

Flood Warning System: An Appropriate Model for Designing and Reliability Assessment

A. Norouzi¹, A.R. Ghavasieh^{2*} and J. Attari²

Abstract

Probabilistic design is a new approach in the design of water resources systems. Accordingly, a framework for a flood warning system design is proposed in this study. The flood warning reliability assessment model, introduced by other authors, is then completed and presented in detail. The model is applied to the *Madarsou* river flood warning system in northeastern Iran, which was installed in 2005. In this case, one control cross section, three vulnerable areas, three time intervals of 30, 90 and 180 minutes for forecasting the flood crest height, two forecaster triggering stages (i.e. 2.5m and 2.7m) and three warning thresholds (i.e. 3m, 3.5m and 4m) are considered. Regardless of the warning thresholds, the longest potential lead-time is obtained for the 30 minute forecasting intervals. The potential lead-time decreases by increasing the system reliability, for higher trigger stages. The trade-off discussion between potential lead-time and system reliability helps decision makers to find out the optimum operational point based on the accepted risk. The analysis results for 30 minutes forecasting intervals in *Madarsou* showed that by increasing the lead time up to 9.28 hours, the number of missed flood increases from 15.10 to 17.78. Indeed, the discussion on the model reliability and the lead-time trade-off depends on the system performance and the acceptable risks for a region.

Keywords: Flood forecasting and warning system, Reliability assessment, Disaster damage reduction.

سیستم هشدار سیل: ارائه و کاربرد مدلی برای طراحی و ارزیابی قابلیت اطمینان

امیر نوروزی^۱، احمدرضا غواصیه^{۲*} و جلال عطاری^۲

چکیده

طراحی براساس روش‌های احتمالاتی یکی از رویکردهای نوین در طراحی سیستم‌های منابع آب می‌باشد. در این مقاله، ضمن ارائه چهارچوبی برای طراحی سیستم‌های هشدار سیل، مدل ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم هشدار سیل که قبلاً توسط محققان دیگر پیشنهاد شده، تکمیل گردیده و جزئیات آن به همراه روندنمای کلی مطالعات قابلیت اطمینان توضیح داده شده است. سپس مدل‌های فوق برای طراحی و ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم هشدار سیل رودخانه مادرسو واقع در استان گلستان، که در سال ۱۳۸۳ نصب گردیده به کار برده شد. در این مطالعه یک مقطع از رودخانه به عنوان مقطع کنترل، سه منطقه به عنوان نقاط حساس، زمان‌های ۳۰، ۹۰ و ۱۸۰ دقیقه به عنوان زمان تناوب پیش‌بینی تراز تاج سیل و دو تراز ۲/۵ و ۲/۷ متر به عنوان فعال‌گر مؤلفه پیش‌بینی انتخاب گردیدند. کلیه مطالعات برای سه مرحله هشداردهی در ترازهای ۳، ۳/۵ و ۴ متر انجام شده است. نتایج به‌دست آمده در این مطالعه نشان می‌دهد با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی و اجتماعی، در میان زمان‌های تناوب پیش‌بینی، زمان تناوب پیش‌بینی ۳۰ دقیقه در هر سه تراز هشداردهی بیشترین زمان پیش‌هشدار را در اختیار تصمیم‌گیرندگان قرار می‌دهد. از سوی دیگر، زمان پیش‌هشدار ممکن برای تراز فعال‌گر ۲/۵ متر بیشتر از تراز فعال‌گر ۲/۷ متر می‌باشد. این در حالی است که تراز فعال‌گر ۲/۷ متر به علت در اختیار داشتن اطلاعات واقعی کامل‌تر، قابلیت اطمینان بالاتری نسبت به تراز فعال‌گر ۲/۵ متر دارد. نتایج نشان می‌دهد در زمان تناوب پیش‌بینی ۳۰ دقیقه، افزایش زمان پیش‌هشدار به مدت ۹/۲۸ ساعت باعث افزایش تعداد سیل‌های از دست رفته از ۱۵/۱۰ به ۱۷/۷۸ می‌گردد. بحث در مورد مصالحه قابلیت اطمینان و زمان پیش‌هشدار برای هر نقطه عملکرد متفاوت است و تعیین نقطه مطلوب بستگی به شرایط منطقه و ریسک‌پذیری تصمیم‌گیرندگان دارد.

کلمات کلیدی: سیستم‌های پیش‌بینی و هشدار سیل، ارزیابی قابلیت اطمینان، کاهش خسارات بلایای طبیعی.

تاریخ دریافت مقاله: ۲۷ مرداد ۱۳۸۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۹ اسفند ۱۳۸۷

1- M.Sc., River Engineering Department, Power and Water University of Technology (PWUT), Tehran, Iran.
2- Assistant Professor, Water Engineering Department, Power and Water University of Technology (PWUT), Tehran, Iran.
*- Corresponding Author

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران - مهندسی رودخانه، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)
۲- استادیار دانشکده مهندسی آب، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)
*- نویسنده مسئول

۱- مقدمه

قابلیت اطمینان سیستم هشدار با توجه به جزئیات مهم آن در سیستم هشدار سیل رودخانه مادرسو واقع در استان گلستان و محاسبه زمان پیش‌هشدار ممکن می‌باشد.

ارائه چهارچوب طراحی و ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم هشدار سیلی که به تازگی نصب گردیده و اطلاعات کافی و ثبت شده‌ای از آن موجود نیست از رویکردهای نوین تحقیق حاضر است. از سوی دیگر، بررسی تأثیر زمان تناوب پیش‌بینی و تغییرات آن در زمان پیش‌هشدار ممکن^۵ و نهایتاً تأثیر این تغییرات در قابلیت اطمینان سیستم از دیگر نوآوری‌های مقاله می‌باشد. بر این اساس تلاش شده است روش قانونمندی برای ایجاد بانک اطلاعاتی یک سیستم هشدار سیل ارائه شود.

۲- مبانی تئوری

به‌منظور مطالعه و بررسی عدم‌قطعیت‌های سیستم هشدار سیل باید عدم‌قطعیت‌های موجود در هر دو زیرسیستم آن (پیش‌بینی و هشدار) به طور مجزا بررسی گردیده و در انتها اثر آنها بر یکدیگر و نیز محدودیت‌های آنها برآورد شود.

۲-۱- زیرسیستم پیش‌بینی

به منظور تبیین ریاضی زیرسیستم پیش‌بینی از سه مدل پیش‌بینی، سیل مشاهده‌ای و پیش‌بینی‌کننده استفاده می‌شود. هدف از تعریف این مدل‌ها آن است که بتوان مشخصاً عدم‌قطعیت‌های موجود در عملکرد سیستم را به صورت توابع احتمالاتی بیان نمود.

۲-۱-۱- مدل پیش‌بینی در زیرسیستم پیش‌بینی

الف) فعال‌گر پیش‌بینی. فعال‌گر پیش‌بینی می‌تواند واقعه‌ای ساده و یا پیچیده باشد که به‌وسیله آن هیدروگراف سیل و نقطه اوج آن پیش از وقوع شبیه‌سازی شود. این واقعه به صورت متغیرهای هواشناسی و یا هیدرولوژیکی تعریف می‌گردد.

ب) سخت‌افزار و نرم‌افزار. یکی از مهم‌ترین مسائلی که باید در این زمینه مورد توجه قرار گیرد، قابلیت اطمینان سخت‌افزارها و نرم‌افزارهای موجود در پیش‌بینی و پیش‌بینی می‌باشد.

ج) توان تشخیص و قابلیت اطمینان. برای مشخص نمودن عملکرد آماری پیش‌بینی، دو متغیر دودویی T ، شاخص فعال‌گر و Θ ، شاخص سیل معرفی می‌گردد. در هر واقعه سیل، $T=0$ به معنی فعال نشدن سیستم پیش‌بینی و $T=1$ به معنی فعال شدن سیستم

اصولاً یک سیستم هشدار سیل^۱ از سه مؤلفه پیش‌بینی^۲، پیش‌بینی^۳ و تصمیم‌گیری^۴ تشکیل شده است. به مجموعه مؤلفه‌های پیش‌بینی و تصمیم‌گیری، زیرسیستم پیش‌بینی و به مؤلفه تصمیم‌گیری، زیرسیستم هشدار گفته می‌شود (Krzyzstofowicz, 1993). این سه مؤلفه به صورت هوشمند در زمان‌هایی که شرایط از پیش تعریف شده سیلاب پیش می‌شوند فعال می‌گردند. برای رسیدن به این مقصود، سیستم پیش‌بینی شرایط آب و هوایی به همراه مشخصات هیدرولیکی رودخانه را در زمان واقعی به مرکز جمع‌آوری اطلاعات مخابره نموده و در آنجا وضعیت حوضه آبریز به صورت پیوسته ارزیابی می‌شود. با تشخیص شرایط وقوع سیل، سیستم پیش‌بینی فعال شده و هیدروگراف سیل را در مناطق مختلف پیش‌بینی می‌کند. با انعکاس نتایج پیش‌بینی به زیرسیستم تصمیم‌گیری در مورد نحوه اعلام هشدار به مردم تصمیم‌گیری می‌شود.

هدف از نصب سیستم هشدار سیل رودخانه‌ای کاهش خسارات تندسیلاب‌ها و سیلاب‌های رودخانه می‌باشد. برای آنکه بتوان پیش از وقوع سیل هشدار داد و اقدامات لازم و مؤثر را برای مقابله با آن انجام داد، باید زمان پیش‌هشدار به اندازه کافی طولانی باشد. تصمیم‌گیری بر مبنای پیش‌بینی سیل ذاتاً دارای عدم‌قطعیت‌هایی در شدت و زمان وقوع است. برای انجام تصمیم‌گیری منطقی و برآورد عملکرد سیستم لازم است تا قابلیت اطمینان سیستم و عدم‌قطعیت‌های پیش‌بینی مطالعه و کمی گردند.

برای مطالعه خسارات مورد انتظار سالانه سیل، روشی کلاسیک در سال ۱۹۹۴ توسط هایمس و همکاران ارائه شد که مبنای مطالعاتی آن بر تابع ارتفاع-خسارت و توزیع احتمالاتی و عدم قطعیت ناشی از دبی اوج سالانه قرار داشت (UNEP, 2002).

کریستوفویچ در سال ۱۹۹۳ مدل ریاضی جامعی برای سیستم‌های هشدار سیل ارائه نمود. این مدل سه هدف (۱) تصمیم‌گیری بهینه (۲) برآورد آماری عملکرد سیستم (۳) محاسبه سود اقتصادی مورد انتظار از سیستم را دنبال می‌نمود (Krzyzstofowicz, 1993). کریستوفویچ و همکاران در سال ۱۹۹۴ روش عددی را برای محاسبه قابلیت اطمینان سیستم هشدار سیل ارائه کردند (Krzyzstofowicz et al., 1994).

هدف اصلی مقاله حاضر، ضمن ارائه نحوه اجرا و کارکرد سیستم هشدار سیل از پیش تا تصمیم‌گیری، تشریح روند مطالعات ارزیابی

پیش‌بینی می‌باشد. به همین ترتیب $\Theta = 0$ معرف عدم وقوع سیل و $\Theta = 1$ نشان‌دهنده وقوع سیل در یک ناحیه خاص می‌باشد.

۲-۱-۲- مدل سیل مشاهداتی و پیش‌بینی در زیرسیستم پیش‌بینی

الف) مدل سیل مشاهداتی. هدف از این مدل بیان عدم قطعیتی است که در تراز و زمان وقوع تاج سیل پیش‌بینی شده وجود دارد، مشروط بر آنکه مطمئناً سیل رخ خواهد داد. اشل آستانه سیل در ارتفاع h_0 قرار دارد. عدم قطعیت موجود در ارتفاع و زمان رسیدن به تاج به صورت $g(h) = g(h|\Theta = 1)$ ، برای $h > h_0$ ، بیان می‌گردد، که همان تابع چگالی احتمال تراز حداکثر سیل می‌باشد.

ب) مدل پیش‌بینی سیل. نقطه پیش‌بینی در نمودار با ارتفاع s مشخص می‌شود. هدف از مطالعه این مدل بیان وابستگی آماری بین سیل پیش‌بینی و سیل واقعی (h, λ) می‌باشد (زمان وقوع، تراز حداکثر).

ج) تاج سیل. با فعال شدن فعال‌گر، پیش‌بینی‌کننده نیز فعال شده، شرایط آب و هوایی جمع‌آوری و تراز سیل پیش‌بینی می‌گردد. اگر پس از پیش‌بینی سیل روی ندهد، نمی‌توان تاج پیش‌بینی شده را با تاج واقعی مقایسه نمود. در این شرایط تابع چگالی s به صورت $k_0(s) = k_0(s|\Theta = 0, T = 1)$ بیان می‌شود. اما اگر سیل روی دهد، آنگاه در این شرایط تابع چگالی s به صورت $f(s|h) = f(s|h, \Theta = 1, T = 1)$ برای $s > 0$ خواهد بود. در همین حالت تابع چگالی تاج سیل پیش‌بینی شده با تابع چگالی احتمال $\hat{k}(s) = \hat{k}(s|\Theta = 1, T = 1)$ بیان می‌شود.

۲-۲- زیرسیستم هشدار

پس از پیش‌بینی تاج سیل، مدیر حوضه آبریز با مسأله تصمیم‌گیری برای اعلام هشدار یا عدم اعلام هشدار مواجه می‌شود. لذا متغیرهای دودویی شاخص هشداردهی، w و شاخص سیل‌گیری منطقه θ معرفی می‌گردند. $w = 1$ ، بدین معنی است که هشداردهی انجام شده و $w = 0$ ، نیز معرف آن است که اعلام هشدار نشده است و اگر منطقه‌ای دچار سیل‌گرفتگی نشود، $\theta = 0$ و اگر منطقه دچار سیل‌گرفتگی شود، $\theta = 1$ می‌باشد. متغیر دیگری به نام s^* نیز به عنوان تراز آستانه هشداردهی به کار می‌رود، به طوری که اگر $s > s^*$ باشد، آنگاه باید هشداردهی انجام گیرد.

برای مشخص نمودن حالت‌های مختلف عملکردی زیرسیستم هشدار بردار (T, w, Θ, θ) در نظر گرفته می‌شود. این چهار متغیر می‌توانند بیانگر چهار حالت برای سیستم هشدار سیل باشند:

- ۱) سیل از دست داده شده: $M = (w = 0 | \theta = 1, \Theta = 1)$
 - ۲) هشدار اشتباه: $F = (w = 1 | \theta = 0, \Theta = 1)$
 - ۳) ردیابی صحیح: $D = (w = 1 | \theta = 1, \Theta = 1)$
 - ۴) خاموشی: $Q = (w = 0 | \theta = 0, T = 1)$. عملکرد اشتباه سیستم (خطا) با روابط احتمالاتی $P(M|y)$ و $P(F|y)$ و از سوی دیگر عملکرد صحیح سیستم با روابط $P(Q|y)$ و $P(D|y)$ مشخص می‌گردند:
- $$P(M|y) = P(w = 0 | \theta = 1, \Theta = 1), \quad (1)$$
- $$P(F|y) = P(w = 1 | \theta = 0, T = 1)$$
- $$P(D|y) = 1 - P(M|y),$$
- $$P(Q|y) = 1 - P(F|y)$$

در روابط فوق y ارتفاع آن بخش از سیلابدشت است که از تراز h_0 بزرگتر می‌باشد. از آنجایی که در زمان سیل‌گرفتگی $y \leq h$ است، لذا تابع چگالی احتمال y نیز با $g(y) = g(y|\Theta = 1, T = 1)$ مشخص می‌شود.

۲-۳- محاسبه احتمال هشدار اشتباه و ردیابی صحیح

هدف از انجام مطالعات، محاسبه احتمال هشدار اشتباه و ردیابی صحیح برای بیان صریح عملکرد سیستم می‌باشد. توابع احتمال ردیابی صحیح و احتمال هشدار اشتباه به ترتیب با روابط (۲) و (۳) مشخص می‌گردند (Krzysztofowicz, et al., 1994):

$$P(D) = \frac{\rho \bar{\Phi}(s^*, y)}{1 - G(y)} \quad (2)$$

$$P(F) = \frac{(1 - \gamma)[1 - k_0(s^*)] + \gamma[G(y) - \Phi(s^*, y)]}{1 - \gamma[1 - G(y)]} \quad (3)$$

در این روابط $G(y)$ تابع توزیع تجمعی ارتفاعی سیلابدشت، γ توان تشخیص و ρ قابلیت اطمینان سیستم می‌باشند و مقادیر $\Phi(s^*, y)$ و $\bar{\Phi}(s^*, y)$ عبارتند از:

$$\Phi(s^*, y) = \int_{h_0}^y \int_{s_0}^s f(s|h)g(h) ds dh$$

$$\bar{\Phi}(s^*, y) = \int_y^\infty \int_{s^*}^\infty f(s|h)g(h) ds dh \quad (4)$$

۲-۴- منحنی مشخصه بهره‌برداری نسبی

نمودار $P(D)$ بر حسب $P(F)$ برای دامنه کامل s^* از یک حد مینیمم، تا بی‌نهایت را منحنی مشخصه بهره‌برداری نسبی^۶

(ROC) گویند. منحنی ROC، فضای بین احتمال ردیابی صحیح و احتمال هشدار غلط را برای سیستم هشدار سیل نشان می‌دهد.

۲-۵- منحنی مشخصه مصالحه عملکرد

در برخی از موارد لازم است که به جای استفاده از احتمال حالات مختلف از تعداد مورد انتظار سالانه (امید ریاضی) حالات استفاده شود. اگر تعداد سیل مورد انتظار سالانه N باشد، آنگاه مقادیر زیر قابل محاسبه می‌باشند (Krzysztofowicz et al., 1994):

(۵) تعداد منطقه‌های سیل گیر مورد انتظار سالانه

$$n = N[1 - G(y)]$$

(۶) تعداد ردیابی‌های صحیح مورد انتظار سالانه برای یک منطقه

$$ND = N[1 - G(y)]P(D)$$

(۷) تعداد هشدارهای غلط مورد انتظار سالانه برای یک منطقه

$$NF = N\left(\frac{\rho}{\gamma}\right)[1 - \gamma + \gamma G(y)]P(F)$$

با استفاده از روابط (۶) و (۷) منحنی ROC تبدیل به رابطه‌ای بین تعداد ردیابی‌های صحیح مورد انتظار سالانه (ND) و تعداد هشدارهای غلط مورد انتظار سالانه (NF) برای یک منطقه می‌شود. این رابطه منحنی مشخصه مصالحه عملکرد^۲ (PTC) نامیده می‌شود.

۲-۶- زمان پیش‌هشدار ممکن

احتمال‌های عملکرد، $P(D)$ و $P(F)$ ، تنها مشخص‌کننده قابلیت اطمینان سیستم هشدار می‌باشند. اما یک تصمیم‌گیری صحیح تنها زمانی مؤثر است که علاوه بر صحت درستی هشدار، مدت زمان کافی نیز در اختیار مسئولین برای انجام کارهای محافظتی قرار دهد. حد بالای فرصت زمانی موجود برای هر هشدار را زمان پیش‌هشدار ممکن گویند و به صورت زیر تعریف می‌گردد:

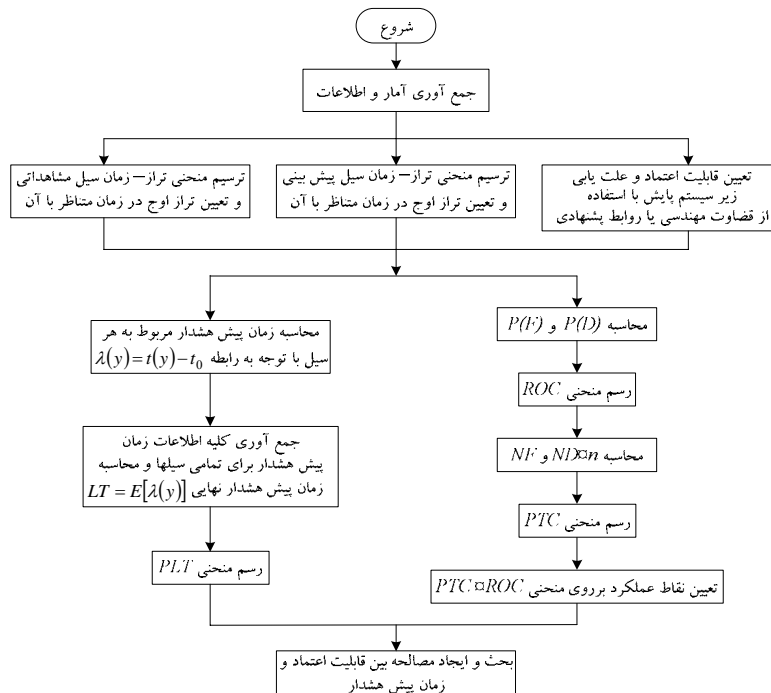
$$\lambda(y) = t(y) - t_0 \quad (۸)$$

که در آن، $\lambda(y)$: زمان پیش‌هشدار ممکن برای پهنه با ارتفاع y ، $t(y)$: مدت زمان لازم از شروع سیلاب تا رسیدن ارتفاع آب به تراز y و t_0 : زمان پیش‌بینی (سقف زمانی که در آن زمان مشاهدات مورد نیاز برای پیش‌بینی جمع‌آوری شده است).

از آنجا که $\lambda(y)$ از سیلی به سیل دیگر تغییر می‌کند، مقدار مورد انتظار آن به عنوان شاخص عملکرد سیستم معرفی می‌گردد:

$$PLT = E[\lambda(y)] \quad (۹)$$

با در اختیار داشتن سه شاخص ROC، PTC و PLT و تعیین نقاط عملکرد می‌توان در مورد نحوه به کارگیری یک سیستم هشدار سیل در یک منطقه سیل‌خیز و انجام تصمیم‌گیری‌های لازم اظهارنظر نمود. شکل ۱ روند کلی مطالعات بررسی مصالحه بین قابلیت اطمینان و زمان پیش‌هشدار ممکن را نشان می‌دهد.



شکل ۱- روندنمای کلی مطالعات قابلیت اطمینان سیستم هشدار سیل (Norouzi et al., 2007)

۳- مطالعه موردی

به منظور به کارگیری روش بررسی قابلیت اطمینان سیستم هشدار سیل و آشکار شدن توانایی‌های آن، سیستم هشدار سیل حوضه آبریز مادرسو به عنوان مطالعه موردی برگزیده شد. رودخانه مادرسو اصلی‌ترین سرشاخه گرگان‌رود می‌باشد که از کوه‌های نردین در استان سمنان سرچشمه می‌گیرد. این رودخانه پس از حرکت از نردین به سمت شمال در پایین‌دست روستای دشت به رودخانه چشمه‌خان که از شرق به غرب جریان دارد می‌پیوندد و به مسیر خود به سمت غرب استان گلستان ادامه می‌دهد. وقوع سیلاب‌های عظیم و مخرب متوالی، وجود جاده بین‌المللی گلستان، عبور زائرین شهر مشهد از این منطقه و جاذبه‌های گردشگری آن موجب گردید تا منطقه موردنظر به سیستم هشدار سیل تجهیز گردد. مطالعات مربوط به تجهیز حوضه به سیستم هشدار سیل از سال ۱۳۸۲ آغاز گردید و در سال ۱۳۸۴ به بهره‌برداری رسید.

۳-۱- ساختار در نظر گرفته شده برای سیستم هشدار سیل مادرسو

از آنجایی که سیستم هشدار سیل رودخانه مادرسو به‌تازگی به بهره‌برداری رسیده است، آماری از کارکرد طولانی مدت آن در دست نیست. به همین دلیل برای انجام مطالعات، روشی مبتنی بر استفاده از بارندگی‌های گذشته و فرض پایش، پیش‌بینی و تصمیم‌گیری در زمان واقعی برای سیستم هشدار سیل مادرسو ارائه گردید. بدین ترتیب که برای هر کدام از مؤلفه‌ها، وظیفه مشخصی تعیین و براساس شبیه‌سازی‌ها و وظایف تعیین شده برای هر مؤلفه، آمار لازم به صورت بازسازی شده به‌دست آمد تا به وسیله این داده‌ها مطالعات ارزیابی قابلیت اطمینان ادامه یابد.

۳-۱-۱- ساختار مؤلفه پایش

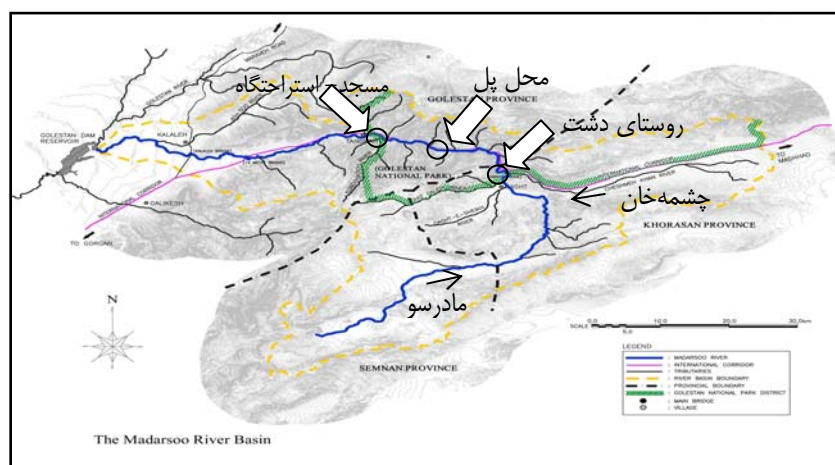
در طول مسیر رودخانه نقاط روستای دشت، پل مراسلاتی جاده گلستان و مسجد- استراحتگاه عمومی به عنوان نقاط حساس در برابر سیلاب در نظر گرفته شده‌اند. نقطه حساس نقطه‌ای است که علاوه بر آبرفتگی در زمان سیل خسارت‌پذیر نیز باشد (غواصیه، ۱۳۸۵).

بازه‌های مادرسو- دشت و رودخانه چشمه‌خان به عنوان بازه‌های سیل‌خیز انتخاب شدند. شکل ۲ وضعیت قرارگیری رودخانه‌های چشمه‌خان، مادرسو و نقاط حساس در برابر سیلاب را نشان می‌دهد. برای انجام مطالعات فیزیوگرافی، منطقه مورد مطالعه به سه بازه رودخانه مادرسو، زیرحوضه نردین (به طول ۶۰ کیلومتر)، رودخانه چشمه‌خان (به طول ۴۰/۷ کیلومتر) و رودخانه مادرسو، حد فاصل دشت- تنگراه (به طول ۳۵ کیلومتر) تقسیم گردید.

از آنجایی که بارندگی ثبت شده‌ای از گذشته در منطقه مورد مطالعه وجود نداشت در طراحی سیستم از ۲۶۰ مورد بارندگی ثبت شده بین سال‌های ۱۳۶۰ تا ۱۳۷۸ در دو ایستگاه آق‌قلا و لاله باغ در استان گلستان استفاده گردید.

پس از آن با انجام روش شبیه‌سازی بارش- رواناب (استفاده از مدل HEC-HMS) از بین ۲۶۰ مورد بارندگی ۲۶ واقعه بارندگی که اولاً به‌صورت همزمان و یا با اختلاف زمان چند ساعته در دو بازه سیل‌گیر روی داده بود و ثانیاً در منطقه ایجاد سیل می‌کردند برای طراحی سیستم انتخاب گردید. برای کالیبراسیون مدل بارش- رواناب از آمار سیلاب سال ۱۳۸۴ استفاده شد.

در طراحی مؤلفه پایش دو تراز $S1=2/5m$ و $S2=2/7m$ به عنوان تراز فعال‌گر (تراز طراحی) انتخاب گردیدند.



شکل ۲- شمای کلی رودخانه‌های مادرسو و چشمه‌خان و قرارگیری نقاط حساس

تعیین این تراز به نوع کاربری اراضی مجاور رودخانه و توپوگرافی منطقه سیل گیر بستگی دارد. سپس دو مقدار توان تشخیص (γ) و قابلیت اطمینان (ρ) سیستم، با استفاده از قضاوت‌های مهندسی تعیین شد. مقادیر γ و ρ برای S1 به ترتیب ۰/۸۰ و ۱/۰۰ و برای سیستم طراحی S2، ۱/۰۰ و ۰/۸۳ در نظر گرفته شده است. $\rho=1$ در تراز S1 بدین معنی است که پس از وقوع هر سیل و فعال شدن سیستم، اطلاعات سیل مورد نظر مخابره می‌گردد و هیچ سیلی از دست نمی‌رود. به همین ترتیب، $\gamma=1$ در تراز S2 بدین معنی است که قطعاً پس از وقوع سیل فعال‌شدگی رخ می‌دهد و مؤلفه پایش تمام موقعیت‌های شرایط سیلابی را درست تشخیص می‌دهد.

به طور کلی، توان تشخیص مؤلفه پایش تنها به تراز قرارگیری فعال‌گر بستگی دارد، در صورتی که قابلیت اطمینان این مؤلفه نه تنها به تراز قرارگیری فعال‌گر، بلکه به سخت‌افزار و نرم‌افزار مورد استفاده در مخابره داده‌ها نیز بستگی دارد.

از پل روستای دشت به عنوان نقطه کنترل به منظور متمرکز نمودن مطالعات استفاده گردید. مؤلفه پایش با فرض عملکرد در زمان واقعی ۲۶ واقعه بارندگی مورد نظر که قبلاً هایتوگراف آنها تهیه شده است، در مدل بارش- رواناب شبیه‌سازی شده و روندیابی می‌گردد. هیدروگراف روندیابی شده در نقطه کنترل به منحنی تراز- زمان تبدیل می‌شود. هنگامی که محاسبات نشان دهنده رسیدن یا تجاوز تراز آب به تراز فعال‌گر باشد، بلافاصله مؤلفه پایش بینی فعال می‌گردد.

۳-۱-۲- ساختار مؤلفه پایش بینی

با فعال شدن مؤلفه پایش بینی هیدروگراف سیل در زمان‌های تناوب پایش بینی ۳۰، ۹۰ و ۱۸۰ دقیقه، پایش بینی می‌گردد. پایش بینی سیلاب در این روش با استفاده از پایش بینی مقدار بارندگی در زمان واقعی و با استفاده از منحنی‌های شدت- مدت- فراوانی صورت می‌گیرد. بارندگی پایش بینی شده با استفاده از مدل بارش- رواناب به هیدروگراف ورودی به رودخانه تبدیل شده و با روندیابی آن تا نقطه کنترل، هیدروگراف خروجی محاسبه می‌گردد. هیدروگراف خروجی از رودخانه به منحنی تراز- زمان سیل تبدیل شده و تراز آب در نقطه کنترل مشخص می‌گردد.

۳-۱-۳- ساختار مؤلفه تصمیم‌گیری

برای طراحی مؤلفه تصمیم‌گیری سه تراز ۳، ۳/۵ و ۴ متر به عنوان تراز هشداردهی انتخاب گردید. انتخاب ترازهای هشداردهی با

توپوگرافی منطقه و نحوه پراکندگی امکانات و دارایی‌های منطقه سیل گیر رابطه مستقیم دارد. هنگامی که تراز ماکزیمم سیل پایش بینی از هر کدام از سه تراز هشداردهی تجاوز نماید، بلافاصله مؤلفه تصمیم‌گیری سیستم، اعلام هشدار می‌نماید. سپس تراز ماکزیمم پایش بینی مورد نظر با تراز سیل واقعی متناظر با آن که قبلاً با استفاده از مدل‌های بارش- رواناب و روندیابی محاسبه شده است، مقایسه می‌گردد. در صورت تطابق این دو با یکدیگر، هشدار متناظر با آن به عنوان یک هشدار درست و در غیر این صورت به عنوان هشدار غلط ثبت می‌شود. تراز ماکزیمم سیل مشاهداتی و پایش بینی به ترتیب H و S نامیده می‌شوند. از آنجایی فرض گردیده که پراکندگی دارایی‌ها در سه تراز مختلف می‌باشد، در صورتی که پایش بینی‌ها برای تراز پایین‌تر نشان‌گر وقوع سیل باشد، اعلام هشدار می‌گردد، اما پایش بینی‌ها متوقف نشده و برای ترازهای بالاتر پایش بینی ادامه می‌یابد.

روند مطالعاتی فوق در غالب روندنمای شکل ۳ خلاصه شده است. این روندنما چگونگی طراحی یک سیستم هشدار سیل را نمایش می‌دهد. با استفاده از این روش می‌توان چگونگی رفتار سیستم هشدار سیل یک منطقه را در برابر سیلاب‌های به وقوع پیوسته در آن مورد ارزیابی قرار داد و بانک اطلاعاتی براساس سیلاب‌های گذشته برای آن تهیه گردد. اطلاعات این بانک با وقوع سیل در منطقه و عملکرد سیستم در برابر آن به مرور تکمیل شده و شرایط را برای کارکرد بهینه سیستم مهیا می‌کند.

۳-۲- کاربرد روش ارزیابی قابلیت اطمینان در مطالعه موردی

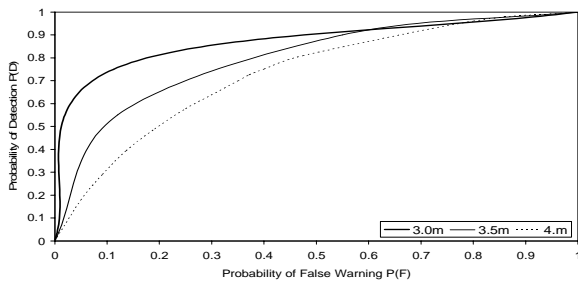
پس از شبیه‌سازی هیدروگراف‌های واقعی و پایش بینی دو حوضه آبریز نردین و چشمه‌خان در پل دشت و محاسبه ارتفاع متناظر سیل آنها، مطالعات مربوط به ایجاد مصالحه بین قابلیت اطمینان و زمان پایش هشدار انجام می‌شود. به این منظور لازم است توزیع‌های مناسب G ، K_0 و \hat{K} بر روی آمار موجود برازش داده شوند. یکی از بزرگترین منابع عدم قطعیت در مطالعات قابلیت اطمینان، انتخاب تابع توزیع مناسب با توجه به آمار موجود می‌باشد. براساس مطالعات انجام شده، تابع توزیع فرض شده برای G ، K_0 و \hat{K} تابع توزیع ویبول می‌باشد (Krzysztofowicz et al., 1994):

$$\begin{cases} P(Z \leq z | \alpha, \beta, \xi) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{z - \xi}{\alpha} \right)^\beta \right] & z > \xi \\ P(Z \leq z | \alpha, \beta, \xi) = 0 & z \leq \xi \end{cases} \quad (10)$$

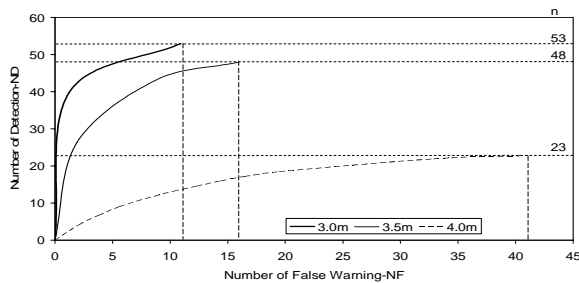
تعریف می‌گردد، که در آن α ، β و ζ به ترتیب ضرایب مقیاس، شکل و مکان هستند (Papoulis, Pillai, 2002).

فوق مقدار n یعنی تعداد سیل‌های مورد انتظار در سال، براساس آمار موجود، 0.53 فرض شده است. شکل‌های ۴ و ۵ نشان‌دهنده منحنی‌های ROC و PTC برای زمان تناوب پیش‌بینی ۳۰ دقیقه و تراز فعال گر SI می‌باشند.

منحنی ROC، رابطه بین احتمال هشدار اشتباه و احتمال ردیابی صحیح را نشان می‌دهد. احتمال هشدار اشتباه بین صفر و ۱ متغیر است، اما احتمال ردیابی صحیح به قابلیت اطمینان سیستم پایش (ρ) محدود می‌شود. منحنی PTC نیز رابطه بین تعداد هشدار اشتباه و تعداد ردیابی صحیح را در طول یک سال نشان می‌دهد.



شکل ۴- منحنی ROC برای تراز SI و زمان پیش‌بینی ۳۰ دقیقه



شکل ۵- منحنی PTC برای تراز SI و زمان پیش‌بینی ۳۰ دقیقه

در توزیع G ، تنها پارامترهای α و β برآورد شده و پارامتر ζ برابر h_0 یا تراز سیل در نظر گرفته می‌شود. در توزیع K_0 و \hat{K} ، مقدار ζ به ترتیب s_1 و s_0 است که $s_0 \leq s_1 \leq h_0$ و s_0 همواره از مقدار تراز آستانه فعال‌شدگی زیرسیستم پیش‌بینی بزرگتر می‌باشد. جدول (۱) مقادیر α ، β و ζ را برای زمان تناوب پیش‌بینی ۳۰ دقیقه نشان می‌دهد. همانطور مشاهده می‌شود، در جایی که مقدار $\gamma = 1$ است، مقدار K_0 برابر صفر در نظر گرفته می‌شود.

پس از محاسبه مقادیر α ، β و ζ ، توابع مربوط به K_0 و \hat{K} برای دو تراز فعال‌گر SI و S2 و سه زمان تناوب پیش‌بینی ۳۰، ۹۰ و ۱۸۰ دقیقه محاسبه گردیده‌اند.

۳-۲-۱- محاسبه احتمال ردیابی صحیح و احتمال هشدار اشتباه

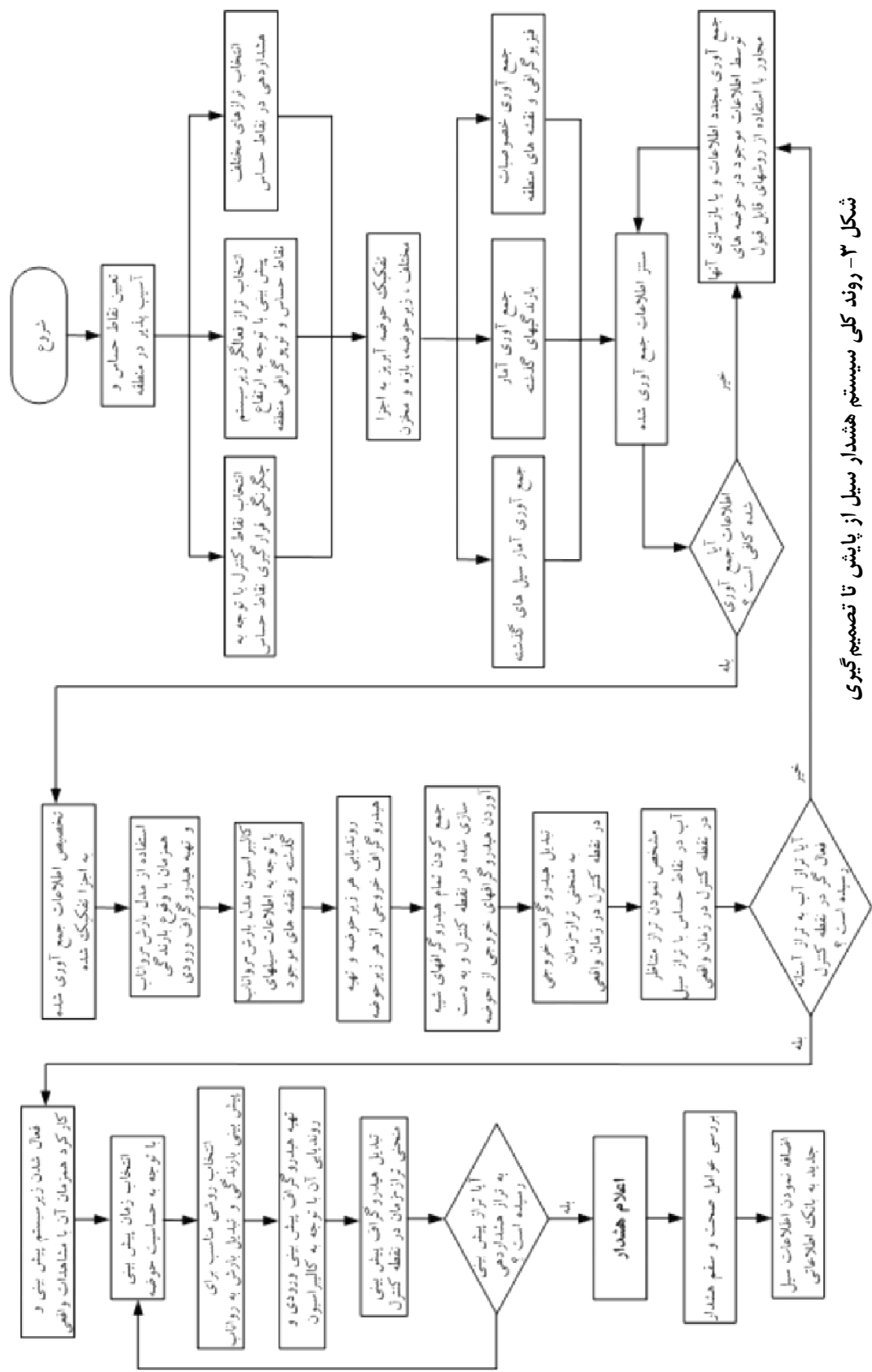
پس از مشخص شدن منحنی‌های G ، K_0 و \hat{K} برای هر دو تراز فعال‌گر S1 و S2 و منحنی‌های ROC و PTC ترسیم می‌شوند. برای رسم این منحنی‌ها ابتدا باید احتمال ردیابی صحیح ($P(D)$) و احتمال هشدار اشتباه ($P(F)$) با استفاده از روابط (۲) و (۳) مشخص شوند. برای حل این دو معادله ابتدا باید انتگرال‌های معادلات (۴) محاسبه شوند. حل این معادلات به روش‌های معمول بسیار دشوار می‌باشد. روشی که برای حل ساده‌تر این معادلات در این مقاله استفاده شده، روش تبدیل نرمال چند دهکی^۸ است.

۳-۲-۲- رسم منحنی‌های ROC و PTC

با محاسبه $\Phi(s^*, y)$ و $\bar{\Phi}(s^*, y)$ می‌توان مقادیر $P(D)$ و $P(F)$ را محاسبه نمود و براساس آن منحنی‌های ROC را رسم کرد. همچنین با استفاده از روابط (۶) و (۷) ND و NF محاسبه شده و منحنی‌های PTC ترسیم می‌گردند. باید توجه نمود که در روابط

جدول ۱- مقادیر α ، β و ζ در زمان تناوب پیش‌بینی ۳۰ دقیقه

ضرایب			داده‌ها		توزیع	
ζ	β	α	انحراف معیار	میانگین		
۳	۲/۹	۱/۱	۰/۳۳	۴/۱۱	۲۱	G K_0 برای تراز طراحی SI \hat{K} برای تراز طراحی SI \hat{K} برای تراز طراحی S2
۲/۵۵	۱/۳	۱/۳	۰/۱۴۸	۲/۶۸	۶	
۲/۶	۱/۴۵	۰/۴۷	۰/۲۷	۳/۳۳	۷	
۳	۱/۷۳	۰/۸۴	۰/۳۴	۳/۸۶	۱۱	



شکل ۳- روند کلی سیستم هشدار سیل از پایش تا تصمیم گیری

خطا (در هر دو مورد تراز طراحی $S1$ و $S2$) با افزایش زمان تناوب پیش بینی است. زمان تناوب پیش بینی بلندتر باعث ورود خطای بیشتری به سیستم می‌شود.

۳-۳- محاسبه زمان پیش‌هشدار ممکن

برای انجام ادامه مطالعات باید زمان پیش‌هشدار ممکن (PLT) محاسبه گردد. برای این منظور سه زمان تناوب پیش‌بینی ۳۰، ۹۰ و ۱۸۰ دقیقه در نظر گرفته شده و برای هر نقطه حساس با توجه به محل قرارگیری و رقوم ارتفاعی این مقدار محاسبه می‌شود.

مدت زمان لازم برای پیش‌بینی سیل، یعنی مدت زمانی که لازم است اطلاعات هواشناسی و بارندگی جمع‌آوری شده و وارد زیرسیستم پیش‌بینی شود، تعیین می‌گردد. سپس با استفاده از رابطه (۸) زمان‌های پیش‌هشدار ممکن متناظر محاسبه می‌شوند. این روند برای هر سه زمان تناوب پیش‌بینی و هر سه نقطه حساس انجام شده‌است. جدول ۳ زمان پیش‌هشدار ممکن را برای ترازهای ارتفاعی ۳، ۳/۵ و ۴ متر نشان می‌دهد.

منحنی‌های PTC نشان می‌دهند که تعداد ردیابی صحیح مورد انتظار سالانه از تعداد سیل‌های مورد انتظار سالانه فراتر نمی‌رود. همچنین، منحنی‌های PTC مشخص می‌کنند که بازاء یک خطای معین در هشدار، تعداد سیلاب‌های بیشتری را در ترازهای پایین‌تر می‌توان به صورت صحیح پیش‌بینی کرد. به عنوان مثال، در شکل (۵) با قبول حدود ۵ هشدار غلط در سال، تعداد آبگرفتگی‌های قابل پیش‌بینی در تراز ۳ متر برابر ۴۶، در ۳/۵ متر برابر ۳۴ و در تراز ۴ متر برابر ۹ نوبت می‌باشد. به عبارت دیگر، برای رسیدن به ماکزیمم ردیابی صحیح مورد انتظار در هر تراز، باید نسبت خطای (اشتباه) بیشتری را نسبت به سیلابی شدن قبول کرد. جدول ۲ مقدار نسبت خطای مورد انتظار برای حالات مختلف برای ۱۰۰ سال را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۲ مشاهده می‌شود که بازاء زمان پیش‌بینی معین، با تغییر تراز طراحی از $S1$ به $S2$ نسبت خطا کمتر می‌شود. این امر به دلیل کامل‌تر بودن اطلاعات تراز $S2$ نسبت به $S1$ می‌باشد. به بیان دیگر، هر اندازه تراز پیش‌بینی دیرتر فعال شود، اطلاعات واقعی‌تر بیشتری به آن وارد شده و به تبع آن تعداد هشدارهای اشتباه بازاء یک تراز معین کاهش می‌یابد. در این جدول نکته دیگر، رابطه افزایش نسبت

جدول ۲- نسبت خطای ممکن سیستم برای سطوح طراحی متفاوت در ۱۰۰ سال

زمان تناوب پیش‌بینی	تراز طراحی	رقوم ارتفاعی (m)	n	NF	ND	$\frac{NF}{ND} =$ نسبت خطا
۳۰ دقیقه	$S1$	۳	۵۳	۱۱	۵۳	۰/۲۰
		۳/۵	۴۸	۱۶	۴۸	۰/۳۳
		۴	۲۳	۴۱	۲۳	۱/۷۸
	$S2$	۳	۴۰	۵	۴۰	۰/۱۲۵
		۳/۵	۳۴	۱۰	۳۴	۰/۲۹
		۴	۱۷	۲۷	۱۷	۱/۵۷
۹۰ دقیقه	$S1$	۳	۴۹	۱۵	۴۹	۰/۳۰
		۳/۵	۴۵	۱۹	۴۵	۰/۴۲
		۴	۱۸	۴۶	۱۸	۲/۵۵
	$S2$	۳	۳۵	۹	۳۵	۰/۲۵
		۳/۵	۳۲	۱۱	۳۲	۰/۳۴
		۴	۱۴	۳۰	۱۴	۲/۱۴
۱۸۰ دقیقه	$S1$	۳	۴۶	۱۸	۴۶	۰/۳۹
		۳/۵	۴۲	۲۲	۴۲	۰/۵۲
		۴	۱۴	۴۷	۱۴	۲/۷۸
	$S2$	۳	۳۳	۱۱	۳۳	۰/۳۳
		۳/۵	۳۱	۱۳	۳۱	۰/۴۲

۲/۶۷	۱۲	۳۲	۱۲	۴		
------	----	----	----	---	--	--

جدول ۳- زمان پیش‌هشدار ممکن برای سطوح طراحی و زمان تناوب پیش‌بینی مختلف

زمان پیش‌هشدار ممکن (ساعت)						نقاط حساس	زمان پیش‌بینی
S2			S1				
۴ متر	۳/۵ متر	۳ متر	۴ متر	۳/۵ متر	۳ متر		
۱۴/۹۷	۱۱/۳۵	۷/۷۲	۲۰/۸۳	۱۸/۹۱	۱۷/۰۰	روستای دشت	۳۰ دقیقه
۱۵/۵۹	۱۲/۷۸	۱۰/۰۱	۲۲/۷۸	۲۰/۰۰	۱۷/۲۲	پل مراسلاتی	
۱۷/۶۸	۱۴/۹۰	۱۲/۱۲	۲۴/۷۸	۲۲/۰۰	۱۹/۲۲	مسجد- استراحتگاه	
۷/۸۰	۱۳/۳۳	۸/۸۶	۲۱/۵۲	۱۸/۶۳	۱۵/۷۸	روستای دشت	۹۰ دقیقه
۱۶/۰۱	۱۲/۸۷	۹/۷۳	۱۷/۶۷	۲۰/۵۸	۱۷/۶۷	پل مراسلاتی	
۱۸/۰۱	۱۴/۸۷	۱۱/۷۳	۲۵/۴۹	۲۲/۵۸	۱۹/۶۷	مسجد- استراحتگاه	
۱۳/۱۵	۶/۷۹	۰/۴۴	۲۱/۶۶	۱۸/۶۵	۱۵/۶۴	روستای دشت	۱۸۰ دقیقه
۱۵/۱۵	۸/۷۹	۲/۴۴	۲۳/۶۶	۲۰/۶۵	۱۷/۶۴	پل مراسلاتی	
۱۷/۱۵	۱۰/۷۹	۴/۴۴	۲۴/۶۰	۲۱/۵۹	۱۸/۵۸	مسجد- استراحتگاه	

برای یک نقطه عملکرد تبیین نمود. باید توجه نمود که، این شرایط ایده‌آل بوده و دست‌یابی به آن تقریباً غیر ممکن است اما با ایجاد مصالحه بین قابلیت اطمینان و زمان پیش‌هشدار می‌توان شرایط بهینه‌ای را برای یک نقطه عملکرد خاص مهیا نمود.

اگر چند نقطه عملکرد بر روی منحنی‌های PTC با شرایط مختلف انتخاب شود آنگاه می‌توان منطقی‌ترین تصمیم را در مورد نحوه هشداردهی انتخاب نمود. به‌عنوان نمونه سه نقطه A ، B و C به عنوان نقاط عملکرد بر روی منحنی‌های PTC ، با ارتفاع‌های ۳، ۳/۵ و ۴ متر مشخص شده است. نقاط A و B دارای $P(F)$ یکسان می‌باشند و نقطه C و A نیز دارای $P(D)$ مشترک هستند. به‌عنوان مثال این منحنی‌ها برای ارتفاع ۳ متر و زمان پیش‌بینی ۳۰ دقیقه در شکل ۶ نشان داده شده‌اند. در این شکل اگر NF برابر با ۳ فرض شود، بدین معنی است که تصمیم‌گیرنده تعداد ۳ خطا در طول صدسال را برای ارتفاع ۳ متر قبول کرده است. با NF در نظر گرفته شده، مقدار ND برای سطح $S1$ ، $۳۵/۲۶$ و برای سطح $S2$ ، $۳۷/۸۹$ می‌باشد که تعداد سیل‌های دریافت شده، برای این دو سطح طراحی است.

از طرف دیگر، تعداد سیل‌های مورد انتظار در طول یک‌صدسال $n = ۵۳$ می‌باشد و مقدار زمان پیش‌هشدار ممکن سه نقطه حساس روستای دشت، پل مراسلاتی و مسجد به ترتیب، برای نقطه B و C

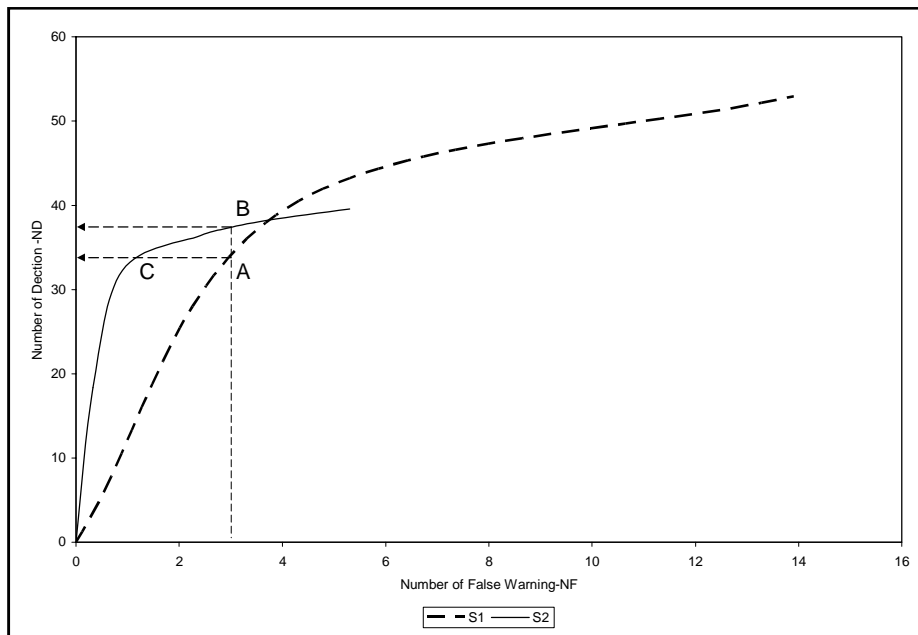
چنانچه مشاهده می‌شود، افزایش و کاهش زمان پیش‌هشدار بستگی مستقیم به ورود اطلاعات صحیح به زیرسیستم پیش‌بینی دارد. از آنجایی که در زمان تناوب پیش‌بینی ۱۸۰ دقیقه اطلاعات هواشناسی هر ۱۸۰ دقیقه یکبار وارد زیرسیستم پیش‌بینی می‌گردد، زمان پیش‌هشدار کمتری نسبت به زمان تناوب پیش‌بینی ۳۰ دقیقه به دست خواهد داد که اطلاعات مربوط به آن هر ۳۰ دقیقه یکبار بازبینی و اصلاح می‌شود.

نکته قابل بحث دیگر، کاهش زمان پیش‌هشدار ممکن از تراز فعال $S1$ به $S2$ می‌باشد. بالاتر بودن تراز $S2$ نسبت به $S1$ باعث می‌شود که زیرسیستم پیش‌بینی در تراز $S2$ دیرتر فعال شود و هیدروگراف‌های سیل با فاصله زمانی بیشتری تولید گردند. اگرچه زمان پیش‌هشدار تراز $S2$ نسبت به $S1$ ، زمان کوتاه‌تری را در اختیار تصمیم‌گیرندگان قرار می‌دهد ولی به دلیل دقیق‌تر بودن آگاهی‌ها و اطلاعات آن راجع به بارندگی، نسبت به تراز طراحی $S1$ قابل اعتمادتر است.

۳-۴- بررسی رابطه قابلیت اطمینان - مصالحه

هر نقطه‌ای که بر روی نمودار ROC یا PTC قرار می‌گیرد، نقطه عملکرد نامیده می‌شود. با صرف‌نظر از شرایط اقتصادی و اجتماعی منطقه مورد مطالعه، شرایط ایده‌آل را می‌توان با سه ضابطه بیشترین تعداد ردیابی صحیح، کمترین تعداد هشدار اشتباه و طولانی‌ترین زمان پیش‌هشدار یا به عبارت دیگر $(ND, NF, LT) = (n, 0, \infty)$

برابر ۷/۷۲، ۱۰/۰۱ و ۱۲/۱۲ ساعت و برای نقطه عملکرد A به ترتیب برابر ۱۷، ۱۷/۲۲ و ۱۹/۲۲ ساعت است.



شکل ۶- منحنی PTC برای ارتفاع ۳ متر و زمان تناوب پیش بینی ۳۰ دقیقه

و یا در دست طراحی با ترکیب گزینه‌های مختلف طراحی اعم از تغییرات قابلیت اطمینان و توان تشخیص مؤلفه پایش، تراز آستانه فعال‌گر مؤلفه پیش‌بینی و یا تراز آستانه هشداردهی به کار گرفته شود.

از آنجا که ارزیابی عملکرد سیستمی که قرار است طراحی و اجرا شود بدون داشتن آمار عملکرد میسر نیست، در این مقاله چارچوبی برای طراحی و تهیه آمار به صورت مصنوعی ارائه گردید. براین اساس می‌توان سیستم هشدار سیل را با توجه به شرایط توپوگرافی، هیدرولوژیکی، هواشناسی و شرایط نقاط حساس طراحی نمود. مهم‌ترین مزیت این مدل نگرش جامع، هدفمند و سیستماتیک آن در طراحی و ساختارشناسی یک سیستم هشدار سیل است.

با استفاده از این روش (طراحی براساس سیلاب‌های تاریخی و ارزیابی عملکرد سیستم) می‌توان یک بانک اطلاعاتی از عملکرد سیستم در مواقع شبیه‌سازی شده سیلاب تهیه نمود. با نصب سیستم هشدار سیل و جمع‌آوری آمارکارکرد آن در زمان وقوع سیل می‌توان بانک اطلاعاتی را کامل و به‌روز کرده و از اطلاعات آن برای کالیبراسیون سیستم استفاده کرد. روشن است پس از گذشت چند سال از کارکرد سیستم می‌توان با استفاده از تجربه‌های گذشته و عدم تکرار اشتباه‌های پیشین به یک سیستم هشدار سیل مطلوب با کمترین تعداد خطا دست پیدا نمود.

مقدار تفاضل $n-ND = 53 - 35/26 = 17/78$ برای نقطه A و $15/10$ در طول ۱۰۰ سال است. حال با توجه به اطلاعات دو نقطه عملکرد، B و A، مصالحه زیر قابل بحث است: آیا قابل قبول است که بازای افزایش تعداد سیل‌های ردیابی‌شده صحیح از $35/26$ به $37/89$ مدت زمان پیش‌هشدار از ۱۷ ساعت به $7/72$ ساعت کاهش یابد؟ یا به عبارت دیگر، آیا این امر برای تصمیم‌گیرندگان توجیه‌پذیر است که بازای کاهش سیل‌های از دست داده توسط سیستم هشدار از $17/78$ به $15/10$ شاهد کاهش زمان پیش‌هشدار به میزان $9/28$ ساعت باشند؟

با انجام مطالعات مشابه برای دیگر ارتفاع‌های هشداردهی و همچنین زمان‌های تناوب پیش‌بینی مشخص گردید، که برای نقاط هم‌ارتفاع، هر اندازه مقدار زمان پیش‌هشدار بیشتر شده، تعداد سیل‌های ردیابی صحیح‌شده کمتر بوده و یا به عبارت دیگر تعداد سیل‌های از دست‌رفته بیشتر گردیده است. لذا استفاده از زمان‌های بلندمدت برای پیش‌بینی سیل باعث کاهش قابلیت اطمینان سیستم می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

مدل ارائه شده در این مقاله که بر اساس مدل اولیه کریستوفویچ طراحی شده است می‌تواند برای سیستم‌های موجود، تازه نصب شده

برای ارائه کاربرد و توانمندی مدل‌های فوق (مدل طراحی و مدل ارزیابی قابلیت اطمینان) سیستم هشدار سیل تازه تأسیس رودخانه مادرسو واقع در استان گلستان در نظر گرفته شد. برای انجام مطالعات، داده‌های لازم به صورت مصنوعی با شبیه‌سازی بارش- رواناب تولید شد. به‌طورکلی، منابع عدم‌قطعیت در نظر گرفته شده در انجام تحقیق، عدم قطعیت موجود در دو مؤلفه پایش و پیش‌بینی بوده است. عدم‌قطعیت موجود در مؤلفه پایش عبارت از عدم‌قطعیت‌های کارکرد نامطلوب سخت‌افزار و نرم‌افزار، و کارکرد تجهیزات می‌باشد و عدم‌قطعیت موجود در مؤلفه پیش‌بینی، عدم‌قطعیت در پارامترها، مدل‌ها و در نتیجه ارتفاع و زمان وقوع تاج سیل پیش‌بینی شده است. با انجام مطالعات قابلیت اطمینان مشخص گردید که: (۱) انتخاب تراز فعال‌گر زیرسیستم پیش‌بینی یکی از عوامل مؤثر در مقدار عدم قطعیت می‌باشد به نحوی که با افزایش تراز فعال‌گر، پیش‌بینی‌ها بسیار به واقعیت نزدیک‌تر می‌شود، (۲) افزایش ارتفاع رقوم نقاط هشداردهی در یک تراز معین فعال‌گر باعث کاهش عدم قطعیت سیستم شده و تعداد هشدارهای اشتباه را کاهش می‌دهد، (۳) افزایش ارتفاع تراز فعال‌شدگی باعث افزایش توان تشخیص مؤلفه پایش می‌گردد برعکس با افزایش تراز آستانه فعال‌شدگی، قابلیت اطمینان مؤلفه پایش کاهش می‌یابد، (۴) برای نقاط هم ارتفاع، هراندازه زمان پیش‌هشدار افزایش یابد، تعداد سیل‌های ردیابی شده بازا تعداد هشدار اشتباه ثابت، کاهش پیدا می‌کند.

در این تحقیق ترازهای آستانه هشداردهی تنها براساس شرایط توپوگرافی منطقه و قضاوت‌های مهندسی تعیین گردیدند. هشداردهی براساس سناریوی خسارت (تابع عمق- خسارت منطقه) می‌تواند به عنوان روشی نوین در طراحی سیستم‌های هشدار سیل استفاده گردد. همچنین مطالعه تأثیر تغییرات پارامترهای توان تشخیص و قابلیت اطمینان مؤلفه پایش بر منحنی‌های ROC و PTC می‌تواند به تدقیق و کاهش عدم‌قطعیت‌های سیستم هشدار سیل کمک نماید.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Flood Forecasting and Warning System
- 2- Monitoring
- 3- Forecasting
- 4- Decision-making
- 5- Potential Lead-Time (PLT)
- 6- Relative Operation Characteristics (ROC)
- 7- Performance Trade-off Characteristics (PTC)
- 8- Normal Fractile Transformation

پیوست ۱- فهرست علائم به کار رفته

سیل ردیابی صحیح شده (سیل دریافت شده)	D
تابع چگالی احتمال تاج سیل پیش‌بینی	$f(s h)$
به شرط وقوع سیل و فعال‌شدگی مؤلفه پیش‌بینی هشداردهی اشتباه	F
تابع چگالی احتمال سیل مشاهداتی	$g(h)$
تابع چگالی احتمال تراز ارتفاعی سیلابدشت	$g(y)$
تراز تاج سیل مشاهداتی	h
تراز آستانه وقوع سیل	h_0
تابع چگالی احتمال تاج سیل پیش‌بینی شده به شرط عدم وقوع سیل و فعال‌شدگی مؤلفه پیش‌بینی	$k_0(s)$
زمان پیش‌هشدار مورد انتظار (زمان فرجه)	PLT
سیل از دست داده شده	M
تعداد منطقه‌های سیل‌گیر مورد انتظار سالانه	n
تعداد سیل مورد انتظار سالانه	N
تعداد ردیابی صحیح سالانه	ND
تعداد هشدار اشتباه سالانه	NF
احتمال ردیابی صحیح سالانه	$P(D)$
احتمال هشدار اشتباه سالانه	$P(F)$
خاموشی سیستم هشدار سیل	Q
ضریب همبستگی	r
تراز تاج سیل پیش‌بینی شده	s
تراز هشداردهی	s^*
زمان لازم برای پیش‌بینی	t_0
مدت زمان لازم از شروع سیلاب تا رسیدن آب به تراز y	$t(y)$
شاخص فعال‌گر مؤلفه پایش	T
شاخص هشداردهی	w
تراز ارتفاعی سیلابدشت	y
ضریب مقیاس در تابع توزیع ویبول	α
ضریب شکل در تابع توزیع ویبول	β
توان تشخیص مؤلفه پایش	γ
زمان پیش‌هشدار ممکن برای ارتفاع y	$\lambda(y)$
شاخص وقوع سیل	Θ
شاخص سیل‌گیری منطقه	θ
قابلیت اطمینان مؤلفه پایش	ρ
ضریب مکان در تابع توزیع ویبول	ξ

۵- تشکر

نویسندگان مقاله مراتب سپاس خود را از شرکت مدیریت منابع آب ایران به دلیل حمایت‌های مالی از طرح‌های تحقیقاتی اعلام می‌دارند. همچنین از آقای مهندس مصطفی بهبهانی به دلیل در

- Water Resources Planning and Management*, 120(6), pp. 609-626.
- Norouzi, A. Ghavasieh, A.R. and Attari, J. (2007), "Uncertainty Evaluation of Flood Warning System: Reliability and Trade-off," *Electronical Proceeding of 32nd Congress of IAHR, Venice, Italy*.
- Papoulis, A. and Pillai, S.U. (2002), *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*, McGraw-Hill, 852p.
- Tung, Y.K., Yen, B.C. and Melching, C.S. (2006), *Hydrosystems Engineering Reliability Assessment and Risk Analysis*, Mc-Graw Hill, 468p.
- United Nation Environmental Plan, (2002), "Early Warning, Forecasting and Operational Flood Risk Monitoring in Asia," Division of Early Warning and Assessment. Technical Report, 167p.
- اختیار گذاشتن آمار و اطلاعات لازم برای انجام این تحقیق تشکر می‌گردد.
- ۶- مراجع**
- غواصیه، احمدرضا (۱۳۸۵)، "کاهش خسارات سیل با تحلیل آسیب‌پذیری"، مجموعه مقالات کارگاه فنی همزیستی با سیلاب، کمیته ملی آبیاری و زهکشی، صص ۱-۱۱.
- Krzysztofowicz, R. (1993), "A Theory of flood warning systems," *Water Resources Research*, 29(12), pp. 3981-3994
- Kelly, K.S and Krzysztofowicz, R. (1994), "Probability Distribution of flood warning systems," *Water Resources Research*, 30(4), pp. 1145-1152.
- Krzysztofowicz, R., Kelly, K.S. and Long, D. (1994), "Reliability of flood warning systems," *Journal of*