

## مطالعه شکست سد خاکی با استفاده از مدل GeoStudio (مطالعه مورد: سد خاکی

صفارود، کرمان)

حسن زمانپور<sup>۱</sup> و مهدی فولادی پناه<sup>۲\*</sup>

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه عمران، واحد رامهرمز، دانشگاه آزاد اسلامی، رامهرمز، ایران.

(۲) استادیار، گروه عمران، واحد رامهرمز، دانشگاه آزاد اسلامی، رامهرمز، ایران.

\*نویسنده مسئول: Fuladipناه@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۹/۱۲

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۷/۰۴

### چکیده

فرسایش داخلی یکی از عوامل اصلی شکست سدهای خاکی است که به سبب شسته شدن ذرات ریز خاک به وجود می‌آید و باعث ایجاد تراوش متمرکز در درون بدنه سد می‌شود که دلیل این امر کاهش تنش موثر قائم در هسته سدهای خاکی و وقوع پدیده قوس زدگی می‌باشد. این پدیده باعث نشست بیشتر هسته نسبت به پوسته می‌گردد که در نهایت ترک خوردگی سد را در پی دارد. در این تحقیق، با استفاده از نرم افزار Geo-Studio که مبتنی بر روش حل المان محدود است شبیه سازی عددی سد خاکی صفارود تحت دو سناریو (الف) بلافاصله پس از ساخت؛ (ب) پس از اولین آبیگری صورت گرفته است. پس از انجام فرآیندهای واسنجی و صحت سنجی در دو مازول SIGMA/W و SEEP/W، مدل رفتاری الاستیک غیرخطی برای پوسته سد و مدل رفتاری موهر-کلمب الاستیک-پلاستیک برای سد با ضریب همبستگی بین مقادیر اندازه گیری شده و محاسبه شده طی فرایندهای واسنجی و صحت-سنجی به ترتیب ۰/۹۴ و ۰/۹۲۴ تایید شدند. در این تحقیق، توزیع تنش قائم در بدنه سد، تغییر مکان های افقی و قائم و محاسبه میزان تنش کل در بدنه سد محاسبه شدند. پس از اولین آبیگری به ازای نسبت  $y/h$  کمتر از ۰/۱، احتمال شکست هیدرولیکی در این سد وجود دارد.

کلید واژه‌ها: المان محدود، ژئواستدیو، سد خاکی، شکست هیدرولیکی، قوس زدگی.

## مقدمه

بررسی پایداری و ایمنی سدهای خاکی تحت شرایط مختلف، از مباحث و مراحل اساسی در طراحی و اجرا می‌باشد. شکست هیدرولیکی سدهای خاکی یکی از دلایل مهم تخریب آنها است که به دلایل مختلفی از جمله ترک خوردگی، قوس زدگی و رگاب اتفاق می‌افتد. شکست هیدرولیکی به صورت معمول در اولین آبگیری در بدنه سدهای خاکی رخ می‌دهد که این اتفاق با کاهش تنش موثر قائم در هسته رسی سدها بوجود می‌آید که علت آن افزایش فشار آب منفذی در توده خاک هسته است. به همین دلیل بررسی فرآیند نشست و نحوه تغییرات فشار آب منفذی و به تبع آن تغییرات میزان تنش و جابجایی از اهمیت بسیاری زیادی برخوردار است. در سدهای خاکی به دلیل سختی کم مصالح به کار رفته در هسته نسبت به مصالح پوسته، نشست بیشتری در هسته رخ می‌دهد و منجر به انتقال بخشی از تنش به هسته سد خاکی می‌گردد (میرمحمدحسینی و همکاران، ۱۳۸۸). نتیجه این فرآیند کاهش میزان تنش در هسته و وقوع پدیده قوس زدگی و وقوع ترک در هسته است. مطالعه پدیده قوس زدگی در سدهای خاکی به کمک ضریبی به نام ضریب قوس زدگی،  $\eta$ ، به صورت زیر صورت می‌پذیرد:

$$\eta = \frac{\sigma_v}{\gamma h} \quad \text{رابطه ۱:}$$

که در این رابطه  $\sigma_v$  مقدار تنش کل در هسته،  $\gamma$  وزن مخصوص مصالح و  $h$  ارتفاع خاکریزی است. طبق این ضریب نسبت تنش قائم به سربار موجود در هر نقطه نشان دهنده بخشی از سربار است که به لایه‌های زیرین منتقل شده است و در واقع شاخصی از شدت وقوع پدیده قوس زدگی می‌باشد. هر چه این نسبت کمتر باشد یعنی مقدار کمتری از وزن سربار به لایه‌های تحتانی منتقل شده باشد و مقدار بیشتری از آن به فیلترهای پوسته تکیه کرده است. در صورتی که میزان قوس زدگی در هسته زیاد گردد ممکن است سبب ایجاد ترک‌های عرضی در هسته شود. در صورتی که ضریب قوس زدگی بزرگتر از یک باشد به این معناست که احتمال قوس زدگی وجود دارد و هر چه این ضریب بیشتر شود این احتمال افزایش می‌یابد. اگر ضریب قوس زدگی کوچکتر از یک باشد قوس زدگی به وقوع نخواهد پیوست (میرمحمدحسینی و همکاران، ۱۳۸۸؛ پاکباز و احمدی، ۱۳۸۸). اطلاعات آماری اشاره بر این دارد که سدهای خاکی بیش از سدهای بتنی در معرض تخریب هستند، همچنین بیش از ۵۰٪ خرابی‌ها یا آسیب دیدگی‌های سدهای خاکی در حین ساخت و یا در اولین آبگیری بوده است. شکست سد کانکی در سال ۱۸۹۵ در هندوستان، شکست سد سینکرکریک در آیداهو در سال ۱۹۴۳، تخریب سد مالپاست در فرانسه در سال ۱۹۶۱ و خرابی سد اوروس در برزیل در مارس ۱۹۶۰ مثال‌هایی در این زمینه هستند

(Djarwadi و همکاران، ۲۰۱۴). بلوری‌بزار و مبینی‌زاد (۱۳۸۹) بیان می‌کنند ایمنی و عملکرد یک سد باید در حین ساخت، اولین آبیگری و در دوران بهره برداری کنترل شود. تنش های ایجاد شده و نیز فشار آب منفذی در بدنه با توجه به تراز آب و اندازه گیری آنها با ابزار دقیق در این دوره از اهمیت ویژه برخوردار است. رفتار غیرخطی و غیر ارتجاعی مصالح سدهای خاکی در بارگذاری و باربرداری و در حالت زهکشی شده یا زهکشی نشده استفاده از مدل های رفتاری که قادر به مدل سازی رفتار هرچه دقیق تر خاک را باشند، ضروری می سازد. جهانی و همکاران (۱۳۹۰) پایداری سدآسفالت هسته ای مجیران را در دو حالت استاتیکی و دینامیکی بررسی کردند. به این نتیجه رسیدند که نتایج حاصل از آنالیز برگشتی سد با ابزار دقیق تطابق خوبی باهم دارند. و سد در برابر زلزله های اعمالی ایمن است. حکیمی و همکاران (۱۳۹۳) در بررسی خود به ارزیابی رفتار سد خاکی کبودوال با استفاده از روش اجزا محدود پرداختند. آنها در تحقیق خود از نرم افزار Plaxis برای تحلیل تئوریک و مقایسه نتایج به دست آمده با مقادیر اندازه گیری شده تنش موثر و فشار آب منفذی در بدنه سد خاکی استفاده کردند. نتایج حاصل از تحقیق حاکی از انطباق مناسب بین شبیه سازی عددی و ابزار دقیق سد بود. خامسی و میرقاسمی (۱۳۸۹) با استفاده از روابط ارائه شده توسط محققین مختلف، به بررسی پدیده شکست هیدرولیکی سدهای خاکی هیته جوت و گلابر پرداختند. برای این کار تحلیل کوپل تنش- فشار آب حفرهای برای سد انجام شده است. در نتیجه این ارزیابی ها مشخص شد وقوع شکست هیدرولیکی در سد گلابر غیر محتمل تشخیص داده شد. Derakhshani و همکاران (۲۰۱۷) در مطالعه ای به مدلسازی عددی سد سنگریزه ای و نیار در ایران پرداختند. در این مدلسازی میزان نشست، فشار آب حفرهای و تنش کل برای ارزیابی رفتار کلی سد مورد ارزیابی قرار گرفت. فاکتور قوس زدگی در این سد حدود ۰/۸۳ تا ۰/۹۰ می باشد که نشان می دهد در سد مورد نظر احتمال وقوع قوس زدگی وجود ندارد. Vandamm و Zou (۲۰۱۳) پایداری شیب شیروانی های را با استفاده از روش جابجایی گوه شکل و روش هیدرودینامیک ذره ای مورد بررسی قرار دارند. آنها از این روش به منظور کنترل شکست هیدرولیکی شیب ها استفاده نمودند. Pakbaz و همکاران (۲۰۰۹) به ارزیابی ساخت دیوار آب بند بتن پلاستیک در تکیه گاه راست و چپ سد خاکی کرخه در کاهش مقدار تراوش پرداختند. نتایج آنها نشان داد که با ساخت دیوار آب بند چپ و راست مقدار تراوش به ترتیب ۶۰ و ۲۰ درصد کاهش می یابد. روشنگر و همکاران (۱۳۹۵) به تحلیل روش های مختلف در ارزیابی میزان تراوش در سد گلفرج با استفاده از نرم افزار GeoStudio پرداختند. نتایج آنها نشان داد استفاده از دیوار آب بند یا پتوی بتنی در بالادست میزان تراوش را به ترتیب ۹۵ و ۱۰ درصد کاهش می دهد. خزایی و همکاران (۱۳۹۲) در تحلیل سه بعدی نشست از پی و جناحین سدهای خاکی با در نظر گرفتن توپوگرافی ساختگاه سد گیوی در استان اردبیل به ای نتیجه رسیدند که با افزایش نفوذپذیری، روند افزایش دبی تراوش در حالت عدم اجرای پرده تزریق نسبت به حالت اجرای پرده تزریق بیشتر است.

همانطور که مشخص است وقوع پدیده شکست هیدرولیکی یکی از عوامل بسیار مهم در خرابی و شکست پروژه‌های سد خاکی می‌باشد. به همین دلیل لزوم شبیه‌سازی و بررسی احتمال وقوع این پدیده امری بسیار لازم و ضروری خواهد بود. در این تحقیق، با استفاده از نرم‌افزار GeoStudio و با کمک دو ماژول SEEP/W و SIGMA/W به تحلیل و بررسی پدیده قوس‌زدگی در سد خاکی صفارود در استان کرمان پرداخته شده است.

## مواد و روش‌ها

در این تحقیق، برای محاسبه مقدار دبی نشت و نیز تعیین تغییر شکل سد از نرم‌افزار Geo-Stedio با مش‌بندی مرکب (مثلث و مربع) استفاده شده است. این نرم‌افزار این قابلیت را دارد که در شرایط ماندگار و شرایط غیرماندگار آنالیز تراوش را انجام دهد و شرایط آب و خاک را در حالت‌های مرحله‌ای بررسی کند. این نرم‌افزار براساس روش عددی اجزا محدود استوار است و می‌توان آنالیز پارامترهای مختلفی مانند تنش-کرنش (با استفاده از ماژول SIGMA/W)، جریان و تحلیل تراوش (با استفاده از ماژول SEEP/W)، پایداری شیب (با استفاده از ماژول SLOPE/W)، تحلیل دینامیکی (با استفاده از ماژول QUAKE/W)، توزیع دما در بدنه سد خاکی (با استفاده از ماژول TEMP/W)، و ... را انجام داد. در این تحقیق از زیربخش SEEP/W و SIGMA/W برای تحلیل سد خاکی استفاده شده است.

مدل SEEP/W براساس رابطه داری در دو وضعیت اشباع و غیراشباع فرمول‌بندی شده است. یکی از بزرگترین تفاوت‌هایی که در دو حالت اشباع و غیراشباع وجود دارد ضریب نفوذپذیری هست که در حالت غیراشباع برخلاف حالت اشباع ثابت نیست و تابعی از درجه اشباع و مکش موجود در خاک غیراشباع است (روشنگر و همکاران، ۱۳۹۵).

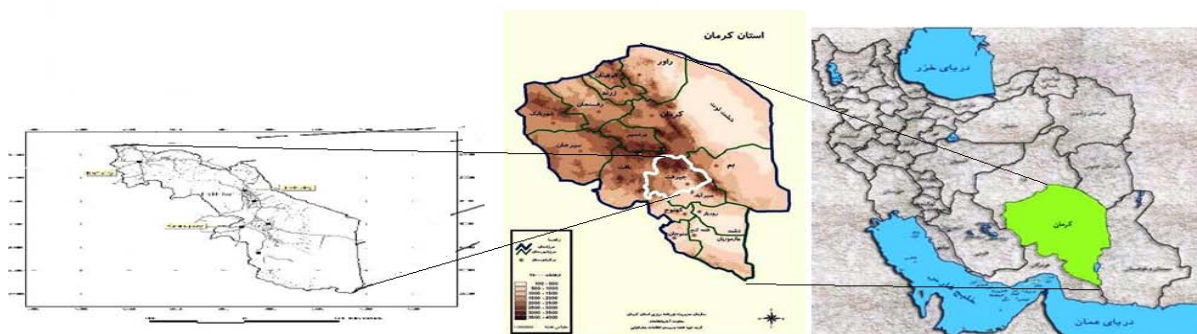
$$\frac{\partial}{\partial x} \left( -k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( -k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad \text{رابطه ۲:}$$

که در این معادله  $x$  و  $y$  مختصات مکانی،  $k_x$  و  $k_y$  ضریب نفوذپذیری در راستای افقی و قائم،  $t$  متغیر زمان،  $H$  بار آبی کل،  $Q$  فلاکس مرزی اعمال شده و  $\theta$  دبی جریان هستند. این معادله بیانگر وضعیت جریان غیردایمی است و تفاوت بین جریان ورودی و خروجی از یک جزء حجمی در یک نقطه در زمان مشخص را تشریح می‌کند. چنانچه جریان دایمی باشد دبی حجمی سیال ورودی و خروجی از یک جزء حجمی در هر زمان یکسان هست. لذا طرف دوم معادله ۱ به صفر تبدیل می‌شود. ماژول SIGMA/W از فرمول‌های ارائه شده توسط (Duncan and Chang, 1970) برای مدول‌های مورد نیاز استفاده می‌کند. در این مدل رفتاری، فرمول‌بندی منحنی تنش-کرنش بصورت هذلولی است و مدول‌های خاک تابعی

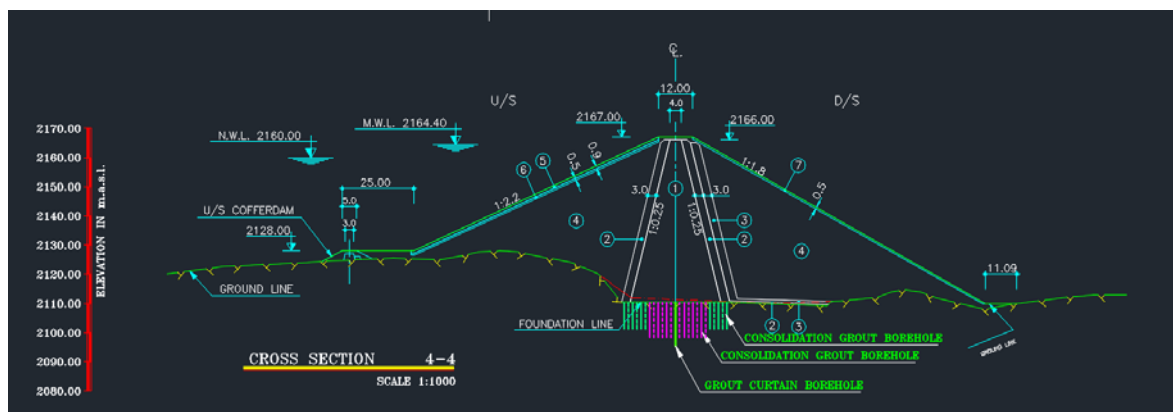
از تنش‌های همه جانبه و تنش برشی است که خاک تجربه می‌کند. این مدل غیرخطی مصالح را می‌توان از آزمایش‌های سه محوری به دست آورد.

### معرفی سد خاکی صفارود

سد مخزنی صفارود در هفت کیلومتری جنوب شرقی شهرستان رابر و در ۳۵ کیلومتری شرق شهر بافت روی روخانه رابر و پس از تلاقی رودخانه‌های رابر-رودبر واقع شده است. ساختگاه سد در ابتدای محل اتصال این دره انتخاب شده است. حداکثر ارتفاع این دره از بستر رودخانه حدود ۷۷ متر می‌باشد. از نظر جغرافیایی محدود طرح سد مخزنی صفارود در ۰۰' ۵۸' ۵۶° طول جغرافیایی و ۹۹' ۱۵' ۳۹° عرض جغرافیایی قرار گرفته است. هسته این سد از نوع رسی است. حجم بدنه سد برابر با ۵/۶ میلیون مترمکعب، طول تاج سد ۸۸۰ متر، عرض تاج ۱۲ متر، عرض بدنه در پی ۳۷۰ متر، حجم کل مخزن ۶۷ میلیون مترمکعب، طول دریاچه ۳۲ کیلومتر، و تراز نرمال آب ۲۱۶۰ متر از سطح دریاهای آزاد هستند. در (شکل ۱) موقعیت سد صفارود در کشور ایران و استان کرمان نشان داده شده است. (شکل ۲) نمایی از پروفیل عرضی سد صفارود همراه با برخی مشخصات هندسی آن را نشان می‌دهد. خصوصیات مصالح سد صفارود در (جدول ۱) ارائه شده است.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی سد خاکی صفارود



شکل ۲: مقطع عرضی سد خاکی صفارود

جدول ۱: خصوصیات مصالح به کار رفته در بدنه سد خاکی صفارود

$K_0$	$\phi$	C	M	$K_b$	$R_f$	n	$K_{ur}$	K	$V_{sat}$	مشخصات
-	درجه	$KN.m^{-2}$	-	$m.day^{-1}$	-	-	$m.day^{-1}$	$m.day^{-1}$	$ton.m^{-3}$	
۰/۸۲	۱۰	۱۰	۰/۲۰	۲۴۰	۰/۹۳	۰/۳۶۳	۱۶۸	۱۲۰	۲/۰۵	هسته
۰/۴۳	۳۵	۰/۰	۰/۲۰	۲۰۰	۰/۸۰	۰/۳۰	۶۰۰	۴۰۰	۲/۰	فیلتر
۰/۳۲	۴۳	۰/۰	۰/۲۰	۳۴۰	۰/۸۵	۰/۵۲	۱۲۴۲	۱۰۳۵	۲/۲۰	پوسته بالادست
۰/۳۵	۴۰	۰/۰	۰/۲۰	۳۴۰	۰/۸۲	۰/۵۲	۹۲۷	۷۷۱	۲/۲۰	پوسته پایین دست

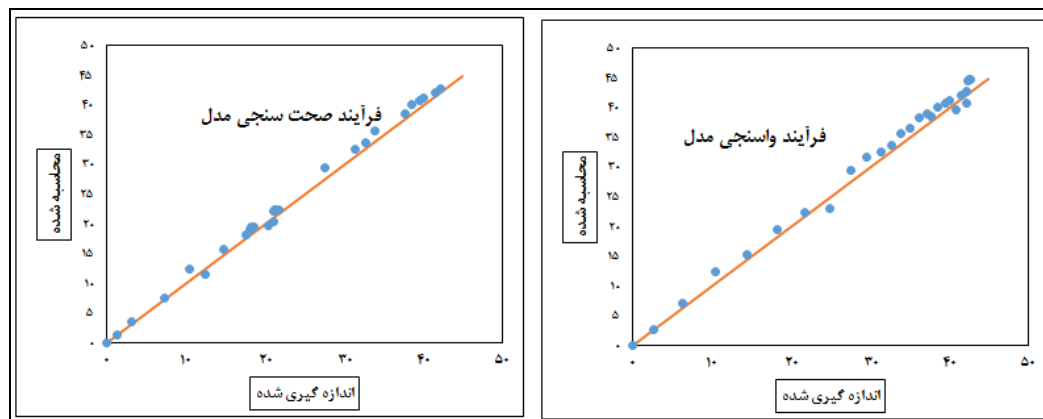
## ابزار دقیق سد خاکی صفارود

فرآیند رفتارسنجی به معنی بررسی عملکرد یک سازه در طی دوران ساخت و بهره برداری و تطبیق آن با پیش بینی-های زمان طراحی با استفاده از ابزار دقیق می‌باشد. ابزار دقیق به منظور کنترل و اندازه‌گیری پارامترهایی نظیر تنش کل، فشار آب منفذی، نشست‌ها و تغییر شکل‌های افقی مورد استفاده قرار می‌گیرند. ابزار دقیق به کار رفته در سد خاکی صفارود مشتمل بر اندازه‌گیری نشست و تغییر شکل سطحی، انحراف‌سنج، نشست‌سنج هیدرولیکی، فشارسنج خاک، فشارسنج آب منفذی در هسته، فشارسنج آب منفذی در فیلتر و پوسته پایین دست، فشارسنج آب منفذی در پی، پیزومتر لوله‌ای است.

## فرآیند کالیبراسیون و صحت‌سنجی

معرفی پارامترهای مورد نیاز برای شبیه‌سازی عددی، یکی از مراحل بسیار مهم در فرآیند مدلسازی است. بدین منظور باید به ازای انتخاب گزینه‌های مختلف برای پارامترهای مدل مورد استفاده، حداکثر مقدار درست‌نمایی را از طریق مقایسه بین خروجی مدل عددی با مقادیر اندازه‌گیری شده به دست آورد. فرآیند واسنجی و صحت‌سنجی مدل در دو مازول SIGMA/W و SEEP/W به ترتیب از طریق استفاده از پارامترهای ژئوتکنیکی و پارامترهای هیدرولیکی انجام پذیرفت. در طی این فرآیند، بیشترین انطباق بین مقادیر خروجی مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده بین مقادیر تنش-کرنش و فشار آب منفذی در هسته سد صفارود تحت شرایط اشباع مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اطلاعات موجود، ۷۰ درصد آنها برای فرآیند واسنجی و ۳۰ درصد آنها برای صحت‌سنجی مورد استفاده قرار گرفتند. در نهایت مدل رفتاری الاستیک غیرخطی برای پوسته سد و مدل رفتاری موهر-کلمب در قالب الاستیک-پلاستیک برای سد صفارود مورد تایید قرار گرفت. در (شکل ۳) مقایسه‌ای بین مقادیر فشار آب منفذی محاسبه شده و اندازه‌گیری شده برای دوره واسنجی و صحت‌سنجی

نشان داده شده است. خط مستقیم در این دو نمودار، خط شاخص انطباق می‌باشد. مقدار ضریب همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده طی فرآیندهای واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب ۰/۹۶ و ۰/۹۲۴ محاسبه شد.

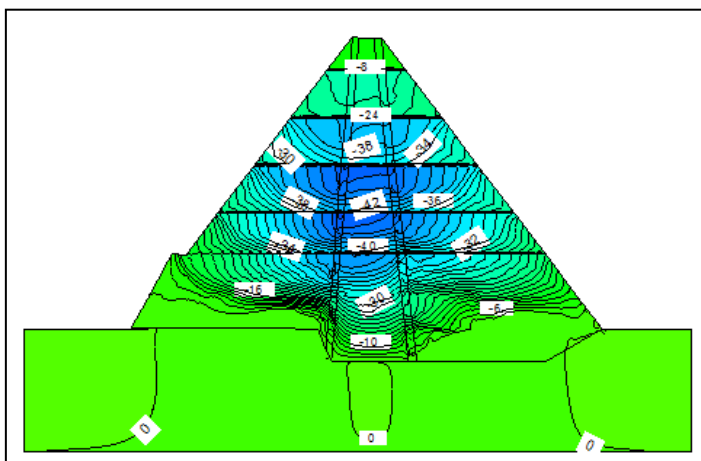


شکل ۳: فرآیند واسنجی و صحت‌سنجی مدل براساس شاخص فشار آب منفذی

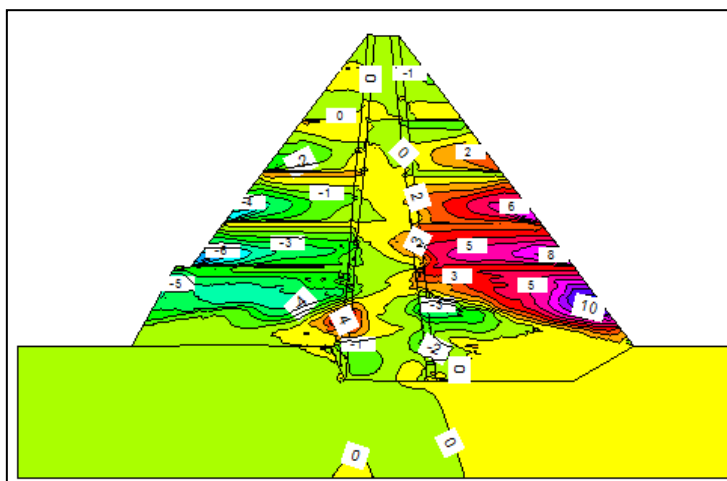
به منظور شبیه‌سازی هر چه بهتر سد خاکی براساس روش المان محدود، لازم است تعداد حداقلی لایه‌ها برای مدل‌سازی عددی تغییر شکل لحاظ شود. طبق تحقیقات و مطالعات انجام گرفته توسط زمردیان و صاحب‌زاده (۱۳۸۳)، حداقل تعداد لایه‌های لازم برای رسیدن به جواب معقول در محدوده  $0/1H$  تا  $0/11H$  می‌باشد که در این معادله  $H$  ارتفاع سد از پی است. در این تحقیق، تعداد لایه‌ها براساس ارتفاع ۷۷ متری سد صفارود، برابر با ۸ لایه انتخاب شد.

#### آنالیز سد خاکی صفارود پس از شرایط ساخت سد

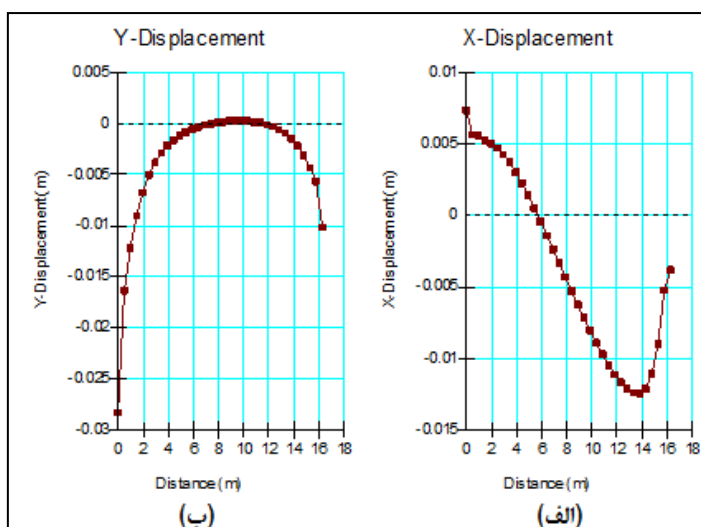
در (شکل ۴) و (شکل ۵) به ترتیب کانتورهای تغییر مکان قائم و افقی سد نشان داده شده است. تغییر مکان‌های قائم و افقی به ترتیب بین  $0/۸۹۹$  متر و  $۷/۲۵۲$  تا  $۱۰/۶$  متر قرار گرفته‌اند. در (شکل ۶-الف) و (شکل ۶-ب) به ترتیب تغییر مکان افقی و قائم انتهای هسته نشان داده شده است. طبق این شکل، تغییر مکان افقی در پی هسته متقارن نمی‌باشد و سمت چپ هسته تغییر شکل بیشتری دارد. (شکل ۷) و (شکل ۸) به ترتیب تغییرات مقادیر ضریب قوس‌زدگی در امتداد محور مرکزی سد و کانتورهای تنش قائم در هسته سد خاکی صفارود را نشان می‌دهند. طبق (شکل ۷)، بیشترین و کمترین ضریب قوس‌زدگی به ترتیب در تاج و ارتفاع نسبتاً کمی از تاج هسته اتفاق افتاده است. در (شکل ۸)، تغییرات تنش‌های قائم بین  $۶۷۳۸$  تا  $۸۸۹۲$  کیلوپاسکال در تغییر است. (شکل ۹) میزان تنش قائم در هسته و فشار هیدرواستاتیک آب و تنش ناشی از وزن هسته را نشان می‌دهد. طبق این شکل، احتمال شکست هیدرولیکی در سد صفارود وجود دارد.



شکل ۴: کانتورهای تغییر مکان قائم سد صفارود

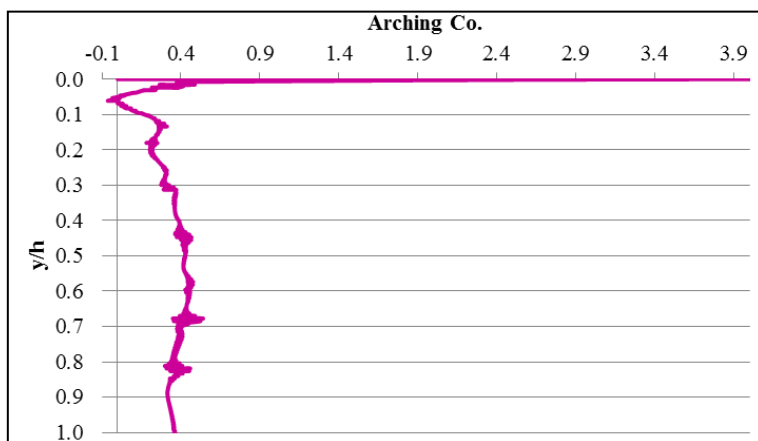


شکل ۵: کانتورهای تغییر مکان افقی سد صفارود

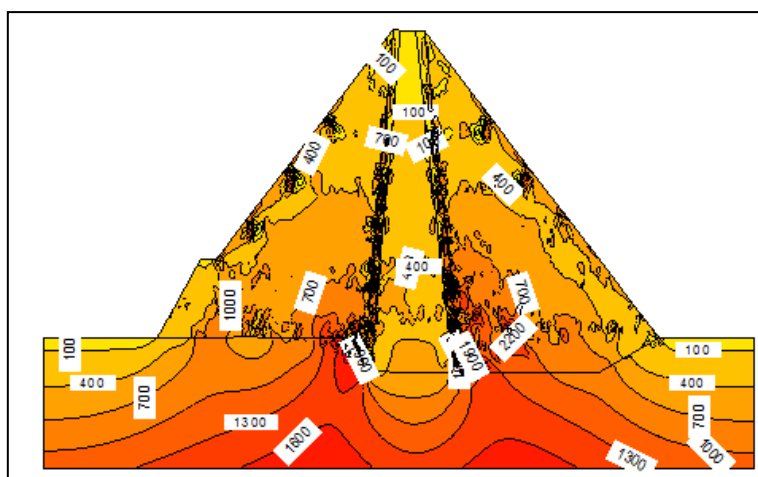


شکل ۶: تغییر مکان قسمت انتهایی هسته سد صفارود

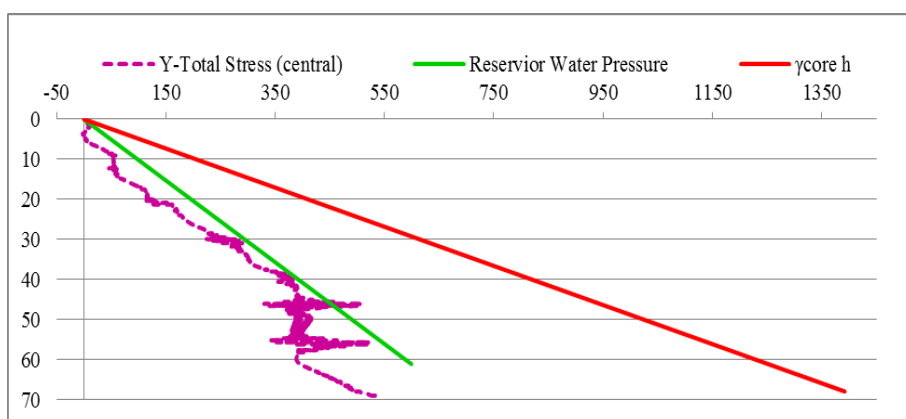




شکل ۷: ضریب قوس زدگی هسته سد خاکی صفارود



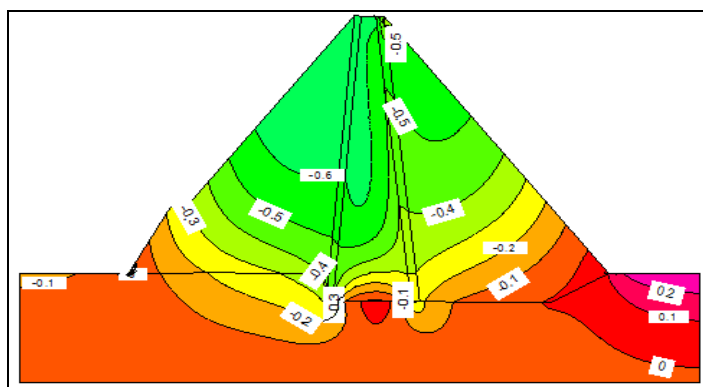
شکل ۸: کنتورهای تنش قائم در شرایط انتهای ساخت سد خاکی صفارود



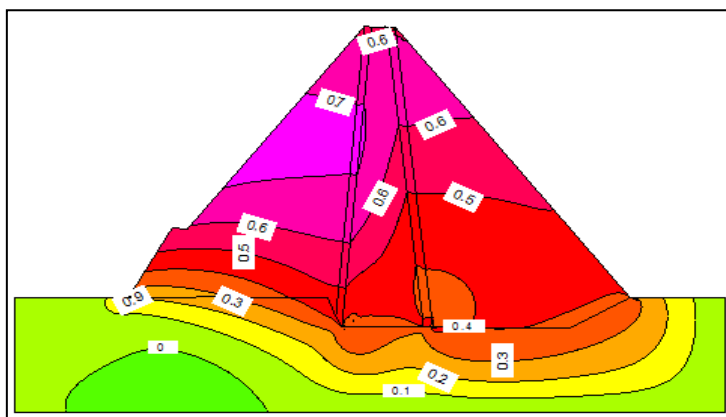
شکل ۹: مقایسه تنش قائم و فشار هیدرواستاتیک آب مخزن و تنش ناشی از وزن مصالح هسته

## آنالیز سد صفارود پس از اولین آبگیری

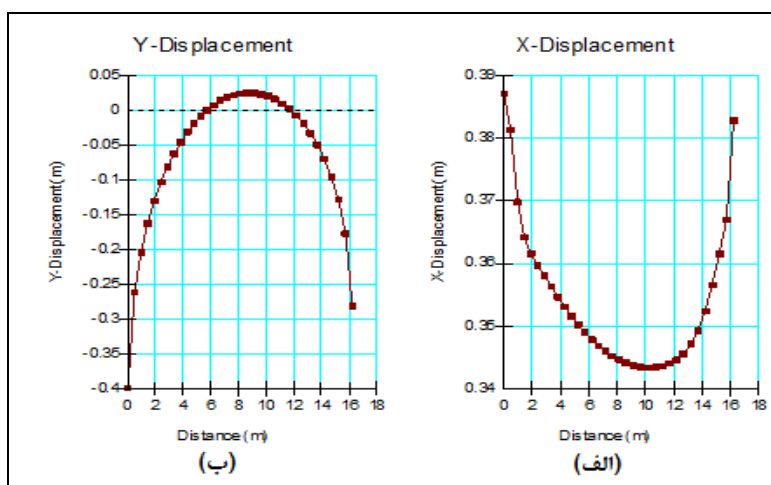
در این بخش تحلیل تغییر شکل‌های افقی و قائم در شرایط اولین آبگیری با استفاده از ماژول SEEP/W محاسبه شده است. برای شرایط مرزی وجه شیبدار بالادست مخزن به علت تغییر ارتفاع این نقاط از شرط مرزی Total Head با مقدار ۸۲/۰۳۴ متر و برای شرط مرزی پایین‌دست سد صفارود نیز گزینه Potential Seepage استفاده شد. (شکل ۱۰) کانتورهای تغییر مکان قائم سد صفارود را نشان می‌دهد که در محدوده بین ۱/۰۰۹- تا ۰/۸۹۳۴ متر قرار گرفته است. کانتورهای تغییر مکان افقی سد در (شکل ۱۱) نشان داده شده است که در محدوده ۰/۷۳۵- تا ۱/۳۲۶ قرار دارد. گراف‌های تغییر شکل افقی و قائم در محل پی هسته در (شکل ۱۲-الف) و (شکل ۱۲-ب) نشان داده شده‌اند. (شکل ۱۳) کانتورهای تنش قائم را نشان می‌دهد که بین ۳۱۴/۹- تا ۹۳۷۶ کیلوپاسکال در تغییر هستند. منحنی تغییرات ضریب قوس‌زدگی در امتداد محور مرکزی سد در (شکل ۱۴) نمایش داده شده است. با توجه به اینکه مقدار ضریب قوس‌زدگی در طول هسته در محدوده بیشتر از یک قرار دارد بنابراین احتمال وقوع شکست هیدرولیکی در بخش‌های بالایی هسته رسی سد صفارود وجود دارد. (شکل ۱۵) میزان تنش قائم در هسته، فشار هیدرواستاتیک آب و تنش ناشی از وزن هسته را نشان می‌دهد.



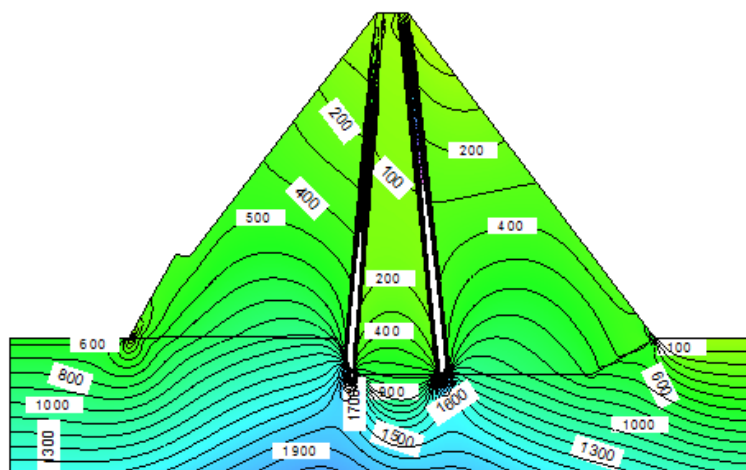
شکل ۱۰: کانتورهای تغییر مکان قائم سد خاکی صفارود پس از اولین آبگیری



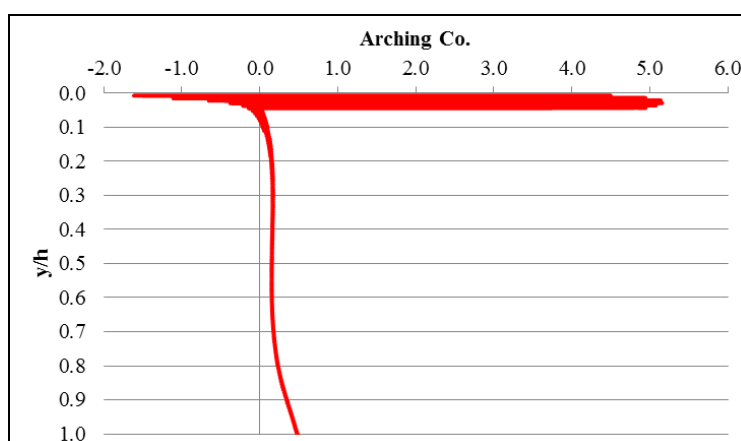
شکل ۱۱: کانتورهای تغییر مکان افقی سد خاکی صفارود پس از اولین آبگیری



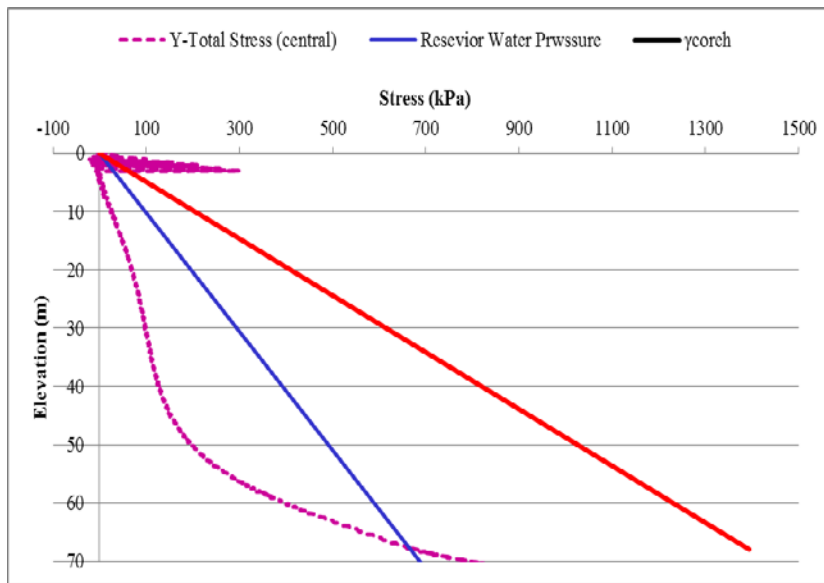
شکل ۱۲: تغییر شکل افقی و قائم در قسمت انتهایی سد خاکی صفارود



شکل ۱۳: کانتورهای تنش قائم در بدنه سد خاکی صفارود پس از اولین آبیگری



شکل ۱۴: منحنی تغییرات ضریب قوس زدگی در هسته سد خاکی صفارود پس از اولین آبیگری



شکل ۱۵: مقایسه تنش قائم، فشار هیدرواستاتیک آب مخزن و تنش ناشی از وزن مصالح هسته در سد خاکی صفارود

#### بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق بررسی تغییرات مکانی و همچنین تغییرات ضریب قوس‌زدگی به منظور پایش پدیده شکست هیدرولیکی در سد خاکی صفارود در استان کرمان با استفاده از نرم‌افزار GeoStudio انجام گرفت. بدین منظور، منحنی تغییرات مکانی قائم و افقی، تغییرات تنش قائم و نیز تغییرات ضریب قوس‌زدگی طی دو سناریو (۱) بلافاصله پس از ساخت و (۲) بعد از اولین آبیگری ترسیم شدند. در اولین سناریو طبق (شکل ۴)، بیشترین تغییر مکان قائم در میانه هسته سد و حداکثر تغییر شکل در قسمت مرکزی هسته اتفاق افتاده است. بیشترین تغییر مکان مربوط به هسته و کمترین تغییر مکان قائم مربوط به پی سنگی می‌باشد. طبق شکل ۵، پوسته سد به نسبت تغییر مکانی داشته است که در مقایسه با هسته کمتر می‌باشد. پی سنگی هیچ‌گونه تغییر مکان افقی نداشته است. بیشترین تغییر مکان افقی مربوط به لایه‌های پایینی پوسته می‌باشد (اولین لایه‌های خاکریزی). پوسته در مقایسه با هسته تغییر مکان افقی بیشتری را تجربه کرده است. حرکت پوسته بالادست به سمت چپ با علامت منفی کانتورهای تغییر شکل افقی و حرکت پوسته پایین‌دست به سمت راست با علامت مثبت کاملاً مشخص می‌باشد. با توجه به (شکل ۶) می‌توان گفت سمت چپ هسته تغییر شکل قائم بیشتری دارد و تغییر شکل قائم هسته تا حدودی متقارن می‌باشد. (شکل ۷) نشان می‌دهد با توجه به مقدار ضریب قوس‌زدگی، احتمال شکست هیدرولیکی در تمام طول ارتفاع هسته وجود دارد. با توجه به (شکل ۱۰) در سناریوی دوم می‌توان گفت بیشترین تغییر مکان مربوط به تاج سد و قسمت بالایی بدنه می‌باشد. پی در پایین‌دست کمی به سمت بالا و در بالادست کمی

به سمت پایین جابه‌جا شده است. با توجه به (شکل ۱۱) می‌توان نتیجه گرفت بیشترین میزان تغییر شکل افقی در محل اتصال پوسته پایین دست به پی سد است. توزیع تغییر شکل افقی در سد از نظم خاصی پیروی نمی‌کند. میزان تغییر شکل افقی و قائم قسمت انتهایی هسته با توجه به (شکل ۱۲) تقریباً متقارن هستند. با توجه به (شکل ۱۵) می‌توان گفت چون میزان فشار هیدرواستاتیکی مخزن بیشتر از تنش کل می‌باشد احتمال شکست هیدرولیکی در بدنه سد وجود دارد.

## منابع

- بلوری بزار، ج. و مبینی زاد، م. (۱۳۸۹). ارزیابی رفتار سد خاکی نهرین در طول ساخت به روش اجزای محدود و مقایسه با مقادیر واقعی. مجله پژوهش آب ایران، (۴): ۱۰-۱.
- پاکباز، م.س. و احمدی، ص. (۱۳۸۸). تحلیل رفتار تنش- کرنش سد البرز با استفاده از قرائت‌های ابزار دقیق و تحقیق میزان و موقعیت تنش‌های بحرانی حین ساخت تا پایان ساخت. هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه شیراز، ۲۳-۲۱ اردیبهشت، شیراز، ایران.
- جهانی، ص.، گلماهی، ح. و ضیاتبار احمدی، م. (۱۳۹۰). مطالعه و بررسی مدلسازی عددی اجزای محدود جهت بررسی پایداری شیروانی‌ها در حین ساخت و پرشدن و افت سریع مخزن (مطالعه موردی سد میجران با استفاده از نرم افزار پلکسیس). پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد.
- حکیمی‌خانسر، ح.، گلماهی، س. ح.، و شیداییان، م. (۱۳۹۳). ارزیابی رفتار سد خاکی کبودوال (قره‌سو-زرینگل) در طول ساخت به روش اجزای محدود با نرم افزار PLAXIS و مقایسه با مقادیر واقعی حاصل از داده‌های ابزار دقیق. فصلنامه تخصصی علوم و مهندسی آب، (۹): ۵۰-۳۳.
- خامسی، س.ا. و میرقاسمی، ع.ا. (۱۳۸۹). بررسی شکست هیدرولیکی در هسته سدهای خاکی. نشریه مهندسی عمران و نقشه برداری، (۲): ۱۹۱-۱۸۱.
- خزائی، ج.، شرفی، ح.، ستاری، د. و هدایتی، ج. (۱۳۹۲). تحلیل سه بعدی نشست از پی و جناحین سدهای خاکی با در نظر گرفتن توپوگرافی ساختگاه (مطالعه موردی: سد گیوی). هفتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه زاهدان، ۱۸-۱۷ اردیبهشت، زاهدان، ایران.
- روشنگر، ک.، روح‌پرور، ب. و صداقتی، ط. (۱۳۹۵). ارزیابی تاثیرگزینه‌های مختلف طراحی در تحلیل تراوش و پایداری سد گلفرج. نشریه دانش آب و خاک، جلد ۲۶، شماره (۱): ۳۰-۱۵.
- میرمحمدحسینی، س.م.، موسوی خونساری، م. و احمدی فرد، ر. (۱۳۸۸). ارزیابی فشار منفذی در هسته سد کرخه هنگام ساختن و آبیگری همزمان. مجله مهندسی آب، سال دوم: ۴۷-۳۷.

**Derakhshandi, M., Pourbagherian, H.R., Baziar, M.H., Shariatmadari, N. and Sadeghpour, A.H. (2017). Numerical Analysis And Monitoring Of A Rock Fill Dam At The End Of Construction (Case Study: Vanyar Dam). International Journal of Civil Engineering, 12, 4, pp: 326-337.**

- 
- Djarwadi, D., Suryolelono, K.B., Suhendro, B. and Hardiyatmo, H.C. (2014).** A Study on Unsteady Seepage Flow through Dam (Jun-Feng FU, Sheng JIN). *Procedia Engineering*, pp: 489-497.
- Pakbaz, M.S., Dardaei, A. and Salahshoor, J. (2009).** Evaluation of performance of plastic concrete cutoff wall in Karkheh dam using 3-D Seepage analysis and measurement. *Journal of Applied Sciences* 9, 4, pp: 724-730.
- Vandamme, J. and Zou, Q. (2013).** Investigation of slope instability induced by seepage and erosion by a particle method. *Computers and Geotechnics*, 48, pp: 14-20.