



دوره ۳۵، شماره ۲، شماره‌ی پیاپی ۱۳۵، تابستان ۱۴۰۱، صفحه‌های ۳۰-۱۶
شناسه‌ی دیجیتال: 10.22092/WMRJ.2021.354915.1419

مقاله‌ی پژوهشی



پژوهش‌های آبخیزداری

شبیه‌سازی آبنگار سیلاب با رابطه‌ی ساده‌شده‌ی انتقال-پخش در آبخیز کشکان، استان لرستان

مانیا دانش‌فر

دانشجوی دکترای مهندسی آبخیزداری، دانشکده‌ی منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد

خدایار عبدالهی

(نویسنده‌ی مسئول)* استادیار، دانشکده‌ی منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد

امیر حمزه حقی‌آبی

استاد، دانشکده‌ی کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه لرستان

نسرتین قرهی

استادیار، دانشکده‌ی منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد

مه‌دی پژوهش

استادیار، دانشکده‌ی منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد

علی رئیسی

استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

*رایانامه‌ی نویسنده‌ی مسئول: kabdolla@sku.ac.ir

تاریخ دریافت: ۳ مرداد ۱۴۰۰ تاریخ پذیرش: ۲۹ شهریور ۱۴۰۰

چکیده

بررسی سیلاب یکی از رایج‌ترین پدیده‌های مخرب طبیعی است و اهمیت زیادی دارد. به دلیل مشکل کمبود و نقص آمار آب در بیش‌تر ایستگاه‌های آب‌سنجی رودهای کشور، شبیه‌سازی آبنگار سیلاب با نرم‌افزارهای آب‌شناسی مهم است. نرم‌افزارهای پرشمار آب‌شناسی برای شبیه‌سازی آبنگار سیلاب هست. این پژوهش کارآیی رابطه‌ی انتقال-پخش را در شبیه‌سازی ۳۶ پدیده‌ی سیلاب در ۵ بازه‌ی رود کشکان و سرشاخه‌های آن بررسی کرده است. ویژگی‌های فیزیکی بازه‌های بررسی‌شده و داده‌های آب‌سنجی هر پدیده‌ی سیلاب شامل آب‌دهی و مقیاس تراز آب ایستگاه ورودی و خروجی برای تعیین ضریب زبری مانینگ و شبیه‌سازی سیلاب با رابطه‌ی انتقال-پخش به کار گرفته شد. ارزیابی آبنگارهای سیلابی نشان‌دهنده‌ی دقت پذیرفتنی نرم‌افزار در شبیه‌سازی روند سیلاب و مقدار آب‌دهی‌های سیلابی است. با هدف بررسی درستی نتیجه‌ی اجرای نرم‌افزار، ضریب‌های نش-ساتکلیف، RMSE، ضریب حجم‌سنجی، ضریب کالینگ‌گوپتا، و ضریب همبستگی R بررسی شد. مقدار بیش‌تر از ۰/۵ برای ضریب ناش ساتکلیف در ۲۹ سیلاب از ۳۶ سیلاب بررسی‌شده و مقدار پذیرفتنی ضریب‌های دیگر برای همه‌ی پدیده‌های سیلابی بررسی‌شده، تأییدکننده‌ی نتیجه‌ی شبیه‌سازی آبنگار سیلاب در حوزه‌ی پژوهشی کشکان در مقیاس بازه‌ی با رابطه‌ی ساده‌شده‌ی انتقال-پخش برای این حوزه است. رابطه‌ی ساده‌شده‌ی انتقال-پخش ممکن است برای شبیه‌سازی سیلاب در مقیاس بازه‌ی در آبخیزهای مشابه به کار گرفته شود.

واژگان کلیدی: روان‌آب سطحی، رابطه‌ی پخشیدگی، ضریب زبری مانینگ، ضریب نش-ساتکلیف، مقیاس بازه‌ی

مقدمه

می‌شود، در حالی که همه‌ی فرآیندهای دیگر با روش‌های ساده، شبیه‌سازی می‌شود (بلوز و تساکیریز ۲۰۱۶). در واقع می‌توان معادل‌های نرم‌افزارهای موج‌پویا را در ترازهای گوناگونی از تقریب ساده‌سازی کرد. معادله‌های پخش-انتشار^۱ (مربوط به شبیه‌سازی انتقال که یکی از روش‌های نظری است) برای بررسی و پژوهش موج‌پویا به کار می‌رود (چن ۲۰۱۰). بسته به هدف ترازهای گوناگون تقریب‌سازی معادل‌های مربوط به موج‌پویا ممکن است برای معادله‌های پخش-انتشار به کار رود (یانگ و همکاران ۲۰۱۶؛

ین و همکاران ۲۰۰۱؛ یونس و همکاران ۲۰۰۸). از هر دو روش تجربی و نظری برای شبیه‌سازی جریان آب و عامل کیفیت آب بهره‌گیری شده است (چن ۲۰۱۰). برقراری ارتباط بین این دو روش و بهره‌گیری از روشی میان این دو در شبیه‌سازی موج سیلاب که عموماً برای بررسی انتقال موج سیلاب به کار می‌رود، ممکن است از دیدگاه کاربردی بودن مفید باشد (گیلهام و همکاران ۱۹۸۴؛ کرچنر و همکاران ۲۰۰۱؛ کومار و همکاران ۲۰۱۰؛ سینگ ۱۹۹۵؛ یانگ و اندرنی ۲۰۱۳) زیرا منجر به پیوند دادن مبحث نظری انتقال-پخش موج سیلاب با پژوهش‌های میدانی، برای بررسی و واریسی نظریه‌ی نرم‌افزار نظری بر پایه‌ی داده‌های مشاهده‌شده یا پژوهش‌های میدانی می‌شود. بخش عمده‌ی از تحقیق‌های انجام‌شده با رابطه‌ی انتقال-پخش در زمینه‌ی تحقیق‌های انتقال آلودگی‌ها و ردیاب‌ها شکل گرفته است. تحقیق‌های اندکی در زمینه‌ی کاربرد رابطه‌ی انتقال-پخش در روندیابی و شبیه‌سازی سیلاب هست. نتیجه‌ی ارزیابی جریان‌های کناری و انتقال مواد محلول در سیلاب‌ها در نظام کارستی نهر در فرانسه (چولت و همکاران ۲۰۱۳) با معادل‌های انتقال-پخش نشان داد که شبیه‌سازی تبادل‌های کناری سیلاب و بهینه‌سازی سنج‌های نرم‌افزار موفق بود. نتیجه‌های یانگ و همکاران (۲۰۱۳) نشان داد که نرم‌افزار دوسنجه‌ی مبتنی بر معادل‌های انتقال-پخش در حوزه‌های شهری کارآیی فراوانی در شبیه‌سازی زمان‌بندی آب‌نگار، آب‌دهی اوج و تطبیق شاخه‌ی بالارونده و شاخه‌ی پایین‌رونده‌ی آب‌نگار مشاهده‌شده و شبیه‌سازی شده دارد. یانگ و همکاران (۲۰۱۵) با نرم‌افزار روندیابی روان آب بر پایه‌ی رابطه‌ی انتقال-پخش در آبخیز اوانانگادا در نیویورک، اهمیت ضریب زبری در زمان‌بندی حرکت روان آب و حجم روان آب را نشان دادند. یانگ و همکاران (۲۰۱۶) نشان دادند که رابطه‌ی انتقال-پخش برای شبیه‌سازی آب‌نگار سیلاب به‌خوبی عمل می‌کند، و با تغییر ضریب‌زبری مانینگ و به‌دست آوردن مقداری بهینه برای آن نرم‌افزار به‌خوبی و اسنچی می‌شود.

روندیابی سیلاب نوعی شبیه‌سازی آب‌نگار خروجی بر پایه‌ی آب‌نگار ورودی و عامل ذخیره است، اما در این مقاله با بررسی

در سراسر دنیا، سیلاب یکی از مهم‌ترین آسیب‌های طبیعی شناخته می‌شود که مسبب زیان‌های پرشمار به بخش‌های گوناگون طبیعی و دست‌ساخته‌های انسانی است. در کنار زیان‌های مالی نمی‌توان از کشتگان سیلاب چشم‌پوشی کرد. سیلاب پدیده‌ی پیچیده است که اثرهای گوناگونی بر اندوخته‌های آب، خاک، محیط‌زیست، و اقتصاد و اجتماع دارد. چهل درصد از کل زیان‌های اقتصادی ناشی از آسیب‌های طبیعی به دلیل سیلاب است (کیا و همکاران ۲۰۱۲؛ تورهان و همکاران ۲۰۱۹؛ بلوز و تساکیریز ۲۰۱۶؛ کورتی و همکاران ۲۰۱۷).

برای بررسی فرآیندهای آب‌شناسی از نرم‌افزارهای گوناگون بهره‌گیری می‌شود. انواع روش‌های بهره‌گیری شده‌ی محققان به نرم‌افزارهای فیزیکی و داده‌محور تقسیم می‌شود (کیا و همکاران ۲۰۱۲). نرم‌افزارها ممکن است در دسته‌های نرم‌افزارهای تجربی، فیزیکی، داده‌محور و نرم‌افزارهایی بر پایه‌ی درجه‌های گوناگونی از ارتباط بین نرم‌افزارهای گوناگون نیز باشد.

روش‌های تجربی از انتخاب‌های پیش رو برای شبیه‌سازی کردن سیلاب است. پژوهش بررسی سیلاب در مقیاس آزمایشگاهی و میدانی از روش‌های تجربی است (اندروز ۱۹۸۰؛ بیگین ۱۹۹۶). در آزمایشگاه‌ها معمولاً در ناوبرهای پایه‌دار یا آبروهای مصنوعی در مقیاس کوچک انجام می‌شود. شرط مرزی و شرط اولیه‌ی سرعت جریان، حجم جریان، و زمان‌بندی جریان به شکل ساده‌تری در نظر گرفته، و درجی‌های پایدار یا جوی‌های مصنوعی مدیریت می‌شود. این شیوه که در مقیاس آزمایشگاهی است، به دلیل ساده‌سازی بیش‌ازحد و تعداد عامل‌هایی که باید در اجرای نرم‌افزار بررسی شود، سرانجام منجر به نتیجه‌های واقعی نمی‌شود (بلوز و تساکیریز ۲۰۱۶).

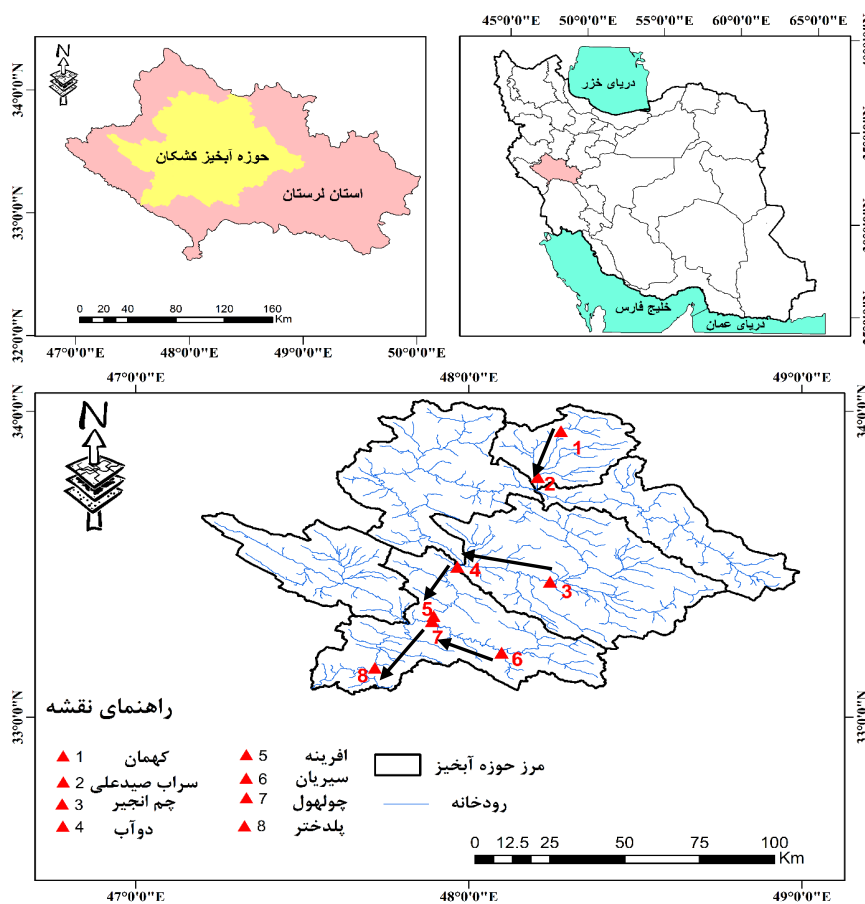
انتخاب دیگر پیش‌روی محققان برای بررسی سیلاب روش‌های نظری است، دانسته‌های مکانیک سیال‌ها، الگوریتم‌های شبیه‌سازی پیش‌رفته و محاسبه‌های با سرعت زیاد پایه‌ی برای روش‌های نظری در شبیه‌سازی سیلاب است (یانگ و همکاران ۲۰۱۶). در تحقیق‌های پرشماری از روش‌های نظری برای شبیه‌سازی و روندیابی سیلاب بهره‌گیری کرده‌اند. برای نمونه روش ماسکینگام خطی (مایز ۲۰۱۰) و روش‌های پیچیده‌تری مانند نرم‌افزارهای موج‌پویا برای شبیه‌سازی سیلاب به کار برده شده است (سن ونانت ۱۸۷۱؛ یانگ و همکاران ۲۰۱۶). البته پژوهش‌گران تأکید کرده‌اند که نرم‌افزارهای موج‌پویا نمی‌تواند پیچیدگی کل چرخه‌ی آب‌شناسی را از مجموعه‌ی کامل معادل‌هایی برای هر پدیده شبیه‌سازی کند، زیرا تعداد زیادی سنجه و عامل هست که باید تعیین شود (یانگ و همکاران ۲۰۱۶). در این نرم‌افزارها فقط یک یا دو فرآیند اصلی چرخه‌ی آب‌شناسی به‌طور کامل شبیه‌سازی

طول رود اصلی (رود کشکان) حدود ۳۰۰ km، و مساحت آبخیز حدود ۹۷۷۵ km² (فروزنده و افاضلی ۲۰۱۵) است. رود کشکان به رود کرخه و سرانجام به خلیج فارس می‌ریزد. در آبخیز کشکان ایستگاه‌های آب‌شناسی پرشماری مانند افرینه، چم انجیر، دوآب، سیریان، سرآب صیدعلی، کشکان، چولهول و پلدختر است (شکل ۱). به دلیل واسنجی هم‌زمان شبیه‌سازی‌های نرم‌افزار در گستره‌ی شبکه‌ی زه‌کشی آبخیز در این تحقیق در پنج بازه‌ی انتخابی رود کشکان (ایستگاه یک تا دو، ایستگاه سه تا چهار، ایستگاه چهار تا پنج، ایستگاه شش تا هفت و ایستگاه پنج تا هشت)، ۳۶ پدیده‌ی سیلاب رخ داده در این بازه‌ها، بررسی و شبیه‌سازی شد.

کارآیی رابطه‌ی انتقال-پخش برای شبیه‌سازی سیلاب سرآب با نگرش سامانه‌ی و دخیل کردن عامل آب-اقلیم‌شناسی، آب‌نگار سیلاب پایین‌دست شبیه‌سازی شد. در این تحقیق از معادل‌های ساده‌شده‌ی انتقال-پخش به‌همراه داده‌های ثبت‌شده‌ی آب‌دهی مقیاس‌سطح آب سیلابی و مشخصه‌های گیتانگاری آبخیز، برای شبیه‌سازی ۳۶ پدیده‌ی سیلاب در پنج بازه از آبخیز کشکان در استان لرستان بهره‌گیری شد.

مواد و روش‌ها

یکی از آبخیزهای مهم و سیل‌خیز در استان لرستان آبخیز کشکان است (۳۲°۷' تا ۳۲°۴' شمالی و ۴۷°۰' تا ۵۰°۰' شرقی).



شکل ۱- موقعیت آبخیز کشکان، ایستگاه‌های آب‌سنجی و شبکه‌ی رودخانه‌ها.

همکاران (۲۰۱۶). در این پژوهش، پنج بازه‌ی پژوهشی بود که ویژگی‌های گیتانگاری در آن‌ها ثابت است. سنجه‌های مربوط به آب‌سنجی هر پدیده‌ی سیلاب شامل آب‌دهی ایستگاه سرآب و پایین‌دست و تراز آب در ایستگاه سرآب و پایین‌دست بازه‌ی پژوهشی تعیین شد.

این نرم‌افزار بر پایه‌ی رابطه‌ی ساده‌شده‌ی انتقال-پخش در محیط برنامه‌ی متلب اجرا می‌شود. پس از اجرای نرم‌افزار انتقال-پخش، نتیجه‌هایی حاصل می‌شود (شکل ۲). این

نرم‌افزار انتقال-پخش با مشخصه‌ی گیتانگاری آبخیز و داده‌های ثبت‌شده از پدیده‌های سیل ثبت‌شده مانند آب‌دهی ساعتی و سطح آب، هر پدیده‌ی سیلاب در هر بازه‌ی پژوهشی را شبیه‌سازی می‌کند. از داده‌های ثبت‌شده‌ی آب‌دهی ساعتی سیلاب، تراز آب رودخانه در سیلاب و مشخصه‌های دیگر آبخیز مانند طول بازه، ارتفاع ایستگاه سرآب و پایین‌دست، شیب بازه‌ی بررسی‌شده، و مساحت منطقه‌ی سرآب پژوهشی، پایه‌ی برای شبیه‌سازی سیل با نرم‌افزار انتقال-پخش است (یانگ و

در فاصله‌ی X (متر) از نقطه‌ی $X=0$ ، به سوی پایین دست است. C و D به ترتیب سرعت جریان (m/s) و پخشیدگی جریان (s/m^2) است. مقدار C و D ثابت است. اگر رابطه‌ی ۲ الف، تحلیلی حل کرده شود رابطه‌ی ۳ به دست می‌آید (یانگ و اندرنی ۲۰۱۳).

$$\frac{\partial q}{\partial t} + C \frac{\partial q}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (D_h \frac{\partial q}{\partial x}) \quad 3$$

رابطه‌ی ۳ را می‌توان تابع پاسخ نهر دانست، که ممکن است مانند تابع خطی برای شبیه‌سازی نشانه‌ی خروجی $g(t)$ ، در پایین دست رود در مجموعه‌ی زمانی مشخص عمل کند (رابطه‌ی ۴).

$$g(t) = \int_0^t f(\tau) q(L, t - \tau) d\tau \quad 4$$

تابع $g(t)$ را می‌توان با حل کردن عددی بازنویسی کرد، زیرا به ندرت با حل کردن تحلیلی نتیجه‌گیری می‌شود (رابطه‌ی ۵).

$$g(n) = \sum_{m=1}^{n-1} f(m) q(n-m) \quad 5$$

در رابطه‌ی شماره‌ی ۵، توابع $f(m)$ ، $g(n-m)$ و $q(n-m)$ به ترتیب نتیجه‌گیری مجموعه‌ی زمانی برای خروجی به دست آمده، ورودی و واحد پاسخ است (n و m شاخص‌های گام‌های زمانی است). با در نظر گرفتن q در رابطه‌ی ۳ و تفکیک آن بر حسب t و بر اساس در نظر گرفتن دو سنجه‌ی ثابت زمانی α و β ، ممکن است زمان اوج و پی‌رو آن آب‌دهی اوج را به دست آورد (رابطه‌ی ۶ و ۷).

$$t_{\max} = \frac{1}{2c^2} (-6D + 6D \sqrt{\frac{1+x^2c^2}{9D^2}}) \quad 6$$

$$\alpha = \frac{4D}{C^2} \quad \text{الف-7}$$

$$\beta = \frac{x^2}{4D} \quad \text{ب-7}$$

با در نظر گرفتن سنجه‌های ثابت زمانی نتیجه گرفته شده در رابطه‌ی ۷، می‌توان رابطه‌ی ۶ را به شکل رابطه‌ی ۸ نوشت.

$$t_{\max} = -\frac{3}{4}\alpha + \frac{3}{4}\alpha \left(\sqrt{1 + \frac{16\beta}{9\alpha}} \right) \quad 8$$

با داشتن زمان اوج، t_{\max} ، می‌توان آب‌دهی اوج Q_{\max} را به دست آورد (رابطه‌ی ۹).

$$Q_{\max} = \frac{PA}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\beta} * t_{\max}^{\frac{3}{2}} * e^{t_{\max}} * e^{-\frac{t_{\max}}{\alpha}} * e^{2\sqrt{\frac{\beta}{\alpha}}} \quad 9$$

نتیجه‌ها، نشان‌گر آب‌نگار شبیه‌سازی شده‌ی هر رخداد سیلابی در ایستگاه پایین دست هر بازه است. نتیجه‌های به دست آمده به مقدار ضریب زبری مانینگ مرتبط است. به گونه‌ی که با تغییر دادن ضریب زبری مانینگ در نرم‌افزار، نتیجه‌های کاملاً متفاوتی حاصل می‌شود. با واسنجی کردن نرم‌افزار بر اساس ضریب زبری مانینگ، مقدار نهایی متفاوتی برای ضریب زبری مانینگ به دست می‌آید که به دلیل بی قطعیتی شعاع آبی است. شعاع آبی متوسطی برای کل رود در نظر گرفته می‌شود. مقدار شعاع آبی متوسط به اندازه‌ی تراز آب در ایستگاه سرآب بستگی دارد. شعاع آبی متوسط برای رود، مقدار تندی موج (C) و پخشیدگی موج (D) به دست می‌آید (و کوریکیو ۲۰۱۹؛ هارشا و همکاران ۲۰۲۰؛ یانگ و همکاران ۲۰۱۶). ضریب زبری مانینگ در این نرم‌افزار اهمیت زیادی دارد زیرا واسنجی کردن این نرم‌افزار بر پایه‌ی ضریب زبری مانینگ است تا در نهایت به ازای ضریب زبری مانینگ واسنجی شده، محاسبه‌های نرم‌افزار انجام شود و شبیه‌سازی سیلاب در ایستگاه پایین دست بازه‌ی انتخاب شده انجام شود؛ بنابراین به ازای پدیده‌های سیلاب گوناگون در بازه‌های گوناگون، ضریب‌های زبری مانینگ گوناگونی به دست می‌آید. در بهره‌گیری از این نرم‌افزار، بر همخوانی شاخه‌ی پایین‌رونده‌ی آب‌نگار سیلابی مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در پایین دست تمرکز می‌شود. برای این کار نرم‌افزار باید واسنجی شود (ضریب زبری مانینگ در این مرحله نقش اساسی دارد). این نکته اهمیت ضریب زبری مانینگ را به‌ویژه در شبیه‌سازی سیلاب در رودهای باز نشان می‌دهد (یانگ و اندرنی ۲۰۱۳؛ یانگ و همکاران ۲۰۱۶).

در حالت ساده معادله‌های جریان ناپایدار در آبراهه‌های باز به شکل تک‌بعدی بررسی شد. معادله‌های دیفرانسیل شناخته شده برای توضیح موج انتقال-پخش در رابطه‌ی ۱ آورده شده است.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = D_h \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \quad 1$$

معادله‌ی ۱ در قالب معادله‌ی انتقال همرفت نتیجه گرفته شد (معادله‌ی ۲، الف و ب).

$$\frac{\partial q}{\partial t} + C \frac{\partial q}{\partial x} = D_h \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} \quad \text{الف-2}$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + C \frac{\partial q}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (D_h \frac{\partial q}{\partial x}) \quad \text{ب-2}$$

انتقال-پخش آبی وابسته به مکان (X) و زمان (t) است. رابطه‌ی ۲ الف ممکن است برای توصیف جریان یک‌بعدی در رود با معادل‌های انتقال-پخش به کار رود (ین و تسای ۲۰۰۱). در رابطه‌ی ۲ الف، q آب‌دهی جریان در واحد طول بر زمان (m/s)

کاربردی بود. پنج بازه‌ی انتخابی پژوهشی تعیین شد (جدول ۱ و شکل ۱). سرعت جریان و پخش‌شدگی جریان به ترتیب با C و D در معادله‌های ۱۲ و ۱۳ به دست آمد (یانگ و همکاران ۲۰۱۵).

$$t_L = C_i(L * L_c)^{0.3} \quad 11$$

$$C = \frac{5}{3} * V \quad 12$$

$$D = \frac{V * R}{2 * S} \quad 13$$

V سرعت جریان S (m/s)، شیب بازه R (m/m) شعاع آبی (m) است. برای تخمین زدن سرعت متوسط جریان در هر یک از بازه‌ها در فاصله‌ی ایستگاه سرآب و پایین دست از رابطه‌ی مانینگ (رابطه‌ی ۱۴) بهره‌گیری شد.

$$V = \frac{R^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}}{n} \quad 14$$

n ضریب زبری مانینگ متوسط برای بازه، R متوسط شعاع آبی بازه، و S شیب متوسط بازه است. شعاع آبی متوسط (R) بازه برابر با متوسط ژرفای آب گرفته شد.

در محاسبه‌ی شعاع آبی فرض گرفته شد که عرض بازه خیلی بزرگتر از متوسط ژرفای آب است. در اجرای نرم‌افزار ساده‌شده‌ی انتقال-پخش، آبنگار اندازه‌گیری شده در ایستگاه آب‌سنجی سرآب نشانه‌ی ورودی نرم‌افزار F(t) گرفته شد. با رابطه‌های ۱۲ و ۱۳ مقدار سرعت جریان و پخش‌شدگی جریان محاسبه شد. ارتفاع نقطه‌ی آغاز هر بازه (ایستگاه سرآب) و نقطه‌ی پایان هر بازه (ایستگاه پایین دست) با سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی مشخص شد. با تعیین کردن مقدار طول هر بازه (X) با نقشه‌ی آبخیز کشکان، شیب متوسط هر بازه (رابطه‌ی ۱۵) و پی‌رو آن تابع g(t) محاسبه شد. این تابع جریان شبیه‌سازی شده‌ی سیلاب در ایستگاه پایین دست است، که برای محاسبه‌ی آن از رابطه‌ی ۳ بهره‌گیری شد. این تابع نیازمند تعیین کردن عاملی مانند طول بازه، شیب، سرعت جریان و پخش‌شدگی جریان است. برای محاسبه‌ی آن، عامل دانسته‌شده در رابطه‌ی ۳ جای‌گزاری می‌شود.

$$S = \frac{\Delta H}{L} \quad 15$$

ΔH اختلاف ارتفاع بین دو ایستگاه آب‌سنجی سرآب و پایین دست بازه و L طول بازه است. با یافتن همه‌ی عامل‌ها، تنها سنجه‌ی مشخص نشده‌ی نرم‌افزار ضریب زبری مانینگ (n) است. با تطابق دادن شاخه‌ی پایین‌رونده‌ی آبنگار مشاهده‌شده

در رابطه‌ی ۹، p روان آب سطحی پس از هدررفت باران اولیه، c سرعت جریان، D پخش‌شدگی جریان، و A مساحت (m^2) است. آب‌دهی به هنجار شده در هر زمان با رابطه‌ی ۳ و ۱۰ به دست آمد.

$$\frac{Q}{Q_{max}} = \left(\frac{t}{t_{max}}\right)^{\frac{3}{2}} * e^{-\beta\left(\frac{1}{t} - \frac{1}{t_{max}}\right)} * e^{-\frac{1}{a}(t-t_{max})} \quad 10$$

هدف اصلی در این پژوهش شبیه‌سازی کردن موج سیلاب در پایین دست رود است که از محاسبه‌های مربوط به تابع g(t) به دست آمد. تابع g(t) جریان‌های کناری ورودی در راه نهر یا بازه، به بازه را حذف می‌کند. نرم‌افزار انتقال-پخش، از آبنگار مجموعه‌ی زمانی موج سیل به جای تابع f(t) بهره‌گیری می‌کند. تأثیر مستقیم تابع f(t) به شرایط مرزی سرآب مربوط می‌شود. آبنگار به دست آمده در پایین دست در شرایطی به دست می‌آید که هیچ ورودی کناری یا بارش جدید به جریان اصلی اضافه نشود. در این شرایط است که ویژگی‌های مربوط به انتشار سیل مانند سرعت جریان و پخش‌شدگی اهمیت خود را نشان می‌دهد. از این‌رو از رابطه‌ی سرعت جریان و پخش‌شدگی در شبیه‌سازی سیلاب با کاربرد روش انتقال-پخش بهره‌گیری شد (یانگ و همکاران ۲۰۱۶).

دیدگاه اصلی در این تحقیق این بود که آب‌دهی ایستگاه پایین دست نهر یا بازه‌ی تأثیرپذیر از جریان آب در ایستگاه سرآب، جریان سطحی و زیرسطحی زیرحوزه‌های میان دو ایستگاه اندازه‌گیری سرآب و پایین دست است. علاوه بر این، مفهوم دیگری نیز هست که نتیجه می‌گیرد آب دهی اوج و حجم جریان سطحی و زیرسطحی زیرحوزه‌های میان ایستگاه اندازه‌گیری سرآب و پایین دست بسیار کم‌تر از آبنگارهای برش سرآب یا پایین دست است. در این جا زمان پیمایش برای آبنگار با رابطه‌ی زمان تأخیر اشنایدر (TL) محاسبه شد. در رابطه‌ی اشنایدر (رابطه‌ی ۱۱) Ct عددی ثابت است که ممکن است میان $\frac{1}{35}$ تا $\frac{1}{65}$ تغییر کند. طول بازه یا رود فاصله بین سرآب و پایین دست بازه‌ی بررسی شده L (km) است. طول گرانشی، LC (km)، نتیجه‌ی طول جریان اصلی از نقطه‌ی خروجی تا نقطه‌ی مرکزی آبخیز است. فرض مهم در این تحقیق این بود که آبنگار شبیه‌سازی شده در پایین دست با داده‌های جریان که در سرآب اندازه‌گیری شده است، تولید می‌شود.

با نرم‌افزار توصیف‌شده، تعدادی رخداد سیلاب در آبخیز کشکان (جدول ۲) در بازه‌های انتخاب‌شده (جدول ۱) شبیه‌سازی شد. از داده‌های ثبت‌شده‌ی ایستگاه‌های آب‌شناسی در سرآب و پایین دست بازه برای مشخص شدن تراز آب رودخانه و آب‌دهی سیلابی بهره‌گیری شد. برخی از خصوصیت‌های فیزیکی بازه‌ها (جدول ۱) در روی کرد این پژوهش و محاسبه‌های نرم‌افزار

بازه) متغیر مستقل دانسته می‌شود (بانگ و همکاران ۲۰۱۶). مشخصه‌های گیتانگاری بازه‌های بررسی شده آبخیز کشکان در جدول ۱، و تاریخ پدیده‌های سیلاب بررسی شده در جدول ۲ نشان داده شده است.

و شبیه‌سازی شده در پایین دست، مقدار ضریب زبری مانینگ واسنجی کرده، و نرم‌افزار واسنجی شد. خصوصیت فیزیکی آبخیز برای پژوهش‌های سیلاب مهم است. مقدار این سنج‌ها در گذر زمان ثابت است. خصوصیت فیزیکی (طول آبراهه، شیب متوسط رود و مساحت سرآب هر

جدول ۱- ویژگی‌های گیتانگاری بازه‌ها.

| ایستگاه | طول جغرافیایی | عرض جغرافیایی | ارتفاع (m) | طول بازه (km) | شیب متوسط (m/m) | مساحت حوزه در بالای هر بازه (km ²) |
|-------------------------------|---------------|---------------|------------|---------------|-----------------|--|
| ۱ کهمان سراب صیدعلی | ۲۴۸۳۰۸ | ۳۷۵۸۴۱۳ | ۱۷۳۰ | ۱۷/۱۷ | ۰/۰۱۲ | ۶۰۰ |
| | ۲۴۱۴۱۰ | ۳۷۴۱۹۷۸ | ۱۵۳۰ | | | |
| ۲ چم انجیر دوآب (کشکان) | ۲۴۳۷۹۳ | ۳۷۰۳۸۶۵ | ۱۱۴۰ | ۳۲/۲ | ۰/۰۰۶ | ۱۵۴۹/۳ |
| | ۷۷۵۳۹۳ | ۳۷۱۰۰۶۸ | ۹۵۰ | | | |
| ۳ دوآب (کشکان) افرینه (کشکان) | ۷۷۵۳۹۳ | ۳۷۱۰۰۶۸ | ۹۵۰ | ۳۶ | ۰/۰۰۴ | ۳۸۲۲/۳۱ |
| | ۷۶۹۳۹۲ | ۳۶۹۱۷۳۵ | ۸۲۰ | | | |
| ۴ سیریان چولهول | ۲۲۹۵۶۳ | ۳۶۷۸۵۳۰ | ۱۲۱۰ | ۳۵/۲۵ | ۰/۰۱۲ | ۱۵۶۷/۹ |
| | ۷۶۹۰۰۵ | ۳۶۸۹۸۴۴ | ۸۰۰ | | | |
| ۵ افرینه (کشکان) پلدختر | ۷۶۹۳۹۲ | ۳۶۹۱۷۳۵ | ۸۲۰ | ۴۲/۴۷ | ۰/۰۰۳ | ۸۸۳۶/۶ |
| | ۷۵۳۴۵۷ | ۳۶۷۲۵۳۰ | ۷۰۰ | | | |

جذر میانگین مربع‌ها، حجم سنجی، Kling-Gupta و همبستگی R در جدول ۲ آورده شده است.

نتیجه‌ی تجزیه و تحلیل کارایی نرم‌افزار و ارزیابی خطا در خروجی شبیه‌سازی با ضریب‌های ناش ساتکلیف، خطای

جدول ۲- ضریب‌های کارایی کاربردی در تحقیق.

| توضیح | رابطه برای محاسبه ضریب | ضریب کارایی |
|--|---|--------------------------|
| در بهترین حالت ۰ است. شاخصی نا منفی است. | $RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_S - Q_O)^2}{n}}$ | خطای جذر میانگین مربع‌ها |
| از ۰ تا ۱۰۰٪ متغیر است. | $R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_O - Q_{AO}) * (Q_S - Q_{AS})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_O - Q_{AO})^2 \sum_{i=1}^n (Q_S - Q_{AS})^2}} \right]^2$ | R ² |
| از ۰ تا ۱ متغیر است. | $CE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_S - Q_O)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_O - Q_{AO})^2}$ | نش - ساتکلیف |
| برای بهترین حالت مقدار آن ۱ و برای بدترین حالت ۰- است. | $VE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n Q_S - Q_O }{\sum_{i=1}^n Q_O}$ | بازدهی حجم سنجی |
| نسخه‌ی بهبود یافته‌ی نش-ساتکلیف. | $KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + \left(\frac{\partial_S}{\partial_O} - 1\right)^2 + \left(\frac{\partial_{AS}}{\partial_{AO}} - 1\right)^2}$ | کالینگ گوپتا |
| ممکن است از -۱ تا +۱ تغییر کند. | $R = \frac{n * \sum_{i=1}^n (Q_S * Q_O) - \sum_{i=1}^n (Q_S) * \sum_{i=1}^n (Q_O)}{\sqrt{[n * \sum_{i=1}^n Q_O^2 - (\sum Q_O)^2] * [n * \sum_{i=1}^n Q_S^2 - (\sum Q_S)^2]}}$ | همبستگی (R) |

پخش است. این نرم‌افزار در پنج بازه‌ی بررسی شده ویژگی‌های فیزیکی بازه‌ها مانند طول رود، شیب متوسط، مساحت سرآب هر بازه و ارتفاع هر ایستگاه را ارزیابی کرد. این داده‌ها برای اجرا کردن نرم‌افزار در MATLAB به کار برده شد. پس از تعیین کردن عامل‌های لازم برای اجرای نرم‌افزار، نرم‌افزار انتقال-پخش برای شبیه‌سازی موج سیلاب در ایستگاه

نتایج و بحث نتیجه‌ی ارزیابی شبیه‌سازی موج سیلاب در پایین دست هر بازه‌ی انتخابی پژوهشی با نرم‌افزار انتقال-پخش به دست آمد و با برخی شاخص‌های ارزیابی کارایی برپایه‌ی میزان دقت نرم‌افزار داده شد. تابع g (t) و f (t) در محیط MATLAB تابع اساسی است. این تابع کلیدی برای حل کردن معادله‌های انتقال-

سیلاب‌ها در سامانه‌ی کارستی با معادله‌های انتقال-پخش بررسی شدند. آن‌ها اثر جریان کناری در سیلاب را با روی‌کردی ریاضی و با فرض یکنواختی جریان در آب‌روهای کارستی در نظر گرفتند. آن‌ها توانستند به‌خوبی از رابطه‌ی انتقال-پخش برای روندیابی سیلاب و بهینه‌سازی سنج‌های نرم‌افزار بهره‌گیرند. جریان‌های کناری که در سیلاب به جریان اصلی اضافه می‌شود نیز در نظر گرفته شد.

هفت سیلاب در این رود و آب‌دهی پایه در آن‌ها بررسی شد. آن‌چه در تحقیق چولت و همکاران (۲۰۱۳) و پژوهش حاضر مشترک است، بهره‌گیری از رابطه‌ی انتقال-پخش برای روندیابی و شبیه‌سازی سیلاب است. آب‌دهی پایه در آب‌دهی‌های مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده در نظر گرفته شد، و هر دو تحقیق به‌خوبی توانسته‌اند از رابطه‌ی انتقال-پخش برای شبیه‌سازی و روندیابی سیلاب بهره‌گیرند؛ اما تفاوت‌هایی هم بین این دو تحقیق هست. در آبخیز کشکان فرض بر این است که جریان‌های کناری در مسیر به جریان اصلی اضافه نمی‌شود. می‌توان گفت یکی از دلایل‌های در نظر گرفتن بازه‌های پژوهشی پرشمار در سرشاخه‌ها و شاخه‌ی اصلی رود کشکان برای شبیه‌سازی و روندیابی سیلاب همین است زیرا با فرض نآشنای اضافه نشدن جریان‌های کناری به جریان اصلی، به‌ویژه در آبخیزی گسترده مانند کشکان، شبیه‌سازی جریان ممکن است به‌خوبی انجام نشود. به همین دلیل در پژوهش‌هایی مانند یانگ و همکاران (۲۰۱۶) بازه‌ی بررسی شده کوتاه است. بنابراین در پژوهش کنونی که فرض بر اضافه نشدن جریان کناری به شاخه‌ی اصلی جریان است، بازه‌های پژوهشی پرشمار در سرشاخه‌ها و شاخه‌ی اصلی رود کشکان در نظر گرفته شد. در تحقیق چولت و همکاران (۲۰۱۳) یکی از موضوع‌های مهم اضافه شدن جریان‌های کناری به رود است. تفاوت این دو تحقیق در مقیاس و محدوده‌ی پژوهشی است. در پژوهش ما مقیاس بررسی سیلاب‌ها بازه‌ی است، یعنی رابطه‌ی انتقال-پخش در چند بازه‌ی گوناگون از شاخه‌ها و سرشاخه‌های رود کشکان بررسی شد. انتخاب چند بازه‌ی پژوهشی در آبخیز کشکان به این دلیل هم بود که برخلاف روال رایج شبیه‌سازی روان‌آب، که کارآیی نرم‌افزار تنها در خروجی آبخیز راستی‌آزمایی و بررسی می‌شود، این کار در چند نقطه از آبخیز انجام شد. در تحقیق‌های پرشماری یک یا چند پدیده‌ی سیلاب را از سرآب به سوی پایین‌دست روندیابی و شبیه‌سازی کردند.

در این تحقیق، به دلیل توجه به بررسی کارآیی نرم‌افزار در چند نقطه از آبخیز و گستردگی آبخیز کشکان، تاریخ سیلاب‌های رخ داده در بازه‌ی رود کشکان و سرشاخه‌های آن ممکن است متفاوت باشد. چه‌بسا سیلاب‌هایی با شدت متوسط که در سرشاخه‌های رود کشکان رخ می‌دهد اما در شاخه‌ی اصلی جریان (به دلیل کم یا متوسط بودن شدت سیلاب رخ داده در بالادست، آسیب‌های رخ داده در مسیر و گسترده بودن آبخیز کشکان)

پایین‌دست هر بازه به‌کار برده شد. آب‌نگار سیل شبیه‌سازی شده برای هر پدیده سیلاب بررسی شد. این نتایج با اختلاف تابع $f(t)$ و $g(t)$ به دست آمد. شکل ۲ (A)، شکل ۲ (B)، شکل ۲ (C)، شکل ۲ (D)، شکل ۲ (E)، نتیجه‌های شبیه‌سازی سیلاب در ایستگاه پایین‌دست را به ترتیب در بازه‌های یک، دو، سه، چهار و پنج نشان می‌دهد. عدد بعد از حروف اختصاری مربوط به بازه، بیان‌گر شماره‌ی سیلاب بررسی شده در آن بازه است. نتیجه‌های آب‌دهی‌های سیلابی شبیه‌سازی‌شده و آب‌دهی‌های سیلابی مشاهده‌شده بررسی و مقایسه شد. مشاهده شد که آب‌دهی اوج در سیلاب شبیه‌سازی‌شده در پایین‌دست کم‌تر از آب‌دهی سیلاب مشاهده‌شده است. آب‌دهی آب‌پایه به آب‌دهی‌های شبیه‌سازی‌شده اضافه شد، و با در نظر گرفتن مساحت سرآب هر بازه، آب‌دهی‌های ویژه برای هر سیلاب مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده به دست آمد. نکته‌ی مهم دیگر این است که ناهنجاری‌هایی در شبیه‌سازی موج سیلاب در پایین‌دست هست. بی‌قطعیتی آب‌نگار ثبت شده، دامنه‌ی کم بی‌تطابق، و ساده‌سازی نرم‌افزار انتقال-پخش برپایه‌ی سنج‌های ضریب زبری مانینگ را می‌توان از دلایل‌های منطقی این ناهنجاری‌ها دانست.

ضریب زبری مانینگ عامل مهمی در برآورد آب‌دهی است. بر این پایه نتیجه‌های شبیه‌سازی با نرم‌افزار انتقال-پخش، با این عامل واسنجی شد. بیش از ۳۶ پدیده‌ی سیلاب (جدول ۲) بررسی و شبیه‌سازی شد. اندازه‌ی گوناگون ضریب زبری مانینگ واسنجی شده، بی‌قطعیتی شعاع آبی (R) است. شعاع آبی متوسط (R) برای کل بازه ناشی از ژرفای سطح آب در ایستگاه سرآب است. به دلیل دست‌رس بودن شعاع آبی‌های گوناگون، سرعت جریان و پخشیدگی به‌دست آمد (آردیکگیلو و کوریکو ۲۰۱۹؛ هارشا و همکاران ۲۰۲۰؛ یانگ و همکاران ۲۰۱۶). بنابراین، به دلیل نقش مهم ضریب زبری مانینگ در این نرم‌افزار، این ضریب واسنجی شده برای هر سیلاب در جدول ۲ نشان داده شد.

شبیه‌سازی ابزاری مهم برای پژوهش سیلاب و بررسی عامل‌های مهم آن است. به دلیل اهمیت روندیابی در سیلاب، نرم‌افزارهای زیادی برای آن هست (سینگ ۱۹۹۵). اولین یافته‌ی پژوهش این بود که می‌توان از رابطه‌ی انتقال-پخش برای شبیه‌سازی سیلاب در رودخانه‌ها بهره‌گیری کرد. در حالی که پژوهش‌های پرشماری کاربرد رابطه‌ی انتقال-پخش را محدود به پژوهش آلودگی آب، خاک و یا بررسی اثر ردیاب‌های تزریق‌شده می‌داند (کومار و همکاران ۲۰۱۰؛ والتر و همکاران ۲۰۰۷؛ دانگ و همکاران ۲۰۱۳)؛ اما پژوهش‌های محدودی مانند چولت و همکاران (۲۰۱۳)، یانگ و اندرنی (۲۰۱۳)، یانگ و همکاران (۲۰۱۵) و یانگ و همکاران (۲۰۱۶) کاربرد رابطه‌ی انتقال-پخش را در شبیه‌سازی سیلاب بررسی کرده‌اند، و نتیجه‌ی آن‌ها کاربرد رابطه‌ی انتقال-پخش در روندیابی و شبیه‌سازی سیلاب است. در تحقیق چولت و همکاران (۲۰۱۳) بررسی جریان‌های کناری و انتقال مواد محلول در

به‌خوبی شبیه‌سازی کرد و تفاوت مقدار شبیه‌سازی شده با مقدار مشاهده‌شده کم بود. همه‌ی یافته‌های یانگ و همکاران (۲۰۱۶) با پژوهش ما هم خوانی دارد، با این تفاوت که پژوهش بر رود کشکان در چند بازه از سرشاخه‌ها و شاخه‌ی اصلی بود. نرم‌افزار با ضریب زبری مانینگ صحت سنجی شد و برای هر بازه یک ضریب زبری مانینگ متوسط واسنجی شده داده شد (جدول ۳). با بررسی نتیجه‌های محاسبه‌ی ضریب‌های کارایی مانند ناش ساتکلیف، دقت پذیرفتنی این رابطه در شبیه‌سازی و روندیابی سیلاب مشخص شد (جدول ۲).

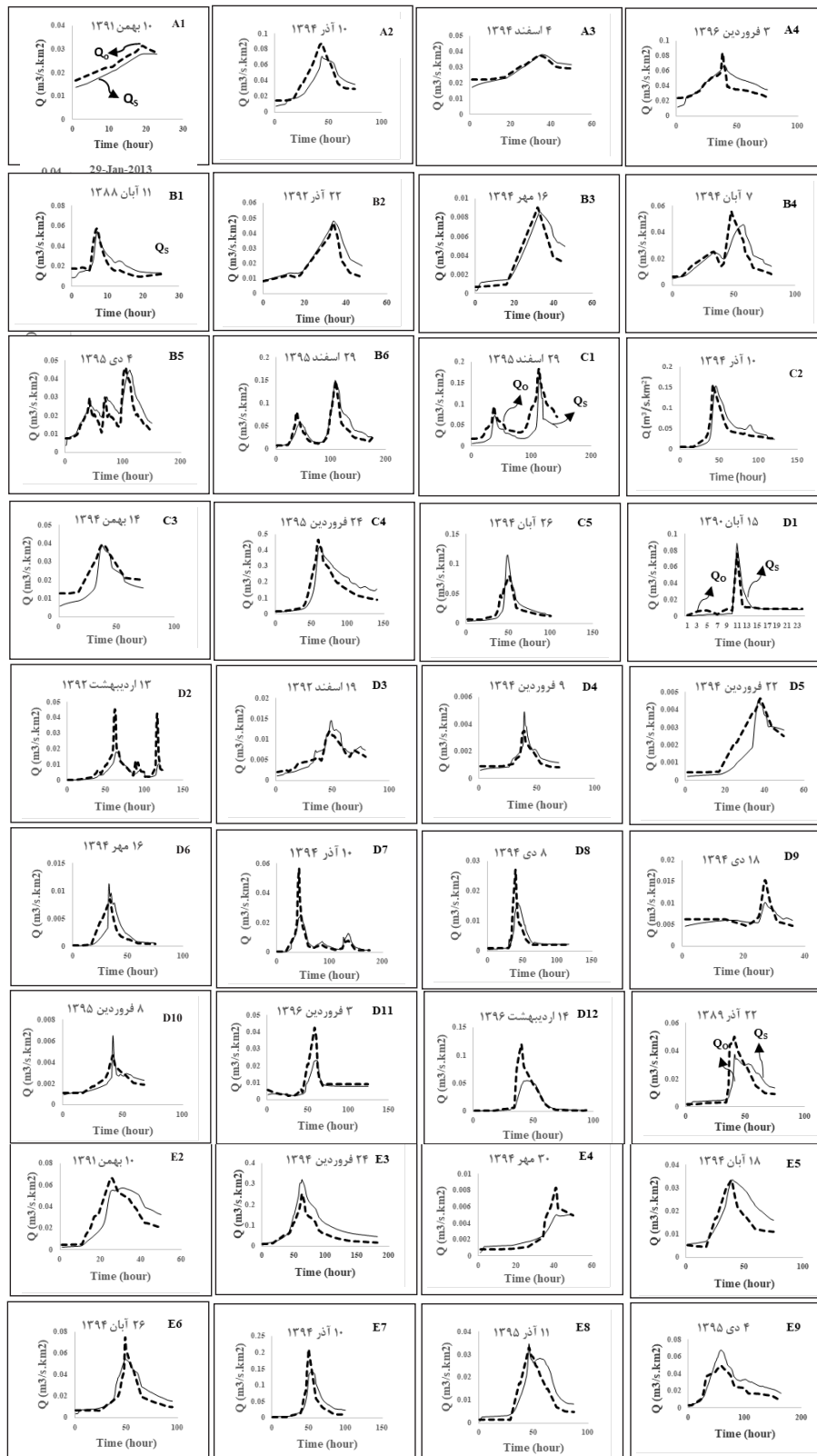
مقدار آب‌دهی‌های شبیه‌سازی شده کمتر از مشاهده‌شده برآورد شد، ممکن است این یافته در همخوانی با چولت و همکاران (۲۰۱۳)، یانگ و اندرنی (۲۰۱۳)، یانگ و همکاران (۲۰۱۵) و یانگ و همکاران (۲۰۱۶) باشد، که کارایی رابطه‌ی انتقال-پخش را در شبیه‌سازی سیلاب بررسی کردند. اگرچه مقیاس پژوهشی این تحقیق‌ها باهم متفاوت است، به‌گونه‌ی که برخی مانند یانگ و اندرنی (۲۰۱۳) در آبخیز شهری، چولت و همکاران (۲۰۱۳) در آبرو کارستی، و یانگ و همکاران (۲۰۱۶) در یک بازه‌ی پژوهشی در رود میسوری آمریکا بود. چولت و همکاران (۲۰۱۳)، یانگ و اندرنی (۲۰۱۳)، یانگ و همکاران (۲۰۱۵) و یانگ و همکاران (۲۰۱۶) تعداد محدودی از پدیده‌های سیلاب را شبیه‌سازی کردند و برای واسنجی کردن نرم‌افزار، مطابق با روال رایج در واسنجی کردن نرم‌افزار، تنها آمار آب‌دهی سیلابی نقطه‌ی خروجی بازه‌ی پژوهشی را به کار بردند، اما در پژوهش ما صحت سنجی و بررسی کارایی نرم‌افزار در چند نقطه از بازه‌های پژوهشی انجام شد. روش‌شناسی این نرم‌افزار در پژوهش ما برای شبیه‌سازی، مقیاس بازه محور بود و شبیه‌سازی آبنگار سیلاب را در مقیاس بازه انجام داد و سازوکارهای انتشار موج سیلاب و سنج‌های مؤثر در آن را بررسی کرد. سنج‌های مهم و مؤثر در این نرم‌افزار برخی ویژگی‌های گیتانگاری حوزه، سرعت جریان و پخشیدگی جریان (یانگ و اندرنی ۲۰۱۳؛ یانگ و همکاران ۲۰۱۶) است. این سنج‌ها فرآیندهای جاری شدن سیلاب از سرآب به پایین دست بر پایه‌ی رابطه‌ی انتقال-پخش و اهمیت ویژگی‌های فیزیکی-آبی آبخیز و بازه‌های بررسی شده در ایجاد موج سیلاب در پایین دست به‌شکل مشاهده‌شده و شبیه‌سازی شده است (کرچنر و همکاران ۲۰۰۱؛ لیانگ ۲۰۱۰). مقدار ضریب مانینگ متوسط برای بازه‌ی یک ۰/۱۲، بازه‌ی دو ۰/۰۴، بازه‌ی سه ۰/۱۱ و بازه‌ی چهار و پنج ۰/۰۵ به‌دست آمد. این تفاوت در مقدار ضریب زبری مانینگ در بازه‌های گوناگون نشان‌گر تفاوت در پوشش گیاهی بستر هر بازه و ویژگی‌های فیزیکی متفاوت است (هارشا و همکاران ۲۰۲۰؛ آردیکگلو و کوریکو ۲۰۱۹). در شکل ۲ آب‌دهی اوج و شکل آبنگار در دو حالت مشاهده‌شده و شبیه‌سازی شده آورده شده است. روند کلی آبنگارهای مشاهده‌شده و شبیه‌سازی شده مشابه است و می‌توان

مشهود نیست و در آمار آب‌سنجی ثبت‌نشده است، و این خود دلیلی برای همسان نبودن تاریخ سیلاب‌های بررسی شده است. بنابراین به دلیل اهمیت بررسی کارایی نرم‌افزار در چند نقطه به‌جای بررسی یک بازه یا رود اصلی جریان، پنج بازه‌ی انتخابی پژوهشی در سرشاخه‌ها و شاخه‌ی اصلی رود کشکان برگزیده شد که اگرچه محدودیت‌هایی دارد سودمندی آن وابستگی مکانی کم‌تر است. در تحقیق چولت و همکاران (۲۰۱۳) منطقه‌ی بررسی شده تنها یک آبرو کارستی در آبخوان، و هفت سیلاب در تاریخ‌های متفاوت بررسی شد. به همین ترتیب پژوهش‌های یانگ و اندرنی (۲۰۱۳) یانگ و همکاران (۲۰۱۵) و یانگ و همکاران (۲۰۱۶) نیز بررسی رابطه‌ی انتقال-پخش محدود به یک بازه‌ی پژوهشی مشخص در آبخیز، و تعداد کمی سیلاب بود. در پژوهش یانگ و اندرنی (۲۰۱۳)، چهار پدیده‌ی سیلاب در یک بازه‌ی مشخص با رابطه‌ی انتقال-پخش شبیه‌سازی شد. در همه‌ی سیلاب‌ها روند به‌خوبی شبیه‌سازی شد اما مقدار شبیه‌سازی شده از مقدار مشاهده شده کم‌تر بود. مقدار ناش ساتکلیف بیش‌تر از ۰/۹ در همه‌ی پدیده‌های سیلاب شبیه‌سازی شده تأییدکننده‌ی کارایی رابطه‌ی انتقال-پخش بود. در پژوهش ما در آبخیز کشکان نیز مقدار ناش ساتکلیف در ۲۹ سیلاب شبیه‌سازی شده از ۳۶ سیلاب پذیرفتنی بود. ضمن آن‌که با ضریب‌های کارایی دیگری نیز کارایی این رابطه در شبیه‌سازی سیلاب تأیید شد. تمرکز یانگ و همکاران (۲۰۱۵) بر اثر پوشش گیاهی و ضریب‌های زبری گوناگون در زمان‌بندی حرکت روان آب و حجم روان آب بود. آن‌ها با کار گذاشتن قطعه‌هایی از پوشش گیاهی یا ایجاد کردن بسترهایی مصنوعی، روان آب‌های شبیه‌سازی شده را بر پایه‌ی رابطه‌ی انتقال-پخش و روان آب‌های مشاهده‌شده مقایسه‌ی کردند. تحقیق آن‌ها حاکی از اثر زیاد ضریب‌های زبری گوناگون در ایجاد روان آب و کارایی نرم‌افزار انتقال-پخش در شبیه‌سازی سیلاب در آبخیز شهری بود. در پژوهش ما بر آبخیز کشکان نیز به این موضوع توجه شد. به دلیل اهمیت زبری سطح گوناگون در زمان‌بندی و حجم روان آب، از ضریب زبری مانینگ بهره‌گیری شد که عاملی مهم برای واسنجی نرم‌افزار شبیه‌سازی سیلاب بر پایه‌ی رابطه‌ی انتقال-پخش است.

یانگ و همکاران (۲۰۱۶) در یک بازه‌ی انتخابی پژوهشی بر شش پدیده‌ی سیلاب در میسوری آمریکا این فرض را در نظر گرفتند که در سیلاب، جریان کناری به جریان اصلی وارد نمی‌شود و بارش باران نیز رخ نمی‌دهد. و نرم‌افزار را بر پایه‌ی ضریب زبری مانینگ واسنجی کردند. برای بازه‌ی پژوهشی به مقدار معینی از ضریب زبری مانینگ دست یافتند، که متوسطی از ضریب زبری آن بازه در نظر گرفته شد. در همه‌ی سیلاب‌های شبیه‌سازی شده، مقدار آب‌دهی‌های شبیه‌سازی شده کم‌تر از آب‌دهی‌های مشاهده‌شده بود، اگرچه روند شبیه‌سازی را

مبتنی بر فیزیک برای به‌دست آوردن اطلاعات پایه‌ی و لازم از بازه‌های رودخانه، آبخیز و شرایط آب‌وهوایی بهره‌گیری کرد (حسن و همکاران ۲۰۱۵؛ لندرو و همکاران ۲۰۰۹؛ یانگ و اندرنی ۲۰۱۳؛ یانگ و همکاران ۲۰۱۶). در بیش‌تر پدیده‌های سیلاب شبیه‌سازی‌شده، مقدار آب‌دهی‌های شبیه‌سازی‌شده از آب‌دهی‌های مشاهده‌شده کم‌تر است که مشابه با چولت و همکاران (۲۰۱۳)، یانگ و اندرنی (۲۰۱۳)، یانگ و همکاران (۲۰۱۵) و یانگ و همکاران (۲۰۱۶) است. هدف شبیه‌سازی سیلاب و روند سیلاب پذیرفتنی بود، و ممکن است آب‌دهی‌های مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده کاملاً برهم منطبق نباشد. این نکته برای آب‌دهی‌های اوج مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده هم درست است. این موضوع می‌تواند علاوه بر پیچیدگی جریان سیلاب مربوط به ماهیت شبیه‌سازی باشد، زیرا در این تحقیق نرم‌افزار یک‌بعدی در نظر گرفته‌شد، و در شبیه‌سازی برخی از سنج‌های مؤثر در جریان دیده‌شد، اما طبیعتاً همه‌ی عامل‌های مؤثر در جریان دیده‌نشده. نرم‌افزار مبتنی بر رابطه‌ی انتقال-پخش توانایی پذیرش در شبیه‌سازی و روندیابی سیلاب دارد. این تحقیق محدودیت‌هایی داشت. برای ساده‌سازی بهره‌گیری از رابطه‌ی انتقال-پخش، نرم‌افزار یک‌بعدی در نظر گرفته‌شد، و تنها با ضریب زبری مانینگ، صحت سنجی شد. این رابطه در قالب نرم‌افزارهای دو یا سه‌بعدی است، و افزودن عامل‌هایی که در واسنجی کردن نرم‌افزار به‌کار می‌رود، دقت این نرم‌افزار را بیش‌تر کرده است. البته، ساده‌سازی نرم‌افزار همان‌گونه که محدودیت است، ممکن است سودمندی آن هم باشد. این سودمندی زمانی بیش‌تر به چشم می‌آید که نرم‌افزار ساده‌شده بتواند دقت زیادی در شبیه‌سازی‌های خود نشان دهد. بهره‌گیری از رابطه‌ی ساده‌شده‌ی انتقال-پخش در شبیه‌سازی سیلاب در پنج بازه‌ی پژوهشی از سرشاخه‌ها و شاخه‌ی اصلی رود کشکان، آبخیز کشکان، نتیجه‌های پذیرفتنی داد. پذیرفتن این نتیجه‌ها از ضریب‌های کارآیی گوناگون اثبات شد.

گفت که نرم‌افزار انتقال-پخش روند را به‌خوبی شبیه‌سازی کرده است. از سوی دیگر، برآورد مقدار آب‌دهی اوج آبنگار سیلاب شبیه‌سازی‌شده کم‌تر از آبنگار سیلاب مشاهده‌شده بود. آب‌دهی اوج عددی با فراوانی روی‌داد کم‌تر است که از دیدگاه آماری هنگام بهینه‌شدن نیز کم‌تر در حالت دل‌خواه است، و ایراد نبود پوشش در بسیاری از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی روان‌آب از جمله نرم‌افزارهای مشابه این تحقیق همچون یانگ و همکاران (۲۰۱۶) دیده‌شد. یکی از دلیل‌های برای این وضعیت ممکن است این باشد که آب‌دهی اوج نقطه یا نقطه‌های محدودی است. در حالی که شاخه‌ی بالارونده و یا شاخه‌ی پایین‌رونده از تعداد نقطه‌های بیش‌تری تشکیل‌شده است. بنابراین، در نمایه‌های آماری گرفتن آب‌دهی اوج معمولاً در حیطه‌ی عددهای متوسط دشوار می‌شود. از سوی دیگر، مسئله‌ی مهم در این تحقیق بهره‌گیری از رابطه‌ی انتقال-پخش برای شبیه‌سازی آبنگار سیلاب است و بهبود شبیه‌سازی آب‌دهی اوج ممکن است زمینه‌ی کاری تحقیق‌های آینده باشد. اگرچه تلاش شد که با واسنجی کردن ضریب زبری مانینگ، شبیه‌ترین حالت در آبنگار شبیه‌سازی‌شده به آبنگار مشاهده‌شده به‌دست آید. آب‌دهی نتیجه گرفته‌شده در این تحقیق از نوع آب‌دهی ویژه است. در واقع از مساحت سرآب هر بازه با فرض رفتار خطی برای تعیین آب‌دهی ویژه‌ی بازه بهره‌برداری‌شده است. البته در برخی موارد مانند سیلاب ۲۲ آذر ۱۳۹۲، ۲۶ آبان ۱۳۹۴ و ۱۸ آبان ۱۳۹۴ وضعیت متفاوتی مشاهده‌شد، و مقدار آب‌دهی اوج آبنگار سیلاب مشاهده‌شده کم‌تر از آبنگار سیلاب شبیه‌سازی‌شده بود. یکی از دلیل‌های آن ممکن است پیچیدگی جریان سیلاب باشد. آب‌دهی خروجی سیلاب ارتباط تنگاتنگی با سرعت جریان دارد. ترکیبی از اطلاعات مکانی و زمانی برای تعیین آب‌دهی خروجی سیلاب در آبخیز مهم است. شرایط آب و هوایی هم ممکن است در این زمینه مؤثر باشد. برای راه‌حلی در وارد کردن پیچیدگی جریان خروجی سیلاب می‌توان از تجزیه و تحلیل داده‌های آب‌دهی خروجی سیلاب و معادله‌های



شکل ۲- مقایسه‌ی آبدهی ویژه‌ی سیلاب شبیه‌سازی شده ($m^3/s.km^2$) در پایین‌دست (خط مشکی ساده) با آبدهی ویژه‌ی سیلاب مشاهده‌شده ($m^3/s.km^2$) در پایین‌دست (خط نقطه‌چین) در واحد زمانی ساعتی (محور افقی) با نرم‌افزار انتقال-پخش در بازه‌های انتخاب-شده: بازه‌ی یک (A)، بازه‌ی دو (B)، بازه‌ی سه (C)، بازه‌ی چهار (D)، بازه‌ی پنج (E).

جدول ۳- اعتبارسنجی نرم‌افزار انتقال-پخش با ضریب‌های کارآیی گوناگون و ضریب زبری مانینگ واسنجی شده برای هر سیلاب.

| بازه | تاریخ سیلاب | ضریب زبری مانینگ | R | R ² | KGE | RMSE | CE | VE |
|------|------------------|------------------|------|----------------|------|--------|------|------|
| ۱ | ۱۰ بهمن ۱۳۹۱ | ۰/۱۶ | ۰/۹۹ | ۰/۹۶ | ۰/۸۵ | ۰/۰۰۲ | ۰/۶۳ | ۰/۸۸ |
| | ۱۰ آذر ۱۳۹۴ | ۰/۱۵ | ۰/۸۴ | ۰/۷۲ | ۰/۷۶ | ۰/۰۱۲ | ۰/۶۶ | ۰/۷۴ |
| | ۴ اسفند ۱۳۹۴ | ۰/۱۲ | ۰/۹۶ | ۰/۹۳ | ۰/۷۲ | ۰/۰۰۲ | ۰/۸۲ | ۰/۹۳ |
| | ۳ فروردین ۱۳۹۶ | ۰/۰۵ | ۰/۷۷ | ۰/۵۹ | ۰/۷۰ | ۰/۰۱۰ | ۰/۲۸ | ۰/۷۸ |
| ۲ | ۱۱ آبان ۱۳۸۸ | ۰/۰۵ | ۰/۸۴ | ۰/۷۱ | ۰/۷۸ | ۰/۰۰۶ | ۰/۶۸ | ۰/۷۱ |
| | ۲۲ آذر ۱۳۹۲ | ۰/۰۴ | ۰/۹۴ | ۰/۸۹ | ۰/۷۶ | ۰/۰۰۵ | ۰/۷۴ | ۰/۸۰ |
| | ۱۶ مهر ۱۳۹۴ | ۰/۰۴ | ۰/۹۲ | ۰/۸۵ | ۰/۸۶ | ۰/۰۰۱ | ۰/۸۲ | ۰/۷۴ |
| | ۷ آبان ۱۳۹۴ | ۰/۰۳ | ۰/۷۹ | ۰/۶۳ | ۰/۷۵ | ۰/۰۰۷ | ۰/۶۱ | ۰/۷۱ |
| ۳ | ۴ دی ۱۳۹۵ | ۰/۰۵ | ۰/۸۷ | ۰/۷۵ | ۰/۷۶ | ۰/۰۰۵ | ۰/۵۸ | ۰/۷۴ |
| | ۲۹ اسفند ۱۳۹۵ | ۰/۰۵ | ۰/۹۱ | ۰/۸۴ | ۰/۷۵ | ۰/۰۱۵ | ۰/۷۵ | ۰/۶۸ |
| | ۲۹ اسفند ۱۳۹۵ | ۰/۱۵۸ | ۰/۸۹ | ۰/۸۰ | ۰/۶۵ | ۰/۰۱۱ | ۰/۶۲ | ۰/۶۴ |
| | ۱۰ آذر ۱۳۹۴ | ۰/۱۱ | ۰/۹۰ | ۰/۸۱ | ۰/۷۹ | ۰/۰۱۷ | ۰/۷۳ | ۰/۶۷ |
| ۴ | ۱۴ بهمن ۱۳۹۴ | ۰/۱۵ | ۰/۹۲ | ۰/۸۵ | ۰/۷۱ | ۰/۰۰۶ | ۰/۳۷ | ۰/۷۷ |
| | ۲۴ فروردین ۱۳۹۵ | ۰/۲۹ | ۰/۸۸ | ۰/۷۸ | ۰/۸۳ | ۰/۰۵۲ | ۰/۷۳ | ۰/۷ |
| | ۲۶ آبان ۱۳۹۴ | ۰/۱۵ | ۰/۸۹ | ۰/۸۰ | ۰/۵۵ | ۰/۰۰۳ | ۰/۳۴ | ۰/۶ |
| | ۱۵ آبان ۱۳۹۰ | ۰/۰۵ | ۰/۹۵ | ۰/۹۰ | ۰/۷۱ | ۰/۰۰۶ | ۰/۷۹ | ۰/۶۷ |
| ۵ | ۱۳ اردیبهشت ۱۳۹۲ | ۰/۰۵ | ۰/۷۷ | ۰/۶۰ | ۰/۳۵ | ۰/۰۰۶ | ۰/۴۳ | ۰/۶۲ |
| | ۱۹ اسفند ۱۳۹۲ | ۰/۰۵ | ۰/۹۵ | ۰/۹۱ | ۰/۶۱ | ۰/۰۰۱ | ۰/۷۳ | ۰/۷۹ |
| | ۹ فروردین ۱۳۹۴ | ۰/۰۵ | ۰/۸۸ | ۰/۷۸ | ۰/۶۹ | ۰/۰۰۰۴ | ۰/۵۹ | ۰/۷۵ |
| | ۲۲ فروردین ۱۳۹۴ | ۰/۱۷ | ۰/۹۰ | ۰/۸۱ | ۰/۷۳ | ۰/۰۰۰۸ | ۰/۶۸ | ۰/۷۲ |
| ۶ | ۱۶ مهر ۱۳۹۴ | ۰/۰۵ | ۰/۷۵ | ۰/۵۷ | ۰/۷۲ | ۰/۰۰۱ | ۰/۴۴ | ۰/۴۲ |
| | ۱۰ آذر ۱۳۹۴ | ۰/۰۵ | ۰/۸۵ | ۰/۷۲ | ۰/۶۵ | ۰/۰۰۴ | ۰/۶۹ | ۰/۶۱ |
| | ۸ دی ۱۳۹۴ | ۰/۰۵ | ۰/۷۵ | ۰/۵۶ | ۰/۶۹ | ۰/۰۰۳ | ۰/۵۵ | ۰/۵۶ |
| | ۱۸ دی ۱۳۹۴ | ۰/۰۵ | ۰/۷۹ | ۰/۶۲ | ۰/۵۰ | ۰/۰۰۱ | ۰/۵۳ | ۰/۸۳ |
| ۷ | ۸ فروردین ۱۳۹۵ | ۰/۰۶ | ۰/۸۳ | ۰/۷۰ | ۰/۸۳ | ۰/۰۰۰۵ | ۰/۶۵ | ۰/۸۱ |
| | ۳ فروردین ۱۳۹۶ | ۰/۰۴ | ۰/۹۲ | ۰/۸۶ | ۰/۵۱ | ۰/۰۰۴ | ۰/۶۵ | ۰/۷۴ |
| | ۱۴ اردیبهشت ۱۳۹۶ | ۰/۰۴ | ۰/۸۵ | ۰/۷۲ | ۰/۴۹ | ۰/۰۱ | ۰/۶۳ | ۰/۶۳ |
| | ۲۲ آذر ۱۳۸۹ | ۰/۰۵ | ۰/۷۹ | ۰/۶۳ | ۰/۷۰ | ۰/۰۰۸ | ۰/۶۳ | ۰/۶۱ |
| ۸ | ۱۰ بهمن ۱۳۹۱ | ۰/۱۵ | ۰/۸۳ | ۰/۶۹ | ۰/۸۰ | ۰/۰۱ | ۰/۶۱ | ۰/۶۷ |
| | ۲۴ فروردین ۱۳۹۴ | ۰/۰۵ | ۰/۹۶ | ۰/۹۳ | ۰/۲۸ | ۰/۰۰۴ | ۰/۳۳ | ۰/۳۷ |
| | ۳۰ مهر ۱۳۹۴ | ۰/۰۲ | ۰/۹۴ | ۰/۸۸ | ۰/۶۵ | ۰/۰۰۱ | ۰/۸۰ | ۰/۷۳ |
| | ۱۸ آبان ۱۳۹۴ | ۰/۰۱ | ۰/۷۹ | ۰/۶۳ | ۰/۶۶ | ۰/۰۰۶ | ۰/۳۴ | ۰/۶۲ |
| ۹ | ۲۶ آبان ۱۳۹۴ | ۰/۰۵ | ۰/۹۳ | ۰/۸۶ | ۰/۷۸ | ۰/۰۰۶ | ۰/۷۹ | ۰/۷۳ |
| | ۱۰ آذر ۱۳۹۴ | ۰/۰۵ | ۰/۸۷ | ۰/۷۶ | ۰/۷۶ | ۰/۰۰۲ | ۰/۷۵ | ۰/۵۳ |
| | ۱۱ آذر ۱۳۹۵ | ۰/۰۲ | ۰/۸۸ | ۰/۷۷ | ۰/۷۶ | ۰/۰۰۵ | ۰/۷۱ | ۰/۵۹ |
| | ۴ دی ۱۳۹۵ | ۰/۰۵ | ۰/۹۰ | ۰/۸۱ | ۰/۶۱ | ۰/۰۱ | ۰/۴۵ | ۰/۶۱ |

ضریب همبستگی (R)، ضریب تعیین (R²)، ضریب کالینگ گوپتا (KGE)، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)، ضریب ناش ساتکلیف (CE) و بازدهی حجمی (Volumetric Efficiency).

فروردین ۱۳۹۶ در بازه‌ی اول، سیلاب ۱۴ بهمن ۱۳۹۴ و ۲۶ آبان ۱۳۹۴ در بازه‌ی سوم، سیلاب ۱۳ اردیبهشت ۱۳۹۲ در بازه‌ی چهارم و سیلاب‌های ۲۴ فروردین ۱۳۹۴ و ۴ دی ۱۳۹۵ در بازه‌ی پنجم مقدار ناش- ساتکلیف کم‌تری از ضریب کالینگ گوپتا بود. مقدار همه‌ی ضریب‌های کارآیی آن‌ها زیاد بود. دلیل کم‌تر بودن

همه‌ی ضریب‌ها دقتی پذیرفتنی از عمل‌کرد نرم‌افزار انتقال-پخش را در شبیه‌سازی آب‌دهی سیلاب ایستگاه خروجی نشان داد. نتیجه‌های هم‌سو برای ضریب‌های کارآیی پرشمار اطمینان بیش‌تری درباره‌ی صحت عمل‌کرد نرم‌افزار می‌دهد. برخی از پدیده‌های سیلاب شبیه‌سازی شده مانند سیلاب ۳

در حالت مناسب خود است. این ویژگی در نرم‌افزارهای زیادی دیده شد (چولت و همکاران ۲۰۱۳؛ یانگ و همکاران ۲۰۱۶). پیچیدگی‌های جریان سیلاب، شرایط منطقه، رفتارهای آب‌شناسی آبخیز، یک‌بعدی بودن نرم‌افزار (در نظر گرفتن عامل‌های مؤثر گوناگون در جریان) و نبود اطمینان به داده‌های ثبت‌شده ممکن است از دلایل دیگر آن باشد.

مقدار متوسط ضریب زبری مانینگ برای بازه‌های اول تا پنجم به ترتیب ۰/۱۲، ۰/۰۴، ۰/۱۱، ۰/۰۵ و ۰/۰۵ به دست آمد. ضریب زبری مانینگ در ارتباط با پوشش گیاهی بستر رودخانه و خصوصیت‌های فیزیکی بازه‌های بررسی شده است (آردیکگلو و کوریکیو ۲۰۱۹؛ هارشا و همکاران ۲۰۲۰). جریان آب در رودهای باز در منطقه‌های کوهستانی با پوشش گیاهی و خاک کم‌تر از ۲۵٪ میان ۰/۰۵ تا ۰/۲۵، و در جریان‌های کوهستانی بی پوشش گیاهی ۰/۱ است (سازمان ترابری ایالات متحده آمریکا ۱۹۸۹). ضریب زبری مانینگ در این تحقیق پذیرفتنی است؛ زیرا منطقه‌ی بررسی شده کوهستانی است.

روال رایج شبیه‌سازی آب‌نگار سیلاب محدود به شبیه‌سازی و صحت سنجی تعداد محدودی پدیده‌ی سیلاب با تاریخ‌های یکسان در یک بازه‌ی انتخابی پژوهشی است. به دلیل کم یا متوسط بودن شدت سیلاب رخ داده در بالادست، تلفاتی که در مسیر رخ می‌دهد و گستردگی آبخیز کشکان واقع در آبخیز کشکان در بازه‌های رود کشکان و سرشاخه‌های آن ممکن است متفاوت باشد.

در بسیاری از پژوهش‌های شبیه‌سازی سیلاب، تنها یک بازه‌ی بررسی شده قرار می‌گیرد اما در این تحقیق پنج بازه‌ی پژوهشی بود. در آبخیز کشکان فرض بر این است که جریان‌های کناری در مسیر به جریان اصلی اضافه نمی‌شود. با این فرض، به‌ویژه در آبخیز گسترده‌ی مانند کشکان، شبیه‌سازی جریان ممکن است به‌خوبی انجام نشود. بنابراین بازه‌های بیش‌تری انتخاب شد. دلیل دیگر توجه به بررسی کارآیی نرم‌افزار در چند نقطه‌ی حوزه‌ی آبخیز است.

شاخص‌های ارزیابی نشان‌دهنده‌ی کارآیی نرم‌افزار و دقت فراوان آن در شبیه‌سازی سیلاب بود. اگرچه حساسیت زیاد ضریب ناش-ساتکلیف به پراکندگی داده‌ها باعث کم‌شدن آن‌ها در شش سیلاب شبیه‌سازی شده با مقدار پذیرفتنی ضریب‌های کارآیی دیگر شد. در تحقیق‌های مشابهی، از رابطه‌ی انتقال-پخش برای شبیه‌سازی انتقال آب رودخانه بهره‌گیری شد (چولت و همکاران ۲۰۱۳؛ یانگ و همکاران ۲۰۱۳؛ یانگ و همکاران ۲۰۱۶). هم‌راستای پژوهش ما، نتیجه‌ی آن‌ها نیز کارآیی زیاد در شبیه‌سازی سیلاب بود. ضریب‌های کارآیی به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که می‌توان از این نرم‌افزار برای شبیه‌سازی سیلاب در منطقه‌های دیگر بهره‌گرفت. با اطلاعات بیش‌تر، پیشنهاد می‌شود که با هدف بهبود دادن نتیجه‌ها می‌توان ساده‌سازی رابطه‌ی انتقال-پخش را کاهش داد.

ضریب کارآیی ناش ساتکلیف از کالینگ گوپتا را می‌توان حساسیت زیاد ناش ساتکلیف به پراکندگی داده‌ها در برخی قسمت‌های بازوی بالارونده یا پایین‌رونده‌ی آب‌نگار شبیه‌سازی شده سیلاب دانست (کوبن و همکاران ۲۰۱۹). نتیجه‌های این پژوهش نشان می‌دهد که شبیه‌سازی آب‌نگار سیلاب با نرم‌افزار انتقال-پخش ممکن است کارآیی نرم‌افزار را در پنج بازه‌ی بررسی شده در آبخیز کشکان تأیید کند.

روش کاربردی در این تحقیق که مبتنی بر رابطه‌ی ساده‌شده‌ی انتقال-پخش در قالب نرم‌افزار انتقال-پخش و بهره‌گیری از داده‌های آب-سنجی (آب‌دهی و تراز آب سیلاب ثبت‌شده با ایستگاه‌های آب‌سنجی سرآب و پایین‌دست) یک بازه است، نتیجه‌هایی پذیرفتنی داده است. این روش ممکن است الگویی برای تعیین یا تخمین زبری رود، سرعت جریان و پخشیدگی جریان بهره‌گیری شود و در نتیجه برای روندیابی سیلاب مفید باشد (یانگ و اندرنی ۲۰۱۳؛ یانگ و همکاران ۲۰۱۶).

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این تحقیق از نرم‌افزار روندیابی سیلاب بر پایه‌ی رابطه‌ی ساده‌شده‌ی انتقال-پخش برای شبیه‌سازی آب‌نگار سیلاب بهره‌گیری شد. منطقه‌ی بررسی شده پنج بازه‌ی پژوهشی از سرشاخه‌ها و شاخه‌ی اصلی رود کشکان واقع در آبخیز کشکان استان لرستان بود. آب‌نگار ۳۷ سیلاب رخ داده در بازه‌های پژوهشی شبیه‌سازی شد. از یک‌سو، آب‌دهی مشاهده‌شده و داده‌های آب‌سنجی ثبت‌شده شرایط مرزی و ضریب زبری مانینگ عامل واسنجی این نرم‌افزار گرفته شد. با تغییر در ضریب زبری مانینگ بهترین تطابق بین شاخه‌ی پایین‌رونده‌ی آب‌نگار مشاهده‌شده و شبیه‌سازی شده ایجاد شد. تحلیل رابطه‌ی محاسبه‌ی نرم‌افزار نشان‌گر نقش کلیدی ضریب زبری مانینگ در این نرم‌افزار است. برآورد سرعت جریان و پخشیدگی موج سیلاب از دیگر جنبه‌های مهم این پژوهش بود. موج سیلاب در پایین‌دست هر بازه‌ی پژوهشی با رابطه‌ی ساده‌شده‌ی انتقال-پخش در نرم‌افزاری برنامه‌نویسی شده در برنامه‌ی متلب شبیه‌سازی شد.

مقایسه‌ی روند آب‌نگار، زمان اوج و ویژگی‌های آب‌نگار مشاهده‌شده و شبیه‌سازی شده نشان‌دهنده‌ی شبیه‌سازی پذیرفتنی سیلاب در پایین‌دست هر بازه‌ی پژوهشی است، هر چند مقدار آب‌دهی اوج سیلاب در آب‌نگار سیلاب شبیه‌سازی شده با آب‌دهی مشاهده‌شده متفاوت است، که در کنار عامل محتمل ایجادکننده‌ی خطا، ممکن است به دلیل کم تکرارپذیر بودن آب‌دهی اوج باشد. آب‌دهی اوج نقطه یا نقطه‌های محدودی است، در حالی که شاخه‌ی بالارونده یا پایین‌رونده از تعداد نقطه‌های بیش‌تری تشکیل شده است. از آن‌جا که عمل کرد این نرم‌افزارها بر پایه‌ی نمایه‌های آماری است و نمایه‌های آماری بر پایه‌ی میانگین‌گیری کار می‌کند، آب‌دهی اوج معمولاً در محدوده‌ی عددهای میانگین نیست، و در زمان بهینه‌سازی کم‌تر

- Andrews ED. 1980. Effective and bankfull discharges of streams in the Yampa River Basin, Colorado and Wyoming. *Journal of Hydrology*. 46(3-4):311–330.
- Ardıçlıoğlu M, Kuriqi A. 2019. Calibration of channel roughness in intermittent rivers using HEC-RAS model: Case of Sarımsaklı creek, Turkey. *SN Applied Sciences*. 1(9):1–9.
- Bellos V, Tsakiris G. 2016. A hybrid method for flood simulation in small catchments combining hydrodynamic and hydrological techniques. *Journal of Hydrology*. 540:331–339.
- Biggin D. 1996. A comparison of ERS-1 satellite radar and aerial photography for river flood mapping. *Water and Environment Journal*. 10(1):59–64.
- Cooperation with the Department of Transportation, Federal Highway Administration. 1989. Published guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains. Available at <https://pubs.usgs.gov/wsp/2339/>. United States Geological Survey Water-Supply Paper 2339, US Government Printing Office Washington, DC, USA.
- Chen Y. 2010. Numerical modelling of solute transport processes using higher order accurate finite difference schemes. Numerical treatment of flooding and drying in tidal flow simulations and higher order accurate finite difference modelling of the advection diffusion equation for solute transport predictions. Ph.D. Dissertation. Department of Civil Engineering. University of Bradford. 328 p.
- Cholet C, Charlier JB, Moussa R, Steinmann M, Denimal S. 2017. Assessing lateral flows and solute transport during floods in a conduit-flow-dominated karst system using the inverse problem for the advection–diffusion equation. *Hydrology and Earth System Sciences*. 21(7):3635–3653.
- Courty LG, Pedrozo-Acuña A, Bates PD. 2017. Itzi (version 17.1): an open-source, distributed GIS model for dynamic flood simulation. *Geoscientific Model Development*. 10(4):1835–1847.
- De Saint-Venant B. 1871. Theory of unsteady water flow, with application to river floods and to propagation of tides in river channels. *French Academy of Science*. 73(1):148–154.
- Dong W, Wang Q, Zhou B, Shan Y. 2013. A simple model for the transport of soil-dissolved chemicals in runoff by raindrops. *Catena*. 101(1):129–35.
- Foroozand H, Afzali SH. 2015. A comparative study of honey-bee mating optimization algorithm and support vector regression system approach for river discharge prediction case study: Kashkan River Basin. *Proceedings of the International Conference on Civil Engineering Architecture and Urban Infrastructure*, 29–30 July, Tabriz, Iran. 14 p.
- Gillham R, Sudicky E, Cherry J, Frind E. 1984. An advection-diffusion concept for solute transport in heterogeneous unconsolidated geological deposits. *Water Resources Research*. 20(3): 369–378.
- Harsha S, Agarwal S, Kiran C. 2020. Regional flood forecasting using SWMM for Urban Catchment. 9(3): 1027–1031.
- Hasan MM, Rahman SM, Mahamud U. 2015. Numerical modeling for the propagation of tsunami wave and corresponding inundation. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR J Mech Civil Eng)*. 12(2):55–62.
- Kia MB, Piraštah S, Pradhan B, Mahmud AR, Sulaiman WNA, Moradi A. 2012. An artificial neural network model for flood simulation using GIS: Johor River Basin, Malaysia. *Environmental Earth Sciences*. 67(1):251–264.
- Kirchner JW, Feng X, Neal C. 2001. Catchment-scale advection and dispersion as a

- mechanism for fractal scaling in stream tracer concentrations. *Journal of Hydrology*. 254(1-4):82-101.
- Kumar A, Jaiswal DK, Kumar N. 2010. Analytical solutions to one-dimensional advection-diffusion equation with variable coefficients in semi-infinite media. *Journal of Hydrology*. 380(3-4):330-337.
- Knoben WJ, Freer JE, Woods RA. 2019. Inherent benchmark or not? Comparing Nash-Sutcliffe and Kling-Gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences*. 23(10):4323-31.
- Leandro J, Chen AS, Djordjević S, Savić DA. 2009. Comparison of 1D/1D and 1D/2D coupled (sewer/surface) hydraulic models for urban flood simulation. *Journal of Hydraulic Engineering*. 135(6):495-504.
- Liang Q. 2010. Flood simulation using a well-balanced shallow flow model. *Journal of Hydraulic Engineering*. 136(9):669-675.
- Singh VP. 1995. Computer models of watershed hydrology. Water Resources Pubns; Reprinted Edition (March 1, 2012). pp. 80-120.
- Turhan E, Ozmen-Cagatay H, Tanteekin A. 2019. Modeling flood shock wave propagation with the smoothed particle hydrodynamics (SPH) method: An experimental comparison study. *Applied Ecology and Environmental Research*. 17(2):3033-3047.
- Mays LW. 2010. Water resources engineering. In: John Wiley & Sons. Chapter 12, water distribution. pp. 463-547.
- Walter MT, Gao B, Parlange JY. 2007. Modeling soil solute release into runoff with infiltration. *Journal of Hydrology*. 347(3-4):430-7.
- Yang Y, Endreny TA. 2013. Watershed hydrograph model based on surface flow diffusion. *Water Resources Research*. 49(1):50-516.
- Yang Y, Endreny TA, Nowak DJ. 2015. Simulating the effect of flow path roughness to examine how green infrastructure restores urban runoff timing and magnitude. *Urban Forestry & Urban Greening*. 14(2):361-7.
- Yang Y, Endreny TA, Nowak DJ. 2016. Application of advection-diffusion routing model to flood wave propagation: A case study on Big Piney River, Missouri USA. *Journal of Earth Science*. 27(1):9-14.
- Yen B, Tsai C-S. 2001. On noninertia wave versus diffusion wave in flood routing. *Journal of Hydrology*. 244(1-2):97-104.
- Younis J, Anquetin S, Thielen J. 2008. The benefit of high-resolution operational weather forecasts for flash flood warning. *Hydrology and Earth System Sciences*. 12(4): 1039-1051.



Watershed Management Research

VOL. 35, No.2, Ser. No: 135, Summer 2022, pp.16 -30

DOI: 10.22092/WMRJ.2021.354915.1419

Research Paper



Flood Hydrograph Simulation Using Simplified Advection-Diffusion Equations in Kashkan Watershed, Lorestan Province

Mania Daneshfar

PhD student of watershed management, Faculty of Earth Science, Shahrekord University

Khodayar Abdollahi

(Corresponding Author)* Assistant professor, Faculty of Earth Science, Shahrekord University

Amir Hamzeh Haghiabi

Professor, Department of Water Engineering, Lorestan University

Nasrin Gharahi Ghehi

Assistant professor, Faculty of Earth Science, Shahrekord University

Mehdi Pajoohesh

Assistant professor, Faculty of Earth Science, Shahrekord University

Ali Raiesi

Assistant professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, shahrekord University

Corresponding Author Email: kabdolla@sku.ac.ir

Received: 25 July 2021 Accepted: 20 September 2021

Abstract

Investigation of floods as one of the most common natural destructive phenomena is very important. Due to the problem of deficiency and defect of hydraulic data in most hydrometric stations in the country, flood hydrograph simulation by hydrological and hydraulic models is helpful. There are several hydrological and hydraulic models to simulate flood hydrographs. The present study has investigated the performance of Advection-Diffusion relationships of 36 flood phenomena in 5 study reaches of Kashkan river and its tributary. Physical properties related to the studied periods and hydrometry data related to each flood phenomenon, including discharge and scale of the input and output station, were used to determine the Manning roughness coefficient and flood simulation. Evaluation of obtained hydrographs indicates the acceptable accuracy of the model in term of simulating values of flood trends and discharge. In order to evaluate the accuracy of the model results, different coefficients such as: Nash-Sutcliffe, RMSE, Volumetric Efficiency, Kling-Gupta and R correlation coefficient were calculated. A value above 0.5 for the Nash-Sutcliffe coefficient in 29 flood phenomena out of 36 studied phenomena, and an acceptable range of other coefficients for all studied flood phenomena, indicates the verifiable results of flood hydrograph simulation using simplified propagation methods at reach scale for studied watershed. Therefore, Advection-Diffusion relationships can be used in similar watersheds to the study area to simulate floods.

■ **Keywords:** Diffusion equations, interval scale, Maning roughness coefficient, Nash-sutcliffe coefficient, surface flow ■