

بررسی جابه‌جایی بدنه سد و زمین‌های اطراف به کمک داده‌های ماهواره راداری

(مطالعه موردی: سد سفیدرود)

مسعود حسین پور^۱، سعید قره‌چلو^۲، فاطمه رفیعی^۳، صمد امامقلی زاده^۴

چکیده

پدیده تغییر شکل زمین نتیجه اعمال تنش‌های طبیعی (زمین ساختی) یا عوامل انسانی (بهره‌برداری بیش از حد از آب‌های زیرزمینی) بر روی خاک است. نظارت و تعیین میزان رانش زمین در مخازن سدها از اهمیت بالایی برخوردار است، چرا که یکی از عوامل اصلی خرابی سدها در جهان زمین لغزش است. با توجه به ماهیت سد و اهمیت جلوگیری از هرگونه اختلال و خرابی در این سازه‌ها باید نظارت مداوم بر تغییر شکل سدها برای اطمینان از عملکرد ایمنی و کارآمدی آن‌ها صورت گیرد. از آنجایی که پایش تغییر شکل سدها با استفاده از روش‌های نظارتی سنتی زمان‌بر، پرهزینه و دشوار است، تصاویر راداری با قدرت تفکیک مکانی در حد میلی‌متر و سرعت پردازش بالا این امکان را برای محققین فراهم آورده است. در دسترس بودن داده‌های SAR، پیوستگی نظارت و پایش در شبانه و روز بدون در نظر داشتن شرایط آب و هوایی و کاهش هزینه‌های پایش به وسیله داده‌های راداری، سنجش از دور را به یک ابزار مناسب برای این منظور تبدیل کرده است. در این پژوهش به منظور بررسی میزان جابه‌جایی بدنه سد و زمین‌های اطراف از ۱۹ تصویر Sentinel-1A برای بازه ۲۰۱۸-۲۰۱۷ از نرم‌افزار SNAP و الگوریتم StaMPS استفاده شده است. همچنین تکنیک پراکنش‌گرهای دائمی (PSI) برای به دست آوردن سری زمانی مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج پردازش‌های تداخل‌سنجی راداری به وسیله پراکنش‌گرهای دائمی نشان دهنده بیشترین جابه‌جایی سد به میزان حداکثر ۹.۵ میلی‌متر در سال است.

واژگان کلیدی: جابه‌جایی سد، تداخل‌سنجی راداری، PSI، سد سفیدرود

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود. (hosseinpoor.masood@yahoo.com)

۲- استادیار، گروه مهندسی ژئوتکنیک-راه و نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود. (sgharachelo@gmail.com)

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود. (f.rafiee74@yahoo.com)

۴- دانشیار، گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود. (s.emamgholizadeh@gmail.com)

مقدمه

مخاطرات زمینی شامل پدیده‌های طبیعی زمین‌شناسی و زیست محیطی مانند زلزله، رانش زمین، فرونشست و سونامی است که ممکن است اثرات مخربی بر جمعیت، قلمرو و اقتصاد داشته باشد. این فرآیند در بلند مدت یا کوتاه مدت ممکن است به طور قابل توجهی بر مناطق آسیب دیده در هر دو مقیاس محلی و منطقه‌ای تأثیر بگذارد. ایمنی سازه‌های عمرانی بزرگ نه تنها با رویکردهای طراحی و ساخت قابل اعتماد، بلکه از طریق کنترل مداوم رفتار آن در مراحل مختلف عملیاتی تضمین می‌شود. سدها یکی از سازه‌های بزرگ مهندسی هستند که با توجه به مزایای اجتماعی و اقتصادی آن‌ها مانند کنترل سیلاب، آبیاری، تولید انرژی، گردشگری، تأمین آب و همچنین هزینه بالای احداث و مخاطرات جانی و مالی جبران‌ناپذیر در صورت وجود مشکل نیاز به پایش ایمنی و کنترل پایداری به وسیله سیستم‌های ابزار دقیق و میکروژئودزی در طول عمر سد به صورت مداوم دارند (۷). بنابراین پایش سد از مراحل اولیه ساخت و ساز در طول عمر مورد انتظار سازه حیاتی است. تکنیک‌های سنتی، اندازه‌گیری را بر روی تعداد محدودی از نقاط کنترل ارائه می‌کنند که معمولاً برای توصیف الگوی تغییر شکل کلی و تأیید اثربخشی مدل‌های ساختاری کافی نیستند. در مقابل، استفاده از ایستگاه‌های کل خودکار، حسگرهای زمینی از راه دور و تکنیک‌های مبتنی بر ماهواره، امکان کنترل سیستماتیک و گسترده هرگونه حرکت سازه‌ای را بدون نیاز به دسترسی به سازه فراهم می‌کند (۵).

در دو دهه گذشته، تداخل‌سنجی راداری^۲ به ابزاری قدرتمند برای اندازه‌گیری جابجایی‌های سطحی تبدیل شده است، که روشی کارآمد برای تجزیه و تحلیل حرکت سطح در زمان کم‌تر و پهنه‌ای وسیع‌تر مرتبط با فرآیندهای ژئوفیزیکی و انسانی است (۸). تداخل‌سنجی راداری تفاضلی^۳ الگوی تداخل ایجاد شده توسط اختلاف فاز بین دو سیگنال رادار در یک نقطه مشترک روی سطح زمین را محاسبه می‌کند. تجزیه و تحلیل چند زمانی تصاویر SAR نظارت بسیار دقیقی از تغییرات با دقت میلی‌متر را فراهم می‌نماید (۸). یکی از تکنیک‌های قدرتمند تجزیه و تحلیل DInSAR، تداخل‌سنجی تفاضلی بر پایه پراکنشگرهای دائمی^۴ است که امکان تخمین دقیق جابجایی در طول زمان را فراهم می‌کند (۶). فرکانس بالای مشاهدات مکانی و زمانی روش تداخل‌سنجی راداری، در مقایسه با روش‌های سنتی دید جامعی از فرآیند تغییر شکل در اختیار ما قرار می‌دهد. همچنین استفاده از این روش باعث صرفه‌جویی در زمان و هزینه نیز می‌شود (۷). این تکنیک برای پایش سدها به صورت موفقیت آمیز استفاده شده است (۹). در سال‌های اخیر مطالعات زیادی با استفاده از روش InSAR بر روی سدها و زمین لغزش‌ها با استفاده از تصاویر ماهواره‌های مختلف در بازه‌های زمانی مختلف و دو روش PSI و SBAS^۵ صورت گرفته است. از جمله پژوهش‌های صورت گرفته می‌توان به سد دربندخان عراق با بررسی تصاویر Sentinel-1A صورت گرفت اشاره کرد، نتایج بیانگر پایداری سد تا قبل از زلزله نوامبر ۲۰۱۷ بود اما پس از آن سد جابجایی دارد (۴).

^۲ Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)

^۳ Differential InSAR (DInSAR)

^۴ Persistent Scatterer Interferometry (PSI)

^۵ Small Baseline Subset Algorithm (SBAS)

سد سفیدرود یکی از مهم‌ترین سدهای مخزنی شمال کشور است که علی‌رغم این که در سال‌های اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته است، پژوهشی مبنی بر اندازه‌گیری جابه‌جایی بر روی این سد انجام نشده است. هدف این پژوهش نشان دادن امکان نظارت بر جابه‌جایی سد از طریق روش‌های سنجش از دور بر روی سد سفیدرود است. در بخش دوم به معرفی منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده و روش انجام پژوهش پرداخته شده و در بخش سوم به بحث و نتیجه‌گیری و در نهایت در بخش چهارم به جمع‌بندی نتایج پرداخته خواهد شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه در پژوهش حاضر قسمتی از حوضه آبخیز سد سفیدرود است. این منطقه در تقسیمات هیدرولوژیک ایران زیرمجموعه حوضه آبخیز دریای خزر محسوب می‌گردد. اقلیم این منطقه به طور کلی معتدل و نیمه خشک بوده و سطح خاک در بیشتر مناطق این حوضه بدون پوشش گیاهی و با قابلیت فرسایش بالا است (۱). سد سفیدرود (۳۶ درجه ۴۵ دقیقه و ۲۷ ثانیه شمالی، و ۴۹ درجه و ۲۳ دقیقه و ۱۶ ثانیه شرقی) یکی از مهم‌ترین سدهای شمال کشور ایران بوده که نقشی حیاتی در تأمین آب کشاورزی و تولید برق در استان گیلان دارد. سد سفیدرود یک سد بتنی وزنی پایه‌دار به ارتفاع ۱۰۶ متر و طول تاج ۴۲۵ متر است. این سد مخزنی نقش مهمی در کنترل سیلاب‌های منطقه ایفا می‌کند (۳). موقعیت سد سفیدرود در شکل ۱ قابل مشاهده است. رودخانه‌های قزل اوزن و شاهرود به ترتیب از استان کردستان و دامنه‌های جنوبی رشته کوه البرز سرچشمه گرفته و در حدود ۶۰ درصد جریان آن‌ها در فصل بهار به مخزن این سد می‌ریزند (۲).

به منظور بررسی میزان جابه‌جایی سد سفیدرود در مطالعه حاضر، از ۱۹ تصویر Sentinel-1 SLC⁶ در حالت بالاگذر استفاده شده که مشخصات آن‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. حالت تصویربرداری نواری IW⁷ تصاویر Sentinel-1 که در مطالعه حاضر استفاده شده‌اند، داده‌ها را به صورت یک نوار ۲۵۰ کیلومتری با وضوح ۲۰*۵ متری در سه قسمت فرعی (IW1, IW2, IW3) از زمین برداشت می‌کنند. این تصاویر به صورت رایگان از سایت <http://asf.alaska.com> از انتهای سال ۲۰۱۶ تا انتهای سال ۲۰۱۸ تهیه شده‌اند.

روش مورد استفاده در این پژوهش، تداخل‌سنجی تقاضلی راداری با استفاده از پراکنش‌گرهای دائمی است. این روش قادر است جابه‌جایی را بر سازه‌های مختلفی از قبیل سدها، پل‌ها و سایر سازه‌ها با دقت بالایی برآورد نماید (۱۰). تصاویر Sentinel-1 توسط سایت ASF^۸ تهیه شده و سپس در نرم‌افزار SNAP در سیستم عامل لینوکس پردازش شدند. سدها، همانند دیگر سازه‌های ساخت بشر، دارای بازتابنده‌های مصنوعی^۹ زیادی هستند. برای هر مجموعه داده، یک تصویر به عنوان تصویر پایه^{۱۰} انتخاب می‌گردد تا عدم

⁶ Single Look Complex

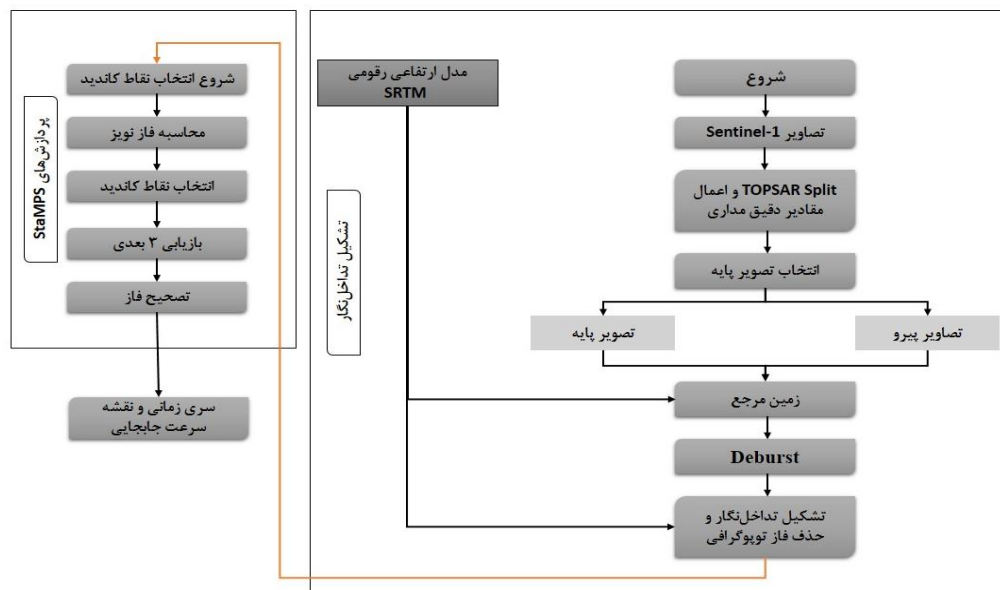
⁷ Interferometric Wide

⁸ asf.alaska.edu

⁹ Artificial reflectors

¹⁰ Master

همبستگی مکانی و زمانی^{۱۱} به حداقل برسند و همچنین به عنوان یک مبنا به منظور تخمین سری زمانی جابه‌جایی در خصوصیات رادیومتریکی ثابت^{۱۲} در طول زمان استفاده گردد. مدل ارتفاعی رقومی^{۱۳} SRTM با رزولوشن 1 arc-second و فرمت HGT توسط نرم‌افزار SNAP دانلود و به منظور زمین مرجع نمودن و همچنین حذف فاز توپوگرافیک از تداخل نگارها استفاده شد. مجموعه اینترفروگرام‌ها با استفاده از پکیج^{۱۴} Stamps در متلب پردازش شد، پراکنش‌گرهای دائمی انتخاب و جابه‌جایی سد برآورد گردید. به منظور کاهش نویز فاز از فیلتر گلدشتاین بهره‌گیری شد. فلوچارت مراحل انجام تحقیق در شکل ۲ قابل مشاهده است.



شکل ۲- فلوچارت مراحل انجام تحقیق

بحث و نتیجه‌گیری

در این قسمت، نتایج پایش جابه‌جایی سد به وسیله تکنیک تداخل‌سنجی راداری مورد بحث قرار خواهد گرفت. انتخاب بهترین تصویر به عنوان تصویر پایه به منظور دستیابی به کم‌ترین عدم همبستگی در نرم‌افزار SNAP انجام شد. نهایت تصویر تهیه شده در ۱۷ فوریه ۲۰۱۸ به عنوان بهترین تصویر با بهینه‌ترین میزان اختلاف خط مبنای عمودی^{۱۵} با سایر تصاویر به عنوان تصویر مبنا انتخاب شد. اختلاف فاز در تداخل نگارهای تولید شده در بازه $(-\pi, \pi)$ رادیان قرار دارد، این مسئله باعث گسستگی مناطق می‌شود که به آن پیچیدگی فاز گفته می‌شود. به منظور واپیچش^{۱۶} و تولید مقادیر پیوسته در تداخل‌نگار، از پکیج SNAPHU استفاده شده است.

¹¹ Spatial and temporal decorrelation

¹² Permanent radiometric characteristic

¹³ Shuttle Radar Topography Mission

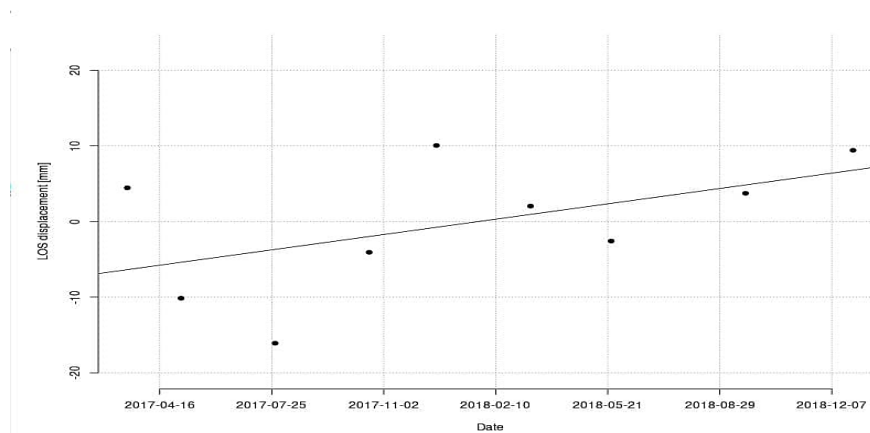
¹⁴ Stanford Method for Persistent Scatterers

¹⁵ perpendicular Baseline

¹⁶ Unwrapping

پس از واپیچش فاز فرینج‌ها بهبود داده شده و سیکل‌های رنگی حذف و پیوسته شده‌اند. بدین ترتیب برآورد جابه‌جایی با سهولت بیش‌تری انجام می‌پذیرد.

در تصویرهای پردازش شده، چند نقطه به عنوان نقاط کاندید انتخاب شدند و پس از انجام پردازش‌ها نقشه‌های سری زمانی جابه‌جایی و سرعت جابه‌جایی تهیه شدند. سری زمانی جابه‌جایی در ۵ نقطه از قسمت‌های مختلف بدنه سد تهیه شد و بررسی‌ها نشان‌دهنده الگوی مشابه در تمامی این نقاط بود. سری زمانی یک نقطه بر روی شمال غربی بدنه سد با موقعیت $36^{\circ}45'33.6''N$ و $49^{\circ}23'08.0''E$ در شکل ۴ قابل مشاهده است. با توجه به خط برازش داده شده مشاهده می‌گردد، به طور عمومی در طی دو سال پراکنش گر دائمی انتخاب شده به ماهواره نزدیک شده است، یعنی در نقطه انتخابی در راستای خط دید ماهواره با بالآمدگی مواجهه بوده است.



شکل ۴- سری زمانی جابه‌جایی سد سفیدرود

در نهایت، نقشه سرعت جابه‌جایی تهیه گردید. در برخی نقاط بدنه شمالی این سد جابه‌جایی سالانه تا ۹.۵ میلی‌متر نیز مشاهده می‌گردد. به علاوه در برخی مناطق شرقی و جنوب غرب این سد بالآمدگی به میزان حدکثر ۸.۵ میلی‌متر رخ داده است. به طور کلی بیش‌ترین میزان جابه‌جایی در اطراف سد در بدنه شمال-شمال شرق این سد به وقوع می‌پیوندد که این نقاط در پایش سد باید مورد توجه بیش‌تری قرار گیرند.

جمع‌بندی

این مطالعه کاربرد روش تداخل‌سنجی پراکنش‌گرهای دائمی (PSI) را برای نقشه‌برداری مناطق ناپایدار و تعیین مخاطرات طبیعی در سد سفیدرود را نشان می‌دهد. نظارت و اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی سد یکی از مهم‌ترین عملیات به منظور جلوگیری از ایجاد بحران و خسارات آبی است. با توجه به اهمیت سد سفیدرود در منطقه مورد مطالعه، این منطقه در بازه ۲۰۱۶-۲۰۱۸ با استفاده از تصاویر SAR مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان‌دهنده نشست برخی نقاط سد در قسمت‌های شمال و شمال شرق به

۹.۵ میلی متر بر سال و بالا آمدگی در قسمت های کوچکی از سد در مناطق شرقی و جنوب غربی این سد به میزان کمتر از ۸ میلی متر در سال بوده است. با توجه به جابه جایی صورت گرفته در سد و اهمیت آن، پیشنهاد می گردد با توجه به به منظور مصارف کشاورزی، در فصول گرم سال نظارت بیش تری بر میزان مصرف آب صورت گیرد. به علاوه، با توجه به موقعیت سد کنونی و اهمیت آن در منطقه، توصیه می گردد. به جهت پایداری سد و جلوگیری از خسارات ناخواسته نظارت مداوم بر جابه جایی این سد در طول زمان صورت گیرد. داده های Sentinel-1 برای ارزیابی تغییر شکل ناحیه کوچک مناسب است، در حالی که تصاویر ماهواره ها با وضوح بالا (مانند TerraSAR-X و COSMO) به دلیل وضوح بالا و خط پایه کوتاه تر می توانند نتایج بهتری به دست آورند بنابراین به منظور افزایش دقت مطالعات، می توان از تصاویر سایر ماهواره ها نیز بهره گیری نمود.

منابع

- ۱- پیشگاه هادیان، پ.، و احسان زاده، ا.، و معینی، ر. (۱۳۹۵). مقایسه عملکرد روش های مختلف در بررسی روند تغییرات متغیرهای اقلیمی (مطالعه موردی: حوضه سد سفیدرود). تحقیقات منابع آب ایران، ۱۲(۲)، ۶۶-۴۹.
- ۲- حاجی آبادی، ر.، و ضرغامی، م.، و نورانی، و. (۱۳۹۵). مدیریت رسوب در بهره برداری چندهدفه از سد سفیدرود با لحاظ تولید انرژی برق آبی و مسائل زیست محیطی. مهندسی عمران و محیط زیست (دانشکده فنی)، ۴۶(۱) (پیاپی ۸۲)، ۳۶-۲۵.
- ۳- رمضانی، ی.، و قمشی، م.، و خزیمه نژاد، ح. (۱۳۹۴). بررسی خصوصیات جریان های غلیظ در مخزن سد سفیدرود. دانش آب و خاک (دانش کشاورزی)، ۲۵(۱)، ۹۱-۱۰۰.
- 4-Al-Husseinawi, Y., Li, Z., and Clarke, P., (2018). Edwards S. Evaluation of the Stability of the Darbandikhan Dam after the 12 November 2017 Mw 7.3 Sarpol-e Zahab (Iran–Iraq Border) Earthquake. Remote Sensing. 10, 1426.
- 5-Corsetti, M.; Marsella, M.; Paoliani, P.; Bonano, M.; Manunta, M. Monitoring an earth dam with satellite radar technique. L'ACQUA 2012, 31–40.
- 6-Crosetto, M.; Monserrat, O.; Cuevas-González, M.; Devanthéry, N.; Crippa, B. Persistent Scatterer Interferometry: A review. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 2016, 115, 78–89.
- 7-Dascal., O. (1987). Postconstruction deformations of rockfill dams. Journal of Geotechnical Engineering. 113, 46-59.
- 8-Ferretti, A., Prati, C., and Rocca, F., (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. 39, 8-20
- 9-Grenerczy, G.; Wegmüller, U. Persistent scatterer interferometry analysis of the embankment failure of a red mud reservoir using ENVISAT ASAR data. Nat. Hazards 2011, 59, 1047–1053.
- 10- Qiu, Z., Jiao, M., Jiang, T., & Zhou, L. (2020). Dam structure deformation monitoring by GB-InSAR approach. IEEE Access, 8, 123287-123296.

Assessment of dam body displacement and surrounding areas with the help of radar satellite data (Case study: Sefidrood Dam)

Masoud hosseinpoorⁱ, Saeed Gharacheloⁱⁱ, Fatemeh Rafieeⁱⁱⁱ, Samad Emamgholizadeh^{iv}

The phenomenon of land deformation is the result of the application of natural stresses (tectonic) or human factors (over-exploitation of groundwater) on the soil. Monitoring and determining the amount of landslides in dam reservoirs is important, because one of the main causes of dam failure in the world is landslides. Due to the nature of the dam and the importance of preventing any disruption in these structures, continuous monitoring of the deformation of the dams should be done to ensure their safety and efficiency. Since monitoring the deformation of dams using traditional surveillance methods is time consuming, costly, and difficult, radar images with millimeter resolution and high processing speeds have made this possible for researchers. The availability of SAR data, the continuity of monitoring in day and night, regardless of weather conditions, and the reduction of monitoring costs by radar data, have made remote sensing a suitable tool for this purpose. In this study, in order to investigate the displacement of the dam body and surrounding areas, 19 Sentinel-1A images for the period 2016-2018 have been used by SNAP software and StaMPS algorithm. The Permanent Scatterer Interferometry (PSI) technique has also been used to obtain time series. The results of radar interferometry processing using permanent Scatterers show the highest displacement rate of the dam is 9.5 mm per year.

Keywords: Dam displacement, Interferometric Synthetic Aperture Radar, PSI, Sefidrood Dam

ⁱ Master student, Department of Water and Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahroud University of Technology. (hosseinpoor.masood@yahoo.com)

ⁱⁱ Assistant Professor, Department of Geotechnical Engineering-Road and Surveying, Faculty of Civil Engineering, Shahroud University of Technology. (sgharachelo@gmail.com)

ⁱⁱⁱ Master student, Department of Water and Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahroud University of Technology. (f.rafiie74@yahoo.com)

^{iv} Associate Professor, Department of Water and Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahroud University of Technology. (s.emamgholizadeh@gmail.com)