

Reliability Analysis of Stream Network Density Changes in Urmia Lake Catchment Area Using FORM Probabilistic Method

H. Moghimi^{1*}

Abstract

In this study, in order to investigate the resilience of the area in the catchment of Lake Urmia, in contrast to the destruction of the density of the stream network, a performance function matrix was developed in the probabilistic First Order Reliability Method (FORM). The basis for calculations in the Python programming environment was the changes in the flow accumulation layer, as an important factor in the surface recharge of Lake Urmia. Preparation of flow accumulation layer, based on the digital elevation model of 30 meter's altitude of Aster Landsat satellite in the geographic information system environment, and the criterion for its changes, according to the different layers of the stream network density and with certain thresholds of sequential power, has been the natural flow path in the automatic extraction method. The performance function in the FORM method was prepared by estimating the standard deviation, mean and linear correlation between the two categories of current stream network density, with thresholds of 100, 300 and 1000, as well as 1000, 3000 and 10000, and by deducting two sets of coordinate points. The results showed that the failure probability in the catchment area, without taking into account the lake environment, varies between 28% and 72%. For the boundary strip, the lake's vulnerability display is the least resilient in the western, northwestern and southern parts. Vulnerability occurs with the destruction of the stream network in accordance with the FORM method in its maximum value with 86% in the western part of Lake Area.

Keywords: FORM Method, Reliability Analysis, Urmia Lake, River Density.

Received: June 14, 2020

Accepted: October 21, 2020

تحلیل قابلیت اطمینان تغییرات تراکم شبکه آبراهه‌های حوضه آبریز دریاچه ارومیه با استفاده از روش احتمالاتی FORM

همایون مقیمی^{۱*}

چکیده

اکوسیستم دریاچه ارومیه، در سال‌های اخیر با بحران کاهش فزاینده سطح آب به دلیل از دست رفتن منابع تغذیه کننده آب سطحی خود روبرو بوده است. در این پژوهش به منظور بررسی تاب‌آوری ناحیه‌ای در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، در مقابل تخریب تراکم شبکه آبراهه‌ای، اقدام به توسعه ماتریس تابع عملکرد در روش احتمالاتی مرتبه اول قابلیت اطمینان (FORM) شده است. پایه محاسبات در محیط برنامه‌نویسی پایتون بر اساس تغییرات لایه تجمع جریان، به عنوان عامل مهم تغذیه آب سطحی دریاچه ارومیه می‌باشد. تهیه لایه تجمع جریان، بر اساس مدل رقومی ارتفاع ۳۰ متری سنجنده Aster در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی و ملاک تغییرات آن بر مبنای لایه‌های تراکم شبکه آبراهه‌ای مختلف و با آستانه‌های ترتیب توانی معین، در روش استخراج خودکار مسیر جریان طبیعی بوده است. تابع عملکرد در روش FORM با تخمین انحراف استاندارد، میانگین و همبستگی خطی، بین دو دسته تراکم شبکه جریان، با آستانه‌های ۱۰۰، ۳۰۰ و ۱۰۰۰ و همچنین ۱۰۰۰، ۳۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ و به صورت کسر دو مجموعه، نقاط مختصاتی تهیه شد. نتایج حاکی از آن است احتمال شکست در حوضه آبریز، بدون احتساب محیط دریاچه، بین دو رقم ۲۸ تا ۷۲ درصد متغیر است. برای نوار مرزی نمایش آسیب‌پذیری دریاچه، کم‌ترین تاب‌آوری در بخش‌های غربی، شمال غربی و جنوبی است. آسیب‌پذیری با تخریب شبکه آبراهه‌ای مطابق با روش FORM در بیشترین مقدار خود با رقم ۸۶ درصد در محدوده میانه غربی مساحت دریاچه رخ می‌دهد.

کلمات کلیدی: روش FORM، قابلیت اطمینان، دریاچه ارومیه، تراکم آبراهه‌ای.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۳/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۷/۳۰

1- Assistant Professor, Department of Geology, Payame Noor University, Iran.
Email: homayounmoghimi@pnu.ac.ir

*- Corresponding Author

۱- استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام نور، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۳۹۹ امکانپذیر است.

قابلیت اطمینان^۱، می‌توان اطمینان‌پذیری ظرفیت سامانه را محاسبه کرد؛ زیرا اطمینان‌پذیری ظرفیت، با نارسایی ذاتی هیدرولیکی ارتباط دارد (Azimi et al., 2019).

تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان، در هر دوی مسائل آب‌های سطحی و به عنوان مثال در مطالعات، (Melching (1992)؛ (2001)؛ (Maier et al. (2001)؛ (Melching and Bauwens (2001)؛ (Sitar et al. (1987)؛ (1993)؛ (Cawfield and Wu (1994)؛ (Jang et al. (1994)؛ (Hamed et al. (1996)؛ (Skaggs and Hamed and Bedient (1999)؛ (1997)؛ (Barry (1997)؛ (Boateng and Xiang and Mishra (1997)؛ (1999)؛ (Cawfield (1999)؛ (Boateng (2001) وجود داشته است. با این حال تمرکز تحقیقات معمولاً در تجزیه و تحلیل مباحث کیفی بوده است؛ که در آن، شرایط شکست به شکل عبور از یک آستانه غلظت مشخص فرموله شده است. به عنوان مثال، استاندارد نظارتی در یک زمان و مکان وجود داشته است؛ که برای نمونه می‌توان مطالعات، (Sitar et al. (1987) و (Jang et al. (1994) را نام برد. از نتایج این پژوهش‌ها می‌توان به دست‌یابی، به تشریح روشن‌تر منابع ایجاد خطا در یک مدل شبیه‌سازی اشاره کرد. به طور مشابه می‌توان در حوضه آبریز دریاچه ارومیه به تحقیقات (Moghadasi et al., 2015) اشاره کرد که در آن به منظور ارائه روشی برای بررسی و شبیه‌سازی نوسانات و تراز ماهانه دریاچه ارومیه با استفاده از روش‌های مختلفی چون معادله بیلان آبی دریاچه، معادله رگرسیون چندگانه و شبکه‌های عصبی مصنوعی بهره گرفته شد. بدین منظور از داده‌های ماهانه مؤلفه‌های مؤثر در بیلان دریاچه از قبیل دبی ورودی، بارندگی متوسط و تبخیر متوسط از سطح آزاد آب استفاده شده است. به علاوه در حیطه بررسی اثر اقلیم نیز می‌توان به مقاله (Razmara et al. (2013) اشاره داشت که در آن برای تحلیل تغییرات آب و هوا بر رواناب ورودی به دریاچه ارومیه از ده مدل آب و هوا در بین مدل‌های AOGCM-AR4² در دوره زمانی آینده ۲۰۴۰-۲۰۱۳، تحت سناریوهای انتشار استفاده شد؛ در سناریوهای محتمل؛ یافته‌ها، کاهش جریان رواناب به دریاچه ارومیه را در سه سطح خطر ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد به ترتیب ۲۱-، ۱۳- و ۰/۳- درصد و افزایش به ترتیب ۴/۷، ۱۳/۸ و ۱۸/۹ نشان می‌دهد. همچنین پیش‌بینی آب و هوای گرم و خشک در مقایسه با سناریو آب و هوای خنک و مرطوب، شرایط بحرانی‌تری را برای آینده پیشنهاد می‌کند. با این حال در حیطه تحلیل، تغییرات نامطمئن شبکه آبراه‌ای پیش از این در حوضه دریاچه ارومیه تحقیقی صورت نپذیرفته است. مزیت اصلی روش قابلیت اطمینان بیش از دیگر روش‌های احتمالاتی مانند شبیه‌سازی مونت کارلو، بازده محاسباتی بالای آن به جز در برخی از مسائل ساده (از منظر عبارت تحلیلی) تنها با چند متغیر تصادفی است؛

دریاچه ارومیه، یکی از بزرگ‌ترین دریاچه‌های دائمی فوق شور در جهان و بزرگ‌ترین دریاچه از این نوع در خاورمیانه است (Younesazadeh et al., 2018). شکل و ساختار طبیعی در ریخت شناسی حوضه آبریز دریاچه، با ایجاد سازه‌های بزرگی نظیر سدها به مرور تغییر کرده است. اثرات ثانوی فعالیت‌های انسانی منجر به تغییر مسیر جریان، تخریب شبکه طبیعی زهکشی و مسیل‌های آبراه‌ای، توسعه کانال‌های آبیاری و انتقال آب، تغییرات در کاربری اراضی و پوشش گیاهی پایین دست سازه‌ها و غیره شود. این تغییرات اثرات مخربی بر زیست بوم آن منطقه و مشخصاً رخداد کمبود جریان داشته؛ بطوری که وجود یک شرایط اقلیمی ناهنجار بلند مدت، در نهایت توانست به خشکسالی‌های شدید دریاچه ارومیه منجر گردد؛ سطح تراز آب آن به شدت کاهش یافته و قسمت اعظم وسعت آن به شورزار تبدیل شود. وقوع این پدیده، افزایش بیش از حد شوری آب این دریاچه را به همراه داشته است (Hassanzadeh, 2014). یکی از مسائل مهم امروز کشور ایران بحث احیای دریاچه ارومیه می‌باشد که از سال ۱۳۸۷ شمسی مورد توجه دولت و برنامه‌های توسعه قرار گرفته است. با وجود تمام محدودیت‌های اعمال شده، طی سال‌های اخیر، سطح زیر کشت نیز افزایش یافته است (Tajrish, 2017). رودخانه‌ها به عنوان منبع مهم تأمین آب کشاورزی، جریان‌های اصلی حیات دریاچه نیز محسوب می‌شوند و بهره‌برداری بهینه و همچنین حراست از بستر و حریم آنها از اهمیت زیادی برخوردار است (Younesazadeh et al., 2018). بررسی وضعیت دریاچه ارومیه در ارتباط با منابع تغذیه و تخلیه را می‌توان در مطالعات (khalili et al. (2013)؛ (Soufi et al. (2020) و (Bani Talebi Dehkordi and Rezaei (2019) دید. با این جمع‌بندی که ارزیابی تخصیص بهینه آب محصولات زراعی به خصوص در شرایط خشکسالی می‌تواند تأثیر به‌سزایی بر بهره‌وری بهتر از آب در سطح حوضه داشته باشد؛ برای نمونه در پژوهش (Abbasi et al. (2014) تأکید شده است که شبکه آبراه‌ای منبع عمده تغذیه دریاچه ارومیه است و در این میان رودخانه زربینه‌رود از مهم‌ترین رودخانه‌های حوضه آبریز این دریاچه می‌باشد.

شبکه یا لایه تجمع جریان حوضه آبریز دریاچه ارومیه که به عنوان یک رکن اساسی در تغذیه آن قلمداد می‌شود، کاملاً در ارتباط با نوع و حدود شبکه آبراه‌ای است. این لایه از تغییر مسیل‌های جریان بر اثر عوامل انسانی برشمرده شده در بالا، به صورت مستقیم تأثیرپذیر است. در شرایطی که متغیرهای غیرقطعی بی‌شماری در فرآیند مطالعات تغییرات شبکه جریان آب سطحی حوضه آبریز دریاچه ارومیه وجود دارند، با استفاده از یک روش احتمالاتی، بر اساس تحلیل مرتبه اول

اگرچه این روش نیز ممکن است تبدیل به فرآیند محاسباتی بسیار سنگین شود و آن هم به دلیل ارزیابی از مشتقات مرتبه اول و دوم در الگوریتم حل می‌باشد (Hamed et al., 1996a, 1996b).

در این پژوهش با استفاده از یک روش تحلیل قابلیت اطمینان، در محیط اسکریپت پایتون، از ماتریس شبکه آبراه‌های به منظور تخمین یک نقشه پیوسته رستری بی‌بعد برای نمایش مکانی نواحی حساس به تخریب منابع تغذیه‌کننده دریاچه ارومیه استفاده شده است. تابع عملکرد در این مطالعه برای روش تحلیل قابلیت اطمینان FORM، تغییرات بلند مدت رقوم تجمعی جریان خواهد بود. به این ترتیب می‌توان با توجه به تغییرات انسان‌ساختی احداث سد‌ها و بندها، و همچنین ایجاد کانال‌های انتقال آب، نواحی دارای شاخص آسیب‌پذیری بالاتر را معین کرد. نقشه نهایی می‌تواند با توجه به محدودیت منابع به منظور توسعه مدل‌های تصمیم‌ساز اعمال ممنوعیت و یا در برنامه‌های احیا، مستقیماً مورد استفاده مدیران واقع شود.

۲- روش تحقیق

۲-۱- موقعیت مورد مطالعه

حوضه آبریز دریاچه ارومیه با وسعت حدود ۵۱۷۶۲ کیلومتر مربع در قسمت شمال غربی ایران بین مختصات جغرافیایی ۴۴ درجه و ۱۴ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۵۳ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۳۰ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته و استان آذربایجان غربی و همچنین بخش‌هایی از استان‌های آذربایجان شرقی و کردستان را دربر می‌گیرد (شکل ۱). وسعت دشت‌های حوضه آبریز دریاچه ارومیه ۱۴۹۲۳ کیلومتر مربع با احتساب پهنه آبی دریاچه و حواشی آن و وسعت ارتفاعات حوضه آبریز نیز ۳۶۸۳۹ کیلومتر مربع می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که حوضه آبریز دریاچه ارومیه یک حوضه کوهستانی می‌باشد (Ministry of Energy, 2016). این حوضه آبریز یکی از پرآب‌ترین و بزرگ‌ترین حوضه‌های آبریز داخلی ایران محسوب می‌شود. دریاچه ارومیه در کانون این حوضه واقع شده و محل جمع‌آوری آب‌های سطحی کل حوضه می‌باشد.

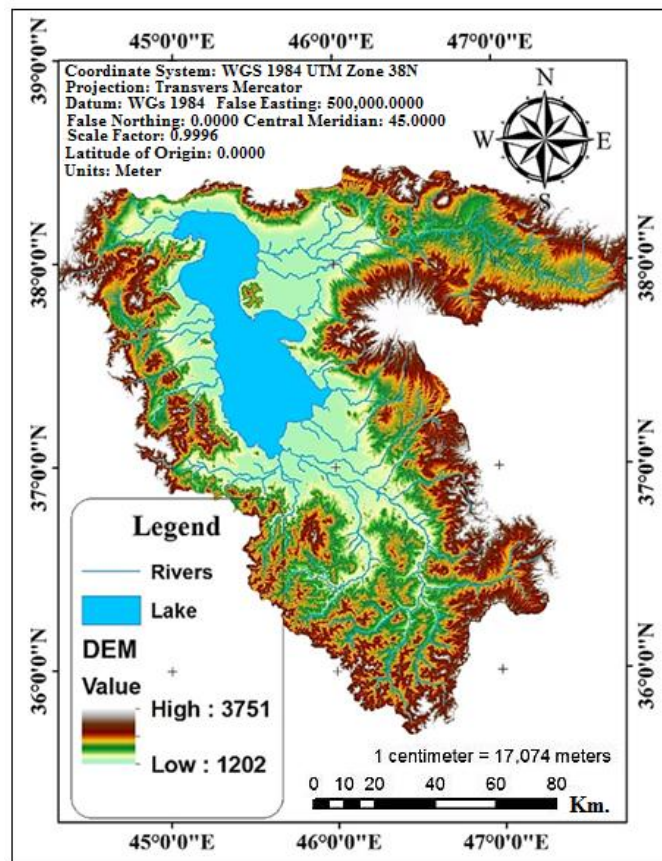


Fig. 1- Geographical location of Lake Urmia catchment area

شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز دریاچه ارومیه

مسیرها، مستقیماً حاصل بکارگیری مدل رقومی ارتفاع در روش تولید خودکار لایه‌های برداری مسیر جریان بوده است.

Table 1- Statistical summary of flow accumulation layers

Layer	Min	Max	Average	Standard Deviation
10000	0	1643273	959.53	24361.76
3000	0	1643131	958.51	24345.08
1000	0	1643125	958.94	24347.83
300	0	1642311	959.31	24357.85
100	0	1643176	982.04	24901.42

در هر مورد، بر اساس روابط تخمین تجمع جریان که مشخصاً از لایه مدل رقومی ارتفاع استفاده می‌شود، توسعه شبکه آبراهه‌ای تا سر حد اشباع ناحیه تخمین زده شده است. در این روش، شکل ۷ کمترین تراکم شبکه آبراهه‌ای را با بیشترین حجم انتقالی نمایش می‌دهد. درحالی که در شکل ۳ زیرشاخه‌های فرعی جریان در محدوده حوضه آبریز به صورت درجات متغیر محاسبه شده است. همچنین شکل ۸ لایه تجمع جریان برای بیشترین تراکم لایه‌برداری مسیل‌ها می‌باشد.

۳-۲- توسعه ریاضی روش FORM

از ماتریس‌های عددی لایه‌های تجمع جریان با آستانه‌های تراکم مختلف، به منظور توسعه تابع عملکرد روش مرتبه اول قابلیت اطمینان استفاده شد. قابلیت اطمینان به صورت احتمال بزرگتر بودن تابع عملکرد $g(X)$ بیشتر از صفر تعریف می‌گردد؛ به این صورت که $P\{g(X)>0\}$. به عبارت دیگر، قابلیت اطمینان مقدار احتمالی است که متغیر تصادفی $X=(X_1, X_2, \dots, X_n)$ در ناحیه امن $g(X)>0$ واقع می‌شود.

رودخانه‌های متعددی از اطراف وارد دریاچه ارومیه می‌شوند که می‌توان به رودخانه‌های بزرگی مانند آجی‌چای، قلعه‌چای، زرینه‌رود، سیمینه‌رود، گذارچای، باراندوزچای، مه‌بادچای، لیلان‌چای، نازلوچای، شهرچای و زولاچای اشاره نمود (Ministry of Energy, 2016). در شکل ۱، شبکه ترسیم خودکار آبراهه‌ای حوضه آبریز دریاچه ارومیه با آستانه تراکم ۱۰۰۰ بر روی لایه تغییرات ارتفاعی این محدوده نشان داده شده است.

۲-۲- لایه تجمع جریان و تراکم شبکه آبراهه‌ای

لایه تجمع جریان آب سطحی، که در الحاقی ArcHydro و در پیش تولید مدل‌های ریاضی ایجاد می‌شود، حاصل تحلیل بر لایه جهت جغرافیایی جریان آب است؛ که خود خروجی لایه مدل رقومی اصلاح شده ارتفاع می‌باشد. لایه مدل رقومی ارتفاع در این پژوهش با دقت سلولی حدوداً ۳۰ متری و برای حوضه آبریز دریاچه ارومیه از سنجنده Aster ماهواره لندست تهیه شد. تراکم شبکه آبراهه‌ای که ملاک اصلاح مدل رقومی ارتفاع در پیش تولید لایه تجمع جریان است، با استفاده از روش خودکار استخراج، و بر طبق آستانه‌های ترتیب‌توانی ۱۰۰، ۳۰۰، ۱۰۰۰، ۳۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ حاصل شد. ملاک بهره‌گیری از آستانه‌های ذکر شده، برازش مقبول صورت لگاریتمی نمودار رگرسیون این آستانه بر معادله توانی بوده است (شکل ۲).

در ادامه هر یک از لایه‌های برداری شبکه آبراهه‌ای، به منظور اصلاح مدل رقومی ارتفاع در تهیه لایه تجمع جریان استفاده شد. نتایج این محاسبات در جدول ۱ برای تمامی آستانه‌های ذکر شده و شکل ۸ برای مقدار متوسط ۱۰۰۰ نمایش داده شده است.

همچنین اشکال ۳ تا ۷ لایه‌های شبکه آبراهه‌ای موقعیت دریاچه ارومیه را برای آستانه‌های مختلف نمایش می‌دهد. هر یک از این

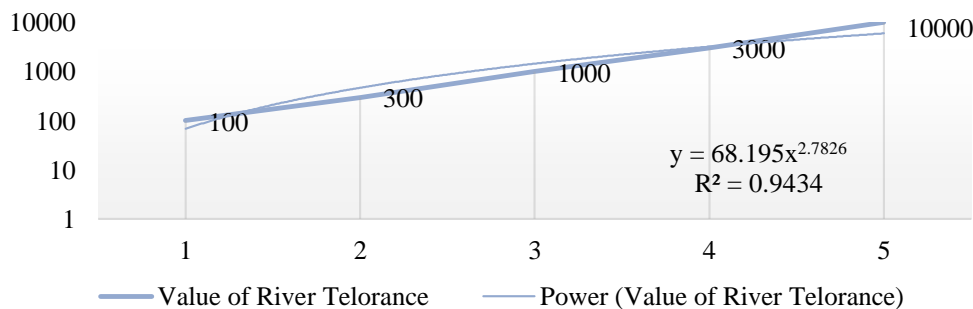


Fig. 2- The regression equation of the stream network threshold

شکل ۲- معادله رگرسیون توانی آستانه شبکه آبراهه‌ای

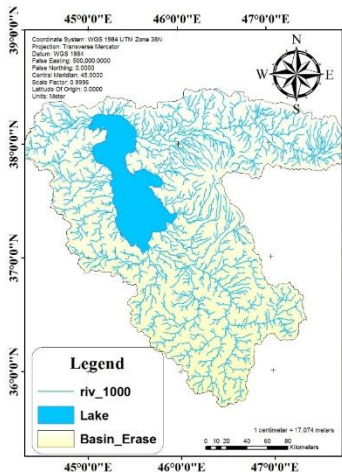


Fig. 5- Stream network with a threshold density of 1000
 شکل ۵- شبکه آبراهه‌ای با آستانه تراکم ۱۰۰۰

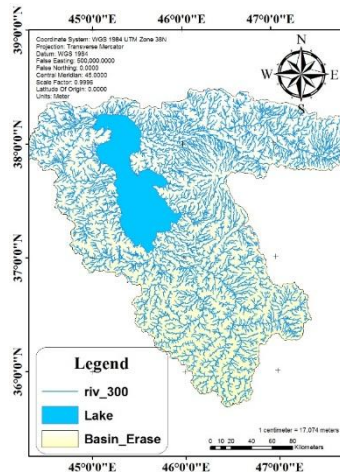


Fig. 4- Stream network with a threshold of density 300
 شکل ۴- شبکه آبراهه‌ای با آستانه تراکم ۳۰۰

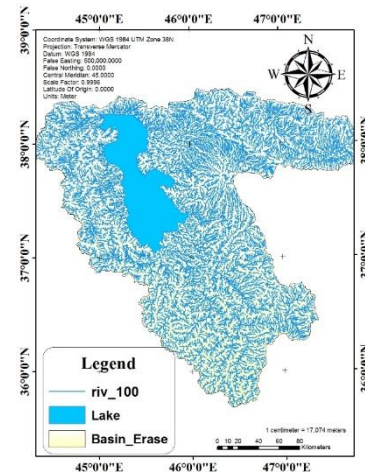


Fig. 3- Stream network with a density threshold of 100
 شکل ۳- شبکه آبراهه‌ای با آستانه تراکم ۱۰۰

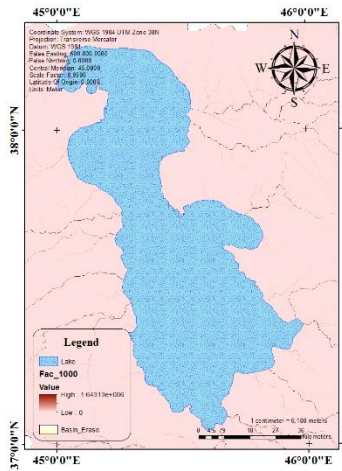


Fig. 8- Flow acc layer with a threshold density of 1000
 شکل ۸- لایه تجمع جریان با آستانه تراکم ۱۰۰۰

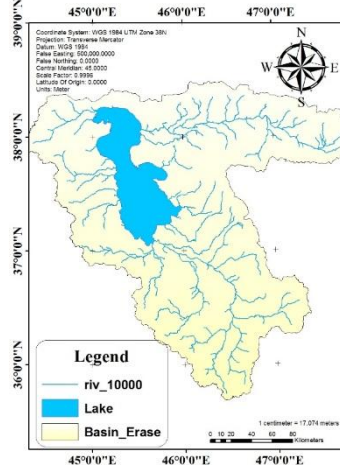


Fig. 7- Stream network with a threshold density of 10000
 شکل ۷- شبکه آبراهه‌ای با آستانه تراکم ۱۰۰۰۰

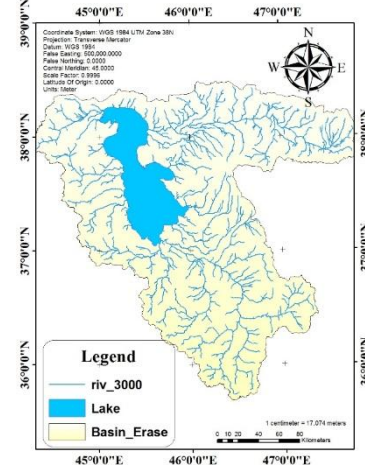


Fig. 6- Stream network with a threshold density of 3000
 شکل ۶- شبکه آبراهه‌ای با آستانه تراکم ۳۰۰۰

پایه ایده روش FORM دستیابی به نتایج معادل محاسبات پیچیده از طریق ساده‌سازی انتگرال $f_x(X)$ و تقریب تابع عملکرد $g(X)$ است. در اصل با ساده‌سازی و تقریب مذکور، مقدار معادلات حاصل می‌گردد. عنوان تحلیل مرتبه اول قابلیت اطمینان یا FORM در اصل از این واقعیت که مقدار تابع عملکرد $g(X)$ در آن از طریق بسط تیلور^۳ به صورت خطی تقریب زده می‌شود، آمده است (Du, 2005).

انتگرال‌های احتمالاتی دارای حجم زیرین سطح (سطح بالایی فراتر از مسأله دو بعدی) joint pdf انتگرال $f_x(X)$ در فضای شکست $g(X) < 0$ و یا فضای امن $g(X) > 0$ می‌باشند (شکل ۹). در توضیحی

بدین ترتیب مقدار احتمال شکست به صورت $g(X) < 0$ تعریف می‌گردد. مقدار شکست در تعریف مشابه به معنی قرارگیری متغیر تصادفی $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ در ناحیه شکست $g(X) < 0$ است. اگر joint pdf متغیر X را $f_x(X)$ بدانیم، احتمال شکست توسط انتگرال معادله (۱) ارزیابی می‌گردد (Du, 2005):

$$p_f = P\{g(X) < 0\} = \int_{g(x) < 0} f_x(X) dx \quad (1)$$

و مقدار قابلیت اطمینان به شکل ذیل تعریف می‌شود (معادله ۲):

$$R = 1 - p_f = P\{g(X) > 0\} = \int_{g(x) > 0} f_x(X) dx \quad (2)$$

۲-۳-۲- گام دوم- تقریب انتگرال مرزی

بعلاوه به منظور توسعه بیشتر انتگرال احتمالاتی جهت ارزیابی، شکل تابع زیر انتگرال ساده‌سازی می‌گردد؛ که در این حالت انتگرال مرزی $g(U)=0$ تقریب زده خواهد شد. روش FORM از یک تقریب خطی تحت عنوان تحلیل مرتبه اول بسط تیلور استفاده می‌کند.

با استفاده از مطالعات (Du 2005) مقدار احتمال شکست در این حالت توسط معادله (۴) تعریف می‌شود:

$$p_f \approx \Phi \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i u_i^* \right) = \Phi(a u^* T) \quad (4)$$

که در آن $au^* T$ حاصل ضرب داخلی بردار واحد a و بردار u^* MPP است. همچنان که در شکل (۱۱) نشان داده شده است، از آنجا که u^* MPP کوتاه‌ترین فاصله بین مرکز مختصاتی تا منحنی تابع عملکرد $g(U)=0$ است، MPP تانژانت منحنی $g(U)=0$ و دایره‌ای با شعاع β است. در شکل (۱۰) درختواره الگوریتم محاسبه MPP نمایش داده شده است. روند محاسبات FORM به صورت ذیل خلاصه شده است:

- تبدیل متغیر تصادفی اصلی از فضای X به فضای U با استفاده از تبدیل رُزن بلات^۵
- جستجوی MPP در فضای U و محاسبه شاخص قابلیت اطمینان β ، (U^*) ؛ مختصات خاص که دارای بیشترین سهم یا مقدار از ادغام احتمالات دارد.
- محاسبه قابلیت اطمینان $R = \Phi(\beta)$

۳- نتایج و تحلیل نتایج

پس از تهیه صورت ماتریسی ورودی‌های معادله تابع عملکرد و با اجرای اسکریپت روش تحلیل مرتبه اول قابلیت اطمینان در محیط برنامه‌نویسی پایتون، نتایج به صورت خروجی ماتریس و با ارقام حداکثری و حداقلی ۷۲ و ۲۸ درصد برای احتمال شکست حاصل شد (شکل ۱۳). احتمال شکست در هر مورد بیانگر شانس تخریب شبکه آبراه‌های در سلول لایه رستری منطقه مورد مطالعه است. با توجه به ماتریس خروجی از تمامی ۲۰۷۹۹ نقطه مختصاتی تحلیل شده، پهنه‌بندی نتایج در نرم‌افزار GIS، نقشه‌های کلاسه‌بندی ۱۲ و ۱۴ را به ترتیب برای شاخص بتا و احتمال شکست ترسیم کرد. همچنین شکل ۱۳ خلاصه آماری احتمال شکست در سلول‌های رستری را نمایش می‌دهد.

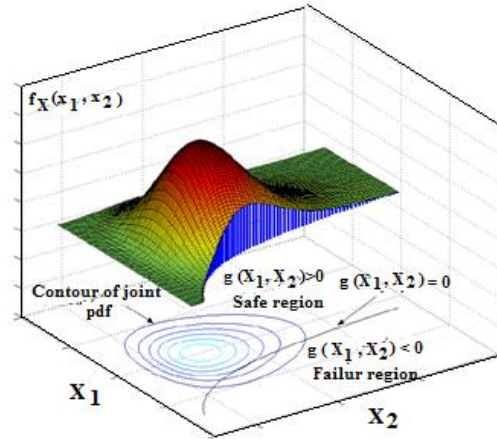


Fig. 9- Probabilistic integrals (Du, 2005)
شکل ۹- انتگرال احتمالاتی (Du, 2005)

دیگر، قابلیت اطمینان عبارت است از حجم زیرین انتگرال $f_X(X)$ در سمت ناحیه امن تابع $g(X)$ و به همان‌گونه فضای شکست معادل است با حجم زیرین انتگرال $f_X(X)$ در سمت ناحیه شکست تابع $g(X)$ که حذف گردیده است.

دو گام مهم در این تقریب‌سازی جهت حصول جواب انتگرال‌های احتمالاتی وجود دارد که این امر را ساده نموده است. در اولین گام انتگرال $f_X(X)$ را باید ساده‌سازی نمود، و بدین ترتیب خطوط کانتوری آن مرتب‌تر و متقارن‌تر خواهد بود (شکل ۹)؛ در گام دوم؛ تقریب انتگرال مرزی $g(X)=0$ است. پس از انجام این دو گام ساده‌سازی، یک راه حل تحلیلی برای رسیدن به جواب نهایی به‌دست خواهد آمد.

۲-۳-۱- گام اول- ساده‌سازی انتگرال

ساده‌سازی انتگرال در این مرحله از طریق انتقال با تبدیل فضای متغیر تصادفی وابسته به یک فضای نرمال استاندارد به عنوان فضای متغیر تصادفی مستقل انجام می‌گردد. فضای شامل متغیر اصلی $X=(X_1, X_2, \dots, X_n)$ تحت عنوان فضای X نامیده می‌شود. به منظور تبدیل کانتورهای انتگرال $f_X(X)$ به شکلی مرتب و متقارن، تمامی متغیرهای تصادف $X=(X_1, X_2, \dots, X_n)$ از فضای X به فضای استاندارد نرمال تبدیل می‌شوند؛ در حالی که متغیرهای استاندارد نرمال $U=(U_1, U_2, \dots, U_n)$ دارای توزیع نرمال استاندارد می‌باشند. در این حالت فضای تبدیل یافته، فضای U نامیده می‌گردد. به این ترتیب انتگرال احتمالی برابر معادله (۳) خواهد بود:

$$p_f = \int_{g(u_1, u_2, \dots, u_n) < 0} \dots \int_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} u_i^2\right) du_1 \dots du_n \quad (3)$$

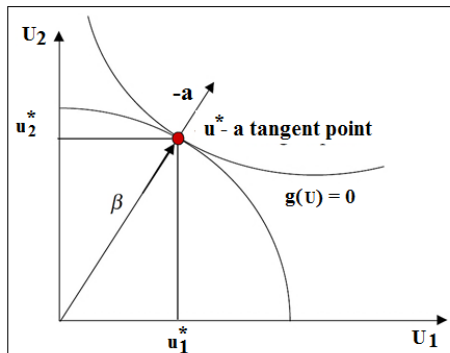


Fig. 11- MPP Tangent Point A (Du, 2005)
 (Du, 2005) شکل ۱۱- MPP تانژانت نقطه A

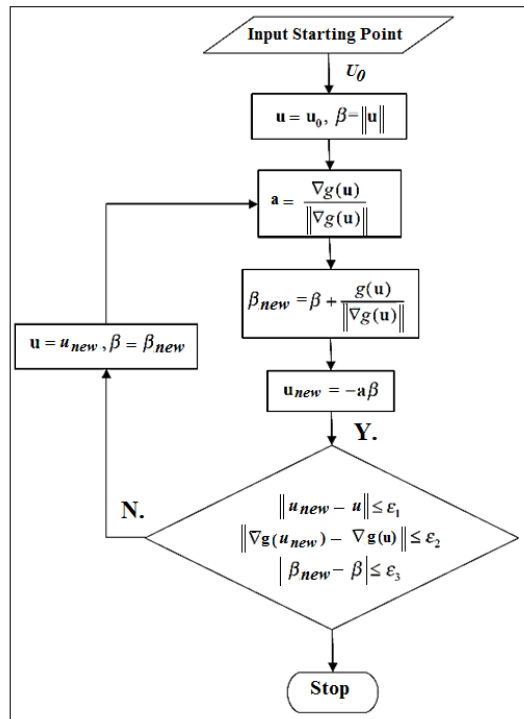


Fig. 10- MPP search tree model (Du, 2005)
 (Du, 2005) شکل ۱۰- درختواره مدل جستجوی MPP

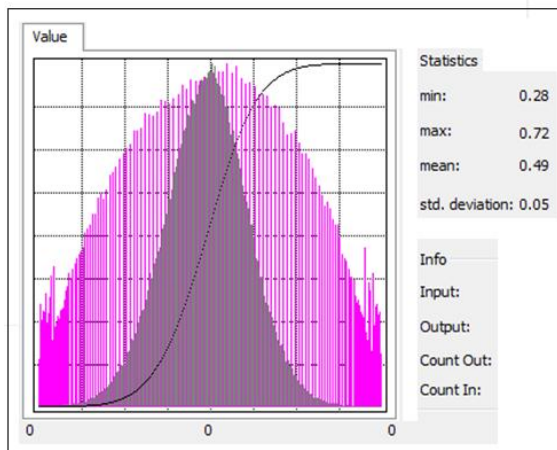


Fig. 13- Statistical summary of failure probability
 in the FORM method
 شکل ۱۳- خلاصه آماری احتمال شکست در روش FORM

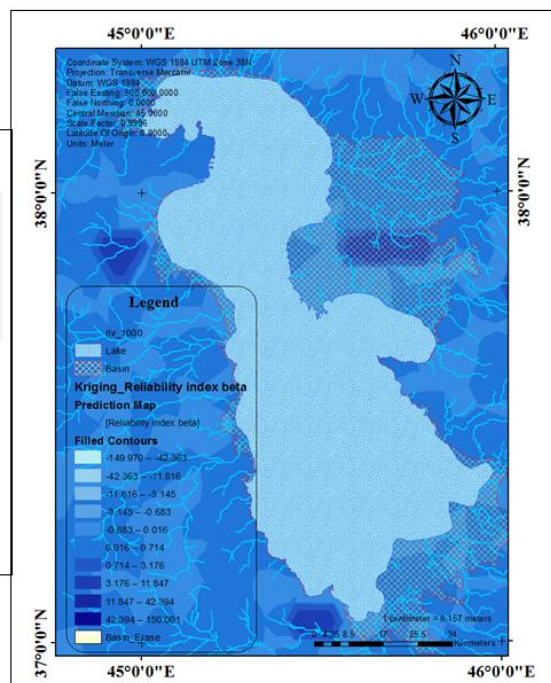


Fig. 12- Beta index in FORM method
 شکل ۱۲- شاخص بتا در روش FORM

مطابق با شکل ۱۴، نتایج این پژوهش حاکی از آن است که وجود شبکه آبراهه‌ای در یک ناحیه حتی بر اساس بزرگی مقدار آورد جریان نمی‌تواند تعیین کننده قدرت تحمل‌پذیری در برابر تخریب و کاهش تراکم مسیل‌های آبراهه‌ای باشد. برای مثال وجود شاخه‌های اصلی و با مقدار دبی بالای مناطق شمال شرقی دریاچه، رقوم شکست بسیار کمتری از بخش‌های مشابه جنوبی را دارا هستند. در این مطالعه به منظور بررسی اثر تغییرات تراکم شبکه آبراهه‌ای بر مقدار آورد جریان و یا لایه تجمع جریان در مرزهای تغذیه دریاچه ارومیه، از روش آماری تحلیل مرتبه اول قابلیت اطمینان استفاده شد. احتمال شکست در سه مجموعه مقدار کمتر، معادل و بیشتر از متوسط ۵۰ درصد بدست آمد، که به ترتیب نواحی مساعد، بدون تغییر، و حساس به تخریب شبکه آبراهه‌ای معرفی شد. که می‌توان دریافت مقدار احتمال شکست در نواحی مرزی و ورودی دریاچه ارومیه لزوماً به بزرگی شبکه آبراهه‌ای وابسته نمی‌باشد. وجود عامل انسان ساختی نظیر بندها، سدها، دیگر فعالیت‌های عمرانی و کشاورزی عملاً با تغییر در شبکه آبراهه‌ای آورد جریان را از بین برده و بنابراین از منظر مفهومی نواحی با احتمال شکست کمتر از ۵۰ درصد در کلاس بدون تغییر ادغام می‌شود.

در شکل ۱۴ موقعیت مناطقی که شرایط نامساعدتری از منظر تحمل‌پذیری در مقابل تخریب و کاهش ارائه جریان آب سطحی را دارا هستند با رنگ‌های تیره‌تر مطابق با راهنما نمایش داده شده است. رقم ۵۰ درصد مناطقی را نشان می‌دهد که با تغییر در ساختار هر ناحیه که در نهایت منجر به تخریب شبکه جریان خواهد شد، آسیب بزرگ صورت نخواهد گرفت. همچنین هر مقدار کمتر از ۵۰ درصد شانس شکست را به صورت معکوس نمایش می‌دهد. کلاس‌های بیشتر از ۵۰ درصد باید به عنوان مناطق ممنوعیت که دارای حساسیت بالایی می‌باشند، در نظر گرفته شوند. نکته مهم آنکه کلاس کاهش تخریب با تقلیل تراکم در شبکه آبراهه‌ای در مناطقی که مقدار احتمال شکست کمتر از ۵۰ درصد محاسبه شده است، عملاً در مقابل این مفهوم که تخریب در مسیر لایه‌های شبکه آبراهه‌ای بر اساس فعالیت‌های سازه‌ای و عمرانی انسان‌ساختی صورت می‌گیرد، بی‌معنی است. به عبارت دیگر، انباشت آب اگرچه در لایه‌های تجمع جریان در برخی مناطق با تخریب شبکه آبراهه‌ای افزوده می‌شود (جدول ۱)، اما در شکل واقعی خود، این آب صرف بخش‌های کشاورزی، صنعت و نوعی دیگر از فعالیت‌ها که در این مطالعه به عنوان تلفات دریاچه می‌تواند تلقی گردد، خواهد شد.

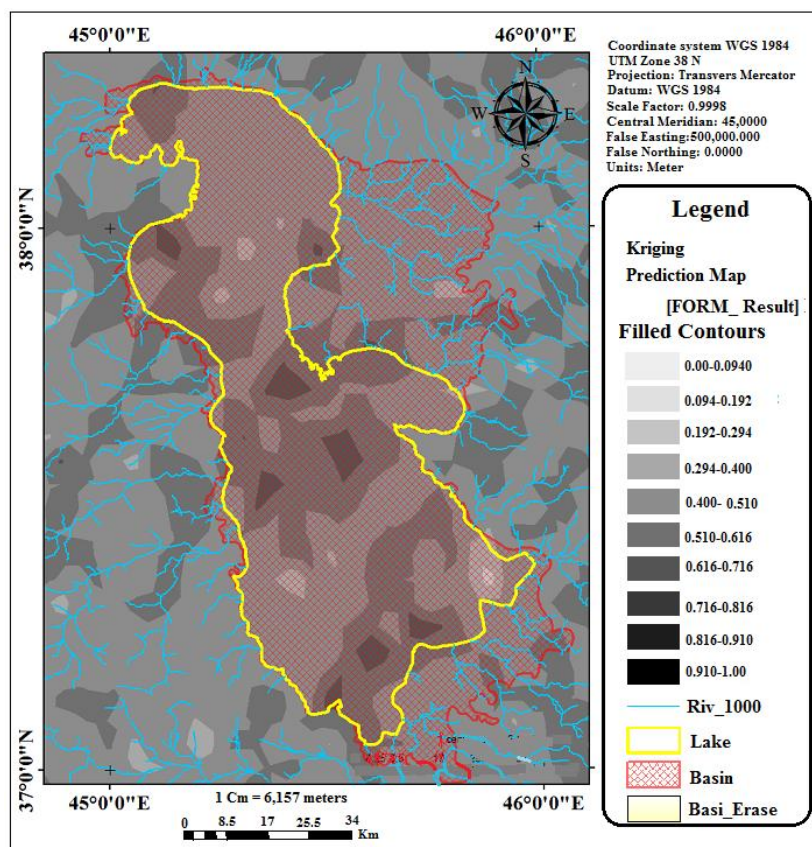


Fig. 14- Failure probability in FORM method

شکل ۱۴- احتمال شکست در روش FORM

تحقیقات منابع آب ایران، سال شانزدهم، شماره ۳، پائیز ۱۳۹۹

Volume 16, No. 3, Fall 2020 (IR-WRR)

Cawfield J, Wu M (1993) Probabilistic sensitivity analysis for one-dimensional reactive transport in porous media. *Journal of Water Resources Research* 29(3):661-672

Du X (2005) Probabilistic engineering design, first order and second reliability methods. University of Missouri-Rolla, Chapter 7

Hamed M, Bedient P (1999) Reliability based uncertainty analysis of groundwater contaminant transport and remediation. *Environmental Protection Agency* 600p

Hamed M, Bedient P, Conte J (1996a) Numerical stochastic analysis of groundwater contaminant transport and plume containment. *Journal of Contaminant Hydrology* 24(1):1-24

Hamed M, Bedient P, Dawson C (1996b) Probabilistic modeling of aquifer heterogeneity using reliability methods. *Journal of Advances in Water Resources* 19(5):277-295

Hassanzadeh Y (2014) Urmia Lake crisis: Water crisis in the country. 10th International Congress on Civil Engineering Tabriz 17-15 (In Persian)

Jang, Y, Sitar N, Der Kiureghian A (1994) Reliability analysis of contaminant transport in saturated porous media. *Journal of Water Resources Research* 30(8):2435-2448

Khalili K, Ahmadi F, Dinpapashoh Y, Behmanesh J (2013) Linear and nonlinear behavior analysis of hydrological time series (Case study: Western Rivers of Lake Urmia). *Iranian Water Resources Research* 10(2):12-20 (In Persian)

Maier H, Lence B, Tolson A, Foschi R (2001) First-order reliability method for estimating reliability, vulnerability, and resilience. *Journal of Water Resources Research* 37(3):779-790

Melching C (1992) An improved first-order reliability approach for assessing uncertainties in hydrologic modeling. *Journal of Hydrology* 132(1):157-177

Melching C, Bauwens W (2001) Uncertainty in coupled nonpoint source and stream water-quality models. *Journal of Water Resources Planning and Management* 127(6):403-413

Moghaddasi M, Morid S, and Delavar M (2015) Urmia agricultural water consumption management approach in Urmia Lake restoration. *Iran-Water Resources Research* 11:1-12 (In Persian)

Moghaddasi S, Morid S, Delavar M, and Hoseinni Safa H (2019) Challenges and compromises of agricultural water supply and environmental water right in the Lake Urmia Basin. *Iran-Water Resources Research* 15(2):26-38 (In Persian)

کمترین تاب‌آوری بر طبق خروجی تابع شکست، مرزهای غربی، شمال غربی و جنوب دریاچه با احتمال ۷۲ درصد و کمینه احتمال در مرزهای با پراکنش همگن و رقم حداقلی ۲۸ درصد است. بزرگ‌ترین رقم احتمال گذر از مرز بحران در محیط میانه غربی دریاچه با عدد بیش از ۸۶ درصد ثبت شده است. بنابراین احتمال شکست در این محاسبات، علاوه بر لایه تراکم شبکه آبراهه‌ای، به فاکتورهایی متعدد دیگری نیز وابسته است، که در روند پژوهش کلی مداخله می‌کند. بر اساس نقشه حاصل شده شکل ۱۴، بیشترین آسیب‌پذیری در محیط دریاچه رخ می‌دهد؛ اما به این علت که در پهنه دریاچه، محاسبات روش مرتبه اول قابلیت اطمینان به شکل مستقل تعیین نشده، لازم است تا در میانمایی تاب‌آوری بر طبق آسیب‌های مرزی، تغییرات ارتفاعی بستر دریاچه که مناطق مستعد خشکسالی را معین می‌کند، به صورت همزمان با این ارقام تفسیر گردد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- First Order Reliability Method
- 2- Atmospheric-Oceanic General Circulation-Fourth Assessment Report Models
- 3- Taylor Expansion
- 4- Maximum Power Point
- 5- Rosenblatt
- 6- A point that has the highest contribution to the probability integration.

۵- مراجع

Abbasi A, Delavar M, Murid S (2014) Development of the system using the water resources of Zarrineh River Basin with emphasis on securing the right of Lake Urmia and optimal allocation of water in the agricultural sector. *Iran-Water Resources Research* 11(3):1-16 (In Persian)

Azimi S, Azhdary Moghaddam M, Hashemi Monfared SA (2019) Analysis of drought recurrence conditions using first-order reliability method. *International Journal of Environmental Science and Technology* 16(8):4471-4482

Bani Talebi Dehkordi M, Rezaei H (2019) Use of renewable water in Urmia Lake catchment with the help of GLEAM model. *Iran-Water Resources Research* 15(3):144-154 (In Persian)

Boateng S (2001) Evaluation of probabilistic flow in two unsaturated soils. *Journal of Hydrogeology* 9(1):543-554

Boateng S, Cawfield J (1999) Two-dimensional sensitivity analysis of contaminant transport in the unsaturated zone. *Journal of Ground Water* 37(2):185-193

- Sufi M, Alijani B, Borna Reza, Asadi F (2020) Hydro-climatic modeling of Urmia Lake level fluctuations. *Iran-Water Resources Research* 16 (1):380-393 (In Persian)
- Sun N, Yeh W (1990) Coupled inverse problems in groundwater modeling: 1 Sensitivity analysis and parameter identification. *Journal of Water Resources Research* 26(10):2507-2525
- Tajrishi (2017) Interview with Iran Newspaper. www.iran-newspaper.com/Newspaper/BlockPrint/144763, Plan for reviving Iranian wetlands, (2012) Urmia Lake Drought Risk Management Program, <https://www.doe.ir/portal/theme/talab/Data/021-DRM.html> (In Persian)
- Xiang Y, Mishra S (1997) Probabilistic multiphase flow modeling using the limit-state method. *Journal of Ground Water* 35(5):820-824
- Younes-zadeh S, Sima S, Javadian M, and Tajrishi M (2018) Determining daily variations of river flood plains in the southern buffer zone of Urmia Lake in 2010. *Iran-Water Resources Research* 14(3):31-41 (In Persian)
- Mok C, Sitar N, Der Kiureghian A (1994) Numerically efficient reliability analysis of groundwater flow and subsurface contaminant transport in computer methods and advances in geomechanics. A. A. Balkema, Brookfield, VT, 1158p
- Ministry of Energy (2016) Water balance report of Urmia Lake catchment area. (In Persian)
- Razmara P, Motiei H, Masah Bovani A, and Torabi S (2013) The impact of climate change on the runoff to Lake Urmia in the coming period. Fifth Iranian Water Resources Management Conference, Tehran (In Persian)
- Sitar N, Cawfield J, Der Kiureghian A (1987) First-order reliability approach to stochastic analysis of subsurface flow and contaminant transport. *Journal of Water Resources Research* 23(5):794-804
- Skaggs T, Barry D (1996) Sensitivity methods for time-continuous, spatially discrete groundwater contaminant transport models. *Journal of Water Resources Research* 32(8):2409-2420
- Skaggs T, Barry D (1997) The first-order reliability method of predicting cumulative mass flux in heterogeneous porous formations. *Journal of Water Resources Research* 33(6):1485-1494