

## Stability Analysis of Riprap Layer at Downstream of Stilling Basin Based on Reliability Analysis

MOJTABA KARIMAEI TABARESTANI\*

Geotechnical and Water Engineering Group, Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran.

(Received: Nov. 14, 2020- Revised: Dec. 28, 2020- Accepted: Feb. 22, 2021)

### ABSTRACT

Determining the exact size of a stable riprap to control scouring at downstream of stilling basin is a challenge in hydraulic engineering due to various uncertainties that can lead a project become unsafe or uneconomical. Accordingly, in the present study, using the reliability analysis method, the stability of the riprap layer at downstream of the Kan diversion dam constructed at Northwest of Tehran city as a case study was studied. Then, the probabilistic properties of the parameters affecting the riprap design were determined. The results showed that the failure probability of the used riprap is about 0.2% for the 100-year flood, while it is more than 10% for the 500-year flood. Next, the relationship between reliability index and safety factor in deterministic design method calculated from the average value of effective parameters was investigated. The results showed that this relationship is linear and the safety factor corresponding to the reliability index of 3 is required to be 2.1. Finally, the sensitivity analysis of the parameters affecting the stability of the riprap layer showed that the parameters of flow discharge, turbulence intensity and relative stone density have the greatest effect on the change of the reliability index.

**Keywords:** Stilling Basin, Scour, Riprap, Reliability Analysis, Sensitivity Analysis.

## مطالعه پایداری لایه حفاظتی سنگچین در پائین دست حوضچه آرامش بر اساس تحلیل قابلیت اطمینان

مجتبی کریمائی طبرستانی\*

گروه ژئوتکنیک و آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، تهران، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۸/۲۴ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۰/۸ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۱۲/۴)

### چکیده

تعیین اندازه دقیق سنگچین پایدار جهت کنترل آبشستگی در پائین دست حوضچه‌های آرامش با توجه به عدم قطعیت‌های مختلف یک چالش در مهندسی هیدرولیک است که می‌تواند منجر به طرحی نایمن و یا غیر اقتصادی گردد. بر این اساس در تحقیق حاضر با استفاده از روش تحلیل قابلیت اطمینان اقدام به مطالعه پایداری سنگچین در پائین دست حوضچه آرامش بند انحرافی کن واقع در شمال غرب شهر تهران به عنوان مطالعه موردی شد. در ادامه با استفاده از روش‌های مختلف نظیر تحلیل فراوانی سیلاب، خصوصیات احتمالاتی فراسنجه‌های موثر بر طراحی سنگچین تعیین شد. نتایج نشان داد که احتمال شکست سنگچین به کار رفته برای سیلاب ۱۰۰ ساله در حدود ۰/۲ درصد است در حالیکه برای سیلاب ۵۰۰ ساله بیش از ۱۰ درصد می‌باشد. در ادامه اقدام به بررسی ارتباط شاخص قابلیت اطمینان و ضریب ایمنی در شرایط طراحی سنگچین بر اساس مقدار میانگین فراسنجه‌های موثر شد. نتایج نشان داد که این ارتباط به صورت خطی است و نیاز است که ضریب ایمنی متناظر با شاخص قابلیت اطمینان  $\beta = 3$ ، برابر با ۲/۱ باشد. در نهایت تحلیل حساسیت فراسنجه‌های موثر بر پایداری سنگچین در پائین دست حوضچه آرامش نشان داد که فراسنجه‌های دبی جریان، شدت آشفنگی و چگالی نسبی سنگ بیشترین تاثیر را بر روی تغییر شاخص قابلیت اطمینان دارند.

واژه‌های کلیدی: حوضچه آرامش، آبشستگی، سنگچین، تحلیل قابلیت اطمینان، تحلیل حساسیت.

### مقدمه

بندهای انحرافی از جمله سازه‌های هیدرولیکی محسوب می‌شوند که با اهداف مختلفی نظیر ایجاد هد انرژی و انحراف آب رودخانه به سمت آبگیر در عرض رودخانه ساخته می‌شوند. این سازه‌ها از بخش‌های مختلفی نظیر سرریز، مسیر انتقال رسوب، دریچه‌ها، آبگیر و حوضچه آرامش تشکیل شده‌اند. با وجود آرامش نسبی جریان در داخل حوضچه آرامش، بعلاوه سرعت زیاد و قابلیت بالای حمل رسوب جریان زلال ورودی، وقوع کف‌کنی و فرسایش بستر رودخانه در پائین دست این سازه اجتناب‌ناپذیر است. به تدریج با گسترش حفره آبشستگی، زیرشویی در پایاب حوضچه اتفاق می‌افتد و با گسترش این روند امکان تخریب بدنه آن وجود دارد.

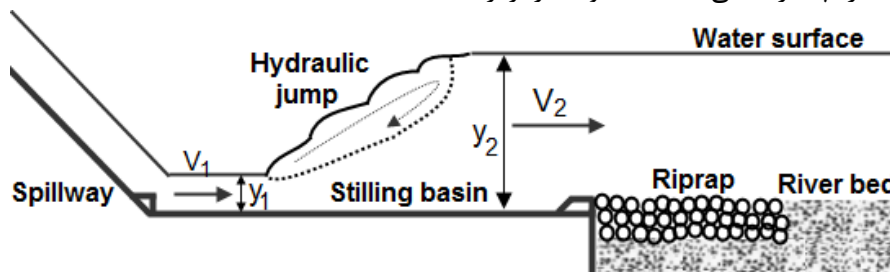
مطالعات مختلفی برای بررسی پدیده آبشستگی در پائین دست حوضچه آرامش انجام شده است. طبق نظر Novak et al. (2007) ساخت یک حوضچه آرامش با طول کافی که پرش هیدرولیکی در آن اتفاق افتد می‌تواند بین ۴۵ تا ۵۰ درصد عمق آبشستگی در پائین دست حوضچه را کاهش دهد. این محقق رابطه‌ای تجربی را برای تعیین عمق آبشستگی در پائین دست حوضچه آرامش ارائه نمود. Oliveto and Comuniello (2008) تحقیقی آزمایشگاهی را بر روی آبشستگی در پائین دست

آرامش انجام دادند. ایشان با توجه به داده‌های آزمایشگاهی روابطی را جهت تخمین عمق نهایی و تغییرات زمانی عمق آبشستگی ارائه نمودند. Oliveto (2012) با مطالعه بر روی فراسنجه‌های مختلف موثر بر عمق آبشستگی در پایین دست حوضچه آرامش، اقدام به ارائه رابطه تجربی برای محاسبه عمق آبشستگی نمود. مطالعه Shafai Bajestan and Omidi (2016) نشان داد که ضمن افزایش عمق آبشستگی با افزایش دبی جریان، مقدار عمق آبشستگی ناشی از پرش مستغرق کمتر از پرش آزاد است. Champagne et al. (2017) در تحقیق آزمایشگاهی خود به مطالعه بر روی کاهش آبشستگی در پائین دست حوضچه آرامش ناشی از تزریق هوا پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که با این روش امکان کاهش عمق آبشستگی تا ۵۹ درصد وجود دارد. Elnikhely (2017) در مطالعه آزمایشگاهی خود نشان داد که با ساخت استوانه‌هایی در عرض شیب معکوس سرریز می‌توان عمق آبشستگی را در پایین دست حوضچه آرامش آن به میزان حداکثر حدود ۲۶ درصد کاهش داد. Vahidi et al. (2020) مطالعه‌ای را بر روی عمق آبشستگی در پائین دست بند انحرافی شهدا در استان خوزستان انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که طول حوضچه آرامش این بند کم است و پیشنهاد نمودند که برای کنترل

نیروهای ناشی از جریان مقاومت کند. (1990) Pilarczyk رابطه‌ای مهم و کاربردی برای طراحی اندازه پایدار سنگچین بر اساس تأثیر شدت آشفتگی جریان، سرعت و عمق جریان، شرایط بستر و مشخصات مصالح سنگچین به صورت زیر ارائه نمود:

$$\frac{d_{50}}{y} = \left[ \frac{V}{Ti \cdot \sqrt{g \cdot (s-1) \cdot \theta \cdot y}} \right]^{2.5} \quad (\text{رابطه ۱})$$

در رابطه فوق  $y$  و  $V$  به ترتیب عمق و سرعت جریان عبوری از لایه سنگچین هستند که در شکل (۱) با اندیس ۲ نشان داده شده‌اند. همچنین  $s$ : چگالی نسبی،  $g$ : شتاب ثقل و  $\theta$ : عدد بی‌بعد شیلدز است که مقدار آن برای حالت عدم حرکت بستر برابر با ۰/۰۳ در شرایط آستانه حرکت ۰/۰۴ و در حالت حرکت بستر برابر با ۰/۰۶ ارائه شده است. همچنین فرانسجه  $Ti$ : ضریب شدت آشفتگی جریان می‌باشد که مقدار آن در حالت‌های مختلف به صورت (۱) شدت آشفتگی زیاد نظیر خم رودخانه‌ها و کانال‌ها، اختلالات و تنگ‌شدگی موضعی برابر با  $6 < Ti < 5$  و (۲) شدت آشفتگی طبیعی نظیر رودخانه‌ها و کانال‌ها برابر با  $8 < Ti < 7$  و (۳) شدت آشفتگی کم نظیر جریان‌های یکنواخت، جریان‌های با بستر صاف و فلوم‌های آزمایشگاهی برابر با  $10 < Ti < 8$  تعریف می‌شود.



شکل ۱- پروفیل طولی حوضچه آرامش و سنگچین پائین‌دست

استفاده از مدل فیزیکی و تحلیل ابعادی حداقل اندازه پایدار سنگ را در این موقعیت تعیین کردند. مطالعات مهم و کاربردی قدیمی - تری نیز توسط (Izbach (1936 و (Maynord (1987 جهت ارائه رابطه‌های طراحی برای تعیین اندازه پایدار سنگچین انجام گرفت که این رابطه‌ها در سال‌های مختلف توسط مهندسين مورد استفاده قرار گرفته است.

یکی از مسائلی که اخیراً در جامعه مهندسی به شکل گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته است توجه به ماهیت غیرقطعی بارهای وارد بر سازه‌ها و تأثیر این موضوع بر پایداری آنها است. در شرایط تحلیل کلاسیک قطعی بدون توجه به میزان عدم قطعیت - های موجود در بارهای اعمالی به سازه با به کارگیری ضرایب ایمنی در طراحی سعی در اعمال اثرات این عدم قطعیت در طراحی سازه دارند. این موضوع می‌تواند منجر بر طرحی با ایمنی بسیار

آبشستگی در پائین‌دست حوضچه از سنگچین با حداقل اندازه ۲۰۰ میلی‌متر استفاده شود. (2020) Saber and Ghodsian اقدام به مطالعه بر روی آبشستگی در پائین‌دست حوضچه آرامش USBR IV به همراه آبپایه پلکانی نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد که افزایش عدد فرود جریان منجر به کاهش شاخص آبشستگی و عملکرد موثرتر آبپایه می‌شود.

با توجه به مطالعات انجام شده، نیاز به حفاظت از پائین‌دست بند انحرافی جهت کنترل آبشستگی ضروری است. یکی از متداولترین روش‌ها جهت حفاظت از بستر در برابر آبشستگی استفاده از پوشش حفاظتی سنگچین است. سنگچین شامل پوششی انعطاف‌پذیر از سنگ‌های با اندازه مشخص است که بر روی هم و در کنار هم با ضخامت و گستره مشخص قرار گرفته‌اند. این پوشش حفاظتی بسیار محبوب بوده و در صورتیکه معدن سنگ مناسب در نزدیکی محل پروژه باشد بسیار اقتصادی است. در شکل (۱) نمایی شماتیک از پروفیل طولی یک حوضچه آرامش به همراه لایه سنگچین حفاظتی در پائین‌دست آن نشان داده شده است. با توجه به شرایط مربوط به مطالعه حاضر این شکل اقتباسی از شکل‌های ارائه شده در تحقیقات محققین قبلی نظیر (2011) Taebi et al. است. یکی از مهمترین بخش‌های طراحی لایه سنگچین، تعیین اندازه پایدار سنگی است که بتواند در برابر

تاکنون مطالعات مختلفی بر روی اندازه سنگچین پایدار در پائین‌دست حوضچه آرامش انجام شده است. (Farhodi and Helbar (2010 در مطالعه‌ای آزمایشگاهی به بررسی پایداری سنگچین در پائین‌دست حوضچه آرامش پرداختند. در این تحقیق پس از بررسی عوامل موثر بر پایداری سنگچین، رابطه‌ی زیر برای طراحی اندازه پایدار سنگ بر حسب عدد فرود جریان پیشنهاد شد.

$$\frac{d_{50}}{y_2} = 0.559 Fr_2^{2.04} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن  $y_2$  و  $Fr_2$  به ترتیب عمق و عدد فرود جریان بعد از پرش هیدرولیکی می‌باشند.

(2011) Taebi et al. اقدام به مطالعه بر روی تعیین اندازه سنگچین پایدار در پائین‌دست حوضچه آرامش نمودند. ایشان با

زیاد و غیر اقتصادی و یا طرحی با ایمنی بسیار پائین و غیر قابل قبول گردد. در نتیجه در طراحی به روش قطعی، اطلاعاتی در مورد میزان پایداری و ایمنی سازه‌ها در دسترس نیست. بر این اساس مهندسی مدرن امروزی نیازمند به کارگیری روش‌های غیر قطعی و یا احتمالاتی در طراحی است تا اطمینان منطقی از پایداری سازه‌ها حاصل شود. این کار به تدریج در حال انجام است و در مهندسی سازه به سرعت گسترش یافته و آئین‌نامه‌های موجود در طراحی سازه‌ها که بر اساس روش‌های قطعی در طراحی نوشته شده بودند، تغییر یافتند و یا در حال تغییر هستند. از طرفی در علم هیدرولیک با توجه به ماهیت غیر قطعی بسیاری از پدیده‌ها نظیر وقوع بارندگی، سیلاب و باد و یا آشفته‌گی و حرکت رسوبات، به کارگیری این روش‌ها در طراحی بسیار ضروری است. با این وجود تاکنون توجه کمی به این موضوع شده است که یکی از نتایج آن وقوع تخریب‌های گسترده در سازه‌های هیدرولیکی در زمان وقوع سیلاب‌ها است.

روش‌های تحلیل قابلیت اطمینان به عنوان ابزاری مفید در کمی‌سازی عدم قطعیت‌های موجود در طراحی سازه‌ها به عنوان بخش مهمی از روش‌های غیر قطعی و ریسک پایه مطرح می‌باشند. در این روش‌ها که بر پایه علم احتمالات در مهندسی بنیان نهاده شدند یک چارچوب منطقی برای تحلیل پایداری و طراحی سازه با توجه به ریسک شکست قابل قبول وجود دارد. شکست در سازه هیدرولیکی نظیر حوضچه‌های آرامش نتیجه تاثیرات متقابل اتفاقی بودن بار خارجی و عدم قطعیت‌های مختلف در تحلیل، طراحی، ساخت و به کارگیری سازه است. مطالعات نسبتاً محدودی در طراحی سازه‌های هیدرولیکی و به خصوص سازه‌های محافظت از آبشستگی با استفاده از تحلیل قابلیت اطمینان در مراجع موجود است که عمدتاً مربوط به پل‌ها می‌باشند. Johnson and Dock (1998) با به کارگیری تحلیل قابلیت اطمینان و استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو<sup>۱</sup> (MCST) پایداری یک پل واقعی را مورد بررسی قرار دادند. ایشان در تحقیق خود اثر عمق قرارگیری پی و همچنین عمر مفید سازه را بر قابلیت اطمینان پایداری سازه بررسی کردند. در ادامه این تحقیق Muzzammil et al. (2008) اقدام به تحلیل قابلیت اطمینان و ارزیابی ریسک پایه‌های یک پل تخریب شده در کشور نیوزیلند با استفاده از روش تحلیل قابلیت اطمینان مرتبه اول<sup>۲</sup> (FORM) نمودند و نتیجه گرفتند که پایداری پل به شدت کم بوده است. ایشان با انجام تحلیل حساسیت بر روی فراسنجه‌های مختلف موثر بر عمق آبشستگی نتیجه گرفتند که عدد فرود جریان بیشترین

تاثیر را بر روی قابلیت اطمینان پایداری هیدرولیکی پل دارد. Salamatian et al. (2013) نیز یک مدل احتمالاتی برای محاسبه سطح ایمنی پل‌ها ناشی از پدیده آبشستگی ارائه نمودند. در این تحقیق اثر توام پایه و کوله پل در نظر گرفته شد و از روش شبکه بیزین<sup>۳</sup> (BN) برای محاسبه ریسک شکست پل استفاده شد. Karimaei Tabarestani and Zarrati (2019) اقدام به محاسبه اندازه سنگچین پایدار در اطراف پایه یک پل واقعی بر اساس روش MCST نمودند. در این تحقیق اثر عمر مفید سازه و احتمال شکست قابل قبول بر روی اندازه سنگچین پایدار مورد بررسی قرار گرفت. Karimaei Tabarestani et al. (2020a) در روش احتمالاتی خود جهت طراحی سنگچین ضمن لحاظ نمودن مکانیزم‌های مختلف شکست سنگچین شامل شکست برشی، شکست لبه‌ای و شکست زیرشویی از روش درخت خطا<sup>۴</sup> (FT) استفاده نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد که با لحاظ نمودن مکانیزم‌های مختلف شکست سنگچین، شاخص قابلیت اطمینان و احتمال شکست پایه پل تغییر زیادی نسبت به حالت لحاظ نمودن هر یک از مکانیزم‌ها به تنهایی می‌کند. Karimaei Tabarestani et al. (2020b) در مطالعه دیگری اقدام به طراحی لایه محافظ آرمور بر روی موج‌شکن توده‌سنگی بندر نوشهر بر اساس روش تحلیل قابلیت اطمینان MCST نمودند. ایشان اثرات غیر قطعی فراسنجه‌های مختلف نظیر مشخصات طوفان‌های دریایی و نیز اثر عمر مفید سازه را در طراحی لحاظ نمودند. در نهایت Karimaei Tabarestani (2020) اقدام به مطالعه بر روی پایداری سنگچین در اطراف پایه پل موجود در آبراهه اصلی و دشت سیلابی با استفاده از روش FORM و MCST نمود. این محقق اقدام به تحلیل حساسیت فراسنجه‌های موثر در طراحی سنگچین دور پایه پل نمود و نتیجه گرفت که فراسنجه سرعت جریان در آبراهه بیشترین تاثیر را بر تغییر قابلیت اطمینان لایه سنگچین دارد.

بررسی منابع مختلف نشان می‌دهد که تاکنون مطالعه کاربردی و نسبتاً عمیقی بر روی پایداری و احتمال شکست لایه سنگچین در پائین‌دست حوضچه آرامش انجام نشده است. بر این اساس هدف از تحقیق حاضر بررسی پایداری لایه سنگچین طراحی شده بر اساس تحلیل قطعی در پائین‌دست حوضچه آرامش است. جهت کاربردی‌تر شدن نتایج به دست آمده از اطلاعات یک سازه واقعی یعنی پروژه بند انحرافی کن در شهر تهران استفاده می‌شود. همچنین جهت انجام تحلیل‌های حاضر از روش‌های FORM و MCST استفاده می‌شود. در ادامه ضمن

<sup>۳</sup> Bayesian Network

<sup>۴</sup> Fault Tree

<sup>۱</sup> Monte Carlo Simulation Technique

<sup>۲</sup> First Order Reliability Method

باشند، تابع حالت حدی سنگچین را می توان به صورت زیر تعریف نمود:

$$g(X) = d_R - d_S \quad (\text{رابطه ۴})$$

همانگونه که از این رابطه مشخص است شکست لایه سنگچین و در ادامه شکست عملکرد حوضچه آرامش و بند انحرافی زمانی اتفاق می افتد که  $d_S$  بزرگتر یا مساوی  $d_R$  باشد که مقدار تابع  $g(X)$  صفر و یا منفی شود.

در تحقیق حاضر از رابطه ۱ جهت تعیین اندازه سنگچین مورد نیاز  $d_S$  استفاده می شود. اما قبل از استفاده از این رابطه نیاز به برآورد فراسنجه های مختلف موجود در آن وجود دارد تا رابطه نهایی بر اساس فراسنجه های مستقل بدست آید. نکته مهم اینکه هر رابطه طراحی دیگری نیز می تواند جایگزین رابطه ۱ در روش - شناسی حاضر شود. در شکل (۲) فلوجارت محاسبات هیدرولیکی با توجه به کتاب های معمول طراحی سازه های هیدرولیکی نظیر (Novak et al. (2007 جهت برآورد فراسنجه های موثر بر طراحی سنگچین در پائین دست حوضچه آرامش ارائه شده است. در این شکل  $H_e$ : ارتفاع انرژی،  $V_a$ : سرعت در بالادست سرریز،  $V_1$ : سرعت در پایاب سرریز یا قبل از پرش هیدرولیکی (شکل ۱)،  $y_1$ : عمق جریان قبل از پرش هیدرولیکی (شکل ۱)،  $y_2$ : عمق آب بعد از پرش هیدرولیکی و  $V_2$ : سرعت جریان بعد از پرش هیدرولیکی است. می توان روابط موجود در شکل (۲) را جایگزین فراسنجه - های موثر در رابطه ۱ نمود و در نتیجه این رابطه را بر حسب فراسنجه های مستقل به صورت زیر نوشت.

$$g(X) = d_R - \frac{1}{\lambda} \times \left( 2Q \left/ \left( L \times \sqrt{2 \cdot g \cdot \left( P + 0.5 \times \left[ \frac{Q}{(C \times L)} \right]^{2/3} - Q^2 \left/ \left[ L \times \left( P + \left[ \frac{Q}{(C \times L)} \right]^{2/3} \right)^2 \right] / 2g \right) \right) \right) \right) \times \left( \frac{\sqrt{1 + 16 \cdot g \cdot \left( P + 0.5 \times \left[ \frac{Q}{(C \times L)} \right]^{2/3} - Q^2 \left/ \left[ L \times \left( P + \left[ \frac{Q}{(C \times L)} \right]^{2/3} \right)^2 \right] / 2g \right) \right) \right)}{g \cdot y_1 - 1} \times \left( \frac{Q \left/ \left( L \times (y_1/2) \times \left( \sqrt{1 + 16 \cdot g \cdot \left( P + 0.5 \times \left[ \frac{Q}{(C \times L)} \right]^{2/3} - Q^2 \left/ \left[ L \times \left( P + \left[ \frac{Q}{(C \times L)} \right]^{2/3} \right)^2 \right] / 2g \right) \right) \right) \right) \right)}{g \cdot y_1 - 1} \right) \right)^{2.5} \quad (\text{رابطه ۵})$$

قبل از پرش هیدرولیکی که خود نیز بر حسب فراسنجه های اصلی دیگر بدست می آید (شکل ۲) و در نهایت  $\lambda$ : ضریب اصلاح مدل می باشند. با داشتن تابع حالت حدی، مرحله بعدی تحلیل قابلیت اطمینان، برآورد احتمال پایداری سنگچین با اندازه  $d_R$  است. از

برقراری ارتباط بین روش های طراحی قطعی و احتمالاتی با استفاده از تحلیل حساسیت اثر هر یک از فراسنجه های موثر در طراحی مورد مطالعه قرار می گیرد.

## روش شناسی

در تحلیل احتمالاتی بر مبنای قابلیت اطمینان نیاز به ارائه یک معیار عملکرد بخصوص و تعیین یک رابطه ریاضی بین فراسنجه - های موثر بر طراحی سازه به عنوان تابع عملکرد است. بر این اساس سطح شکست یا حالت حدی مطلوب را می توان به صورت مرز بین منطقه ایمن و نایمن در فضای فراسنجه های طراحی تعریف نمود. در مطالعه حاضر، شکست حالت حدی به صورت بزرگتر شدن اندازه پایدار سنگچین لازم با توجه به شرایط بارهای هیدرولیکی ورودی نسبت به اندازه سنگچین طراحی تعریف می - شود. در واقع حالت حدی شکست، معادل مقادیر صفر و منفی برای تابع عملکرد خواهد بود و در شرایط ایمنی مقادیر تابع مثبت می باشد. در نتیجه احتمال شکست تابع حالت حدی مربوط به مسئله طراحی اندازه سنگچین در پائین دست حوضچه آرامش به صورت زیر تعریف می شود:

$$P_f = P[g(X) \leq 0] \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در آن  $P_f$ : احتمال شکست،  $g(X)$ : تابع عملکرد سنگچین و  $X$ : بردار متغیرهای تصادفی پایه مربوط به فراسنجه - های موثر بر طراحی سنگچین است. بر این اساس، در صورتیکه  $d_S$ : اندازه سنگچین مورد نیاز با توجه به بارهای ورودی (تقاضای سیستم) و  $d_R$ : اندازه سنگ موجود طراحی شده (ظرفیت سیستم)

که در آن فراسنجه  $X$  نشان دهنده بردار فراسنجه های تصادفی پایه شامل تمامی فراسنجه های سمت راست رابطه است. بقیه فراسنجه های موثر شامل  $Q$ : دبی جریان،  $L$ : طول سرریز،  $P$ : ارتفاع بالادست سرریز،  $C$ : ضریب تخلیه سرریز،  $y_1$ : عمق جریان

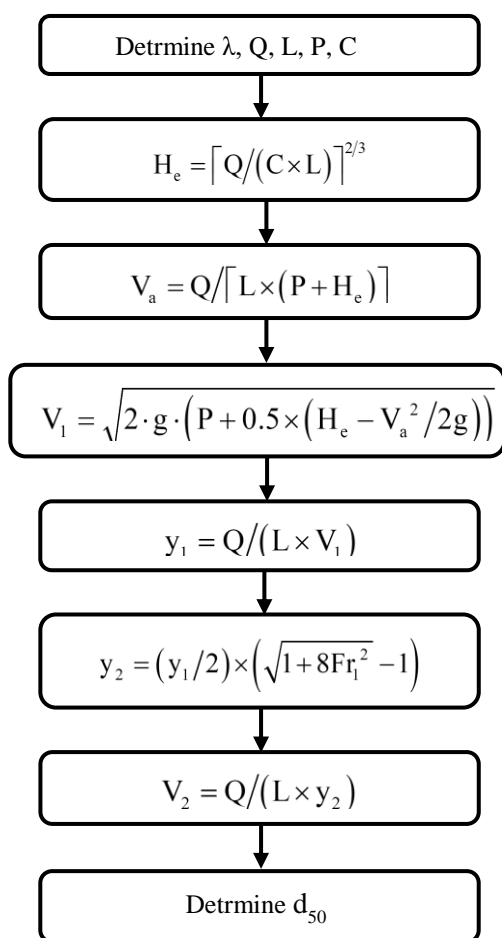
ماتریس کوواریانس، R: ماتریس همبستگی و F: نشان‌دهنده ناحیه شکست است. در شرایطی که فراسنجه‌های موثر همگی مستقل باشند آنگاه ماتریس همبستگی به صورت همانی خواهد شد. در رابطه ۷ باید از فراسنجه‌های نرمال استفاده شود. برای فراسنجه‌های غیر نرمال، مقادیر میانگین و انحراف از معیار نرمال معادل به‌گونه‌ای محاسبه می‌شوند که احتمال تجمعی و چگالی احتمال توزیع نرمال معادل و توزیع غیر نرمال مشابه باشند (Rackwitz and Fiessler, 1976). در این حالت مقدار میانگین نرمال معادل عبارتست از:

$$\mu^N = x - \sigma^N \phi^{-1}[F(x)] \quad (\text{رابطه ۹})$$

و مقدار انحراف از معیار معادل عبارتست از:

$$\sigma^N = f_1 \left[ \phi^{-1}[F(x)] \right] / f(x) \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

که در آن x: فراسنجه غیر نرمال اصلی،  $\phi^{-1}[\cdot]$  تابع چگالی احتمال تجمعی معکوس مربوط به فراسنجه‌های استاندارد نرمال، F(x) تابع CDF غیر نرمال اصلی،  $f_1[\cdot]$  تابع PDF فراسنجه نرمال استاندارد و f(x) تابع PDF غیر نرمال اصلی است.



شکل ۲- فلوجارت طراحی اندازه سنگچین در پائین دست حوضچه آرامش

آنجا که عدم قطعیت فراسنجه‌های تقاضا و ظرفیت سیستم به صورت تابع چگالی احتمال<sup>۵</sup> (PDF) نشان داده می‌شود، بر این اساس احتمال شکست ارائه شده در رابطه ۲ به صورت زیر محاسبه می‌شود: (Halder and Mahadvan, 2000)

$$P_f = \iiint_{g_0 < 0} f_X(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) dx_1 dx_2 dx_3 \dots dx_n \quad (۶)$$

که در آن  $f_X(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$  تابع چگالی احتمال ترکیبی برای بردار فراسنجه تصادفی پایه X است و انتگرال‌گیری روی تمام سطح شکست انجام می‌شود. رابطه ۶ یک معادله عمومی برای حل تمامی مسائل قابلیت اطمینان می‌باشد و به نام معادله اساسی قابلیت اطمینان شناخته می‌شود. در عمل بدست آوردن تابع چگالی احتمال ترکیب فراسنجه‌ها غیرممکن است. همچنین انتگرال‌گیری مورد نظر نیز چندان ساده نخواهد بود. برای رفع این مشکل، از روش‌های تقریبی برای محاسبه احتمال شکست استفاده می‌شود. این روش‌ها به دو نوع کلی روش‌های تحلیلی تقریبی به عنوان نمونه روش FORM و همچنین روش‌های شبیه‌سازی نظیر روش MCST تقسیم می‌شوند. (Halder and Mahadvan, 2000)

در تحقیق حاضر از هر دو روش FORM و MCST استفاده شده است. علت انتخاب این دو روش همپوشانی مزایا و معایب آنها است تا به این ترتیب نتایج در زمان کوتاه‌تر و با دقت بیشتری در دسترس قرار گیرد. مزیت روش FORM سادگی و کوتاهی زمان انجام تحلیل و عیب آن کم بودن دقت به خصوص برای توابع حالت حدی غیرخطی و پیچیده می‌باشد. از طرف دیگر مزیت روش شبیه‌سازی MCST دقت مناسب و عیب آن زمانبر بودن است. در ادامه توصیفی مختصر از این دو روش ارائه می‌شود.

#### روش FORM

در این روش شاخص قابلیت اطمینان یا شاخص  $\beta$  که به صورت حداقل فاصله از مبدا مختصات تا سطح شکست در فضای نرمال استاندارد تعریف می‌شود، از طریق یک مسئله بهینه‌سازی با قید محدودیت برای فراسنجه‌های موثر محاسبه می‌شود. این فراسنجه توصیفی دیگر از احتمال شکست سیستم می‌باشد. فرمول ماتریسی محاسبه شاخص  $\beta$  به صورت زیر خواهد بود: (Nowak and Collins, 2000)

$$\beta = \min_{x \in F} \sqrt{(X - \mu)^T M^{-1} (X - \mu)} \quad (\text{رابطه ۷})$$

یا به عبارت دیگر

$$\beta = \min_{x \in F} \sqrt{\left( \frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i} \right)^T R^{-1} \left( \frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i} \right)} \quad (\text{رابطه ۸})$$

که در آن  $x_i$ : فراسنجه احتمالاتی i-ام از بردار فراسنجه تصادفی X با میانگین  $\mu_i$  و انحراف از معیار  $\sigma_i$  است. همچنین M:

در نهایت پس از محاسبه شاخص  $\beta$ ، اقدام به محاسبه احتمال شکست می‌گردد. در این حالت احتمال شکست یا احتمال فراگذشت از حالت حدی  $P_f$  با توجه به توزیع نرمال استاندارد به صورت زیر محاسبه می‌شود:

در نهایت پس از محاسبه شاخص  $\beta$ ، اقدام به محاسبه احتمال شکست می‌گردد. در این حالت احتمال شکست یا احتمال فراگذشت از حالت حدی  $P_f$  با توجه به توزیع نرمال استاندارد به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

که در آن  $\Phi()$ : تابع تجمعی توزیع نرمال استاندارد است.

### روش MCST

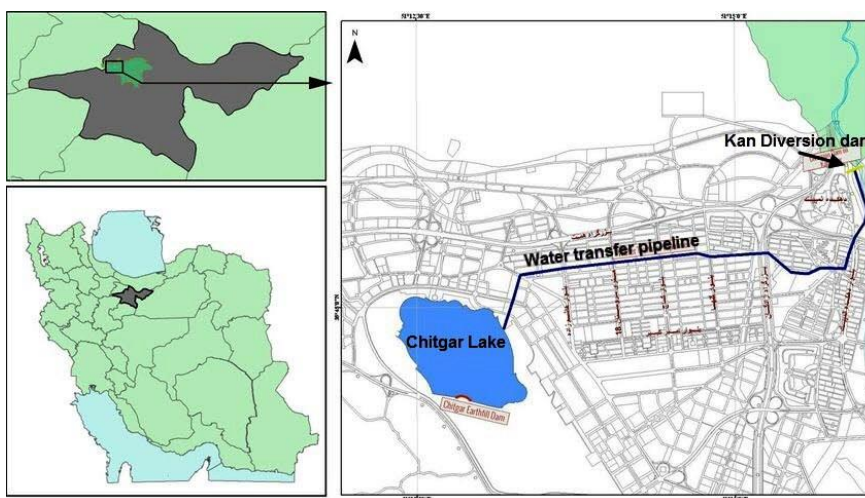
این روش به صورت برآورد نمونه‌های مختلفی از فراسنجه‌های تصادفی پایه با توجه به ویژگی‌های احتمالاتی هر یک و قرار دادن این نمونه‌ها در تابع عملکرد انجام می‌گیرد. همان‌گونه که پیشتر بیان شد شکست هنگامی رخ می‌دهد که  $g(X) < 0$  (رابطه ۵) باشد، در نتیجه یک برآورد از احتمال شکست  $P_f$  می‌تواند به صورت زیر تعریف شود:

$$P_f = \frac{N_f}{N} \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

که در آن  $N_f$ : شمار چرخه‌های شبیه‌سازی است که  $g(X) < 0$  و  $N$ : شمار کل چرخه‌های شبیه‌سازی است. اگر  $N$  به سمت بی‌نهایت میل کند،  $P_f$  به سمت احتمال شکست واقعی میل خواهد کرد. دقت رابطه ۱۲ را می‌توان با توجه ضریب تغییرات  $P_f$  تعیین نمود به‌گونه‌ای که هر چه ضریب تغییرات (CV) که به صورت نسبت انحراف از معیار به میانگین تعریف می‌شود، کوچکتر باشد، دقت احتمال شکست تخمینی بیشتر است. طبق پیشنهاد

### مطالعه موردی - بند انحرافی کن

بند انحرافی کن در شمال غرب شهر تهران، بر روی رودخانه فصلی کن و در مرز مناطق ۵ و ۲۲ شهرداری تهران واقع شده است. این بند در مختصات UTM تقریبی ۵۲۳۹۶۰ تا ۵۲۴۰۲۰ طول شرقی و ۳۹۵۷۸۸۰ تا ۳۹۵۷۹۳۰ عرض شمالی واقع شده است. این سازه با هدف تغییر مسیر و انتقال آب رودخانه کن به سمت دریاچه ۱۴۰ هکتاری چیتگر احداث شده است. شکل (۳) موقعیت بند انحرافی و کانال انتقال ۶ کیلومتری آن را نسبت به دریاچه چیتگر در نقشه طرح تفصیلی منطقه ۲۲ شهر تهران نشان می‌دهد. دوره بازگشت سیلاب طراحی برای سیستم تخلیه سیلاب به شرط باز بودن دریاچه‌های تخلیه رسوب (که حوضچه آرامش مجزا دارند) برابر با ۱۰۰ سال در نظر گرفته شد. همچنین نیاز سیستم انتقال آب پایین دست ۰/۷ تا ۱ متر مکعب بر ثانیه در گزارش برنامه‌ریزی منابع آب اعلام شده است. لیکن به جهت استفاده از حداکثر ظرفیت طراحی سیستم انتقال آب، دبی طراحی سیستم آبرگیر بند انحرافی برابر با ۱/۲ مترمکعب بر ثانیه در نظر گرفته شده است (TTECO, 2011).



شکل ۳- موقعیت مطالعه موردی شامل بند انحرافی کن و دریاچه چیتگر

اطلاعات دریافتی از مهندسان مشاور طرح نشان می‌دهد که مقطع سرریز از نوع اوجی و حوضچه آرامش از نوع USBR I است. رقوم کف حوضچه آرامش معادل ۱۳۳۷ متر از سطح دریا و رقوم دیوارهای جناحین آن معادل ۱۳۴۱/۴۰ متر از سطح دریا (ارتفاع دیوارها معادل ۴/۴۰ متر) برآورد شده است. طول حوضچه آرامش

طراحی بند انحرافی کن شامل بخش‌های مختلفی است که طراحی سرریز، حوضچه آرامش و لایه محافظت از بستر در پائین-دست به عنوان بخش‌های مهم پروژه محسوب می‌شوند. در واقع در پائین دست سرریز جهت تشکیل پرش هیدرولیکی و ورود جریان ملایم به رودخانه از حوضچه آرامش بهره گرفته شده است.

نیاز به تحلیل فراوانی بر روی سیلاب‌های اندازه‌گیری شده در نزدیکی سازه است. ایستگاه آبسنجی سولقان در فاصله کمی در بالادست سازه قرار دارد. به این ترتیب با استفاده از حداکثر دبی سیلاب اندازه‌گیری شده در این ایستگاه، اقدام به تعیین دبی سیلاب طراحی با دوره بازگشت‌های مختلف با استفاده از نرم‌افزار Easyfit گردید. علت استفاده از این نرم‌افزار پشتیبانی از توزیع‌های احتمالاتی متنوع و زیاد در این نرم‌افزار است که لازمه تحلیل احتمالاتی می‌باشد. نکته مهم اینکه برای سازه‌های رودخانه‌ای نظیر بند انحرافی معمولاً دوره بازگشت سیلاب کمتر از ۲۰۰ سال در نظر گرفته می‌شود (Iran Code No. 316, 2005). بر این اساس در جدول (۱) نتایج تحلیل فراوانی سیلاب با توجه به دوره بازگشت‌های مختلف از ۲۵ تا ۵۰۰ سال ارائه شده است. در این جدول نتایج ۲۰ توزیع مختلف که بهترین برازش را به داده‌های سیلاب داشتند نشان داده شد. همچنین نتیجه آزمون نیکویی برازش کلموگروف-اسمیرنوف<sup>۱</sup> نیز برای توزیع‌های مختلف نشان داده شده است. با توجه به این نتایج، بهترین برازش به داده‌ها مربوط به توزیع GenExtreme می‌باشد. در ادامه با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان خصوصیات احتمالاتی سیلاب‌های مختلف شامل میانگین و انحراف از معیار را بدست آورد که در جدول (۲) ارائه شده است.

نیز برابر با ۱۴/۶ متر است. همچنین با توجه به بارگذاری هیدرولیکی در محل سازه، اندازه سنگچین در پایین‌دست حوضچه آرامش نیز برابر با ۰/۳ متر برآورد شد (TTECO, 2011). در تحقیق حاضر پس از برآورد فراسنجه‌های هیدرولیکی در محل بند انحرافی کن اقدام به مطالعه پایداری لایه حفاظتی سنگچین موجود در پائین‌دست حوضچه آرامش می‌گردد. بر این اساس از رابطه ۴ به عنوان تابع حالت حدی استفاده می‌شود. در نتیجه نیاز است تا محدوده تغییرات فراسنجه‌ها مشخص گردد که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

### تعیین فراسنجه‌های موثر بر احتمال شکست سنگچین مستقر در پائین‌دست حوضچه آرامش

#### الف- اندازه سنگچین موجود در

این مقدار با توجه به نیازهای طراحی و موارد مطرح شده توسط کارفرما، از طریق مهندسان مشاور طرح می‌شود. در پروژه بند انحرافی کن مقدار این فراسنجه برابر با ۰/۳ متر در نظر گرفته شد. ولی از آنجا که معمولاً مشکلات اجرایی وجود دارد، در تحقیق حاضر یک توزیع نرمال برای این فراسنجه با مقدار میانگین ۰/۳ و ضریب تغییرات ناچیز ۵٪ در نظر گرفته شد.

#### ب- دبی جریان Q

جهت تعیین دبی جریان طراحی در محل بند انحرافی کن

جدول ۱- نتیجه آزمون نیکویی برازش بر روی سیلاب‌های با دوره بازگشت مختلف

شماره	توزیع	دوره بازگشت سیلاب (سال)						
		۲۵	۵۰	۷۵	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۵۰۰
۱	GenExtreme	۱۰۴/۷	۱۲۱/۸	۱۳۱/۹	۱۳۹/۲	۱۴۹/۵	۱۵۶/۸	۱۸۰/۷
۲	GumbelMax	۱۰۲/۶	۱۱۸/۱	۱۲۷/۱	۱۳۳/۵	۱۴۲/۴	۱۴۸/۸	۱۶۹/۱
۳	Wakeby	۱۰۲/۳	۱۱۹/۵	۱۳۰/۱	۱۳۸/۱	۱۴۹/۷	۱۵۸/۲	۱۸۷/۸
۴	JohnsonSB	۱۰۳/۷	۱۱۸/۷	۱۲۷/۳	۱۳۳/۲	۱۴۱/۴	۱۴۷/۱	۱۶۴/۸
۵	Burr	۱۰۲/۱	۱۱۷/۱	۱۲۵/۹	۱۳۲/۱	۱۴۱	۱۴۷/۴	۱۶۸/۱
۶	Dagum	۱۰۴	۱۲۴/۴	۱۳۷/۹	۱۴۸/۲	۱۶۳/۹	۱۷۶	۲۲۰/۶
۷	GenLogistic	۱۰۳/۹	۱۲۴/۳	۱۰۹/۱	۱۴۷/۴	۱۶۲/۳	۱۷۳/۶	۲۱۳/۸
۸	Gamma	۱۰۴/۲	۱۱۹/۸	۱۲۸/۷	۱۳۴/۹	۱۴۳/۶	۱۴۹/۸	۱۶۹
۹	Pearson6	۱۰۴/۱	۱۱۹/۶	۱۲۸/۵	۱۳۴/۸	۱۴۳/۵	۱۴۹/۶	۱۶۸/۸
۱۰	Weibull	۹۶/۱	۱۰۷/۸	۱۱۴/۳	۱۱۸/۷	۱۲۴/۸	۱۲۸/۹	۱۴۱/۷
۱۱	Frechet	۱۰۵/۴	۱۲۴/۴	۱۳۵/۹	۱۴۴/۳	۱۵۶/۴	۱۶۵/۲	۱۹۴/۷
۱۲	Pearson6 (4P)	۱۰۴	۱۲۲/۳	۱۳۳/۳	۱۴۱/۴	۱۵۳	۱۶۱/۵	۱۸۹/۸
۱۳	Lognormal (3P)	۱۰۸/۱	۱۲۷/۸	۱۳۹/۷	۱۴۸/۳	۱۶۰/۷	۱۶۹/۷	۱۹۹/۵
۱۴	LogPearson3	۱۰۹	۱۲۶/۵	۱۳۶/۴	۱۴۳/۴	۱۵۳/۱	۱۵۹/۹	۱۸۱/۱
۱۵	LogLogistic	۱۲۰/۳	۱۵۳/۱	۱۷۵/۸	۱۹۳/۷	۲۲۱/۹	۲۴۴/۳	۳۰۳/۸
۱۶	InvGaussian	۱۰۷/۶	۱۲۵/۹	۱۳۶/۷	۱۴۴/۴	۱۵۵/۲	۱۶۲/۹	۱۸۷/۶
۱۷	FatigueLife	۱۰۸/۲	۱۲۶/۶	۱۳۷/۴	۱۴۴/۹	۱۵۵/۷	۱۶۳/۳	۱۸۷/۶
۱۸	Rayleigh	۹۶	۱۰۶/۱	۱۱/۶	۱۱۵/۳	۱۲۰/۴	۱۲۳/۹	۱۳۴/۴
۱۹	Gamma (3P)	۱۱۰/۶	۱۲۹/۲	۱۳۹/۹	۱۴۷/۴	۱۵۸	۱۶۵/۵	۱۸۹/۱
۲۰	Pert	۹۰/۳	۹۸/۱	۱۰۲/۱	۱۰۴/۶	۱۰۷/۹	۱۱۰/۱	۱۱۵/۹

<sup>۱</sup> Kolmogorov-Smirnov Goodness of Fit Test



**ج- فراسنجه‌های مربوط به هندسه سرریز شامل P و L**

به علت مشکلات اجرایی، تغییر در مقدار فراسنجه‌های P و L نسبت به مقادیر طراحی می‌تواند اتفاق افتد ولی قاعدتا این تغییر زیاد نخواهد بود بر این اساس در تحقیق حاضر مقدار طراحی این فراسنجه‌ها، به عنوان مقدار میانگین یک توزیع نرمال در نظر گرفته شد. برای اعمال اثرات تغییر ناچیز فراسنجه‌ها حول مقدار میانگین، یک مقدار کوچک برای ضریب تغییرات فراسنجه برابر با ۰.۵٪ تعیین شد.

**د- ضریب دبی (C)**

این فراسنجه با توجه به نیازهای طراحی عددی مابین ۱/۷ تا ۲/۲۵ در نظر گرفته می‌شود. کمترین عدد مربوط به سرریزهای لبه‌به‌ن می‌باشد که در بیشتر موارد بعلت پر شدن مخزن بند انحراف از رسوبات مقدار  $C=1.7$  منظور می‌گردد. در تحقیق حاضر برای این فراسنجه یک توزیع نرمال با مقدار میانگین ۱/۷ و ضریب تغییرات ۰.۵٪ در نظر گرفته شد. می‌توان از مقادیر و توزیع‌های دیگر در طرح‌های مشابه استفاده کرد.

**ه- عدد بی بعد شیلدز (θ)**

این فراسنجه در محل طرح سنگچین با توجه به خصوصیات بستر بدست می‌آید. با توجه به اینکه بستر در محل اجرای سنگچین و حوضچه آرامش بدون حمل رسوب است، (Pilarczyk (1990 مقدار این فراسنجه را برابر با  $\theta=0.03$  در نظر گرفت. در تحقیق حاضر مقدار این فراسنجه به صورت معین (قطعی) در نظر گرفته شد.

**و- ضریب آشفتگی جریان (Ti)**

طبق پیشنهاد (Pilarczyk (1990 مقدار این فراسنجه با توجه به شرایط جریان بعد از حوضچه آرامش که آشفتگی بسیار زیادی دارد در محدوده بین ۵ و ۶ تعریف می‌شود. بر این اساس در تحقیق حاضر یک توزیع یکنواخت در این محدوده برای این فراسنجه مابین ۵ و ۶ در نظر گرفته شد.

**ز- چگالی نسبی دانه‌های سنگچین (s)**

مقدار این فراسنجه با توجه به جنس سنگ بکار گرفته شده در ساخت سنگچین منظور می‌گردد. این موضوع که آیا سنگ مورد نیاز از یک معدن و یا از چند معدن مختلف انتخاب شود بر روی مقدار فراسنجه s موثر است. با توجه به مقدار این فراسنجه در غالب کارهای اجرایی، در تحقیق حاضر یک توزیع یکنواخت در محدوده مابین ۲/۵ تا ۳ برای آن در نظر گرفته شد.

**ق- ضریب اصلاح مدل (λ)**

این فراسنجه با توجه به نوع و دقت رابطه بکار رفته برای طراحی سنگچین در نظر گرفته می‌شود. این ضریب دقت رابطه ۱ را در برآورد اندازه سنگچین در شرایط واقعی بیان می‌کند. در این تحقیق مشابه با مطالعه (Johnson and Dock (1998 یک توزیع مثلثی با حد بالایی ۱ و حد پایینی ۰/۸ و مقدار میانگین ۰/۹۵ برای این فراسنجه فرض شد. برای برآورد دقیق‌تر این فراسنجه نیاز به انجام تحقیقات آزمایشگاهی و میدانی است. در نهایت در جدول (۲) محدوده تغییرات فراسنجه‌های موثر بر تحلیل قابلیت اطمینان سنگچین در پائین دست حوضچه آرامش بند انحرافی کن نشان داده شده است.

جدول ۲- محدوده تغییرات فراسنجه‌های موثر در طراحی سنگچین پائین دست حوضچه آرامش

پارامتر	توزیع	میانگین	انحراف معیار	حد بالا	حد پایین
$d_R$ (m)	Normal	۰/۳	۰/۰۱۵	-	-
Q (m <sup>3</sup> /s)	سیلاب ۲۵ ساله	۱۰۴/۳۷	۶/۰۸۷	-	-
	سیلاب ۵۰ ساله	۱۲۱/۵۷	۱۰/۷۹۲	-	-
	سیلاب ۷۵ ساله	۱۳۰/۴۹	۱۵/۱۸۴	-	-
	سیلاب ۱۰۰ ساله	۱۳۹/۴۱	۱۷/۳۵۶	-	-
	سیلاب ۱۵۰ ساله	۱۵۰/۲۴	۲۲/۲۴۱	-	-
	سیلاب ۲۰۰ ساله	۱۵۸/۴	۲۶/۲۴۷	-	-
سیلاب ۵۰۰ ساله	۱۸۴/۸	۴۲/۵۶۵	-	-	
L (m)	Normal	۲۶	۱/۳	-	-
P (m)	Normal	۲/۴۱	۰/۱۲۱	-	-
C	Normal	۱/۷	۰/۰۸۵	-	-
θ	Deterministic	۰/۰۳	-	-	-
Ti	Uniform	۵/۵	۰/۳	۵	۶
s	Uniform	۲/۷۵	۰/۱۴	۲/۵	۳
λ	Triangular	۰/۹۵	۰/۰۳	۱	۰/۸

## نتایج و بحث

### تعیین احتمال شکست سنگچین در شرایط موجود

در این بخش با استفاده از داده‌های ارائه شده در جدول (۲) اقدام به ارائه نتایج حاصل از محاسبه شاخص قابلیت اطمینان  $\beta$  و احتمال شکست  $P_f$  لایه سنگچین در پائین دست حوضچه آرامش بند انحرافی کن با استفاده از روش‌های FORM و MCST گردید. برای انجام این کار از قابلیت برنامه‌نویسی در نرم‌افزارهای اکسل و متلب استفاده شد. در جدول (۳) نتایج حاصل از روش‌های FORM و MCST برای سیلاب‌های با دوره بازگشت مختلف ارائه شده است. در این جدول، جهت تعیین تعداد چرخه شبیه‌سازی در روش MCST به گونه‌ای عمل شد که شرایط  $COV(P_f) = 0.05$  برآورد شود و به این ترتیب حداقل تعداد چرخه شبیه‌سازی بیش از ۱۰۰۰۰۰۰ چرخه محاسبه شد که بسیار زمانبر بود. همانگونه که قبلاً بیان شد در صورتیکه تعداد چرخه‌های شبیه‌سازی در روش MCST کافی باشد این روش نتایج دقیق را بدست می‌دهد و می‌توان از آن برای بررسی دقت روش‌های دیگر استفاده نمود در حالیکه روش FORM یک روش تقریبی است که از تقریب مرتبه اول بسط تیلور استفاده می‌کند. از طرفی روش FORM یک روش سریع است و حجم محاسبات به مراتب کمتری نسبت به روش MCST دارد. همانگونه که در جدول (۳) مشخص است نتایج حاصل از روش FORM بسیار نزدیک به نتایج حاصل از روش MCST می‌باشد که این موضوع درستی نتایج تحلیل FORM را نشان می‌دهد. در نتیجه می‌توان از این روش برای تحلیل پایداری لایه سنگچین در پائین دست حوضچه آرامش با دقت مناسبی استفاده نمود.

نتایج ارائه شده در جدول (۳) نشان می‌دهد که با افزایش دوره بازگشت سیلاب طراحی و یا بزرگتر شدن دبی سیلاب، شاخص قابلیت اطمینان کاهش می‌یابد به گونه‌ای که با افزایش دوره بازگشت از ۲۵ سال به ۵۰۰ سال (افزایش ۷۷ درصدی دبی جریان)، شاخص  $\beta$  بیش از ۵ برابر کاهش می‌یابد. از آنجا که طبق نظر کمیته ایمنی سازه<sup>۱</sup> شاخص قابلیت اطمینان هدف یا مورد قبول در اعضای سازه‌ای باید نزدیک به ۳ باشد، نتایج جدول (۳) نشان می‌دهد که اندازه سنگچین طراحی برای سیلاب‌های کمتر از ۱۰۰ سال پایداری مناسبی دارد و برای سیلاب‌های با دوره بازگشت بیشتر نیاز است تمهیدات ویژه‌ای در نظر گرفته شود. به عنوان نمونه بعد از عبور سیلاب بازبینی و بازسازی احتمالی لایه سنگچین نیاز خواهد بود. همچنین بهینه‌ترین حالت پایداری را

می‌توان تا حدودی مربوط به سیلاب ۱۰۰ ساله دانست. بر این اساس از داده‌های این سیلاب جهت تحلیل‌های بعدی استفاده می‌شود.

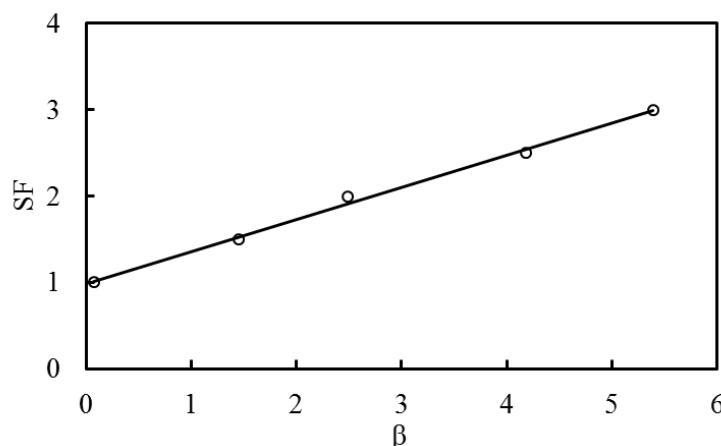
جدول ۳- نتایج تحلیل قابلیت اطمینان لایه سنگچین پائین دست حوضچه آرامش کن

دوره بازگشت سیلاب (سال)	$P_f$		$\beta$	
	FORM	MCST	FORM	MCST
۲۵	$5/93 \times 10^{-1}$	$5/27 \times 10^{-1}$	۶/۰۸۲	۶/۱۰۱
۵۰	$1/1 \times 10^{-5}$	$0/99 \times 10^{-5}$	۴/۳۴۳	۴/۱۴۸
۷۵	$0/00036$	$0/00036$	۳/۳۸	۳/۳۸۲
۱۰۰	$0/0019$	$0/0016$	۲/۸۸۵	۲/۹۵
۱۵۰	$0/01$	$0/008$	۲/۳۹۷	۲/۴۲۵
۲۰۰	$0/02$	$0/019$	۱/۹۵۱	۲/۰۸۴
۵۰۰	$0/131$	$0/117$	۱/۱۲	۱/۱۹

### رابطه بین شاخص قابلیت اطمینان و ضریب ایمنی طراحی

استفاده از ضریب‌های ایمنی یک روش معمول در طراحی سازه‌ها به روش قطعی است. در واقع بعد از طراحی یک سازه بر اساس برآورد مقادیر بارهای وارد بر آن، با به کارگیری ضرایب ایمنی سعی در پوشش عدم قطعیت‌ها در طراحی و غیر دقیق بودن بارهای برآورد شده می‌شود. عموماً این ضریب‌ها با توجه به قضاوت مهندسی و تجربیات و یا ضوابط مطرح شده در آئین‌نامه‌ها انتخاب می‌گردند. از آنجا که تحلیل قابلیت اطمینان یک چارچوب علمی و مهندسی برای کمی نمودن عدم قطعیت‌ها فراهم می‌کند، می‌توان از این طریق اقدام به تعیین ضریب ایمنی مناسب نمود. بر این اساس در این بخش اقدام به محاسبه ضریب ایمنی طراحی سنگچین بر اساس شاخص قابلیت اطمینان می‌گردد. عموماً در یک طراحی قطعی ضمن در نظر گرفتن یک دوره بازگشت مشخص، از متوسط مقادیر بارهای برآورد شده با روش‌های مختلف استفاده می‌شود. در اینجا فرض می‌شود دوره بازگشت سیلاب طراحی ۱۰۰ ساله باشد که مقداری معمول برای سازه‌های رودخانه‌ای به غیر از پل‌ها محسوب می‌شود. در نتیجه با استفاده از مقادیر متوسط ارائه شده در جدول (۲) برای فراسنجه‌های موثر در طراحی سنگچین، مقدار سنگچین طراحی در شرایط ضریب ایمنی  $SF=1$  برابر با  $d_r=0.149$  m بدست می‌آید. با در نظر گرفتن یک ضریب تغییرات کم  $CV=0.05$ ، و انجام تحلیل قابلیت اطمینان با توجه به داده‌های جدول (۱) شاخص قابلیت اطمینان متناظر با این مقدار برابر با  $\beta=0.08$  و فراسنجه احتمال شکست  $P_f = 0.47$  خواهد بود که بسیار ناایمن است. در ادامه با افزایش اندازه سنگچین طراحی ( $d_r$ ) اقدام به انجام تحلیل قابلیت اطمینان مشابه می‌گردد و شاخص  $\beta$  جدید محاسبه می‌گردد.

توجه به مقدار شاخص  $\beta$  و یا فراسنجه  $P_f$  (رابطه ۱۱) در  $\gamma$  رده مختلف شامل خطرناک ( $\beta < 1$ )، غیر قابل قبول ( $\beta = 1.5$ )، ضعیف ( $\beta = 2$ )، کمتر از میانگین ( $\beta = 2.5$ )، بیشتر از میانگین ( $\beta = 3$ )، خوب ( $\beta = 4$ ) و زیاد ( $\beta = 5$ ) تقسیم می‌کند. در نتیجه به جای استفاده از یک ضریب ایمنی ثابت در طراحی سازه، می‌توان اقدام به محاسبه ضریب ایمنی مطلوب با توجه به اهمیت سازه و همچنین لحاظ نمودن اثرات عدم قطعیت در طراحی‌ها نمود. برای مثال رابطه (۱۳) مقدار ضریب ایمنی متناظر با شاخص قابلیت اطمینان هدف  $\beta = 3$  را برابر با  $SF = 2.1$  بدست می‌دهد. این مقدار ضریب ایمنی به دلیل تغییرات فراسنجه‌هایی نظیر  $Q$  نسبت به مقدار میانگین است. با بررسی آئین‌نامه‌های مربوط به سازه‌های هیدرولیکی و رودخانه‌ای نظیر HEC No.14 (2006) مشخص می‌شود که تاکنون به این بحث در مهندسی هیدرولیک به طور جدی پرداخته نشده است و این موضوع به عنوان یک نیاز مهم در مهندسی هیدرولیک مطرح است.



شکل ۴- تغییرات ضریب ایمنی در طراحی قطعی نسبت به شاخص قابلیت اطمینان

$$\alpha_{X_i} = \frac{\left( \frac{\partial g}{\partial X_i} \right) \sigma_{X_i}^N}{\left[ \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial g}{\partial X_i} \right)^2 \sigma_{X_i}^N \right]^{1/2}} \quad (\text{رابطه } 14)$$

که در آن  $\sigma_{X_i}^N$ : انحراف از معیار فراسنجه نرمال معادل می‌باشد که در رابطه ۱۰ اشاره شد. در این رابطه لازم است مقادیر فراسنجه‌ها در نقطه طراحی که کمترین فاصله را از تابع هدف تا مبدا مختصات در فضای نرمال استاندارد داراست، قرار داده شود. در روش FORM برای محاسبه شاخص  $\beta$  این نقطه تعیین شده و ضرایب حساسیت  $\alpha_{X_i}$  مستقیماً بدست می‌آید. در نتیجه نیاز به انجام تحلیل جداگانه برای محاسبه این ضریب‌ها نیست. خصوصیات این ضریب حساسیت بدین گونه است که (۱) هر چه مقدار  $\alpha_{X_i}$  کوچکتر باشد، تاثیر فراسنجه بر قابلیت اطمینان

مقدار ضریب ایمنی نیز برابر با نسبت اندازه سنگچین طراحی جدید به اندازه سنگچین متناظر با مقادیر متوسط فراسنجه‌های موثر خواهد بود. در شکل (۴) نتایج تحلیل نشان داده شده است. با توجه به این شکل با افزایش اندازه سنگچین طراحی یا ضریب ایمنی SF، مقدار شاخص  $\beta$  نیز افزایش می‌یابد. همچنین در شکل (۴) خط برازش داده شده به نقاط محاسباتی نشان داده شده است. معادله این خط که ارتباط مابین فراسنجه‌های SF و  $\beta$  را نشان می‌دهد، به صورت زیر است:

$$SF = 0.37\beta + 0.99 \quad (\text{رابطه } 13)$$

این رابطه به لحاظ طراحی ایمن بسیار با اهمیت بوده و نشان می‌دهد که مقدار ضریب ایمنی با توجه به شاخص قابلیت اطمینان طراحی چقدر انتخاب شود. آئین‌نامه‌های مختلف طراحی سازه‌ها ضمن لحاظ نمودن اثرات غیر قطعی در طراحی، حداقل ضوابط مورد نیاز جهت طراحی قطعی سازه را ارائه می‌نمایند. به عنوان نمونه آئین‌نامه USACE (1997) پایداری یک سازه را با

#### تحلیل حساسیت فراسنجه‌های موثر بر قابلیت اطمینان لایه سنگچین

تعیین میزان نقش و اثرگذاری فراسنجه‌های مختلف موثر بر قابلیت اطمینان و یا احتمال شکست یک سیستم از نکات دیگری است که در مطالعات غیر قطعی (احتمالاتی) بسیار حائز اهمیت است. به این ترتیب یک طراح می‌تواند با توجه به نقش هر فراسنجه، کنترل بیشتر و دقیق‌تری را بر روی اندازه‌گیری و یا تخمین آن‌ها درخواست کند. روش‌های مختلفی برای تحلیل حساسیت فراسنجه‌های موثر در مطالعه قابلیت اطمینان وجود دارد. یکی از فراسنجه‌هایی که جهت انجام این موضوع به صورت کیفی به کار می‌رود، ضریب حساسیت  $\alpha_{X_i}$  که در آن اندیس  $X_i$  مربوط به فراسنجه تصادفی  $i$ -ام است و به صورت زیر تعریف می‌شود: (Nowak and Collins, 2000)

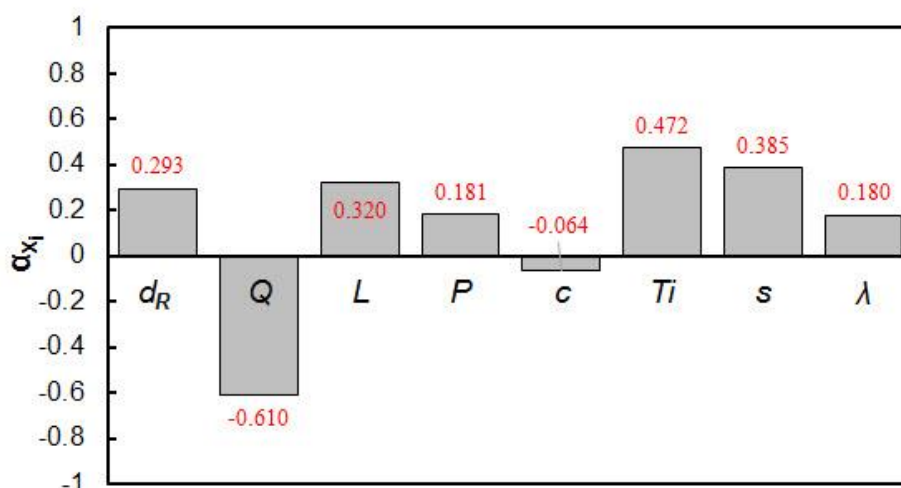
### الف- بررسی تاثیر میانگین فراسنجه‌های موثر

در این قسمت با تغییر میانگین فراسنجه‌های موثر بدون تغییر در مقدار ضریب تغییرات آنها، اثر کمی میانگین هر فراسنجه بر شاخص قابلیت اطمینان  $\beta$  مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل (۶) نتایج تحلیل حاضر نشان داده شده است. مشابه با نتایج ارائه شده در شکل (۵)، بررسی شکل (۶) نیز نشان می‌دهد که بر خلاف بقیه فراسنجه‌های موثر با افزایش فراسنجه‌های  $Q$  و  $C$  شاخص  $\beta$  کاهش می‌یابد به گونه‌ای که با افزایش میانگین فراسنجه  $Q$  از ۵۰ تا ۲۵۰ (۵ برابر افزایش)، شاخص  $\beta$  به میزان تقریباً ۹۸ درصد کاهش می‌یابد که این میزان کاهش بیشترین مقدار در بین بقیه فراسنجه‌های موثر است. در مورد فراسنجه  $C$  لازم است اشاره شود که تغییرات میانگین این فراسنجه در محدوده مجاز  $1/7$  تا  $2/2$  در نظر گرفته شد و نتایج نشان داد که با افزایش میانگین این فراسنجه از  $1/7$  تا  $2/2$  (۳۰ درصد افزایش)، مقدار شاخص  $\beta$  به میزان تقریباً ۱۰ درصد کاهش می‌یابد. بررسی بقیه فراسنجه‌هایی که افزایش آنها تاثیر مثبت بر روی افزایش قابلیت اطمینان (شاخص  $\beta$ ) لایه سنگچین دارد نشان می‌دهد که بیشترین و کمترین مقدار تاثیر مربوط به فراسنجه‌های  $s$  و  $P$  می‌باشد. بر اساس نتایج بدست آمده، با افزایش میانگین فراسنجه  $s$  از ۲ تا ۳ در محدوده مجاز (۵۰ درصد افزایش)، شاخص  $\beta$  به میزان تقریباً ۶۷ برابر افزایش می‌یابد. در حالیکه با افزایش مقدار میانگین فراسنجه  $P$  از  $1/5$  تا ۵ (به میزان  $3/3$  برابر)، شاخص  $\beta$  به میزان تقریباً ۴ برابر افزایش می‌یابد. در نهایت برای دو فراسنجه باقیمانده باید گفت که با افزایش میانگین فراسنجه  $Ti$  در محدوده اشاره شده در رابطه ۵ به میزان ۲ برابر (افزایش از ۴ تا ۸)، شاخص  $\beta$  به میزان تقریباً ۲۷ برابر افزایش می‌یابد و با افزایش میانگین فراسنجه  $L$  از ۱۸ تا ۳۵ (حدوداً ۲ برابر افزایش)، شاخص  $\beta$  به میزان تقریباً  $4/7$  برابر افزایش می‌یابد.

سیستم کمتر است. (۲) مقدار مثبت فراسنجه  $\alpha_{x_i}$  مربوط فراسنجه‌های مقاومت و مقدار منفی آن مربوط به فراسنجه‌های بار می‌باشند. فراسنجه‌های مقاومت شامل متغیرهایی هستند که افزایش آنها موجب بهبود قابلیت اطمینان سیستم می‌شوند و بلعکس این تعریف برای فراسنجه‌های بار صادق است. (۳) مجموع توان دوم ضرایب حساسیت فراسنجه‌های تصادفی برابر با یک است. (Muzzammil et al., 2008)

در تحقیق حاضر با استفاده از داده‌های ارائه شده در جدول (۲) به همراه دوره بازگشت سیلاب طراحی ۱۰۰ ساله، اقدام به محاسبه ضرایب حساسیت  $\alpha_{x_i}$  گردید. نتایج بدست آمده در شکل (۵) نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل مشخص است فراسنجه دبی جریان  $Q$  بیشترین تاثیر را بر روی قابلیت اطمینان پایداری سنگچین دارد و بعد از آن فراسنجه‌های شدت آشفتنگی  $Ti$ ، چگالی نسبی سنگ  $s$  و طول سرریز  $L$  قرار دارند. در نتیجه تخمین دقیق‌تر این فراسنجه‌ها به خصوص  $Q$  و کاهش ضریب تغییرات آنها می‌تواند کمک زیادی به افزایش قابلیت اطمینان پایداری سنگچین کند. همچنین مقادیر ضریب حساسیت فراسنجه‌های  $Q$  و  $C$  منفی می‌باشند و بقیه مثبت هستند که این موضوع نشان می‌دهد کاهش این فراسنجه‌ها می‌تواند افزایش قابلیت اطمینان پایداری سنگچین در پائین دست حوضچه آرامش را موجب شود. مشابه با مطالعه حاضر، تحقیق کریمایی (۲۰۲۰) نیز بر روی تحلیل حساسیت فراسنجه‌های موثر بر پایداری سنگچین در اطراف پایه پل نیز نشان می‌دهد که دبی جریان (یا سرعت جریان) بیشترین تاثیر را بر روی قابلیت اطمینان پایداری سنگچین دارد.

در ادامه تحلیل حساسیت فراسنجه‌های موثر به صورت کمی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

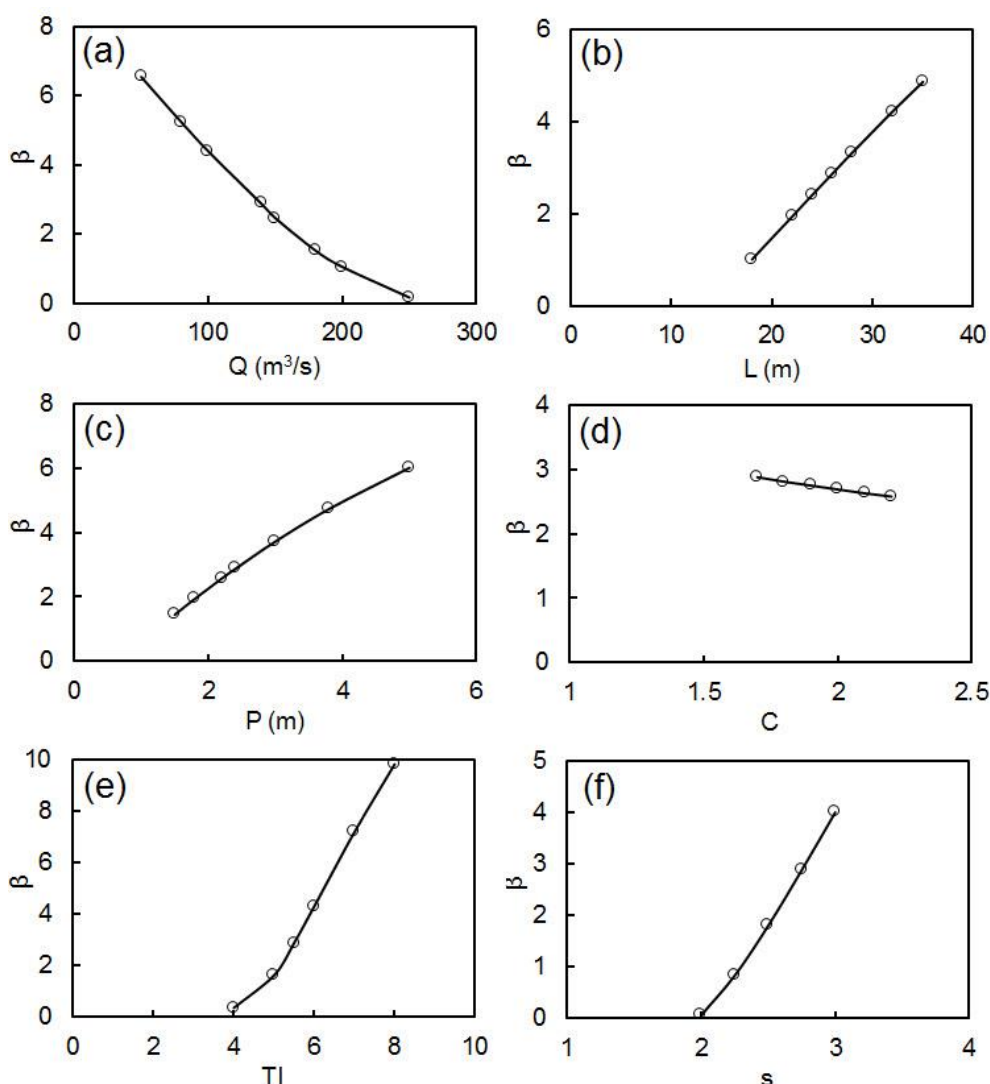


شکل ۵- تحلیل حساسیت فراسنجه‌های موثر بر پایداری سنگچین در پائین دست حوضچه آرامش

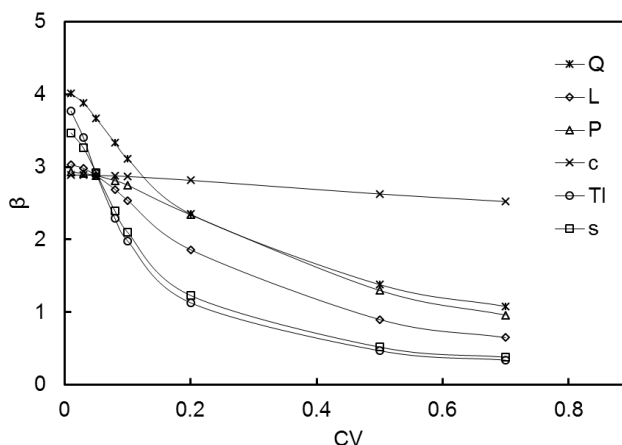
داده می‌شود و مقدار شاخص  $\beta$  متناظر محاسبه می‌شود. نتیجه این تحلیل در شکل (۷) نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل مشخص است محدوده تغییرات CV فراسنجه‌های تصادفی از ۰/۱ تا ۰/۷ تغییر یافت و در هر مرحله مقدار شاخص  $\beta$  محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش CV در تمامی فراسنجه‌ها منجر به کاهش شاخص  $\beta$  می‌شود. با توجه به شکل (۷)، ضریب تغییرات فراسنجه‌های تصادفی  $Q$ ،  $Ti$  و  $s$  نقش بسیار مهمی را در کاهش قابلیت اطمینان لایه سنگچین در پائین دست حوضچه آرامش ایفا می‌کنند به طوری که با افزایش میزان CV از ۰/۱ تا ۰/۷ (افزایش ۷۰ برابری)، شاخص  $\beta$  لایه سنگچین برای این فراسنجه‌ها بیش از ۷۰ درصد کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به شکل (۷)، ضریب تغییرات فراسنجه  $C$  تاثیر کمتری بر کاهش قابلیت اطمینان لایه سنگچین (حدود ۱۲ درصد کاهش) نسبت به بقیه فراسنجه‌ها دارد.

#### ب- بررسی ضریب تغییرات فراسنجه‌های موثر

محدوده تغییرات فراسنجه‌های موثر بر یک سیستم نظیر لایه سنگچین نسبت به مقدار میانگین که با ضریب تغییرات CV مشخص می‌شود، تاثیر زیادی بر قابلیت اطمینان آن دارد. قاعدتا هر چه مقدار CV مربوط به یک فراسنجه موثر بیشتر باشد، اثر پذیری آن بر کاهش قابلیت اطمینان افزایش خواهد یافت. از طرفی مقایسه اثرگذاری فراسنجه‌های مختلف با توجه به تغییر CV بر روی قابلیت اطمینان سیستم در شرایط عدم تغییر مقدار میانگین فراسنجه‌ها بسیار حائز اهمیت است. چرا که طراح می‌تواند با دانستن این موضوع اقدام به کنترل بیشتری بر روی کاهش محدوده تغییرات فراسنجه‌هایی کند که تاثیر بیشتری بر کاهش قابلیت اطمینان دارند. در این قسمت با ثابت نگهداشتن مقدار میانگین فراسنجه‌ها در جدول (۲) به همراه داده‌های مربوط به سیلاب طراحی ۱۰۰ ساله، مقدار ضریب CV هر فراسنجه تغییر



شکل ۶- تحلیل حساسیت میانگین فراسنجه‌های موثر



شکل ۷- تحلیل حساسیت ضریب تغییرات فراسنجه‌های موثر

### نتیجه‌گیری

پدیده آبشستگی موضعی در پائین‌دست حوضچه‌های آرامش بندهای انحرافی می‌تواند منجر به زیرشویی و در نهایت تخریب سازه گردد. بر این اساس استفاده از لایه سنگچین جهت محافظت از بستر بسیار معمول است. در تحقیق حاضر پایداری این لایه سنگچین با استفاده از تحلیل قابلیت اطمینان مورد توجه قرار گرفته است. از دو روش FORM و MCST در تحلیل پایداری استفاده شده است. علت استفاده از این دو روش دریافت نتایج در زمان کوتاه‌تر و با دقت بیشتر است. در ادامه سنگچین به کار رفته در پائین‌دست حوضچه آرامش بند انحرافی کن در غرب شهر تهران به عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. برای تحلیل قابلیت اطمینان اولین قدم برآورد خصوصیات احتمالاتی فراسنجه‌های موثر است که در تحقیق حاضر با انجام تحلیل فراوانی سیلاب و استفاده از ۲۰ نوع توزیع احتمالاتی مختلف اقدام به محاسبه خصوصیات احتمالاتی سیلاب‌های با دوره بازگشت مابین ۲۵ تا ۵۰۰ سال شد. همچنین خصوصیات احتمالاتی فراسنجه‌های دیگر نیز با توجه فرضیات معقول و شرایط جریان تعیین شد.

نتایج تحلیل قابلیت اطمینان در شرایط موجود نشان داد که مقادیر شاخص  $\beta$  و احتمال شکست  $P_f$  در دو روش به کار رفته بسیار نزدیک به هم بوده که این موضوع درستی نتایج تحلیل FORM را نشان می‌دهد. در ادامه نتایج نشان داد که با افزایش دوره بازگشت سیلاب طراحی از ۲۵ سال به ۵۰۰ سال، شاخص  $\beta$  بیش از ۵ برابر کاهش می‌یابد. همچنین نتایج شاخص  $\beta$  برای سیلاب‌های بیش از ۱۰۰ سال کمتر از ۳ بدست آمد که لازم است در این شرایط تمهیدات ویژه‌ای در نظر گرفته شود. در ادامه ارتباط مابین ضریب ایمنی در طراحی قطعی و شاخص قابلیت اطمینان در طراحی غیر قطعی مورد مطالعه قرار گرفت که تحلیل نتایج نشان داد ارتباطی خطی و مستقیم مابین این دو شاخص

وجود دارد. همچنین با انتخاب مقدار ضریب ایمنی متناظر با شاخص  $\beta=3$  برابر با  $SF=2.1$  بدست آمد. در نهایت بررسی میزان نقش و اثرگذاری فراسنجه‌های مختلف موثر بر احتمال شکست سنگچین در غالب تحلیل حساسیت نشان داد که فراسنجه‌های دبی جریان، شدت آشفستگی، چگالی نسبی دانه‌های سنگچین و طول سرریز بیشترین تاثیر را بر روی پایداری سنگچین دارند. در نتیجه تخمین دقیق‌تر این فراسنجه‌ها و کاهش ضریب تغییرات آن‌ها می‌تواند کمک زیادی به افزایش قابلیت اطمینان پایداری سنگچین کند. همچنین کمترین تاثیر را ضریب سرریز دارد. در مرحله بعد تحلیل حساسیت بر روی مقدار میانگین فراسنجه‌های موثر در شرایط ثابت بودن ضریب تغییرات آنها نشان داد که با افزایش میانگین فراسنجه دبی جریان از ۵۰ تا ۲۵۰ (۵ برابر افزایش)، شاخص  $\beta$  به میزان تقریباً ۹۸ درصد کاهش می‌یابد که این میزان کاهش بیشترین مقدار در بین بقیه فراسنجه‌های موثر است. در آخر نیز تحلیل حساسیت بر روی ضریب تغییرات فراسنجه‌های موثر در شرایط ثابت بودن مقدار میانگین آنها نیز نشان داد که افزایش ضریب تغییرات در تمامی فراسنجه‌ها منجر به کاهش شاخص  $\beta$  می‌شود به طوری که کمترین کاهش مربوط به فراسنجه ضریب سرریز است که با افزایش مقدار ضریب تغییرات این فراسنجه از ۰/۱ تا ۰/۷ (افزایش ۷۰ برابری)، شاخص  $\beta$  لایه سنگچین حدود ۱۲ درصد کاهش یافت.

### سپاس‌گزاری

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی انجام گردیده است. به این وسیله نویسنده کمال تشکر خود را از معاونت پژوهشی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی اعلام می‌دارد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

## REFERENCES

- Elnikhely, E. (2017). Investigation and analysis of scour downstream of a spillway. *Ain Shams Engineering Journal*. DOI: 10.1016/j.asej.2017.03.008.
- Farhoudi, J. and Helbar, S. M. (2010). Design of Stable Riprap Downstream of Stilling Basins Using Froude Number. *Journal of Water and Soil Science*. 19(1), 97-106. (In Farsi)
- Halder, A. and Mahadevan, S. (2000). Probability, Reliability and Statistical Methods in Engineering Design. John Wiley & Son, New York.
- Hydraulic Engineering Circular No. 14 (HEC No.14). (2006). *Hydraulic Design of Energy Dissipaters for Culverts and Channels*. Federal Highway Administration. Report No. FHWA-NHI-06-086.
- Iran Ministry of Energy. Report No. 316. (2005). *Guideline for Determination Design flood return period in river works*. Iran Water Resources Management Co.P.18.
- Johnson, P. A. and Dock, D. A. (1998). Probabilistic Bridge Scour Estimates. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(7), 750-754.
- Karimaei Tabarestani, M. and Zarrati, A. R. (2019). Reliability analysis of riprap stability around bridge piers. *Journal of Applied Water Engineering and Research*. 7 (1), 79-88.
- Karimaei Tabarestani, M., Salamatian, A. and Panahi Azad, M. (2020a). Component and system-level reliability analysis of riprap layer around bridge pier in clear water condition. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*. DOI: 10.1080/09715010.2019.1711206.
- Karimaei Tabarestani, M., Feizi, A. and Bali, M. (2020b). *Reliability-based design and sensitivity analysis of rock armors for rubble-mound breakwater*. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 42(3): 1-13.
- Karimaei Tabarestani, M. (2020). Study on stability and sensitivity analysis of protective riprap layer placed around bridge pier by using reliability analysis theory. *Journal of Hydraulics*. 14(4):51-68. (In Farsi)
- Champagne, T., Barlock, R., Ghimire, S., Barkdoll, B., Gonzalez-Castro, J. and Deaton, L. (2017). Scour Reduction by Air Injection Downstream of Stilling Basins: Optimal Configuration Determination by Experimentation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 04016067-1-9.
- Maynard, S. T. (1987). *Stable riprap for open channel flows*. Ph. D dissertation, Department of Civil Engineering, Colorado State University, Ft Collins, CO.
- Muzzammil, M., Siddiqui, N. A. and Siddiqui, A. F. (2008). Reliability considerations in bridge pier scouring. *Journal of Structural Engineering and Mechanics*. 28(1): 1-18.
- Nowak, A. S. and Collins, K. R. (2000). *Reliability of structures*. McGraw Hill, Singapore.
- Novak, P., Moffat, A.I.B., Nalluri, C. and Narayanan, R. (2007). *Hydraulic structures*. 4<sup>th</sup> Edition. Taylor & Francis.
- Oliveto, G. and Comuniello, V. (2008). Local Scour Downstream of Positive-Step Stilling Basins. *Journal of Hydraulic Engineering*. 135(10), 846-851.
- Oliveto, G. (2012). Local scouring downstream of a spillway with an apron. *ICE Water Management*, 166 (WM5) 254-261.
- Pilarczyk, K. W. (1990). Stability criteria for revetments. In: *Proceeding of National Conference on Hydraulics Engineering*, American Society of Civil Engineering (eds.) HH Chang and JC Hill, San Diego, USA. 15-26.
- Rackwitz, R. and Fiessler, B. (1976). Note on Discrete Safety Checking When Using Non-Normal Stochastic Models for Basic Variables. Load Project Working Session. Cambridge, MA: MIT.
- Saber, M. and Ghodsian, M. (2020). Experimental Investigation on Scour Downstream of USBR VI Stilling Basins. *Journal of Hydraulics*, 14 (4): 138-148. (In Farsi)
- Salamatian, S. A., Zarrati, A. R. and Banazadeh, M. (2013). Assessment of bridge safety due to scour by Bayesian network. *Journal of Water Management*. 166(6), 341-350.
- Shafai Bajestan, M. and Omidi, S. (2016). Investigation of Scour Depth Downstream of Stilling Basin for the Case of B-Jump. *Irrigation Sciences and Engineering*. 38(4), 125-136. (In Persian)
- Taebi, H., Fathi, M. and Shafai Bajestan, M. (2011). Prediction of stable riprap size to control scouring at downstream of stilling basin. *Iranian Water Research Journal*. 5(8): 23-34. (In Farsi)
- Tehran Technical and Engineering Consulting Organization (TTECO). (2011). *Hydraulic design report of Kan diversion dam*. Report No. CAL-STP-R-DVD-ST-BD-001.
- United States Army Corps of Engineers(USACE). (1997). *Engineering and design: Introduction to probability and reliability methods for use in geotechnical engineering*. Engineering Circular No. 1110-2-547. Dept. of the Army. Washington D.C.
- Vahidi Alvar, M., Asghari Pari, S. A., Shafai Bajestan, M. and Arman, N. (2020). Investigating the causes of scouring downstream of stilling basin of Shohada diversion dam and proposing suitable solutions to control it. *Irrigation Sciences and Engineering*. 43(1), 1-14. (In Farsi)