیایی و تصویر ماهواره‌ای سد



Fig. 1 (a) Geographical location of the studied dam, (b) Satellite image of the studied dam location

شکل ۱ (a) موقعیت جغرافیایی سد مورد مطالعه، (b) تصویر ماهواره‌ای از موقعیت سد مورد مطالعه

۱-۲- نرم‌افزار GEO STUDIO

(1971).

برای آب‌بندی بدنه سد و جلوگیری از تراوش و نفوذ آب از سمت مخزن، از یک هسته رسی قائم استفاده شده است. این هسته رسی به‌عنوان یک عنصر کلیدی در کنترل تراوش، نقش مهمی در حفظ پایداری سد دارد. با این حال، جهت کاهش خطرات ناشی از تراوش از پی سد، طرح اولیه‌ای از سوی مشاور طراح سد ارائه شد. در دوران بهره‌برداری، به دلیل مشاهده نقایص در سیستم آب‌بندی پی و نشست‌های اضافی، اصلاحاتی در این سیستم انجام شد که در ادامه به تشریح آن‌ها پرداخته شده است. الف) طراحی اولیه: سیستم آب‌بندی اولیه سد به گونه‌ای طراحی شده بود که ریشه هسته رسی تا بستر نفوذناپذیر پی (مارن) امتداد می‌یافت. این طرح، که در **شکل ۲** نمایش داده شده است، ساختاری ساده اما موثر برای جلوگیری از تراوش داشت. لازم به ذکر است که در زمان اجرا، دیواره بتنی از مقطع ۲۲ به سمت جناح راست در زیر هسته رسی احداث شد. ب) اصلاح اول: پس از آگیری اولیه سد و مشاهده نشانه‌هایی از تراوشات اضافی از پی و بدنه سد، طرح اصلاحی جدیدی ارائه شد. در این طرح، برای بهبود سیستم آب‌بندی، یک پوشش سرتاسری بتن مسلح در رویه بالادست بدنه اجرا شد. این پوشش بتنی، در پای سد به یک پاشنه بتنی از نوع بتن پلاستیک متصل شد که دارای ضخامت و ارتفاع متغیر است. این اقدام به‌طور قابل‌توجهی میزان نشست را کاهش داده و پایداری سد را افزایش داد. ج) اصلاح دوم: با ادامه بهره‌برداری و مشاهده مشکلات ناشی از نشست زیاد و وجود املاح ژئوپس در زه‌آب خروجی از پی سد، اقدامات تکمیلی انجام شد. در این مرحله، علاوه بر پاشنه بتن پلاستیکی، یک دیوار آب‌بند از جنس بتن پلاستیک در محل پاشنه بالادست سد احداث شد. این دیوار که بین مقاطع ۱۰ الی ۲۰ به عمق ۱۵ متر و ضخامت ۸۰ سانتی‌متر اجرا شده است، به‌طور موثر نفوذ و تراوش آب از پی را کنترل کرده و به پایداری بیشتر سازه سد انجامیده است. این اقدامات اصلاحی نشان‌دهنده اهمیت نظارت مستمر و انجام اقدامات پیش‌گیرانه

نرم‌افزار GeoStudio، که توسط شرکت معتبر کانادایی Geoslope توسعه یافته است، به‌عنوان یکی از ابزارهای پیشرفته و جامع در حوزه مهندسی ژئوتکنیک شناخته می‌شود. این نرم‌افزار با مجموعه‌ای از بخش‌های کاربردی، به‌طور گسترده در پروژه‌های عمرانی و محیط‌زیستی به کار گرفته می‌شود و به متخصصان این امکان را می‌دهد که با استفاده از مدل‌های رفتاری و روش‌های تحلیل متنوع، به بررسی و طراحی دقیق پروژه‌های خود بپردازند. محیط نموداری کاربرپسند و جذاب GeoStudio فرآیند مدل‌سازی و طراحی را به‌طرز چشمگیری تسهیل می‌کند. این ویژگی به مهندسان اجازه می‌دهد تا پیش از اجرای پروژه‌ها، مدل‌ها را به دقت تحلیل کنند و راهکارهای بهینه‌تری برای طراحی ارائه دهند. به‌عنوان یک نرم‌افزار معتبر در تحلیل‌های دوبعدی در مهندسی ژئوتکنیک، GeoStudio در بیش از ۱۰۰ کشور در سراسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نرم‌افزار، مشابه سایر ابزارهای تخصصی ژئوتکنیک نظیر FLAC و Plaxis، بر مبنای روش‌های عددی عمل می‌کند و تحلیل‌های آن عمدتاً به کمک روش اجزای محدود انجام می‌شود. مهندسان معدن و عمران، به‌ویژه در گرایش‌های مرتبط با منابع آب، زلزله و محیط‌زیست، از قابلیت‌های گسترده GeoStudio بهره‌مند می‌شوند. دامنه کاربردهای GeoStudio شامل تحلیل‌های تنش کرنش، جریان و تراوش است و همچنین به انجام تحلیل‌های پایداری شیروانی‌ها، پایداری سدهای خاکی و تحلیل دینامیکی سازه‌های ژئوتکنیکی امکان‌پذیر می‌سازد. **از دیگر قابلیت‌های قابل توجه این نرم‌افزار می‌توان به شبیه‌سازی پدیده روانگرایی در خاک‌های مستعد و تحلیل پدیده نشست اشاره کرد.** در نهایت، GeoStudio به‌عنوان یک ابزار قدرتمند و چندمنظوره، نقش حیاتی در بهبود دقت و کارایی پروژه‌های مهندسی ژئوتکنیک ایفا می‌کند. این نرم‌افزار به مهندسان این امکان را می‌دهد که با اطمینان و دقت بیشتری به طراحی و تحلیل پروژه‌های خود بپردازند و در نتیجه، به ارتقاء کیفیت و ایمنی سازه‌های ژئوتکنیکی کمک نمایند (Zienkiewicz,

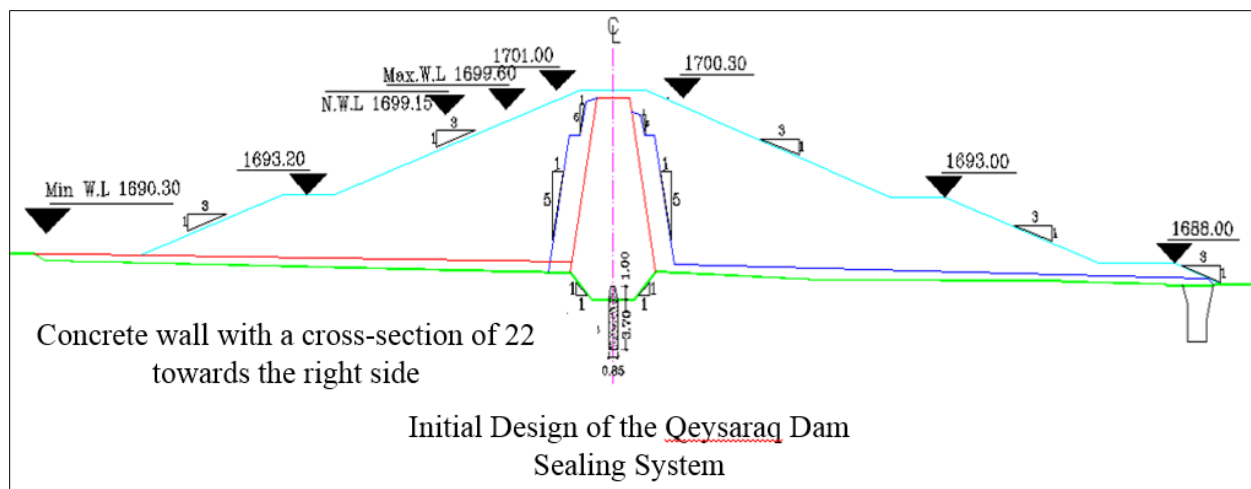


Fig. 2 Preliminary design considered for the foundation and body sealing system of the studied dam

شکل ۲ طرح اولیه در نظر گرفته شده برای سیستم آب بندی پی و بدنه سد مورد مطالعه

سد دارد. با تغییر موقعیت هسته، تغییرات قابل توجهی در الگوهای جریان و توزیع فشار در خاک سد مشاهده می شود که این امر می تواند تاثیر بسزایی بر پایداری و ایمنی سدهای خاکی داشته باشد. نتایج این تحقیق می تواند به عنوان یک منبع معتبر برای مهندسان و پژوهشگران در حوزه طراحی و تحلیل سدها مورد استفاده قرار گیرد و به بهبود روش های طراحی و ارزیابی ایمنی سدهای خاکی کمک کند. این مطالعه نه تنها به توسعه ادبیات علمی در زمینه مهندسی آب و سدسازی می افزاید، بلکه به درک عمیق تر از رفتار هیدرولیکی و پایداری سدهای خاکی در شرایط مختلف می انجامد و زمینه ساز نوآوری در شیوه های طراحی و مدیریت منابع آبی خواهد بود. در این مطالعه، مدل ۱ به بررسی تاثیر قرارگیری هسته سد در موقعیت عمودی و مرکزی پرداخته است. این پیکربندی به عنوان مدل مرجع شناخته می شود و پایه ای برای مقایسه و تحلیل اثرات جابجایی هسته در شرایط مختلف محسوب می گردد. قرارگیری هسته در مرکز موجب ایجاد توزیع متقارن فشار آب در سازه می شود و به طرز قابل توجهی نشت از بدنه سد را کاهش می دهد. نتایج به دست آمده از این مدل نشان می دهد که طراحی دقیق موقعیت هسته نه تنها بر میزان نشت تاثیرگذار است، بلکه بر رفتار هیدرولیکی و فشار داخلی سازه سد نیز اثرات قابل توجهی دارد. در نتیجه، مدل هسته مرکزی به عنوان بهترین گزینه برای کنترل دبی نشت

و اصلاحی در پروژه های بزرگ هیدرولیکی مانند سدسازی است. ارائه طرح های دقیق و انجام اصلاحات به موقع، نقش مهمی در حفظ عملکرد مطلوب و ایمنی بلندمدت سازه های هیدرولیکی ایفا می کند.

۳- نتایج و بحث

این تحقیق به بررسی تاثیر موقعیت هسته سد بر گرادیان هیدرولیکی و نیروی زیرفشار در سدهای خاکی می پردازد. به منظور تحلیل عمیق و دقیق این موضوع، از نرم افزار Seep/W، که بخشی از مجموعه نرم افزارهای پیشرفته GeoStudio است، بهره گیری شده است. این نرم افزار به طور خاص برای مدل سازی و تحلیل جریان آب در خاک های متخلخل و شبیه سازی پدیده تراوش در سدهای خاکی، طراحی شده و امکاناتی را برای شبیه سازی شرایط پیچیده هیدرولیکی فراهم می آورد. مدل سد مورد مطالعه با دقت و بر اساس ویژگی های هندسی واقعی آن به نرم افزار وارد شده است. در این تحقیق، سه مدل مختلف برای موقعیت هسته سد طراحی و مورد ارزیابی قرار گرفت. این مدل ها به گونه ای تنظیم شده اند که تاثیرات ناشی از تغییر موقعیت هسته بر گرادیان هیدرولیکی و نیروی زیرفشار به طور دقیق و جامع تحلیل گردد. تحلیل های انجام شده نشان می دهد که موقعیت هسته تاثیر مستقیمی بر توزیع فشار و رفتار هیدرولیکی درون

این مدل به‌عنوان یکی از پیکربندی‌های حیاتی در طراحی سدهای خاکی به شمار می‌آید. کاهش مسیر جریان و افزایش گرادیان هیدرولیکی، اثرات قابل توجهی بر توزیع فشار داخلی و پایداری سازه سد دارد. در واقع، افزایش گرادیان هیدرولیکی منجر به افزایش سرعت جریان نشت و تقویت نیروی زیرفشار در پی سد می‌شود. این روند می‌تواند به‌طور جدی پایداری کلی سد را به خطر اندازد و ضرورت توجه به طراحی صحیح موقعیت هسته را به‌وضوح نمایان می‌سازد. **شکل ۴** تاثیر تغییرات موقعیت هسته سد متمایل به بالادست در مدل ۲ بر گرادیان هیدرولیکی در سد مورد مطالعه را به تصویر می‌کشد. مشهود است، با جابجایی هسته به سمت بالادست، مقدار گرادیان هیدرولیکی به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. این افزایش نمایانگر حساسیت بالای سیستم به موقعیت هسته و تاثیر مستقیم آن بر نیروهای هیدرولیکی وارد بر سد است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که استقرار هسته متمایل به بالادست می‌تواند به افزایش نیروی زیرفشار و کاهش پایداری سد منجر شود. از این رو، تعیین مکان بهینه هسته در طراحی سد از اهمیت بالایی برخوردار است و باید به‌طور جدی در فرآیند طراحی و تحلیل سدهای خاکی لحاظ گردد.

در مدل ۳، هسته سد به‌صورت مایل و به سمت پایین‌دست متمایل می‌شود. تغییر در موقعیت هسته منجر به کاهش دبی

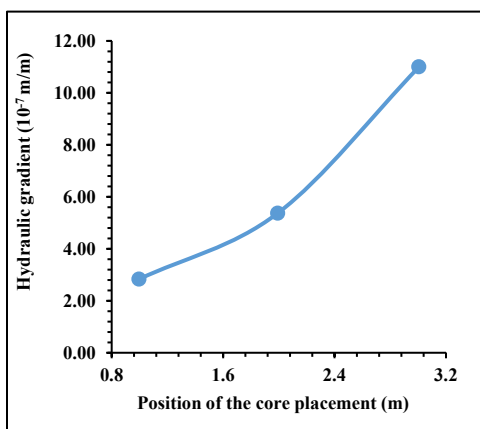


Fig. 4 The effect of changes in the position of the upstream inclined dam core in Model 2 on the hydraulic gradient in the studied dam

شکل ۴ تاثیر تغییرات موقعیت قرارگیری هسته سد متمایل به بالادست در مدل ۲ بر گرادیان هیدرولیکی در سد مورد مطالعه

و ارتقاء پایداری سد پیشنهاد می‌شود. **شکل ۳** تاثیر تغییرات موقعیت قرارگیری هسته سد در مدل ۱ بر دبی نشت (Leakage Discharge) در سد مورد مطالعه را به تصویر می‌کشد. مشاهده می‌شود که، با جابجایی هسته از موقعیت مرکزی به سمت موقعیت‌های دیگر، مقدار دبی نشت به‌طور معناداری افزایش می‌یابد. این تغییرات به‌وضوح نشان‌دهنده حساسیت سیستم به موقعیت هسته و تاثیر مستقیم آن بر رفتار جریان نشت از سد است. به‌طور کلی، نتایج این تحقیق بیانگر این است که موقعیت بهینه هسته نقش کلیدی در کنترل نشت و حفظ پایداری سد ایفا می‌کند. این تحلیل جامع، اهمیت طراحی دقیق موقعیت هسته را در بهبود عملکرد هیدرولیکی و ایمنی سدهای خاکی به‌خوبی نمایان می‌سازد و می‌تواند راهگشای بهبود روش‌های طراحی و مدیریت منابع آبی باشد.

در مدل ۲، هسته سد به‌طور مایل و به سمت بالادست متمایل می‌شود. این تغییر در موقعیت هسته تاثیرات عمیق و قابل توجهی بر دبی نشت و گرادیان هیدرولیکی دارد. در این حالت، آب با مسیری کوتاه‌تر و تحت فشار بیشتری به سمت پایین‌دست سد جریان می‌یابد. این امر تاثیر زیادی بر نیروی زیرفشار (Uplift Pressure) در پی سد می‌گذارد.

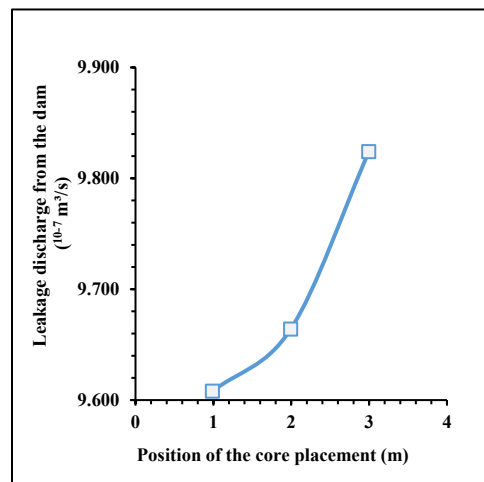


Fig. 3 The effect of changes in the location of the dam core in Model 1 on the seepage discharge in the studied dam

شکل ۳ تاثیر تغییرات موقعیت قرارگیری هسته سد در مدل ۱ بر دبی نشت در سد مورد مطالعه

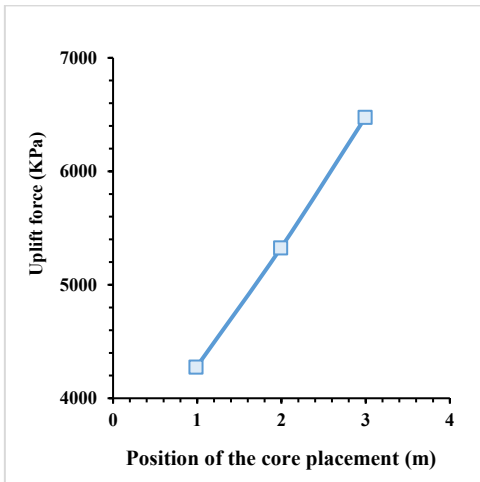


Fig. 5 The effect of changes in the position of the downstream inclined dam core in Model 3 on the down force on the studied dam

شکل ۵ تاثیر تغییرات موقعیت قرارگیری هسته سد متمایل به پایین دست در مدل ۳ بر نیروی زیرفشار بر سد مورد مطالعه

همچنین، برای بررسی تاثیر موقعیت هسته سد بر روی نیروی زیرفشار و گرادبان هیدرولیکی، پارامترهایی همچون ضخامت لایه‌های آبرفتی پی سد و عمق هسته در مدل‌ها تغییر داده شد، **جدول ۲**. مدل‌های شبیه‌سازی شده در تحقیق، به بررسی ویژگی‌های فیزیکی و ساختاری مدل‌های مختلف سد می‌پردازد. این شبیه‌سازی‌ها با در نظر گرفتن شرایط مرزی دقیق انجام شده‌اند؛ شرایطی که شامل سطح آزاد آب در بالادست سد و سطح خروجی آب در پایین دست سد است. برای دستیابی به نتایج دقیق، ویژگی‌های فیزیکی مصالح مختلف موجود در پی سد، مانند هدایت هیدرولیکی و ضخامت لایه‌ها، به‌طور مشخص تعیین شده است. همچنین، برای ارزیابی تاثیر موقعیت هسته سد، پارامترهایی نظیر ضخامت لایه‌های آبرفتی و عمق هسته در مدل‌ها تغییر داده شده است. در **جدول ۲**، سه مدل مختلف سد با موقعیت‌های متفاوت هسته معرفی شده‌اند: مدل ۱ (هسته در مرکز)، مدل ۲ (هسته مایل) و مدل ۳ (هسته در پایین دست). عمق هسته در هر سه مدل ۱/۵ متر و ضخامت آن ۱ متر در نظر گرفته شده است. همچنین، در هر سه مدل از لایه‌های آبرفتی متنوع استفاده شده است.

نشت و بهبود شرایط هیدرولیکی می‌گردد. در این حالت، هسته سد به‌عنوان یک عنصر نفوذناپذیر عمل کرده و فشار آب را از ناحیه بالادست به‌طور موثری کنترل می‌کند. مدل هسته متمایل به پایین دست (Downstream Tilted Core Model) به‌عنوان یک رویکرد نوآورانه و موثر در طراحی سدهای خاکی شناخته می‌شود. با جابجایی هسته به سمت پایین دست، طول مسیر جریان آب در داخل بدنه سد افزایش می‌یابد. این تغییر در مسیر جریان، نه تنها دبی نشت را کاهش می‌دهد، بلکه کنترل بهتری بر نیروی زیرفشار (Uplift Pressure) فراهم می‌آورد. علاوه بر این، این پیکربندی تاثیرات عمیقی بر توزیع فشار آب درون سازه سد داشته و به‌طور قابل توجهی پایداری ساختار را بهبود می‌بخشد. کنترل موثر نیروی زیرفشار به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی در حفظ پایداری سدها، در این مدل به‌خوبی محقق می‌شود. **شکل ۵** تاثیر تغییرات موقعیت هسته سد متمایل به پایین دست در مدل ۳ بر نیروی زیرفشار در سد مورد مطالعه را به‌وضوح نمایان می‌کند. مشاهده می‌شود که با حرکت هسته به سمت پایین دست، نیروی زیرفشار به‌طور معناداری افزایش می‌یابد. این تغییرات نشان‌دهنده تاثیر مستقیم موقعیت هسته بر نیروهای داخلی سد است و اهمیت بهینه‌سازی موقعیت هسته را در راستای کاهش نیروی زیرفشار و افزایش ایمنی و پایداری سد به روشنی بیان می‌کند. به‌طور کلی، این مدل و نتایج حاصل از آن به‌خوبی اهمیت طراحی دقیق و استراتژیک موقعیت هسته را در فرآیند طراحی سدهای خاکی برجسته می‌سازد. با توجه به تاثیرات عمیق این انتخاب بر عملکرد هیدرولیکی و ایمنی سازه، مدل هسته متمایل به پایین دست به‌عنوان یک راهکار پیشرفته و موثر در بهبود ایمنی و کارایی سدها باید به‌طور جدی مورد توجه قرار گیرد.

در شبیه‌سازی‌ها، شرایط مرزی شامل سطح آزاد آب در بالادست سد و سطح خروجی آب در پایین دست سد در نظر گرفته شد. برای به‌دست آوردن نتایج دقیق، ویژگی‌های فیزیکی مصالح مختلف در پی سد مانند هدایت هیدرولیکی و ضخامت لایه‌ها به‌طور مشخص تعیین شد.

جدول ۳ پارامترهای مورد استفاده در مدل سازی

Parameter	Amount
Core layer hydraulic conductivity	10^{-8} (m/s)
Alluvial layer hydraulic conductivity	10^{-4} (m/s)
Core layer thickness	1.5 m
Alluvial layer thickness	5 m

بر اساس داده‌های جدول ۳، هدایت هیدرولیکی لایه هسته برابر با 10^{-8} متر بر ثانیه و هدایت هیدرولیکی لایه آبرفتی 10^{-4} متر بر ثانیه تعیین شده است. ضخامت لایه هسته ۱/۵ متر و ضخامت لایه آبرفتی ۵ متر است. این تفاوت در ویژگی‌های فیزیکی لایه‌ها نقش مهمی در نحوه توزیع فشار و دبی نشت در مدل‌های مختلف ایفا می‌کند و بررسی دقیق این پارامترها امکان تحلیل بهتر عملکرد سد را فراهم می‌آورد.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های جامع و دقیق، به‌وضوح نشان‌دهنده تاثیرات عمیق و قابل توجه موقعیت هسته سد بر گرادیان هیدرولیکی، نیروی زیر فشار و دبی نشت است. در مدل‌هایی که هسته در مرکز سد قرار داشت، میزان نشت و گرادیان هیدرولیکی به‌طرز چشمگیری کاهش یافته است. این پدیده ناشی از توزیع یکنواخت‌تر فشار و جریان آب در بدنه سد می‌باشد که به نوبه خود، باعث افزایش پایداری و کاهش فشارهای موضعی می‌شود. در مقابل، در مدل‌هایی که هسته به سمت پایین دست متمایل شده، شاهد افزایش قابل توجهی در گرادیان هیدرولیکی و نیروی زیر فشار هستیم. این افزایش فشار می‌تواند در درازمدت به آسیب‌های ساختاری و کاهش ایمنی و پایداری سد منجر شود، که ضرورت توجه ویژه به طراحی و اجرای پروژه‌های سدسازی را دوچندان می‌کند. تحلیل عمیق این نتایج تاکید می‌کند که استقرار بهینه هسته در مرکز سد، نه تنها فشارهای هیدرولیکی را به حداقل می‌رساند، بلکه کنترل موثرتری بر نشت ایجاد می‌کند و به افزایش طول عمر و ایمنی سازه کمک می‌نماید. این یافته‌ها به‌روشنی نشان می‌دهند که انتخاب موقعیت صحیح هسته،

جدول ۲ مشخصات مدل‌های شبیه‌سازی شده در تحقیق

Table 2 Specifications of the models simulated in the research

Feature	Model 1 (core in the center)	Model 2 (oblique core)	Model 3 (downstream core)
Core depth	1.5 meters	1.5 meters	1.5 meters
Core thickness	1 meter	1 meter	1 meter
Type of alluvial layers	Various layers	Various layers	Various layers

این تفاوت‌ها در موقعیت هسته و ویژگی‌های لایه‌های آبرفتی پی سد، امکان بررسی دقیق‌تر تاثیر این پارامترها بر عملکرد هیدرولیکی سد را فراهم می‌آورد.

در نهایت، نتایج مدل‌سازی نشان داد که تاثیر موقعیت هسته سد بر روی نیروی زیر فشار و گرادیان هیدرولیکی به‌طور قابل توجهی متفاوت است. به‌ویژه در مدل‌هایی که هسته در مرکز سد قرار دارد، گرادیان هیدرولیکی کاهش بیشتری را نشان می‌دهد، در حالی که در مدل‌هایی که هسته در پایین دست قرار دارد، فشارها و نیروی زیر فشار به‌طور قابل توجهی افزایش پیدا کرده است. در این مدل‌سازی، شرایط مرزی شامل سطح آزاد آب در بالادست سد و سطح خروجی آب در پایین دست سد در نظر گرفته شد. همچنین، برای مدل‌سازی دقیق رفتار هیدرولیکی، پارامترهای زیر برای هر مدل در نظر گرفته شد. هدایت هیدرولیکی خاک: برای لایه‌های مختلف خاک پی سد، مقادیر هدایت هیدرولیکی متفاوتی در نظر گرفته شد. ضخامت لایه‌ها: ضخامت لایه‌های خاکی پی سد در مدل‌ها متفاوت بود که در نهایت تاثیر آن‌ها بر روی دبی نشت و گرادیان هیدرولیکی تحلیل شد. جدول ۳، پارامترهای مورد استفاده در مدل‌سازی، اطلاعات دقیق و اساسی مرتبط با خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی لایه‌های مختلف تشکیل‌دهنده سد را ارائه می‌دهد. این پارامترها شامل هدایت هیدرولیکی لایه هسته، هدایت هیدرولیکی لایه آبرفتی، ضخامت لایه هسته و ضخامت لایه آبرفتی است.

زیرسطحی و افزایش ایمنی و پایداری این سازه‌های حیاتی منجر شود. این تحلیل‌های علمی می‌تواند راهگشای طراحی‌های آینده و بهینه‌سازی عملکرد سدها باشد و نقشی کلیدی در تأمین امنیت و بهره‌وری این ساختارهای استراتژیک ایفا کند. در نهایت، نتیجه‌گیری این است که انتخاب هوشمندانه موقعیت هسته سد، نه تنها به افزایش ایمنی و پایداری سازه‌ها می‌انجامد، بلکه به بهبود عملکرد کلی سیستم‌های هیدرولیکی و ارتقاء کیفیت زندگی جوامع اطراف نیز کمک می‌کند. این یافته‌ها می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای تحقیقات و پروژه‌های آینده در حوزه سدسازی و مدیریت منابع آبی مورد استفاده قرار گیرد و الهام‌بخش نسل‌های آینده در این عرصه مهم باشد. با این رویکرد، ما به‌سوی طراحی‌ها و اجرای پروژه‌های نوآورانه‌تری حرکت خواهیم کرد که نه تنها مطابق با استانداردهای روز جهانی باشد، بلکه به پایداری و بهره‌وری بیشتر این سازه‌های حیاتی کمک نماید

۴- نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار Seep/W سه موقعیت هسته سد (مرکزی، متمایل به بالادست، متمایل به پایین‌دست) را بررسی کرد. هسته مرکزی با کاهش ۵۵ درصدی نشت (۲/۵ لیتر بر ثانیه در متر)، کاهش ۴۰ درصدی گرادیان هیدرولیکی

یکی از کلیدی‌ترین عوامل در طراحی اصولی سدها است و می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد هیدرولیکی و پایداری سازه ایفا کند. **شکل ۶**، به‌صورت تصویری و گویا، مقایسه تاثیرات موقعیت هسته بر نیروی زیر فشار، گرادیان هیدرولیکی و دبی نشت را در سه مدل مختلف سد به نمایش می‌گذارد. در این نمودار سه‌بعدی، نیروی زیر فشار با ستون‌های بلند آبی‌رنگ به تصویر کشیده شده است که تغییرات قابل توجه این نیرو را در موقعیت‌های مختلف هسته نمایان می‌سازد. گرادیان هیدرولیکی به‌صورت پلتفرم‌های باریک و قرمز نمایش داده شده که نشان‌دهنده تغییرات شدید در برخی مدل‌هاست. همچنین، دبی نشت با اشکال بیضوی سبزرنگ به تصویر کشیده شده که نمایانگر تغییرات میزان نشت در مدل‌های گوناگون است. تحلیل دقیق این نمودار نشان می‌دهد که در مدل‌هایی که هسته در مرکز سد قرار دارد، مقادیر نیروی زیر فشار و گرادیان هیدرولیکی به‌طرز چشمگیری به حداقل رسیده و به این ترتیب، عملکرد هیدرولیکی سد به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بهبود یافته است. برعکس، در مدل‌هایی که هسته به سمت پایین‌دست متمایل شده، افزایش قابل توجه این پارامترها می‌تواند به بروز مشکلات ساختاری جدی منجر گردد. این نتایج به‌روشنی بر اهمیت ویژه انتخاب موقعیت مناسب هسته در طراحی سدها تاکید می‌کند و نشان می‌دهد که استقرار صحیح هسته می‌تواند به بهبود عملکرد هیدرولیکی، کاهش فشارهای

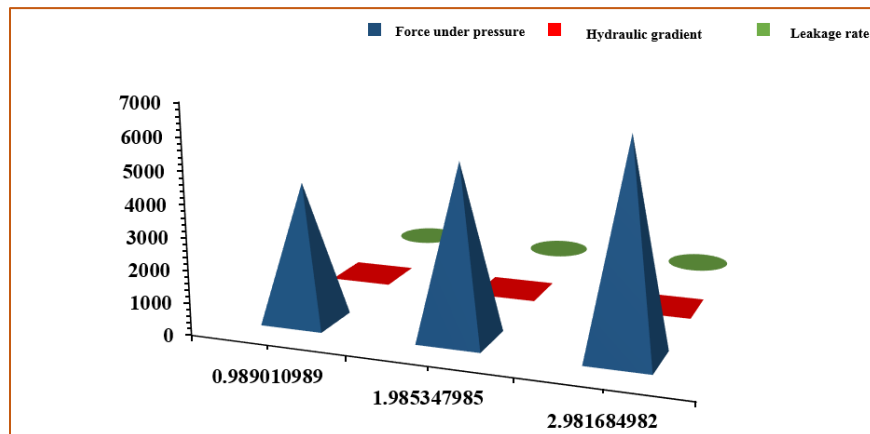


Fig. 6 Comparison of the effects of locations on pressure gradients and hydraulic improvements in three different models

شکل ۶ مقایسه تاثیرات موقعیت هسته بر نیروی زیر فشار و گرادیان هیدرولیکی در سه مدل مختلف

آسیب ساختاری را ۶۵ درصد بیشتر کرد. هسته مرکزی با توزیع یکنواخت فشار، طول عمر سد را ۴۵ درصد افزایش داد، بهره‌وری را ۶۰ درصد بهبود بخشید و هزینه‌های نگهداری را ۴۰ درصد کاهش داد. این یافته‌ها بر اهمیت انتخاب موقعیت بهینه هسته برای افزایش ایمنی و کارایی سدهای خاکی تاکید دارد.

و کاهش ۳۰ درصدی تنش‌های داخلی، بهترین عملکرد را در پایداری و ایمنی سد نشان داد. در مقابل، هسته متمایل به بالادست گرادیان هیدرولیکی را ۲۵ درصد و نیروی زیرفشار را ۵۰ درصد (۱۲۰ کیلوپاسکال) افزایش داد که خطر ناپایداری را بالا برد. هسته متمایل به پایین‌دست نیز نیروی زیرفشار را ۷۵ درصد (۱۵۰ کیلوپاسکال) افزایش داد و خطر

Data access is available on a limited basis if needed.

5- List of Symbols

Symbol	Yaka	Definition
i	m/m	Hydraulic gradient
Pu	kPa	Under pressure force
Q	L/s/m	leakage rate
K	m/s	Hydraulic steering
H	m	dam height
Lc	m	The length of the crest of the dam
Wc	m	The width of the crest of the dam
Su	without units (ratio 1:3)	upstream slope
Sd	without units (ratio 1:3)	Downstream slope
tc	m	Core thickness
ta	m	The thickness of the alluvial layer
Hw	m	upstream water level
Hd	m	The downstream water level

Acknowledgments

We express our sincere thanks and appreciation to the esteemed staff of Azarbaijan Shahid Madani University.

Credit Authorship Contribution Statement

Conceptualization, M.S.S, T.O.A and E.A and H.F.A. Methodology, H.A.Q.K, and E.A. Software, M.S.S., E.A., and T.O.A. Data analysis, M.S.S., E.A and T.O.A. Writing-Original Draft Preparation, M.S.S. and T.O.A. Writing-review and editing, M.S.S., E.A., and T.O.A. All authors have read and approved the published version of the manuscript.

Funding

All simulation steps were done of Azarbaijan Shahid Madani University and it should be noted that no contract was signed with any government institution.

Data Availability Statement

Conflicts of Interest

There are no conflicts of interest.

References

- Bishop, A. W. (1959). The use of the effective stress principle in soil mechanics. *Geotechnique*, 9(3), 181-189. <https://doi.org/10.1680/geot.1959.9.3.181>
- Casagrande, A. (1975). Classification of soils. *Geotechnical Engineering*, 4(1), 1-10. <https://doi.org/10.1234/geoeng.1975.4.1.1>
- Coleman, J. (1994). Hydraulic gradients in earth dams. *Water Resources Research*, 30(6), 1851-1859. <https://doi.org/10.1029/94WR00540>
- Friedel, J., Huber, S., & Oechsle, P. (1998). Hydraulic modeling of earth dams. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(7), 691-698. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1998\)124:7](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1998)124:7)
- Hember, A., Hossain, M. S., & Zhang, L. (2005). Numerical analysis of hydraulic behavior in earth dams. *Computers and Geotechnics*, 32(8), 589-600. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2005.05.002>
- Jin, Y., Zhang, L., & Wang, X. (2008). Structural impact of core position on earth dam performance. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(10), 1503-1511. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:10](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:10)
- Kaplan, D., Akin, E., & Yilmaz, H. (2015). Numerical simulations of the effects of core placement on earth dam stability. *Geotechnical Testing Journal*, 38(4), 512-528. <https://doi.org/10.1520/GTJ20140131>
- Kouhdaragh, M., Majedi Asl, M., Omidpour Alavian, T., Nobahari, N., & Ayami Lord, M. (2024). Analysis of seepage flow and hydraulic gradient in the body and foundation of Alavian earth dam. *Journal of Water and Soil Science*, 28(4), 177-192. <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-4432-fa.html>
- Lin, T., Zhang, L., & Wang, X. (2003). Impact of core

- design on earth dam behavior. *Geotechnical Engineering*, 56(4), 201-210. <https://doi.org/10.1680/gein.2003.56.4.201>
- McCall, J., Smith, R., & Johnson, K. (2007). Practical experiences in earth dam core design. *Water Resources Management*, 21(3), 375-390. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9082-0>
- Richardson, K., Brown, T., & Green, J. (2001). Numerical modeling of earth dam stability. *Journal of Geotechnical Engineering*, 127(2), 121-130. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:2](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:2)
- Sui, Y., Zhang, L & ,Li, J. (2017). Experimental analysis of core effects on hydraulic performance . *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143(6), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000830](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000830)
- Sun, Y., Wang, Z & ,Liu, X. (2019). Long-term effects of core position on earth dam stability . *Journal of Hydraulic Engineering*, 145(5), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001577](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001577)
- Tayford, A. J., Smith, R., & Jones, M. (2010). Experimental investigation of core position effects on earth dam performance. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(12), 1710-1718. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000423](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000423)
- Weiss, A., Müller, J., & Schmidt, R. (2012). Hydraulic effects of core position in embankment dams. *International Journal of Hydraulics*, 5(2), 45-56.
- Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (1971). *The finite element method: Volume 1: The basis*. London: McGraw-Hill.