

Verification of Rational Method in Predicting Maximum Runoff using Radar Data (Case Study: Ramiyan Basin)

Parviz Panjekoobi¹, Seyed Abolfazl Masoodian^{2*}, Abdolazim Ghangherme

¹ PhD Candidate, Department of Physical Geography, University of Isfahan, Isfahan, Iran

² Professor, Department of Physical Geography, University of Isfahan, Isfahan, Iran

³ Assistant Professor, Department of Geography, University of Golestan, Gorgan, Iran

Abstract

Forecasting maximum discharge of the basin requires accurate information on the amount, severity and distribution of precipitation. For prediction of maximum runoff of a basin using relationship of $Q = 0.278 CiA$, the rainfall intensity in the whole basin is considered constant. The amount of precipitation in different parts of a basin is obtained through interpolation methods. This method is known as duration-area. Because rainfall is a very variable parameter, probability of an unpredictable estimate of precipitation is high. In this study, using the radar data, the amount and severity of rainfall over the basin were obtained. (intensity-duration-area method). Basin concentration time lines were prepared in G.I.S. Software. Coordinates of environment and area of the curves were defined for radar and its implementation program was written in radar software. Then amount and severity of precipitation were estimated by the radar. Because volume was directly used, the relationship changed. The maximum runoff was simulated and compared with observation runoff. Maximum runoff was high in severe rainfall. If soils of basin were already wet, maximum runoff was high. Conditions were different in low rainfall. If the severity of the rainfall was low and then increased, the amount of runoff was more than expected. If the intensity was high and then decreased, the amount of runoff was lower. This was the result of the spatial and temporal dispersion of precipitation in maximum runoff. Time delay between maximum runoff and simulation in severe rainfall was short. And time lag in ordinary and low rainfall was long. Using a constant runoff coefficient does not estimate maximum runoff value accurately. Due to the characteristics of rainfall (intensity, amount, duration, spatial and temporal distribution) and soil moisture characteristics of the soil, various coefficients should be used.

Key words: Simulation, Rational Relationship, Runoff, Radar and Ramiyan Basin.

صحت‌سنجی رابطه استدلالی بیشینه رواناب به روش شدت - مدت - مساحت با استفاده از

داده‌های پوششی رادار؛ مطالعه موردی: حوضه آبریز رامیان

پرویز پنجه کوبی: دانشجوی دکترا، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
سید ابوالفضل مسعودیان*: استاد، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
عبدالعظیم قانقرمه: استادیار، گروه جغرافیا، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

وصول: ۱۳۹۸/۰۲/۲۴ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۱۷، صص ۵۷-۷۸

چکیده

پیش‌بینی بیشینه رواناب حوضه به اطلاعات درست از حجم، شدت و پراکنش بارش نیاز دارد. در رابطه استدلالی $Q = 0.278 CiA$ برای پیش‌بینی رواناب حوضه، شدت بارش ثابت فرض شده است و مقدار بارش نیز در بخش‌های مختلف حوضه از روش‌های درون‌یابی به دست می‌آید؛ زیرا بارش، یک فراسنج بسیار متغیر و احتمال خطا در برآورد آن زیاد است. این روش استدلالی به روش مدت - مساحت مشهور است. در این پژوهش به کمک داده‌های پوششی رادار، حجم و شدت بارش بر فراز حوضه در گام‌های زمانی ۳۰ دقیقه (روش شدت - مدت - مساحت) به دست آمد. منحنی‌های همزمان تمرکز حوضه در گام‌های زمانی ۳۰ دقیقه در نرم‌افزار GIS تهیه شد. سپس مختصات محیط و مساحت منحنی‌ها برای رادار تعریف، برنامه اجرایی آن در محیط نرم‌افزار رادار نوشته و حجم و شدت بارش در گام زمانی لازم برآورد شد. در ادامه به دلیل استفاده از داده‌های حجم بارش در گام زمانی انتخابی، رابطه استدلالی تغییر یافت و بیشینه رواناب شبیه‌سازی و با بیشینه دبی مشاهداتی مقایسه شد. هنگام بارش‌های شدید و پر حجم یا مرطوب بودن خاک حوضه به دلیل بارش‌های پیشین، بیشینه دبی زیاد بود. در بارش‌های کم‌شدت و کم‌حجم شرایط متفاوت بود؛ اگر شدت بارش در ابتدا کم بود و سپس افزایش داشت، مقدار رواناب بیش از حد انتظار بود؛ اگر شدت بارش در ابتدا زیاد بود و سپس کاهش داشت، مقدار رواناب کمتر بود. تأثیر پراکنش زمانی و مکانی بارش نیز بر مقدار دبی بیشینه نشان داده شد. تأخیر زمانی بین بیشینه دبی مشاهداتی و بیشینه رواناب شبیه‌سازی در بارش‌های شدید و پر حجم، کوتاه و در بارش‌های معمولی و کم‌حجم، طولانی بود. نتایج نشان داد استفاده از ضریب رواناب ثابت در رابطه استدلالی، مقدار بیشینه رواناب را دقیق برآورد نمی‌کند. با توجه به ویژگی بارش (شدت، مقدار، مدت، پراکنش زمانی و مکانی) و همچنین ویژگی رطوبتی خاک حوضه باید از ضرایب مختلف بهره برد.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی، رابطه استدلالی، رواناب، رادار و حوضه رامیان.

مقدمه

موقعیت جغرافیایی، تغییرات باد و دیگر دلایل مکانیکی، خطای جالب توجهی داشته باشند (Yilmaz et al., 2005: 498)؛ بنابراین توزیع نامناسب باران‌سنگ‌ها، برآورد درست بارش را ناممکن می‌کند و اندازه‌های بارش در مکان‌های گوناگون اشتباه برآورد می‌شود. با افزایش شمارگان باران‌سنگ‌ها این مشکل برطرف خواهد شد؛ ولی این کار بسیار پرهزینه است (Seed et al., 2002: 37).

رادار، ابزار توانمندی برای تولید داده‌های بارشی ارزشمند و با درجه تفکیک زمانی و مکانی مناسب است. رادار هواشناسی، برآوردی ناحیه‌ای از بارش در زمان واقعی ارائه می‌دهد که ایستگاه‌های باران‌سنجی امکان انجام آن را ندارند. این امر فرصتی مناسب برای توسعه و پیشرفت پیش‌بینی‌های جدید است و بهبود تکنیک‌های جدید پیش‌بینی کاربردی را فراهم می‌سازد (Cranston And Black, 2006: 51). رادار شبیه‌سازی رواناب را با استفاده از نرم‌افزار بهبود می‌بخشد (Nicholas Kouwen, 1998: 74).

رواناب به‌مثابه یکی از مؤلفه‌های بیلان آب حوضه اهمیت زیادی در آبخیزداری و مدیریت منابع آب دارد. بحث رواناب و رابطه بارندگی - رواناب، از مهم‌ترین و درواقع اساسی‌ترین موضوعات در هیدرولوژی آب‌های سطحی است. به‌طور کلی رواناب سطحی فوری در نتیجه ترکیب بارش شدید با زمین شیب‌دار یا خاک اشباع‌شده پدید می‌آید. درباره پیش‌بینی سیل، مشخص‌کردن اطلاعات توزیع زمانی و مکانی بارش در سطح حوضه آبریز بسیار مهم است (Liechti te al., 2013: 3853). پیش‌بینی و تعیین میزان کمی فرایندهای تولید رواناب و انتقال آن به نقطه خروجی حوضه آبریز اهمیت خاصی دارد.

بارش از متغیرهای کلیدی چرخه آب است؛ از این رو اثر زیادی بر سامانه‌های رودخانه‌ای و ساخته‌شده دارد. برای مدیریت اجرایی آب و تنظیم و شناخت بهتر چرخه آب، دیدبانی متغیرهای آب‌شناختی اهمیت بسیاری دارد (Martins et al., 2013: 84). تغییرات بارندگی در مقیاس زمانی و مکانی زیاد است. ارائه اطلاعات دقیق و مناسب درباره خشکسالی و سیل، مدیریت محصولات کشاورزی، پیش‌بینی هوا، مدیریت سدها، تشخیص و ارزیابی رخداد حداکثر بارش و همچنین مدیریت کاربردی دیگر منابع آب، همگی به اطلاع از مقدار بارش واقعی نیاز دارد. پژوهش‌های آب‌شناسی و علوم کاربردی به برآورد مطمئن و درست بارش و پیش‌بینی‌ها با درجه تفکیک زیاد نیاز دارد (Berne And Krajewski, 2013: 357).

تغییرات شدید در شدت، مدت و توزیع فضایی، جزو ذات بارش‌های رگباری ناشی از سلول‌های همرفتی است؛ بنابراین سنجش ناحیه‌ای و دقیق آنها با شبکه باران‌سنجی مشکل است؛ زیرا سنجش باران‌سنج، سنجشی نقطه‌ای است و ممکن نیست متوسط بارش را در سطح نمایش دهد (Zhu et al., 2014: 270). شرایط تشکیل و بزرگی سیل در هر مکانی یکسان نیست. یکی از راهکارهای مهم برای پیش‌بینی زمان رخداد سیل، برآورد درست و بهنگام بارش است که این نخستین مشکل در زمینه پیش‌بینی سیل محسوب می‌شود؛ به بیان دیگر مشخص‌کردن اطلاعات پراکنش زمانی و مکانی بارش در سطح حوضه آبریز کار مشکلی است. باران‌سنگ‌ها هم که مقدار واقعی بارش را اندازه‌گیری می‌کنند، ممکن است به دلیل خیس‌شدن بدنه، پراکندگی نامنظم،

اوریم و همکاران^۳ (۲۰۰۹) با استفاده از رادار هواشناسی، بارش‌های سنگین هلند را بررسی کردند و منحنی شدت - مدت - فراوانی را به دست آوردند. بارش‌های رادار و تغییرات آن استخراج و با داده‌های بارش زمینی مقایسه شد. نتایج نشان داد با وجود زیادبودن خطاها برای دوره‌های طولانی‌مدت، داده‌های رادار برای استخراج منحنی‌های (شدت - مدت - فراوانی) مناسب بودند.

پارک و هر^۴ (۲۰۱۲) با استفاده از پیش‌پردازش داده‌های رادار، روش کالیبراسیون اتوماتیک را برای شرایط رطوبت اولیه پیشنهاد کردند که بر تخلیه حوضه تأثیر دارد.

هرنان و همکاران^۵ (۲۰۱۳) در واگوی یازده حوضه کوهستانی منطقه کلرادو^۶ در دو طوفان فصل گرم به این نتیجه رسیدند که بارش و ویژگی‌های حوضه‌ها، الگوهای پیش‌بینی سیل را در حوضه‌هایی با اندازه‌های مختلف تعیین می‌کنند و مهارت پیش‌بینی سیل و زمان پیش‌بینی سیل به ارتباط بین ویژگی‌های حوضه و بارش بستگی دارد.

پانزیرا و همکاران^۷ (۲۰۱۶) آستانه مجموع بارش را با استفاده از ۱۰ سال داده‌های رادار برای تهیه سیستم هشدار سریع در دامنه‌های آلبی سوئیس ارائه کردند. نتایج آنها نشان داد مقادیر آستانه‌ها با دوره زمانی و مناطق مختلف متفاوت است. درنهایت با استفاده از داده‌های رادار، سیستم هشدار سریع برای استفاده کاربران زیادی تهیه شد. پیش از آنکه مقدار

ویژگی‌های حوضه آبریز در ارتباط با ویژگی طوفان، نقش تعیین‌کننده‌ای در قابلیت تولید رواناب زیاد سیل دارد (Hernan et al., 2013: 1095) و در زمانی که خاک اشباع از آب باشد، تغییرات بارش حرکات سیل را کنترل می‌کند (Anquetin et al., 2010: 146). پیشینه جریان شبیه‌سازی به شدت و اندازه حوضه بستگی دارد و عدم اطمینان در شبیه‌سازی رواناب با افزایش اندازه حوضه به سرعت کاهش می‌یابد (Cunha et al., 2012: 1). عموماً در حوضه‌های بزرگ، توزیع مکانی بارندگی یکسان نیست و ممکن است بخشی از حوضه، بارش بیشتر و بخش دیگر، کمتر از میانگین داشته باشد؛ این امر رواناب سطحی را با استفاده از فرمول‌های تجربی با خطا همراه خواهد کرد.

سیل‌های یک منطقه با استفاده از روش‌های گوناگون پیش‌بینی می‌شود. برای پیش‌بینی ویژگی سیل یک مکان مشخص، بهتر است تعدادی از سیل‌های رخ داده در آن منطقه را اندازه‌گیری و ثبت کرد تا با تجزیه و تحلیل داده‌های آنها، وضعیت سیل‌هایی پیش‌بینی شود که در آینده رخ خواهد داد (علیزاده، ۱۳۹۱: ۸۵۶).

پیشینه پژوهش

پژوهش جیانونی و همکاران^۱ (۲۰۰۳) در حوضه آبریز رودخانه راپیدین^۲ نشان داد ساختار طوفان و حرکت آن نقش مهمی در شناسایی توزیع زمانی بارش دارد که این عامل اولیه در شناسایی واکنش سیل‌های شدید بود.

³ Overeem et al

⁴ Park And Hur

⁵ Hernan et al

⁶ Colorado

⁷ Panzeira et al

¹ Giannoni et al

² rapidian

دست می‌آورد و با مقایسه آن با دبی مشاهداتی حوضه به دنبال اهداف زیر است:

الف- تعیین زمان و مکان دقیق بارش در حوضه آبریز و در مناطقی که تعداد ایستگاه‌های زمینی کم است یا وجود ندارد؛

ب- آگاهی از شدت بارش، مجموع بارش و چگونگی پراکنش بارش به‌ویژه در بخش‌هایی از حوضه آبریز که امکان سنجش آن با شبکه باران‌سنجی فراهم نیست و ارائه مدل مناسب برای پیش‌بینی سیل احتمالی؛

ج- به‌دست‌آوردن ضریب رواناب بهینه با استفاده از داده‌های رادار و مقدار رواناب مشاهداتی در حوضه آبریز؛

د- تعیین ارتباط بین شدت و مدت‌زمان بارش با مقدار رواناب حاصل‌شده در حوضه آبریز.

روش‌شناسی پژوهش

داده‌های پژوهش

داده‌های استفاده‌شده در این پژوهش عبارت‌اند از: ۱. داده‌های بارش ایستگاه‌های زمینی داخل حوضه یا پیرامون آن که از اداره کل هواشناسی استان گلستان (بخش آمار) دریافت شد.

۲. داده‌های رادار هواشناسی که از اداره کل هواشناسی استان گلستان و مازندران (اداره رادار) دریافت شد.

۳. داده‌های دبی و رواناب حوضه آبریز رامیان که از واحد مطالعات آب سطحی اداره کل امور آب استان گلستان دریافت شد. داده‌های دبی بین سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۶ و مواقعی که دبی رودخانه به دلیل بارش افزایش خوبی داشت و داده‌های راداری آن نیز برای

مجموع بارش به مقدار آستانه برسد، سطح هشدار مشخص و صادر خواهد شد.

موسوی و همکاران (۱۳۷۸) در برآورد ضریب رواناب برای حوضه‌های دریای مازندران به این نکته اشاره داشتند که مقادیر ضرایب رواناب به‌دست‌آمده از روش استدلالی - احتمالی، کمتر از روش‌های تجربی چاو و همکاران^۱ (۱۹۸۸) و مقادیر به‌دست‌آمده در دبی بیشینه از روش استدلالی - احتمالی، در عملکرد بهتر از روش چاو و همکاران بوده است.

نشاط و صدقی (۱۳۸۵) در برآورد میزان رواناب با استفاده از روش سازمان حفاظت خاک SCS^۲ و HSC-HMS در حوضه باغ‌ملک استان خوزستان به این نتیجه رسیدند که به دلیل بروز شرایط مختلف در زمان وقوع هر سیلاب به‌ویژه شرایط شدت بارش، روش SCS توان تحلیل را نداشته است. همچنین مشخص شد تشکیل رواناب واقعی تا حدودی با روند محاسباتی روش SCS تفاوت داشته است.

نتایج پژوهش میرزایی و رئوف (۱۳۹۳) در بررسی زمان تمرکز نشان داد استفاده از فراسنج‌های بیشتر در محاسبه زمان تمرکز نتایج مطلوب‌تری به دنبال داشته است.

اهداف پژوهش

این پژوهش به کمک داده‌های پوششی رادار که گام زمانی ۱۵ دقیقه‌ای دارد و حجم و شدت بارش، متوسط و مجموع رواناب را برای منحنی‌های هم‌زمان تمرکز محاسبه می‌کند، بیشینه رواناب حوضه را به

^۱ Chow et al

^۲ Soil Conservation Service

دقیقه برآورد شده بود. در واقع این حجم بارش برآوردی رادار در مدت ۳۰ دقیقه (۱۸۰۰ ثانیه) ایجاد رواناب کرده بود. برای برآورد رواناب برحسب مترمکعب بر ثانیه از رابطه (۳) استفاده شد.

$$Q = \frac{\text{حجم بارش در } 30 \text{ دقیقه}}{30 \times 60} \quad (3)$$

$$= \frac{\text{حجم بارش در } 30 \text{ دقیقه}}{1800}$$

با به‌کارگیری حجم بارش برآوردی رادار با گام زمانی ۳۰ دقیقه در رابطه (۱)، این رابطه به صورت رابطه (۴) نوشته شد.

$$Q \text{ m}^3/\text{s} = \frac{\text{حجم بارش در } 30 \text{ دقیقه}}{1800 \text{ s}} \times C \quad (4)$$

در ادامه کار فایل محیط (پلیگون) حوضه رامیان در نرم‌افزار G.I.S (ساج) فراخوانی شد؛ محیط و مساحت حوضه به دست آمد و نقشه رقومی ارتفاع حوضه (DEM) نیز استخراج شد. سپس با استفاده از نقشه رقومی ارتفاع، شیب حوضه و شبکه رودخانه حوضه و همچنین طول رودخانه اصلی حوضه نیز محاسبه و استخراج شد؛ بنابراین با داشتن طول رودخانه اصلی و شیب متوسط آن و با استفاده از فرمول کریپچ $T_c = 0.949 \left(\frac{L^3}{H}\right)^{0.385}$ زمان تمرکز حوضه محاسبه شد (علیزاده، ۱۳۹۱: ۵۲۶). در آن T_c ، زمان تمرکز حوضه و L ، طول رودخانه اصلی و H ، اختلاف بین بیشترین و کمترین ارتفاع است. زمان تمرکز حوضه برابر با ۲/۷۱ ساعت یا ۱۶۳ دقیقه به دست آمد.

برای افزایش دقت کار، تصمیم بر آن شد منحنی‌های همزمان تمرکز ۳۰ دقیقه محاسبه شود؛ بنابراین در نخستین گام زمانی، زمان تمرکز

این پژوهش در نظر گرفته شد. با این توضیح ۱۲ بارش انتخاب شد.

روش پژوهش

مقدار بیشینه رواناب به روش استدلالی از رابطه (۱) به دست می‌آید (علیزاده، ۱۳۹۱: ۵۸۸).

$$Q = 0.278 CiA \quad (1)$$

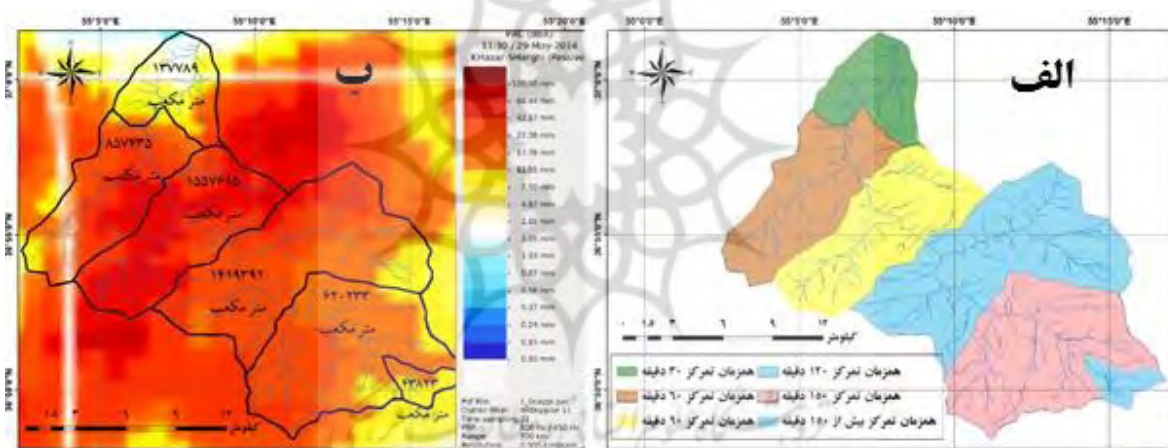
در این رابطه، Q بیشینه رواناب برحسب مترمکعب بر ثانیه، C ضریب رواناب، i شدت بارش برحسب میلی‌متر بر ساعت و A مساحت حوضه برحسب کیلومتر مربع است. ضریب ۰/۲۷۸ در این رابطه برای تبدیل واحد به کار گرفته شده است؛ زیرا دبی برحسب مترمکعب بر ثانیه است؛ در حالی که در سمت راست این رابطه شدت بارش برحسب میلی‌متر بر ساعت و مساحت نیز برحسب کیلومتر مربع است. این ضریب برای تبدیل مقیاس استفاده شده است. در سیستم متریک سطح برحسب مترمربع و زمان برحسب ثانیه است؛ بنابراین در تبدیل واحدها به سیستم متریک داریم: $\left[\frac{m \times 10^{-3}}{3600 \text{ s}} \times (\text{بارش شدت } i) \times (A \text{ مساحت}) \times 10^6\right]$ و نتیجه جاگذاری واحدها به شکل رابطه (۲) خواهد بود.

$$\frac{m \times 10^3}{3600 \text{ s}} = \frac{1000}{3600} \text{ m}^3/\text{s} = 0.278 \text{ m}^3/\text{s} \quad (2)$$

(حجم بارش = شدت بارش × مساحت)، و چون در این پژوهش به کمک داده‌های پوششی رادار و به‌طور مستقیم از حجم بارش استفاده شد، به تبدیل مقیاس نیازی نبود و ضریب ۰/۲۷۸ از رابطه استدلالی حذف شد. مقیاس زمانی استفاده‌شده برای گام ۳۰

مختصات نقاط پیرامون هر قسمت از محدوده همزمان تمرکز در سیستم مختصات جغرافیایی به‌صورت طول و عرض جغرافیایی با دقت زیاد با استفاده از G.I.S به دست آمد. مختصات یادشده به‌صورت برنامه اجرایی برای نرم‌افزار رادار نوشته شد (شکل ۲). پس از اجرای این برنامه در محیط نرم‌افزار رادار و با استفاده از داده‌های خام رادار، مجموع بارش، میانگین بارش، میانگین رواناب و حجم کل رواناب برای گام زمانی ۳۰ دقیقه، برای هریک از قسمت‌های همزمان تمرکز، از ابتدا تا پایان هر بارش به دست آمد (شکل ۱ ب).

۲/۷۱ - ۰/۵=۲/۲۱ به دست آمد. در مرحله دوم با داشتن زمان تمرکز جدید و شیب حوضه، طول رودخانه اصلی بر مبنای زمان تمرکز جدید به دست آمد و اختلاف آن با طول اولیه رودخانه، فاصله مکانی زمان تمرکز ۳۰ دقیقه حوضه را تا خروجی مشخص کرد. سپس مساحت بالادست نقطه جدید محاسبه و از مساحت اولیه حوضه جدا شد. در واقع اختلاف مساحت به دست آمده به سمت خروجی زمان تمرکز ۳۰ دقیقه دارد. با همین روش فایل (پلیگون) همزمان، تمرکز حوضه رامیان با گام زمانی ۳۰ دقیقه تا دورترین فاصله نسبت به خروجی به دست آمد و حوضه به شش قسمت تبدیل شد (شکل ۱ الف).



شکل ۱. الف: همزمان تمرکز حوضه رامیان با گام زمانی ۳۰ دقیقه؛ ب: یک نمونه محاسبه بارش رادار بر فراز حوضه (۸ خرداد ۹۳)؛ (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۸)

```
<?xml version="1.0"?>
<table2d refid="area" >
<table1d refid="area" >
<name>Ramian-30min</name>
<cell refid="threshold06" > 10.0 15.0 20.0</cell>
<cell refid="threshold12" > 20.0 30.0 40.0</cell>
<cell refid="threshold24" > 30.0 45.0 60.0</cell>
<cell refid="threshold72" > 70.0 100.0 130.0</cell>
<cell refid="lon" >55.0901967837 55.0910893528999 55.092855634 ..... 55.0901967837 55.0901967837</cell>
<cell refid="lat" >36.98457529 36.9883224702999 36.9933618506999 ..... 36.98457529 36.98457529</cell>
</table1d>
</table2d>
```

شکل ۲. نمونه فایل اجرایی در نرم‌افزار رادار برای مشخص کردن پیرامون حوضه (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۸)

شدت بارش برای کل حوضه یکسان فرض می‌شود. در واقع توزیع فضایی و مکانی، شدت و مدت بارش

در روش استدلالی که با عنوان روش مدت - مساحت شناخته می‌شود، برای برآورد بیشینه رواناب،

همزمان تمرکز ۶۰ دقیقه باریده است نیز، از خروجی حوضه عبور خواهد کرد و در ایجاد رواناب نقش خواهد داشت؛ بنابراین بیشینه رواناب برای گام‌های زمانی ۳۰ دقیقه‌ای متوالی از روابط زیر به دست خواهد آمد (رابطه ۵ تا ۸):

$$Q_{30} = C \times \frac{(A_{30}i_{30})}{1800} \quad Q_{60} = C \times \frac{(A_{30}i_{60} + A_{60}i_{30})}{1800} \quad \text{و} \quad (۵)$$

$$Q_{90} = C \times \frac{(A_{30}i_{90} + A_{60}i_{60} + A_{90}i_{30})}{1800}$$

$$Q_{120} = C \times \frac{(A_{30}i_{120} + A_{60}i_{90} + A_{90}i_{60} + A_{120}i_{30})}{1800} \quad (۶)$$

$$Q_{150} = C \times \frac{(A_{30}i_{150} + A_{60}i_{120} + A_{90}i_{90} + A_{120}i_{60} + A_{150}i_{30})}{1800} \quad (۷)$$

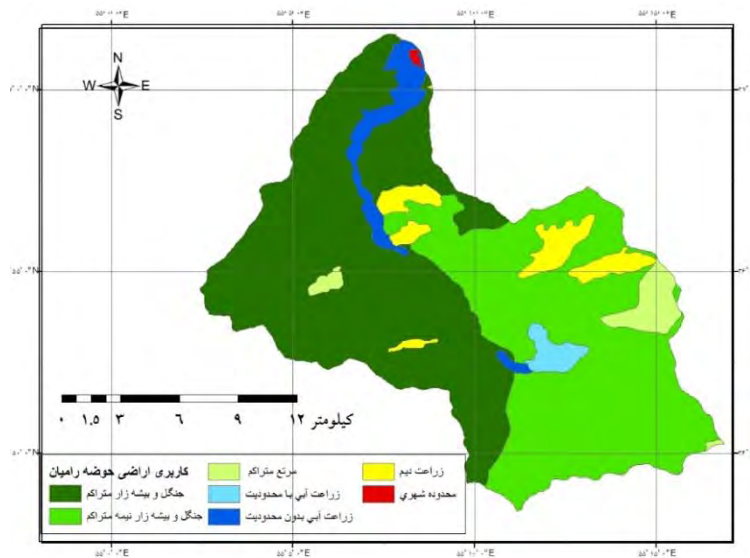
$$\frac{Q_{163}}{C} = \frac{(A_{30}i_{163} + A_{60}i_{150} + A_{90}i_{120} + A_{120}i_{90} + A_{150}i_{60} + A_{163}i_{30})}{1800} \quad (۸)$$

مقدار ضریب رواناب با توجه به مقدار و نوع پوشش گیاهی و مقدار متوسط شیب حوضه در بخش‌های مختلف آن به روش زیر محاسبه شد (مقدار متوسط ضریب رواناب در حوضه‌های مختلف مطابق با جدول (۱) در نظر گرفته می‌شود):

جدول ۱. ضریب رواناب در حوضه‌های مختلف (علیزاده، ۱۳۹۱: ۵۸۱)

شیب زمین برحسب درصد			نوع پوشش سطح حوضه
۱۰ - ۳۰	۵ - ۱۰	۰ - ۵	
۰/۲۲	۰/۱۶	۰/۱	خاک شنی لومی
۰/۴۲	۰/۳۶	۰/۳	خاک رسی لومی
۰/۶۰	۰/۵۵	۰/۴	خاک رسی سنگین
۰/۳	۰/۲۵	۰/۱	خاک شنی لومی
۰/۵	۰/۳۵	۰/۳	خاک رسی لومی
۰/۶	۰/۵۰	۰/۴	خاک رسی سنگین
۰/۵۲	۰/۴	۰/۳	خاک شنی لومی
۰/۷۲	۰/۶	۰/۵	خاک رسی لومی
۰/۸۲	۰/۷	۰/۶	خاک رسی سنگین
	۰/۵	۰/۴	۳۰٪ آسفالت
	۰/۶۵	۰/۵۵	۵۰٪ آسفالت
	۰/۸۰	۰/۶۵	۷۰٪ آسفالت

متغیر است. در این پژوهش از داده‌های پوششی رادار با درجه تفکیک مکانی (رزولوشن) ۵۰۰ متر و گام زمانی ۱۵ دقیقه استفاده شد که در مقایسه با روش مدت - مساحت دقت زیادی داشت. در این روش، رادار متوسط بارش ۱۵ دقیقه‌ای را برای هریک از بخش‌های همزمان تمرکز حوضه محاسبه کرد و سپس با جمع مقدار بارش در دو گام ۱۵ دقیقه‌ای متوالی، مجموع بارش در گام زمانی ۳۰ دقیقه به دست آمد. دقت این روش نسبت به روش مدت - مساحت بسیار بیشتر است و این در بارش‌های همرفتی که تغییرات زیادی دارند، بسیار مهم است. می‌توان از آن با عنوان شدت - مدت - مساحت نام برد. با شروع بارش پس از ۳۰ دقیقه، فقط بارش در بخش همزمان تمرکز، ۳۰ دقیقه در ایجاد رواناب دخالت دارد و بارش سایر بخش‌ها هنوز به خروجی حوضه نرسیده است. پس از ۶۰ دقیقه، علاوه بر بارش منحنی همزمان تمرکز ۳۰ دقیقه دوم که در قسمت اول باریده است، بارشی که در زمان ۳۰ دقیقه اول در بخش دوم



شکل ۳. نقشه کاربری اراضی حوضه رامیان

بنابراین در موارد اختلاف مقدار بیشینه رواناب شبیه‌سازی با بیشینه دبی واقعی، می‌بایست ضریب رواناب حوضه تغییر می‌یافت تا رواناب بیشینه شبیه‌سازی با دبی برابر می‌شد. این کار با تغییر ضریب رواناب به روش آزمون و خطا انجام و مقدار بیشینه رواناب با دبی برابر شد.

از نقشه کاربری اراضی حوضه (شکل ۳) مشخص شد ۱۰/۱۷ درصد مساحت حوضه اراضی کشاورزی، ۲/۶ درصد آن مرتع، ۸۷/۱ درصد آن پوشش جنگلی و ۰/۱۳ درصد نیز مسکونی بوده است. با در نظر گرفتن دامنه شیب حوضه در بخش‌های مختلف و با توجه به نوع خاک حوضه که جزو گروه خاک‌های سبک محسوب می‌شود، مقدار تقریبی ضریب رواناب به روش

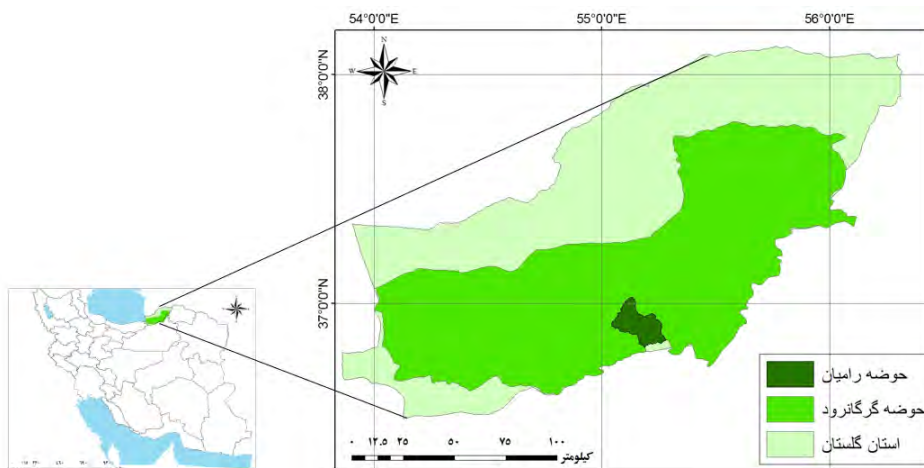
محدوده پژوهش

این پژوهش در حوضه رامیان از زیرحوضه‌های گرگان‌رود انجام شد. مساحت این حوضه ۲۴۵ کیلومترمربع و محیط آن ۸۰/۳ کیلومترمربع است. طول رودخانه اصلی آن ۳۱/۸ کیلومترمربع، بیشترین ارتفاع رودخانه اصلی آن ۲۲۸۳ کیلومترمربع، کمترین ارتفاع آن ۱۹۹ متر و شیب متوسط رودخانه اصلی آن ۶/۶ درصد است (شکل ۴). زمان تمرکز حوضه به سه روش کالیفرنیا، کریچ و چاو به ترتیب برابر با ۲/۶۹، ۲/۷۳ و ۲/۵۳ ساعت و ضریب فشردگی آن ۱/۴۴ است.

میانگین وزنی به صورت زیر محاسبه شد (رابطه ۹):

$$\frac{[(10 \cdot 17 \times 0 \cdot 3) + (2 \cdot 6 \times 0 \cdot 16) + (87 \cdot 1 \times 0 \cdot 25) + (0 \cdot 13 \times 0 \cdot 4)]}{100} = 0 \cdot 253 \quad (9)$$

این ضریب به مثابه پیش فرض در رابطه استدلالی (رابطه ۴) به کار گرفته شد. با استفاده از داده‌های پوششی رادار برای مساحت‌های همزمان تمرکز ۳۰ دقیقه‌ای، مقدار بیشینه رواناب حوضه برای بارش‌های مختلف به دست آمد و با دبی بیشینه مشاهداتی مقایسه شد. در این پژوهش حجم بارش منحنی‌های همزمان تمرکز با استفاده از داده‌های پوششی رادار برآورد و در رابطه (۴) جایگزین شد؛



شکل ۴. موقعیت جغرافیایی حوضه‌ی رامیان

یافته‌های پژوهش

در این پژوهش ۱۲ بارش بین سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۶ واکاوی شد؛ بارش‌هایی که در حوضه‌ی رامیان موجب افزایش رواناب شد و داده‌های رادار آنها نیز در دسترس بود. به ترتیب تاریخ رخداد، نخست ۵ بارش شدید با دبی بیشینه‌ی بیش از ۱۰۰ مترمکعب بر ثانیه و سپس سایر بارش‌ها با دبی بیشینه‌ی کمتر از ۱۰۰ مترمکعب بر ثانیه واکاوی شدند. در این بارش‌ها بیشینه‌ی رواناب از رابطه‌ی استدلالی تغییر یافته (رابطه‌ی ۴) به دست آمد. حجم کل بارش برآوردی رادار از ابتدا تا پایان هر بارش به دست آمد. از تقسیم حجم بارش بر سطح حوضه، ارتفاع بارش برآوردی رادار نیز محاسبه شد.

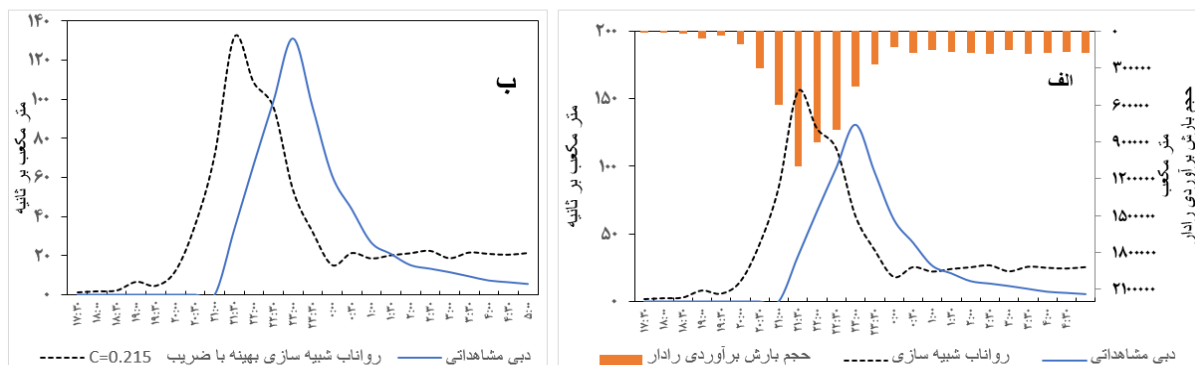
بارش ۲۶ تیرماه ۱۳۹۱ (۱۶ جون ۲۰۱۲)

بارش ۲۶ تیرماه ۱۳۹۱، یک بارش همرفتی تابستانه بود که با شروع ناگهانی موجب افزایش چشمگیر حجم بارش بر فراز حوضه شد؛ به طوری که حجم بارش برآوردی رادار به حدود دو میلیون

مترمکعب بر ساعت رسید. دبی رودخانه بیش از ۱۳۱ مترمکعب بر ثانیه شد. شبیه‌سازی بیشینه‌ی رواناب حوضه با استفاده از داده‌های رادار در رابطه‌ی استدلالی بیش از دبی واقعی بود (شکل ۵ الف). با جایگزینی ضریب رواناب ۰/۲۱۵ در رابطه‌ی استدلالی، مقدار رواناب شبیه‌سازی با دبی واقعی برابر شد (شکل ۵ ب). ارتفاع بارش برآوردی رادار برای دو ساعت اول حدود یک میلی‌متر (۲۴۶۰۰۰ مترمکعب) بود؛ در حالی که هیچ افزایش در دبی دیده نشد و این مقدار بارش صرف برگاب و افزایش رطوبت سطح خاک حوضه شد. با تداوم بارش به تدریج افزایش رواناب رخ داد. رادار حجم کل این بارش را ۷۸۱۰۹۷۶ مترمکعب در مدت ده ساعت برآورد کرد. مجموع ارتفاع بارش برآوردی حوضه ۳۱/۹ میلی‌متر بود. بخش زیادی از این بارش در مدت چهار ساعت رخ داد که موجب افزایش دبی حوضه شد. پس از ساعت ۲۱:۳۰ رواناب شبیه‌سازی بیش از دبی واقعی دیده شد. واکاوی داده‌های پوششی رادار نشان داد پراکنش بارش در سرتاسر حوضه تقریباً یکنواخت و بنابراین

شبیه‌سازی شده رادار و بیشینه دبی مشاهداتی برای این بارش ۹۰ دقیقه بود.

شدت بارش کم بوده است (حدود ۳/۱ میلی‌متر بر ساعت) و باعث برآورد بیشتر رواناب شبیه‌سازی از دبی واقعی شد. تأخیر زمانی بین بیشینه رواناب



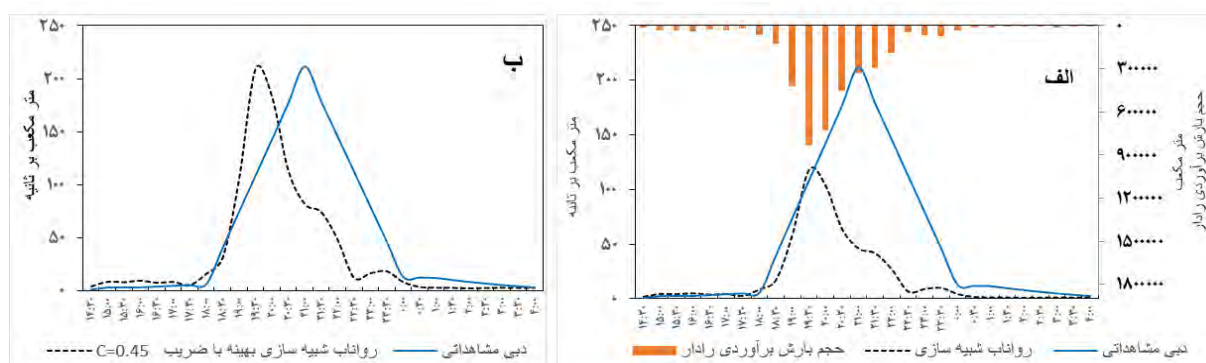
شکل ۵. الف: حجم بارش برآوردی، هیدروگراف واقعی و شبیه‌سازی؛ ب: هیدروگراف واقعی و شبیه‌سازی بهینه روز ۲۶ تیرماه ۱۳۹۱ (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۸)

حوضه ۱۶/۶ میلی‌متر بود و چون در مدت کوتاهی رخ داد، به تشکیل رواناب زیادی منجر شد. یک دلیل دیگر افزایش چشمگیر دبی این بارش، وضعیت رطوبتی خاک حوضه بود؛ چون در چهار روز پیش (۲۶ تیرماه) بارش شدیدی در حوضه رخ داده بود؛ بنابراین سطح خاک حوضه مرطوب بود و با دریافت مقدار کمتری بارش به اشباع رسید. در نتیجه مقدار بیشینه رواناب ایجاد شده بیش از حد انتظار بود (در قیاس با بارش سیل ۲۶ تیرماه ۱۳۹۱).

شبیه‌سازی مقدار رواناب با استفاده از داده‌های پوششی رادار، مقدار بیشینه رواناب را کمتر از دبی واقعی نشان داد. با جایگزینی ضریب رواناب ۰/۴۵ در رابطه استدلالی، مقدار بیشینه رواناب با مقدار دبی مشاهداتی برابر شد. فاصله زمانی بین بیشینه رواناب شبیه‌سازی شده و دبی مشاهداتی، ۶۰ دقیقه بود.

بارش ۳۰ تیرماه ۱۳۹۱ (۲۰ جون ۲۰۱۲)

بارش ۳۰ تیرماه ۱۳۹۱ نیز یک بارش همرفتی تابستانه بود که به‌طور ناگهانی شروع شد و مقدار حجم بارش برآوردی آن بر فراز حوضه به یک‌باره افزایش چشمگیری یافت. مقدار بیشینه حجم آب برآوردی رادار یک میلیون و ۶۰۰ هزار مترمکعب بر ساعت بود که موجب ایجاد رواناب ۲۱۱ مترمکعب بر ثانیه شد (شکل ۶). رادار ارتفاع بارش برآوردی را در دو ساعت اول حدود ۰/۷ میلی‌متر (۱۷۶۰۰۰ مترمکعب) نشان داد که در این مدت هیچ افزایشی در دبی رخ نداد و این مقدار بارش در نتیجه برگاب و افزایش رطوبت خاک حوضه از چرخه تشکیل رواناب خارج شد. رادار کل حجم این بارش را ۴۰۵۷۷۶۵ مترمکعب برآورد کرد که در مدت شش ساعت رخ داد. ارتفاع بارش برآوردی رادار بر فراز

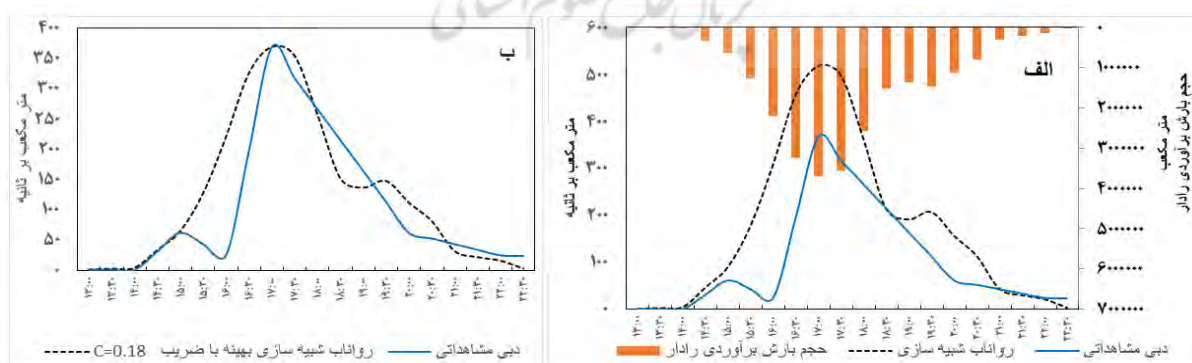


شکل ۶. الف: حجم بارش برآوردی، هیدروگراف واقعی و شبیه‌سازی؛ ب: هیدروگراف واقعی و شبیه‌سازی بهینه روز ۳۰ تیرماه ۱۳۹۱ (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۸)

بارش را به ترتیب ۷۱ و ۴۴ میلی‌متر بر ساعت نشان داد. مجموع حجم بارش برآوردی رادار در این مدت ۲۶۸۰۳۷۵۶ مترمکعب شد. ارتفاع بارش برآوردی رادار بر فراز حوضه بیش از ۱۰۹ میلی‌متر بود. در شبیه‌سازی بیشینه رواناب به کمک داده‌های پوششی رادار در رابطه استدلالی، مقدار بیشینه رواناب بیش از دبی واقعی بود؛ بنابراین با جایگزینی ضریب $0/18$ در رابطه استدلالی، بیشینه رواناب شبیه‌سازی سیل برابر با بیشینه دبی مشاهداتی شد (شکل ۷ ب). بیشینه رواناب برآوردی حوضه با بیشینه دبی مشاهداتی همزمان بود و تأخیر زمانی نداشت.

بارش ۸ خردادماه ۱۳۹۳ (۲۵ می ۲۰۱۴)

بارش ۸ خردادماه ۱۳۹۳، یک بارش همرفتی بسیار شدید بود که موجب افزایش بسیار زیاد رواناب حوضه شد. دبی بیشینه مشاهداتی حوضه ۳۶۷ مترمکعب بر ثانیه بود. علاوه بر شدت، مدت‌زمان بارش نیز بیش از پنج ساعت بود. مقدار بیشینه بارش برآوردی رادار نزدیک به هفت میلیون مترمکعب بر ساعت بود. شدت بیشینه بارش حوضه حدود ۲۸ میلی‌متر بر ساعت برآورد شد (شکل ۷ الف). البته واکاوی جزئیات داده‌های پوششی رادار برای منحنی همزمان تمرکز ۳۰ دقیقه و ۹۰ دقیقه، بیشینه شدت

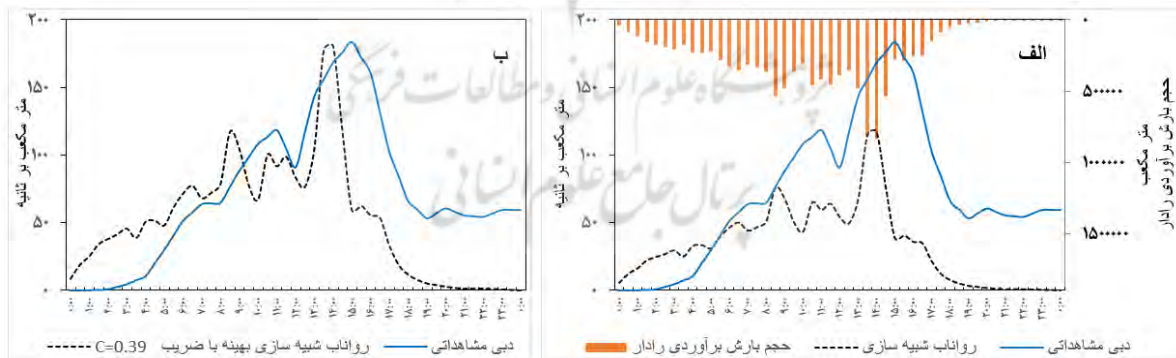


شکل ۷. الف: حجم بارش برآوردی، هیدروگراف واقعی و شبیه‌سازی؛ ب: هیدروگراف واقعی و شبیه‌سازی بهینه روز ۸ خردادماه ۱۳۹۳ (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۸)

بارش ۲۹ فروردین ماه ۱۳۹۵ (۱۷ آوریل ۲۰۱۶)

بارش ۲۹ فروردین ماه ۱۳۹۵، یک بارش شدید بهاری بود که ۲۴ ساعت ادامه داشت. رادار مجموع بارش را در این مدت ۱۱۶۸۱۸۲۷ مترمکعب برآورد کرد که ارتفاع بارش حوضه، ۴۷/۷ میلی‌متر بود. نکته جالب این بارش این بود که با شدت کمتری شروع شد و شدت آن با گذشت زمان افزایش یافت. در دو ساعت اول بارش با وجود اینکه رادار ارتفاع بارش را ۲/۳ میلی‌متر (۵۷۰۰۰۰ مترمکعب) برآورد کرد، ولی افزایش دبی بسیار ناچیز بود. این مقدار بارش صرف برگاب و مرطوب کردن حوضه شد. شدت کمتر بارش در ساعات اولیه موجب مرطوب شدن و اشباع خاک حوضه شد و رواناب به تدریج افزایش یافت. پس از گذشت چهارده ساعت از آغاز بارش، شدت آن افزایش چشمگیری یافت و مقدار بیشینه حجم بارش به حدود یک میلیون و ۶۰۰ هزار مترمکعب در ساعت رسید. بیشینه دبی مشاهداتی

سیل به ۱۸۵ مترمکعب بر ثانیه رسید (شکل ۸ الف)؛ بنابراین در قیاس با بارش ۲۶ تیرماه که با مقدار دو میلیون مترمکعب بر ثانیه فقط ۱۳۱ مترمکعب بر ثانیه دبی بیشینه داشت، مقدار رواناب بیشینه این سیل بیشتر بود. این افزایش بیشینه رواناب تأثیر رطوبت پیشین خاک حوضه را در ایجاد رواناب نشان داد؛ زیرا پیش از اینکه بیشینه شدت بارش رخ دهد، به دلیل تداوم بارش، خاک حوضه کاملاً مرطوب و اشباع شده بود و درصد زیادی از افزایش بارش به رواناب تبدیل شد. شبیه‌سازی بیشینه رواناب به کمک داده‌های پوششی رادار در رابطه استدلالی، بیشینه رواناب را ۱۱۷ مترمکعب بر ثانیه نشان داد که کمتر از دبی واقعی بود؛ بنابراین با جایگزینی ضریب ۰/۳۹ در رابطه استدلالی، مقدار بیشینه رواناب شبیه‌سازی با مقدار بیشینه دبی برابر شد (شکل ۸ ب). بیشینه دبی مشاهداتی ۶۰ دقیقه پس از مقدار بیشینه شبیه‌سازی رخ داد.



شکل ۸ الف: حجم بارش برآوردی، هیدروگراف واقعی و شبیه‌سازی؛ ب: هیدروگراف واقعی و شبیه‌سازی بهینه روز ۲۹ فروردین ماه ۱۳۹۵ (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۸)

بارش ۲۰ مردادماه ۱۳۹۶ (۱۱ آگوست ۲۰۱۷)

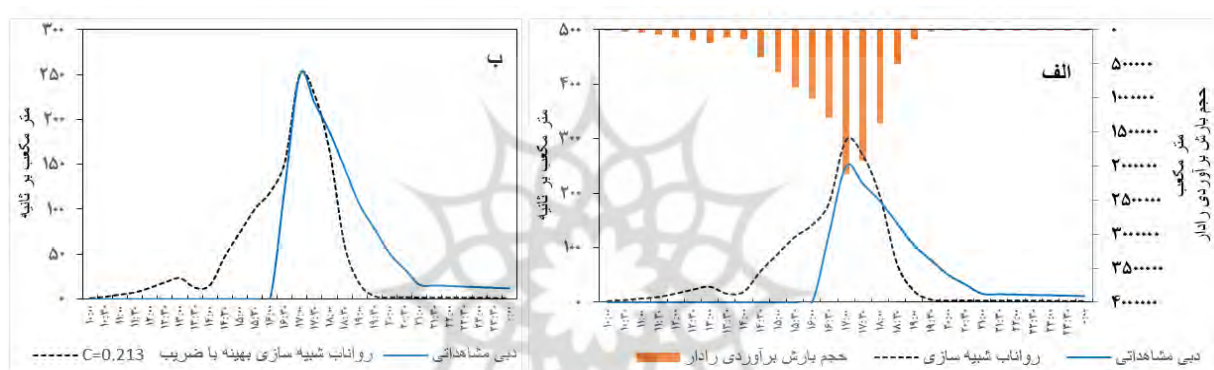
بارش ۲۰ مردادماه ۱۳۹۶، یک بارش همرفتی تابستانه بود که موجب افزایش دبی حوضه به مقدار

۲۵۰ مترمکعب بر ثانیه شد. رادار مجموع بارش را در مدت پنج ساعت، ۱۱۲۴۵۴۵۸ مترمکعب برآورد کرد و ارتفاع بارش برآوردی رادار برای حوضه، ۴۵/۹

مرطوب‌کردن خاک خشک حوضه از چرخه تولید رواناب خارج شد. رادار شبیه‌سازی بیشینه رواناب را با رابطه استدلالی بیش از دبی واقعی نشان داد؛ بنابراین با جایگزینی ضریب $0/213$ در رابطه استدلالی، مقدار بیشینه رواناب شبیه‌سازی با بیشینه دبی مشاهداتی برابر شد (شکل ۹ ب). بیشینه رواناب شبیه‌سازی با استفاده از داده‌های پوششی رادار با بیشینه دبی مشاهداتی همزمان بود.

میلی‌متر بود. مقدار بیشینه بارش برآوردی رادار حدود چهار میلیون مترمکعب بر ساعت ($16/5$ میلی‌متر بر ساعت) بود (شکل ۹ الف). بیشینه شدت بارش در منحنی همزمان تمرکز، 120 دقیقه و به مقدار 21 میلی‌متر بر ساعت برآورد شد.

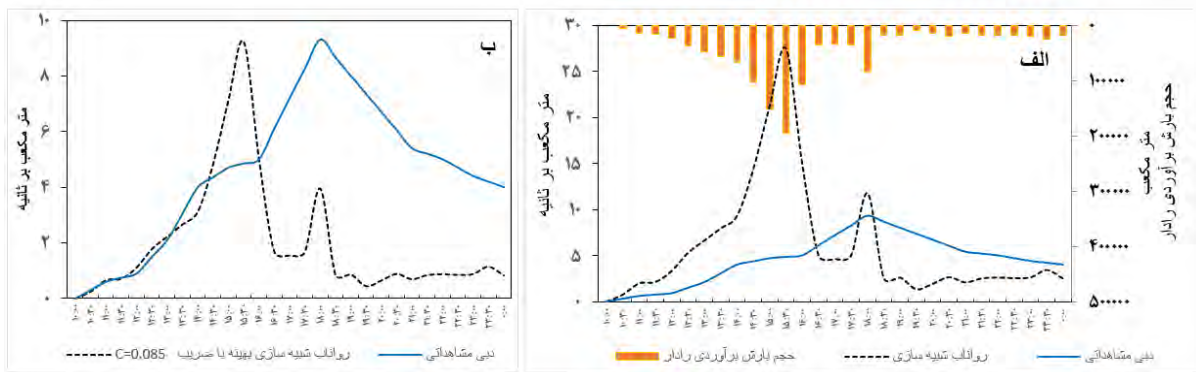
در دو ساعت آغازین بارش، با وجود اینکه رادار به‌طور متوسط $5/1$ میلی‌متر (1250000 مترمکعب) بارش را بر فراز حوضه برآورد کرد، تغییراتی در دبی واقعی دیده نشد. این بارش در نتیجه برگاب و



شکل ۹. الف: حجم بارش برآوردی، هیدروگراف واقعی و شبیه‌سازی؛ ب: هیدروگراف واقعی و شبیه‌سازی بهینه روز ۲۰ مردادماه ۱۳۹۶ (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۸)

رواناب شبیه‌سازی با دبی واقعی حوضه برابر شد (شکل ۱۰ ب). رادار مقدار کل حجم این بارش را 1196207 مترمکعب در مدت چهارده ساعت برآورد کرد. ارتفاع بارش برآوردی رادار در این مدت $4/9$ میلی‌متر بود. افزایش دبی رودخانه به دلیل افزایش شدت بارش بود و به مقدار 400 هزار مترمکعب بر ساعت رسید. دبی بیشینه مشاهداتی حدود 150 دقیقه پس از بیشینه رواناب شبیه‌سازی رخ داد.

بارش ۲۵ اسفندماه ۱۳۹۰ (۱۳ مارس ۲۰۱۳) بارش ۲۵ اسفندماه ۱۳۹۰، بارشی شدید بود. بیشینه مقدار حجم بارش برآوردی رادار 400 هزار مترمکعب بر ساعت بود که موجب افزایش در مقدار دبی حوضه تا 9 مترمکعب بر ثانیه شد. در شبیه‌سازی بیشینه رواناب با استفاده از داده‌های پوششی رادار، مقدار بیشینه رواناب بیش از مقدار دبی واقعی به دست آمد (شکل ۱۰ الف)؛ بنابراین با جایگزینی ضریب رواناب $0/085$ در رابطه استدلالی، مقدار

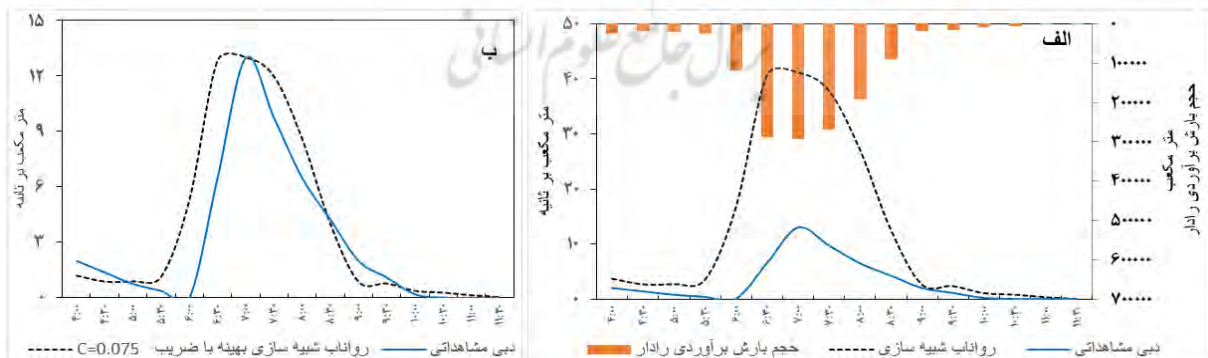


شکل ۱۰. الف: حجم بارش برآوردی، هیدروگراف واقعی و شبیه‌سازی؛ ب: هیدروگراف واقعی و شبیه‌سازی بهینه روز ۲۵ اسفندماه ۱۳۹۰ (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۸)

حوضه مرطوب باشد. اتلاف بارش بیشتر به دلیل برگاب بود. بیشینه دبی این بارش ۱۳ مترمکعب بر ثانیه بود. در شبیه‌سازی بیشینه رواناب با داده‌های پوششی رادار، مقدار بیشینه رواناب بیش از دبی مشاهداتی بود (شکل ۱۱ الف). با جایگزینی ضریب 0.075 در رابطه استدلالی، بیشینه رواناب شبیه‌سازی با دبی مشاهداتی برابر شد (شکل ۱۱ ب). زمان رخداد بیشینه دبی مشاهداتی ۳۰ دقیقه با بیشینه رواناب شبیه‌سازی اختلاف داشت.

بارش ۳۱ تیرماه ۱۳۹۱ (۲۱ جون ۲۰۱۲)

بارش ۳۱ تیرماه ۱۳۹۱، یک بارش شدید تابستانه بود. رادار، بیشینه حجم بارش برآوردی این بارش را حدود ۶۰۰ هزار مترمکعب بر ساعت برآورد کرد. رادار مجموع حجم این بارش را 1607927 مترمکعب برآورد کرد که در مدت پنج ساعت رخ داد. در دو ساعت اول بارش، رادار ارتفاع بارش را 0.84 میلی‌متر (207000 مترمکعب) برآورد کرد، ولی اثر افزایشی بر دبی نداشت. البته چون روز قبل در حوضه بارش شدید رخ داده بود، انتظار بر این بود که خاک

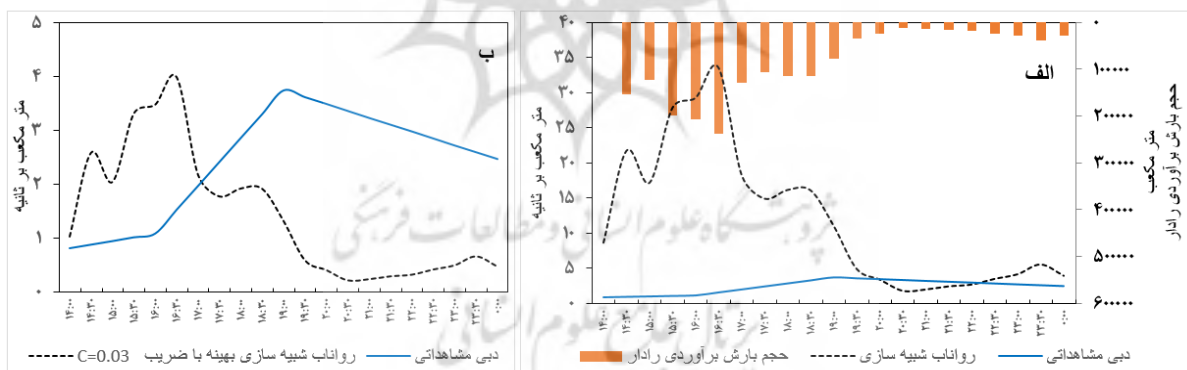


شکل ۱۱. الف: حجم بارش برآوردی، هیدروگراف واقعی و شبیه‌سازی؛ ب: هیدروگراف واقعی و شبیه‌سازی بهینه روز ۳۱ تیرماه ۱۳۹۱ (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۸)

بارش ۳ مهرماه ۱۳۹۱ (۲۴ سپتامبر ۲۰۱۲)

به‌تناوب بین ۲۰ تا ۳۰ میلی‌متر بارش ثبت شده بود؛ در حالی که مجموع تبخیر ده‌روزه سه ایستگاه هواشناسی علی‌آباد، گنبد کاووس و کلاله به ترتیب ۴۲، ۵۴ و ۶۲ میلی‌متر بود؛ بنابراین خاک حوضه خشک بود و با این حجم بارش به زمان زیادی نیاز داشت تا به اشباع برسد و ایجاد رواناب کند؛ به همین دلیل اندک رواناب ایجاد شده با تأخیر ۱۵۰ دقیقه‌ای نسبت به رواناب شبیه‌سازی از خروجی حوضه عبور کرد. در نتیجه باید انتظار داشت ضریب رواناب کوچک باشد. در شبیه‌سازی، بیشینه رواناب با دبی واقعی اختلاف زیادی داشت و بسیار بیشتر از مقدار واقعی بود که با جایگزینی ضریب ۰/۰۳ در رابطه استدلالی، مقدار رواناب شبیه‌سازی با دبی برابر شد (شکل ۱۲ ب).

بارش ۳ مهرماه ۱۳۹۱ با شدت نسبتاً خوبی آغاز شد. بیشینه حجم بارش برآوردی رادار حدود ۴۰۰ هزار مترمکعب بر ساعت بود. حجم کل بارش برآوردی رادار برای این بارش، ۱۷۰۶۱۸۰ مترمکعب بود که در مدت ۱۰ ساعت برآورد شد. دبی مشاهداتی آن در مقایسه با حجم بارش برآوردی رادار کم بود (شکل ۱۲ الف). در دو ساعت اول بارش، رادار مجموع بارش را ۳/۰۳ میلی‌متر برآورد کرد؛ ولی افزایش دبی بسیار ناچیز بود. این اختلاف در افزایش رواناب به دلیل وجود برگاب و خاک نسبتاً خشک حوضه در این موقع از سال بود. واکاوی داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی پیرامون حوضه نشان داد از زمان آخرین بارش بیش از ۱۰ روز گذشته بود. از تاریخ ۱۲ تا ۲۳ شهریورماه ۱۳۹۱ به‌طور متوسط و



شکل ۱۲. الف: حجم بارش برآوردی، هیدروگراف واقعی و شبیه‌سازی؛ ب: هیدروگراف واقعی و شبیه‌سازی بهینه روز ۳ مهرماه ۱۳۹۱ (منبع: نویسنده‌گان، ۱۳۹۸)

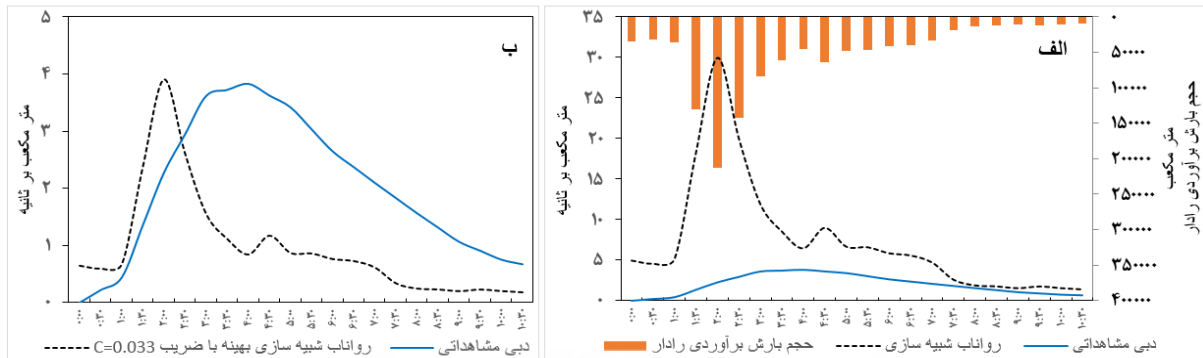
بارش ۵ اردیبهشت‌ماه ۱۳۹۲ (۲۵ آوریل ۲۰۱۳)

ساعت به ثبت رسید. بیشینه حجم بارش برآوردی رادار برای این بارش حدود ۴۰۰ هزار مترمکعب در ساعت بود؛ ولی چون در ادامه شدت آن کم شد، افزایش رواناب خوبی ایجاد نکرد. به دلیل اتلاف بارش در فرایند برگاب، یک ساعت اول مجموع بارش برآوردی

بارش ۵ اردیبهشت‌ماه ۱۳۹۲ با شدت خوبی آغاز شد؛ ولی حدود یک ساعت بعد شدت آن کاهش چشمگیری یافت (شکل ۱۳ الف). حجم کل بارش برآوردی رادار ۱۲۸۰۸۰۳ مترمکعب بود و در مدت ۱۱

از داده‌های پوششی رادار بسیار بیشتر از دبی واقعی بود (شکل ۱۳ الف)؛ بنابراین با جایگزینی ضریب 0.033 در رابطه استدلالی، مقدار بیشینه رواناب شبیه‌سازی با بیشینه دبی مشاهداتی برابر شد (شکل ۱۳ ب).

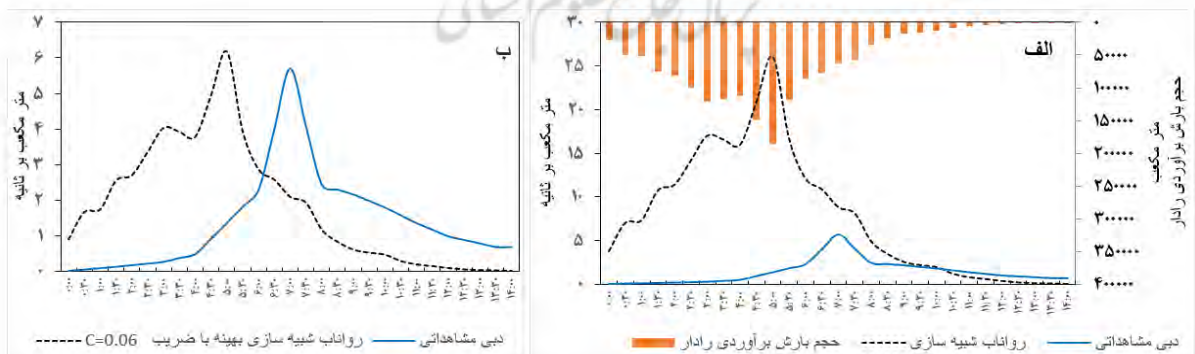
رادار 0.4 میلی‌متر بود که در این مدت افزایشی در دبی رخ نداد. بیشینه دبی مشاهداتی آن در حدود 4 مترمکعب بر ثانیه بود و 90 دقیقه پس از بیشینه رواناب شبیه‌سازی رخ داد. بیشینه رواناب شبیه‌سازی با استفاده



شکل ۱۳. الف: حجم بارش برآوردی، هیدروگراف واقعی و شبیه‌سازی؛ ب: هیدروگراف واقعی و شبیه‌سازی بهینه روز ۵ اردیبهشت‌ماه ۱۳۹۲ (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۸)

مدت 13 ساعت به ثبت رسید. بیشینه دبی مشاهداتی 120 دقیقه پس از بیشینه رواناب شبیه‌سازی رخ داد. مقدار بیشینه رواناب شبیه‌سازی به کمک داده‌های پوششی رادار بیش از دبی واقعی بود (شکل ۱۴ الف). با جایگزینی ضریب رواناب 0.06 در رابطه استدلالی، مقدار دبی مشاهداتی با رواناب شبیه‌سازی برابر شد (شکل ۱۴ ب).

بارش 25 آذرماه 1394 (16 دسامبر 2015) شدت بارش 25 آذرماه 1394 به تدریج افزایش یافت و مقدار بیشینه حجم بارش برآوردی رادار برای این بارش پس از گذشت پنج ساعت به مقدار 350 هزار مترمکعب بر ساعت رسید و به سرعت از شدت آن کاسته شد (شکل ۱۴ الف). رادار مجموع بارش را 1550269 مترمکعب برآورد کرد که در



شکل ۱۴. الف: حجم بارش برآوردی، هیدروگراف واقعی و شبیه‌سازی؛ ب: هیدروگراف واقعی و شبیه‌سازی بهینه روز ۲۵ آذرماه 1394 (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۸)

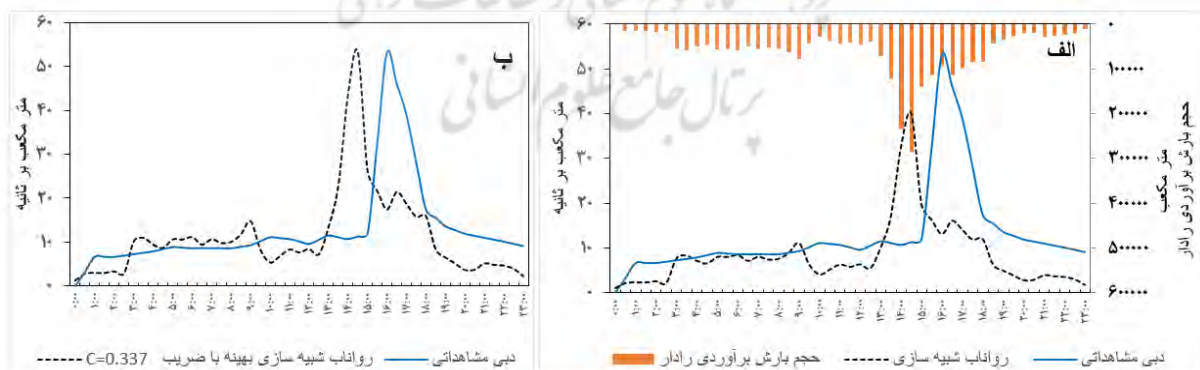
بارش ۲۰ دی‌ماه ۱۳۹۴ (۱۰ ژانویه ۲۰۱۶)

شدت بارش ۲۰ دی‌ماه ۱۳۹۴ در ۱۳ ساعت آغازین نسبتاً خوب بود. حجم بارش برآوردی رادار در این مدت حدود ۱۰۰ هزار مترمکعب بر ساعت بود. سپس یک افزایش ناگهانی در حجم بارش برآوردی دیده شد و مقدار بیشینه حجم بارش برآوردی به بیش از ۵۶۰ هزار مترمکعب بر ساعت رسید (شکل ۱۵ الف). حجم کل بارش برآوردی رادار ۲۲۰۹۵۶۰ مترمکعب بود که در مدت ۲۴ ساعت به ثبت رسید. بیشینه دبی مشاهداتی این بارش ۵۳ مترمکعب بر ثانیه بود که در قیاس با حجم بارش برآوردی رادار و نسبت به بارش‌های مشابه، افزایش بیشتری را نشان داد. برای توضیح آن به دو نکته زیر باید توجه کرد:

۱. پیش از آنکه بارش به مقدار بیشینه برسد، برای ساعات زیادی با شدت کمتری در حوضه دیده شد که به افزایش جزئی دبی حوضه نیز انجامید. این خود دلیلی بر اشباع‌شدن خاک حوضه بود؛ بنابراین در زمانی که شدت بارش زیاد شد، خاک حوضه کاملاً

اشباع بود و تمامی افزایش بارش صرف ایجاد رواناب شد.

۲. در واکاوی بیشتر مشخص شد در مدت یک هفته پیش از این بارش، در حوضه و پیرامون آن بارش‌های چشمگیری رخ داده است (جدول ۲). مجموع تبخیر یک هفته پیش در چهار ایستگاه هواشناسی گنبد کاووس، کلاله، مینودشت و علی‌آباد که پیرامون حوضه جا دارند، به ترتیب ۱۲/۶، ۹/۴، ۱۲/۵ و ۱۱/۳ میلی‌متر و کمتر از متوسط بارش بود. این هم دلیل دیگری بر این ادعاست که خاک حوضه از پیش هم خشک نبوده و رطوبت کافی داشته است و با شروع بارش هرچند با شدت کم، افزایش رواناب در حوضه دیده شد. بیشینه دبی مشاهداتی ۹۰ دقیقه پس از بیشینه رواناب شبیه‌سازی رخ داد. شبیه‌سازی بیشینه رواناب با استفاده از رابطه استدلالی و به کمک داده‌های پوششی رادار کمتر از دبی واقعی بود (شکل ۱۵ الف). با جایگزینی ضریب ۰/۳۳۷ در رابطه استدلالی، مقدار دبی مشاهداتی با رواناب شبیه‌سازی برابر شد (شکل ۱۵ ب).



شکل ۱۵. الف: حجم بارش برآوردی، هیدروگراف واقعی و شبیه‌سازی؛ ب: هیدروگراف واقعی و شبیه‌سازی بهینه روز

۲۰ دی‌ماه ۱۳۹۴ (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۸)

جدول ۲. مجموع بارش ایستگاه‌های پیرامون حوضه از ۱۳ تا ۱۹ دی‌ماه ۱۳۹۴

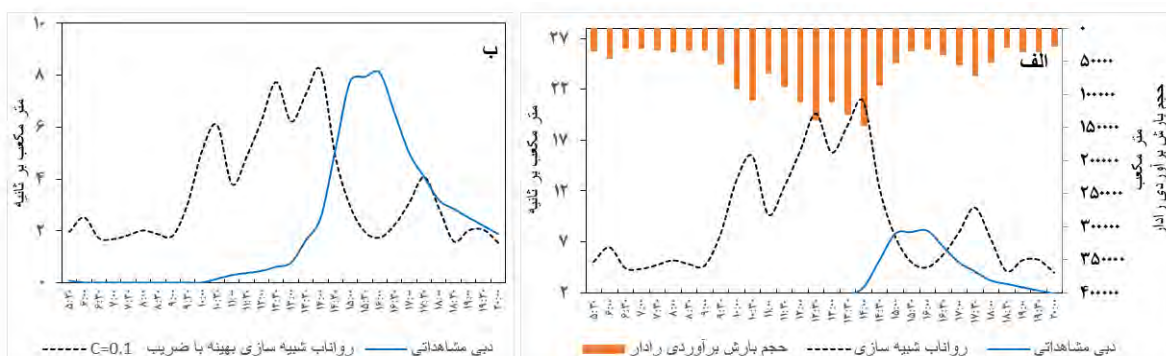
بارش میلی‌متر	طول	عرض	نام ایستگاه	بارش میلی‌متر	طول	عرض	نام ایستگاه	بارش میلی‌متر	طول	عرض	نام ایستگاه
۴۵	۵۵/۵۸۴	۳۷/۱۲۵	دوزین	۱۹	۵۴/۷۵۸	۳۶/۹	فاضل‌آباد	۲۱	۵۴/۸۹۲	۳۶/۹	علی‌آباد
۴۰	۵۵/۶۵۳	۳۷/۲۵	آب‌پران	۱۶	۵۴/۸۵۷	۳۶/۹۵۵	مزرعه کتول	۴۰	۵۵/۳۸۳	۳۷/۲۲۴	مینودشت
۲۷	۵۵/۶۵۳	۳۷/۰۵	قلعه‌قافه	۲۲	۵۴/۹۴۳	۳۶/۹۳۴	مازیاران	۳۱	۵۵/۲	۳۷/۲۶۷	گنبد کاووس
۳۱	۵۵/۶۰۲	۳۷/۲۲۲	فارسیان	۲۸	۵۴/۷۷	۳۶/۸۷۲	محمدآباد	۴۱	۵۳/۳۸۴	۳۷/۴۵۶	کلاله
۳۸	۵۵/۶۳۸	۳۷/۲۲۴	کیارام	۲۹	۵۴/۹۵۸	۳۶/۸۸۸	زرین‌گل	۲۹	۵۵/۲۷	۳۶/۹۷۲	وطن
۳۰	۵۵/۴۳۵	۳۷/۲۷۲	گالیکش	۳۵	۵۵/۱۵	۳۷/۰۱۷	رامیان	۱۶	۵۵/۱۷۲	۳۷/۰۹	آزادشهر
۳۶	۵۵/۳۸۴	۳۷/۰۵۷	ساسنگ	۳۲	۵۵/۱۰۱	۳۶/۹۰۸	پاقلعه	۵	۵۵/۳۵	۳۶/۸۴۳	خوش‌بیلان
۳۸	۵۵/۵۲۵	۳۷/۲	توسکاچال	۱۸	۵۵/۲۵۹	۳۷/۱۵۲	قره‌چشمه	۹	۵۵/۵۵۳	۳۷/۰۰۴	وامنان

(منبع: اداره کل هواشناسی گلستان، ۱۳۹۷)

بارش ۱۰ اسفندماه ۱۳۹۴ (۲۹ فوریه ۲۰۱۶)

مشخص بود. دبی ۸ مترمکعب بر ثانیه برای بارشی که بیشینه حجم آن حدود ۲۵۰ هزار مترمکعب بر ساعت بود، اندکی بیش از حد انتظار بود؛ زیرا بارش در چند ساعت اول بسیار شدید نبود و فقط تولید برگاب و خاک حوضه را مرطوب کرد. در این مرحله هیچ روانابی تولید نشد؛ ولی در ادامه با افزایش شدت بارش، درصد بیشتری از بارش به رواناب تبدیل شد. افزایش حجم کل بارش تأثیر زیادی بر افزایش دبی رودخانه داشت. داده‌های پوششی رادار که در رابطه استدلالی برای تعیین بیشینه رواناب به کار گرفته شد، رواناب را اندکی بیش از دبی واقعی نشان داد (شکل ۱۶ الف). با جایگزینی ضریب ۰/۱ در رابطه یادشده، بیشینه رواناب شبیه‌سازی با دبی مشاهداتی برابر شد (شکل ۱۶ ب).

بارش ۱۰ اسفندماه ۱۳۹۴ در ابتدا با شدت کم شروع شد و پس از گذشت چهار ساعت افزایش یافت و حجم بارش برآوردی رادار از ساعت چهارم و به مدت شش ساعت و با مقدار بیش از ۱۰۰ هزار مترمکعب ادامه یافت. رادار حجم کل بارش را ۱۸۹۴۱۲۰ مترمکعب برآورد کرد که در مدت ۱۴ ساعت به ثبت رسید. رادار برای سه ساعت اول، ارتفاع بارش را یک میلی‌متر (۲۴۶۰۰۰ مترمکعب) برآورد کرد، ولی دبی حوضه هیچ تغییری نکرد. این مقدار بارش در نتیجه برگاب و مرطوب‌کردن خاک از چرخه ایجاد خارج شد (شکل ۱۶ الف).
با توجه به بیشینه حجم بارش برآوردی رادار، مقدار دبی مشاهداتی اندکی بیش از حد انتظار بود. این موضوع از مقایسه با بارش‌های دیگر به‌خوبی



شکل ۱۶. الف: حجم بارش برآوردی، هیدروگراف واقعی و شبیه‌سازی؛ ب: هیدروگراف واقعی و شبیه‌سازی بهینه روز ۱۰ اسفندماه ۱۳۹۴ (منبع: نویسنندگان، ۱۳۹۸)

بحث

حجم کل بارش ۲۰ دی‌ماه ۱۳۹۴ زیاد بود که در مدت ۲۴ ساعت ثبت شد؛ زیرا در ساعات اولیه، بارش با شدت کم در حوضه وجود داشت، خاک حوضه اشباع شد و در ادامه با افزایش شدت، رواناب افزایش بسیار زیادی یافت. در واقع درصد زیادی از بارشی که بر فراز حوضه باریده بود، به رواناب تبدیل شد. البته شرایط رطوبتی پیش از بارش نیز مزید بر علت بود. حجم کل بارش ۲۹ فروردین‌ماه ۱۳۹۵ نیز بسیار زیاد بود (بیش از ۱۱ میلیون مترمکعب) که در مدت ۲۱ ساعت ثبت شد. شدت بارش در ساعات اولیه کمتر بود که موجب اشباع خاک حوضه شد. در ادامه با افزایش تدریجی شدت، رواناب افزایش زیادی یافت و زمانی که افزایش ناگهانی در شدت بارش رخ داد، بیشینه رواناب افزایش چشمگیری را نشان داد که بیش از حد انتظار بود.

تأثیر حجم بارش در بارش ۱۰ اسفندماه ۱۳۹۴ نیز مشخص بود. در این تاریخ نخست بارش با حجم کمتر دیده شد و پس از گذشت چند ساعت افزایش یافت که موجب افزایش رواناب شد. در مقایسه با دو بارش ۲۹ فروردین‌ماه ۹۵ و ۲۰ دی‌ماه ۹۴، حجم این بارش کمتر بود؛ بنابراین تأثیر کمتری بر افزایش

از آنجا که در این پژوهش از داده‌های پوششی رادار استفاده شد و حجم بارش در گام زمانی ۳۰ دقیقه به دست آمد، رابطه استدلالی تغییر یافت و سپس بیشینه رواناب ۱۲ بارش در حوضه رامیان شبیه‌سازی شد. بر این اساس نتایج زیر به دست آمد. رابطه بین شدت بارش و بیشینه رواناب مستقیم بود و به‌طور کلی با افزایش شدت بارش، مقدار بیشینه رواناب افزایش یافت. در بارش‌های شدید با جایگزینی ضریب رواناب بزرگ‌تر، مقدار رواناب شبیه‌سازی با دبی واقعی برابر شد. برعکس در بارش‌هایی که شدت کمتری داشت، مقدار بیشینه رواناب کمتر از حد انتظار بود. در این بارش‌ها از ضریب رواناب کوچک استفاده و رواناب شبیه‌سازی با دبی برابر شد. تأثیر حجم بارش در ایجاد رواناب مانند شدت بارش بود. در بارش‌هایی که حجم کل آنها زیاد بود، مقدار رواناب افزایش داشت. در بارش‌های همرفتی تابستان به دلیل افزایش ناگهانی حجم بارش مقدار دبی افزایش یافت؛ ولی در سایر بارش‌ها، افزایش حجم بارش تأثیر خود را بر افزایش رطوبت خاک و اشباع شدن خاک حوضه نشان داد.

۵/۱ میلی‌متر، در بارش ۳ مهرماه ۱۳۹۲، ۳ میلی‌متر و در بارش ۲۹ فروردین‌ماه ۱۳۹۵، ۲/۳ میلی‌متر بود.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد در یک حوضه با توجه به شرایط مختلف، ضریب رواناب متفاوت است و استفاده از یک ضریب رواناب ثابت برای تعیین (پیش‌بینی) بیشینه رواناب در رابطه استدلالی قابل اعتماد نیست. مقدار رواناب و بیشینه آن علاوه بر ویژگی حوضه (شکل، شیب حوضه، مساحت و... که معمولاً ثابت‌اند) و ویژگی محیطی (پوشش گیاهی و فصل)، به شدت، مدت، حجم، پراکنش زمانی و مکانی بارش و وضعیت رطوبتی خاک حوضه نیز بستگی دارد. نکته مهم اینکه پراکنش شدت بارش بر فراز حوضه نقش بسزایی در چگونگی شکل‌گیری هیدروگراف سیل دارد. اینکه چه مقدار بارش و با چه شدتی و در کجای حوضه ببارد، برای تعیین مقدار دبی بیشینه بسیار مهم است. با استفاده از داده‌های پوششی رادار، تغییرات زمانی و مکانی شدت بارش، مقایسه چگونگی بارش در سیل‌های گذشته و تغییر ضریب رواناب می‌توان با دقت بیشتری مقدار بیشینه رواناب را پیش‌بینی و سیل احتمالی را مدیریت کرد.

منابع

علیزاده، امین، (۱۳۹۱). اصول هیدرولوژی کاربردی، چاپ ۳۴ (ویرایش ششم)، انتشارات آستان قدس رضوی، دانشگاه امام رضا (ع).

رواناب داشت. تأثیر وضعیت رطوبتی خاک پیش از بارش در شبیه‌سازی رواناب به‌خوبی نمایان بود. در بارش‌هایی که خاک حوضه به دلیل بارش پیشین مرطوب بود یا در یک بارش به دلیل طولانی‌شدن زمان بارش، خاک حوضه پیش از زمان رخداد بیشینه رواناب مرطوب و اشباع شده بود، مقدار بیشینه رواناب این بارش‌ها زیاد بود. این موضوع هم در بارش‌های همرفتی تابستان (۳۰ تیرماه ۱۳۹۱) و هم در بارش‌های شدید سایر فصول (۲۰ دی‌ماه ۱۳۹۴، ۱۰ اسفندماه ۱۳۹۴ و ۲۹ فروردین‌ماه ۹۵) دیده شد. مقدار بیشینه رواناب این بارش‌ها در مقایسه با افزایش شدت و حجم بارش برآوردی رادار بیشتر بود و گفته آنکویتین و همکاران (۲۰۱۰) در این بارش‌ها دیده شد؛ اینکه «در زمانی که خاک اشباع از آب باشد، تغییرات بارش حرکات سیل را کنترل می‌کند».

تأثیر پراکنش زمانی بارش در ایجاد رواناب نشان داد در بارش‌هایی که شدت بارش در آغاز زیاد بود و سپس کاهش یافت، مقدار بیشینه رواناب کمتر بود (مانند بارش ۳ مهرماه ۱۳۹۱ و ۵ اردیبهشت‌ماه ۱۳۹۲). برعکس اگر در ابتدا بارش کم و در ادامه شدید شد، مقدار بیشینه رواناب بیشتر بود (۱۰ اسفندماه ۱۳۹۴). به‌طور کلی اختلاف زمانی بین دبی بیشینه مشاهداتی و بیشینه رواناب شبیه‌سازی در بارش‌های شدید کمتر و در بارش‌های کم‌حجم بیشتر بود. هیدروگراف سیل در بارش‌های شدید و پر حجم تابستانه بیشتر نوک‌تیز و در بارش‌های کم‌حجم و معمولی زمستانه پهن بود. مقدار اتلاف بارش در فرایند برگاب و مرطوب‌کردن خاک حوضه در زمان متراکم‌بودن پوشش گیاهی حوضه بیشتر بود. به‌طور مشخص مقدار اتلاف در بارش ۲۰ مردادماه ۱۳۹۶،

- Ruchill Water catchment, Meteorol, Appl, Vol 13, Pp 43-52.
- Cunha, L.K., Mandapaka, P.V., Krajewski, W.F., Mantilla, R., (2012). **Impact of radar-rainfall error structure on estimated flood magnitude across scales: An investigation based on a parsimonious distributed hydrological model**, Water Resources Research, Vol 48, Pp 1-22.
- Gad, M.A., Tsanis, I.K., (2003). **A GIS methodology for the analysis of weather radar precipitation data**, Journal of Hydroinformatics, Pp 113-126 echnology.
- Giannoni, A., Smith, A.S., Zhang, Y., Roth, G., (2003). **Hydrologic modeling of extreme floods using radar rainfall estimates**, Advances in Water Resources 26, Pp 195-203.
- Hernan, A.M., Enrique, R.V., Dadid, J.G., (2013). **Limits to Flood Forecasting in the Colorado Front Range for Two Summer Convection Periods Using Radar Nowcasting and a Distributed Hydrologic Model**, Journal of hydrometeorology, Vol 14, Pp 1075-1097.
- Liechti, K., Panziera, L., Germann, U., Zappa, M., (2013). **The potential of radar-based ensemble forecasts for flash-flood early warning in the southern Swiss Alps**, Hydrol, Earth Syst, Sci., Vol 17, Pp 3853-3869.
- Martins, B., Cabus, P., De Jongh, I., Verhoest, N.E.C., (2013). **Merging weather radar observations with ground-based measurements of rainfall using an adaptive multiquadric surface fitting algorithm**, Journal of Hydrology 500 (2013), Pp 84-96.
- Nicholas, Kouwen, (1998). **Watflood, Micro-Computer Based Flood Forecasting System Based on Real-Time Weather Radar**, Canadian Water Resources Journal, Pp 62-77.
- Overeem, A., Buishand, T.A., Holleman, I., (2009). **Extreme rainfall analysis and estimation of depth-duration-frequency** موسوی، فرهاد، جمشیدنژاد، جعفر، اسلامیان، سید سعید، رستم‌افشار، ناصر، (۱۳۷۸). **تخمین ضریب رواناب برای تعدادی از حوضه‌های دریای مازندران، علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، دوره ۳، شماره ۲، ۱-۱۹.**
- میرزایی، سجاد، رئوف، مجید، (۱۳۹۳). **مقایسه معادلات تجربی و روش تجزیه هیدروگراف سیلاب در برآورد زمان تمرکز (مطالعه موردی: حوضه آتسگاه - استان اردبیل)**، نشریه علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز، دوره ۶، شماره ۴، ۱۴-۴۰۷.
- نشاط، علی، صدقی، حسین، (۱۳۸۵). **برآورد میزان رواناب با استفاده از روش سازمان HEC-HMS و مدل (SCS) حفاظت خاک در حوضه آبخیز باغ‌ملک - استان خوزستان**، مجله علمی پژوهشی علوم کشاورزی، دوره ۱۲، شماره ۴، ۷۸۷-۷۹۸.
- Anquetin, S., Braud, I., Vannier, O., Viallet, P., Boudevillain, B., Creutin, J.D., Manus, C., (2010). **Sensitivity of the hydrological response to the variability of rainfall fields and soils for the Gard 2002 flash-flood event**, Journal of Hydrology, Vol 394, Pp 134-147.
- Berne, A., Krajewski, W.F., (2013). **Radar for hydrology: Unfulfilled promise or unrecognized potential?**, Advances in Water Resources, Vol 51, Pp 357-366.
- Chow, V.T, Miadment, D.R., Mays., L.G., (1988). Applied Hydrology McGraw - Hill international Edition 596, Pp 147-150.
- Cranston, M.D., Black, A.R., (2006). **Flood warning and the use of weather radar in Scotland: a study of flood events in the**

- Australian Weather Radars**, Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, (Technical Report 02/7, 2002).
- Yilmaz, K.K., Hogue, S., Gupta, H.V., Wagener, T., (2005). **Inter comparison of Rain Gauge, Radar, and Satellite-Based Precipitation Estimates with Emphasis on Hydrologic Forecasting**, Journal of Hydrometeorology, Vol 6, Pp 497-517.
- Zhu, D., Xuan, Y., Cluckie, I., (2014). **Hydrological appraisal of operational weather radar rainfall estimates in the context of different modelling structures**, Hydrology and Earth System Sciences, Pp 257-272.
- curves using weather radar**, Water Resources Reserch, Vol 45, Pp 1-15.
- Panziera, L., Gabella, M., Zanini, S., Hering, A., Germann, U., Berne, A., (2016). **A radar-based regional extreme rainfall analysis to derive the thresholds for a novel automatic alert system in Switzerland**, Hydrology, Earth System, Vol 20, Pp 2317-2332.
- Park, J.H., Hur, Y.T., (2012). **Development and application of GIS based K-DRUM for flood runoff simulation using radar rainfall**, Journal of Hydro-environment Research 6 (2012) 209e219.
- Seed, A., Siriwardena, L., Sun, X., Jordan, P., Elliott, J., (2002). **On the Calibration of**

