

A.R. Mazaheri

Department of Engineering
Faculty, Ayatollah Boroujerdi
University.

e-mail: A.Mazaheri@abru.ac.ir

R. Alipour*

Civil Engineering Department,
Shahrekord University, Iran.

e-mail: R.alipour@sku.ac.ir

B. Shokri Derivand

Department of engineering,
Islamic Azad University, Iran.

e-mail: shokridrk@gmail.com

Study the Monitoring and Numerical Analyses of Rockfill Dam (Case Study of Marvak Dam in Lorestan, Iran)

In this study, behavior of Marvak Rockfill Dam with clay core by 68 m height by using numerical modelling by GeoStudio software and monitoring results have been evaluated. In the first step of this study, Marvak dam have been numerically modelled by GeoStudio software and vertical stresses in the core and maximum settlement during construction have been determined. At the next step, results have been compared with monitoring results in the various parts of the dam. Comparison of the numerical and monitoring results depicted that at the elevation 1590 m, 31 m lower than crest, maximum settlement in the instrument INC 10 in which located 4 m upstream of dam body is 810 mm and numerical results is equal to 800 mm. Maximum settlement in long term and arching occur in the middle of the dam approximately. The value of arching ratio is between 0.73-1 which indicate that Marvak Dam is in stable condition.

Keywords: Marvak rockfill dam, Monitoring instrument, Settlement, Total stress, Arching, GeoStudio.

* Corresponding author

Received 11 February 2020, Revised 12 June 2020, Accepted 16 June 2020.

DOI: 10.22091/cer.2020.5223.1194

بررسی عددی رفتار سد خاکی و مقایسه آن با داده‌های ابزار دقیق (مطالعه موردی سد مروک لرستان)

در این تحقیق رفتار سد خاکی مروک با هسته رسی که دارای ارتفاع ۶۸ متر می‌باشد، با استفاده از مدل‌سازی عددی نرم‌افزار GeoStudio و ابزار دقیق بررسی گردیده است. ابتدا هندسه این سد خاکی در نرم‌افزار، مدل‌سازی شده و تنش‌های قائم در هسته و مقدار نشست بیشینه در حین ساخت تعیین گردیده است. آنگاه نتایج با قرائت‌های ابزار دقیق نصب شده در قسمت‌های مختلف بدنه سد مقایسه شده است. مقایسه نتایج تحلیل‌های عددی و قرائت‌های ابزار دقیق نشان می‌دهد زمانی که تراز ساخت سد در ارتفاع ۱۵۹۰ متری از سطح دریا (۳۱ متر پایین‌تر از تاج سد) باشد حداکثر نشست اندازه‌گیری شده در پایان ساخت سد با ابزار INC 10-1 که در ۴ متری بالادست محور سد نصب شده است، مقدار ۸۱ سانتی‌متر بوده و نتایج تحلیل عددی مقدار نشست در همان نقطه را برابر ۸۰ سانتی‌متر نشان می‌دهد. بیشترین میزان قوس‌زدگی و نشست قائم در درازمدت تقریباً در وسط سد رخ می‌دهد. مقدار ضریب قوس‌زدگی بین ۰/۷۳ تا ۱ می‌باشد که بیانگر این است که سر مروک در وضعیت پایدار قرار دارد.

واژگان کلیدی: سد خاکی مروک، ابزار دقیق، نشست، تنش کل، قوس‌زدگی، GeoStudio.

احمد رضا مظاهری

دانشکده مهندسی، دانشگاه
آیت‌الله بروجردی.
پست الکترونیک:

A.Mazaheri@abru.ac.ir

رسول عالی پور*

دانشکده مهندسی، دانشگاه
شهرکرد، ایران.
پست الکترونیک:

R.alipour@sku.ac.ir

بهزاد شکری دری‌کوند

کارشناس ارشد ژئوتکنیک،
دانشگاه آزاد اراک.
پست الکترونیک:

shokridrk@gmail.com

۱- مقدمه

مراحل طراحی ضروری است و رفتارنگاری آنها در راستای ارزیابی عملکرد و عکس‌العمل این سازه‌های مهم در شرایط مختلف بارگذاری یعنی سه دوره زمان ساخت، اولین آگیری و زمان بهره‌برداری بسیار اهمیت دارد [۱]. به‌منظور بررسی پایداری سدها مطالعات بسیاری بر روی سدهای بزرگ خاکی و رویه بتنی انجام گردیده است. گیگز و ساکلاریو^۱، به مقایسه نتایج تغییرشکل‌پذیری‌های افقی واقعی در مشاهدات ثبت شده ژئودزی پیوسته بر رفتار سد خاکی مورونوس در یونان توسط آنالیز برگشتی عددی پرداختند که در آن مدل‌سازی ژئوتکنیکی سد با استفاده از نرم‌افزار زد سویل^۲ که براساس روش المان محدود استوار است انجام شد. آنها نتیجه‌گیری کردند که

سدها از نظر اقتصادی، اجتماعی و سیاسی دارای اهمیت بسیار زیادی می‌باشند. نقش سدها در توسعه کشاورزی، عمران مناطق روستائی و شهری، تأمین آب آشامیدنی، تولید انرژی هیدروالکتریک، کنترل و تنظیم شدت جریان آب در رودخانه‌ها و غیره قابل توجه است. به‌علت بالا بودن هزینه ساختمان سدها و نیز شدت وخامت عواقب ناشی از پایداری سدها، مسأله حفاظت و نگهداری و ارزیابی مستمر پایداری سدها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تضمین وضعیت پایداری سد در کلیه

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۲۲، بازنگری: ۱۳۹۹/۰۳/۲۳، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۲۷.
DOI: 10.22091/cer.2020.5223.1194 شناسه دیجیتال

1- Gikas and Sakellariou
2- Z-Soil

تجزیه و تحلیل‌های عددی برای حل مسائل پیچیده پایداری به‌طور گسترده استفاده می‌شود [۷-۱۱]. به‌طور مثال، رفتار نشست سد شیبویا^۵ در طول ساخت و ساز و آبیگری اولیه، با استفاده از تجزیه و تحلیل دوبعدی المان محدود مورد بررسی قرار گرفت. محققان، نتایج را با داده‌های اندازه‌گیری ابزار دقیق در رقوم نشست‌ها نیز مقایسه کردند [۱۲]. با مقایسه نتایج اینگونه تحلیل‌ها با واقعیت که همان نتایج ابزار دقیق است، علاوه بر اعتباربخشی به تحلیل عددی، می‌توان مبنای مناسبی برای انجام یک تحلیل برگشتی^۶ برای حصول به پارامترهای دقیق ژئوتکنیکی ایجاد کرد [۱۳ و ۱۴]. با این حال، نتایج حاصل از این تحلیل‌ها می‌تواند مبنای مناسبی برای تحلیل‌های بعدی از جمله رفتارنگاری در دوران بهره‌برداری و تحلیل عددی دینامیکی سد باشد.

کماسی و همکاران، استوار کشکولی و همکاران و مظاهری و همکاران با استفاده از نتایج ابزار دقیق به بررسی جابه‌جایی‌های افقی و قائم و نیز فشار آب حفره‌ای در سدهای ایوشان، رودبال داراب و دویرج ایلام پرداخته‌اند [۱۵-۱۸].

در این تحقیق، سعی شده است ابتدا بدنه سد مروک در نرم‌افزار عددی مدل‌سازی گردد و سپس نتایج حاصل از تنش‌ها، نشست‌ها و مقادیر قوس‌زدگی با مقادیر استاندارد مقایسه و در ادامه با قرائت نتایج ابزار دقیق در نقاط مختلف بدنه سد، نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی مورد مقایسه و ارزیابی قرار گیرد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی سد مروک

سد مخزنی مروک در استان لرستان و به فاصله حدود ۴۰ کیلومتری از شهرستان دورود واقع شده است. این سد بر روی رودخانه تیره از سرشاخه‌های رود دز و در

روش اجزای محدود با نتایج اندازه‌گیری واقعی، یک روش مناسب برای بررسی یا کالیبره کردن تغییرات هندسی حاصل از مطالعات مدل‌سازی است [۲]. در سال ۲۰۱۱، مول و استروب هار^۳، به بررسی سد نام نگوم در چین و مقایسه نتایج ابزار دقیق و تحلیل عددی پرداختند و نتیجه گرفتند که خزش مصالح سد یک چالش اصلی در پیش‌بینی تغییرشکل‌ها است [۳]. ژوهو و همکاران^۴ در سال ۲۰۱۶، به بررسی سد خاکی در چین پرداختند. آنها با استفاده از ماهواره، سری‌های زمانی تداخل را برای نظارت بر تغییرشکل‌پذیری سطح سد انجام دادند [۴]. حائری و فقیهی، به بررسی رفتار سد طالقان در زمان ساخت پرداختند. آنها با مقایسه نتایج ابزار دقیق و تحلیل‌های انجام شده به ناکارآمدی مدل الاستیک خطی در تعیین تغییرشکل‌ها در سدهای سنگریزه‌ای و خاکی به خصوص در هسته پی بردند [۱]. پژوهشگران، سد گتوندعلیا که یک سد سنگریزه‌ای با هسته رسی مخلوط می‌باشد را به‌صورت دوبعدی و با استفاده از نرم‌افزار FLAC تحلیل نمودند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که مقادیر نشست‌های سد در محدوده مجاز قرار دارد [۵]. محققان دیگری نیز، به بررسی رفتار سد گتوندعلیا با استفاده از نتایج ابزار دقیق پرداختند و نتیجه گرفتند که اکثر نشست‌های بدنه سد حین ساخت رخ می‌دهد و این نشست‌ها در محدوده مجاز قرار دارد [۶]. در سدهای خاکی به‌منظور کنترل رفتار و عملکرد سد، در قسمت‌های مختلف بدنه و در اعماق مختلف ابزارهایی جهت کنترل فشار آب منفذی، تنش قائم و تنش افقی نصب می‌گردد. تعدادی از این ابزار، طی نصب و در طی زمان، کارایی خود را از دست می‌دهند بنابراین لازم است در پاره‌ای از زمان‌ها تحلیل‌های مختلفی به منظور کنترل نتایج ابزارها صورت گیرد.

⁵- Shuibuya

⁶- Back Analysis

³- Moll and Straubhaar

⁴- Zhou et al.

شکل ۲، مقطع سد و محل نصب ابزارهای نصب شده در ترازهای مختلف در مقطع ۱۰-۱۰ را نشان می‌دهد که در هسته رسی به ازای هر ۳ متر خاکریزی یک صفحه نشست، در پوسته‌ها به ازای هر ۶ متر و در پی در هر ۶ متر صفحه نشست‌سنج نصب شده است [۱۹].

در کل بدنه سد در مجموع ۱۵۶ ابزار نصب شده است که از این تعداد، ۹۰ عدد پیژومتر، ۲۹ عدد تنش‌سنج و ۸ عدد نشست‌سنج در داخل بدنه سد به کار رفته است. در جدول ۱ تعداد ابزار نصب شده در بدنه سد نشان داده شده است.

جدول ۱- ابزاربندی بدنه و پی سد مروک

نوع ابزار نصب شده	تعداد ابزار نصب شده
پیژومتر الکتریک	۲۴
پیژومتر کاساگرانده	۳۲
فشارسنج	۲۹
انحراف‌سنج	۸
پیژومترهای فونداسیون	۳۴
نشست‌سنج سطحی	۲۷
شتاب‌نگاشت زلزله	۳

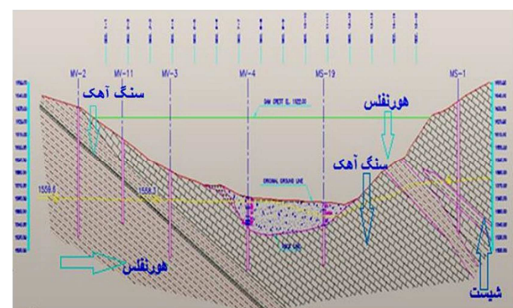
۲-۳- مدل‌سازی عددی بدنه سد مروک

۲-۳-۱- مشخصات هندسی، ابعاد مدل و تعداد لایه‌ها
به‌منظور مدل‌سازی بدنه سد از نرم‌افزار GeoStudio استفاده شده است. در این خصوص، نیاز است همانند اجرای واقعی بدنه که مرحله به مرحله خاکریزی صورت می‌گیرد، در نرم‌افزار نیز این اصل رعایت گردد. حداقل تعداد لایه‌های لازم برای رسیدن به نتایج معقول در مدل‌های کامپیوتری سد، $H/10$ و $H/9$ ارایه شده که H ارتفاع از پی سد می‌باشد [۲۰]. ارتفاع سد مروک از پی ۶۸ متر می‌باشد؛ از اینرو، حداقل تعداد لایه‌ها جهت مدل‌سازی ۷ لایه می‌باشد که در مدل‌سازی انجام شده جهت بالا بردن دقت نتایج ۱۲ لایه در نظر گرفته شده است.

فاصله حدود دو کیلومتری بالادست روستای مروک احداث گردیده است. طول تاج سد ۴۸۶، عرض تاج ۱۲، ارتفاع سد از پی ۶۸ و طول دریاچه ۸۵۰۰ متر می‌باشد. همچنین تراز تاج سد ۱۶۲۱ متر از سطح دریا و مساحت دریاچه ۶۸۰ هکتار می‌باشد. هدف از ساخت سد، تأمین نیاز آبی اراضی توسعه کشاورزی پایاب سد در حدود ۳۲ میلیون مترمکعب در دشت سیلاخور و با قابلیت ذخیره‌سازی تا حدود ۱۰۰ میلیون مترمکعب در سال بوده است [۱۹]. ساختگاه سد مخزنی مروک، از دیدگاه زمین‌شناسی ایران، در منطقه سندنج- سیرجان، در جنوب‌شرقی شهر بروجرد و شمال‌غربی شهر دورود قرار دارد. در ساختگاه، رودخانه تیره از سوی شمال خاوری به سوی جنوب باختری جریان دارد و تنگه‌ای به طول ۶۸۸ متر در سنگ‌های آهک بلورین، هورنفلس و شیست حفر کرده است. ساختگاه در ابتدای تنگه انتخاب گردیده است [۲۰]. شکل ۱، مقطع زمین‌شناسی مهندسی سد را نشان می‌دهد.

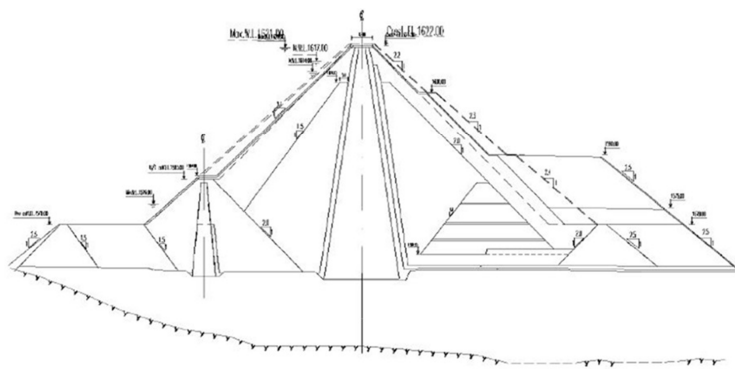
۲-۲- سیستم ابزار دقیق بدنه سد مروک

در قسمت‌های مختلف بدنه سد مروک و در ترازهای ارتفاعی گوناگون عملیات نصب ابزار دقیق انجام شده است.

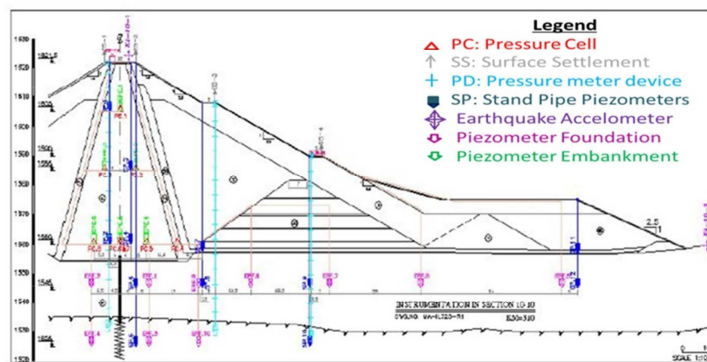


شکل ۱- مقطع عرضی زمین‌شناسی محل سد [۱۹]

بیشترین ابزار در مقطع ۱۰-۱۰ که بزرگترین مقطع سد می‌باشد، قرار گرفته است. لذا این مقطع، به‌عنوان مقطع بحرانی سد جهت انجام تحلیل‌ها انتخاب شده است.



(الف)



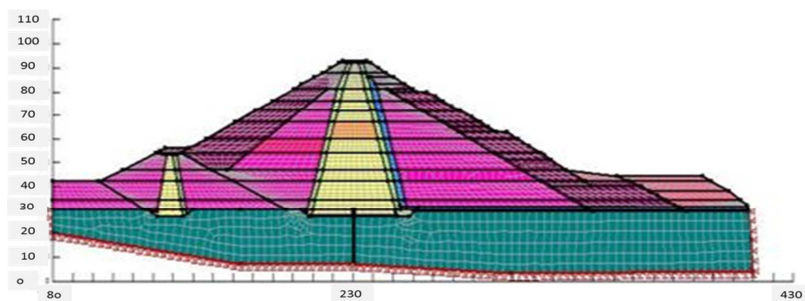
(ب)

شکل ۲- (الف) مقطع عرضی ۱۰-۱۰ سد مروک و (ب) محل نصب ابزار دقیق در مقطع ۱۰-۱۰

شده‌ای می‌باشد، انتخاب شده است. متغیرهای مورد نیاز در مدل عبارتند از: وزن مخصوص، مدول الاستیسیته، ضریب پواسون، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، زاویه اتساع. جدول ۲ پارامترهای ژئومکانیکی مصالح بدنه سد را نشان می‌دهد.

۲-۳-۲- مشخصات لایه‌های خاک و مش‌بندی

در شکل ۳، لایه‌بندی و مش‌بندی بدنه سد در نرم‌افزار نشان داده شده است. با توجه به طبیعت غیرخطی مصالح ژئوتکنیک به‌ویژه خاک، مدل رفتاری غیرخطی الاستوپلاستیک موهر- کولمب، که مدل شناخته



شکل ۳- شبکه المان محدود ایجاد شده برای مقطع عرضی ۱۰-۱۰ سد مروک

X مقید گردیده‌اند. به‌منظور دستیابی به مدل دقیق‌تر، مدل‌سازی سد به‌صورت مرحله‌ای و در ۱۲ مرحله انجام

۲-۳-۳- شرایط مرزی و مراحل مدل‌سازی

به‌منظور ایجاد شرایط مرزی مناسب، گره‌های کف پی در دو جهت X و Y و گره‌های مرزی کناری در جهت

شده تا امکان مدل سازی مرحله ای دوران ساخت بدنه سد ایجاد گردد.

جدول ۲- مقادیر پارامترهای مصالح سد مروک

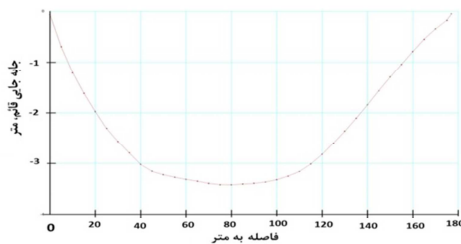
وزن مخصوص مرطوب (kN/m^3)	وزن مخصوص خشک (kN/m^3)	زاویه اصطکاک (deg)	چسبندگی (kN/m^2)	مدول الاستیک (kN/m^2)	ضریب پواسون	نفوذپذیری (m/sec)	نوع مصالح
۱۷	۱۸	۱۸	۲۰	۲۰	۰/۳	$۲/۵ \times 10^{-6}$	هسته
۱۹	۲۰	۳۰	صفر	۳۵	۰/۲	۱×10^{-3}	پوسته
۲۰	۲۱	۴۴	صفر	۹۰	۰/۲	۱×10^{-4}	پوسته درشت دانه
۲۰	۲۱	۲۵	صفر	۲۵	۰/۲	۱×10^{-4}	فیلتر
۲۰	۲۱	۲۵	صفر	۲۵	۰/۲	۱×10^{-4}	زهکش
۲۱	۲۲	۲۷	۱۰۰	۴۰	۰/۳	۱×10^{-10}	فونداسیون

ضخامت لایه های خاکریزی مدل، ۸ متر و با میانگین ۴ متر می باشد.

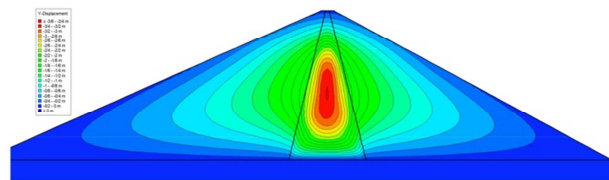
۲-۳-۴- صحت سنجی مدل سازی

به منظور صحت سنجی نتایج، مدل سازی سد گذار لندر در خوزستان با ارتفاع ۱۷۸ متر توسط نرم افزار GeoStudio/Slope انجام پذیرفت. به این منظور، مدل سازی سد گذار لندر انجام پذیرفت و نتایج مختلف مدل سازی عددی با نتایج ابزار دقیق مقایسه گردید. در شکل ۴، نتایج جابه جایی قائم برای سد گذار لندر نشان داده شده است که تطابق بسیار خوبی با نتایج ابزار دقیق دارد.

در هنگام ساخت مدل پس از هر مرحله لایه بندی شرایط تنش های موجود در ساختگاه، پیش از احداث سد مدل می شود و پس از اعمال شرایط اولیه و شرایط مرزی، پی سد مورد تحلیل قرار گرفته است. در این حالت، مدل، آماده ایجاد شرایط جدید که همان ایجاد لایه های خاکریزی است می باشد. در این شرایط، با ایجاد هر لایه خاکریزی، تحلیل تا رسیدن به شرایط تعادل، ادامه می یابد. در نهایت، با تعریف لایه آخر، شرایط پایان ساخت مدل می شود. به دلیل مراحل پلکانی زمان ساخت بدنه سد، از مش مستطیلی استفاده گردید. تعداد کل المان های در نظر گرفته شده برای سد در مقطع حداکثر و پی، جمعاً ۴۸۷۱ المان و ۴۲۷۵ گره می باشد و حداکثر



(ب)



(الف)

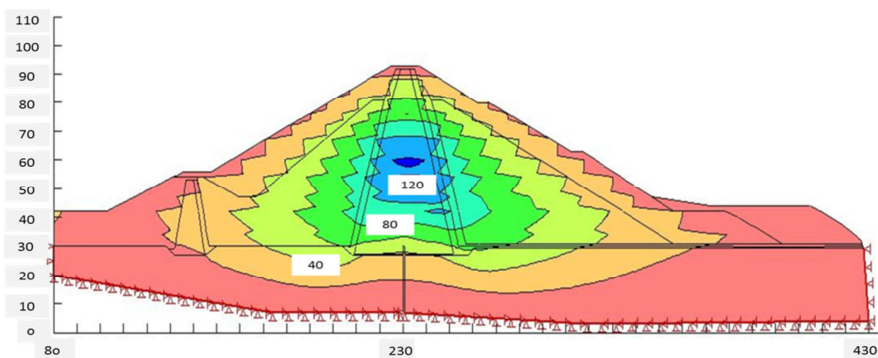
شکل ۴- صحت سنجی مدل نرم افزاری با مدل سازی سد گذار لندر با به دست آوردن جابه جایی های قائم (الف) و (ب) در هسته سد

۳- نتایج و بحث

پس از بیان نحوه مدل سازی و مشخصات و تراز ابزار نصب شده در بدنه سد، نیاز است تا نتایج به دست آمده از تحلیل های عددی مورد ارزیابی و بررسی دقیق قرار گیرد.

شده است، برابر ۱۱۴ سانتیمتر می‌باشد. با توجه به ارتفاع ۶۸ متری سد، این مقدار نشست در حدود ۱/۷ درصد ارتفاع سد می‌باشد. براساس نشست متعارف دیگر سدهای دنیا در حین و پایان ساخت که بین ۱ تا ۲ درصد ارتفاع سد مجاز می‌باشد [۲، ۳ و ۴]، این میزان نشست در حد معمول قرار دارد. دلایل دستیابی به مقادیر مختلف نشست در قسمت‌های مختلف بدنه بستگی به جنس مصالح هسته و پوسته و نیز باز توزیع تنش‌ها و مقادیر آنها در قسمت‌های گوناگون سد دارد.

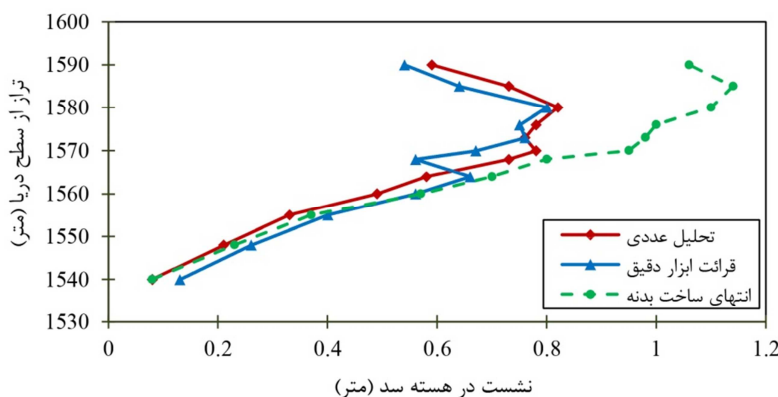
همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، روند نتایج قرائت شده ابزار دقیق با نتایج تحلیل عددی هم‌خوانی مناسبی دارد. بیشترین نشست پیش‌بینی شده توسط تحلیل در پایان ساخت ۱۱۴ سانتی‌متر و در تراز ۱۵۸۵ می‌باشد.



شکل ۵- توزیع نشست در بدنه و هسته سد در پایان ساخت (مقادیر به سانتیمتر می‌باشند)

به‌دلیل کم شدن عرض قسمت هسته سد و استفاده از پوسته سد به‌عنوان یک تکیه‌گاه در جلوگیری از افزایش نشست در قسمت‌های نزدیک به تاج سد دانست.

به‌طور کلی، این نتایج نشان می‌دهد که میزان نشست قائم در قسمت‌های میانی بدنه سد بیشترین مقادیر خود را تجربه می‌کند. این موضوع را می‌توان



شکل ۶- تغییرات نشست در پایان ساخت و مقایسه نتایج تحلیل عددی و ابزار دقیق INC10-1

هسته است که دلیل آن تغییر شکل پذیری کمتر مصالح درشت‌دانه پوسته نسبت به مصالح هسته رسی است.

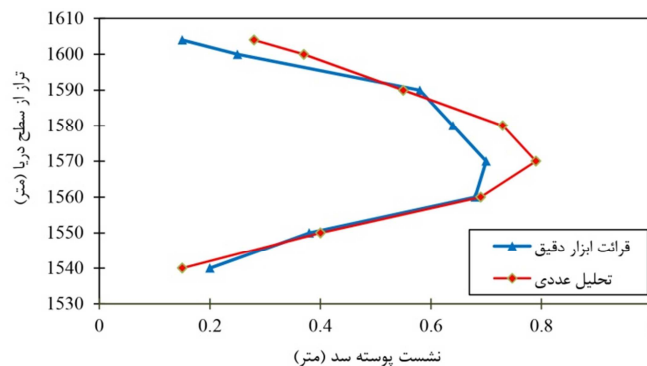
۳-۲- تنش قائم در بدنه سد مروک

به‌منظور کنترل تنش کل و نیز بررسی پدیده قوس‌زدگی در سد مروک از ابزار سلول فشارکل، نوع تار مرتعش استفاده شده است. در مقطع ۱۰-۱۰ برای بررسی وضعیت تنش قائم کل، ۱۴ عدد سلول تنش کل در سه تراز ۱۵۶۰، ۱۵۸۵ و ۱۶۰۵ سد نصب شده‌اند.

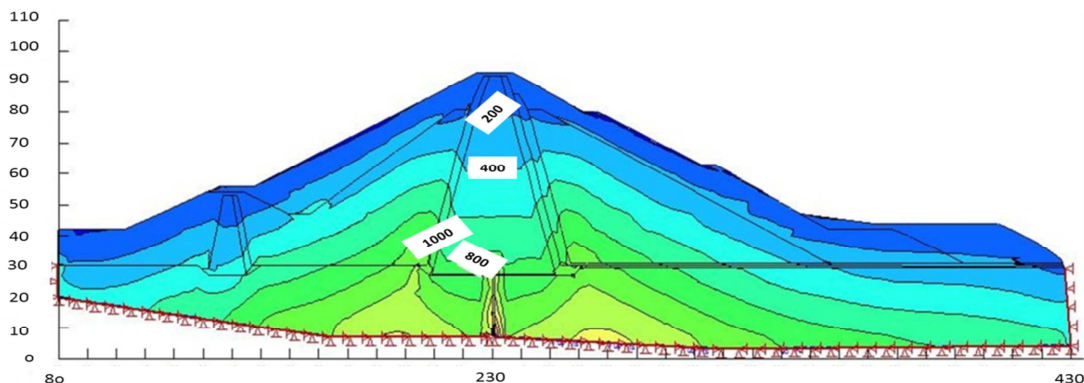
نتایج کانتور تنش و نحوه توزیع تنش قائم در پایان ساخت در شکل ۸ نشان داده شده است. مقدار تنش‌های قائم در هسته نسبت به پوسته کمتر است که این موضوع به‌علت سختی کمتر مصالح هسته می‌باشد.

نتایج حاصل از اندازه‌گیری نشست قائم در پوسته پایین‌دست در شکل ۵ نشان داده شده است. مقدار بیشینه نشست حاصل از تحلیل برابر ۷۹ سانتیمتر و بیشینه نشست اندازه‌گیری شده توسط ابزار دقیق INC10-2 در نشیب‌بند و در انتهای ساخت، ۶۸ سانتیمتر است که تطابق رفتاری خوب روند واقعی نشست اندازه‌گیری شده در پوسته را نشان می‌دهد. منحنی‌های نشست سد همانند نتایج تحقیقات سایر پژوهشگران سهمی‌شکل هستند، زیرا در هر مرحله از خاکریزی، لایه‌های زیرین، اجازه نشست پیدا کرده و نشست حداکثر تقریباً در تراز میانی سد واقع می‌گردد [۵].

با مقایسه نمودارهای نشست هسته در شکل ۶ و پوسته پایین‌دست در شکل ۷ ملاحظه می‌شود که مقدار نشست در پوسته پایین‌دست کمتر از مقدار نشست در



شکل ۷- نتایج نشست به‌دست آمده از تحلیل و ابزار دقیق INC10-2



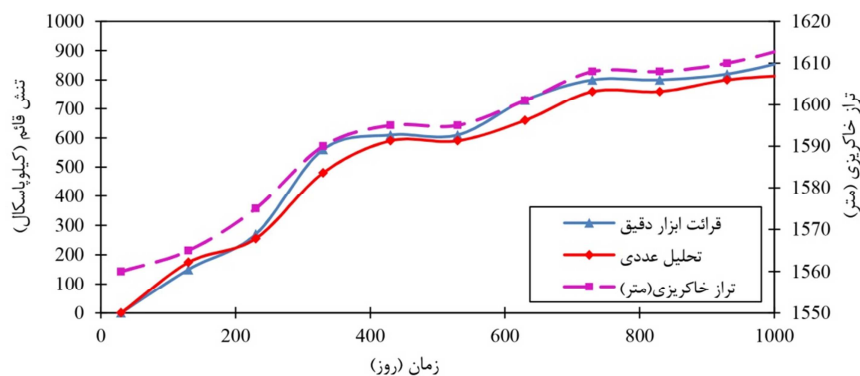
شکل ۸- نتایج کانتور تنش و نحوه توزیع تنش قائم در تمام بدنه سد در پایان ساخت

متفاوت می‌باشد. این تفاوت مقدار نشست، سبب می‌شود تمام وزن مصالح به خاک لایه‌های زیرین آن منتقل نگردد

در محل اتصال پوسته به هسته سد به‌علت تغییر جنس مصالح و تغییر مدول الاستیک آنها مقدار نشست

شکل ۹، نتایج تنش قائم به دست آمده از تحلیل و ابزار دقیق را در تراز ۱۵۶۰ و در ۱۰ متری بالادست محور سد نشان می‌دهد.

که این موضوع به خوبی در شکل ۸ نشان داده شده است. در لایه‌های پایین‌تر، این تغییر شیب کنتورهای تنش در محل اتصال هسته به پوسته، بیشتر می‌شود.



شکل ۹- نتایج تنش قائم به دست آمده از تحلیل و ابزار دقیق در تراز ۱۵۶۰ و در ۱۰ متری بالادست محور در پایان ساخت

مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده تا چه مقدار به خط رگرسیون با شیب یک، نزدیک است. در محاسبات، هرچه قدر مقدار NS به عدد یک نزدیک‌تر باشد، آنگاه کارایی بیشتر مدل را نشان می‌دهد [۸]. در واقع، چنانچه مقدار NS معادل یک گردد، برازش کاملی را نشان می‌دهد و بیانگر انطباق کامل بین داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده است. با اعمال رابطه (۱) بر روی داده‌های تنش قائم مشاهداتی و پیش‌بینی شده در شکل ۱۰، مقدار ضریب تعیین ۰/۹۹ به دست آمده که نشانگر هم‌خوانی نتایج مربوط به ضریب قوس‌زدگی برای مقادیر ابزار دقیق و مقادیر نرم‌افزار می‌باشد.

همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است مقادیر پیش‌بینی تنش و نشست در نقاط و ترازهای مختلف بدنه سد با نتایج قرائت شده ابزار دقیق برای حدود ۳۰ نقطه متفاوت مقایسه گردیده است.

همانطور که مشخص است از لحاظ مهندسی، نتایج به دست آمده از تحلیل عددی با دقت مناسبی با نتایج مشاهده‌ای ابزار دقیق هم‌خوانی دارد. اختلاف میان پیش‌بینی در مدل‌سازی‌های عددی و نتایج ابزار دقیق عمدتاً شامل موارد زیر می‌باشد:

مقدار بیشینه تنش قائم کل حاصل از تحلیل در هسته در این مقطع، در حدود ۷۹۰ کیلوپاسکال در تراز ۱۵۶۰ و بیشترین تنش قائم در این نقطه که توسط ابزار pc-3 اندازه‌گیری شده است، مقدار ۸۷۰ کیلوپاسکال می‌باشد. براساس نتایج تحلیل‌های عددی تنش قائم حاصل در تراز ۱۵۸۵ در پایان ساخت، مقدار ۴۵۰ کیلوپاسکال و در تراز ۱۶۰۵ در پایان ساخت، مقدار ۲۰۰ کیلوپاسکال می‌باشد. به طور معمول، فشار کل با افزایش سربار ناشی از خاکریزی، افزوده می‌شود.

به منظور ارزیابی و مقایسه عملکرد نتایج حاصل از تنش و نشست ابزار دقیق و مدل Geo-studio از رگرسیون چندمتغیره و از معیار کرائی نش- ساتکلیف^۷ در رابطه (۱) استفاده شده است.

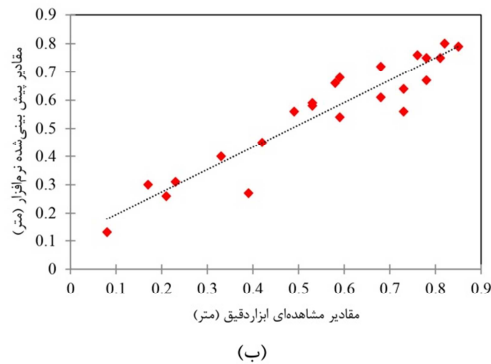
$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - O_{ave})^2} \quad (1)$$

در این رابطه، n تعداد نمونه‌ها، O_{ave} میانگین مقادیر مشاهداتی، O_i و P_i به ترتیب مقادیر مشاهده‌ای و مقادیر پیش‌بینی شده است.

ضریب تعیین، نشان می‌دهد که خط رگرسیون بین

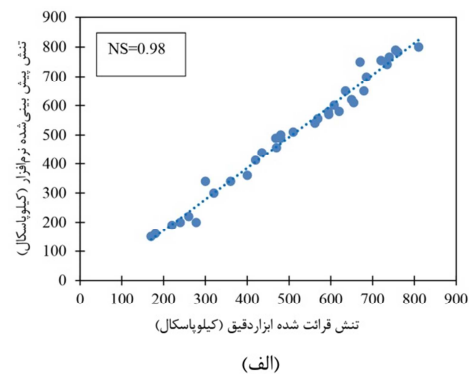
⁷ - Nash-Sutcliffe

ج- مسائل اجرایی و نحوه تراکم و ضخامت لایه‌ها به‌همراه اعمال رطوبت لازم که ممکن است به صورت یکسان و هموژن نباشند.



الف- تقریب‌هایی که در روش‌های عددی برای پیش‌بینی پدیده‌های فیزیکی به‌کار می‌روند تا مسأله قابل حل باشد.

ب- رفتار مصالح و نحوه مدل‌سازی آنها در نرم‌افزارهای عددی که خود دارای پیچیدگی‌های خاص خود می‌باشد.



شکل ۱۰- نمودار پراکنش برای مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده، (الف) مقادیر تنش و (ب) مقادیر نشست

تحتانی منتقل شده و مقدار بیشتری از آن به فیلترها یا پوسته تکیه کرده است [۱۰].

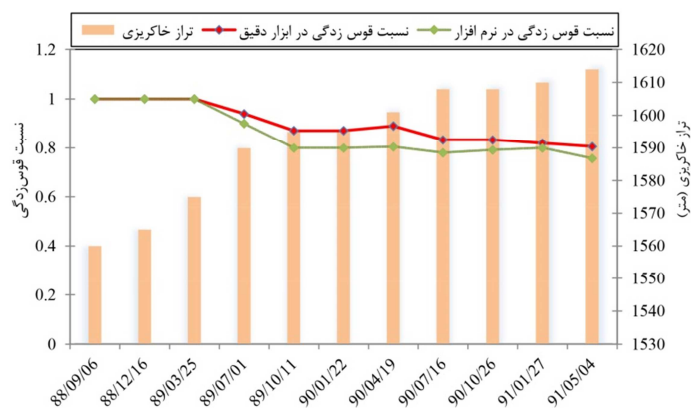
شکل ۱۱، تغییرات ضریب قوس‌زدگی در ۱۰ متری بالاتر از محور سد در تراز ۱۵۶۰ متری (۵/۶۱ متر پایین‌تر از تاج سد) را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود روند تغییرات ضریب قوس‌زدگی با افزایش ارتفاع خاکریز روند کاهشی است. علاوه بر آن با توجه به شکل ۱۲ تغییرات ضریب قوس‌زدگی در تراز ۱۵۶۰ (۵/۶۱ متر پایین‌تر از تاج سد) و در ۱۰ متری پایین‌تر از محور سد مقدار قوس‌زدگی در نزدیکی فیلتر، بیشتر است. با توجه به اینکه نتایج تحلیل تنش قائم در این نقطه بیشتر است، از این‌رو نتایج تحلیل با نتایج ابزار دقیق متفاوت می‌باشد. این امر به دلیل تفاوت در پارامترهای طراحی خاک در عمل با واقعیت، متفاوت می‌باشد و بخشی دیگر، به احتمال بروز خطا و یا عملکرد نامناسب این ابزار است.

با محاسبه معیار کارائی نش- ساتکلیف رابطه (۱) برای مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده‌ای ضریب قوس‌زدگی مقدار ۰/۸۶ به‌دست آمده است. این مقدار،

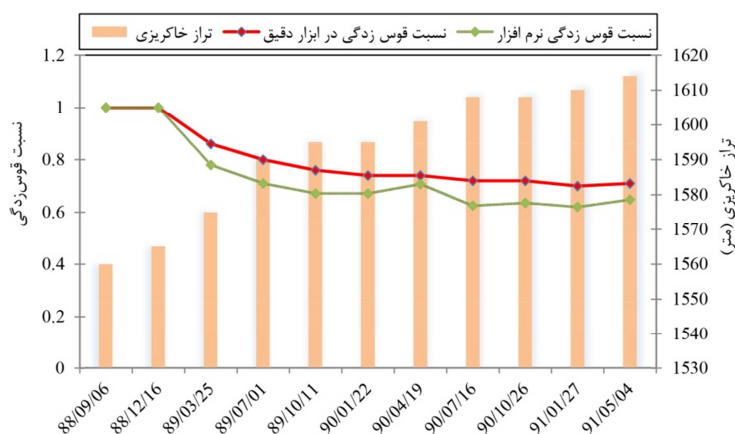
۳-۳- بررسی پدیده قوس‌زدگی بدنه سد

مصالح هسته به دلیل تراکم‌پذیری بیشتر و مقاومت کمتر، نسبت به پوسته و نواحی انتقالی تمایل بیشتری به نشست دارند. از طرفی، به علت وجود مقاومت برشی در فصل مشترک بین هسته و فیلتر (یا پوسته) مصالح سخت‌تر فیلتر در مقابل این نشست، مقاومت نموده و در صورتی که مصالح هسته مقاومت برشی بالایی داشته باشد، می‌تواند با تکیه کردن مصالح هسته به پوسته، بخشی از وزن مصالح هسته به فیلتر یا پوسته منتقل شده و در نتیجه تنها قسمتی از سربار موجود روی مصالح هسته به لایه‌های زیرین آن منتقل شود [۷]. بنابراین سطح تنش در مصالح هسته نسبت به وضعیتی که تمام سربار، (γ_{H}) به لایه‌های زیرین منتقل می‌شود، کاهش می‌یابد. در واقع، نسبت تنش قائم به سربار موجود در هر نقطه (σ_v/γ_{H}) نشان‌دهنده بخشی از وزن سربار است که به لایه‌های زیرین منتقل شده است. هرچه این نسبت کمتر باشد یعنی مقدار کمتری از وزن سربار به لایه‌های

نشانهگر هم‌خوانی نسبتاً مناسب بین مقادیر ابزار دقیق و نرم‌افزار می‌باشد.



شکل ۱۱- تغییرات ضریب قوس‌زدگی در ۱۰ متری بالاتر از محور سد در تراز ۱۵۶۰ (۶۱ متر پایین‌تر از تاج سد)



شکل ۱۲- تغییرات ضریب قوس‌زدگی در ۱۰ متری پایین‌تر از محور سد در تراز ۱۵۶۰ (۶۱ متر پایین‌تر از تاج سد)

۰/۷۳ تا ۱ می‌باشد که بیانگر این است که سد مروک در وضعیت پایان ساخت در وضعیت پایدار می‌باشد. در پایان، جهت تحقیقات آینده موارد زیر ذکر می‌شود:

- الف- توسعه مدل رفتاری مناسب جهت پیش‌بینی دقیق رفتار مصالح پوسته
- ب- بررسی مسائل اجرایی در هنگام ساخت سد و تأثیر آن در مدل‌سازی‌های اولیه

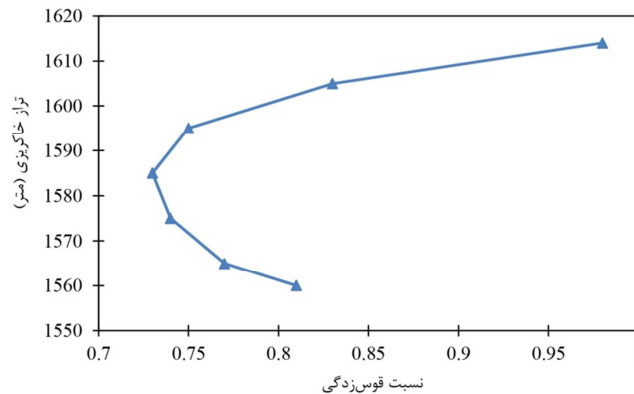
۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق رفتار سد مروک در پایان ساخت، به کمک اطلاعات به‌دست آمده از ابزار دقیق و تحلیل‌های عددی، مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشست‌سنج در هر ۲ ابزار، تطابق قابل‌قبول و منطقی با نتایج حاصل از

شکل ۱۳، منحنی تغییرات نسبت قوس‌زدگی در ارتفاع محور هسته را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، کمترین میزان ضریب قوس‌زدگی (بیشترین مقدار قوس‌زدگی حاصل از تحلیل عددی) مقدار ۰/۷۳ است که تقریباً در وسط ارتفاع سد رخ می‌دهد. تغییرات قوس‌زدگی پس از افزایش ارتفاع خاکریزی، روند کاهشی را نشان می‌دهد. با توجه به کانتورهای جابه‌جایی قائم شکل ۶، که بیشینه جابه‌جایی قائم (نشست) را در تراز ۱۵۹۰ نشان می‌دهند، به‌خوبی ارتباط ضریب قوس‌زدگی و نشست در هسته مشخص می‌شود و گویای افزایش شدت قوس‌زدگی با افزایش نشست در هسته است. در ارتفاع‌های بالاتر، مقادیر نسبت قوس‌زدگی با سرعت بیشتری افزایش می‌یابد که دلیل آن کاهش نشست هسته در نقاط با ارتفاع بالاتر است. مقدار ضریب قوس‌زدگی بین

اندازه‌گیری شده توسط ابزار دقیق در پایان ساخت، اعداد ۷۰ سانتی‌متر در پوسته پایین‌دست را نشان می‌دهد که با نتایج تحلیل، تطابق دارد.

تحلیل‌های عددی نشان می‌دهد. به‌گونه‌ای که در تحلیل، بیشترین نشست در هسته و پوسته پایین‌دست به ترتیب برابر با ۱۲۰ و ۶۰ سانتی‌متر است و مقدار نشست



شکل ۱۳- منحنی تغییرات نسبت قوس‌زدگی در محور هسته

هسته- فیلتر و فیلتر- پوسته دیده می‌شود. علاوه بر این، میزان قوس‌زدگی در ترازهای بالاتر به علت درصد رطوبت کمتر و عرض کم هسته، بیشتر است. مقدار ضریب قوس‌زدگی بین ۰/۷۳ تا ۱ می‌باشد که این مقدار نشان از قوس‌زدگی کم در هسته سد مروک می‌باشد.

تشکر و قدردانی

در پایان لازم است که نهایت سپاس و قدردانی خود را از مسئولین محترم شرکت آب منطقه‌ای لرستان و مهندسین مشاور آیفن ابراز نماییم.

بیشترین میزان نشست کل مربوط به بدنه و بخش ناچیزی متعلق به پی است. بیشترین نشست هسته در پایان ساخت ۱۲۰ سانتی‌متر می‌باشد که ۱/۷ درصد ارتفاع سد می‌باشد. با توجه به مقادیر نشست‌های متعارف دیگر سدهای دنیا که بین ۱ تا ۲ درصد است، این مقدار نشست سد مروک در محدوده معمول است. بیشترین مقدار تنش در ترازهای پایین و در محل اتصال هسته و پی رخ می‌دهد. مقدار تنش‌های قائم در هسته سد نسبت به پوسته کاهش می‌یابد که علت آن کمتر بودن سختی مصالح هسته نسبت به پوسته است. به دلیل تفاوت سختی مصالح هسته با فیلتر و پوسته، قوس‌زدگی میان

مراجع

- [1] Haeri, S. M., & Faghihi, D. (2008). "surveying Soil Dams at Construction Time, Case Study: Taleghan Dam", *Fourth National Congress of Civil Engineering*, Tehran, Tehran University (In persian).
- [2] Moll, S., & Straubhaar, R. (2011). "Performance of a high rockfill dam during construction and first impounding. Nam Ngum 2 CFR, Dams and Reservoirs under Changing Challenges", In *Proceedings of the International Symposium on Dams and Reservoirs under Changing Challenges—79 Annual Meeting of ICOLD, Swiss Committee on Dams*, 65-72.
- [3] Gikas, V., & Sakellariou, M. (2008). "Settlement analysis of the Mornos earth dam (Greece): Evidence from numerical modeling and geodetic monitoring", *Engineering Structures*, 30(11), 3074-3081.
- [4] Zhou, M., Zhang, B., & Peng, C. (2018). "Numerical evaluation of soft inter-slab joint in concrete-faced rockfill dam with dual mortar finite element method", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 42(5), 781-805.

- [5] Hosseini, M., & Shahourdi, L. (2013). "Evaluation and analysis of Gotvand dam construction during construction using the results of practical tools", *First National Conference on Engineering Geotechnics*, Ardebil, Mohaghegh Ardebil University (In persian).
- [6] Ansari, H., Mirghasemi, A., & Niroumand, H. (2013). "The Survey of Soil Dams in Coincidental Construction and Drainage Conditions by Instrumentation Results", *The First National Conference on Geotechnical Engineering*, Ardebil, Mohaghegh Ardebil University (In persian).
- [7] Rashidi, M. (2013). "Investigation of Gavoshan Dam Stress During Construction and First Dewatering", *First National Conference on Engineering Geotechnics*, Ardebil, Mohaghegh Ardebil University (In Persian).
- [8] Eberhardt, E. (2003). "Rock slope stability analysis-Utilization of advanced numerical techniques", *Earth and Ocean sciences at UBC*.
- [9] Ormann, L., Zardari, M. A., Mattsson, H., Bjelkevik, A. & Knutsson, S. (2013). "Numerical analysis of strengthening by rockfill embankments on an upstream tailings dam", *Canadian Geotechnical Journal*, 50(4), 391-399.
- [10] GeoSlope International Ltd. (2007). *SEEP/W Users Guide*. GeoSlope International, Calgary, Canada.
- [11] Zhou, W., Hua, J., Chang, X., & Zhou, C. (2011). "Settlement analysis of the Shuibuya concrete-face rock-fill dam", *Computers and Geotechnics*, 38(2), 269-80.
- [12] Rashidi, M., & Haeri, S. M. (2017). "Evaluation of behaviors of earth and rockfill dams during construction and initial impounding using instrumentation data and numerical modeling", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9(4), 709-725.
- [13] Rashidi, M., Heidar, M., & Azizyan, G. (2017). "Numerical analysis and monitoring of an embankment dam during construction and first impounding (case study: Siah Sang Dam)", *Scientia Iranica*, 25(2), 505-516.
- [14] Zanjani, M. M., Soroush, A., & Khoshini, M. (2016). "Two-dimensional numerical modeling of fault rupture propagation through earth dams under steady state seepage", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 88, 60-71.
- [15] Komasi, M., & Beiranvand, B. (2020). "Study of Vertical and Horizontal Displacements of Eyvashan Earth Dam Using Instrumentation and Numerical Analysis", *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(1), 245-256.
- [16] Komasi, M., & Beiranvand, B. (2019). "Evaluation of pore water pressure foundation and core of Sivand dam after the dewatering period in comparison with the actual instrument results", *Dam and Hydroelectric Powerplant*, 6(21), 63-77.
- [17] Ostvar Kashkouli, Y., & Jabbari, M. M. (2017). "Evaluating excess pore pressure in embankment and comparison with monitoring results and FLAC software, Case study: Roudbal Darab Dam", 16 th Iranian Hydraulics Conference.
- [18] 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*, https://ceej.tabrizu.ac.ir/article_9816_0.html.
- [19] Annual Report, 2012, Instrumentation and Monitoring of Marvak Dam, Kowsar Universe Company (In persian).
- [20] Emeraldian, M. & Sahebzadeh K. (2004). "Determination of the number of stages for the construction of earth and dams dams for the analysis of consolidation in computer models", *the first National Congress of Civil Engineering*, Sharif University of Technology, Tehran, Iran (In persian).
- [21] Mehrnehad, H. (2014). "Evaluation of Injection of Pinnacle and Drawing of the Curtain Wall of the Dam marvak in Lorestan", *Thesis, Master of Science in Yazd University* (In persian).