



مدیریت آب و آبیاری

دوره ۱۲ ■ شماره ۳ ■ پاییز ۱۴۰۱

صفحه‌های ۵۳۹-۵۲۷

DOI: 10.22059/jwim.2022.339386.971

مقاله پژوهشی:

تحلیل عددی رفتار استاتیکی سد خاکی تحت تأثیر تغییر شیب هسته (مطالعه موردی: سد آزاد)

نازنین شاه‌کرمی^{۱*}، مریم بیات^۲

۱. استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران.

۲. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران.

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۰۳

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۳۰

چکیده

در طراحی سدهای خاکی، قائم یا مایل بودن هسته با توجه به ملاحظات فنی و اقتصادی، مزایا و معایب خاص خود را دارد. در هر یک از این گزینه‌ها، توجه به میزان نشست، تغییر شکل‌ها و تنش‌های ایجادشده در بدنه و پی سد و نیز برقراری پایداری ضروری است. ضمن آن‌که کنترل پدیده قوس‌زدگی ناشی از تنش‌ها و نشست‌های متفاوت در ترازها و مناطق مختلف که خود می‌تواند منجر به شکست هیدرولیکی سد شود، باید مورد بررسی قرار گیرد. در این پژوهش ضمن تحلیل رفتار استاتیکی سد بلند "آزاد" در شرایط واقعی (با هسته رسی قائم) در نرم‌افزار GeoStudio، تحلیل تراوش، تنش-کرنش، قوس‌زدگی و پایداری دامنه‌های سد با زوایای مختلف هسته (صفر، پنج، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۲ درجه نسبت به امتداد قائم) در دو فاز پایان ساخت و تراوش دائم نیز مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد برای یک عمق مشخص، با افزایش زاویه تمایل هسته، دبی تراوش از بدنه و پی سد (به‌طور محسوس‌تر در زوایای بیش از ۱۵ درجه) و جابه‌جایی قائم خط مرکزی هسته افزایش یافت. همچنین با افزایش زاویه، متوسط ضریب اطمینان پایداری برای دامنه پایین‌دست سد به‌طور غیرمحسوس افزایش، اما برای دامنه بالادست به‌ویژه برای زوایای بیش از ۱۵ درجه کاهش بارز ۲۲/۶ درصدی داشت. روند افزایش تنش قائم کل خط مرکزی هسته با افزایش عمق نیز برای زوایای مختلف هسته، فاقد تغییرات قابل ملاحظه بود. در مورد قوس‌زدگی، به‌جز در محدوده ارتفاعی ۰/۳ ارتفاع از تاج، احتمال آن با افزایش زاویه تمایل هسته کم شد.

کلیدواژه‌ها: تحلیل استاتیکی، سد خاکی، شیب هسته، قوس‌زدگی.

Numerical analysis of static behavior of embankment dam under changes in the core inclination (Case Study: Azad Dam)

Nazanin Shahkarami^{1*}, Maryam Bayat²

1. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran.

2. M. Sc. Graduate of Geotechnics, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran.

Received: February 19, 2022

Accepted: June 24, 2022

Abstract

In the design of embankment dams, the vertical or inclination of the core has its own advantages and disadvantages according to technical and economic considerations. In each of these options, it is necessary to pay attention to the amount of seepage, deformations and stresses created in the body and foundation of the dam, as well as stability. In addition, the control of the arching caused by different stresses and subsidence in different levels and areas, which can lead to hydraulic failure of the dam, should also be considered. In this study, while analyzing the static behavior of the "Azad" dam in real condition (with a vertical core) in GeoStudio software, analysis of seepage, stress-strain, arching and slope stability with different core inclination (zero, five, 10, 15, 20 and 22 degrees relative to the vertical) at end of construction and steady-state seepage have also been studied and compared. The results showed that for a given depth, with increasing the angle of inclination of the core from the vertical position, the seepage through the dam body and foundation (especially for angles greater than 15 degrees) and the vertical displacement of the core central line increased. Also with increasing the angle of inclination, the average stability safety factor of the downstream slope of the dam increased imperceptibly but for the upstream slope especially for angles greater than 15 degrees, there was a significant decrease of 22.6 percent. The trend of increasing the total vertical stress along the central core line with increasing depth for different angles of the core did not change significantly. In the case of arching, except in the height range of 0.3 of the height of the crest, the probability decreased with increasing inclination angle of the core.

Keywords: Arching, Core inclination, Embankment dams, Static analysis.

مقدمه

یکی از مهم‌ترین انواع سدها، سدهای خاکریز هستند که از مصالح طبیعی موجود در طبیعت از قبیل خاک، سنگ، سنگریزه و غیره تشکیل شده‌اند. در این سدها از هیچ‌گونه مصالح چسباننده طبیعی استفاده نشده و مقاومت کافی در برابر نیروها و تراوش آب تنها با تراکم مصالح به وجود می‌آید. با وجود پیشرفت‌های حاصله هنوز پیشنهاد راه‌حل‌های ریاضی محکم و قطعی برای طراحی سد خاکی مشکل است و در نتیجه بسیاری از اجزای سدها بر مبنای تجزیه و ذوق و ذکاوت مهندسين طرح و اجرا می‌شوند. به عبارت دیگر، یک طرح تیپ دقیق و کامل برای سد خاکی وجود ندارد و از این رو با توجه به ابعاد پروژه‌های سد و نیز با عنایت به این مسئله که سدهای خاکی در فازهای مختلف حین ساخت، آبیگری اولیه، در طول زمان بهره‌برداری و یا هنگام تخلیه سریع، در معرض انواع تنش‌های متفاوت از جمله تنش‌های حاصل از نشست سد و تنش‌های حاصل از بدنه سد، فشار استاتیکی آب و نیروی دینامیکی امواج، زلزله و غیره قرار دارند، می‌باید تمامی ملاحظات لازم در نظر گرفته شود تا طرح ایمنی اجرا شود (Rahimi, 2013). طراحی سدهای خاکی و سنگریزه‌ای به‌طور عمده براساس نشست و حفظ پایداری آن در مقابل لغزش شیب‌ها صورت می‌گیرد، اما تغییرشکل‌های ایجادشده در داخل بدنه و پی سد نیز اهمیت بسیار زیادی دارد و طراحی باید به گونه‌ای صورت گیرد که از ایجاد ترک در سد جلوگیری و در صورت ایجاد کنترل شود (Komasi et al., 2020).

تیپ متنوع مسائل لازم در طراحی مناسب یک سد خاکی مانند برآورد تراوش در بدنه و پی سد، فشار آب منفذی، تنش‌ها، تغییرشکل‌ها، قوس‌زدگی، پایداری دامنه‌ها و دیگر مسائلی که ممکن است سبب ایجاد خسارت، خرابی و یا انهدام سد شود و راه‌های طراحی بهتر، ایمن‌تر

و یا اقتصادی‌تر سد سبب شده است که پژوهش‌های گسترده و گوناگونی در این زمینه تاکنون انجام شود. در بسیاری از این پژوهش‌ها سعی شده است که جهت رسیدن به نتیجه بهتر از روش‌های عددی و نرم‌افزارهای مربوط استفاده شود. به‌طور نمونه از مطالعات انجام‌شده می‌توان به پژوهش‌های (Najafzadeh, 2019) Shakouri & Mohammadi (2020) و (Aalimohammadi & Shahkarami (2021) در مسائل مرتبط با تحلیل تراوش در سد خاکی؛ (Asakere & Ahang (2017) و (Komasi et al. (2020) در تحلیل تنش- کرنش و قوس‌زدگی یک سد خاکی نمونه و (Aminjavaheri & Karam (2014)، (Fattah et al. (2017) و (Calamak et al. (2020) در بررسی پایداری شیب‌های بالادست یا پایین‌دست با استفاده از روش‌های تحلیل عددی اشاره نمود. در تعدادی از مقالات نیز مانند (Al-Labban (2018)، (Salmasi & Hakimi (2020) و (Mazaheri et al. (2020) تلفیقی از چندین جنبه مرتبط در طراحی سد خاکی مانند تراوش از بدنه و پی و مقدار فشار منفذی در بخش‌های مختلف سد، تنش- کرنش، پایداری دامنه‌ها همراه با هم در قالب ارزیابی رفتار سد در حالت‌های مختلف بررسی شده‌است. زاویه قرارگیری هسته سد نیز می‌تواند بر میزان پایداری، تراوش، تنش‌ها و تغییر شکل‌های ایجادشده در بدنه و هسته آن نقش به‌سزایی داشته باشد. در پژوهشی رفتار استاتیکی و لرزه‌ای سد خاکی بیواز با هسته رسی مایل در پایان ساخت با استفاده از نرم‌افزار FLAC قبل و بعد از وقوع زلزله بررسی شود. در ادامه، تحلیل‌ها با فرض قائم‌بودن هسته انجام گرفت. نتایج تحلیل استاتیکی و دینامیکی حاکی از مقادیر تغییر شکل و تنش بیش‌تر هسته مایل در مقایسه با هسته قائم بود (Karbor & Soroush, 2011). تأثیر قائم یا مایل بودن هسته سد بر گسیختگی ناشی از قوس‌زدگی موضوع پژوهش دیگری بود که به‌طور موردی برای سد سنگریزه‌ای گاوشان

مهم تأثیرگذار بررسی شد. نتایج نشان داد که میزان تراوش عبوری در هسته قائم کم‌تر از هسته مایل بود، اما ضریب اطمینان پایداری شیب بالادست در سد با هسته مایل حدود ۵۵ درصد بیشتر از سد هسته قائم بود (Salmasi et al., 2020).

در پژوهش حاضر به تحلیل رفتار استاتیکی سد خاکی با فرض زوایای متفاوت برای هسته رسی با استفاده از تحلیل عددی در دو مرحله پایان ساخت (قبل از آبگیری) و تراوش دائم (در طول زمان بهره‌برداری) پرداخته شده است. به این منظور با کمک مجموعه نرم‌افزاری GeoStudio، میزان تراوش از بدنه و پی سد، تنش‌ها و کرنش‌های ایجادشده و در نتیجه آن پدیده قوس‌زدگی و هم‌چنین پایداری شیب‌ها در سد سنگریزه‌ای آزاد در شرایط واقعی با هسته قائم به‌دست‌آمده و سپس تحلیل‌ها با فرض زوایای تمایل متفاوت هسته سد، مجدد انجام و نتایج به‌دست‌آمده از آن‌ها مقایسه شده است.

مواد و روش‌ها

مشخصات سد مخزنی آزاد

سد مخزنی آزاد از نوع سنگریزه‌ای با هسته رسی قائم در ۴۰ کیلومتری غرب سنج در استان کردستان واقع شده است. رقوم نرمال و تاج سد به‌ترتیب ۱۴۷۵ و ۱۴۸۰ متر از سطح دریا است. رقوم بستر طبیعی و سنگ سالم کف رودخانه در محل محور به‌ترتیب ۱۳۶۲ و ۱۳۵۷ متر از سطح دریا می‌باشند. بدین ترتیب ارتفاع سد از بستر رودخانه ۱۱۸ متر و از بستر سنگ سالم پی ۱۲۳ متر می‌باشد. طول تاج سد حدود ۵۹۷/۵ متر می‌باشد. مقطع تیپ بدنه سد در شکل (۱) ارائه شده است. هم‌چنین مشخصات مصالح به‌کار رفته در سد آزاد در قسمت‌های مختلف سد، به شرح جدول (۱) می‌باشد (Iran Water and Power Resources Development Company, 2008).

انجام گرفت. پژوهش‌گران با استفاده از مدل SIGMA/W به بررسی نشست‌های متفاوت بین هسته و پوسته که می‌تواند منجر به قوس‌زدگی شود پرداختند و نقش شکل هسته از لحاظ قائم یا مایل بودن را بر احتمال این گسیختگی بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که از جنبه تنش وارد بر سد و مقاومت به گسیختگی ناشی از قوس‌زدگی، سد مایل عملکرد بهتری نسبت به هسته قائم با یک ضخامت دارد (Nayebzadeh & Mohammadi, 2011).

Zahedi & Aghagani (2018) تراوش از بدنه سد خاکی در یک مدل سد خاکی با ارتفاع‌های مختلف و سه نوع هسته (قائم، مایل، دیافراگمی) را با استفاده از SEEP/W بررسی کردند. در هر سه نوع هسته، شیب‌ها و هندسه‌های مختلفی ارزیابی شدند. تحلیل‌های انجام‌شده حاکی از آن بود که دبی تراوش از بدنه و حداکثر گرادیان هیدرولیکی در سد با هسته مایل بیش‌تر از هسته قائم است. ضمن آن‌که در سد با هسته مایل، با کاهش شیب این مقادیر افزایش می‌یابد. Sazzad & Islam (2019) در بخشی از پژوهش جامع خود در مورد روش‌های کنترل تراوش سد خاکی با نرم‌افزار SEEP/W، به بررسی شکل‌های مختلف هسته رسی داخل بدنه سد با یک حجم ثابت پرداختند. آن‌ها تأثیر هسته قائم مستطیلی، قائم دوزنقه‌ای، مایل بالادست و مایل پایین‌دست با زاویه ۴۵ درجه به افق را بر روی مقدار فشار منفذی و تغییرات آن، مقادیر گرادیان خروجی، دبی و سرعت تراوش جریان در بدنه و تغییرات خط فریاتیک بررسی کردند. نتایج بررسی آن‌ها در مجموع برتری استفاده از هسته قائم دوزنقه‌ای را نسبت به سایر شکل‌های هسته نشان داد. در پژوهش دیگری در سال ۲۰۲۰ به مقایسه عملکرد هسته قائم و هسته مایل با استفاده از مدل‌های عددی برای شبیه‌سازی تراوش و گرادیان هیدرولیکی پرداخته شد. هم‌چنین نسبت نفوذپذیری پوسته به هسته نیز به‌عنوان یک متغیر

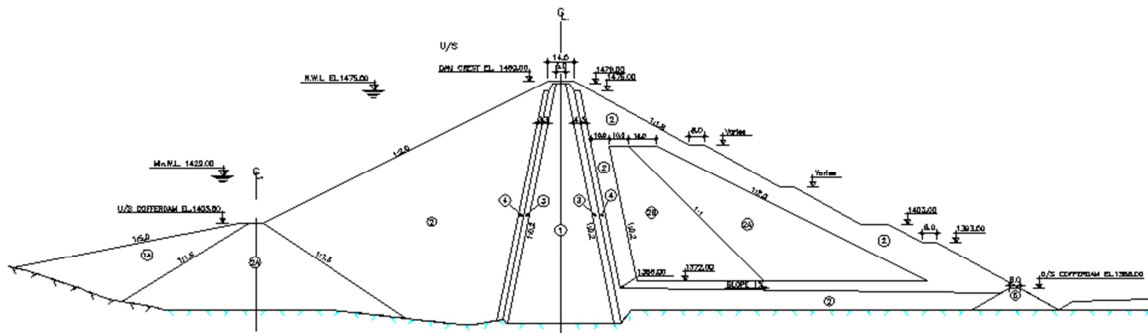


Figure 1. Typical cross-section of Azad earth dam (Iran Water and Power Resources Development Company, 2008)

Table 1. Geotechnical characteristics of Azad earth dam (Iran Water and Power Resources Development Company, 2008)

Material type	Loading procedure	Saturated density ($\frac{KN}{m^3}$)	Wet density ($\frac{KN}{m^3}$)	Poisson's ratio	Cohesion (KPa)	Friction angle (degree)	Permeability ($\frac{m}{s}$)
Clay core	UU				60	4	
	CU	20	19.5	0.33	30	14	5×10^{-9}
	CD				0	20	
Rockfill zone (2)		22.5	22	0.3	45	47	5×10^{-5}
Rockfill zone (2A)		22.5	22	0.3	45	43	5×10^{-5}
Rockfill zone (2B)		22.5	22	0.3	45	40	1×10^{-5}
Filter		19.5	19	0.2	0	35	1×10^{-5}
Drainage		20	19.5	0.2	0	35	1×10^{-4}
Upstream shell of cofferdam (1A)		19	18.5	0.3	0	30	1×10^{-6}
Rock foundation		23	22.5	0.25	100	35	1.5×10^{-6}

قوس زدگی

در سدهای خاکی به علت اختلاف نشست هسته مرکزی در مقایسه با پوسته‌ها، ممکن است پدیده قوس زدگی^۱ دیده شود. در پدیده قوس زدگی بخش دارای تغییر شکل عمودی بیشتر، مقادیر کمی از وزن خود را به مقطع محکم‌تر یا صلب‌تر انتقال خواهد داد. این انتقال بار به علت تنش برشی ایجاد شده در سطوح مشترک دو منطقه با مصالح، قابلیت تغییر شکل پذیری، سختی و تراکم پذیری متفاوت اتفاق می‌افتد. به عبارت دیگر، هسته در مقایسه با پوسته‌ها بیش تر نشست می‌کند و مقاومت برشی بیشتری در بخش‌های مرزی هسته به وسیله تنش‌های برشی نگه داشته شده‌اند، ممکن است جدایی بخش بالایی از بخش پایینی اتفاق بیفتد. این موضوع می‌تواند باعث شکست هیدرولیکی و در نتیجه آن، پاپینگ در هسته رس شود. به همین دلیل است که استفاده از مصالح نرم در هسته سد

نرم افزار GeoStudio

بسته نرم‌افزاری GeoStudio متشکل از چند زیربرنامه یا ماژول مختلف است که هر یک از این ماژول‌ها ابزاری مناسب برای تحلیل‌های مختلف سازه‌های ژئوتکنیکی فراهم می‌کنند. از مزایای برنامه GeoStudio، پوشش دادن کلیه تحلیل‌های مورد نیاز در هر سازه خاکی دلخواه به وسیله هر یک از زیربرنامه‌های خود است. در این پژوهش از سه زیربرنامه SIGMA/W، SEEP/W و SLOPE/W به ترتیب به منظور تحلیل تراوش و جریان آب در بدنه سد و پی، تحلیل تنش- کرنش و بررسی پایداری شیب‌ها در دو حالت پایان عملیات ساخت و نیز تراوش دائم استفاده شده است. این نکته قابل توجه است که تحلیل‌های لازم در SLOPE/W براساس روش تعادل حدی که شامل مجموعه‌ای از روش‌های ترسیمی برای آنالیز پایداری است، می‌باشد و در دیگر زیربرنامه‌ها تحلیل‌ها براساس روش المان محدود است (Javaheri, 2009).

مورد استفاده در مدل سازی به ترتیب صفر، پنج، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۲ درجه نسبت به امتداد قائم فرض و مورد تحلیل قرار گرفتند. این زوایا به گونه ای انتخاب شده اند که حتی الامکان هسته، تداخلی با فرازبند نداشته باشد.

لازم به ذکر است که در هر گام، نتایج به دست آمده از مدل سازی برای شرایط واقعی سد آزاد با نتایج ابزار دقیق سد مقایسه شد و پس از تأیید صحت مدل، مدل سازی های لازم در آن گام در شرایط تغییر زاویه هسته صورت گرفت که به دلیل محدودیت حجم مقاله از ارائه مراحل صحت سنجی در بخش های آتی خودداری شد.

تحلیل تراوش در سد آزاد

تحلیل تراوش سد آزاد با استفاده از نرم افزار SEEP/W در مرحله پایان ساخت و تراوش دائم انجام شد. در تحلیل های تراوش ضریب نفوذ پذیری به طور کلی ثابت در نظر گرفته شده است. شکل (۲) به طور نمونه، خط فریاتیکی و خطوط تراز هد کل (خطوط هم پتانسیل) سد آزاد را در شرایط واقعی نشان می دهد. با توجه به شکل (۲-ا) در مرحله پایان ساخت، هسته باعث پایین آوردن خط فریاتیکی از میان بدنه سد می شود، اما چون هنوز سد آبیگری نشده است، مقدار افت آن قابل توجه نیست. ضمن آن که دبی عبوری از مقطع میانی سد نیز در این حالت $1/29 \times 10^{-5}$ متر مکعب بر ثانیه است. در مرحله تراوش دائم (شکل ۲-ب) دبی عبوری از مقطع میانی سد در مرحله تراوش دائم $1/1 \times 10^{-4}$ متر مکعب بر ثانیه است که نشان می دهد سد از نظر تراوش دارای عملکرد قابل قبولی است.

که مقاومت برشی کافی ندارند تا روی مصالح پوسته آویزان شود، سودمند است (Motamedi & Hosseini, 2006). بنابراین می توان گفت که اثر قوس زدگی به اختلاف مدول الاستیسیته بین دیواره هسته و پوسته، شیب دیواره هسته، ارتفاع سد، مقاومت مصالح خاکریزی و سرعت ساخت بستگی دارد. بیشترین قوس زدگی معمولاً در نزدیکی های فیلتر به وقوع پیوسته و مقدار قوس زدگی در وسط هسته کاهش می یابد. برای نشان دادن قوس زدگی ساده ترین راه، استفاده از ضریب قوس زدگی که نسبت تنش های موجود قائم به تنش ناشی از سربار است (رابطه ۱)، می باشد (Niroumand et al., 2000). میزان قوس زدگی با ضریب قوس زدگی رابطه معکوس دارد، به طوری که هر چه این ضریب کم تر باشد، مقدار آن بیش تر است و برعکس.

$$A.F = \frac{\sigma_v}{\gamma h} \quad (1)$$

در رابطه فوق، A.F ضریب قوس زدگی، σ_v تنش قائم اندازه گیری شده در داخل هسته، γ وزن مخصوص هسته و h ارتفاع خاکریز از بالا تا محل اندازه گیری تنش می باشد.

بحث و نتایج

در ابتدا به منظور بررسی رفتار سد آزاد، تحلیل های عددی تراوش، تنش- کرنش و پایداری دامنه ها در شرایط استاتیکی در دو مرحله پایان ساخت و تراوش دائم در شرایط واقعی سد یعنی با هسته قائم انجام شده است. در ادامه، برای ارزیابی تأثیر شیب هسته بر نتایج تحلیل ها، زاویه قرارگیری هسته سد آزاد تغییر داده شد. بدین منظور، زوایای

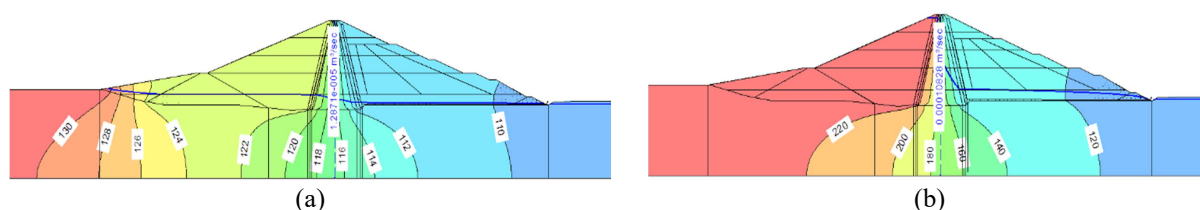


Figure 2. Total head contour and phreatic surface of Azad dam at the (a) end of construction, (b) steady state condition

دائم و با فرض کرنش صفحه‌ای برای مقطع تیپ سد در نرم‌افزار SIGMA/W صورت گرفت. به این منظور از مدل رفتاری الاستیک خطی برای پی و الاستوپلاستیک سخت-شونده برای دیگر مصالح بدنه سد استفاده شد. لازم به ذکر است از آنجاکه در آنالیز استاتیکی بر خلاف آنالیز دینامیکی، تنش‌ها و جابه‌جایی‌های افقی چندان محسوس و دارای اهمیت نیستند، بنابراین صرفاً تنش و جابه‌جایی قائم بررسی و ارائه شده است.

تحلیل تنش قائم کل در هسته سد آزاد

تنش قائم کل خط مرکزی هسته سد آزاد، برای زوایای مختلف هسته در دو مرحله پایان ساخت و تراوش دائم در این بخش مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۴) به‌طور نمونه، نشان‌دهنده خطوط تراز تنش قائم کل در سد آزاد با هسته قائم است. با توجه به این شکل، خطوط تراز تنش کل در یک ارتفاع مشخص در پوسته با نزدیک شدن به هسته افزایش می‌یابد تا این‌که در مجاورت فیلتر و پوسته به حداکثر مقدار خود می‌رسد و سپس با عبور از این ناحیه و در هسته سد تنش کل کاهش یافته و در مرکز هسته به کم‌ترین مقدار خود می‌رسد. تنش قائم کل روی خط مرکزی هسته و در کف هسته، که بیش‌ترین مقدار تنش قائم کل روی خط مرکزی هسته را دارد، در مرحله تراوش پایان ساخت ۱۸۸۳/۳۱ کیلوپاسکال و در مرحله تراوش دائم ۱۹۵۰/۴۶ کیلوپاسکال است که نسبت به مرحله پایان ساخت به میزان ۳/۵۷ درصد افزایش داشته است.

تغییرات دبی عبودی از مقطع میانی سد آزاد برحسب زاویه انحراف هسته از زاویه قائم در شکل (۳) نشان داده شده است. در این مرحله، با توجه به شکل (۲) که حاکی از کم‌تر بودن هد کلی و نشت از میان بدنه و پی سد در مرحله پایان ساخت نسبت به حالت تراوش دائم دارد، صرفاً نشت عبوری برای زوایای مختلف هسته در مرحله تراوش دائم ارزیابی گردید. با توجه به شکل (۳) مشاهده می‌شود که میزان دبی نشت از بدنه و پی سد، به‌طور کلی با افزایش زاویه تمایل هسته افزایش می‌یابد که این موضوع یکی از نقاط ضعف هسته‌های مایل نسبت به قائم می‌باشد. هم‌چنین با افزایش شیب صعودی نمودار پس از زاویه ۱۵ درجه می‌توان دریافت که این اثر در زوایای بیش از ۱۵ درجه محسوس‌تر خواهد بود.

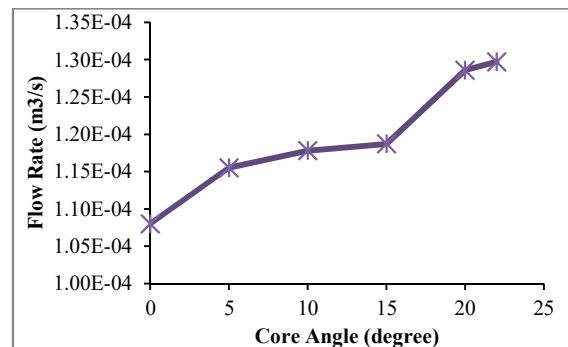


Figure 3. Flow changes across the middle section of the Azad dam in terms of different angles of the core relative to the vertical- steady state condition

تحلیل تنش - کرنش سد آزاد

تحلیل تنش - کرنش در مرحله پایان ساخت و تراوش

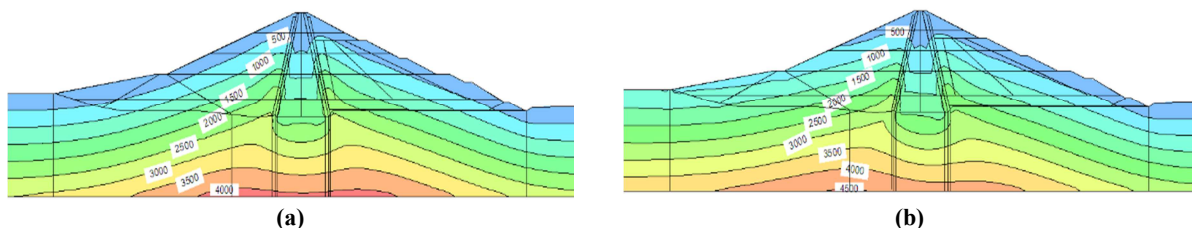


Figure 4. The total vertical stress contours of Azad earth dam; (a) End of construction, (b) Steady state condition

هسته با زوایای صفر، پنج، ۱۰ و ۱۵ درجه با هم برابر و مساوی ۳۱۰/۴۸ کیلوپاسکال، و همچنین برای زوایای ۲۰ و ۲۲ درجه تقریباً برابر ۲۷۶/۸۸ کیلوپاسکال بوده که در بیش‌ترین حالت حدود ۱۰/۸ درصد کاهش داشته است. اما پس از آن از عمق حدود ۴۰ متری تا کف هسته، برای زوایای مختلف موردبررسی در یک عمق معین، مقادیر تنش قائم کل با اختلاف ناچیزی (کم‌تر از ۱ درصد) تقریباً برابر است. با توجه به شکل‌های (۵) و (۶) می‌توان دریافت که تغییر شیب هسته در دو فاز پایان ساخت و تراوش دائم تا زاویه کوچک‌تر از ۲۰ درجه نسبت به قائم و به‌جز در اعماق ۰/۱ تا ۰/۳ ارتفاع هسته از تاج، تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر روی تنش قائم کل ندارد.

نمودارهای تنش قائم کل خط مرکزی هسته سد آزاد در عمق‌های صفر، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷، ۰/۸، ۰/۹، ۱ برابر ارتفاع هسته از تاج، برای زوایای مختلف هسته در دو مرحله پایان ساخت و تراوش دائم در شکل‌های (۵) و (۶) نمایش داده شده است. با توجه به شکل‌ها در هر دو مرحله پایان ساخت و تراوش دائم برای یک زاویه مشخص، با افزایش عمق مقدار تنش قائم کل نیز افزایش می‌یابد. در ضمن شیب این تغییرات صعودی در همه نمودارها تقریباً یکسان است. همچنین برای زوایای مختلف هسته، از تاج تا عمق ۰/۱ ارتفاع هسته، مقدار تنش قائم کل تقریباً یکسان می‌باشد. از عمق ۰/۱ تا ۰/۳ ارتفاع هسته، می‌توان گفت تنش قائم کل برای

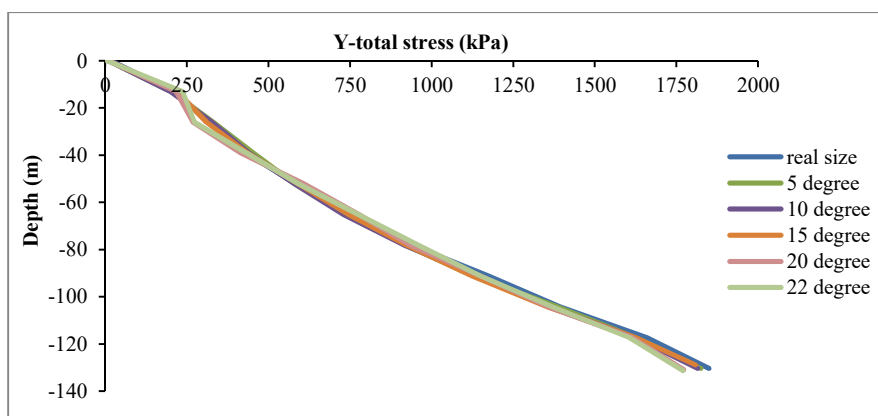


Figure 5. Total vertical stress variation with depth along the center line of the core in Azad dam for different angles of the core- condition of end of construction

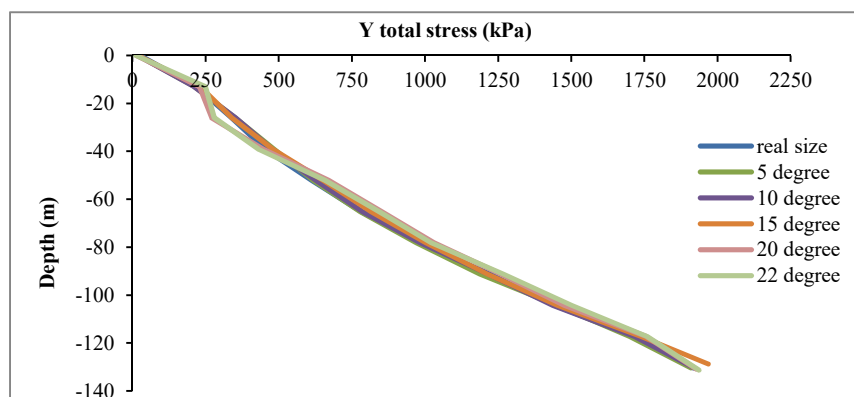


Figure 6. Total vertical stress variation with depth along the center line of the core in Azad dam for different angles of the core – the condition of steady state.

تحلیل نشست در هسته سد آزاد

جابه‌جایی قائم خط مرکزی هسته سد آزاد برای زوایای مختلف هسته در دو مرحله پایان ساخت و تراوش دائم بررسی شد. خطوط کنتور جابه‌جایی قائم سد آزاد به‌طور نمونه در شرایط واقعی در شکل (۷) در دو مرحله پایان ساخت و تراوش دائم نشان داده شده است. جابه‌جایی قائم خط مرکزی هسته سد آزاد در عمق‌های صفر، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷، ۰/۸، ۰/۹، ۱ برابر ارتفاع هسته از تاج، برای زوایای مختلف هسته در دو مرحله پایان ساخت و تراوش دائم بررسی و در شکل‌های (۸) و (۹) نمایش داده شده است. خطوط تراز جابه‌جایی قائم در کناره‌ها در مرحله پایان ساخت به دلیل عدم وجود آب مقدار صفر را نشان می‌دهد، اما در مرحله تراوش دائم در سمت بالادست به دلیل وجود آب تغییر شکل رخ داده است.

در یک عمق معین، مقادیر جابه‌جایی قائم به ترتیب برای هسته با زوایای قرارگیری صفر، پنج، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۲ درجه نسبت به قائم، رو به افزایش است. چنانچه مشهود است از میان وضعیت‌های مختلف هسته با

شیب‌های تحت بررسی، کم‌ترین نشست مربوط به هسته قائم و بیش‌ترین مقدار آن مربوط به زاویه ۲۲ درجه می‌باشد. اگرچه روند تغییرات جابه‌جایی قائم در همه زوایای موردبررسی و در هر دو حالت پایان ساخت و تراوش دائم تقریباً یکسان است، اما در کل مقدار جابه‌جایی‌های قائم مرحله تراوش دائم بیش‌تر از مرحله پایان ساخت می‌باشد (حدود ۱۰ الی ۱۲ درصد). حداکثر جابه‌جایی قائم خط مرکزی هسته سد مفروض با شیب‌های مختلف در دو فاز پایان ساخت و تراوش دائم، تقریباً در فاصله ۰/۴ ارتفاع کل هسته از تاج اتفاق افتاده است. خطوط تراز جابه‌جایی قائم در فاصله تقریبی یک سوم میانی ارتفاع کل هسته مقدار بیش‌تری را نشان می‌دهند. مقادیر نشست خط مرکزی هسته‌های مایل بیش از نشست هسته در وضعیت قائم است. به‌طورکلی می‌توان گفت که در هسته‌های مایل تا زاویه انحراف ۲۲ درجه نسبت به امتداد قائم، با افزایش زاویه و در واقع کاهش شیب هسته، مشابه با پژوهش Karbor & Soroush (2011) بر میزان نشست یا جابه‌جایی قائم افزوده می‌شود.

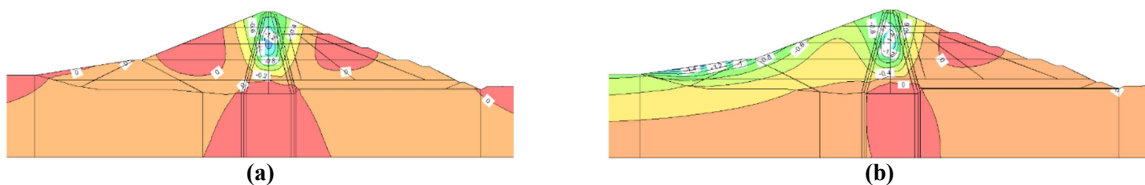


Figure 7. The vertical displacement contours of Azad earth dam; (a) End of construction, (b) Steady state condition

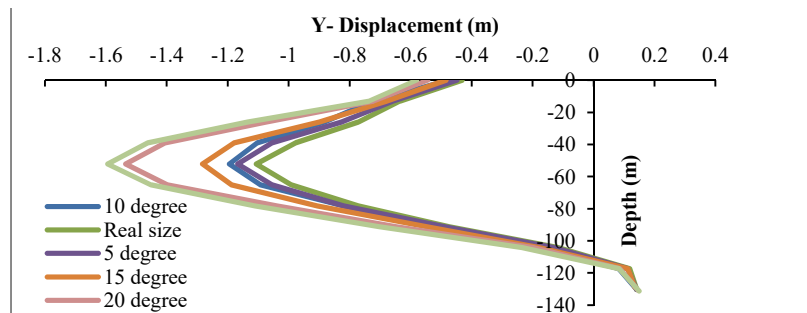


Figure 8. The vertical displacements along the center line of the core in depth for different angles of the core - at the end of construction condition.

تحلیل عددی رفتار استاتیکی سد خاکی تحت تأثیر تغییر شیب هسته (مطالعه موردی: سد آزاد)

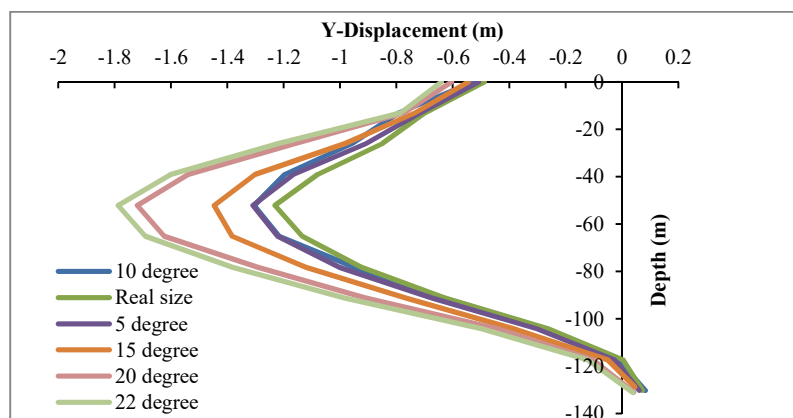


Figure 9. The vertical displacements along the center line of the core in depth for different angles of the core - at the condition of steady state.

مرکزی هسته در یک عمق ثابت، برای هسته مایل با زوایای ۱۵، ۲۰ و ۲۲ قابل ملاحظه‌تر از سه حالت دیگر (صفر، پنج و ۱۰) بوده و به عبارتی اثر افزایش زاویه هسته نسبت به قائم تا کم‌تر از ۱۵ درجه، بر ضریب قوس‌زدگی چندان محسوس نیست.

تحلیل پایداری شیب دامنه‌های سد آزاد

به‌منظور تحلیل پایداری دامنه‌های سد آزاد طی مراحل پایان ساخت و تراوش دائم از چهار روش معمولی، بیشاپ، جانبو و مورگنسترن- پرایس در نرم‌افزار SEEP/W استفاده شد. نتایج این بررسی به‌طور نمونه برای شرایط واقعی سد آزاد (هسته قائم) در جدول (۲) ارائه شده است. با توجه به این جدول، حداقل ضریب اطمینان بدنه بالادست در هر دو مرحله مربوط به روش جانبو و معادل ۲/۵۲۵ و حداقل ضریب اطمینان بدنه پایین‌دست در مرحله تراوش دائم مربوط به روش معمولی و برابر ۱/۸۳۷ است که از حداقل مقدار توصیه‌شده در تحلیل پایداری استاتیکی سدهای خاکی توصیه‌شده توسط سازمان مهندسی ارتش آمریکا (Rahimi, 2013) بزرگ‌تر و لذا سد پایدار است. متوسط ضرایب اطمینان بهینه برحسب زاویه انحراف از

تحلیل قوس‌زدگی در سد آزاد

نمودار ضریب قوس‌زدگی خط مرکزی هسته سد آزاد در عمق‌های مختلف از تاج تا کف هسته (۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷، ۰/۸، ۰/۹، ۱ برابر ارتفاع هسته از تاج)، با زوایای مختلف در مرحله پایان ساخت و تراوش دائم در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نمایش داده شده است. در هر دو مرحله و برای یک زاویه مشخص، ضریب قوس‌زدگی با افزایش عمق ابتدا کاهش‌یافته به یک مقدار کمینه می‌رسد و بعد از آن روند تقریباً افزایشی دارد و در انتها به یک نقطه همگرا می‌شود. مقدار تغییرات ضریب قوس‌زدگی در مقایسه با مقادیر گزارش‌شده در سایر پژوهش‌ها مانند Asakereh & Ahang (2017) و Komasi *et al.* (2020) مقادیر قابل‌قبولی می‌باشد.

همان‌گونه که از شکل‌ها مشخص است، در هر دو مرحله پایان ساخت و تراوش دائم، تا عمق ۰/۳ ارتفاع هسته با افزایش زاویه انحراف، روند تغییرات نمودارها برحسب عمق نامنظم است، اما از عمق ۰/۳ ارتفاع تا کف هسته با افزایش زاویه هسته، ضریب قوس‌زدگی روند تقریباً افزایشی خواهد داشت و شیب نمودارها برای زوایای مختلف تقریباً یکسان است. از طرفی می‌توان دریافت که در این ناحیه، افزایش ضریب قوس‌زدگی خط

نگرفته و فاقد فشار آب منفذی می‌ماند، بوده و سبب می‌شود تا بتوان این دامنه را با شیب بیش‌تری اجرا نمود. در عین‌حال، در دامنه بالادست با افزایش زاویه هسته به-تدریج از ضریب اطمینان کاسته شده و در ادامه برای زاویه ۲۲ درجه ضمن ۲۲/۶ درصد کاهش به کم‌ترین مقدار یعنی ۲/۰ می‌رسد. با توجه به افت نمودار از زاویه ۱۵ به ۲۰ درجه و افزایش شیب نزولی آن، می‌توان دریافت که تأثیر زاویه تمایل هسته بر ضریب اطمینان، برای زوایای بالای ۱۵ درجه قابل‌ملاحظه‌تر است.

قائم هسته سد آزاد، برای وضعیت‌های بحرانی پایداری استاتیکی دامنه‌های بالادست و پایین‌دست و در دو فاز پایان ساخت و تراوش دائم به‌دست آمد (شکل ۱۲). با توجه به شکل مشاهده می‌شود که هرچند متوسط ضریب اطمینان مربوط به دامنه پایین‌دست در پایان ساخت و ابستگی چندانی به تغییر زاویه و شیب هسته ندارد، ولیکن به‌هنگام تراوش دائم با افزایش زاویه هسته نسبت به قائم افزایش می‌یابد. این موضوع به‌علت خشک‌ماندن بخشی از دامنه پایین‌دست که در مسیر خط نشت قرار

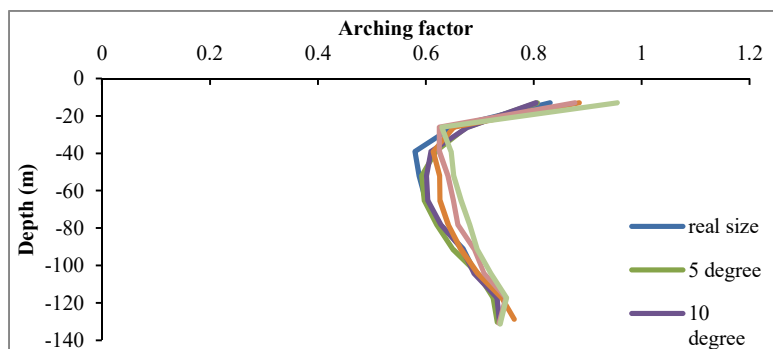


Figure 10. The changes of the arching factor along the center line of the core in depth for different angles of the core - at the end of construction condition.

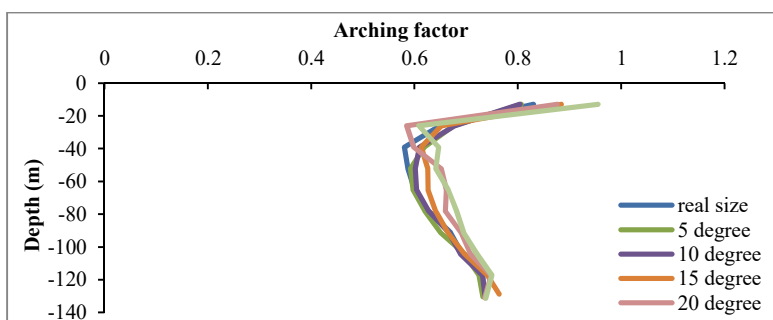


Figure 11. The changes of the arching factor along the center line of the core in depth for different angles of the core - at the condition of steady state.

Table 2. Calculated safety factors of downstream and upstream slope in Azad dam at the two conditions of end of construction and steady state

Analysis Method	Safety factor		
	End of construction		Steady state
	Upstream slope	Downstream slope	Downstream slope
Ordinary	2.591	2.112	1.837
Bishop	2.892	2.476	2.572
Janbu	2.525	2.022	1.928
Morgenstern-Price	2.612	2.273	2.233
Average	2.655	2.22	2.143

تحلیل عددی رفتار استاتیکی سد خاکی تحت تأثیر تغییر شیب هسته (مطالعه موردی: سد آزاد)

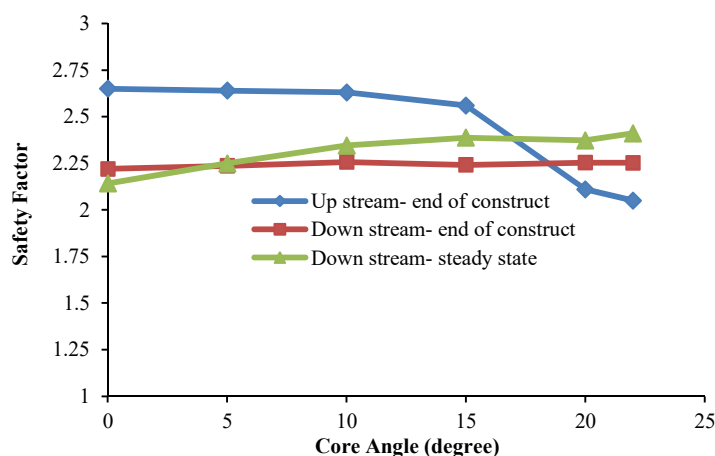


Figure 12. The Calculated safety factors of downstream and upstream slope in Azad dam for different angles of the core - at the two conditions of end of construction and steady state.

Salmasi *et al.* (2020) است. این ویژگی در هسته با

زوایای بیش از ۱۵ درجه محسوس تر بود.

تنش قائم کل روی خط مرکزی هسته در مرحله تراوش دائم نسبت به مرحله پایان ساخت به میزان ۳/۵۷ درصد افزایش داشت. تغییر شیب محور هسته در دو فاز پایان ساخت و تراوش دائم تا زاویه کوچکتر از ۲۰ درجه، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر تنش قائم کل نداشت، اما برای زوایای بزرگتر، در قسمتی از اعماق ۰/۱ تا ۰/۳ ارتفاع هسته از تاج، منجر به ۱۰/۵ درصد کاهش در تنش قائم کل شد.

در همه زوایای هسته مورد بررسی، جابه‌جایی‌های قائم خط مرکزی هسته در مرحله تراوش دائم، حدود ۱۰ الی ۱۲ درصد بیش‌تر از مرحله پایان ساخت بود. ضمن آن‌که برای یک عمق مشخص با افزایش زاویه انحراف، مقادیر نشست خط مرکزی هسته در هر دو مرحله افزایش یافت. جابه‌جایی قائم خط مرکزی هسته در دو مرحله پایان ساخت و تراوش دائم، برای یک شیب ثابت هسته، با افزایش عمق ابتدا افزایش و به یک مقدار بیشینه رسید و بعد از آن کاهش یافته و در انتها به یک نقطه همگرا شد. در هر دو مرحله، بیش‌ترین جابه‌جایی-

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر در ابتدا رفتار استاتیکی سد سنگریزه‌ای آزاد در وضعیت واقعی (با هسته قائم مرکزی) در دو مرحله پایان ساخت و تراوش دائم مورد تحلیل قرار گرفت. سپس برای ارزیابی تأثیر زاویه شیب هسته بر رفتار سد آزاد (به‌عنوان سد بلند با هسته رسی)، زوایای قرارگیری محور هسته به ترتیب صفر، پنج، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۲ درجه نسبت به وضعیت قائم، تغییر داده شد. تحلیل تراوش سد آزاد با استفاده از نرم‌افزار SEEP/W، تحلیل تنش- کرنش با فرض کرنش صفحه‌ای برای مقطع تیپ سد در نرم‌افزار SIGMA/W و تحلیل پایداری دامنه‌های سد آزاد طی مراحل پایان ساخت و تراوش دائم از چهار روش معمولی، بیشاپ، جانبو و مورگنسترن- پرایس در نرم‌افزار SEEP/W انجام شد. تحلیل مدل‌ها در وضعیت کنونی سد و هم‌چنین تحت زوایای مایل فرضی هسته منتج به موارد زیر شد.

میزان دبی نشست از مقطع میانی سد با افزایش زاویه هسته افزایش یافت که این موضوع یکی از نقاط ضعف هسته‌های مایل نسبت به قائم می‌باشد. این نتیجه به‌طور نمونه مشابه با نتایج حاصل از پژوهش‌های Zahedi & Aghagani (2018)، Sazzad & Islam (2019) و

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

منابع

1. Aalimohammadi, S., Shahkarami, N., & Asadi H. (2021). Analysis of seepage in the conditions of increased reservoir capacity by raising the spillway level (Case study: Kamal-Saleh earth dam). *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(9) (2021). (In Persian)
2. Al-Labban, S. (2018). *Seepage and Stability Analysis of the Earth Dams under Drawdown Conditions by using the Finite Element Method*, Ph.D. Thesis, University of Central Florida, US.
3. Aminjavaheri, A., & Karam, M. (2014). Application of Shear Keys to Improve the Slope Stability of Earth Dams on Weak Alluvial Foundations. *Journal of Soil Behavior and Geomechanics, ASCE*, 642-650.
4. Asakereh, A., & Ahang, M. (2017). Numerical Analysis of Arching Phenomenon at Core of Baft Zoned Embankment Dam, Kerman. *Modares Civil Engineering Journal (M.C.E.J)*, 17(5). (In Persian)
5. Calamak, M., Kilic, Y., & Yanmaz A.M. (2020). On the Stability of Moderate Height Berm-Type Earthen Dams: The Hancagiz Dam Example. *Journal of Geotechnical and Geological Engineering*, 38, 4169-4179. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01286-6>
6. Fattah, M.Y., Omran, H.A., & Hassan, M.A. (2017). Flow and stability of Al-Wand earth dam during rapid drawdown of water in reservoir. *Journal of Acta Montanistica Slovaca*, 22(1).
7. Iran Water and Power Resources Development Company, (2008). *Geotechnical reports of Azad Rockfill Dam: Design of foundation and body of the dam*. (In Persian)
8. Javaheri, A. R. (2009). *Static and Dynamic Analysis of embankment Dams Using GEOSTUDIO*, Iran, Elme Omran Press. (In Persian)
9. karbor, A.H., & Soroush, A. (2011). Comparison of Behavior of an Embankment Dam with Inclined and Vertical Cores using Numerical Analysis. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 44(5). (In Persian)
10. Komasi, M., Mazaheri, A.R., & Beiranvand, B. (2020). Numerical analysis of the effect of arching Eyvashan dam in the first impounding period and its comparison with Instrumental results. *Journal of Water and Soil Conservation*, 26(6). DOI: 10.22069/jwsc.2019.14530.2969

های خط مرکزی هسته با شیب‌های مختلف، حدوداً در یک سوم میانی ارتفاع کل هسته بود، به طوری که حداکثر نشست قائم تقریباً در فاصله ۰/۴ ارتفاع کل هسته از تاج رخ داد.

- ضریب قوس‌زدگی در هر دو مرحله پایان ساخت و تراوش دائم برای یک زاویه مشخص، با افزایش عمق ابتدا کاهش و به یک مقدار کمینه رسید، پس از آن با نرخ ملایم‌تری روند تقریباً افزایشی داشت. به طور کلی از عمق ۰/۳ ارتفاع هسته تا کف آن، با افزایش زاویه تمایل هسته، احتمال پدیده قوس‌زدگی کم شد. این نتیجه با یافته حاصل از پژوهش Nayebzadeh & Mohammadi (2011) همخوانی دارد. روند تغییرات برای زوایای مختلف تقریباً یکسان بود. ضمن آن‌که مقدار کمینه ضرایب قوس‌زدگی حاصل شده، بیانگر عدم خطر قوس‌زدگی در زوایای مختلف هسته بود.

- دامنه‌های بالادست و پایین‌دست در پایان ساخت و حین نشست دائم برای هسته قائم و هسته‌های مایل دارای پایداری استاتیکی بود. پایداری استاتیکی دامنه پایین‌دست در پایان ساخت وابستگی چندانی به تغییر زاویه هسته نداشت، اما به‌هنگام تراوش دائم با افزایش زاویه هسته افزایش یافت. در دامنه بالادست با افزایش زاویه انحراف، ضریب اطمینان به‌ویژه برای زوایای بالای ۱۵ درجه به‌طور محسوسی کاهش یافت.

چنانچه مشاهده شد، تغییر شیب (محوری) هسته رسی در سدهای خاکریزه‌ای می‌تواند به‌طور هم‌زمان نقاط قوت و ضعف مختلفی را در رفتار سازه سد در پی داشته باشد. بنابراین وظیفه طراح است که به فراخور شرایط پروژه و تشخیص خود، نسبت به طرح سازه مطلوب و ایمن با در نظر گرفتن همه جوانب اقدام نماید.

پی‌نوشت‌ها

1. Arching

11. Mazaheri, A.R., Komasi, M., & Veisi, M. (2020). Numerical examination of embankment dams after construction and at the time of the first impounding-Case study is Doiraj dam in Ilam province. *Journal of Civil and Environmental Engineering*. (In Persian)
12. Motamedi, M., & Hosseini, S.M.M. (2006). Arching and Optimum Mixture Percentage of Materials in Karkkeh Dam, Iran.
13. Najafzadeh, M. (2019). Projection of seepage and piezometric pressure in earth dams using soft computational models. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(7). (In Persian)
14. Nayebzadeh, R., & Mohammadi, M. (2011). The Effect of Impervious Clay Core Shape on the Stability of Embankment Dams. *Journal of Geotechnical and Geological Engineering*, 29, 627-635. DOI 10.1007/s10706-011-9395-z.
15. Niroumand, H., Mirghasemi, A.A., & Pakzad, M. (2000). Monitoring of Karkkeh Dam during Construction Using Instrumentation Data, *4th Conference on Dam Construction*, Tehran, Iran.
16. Rahimi, H. (2013). *Embankment Dams*, Fourth Edition, Tehran University Press, Iran. (In Persian)
17. Salmasi, F. Norouzi, R. Abraham, J., & et al. (2020). Effect of Inclined Clay Core on Embankment Dam Seepage and Stability through LEM and FEM. *Journal of Geotechnical and Geological Engineering*, 38, 6571-6586. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01455-7>
18. Salmasi, F., & Hakimi Khansar, H. (2020). Simulation of behavior the Kabudval Dam during construction with 3D numerical modeling. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(9). (In Persian)
19. Sazzad, M. M., & Islam, M. M. (2019). A comprehensive study of different types of seepage control measures for earth dam using FEM. *Journal of Civil and Construction Engineering*, 5(1), 24-37.
20. Shakouri, B., & Mohammadi, M. (2020). Evaluation of Penetration Depth for Cutoff Walls in the Core of Earth Dams. *Journal of Geotechnical and Geological Engineering*, 38, 151-167. <https://doi.org/10.1007/s10706-019-01004-x>
21. Zahedi, P., & Aghazani, H. F. (2018). The effect of clay core specifications on the seepage behavior of an earthfill dam. *5th International Symposium on Dam Safety*, Istanbul, Turkey.