

## بررسی تأثیر عملیات آبخیزداری بر توزیع جریان سطحی با استفاده از معرفی الگوریتم توزیع جهت جریان متعدد

علی طالبی<sup>۱\*</sup>، مسعود عشقی زاده<sup>۲</sup>، محمد تقی دستورانی<sup>۳</sup>، حمیدرضا عظیم زاده<sup>۱</sup>

۱. دانشیار گروه آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی و کoirشناسی دانشگاه یزد

۲. دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی و کoirشناسی دانشگاه یزد

۳. دانشیار دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست دانشگاه فردوسی مشهد

(تاریخ دریافت: ۹۳/۰۲/۱۴ - تاریخ تصویب: ۹۳/۰۷/۲۸)

### چکیده

روندیابی جریان سطحی در حوضه‌های آبخیز به دو گروه اصلی شامل الگوریتم جهت جریان متعدد و الگوریتم جهت جریان منفرد تقسیم می‌شود. بسیاری از بسته‌های نرم‌افزاری و مطالعات از الگوریتم جهت جریان منفرد به دلیل سادگی و حجم کم محاسبات برای روندیابی جریان سطحی در حوضه‌های آبخیز استفاده می‌کنند. در این تحقیق تأثیر عملیات آبخیزداری بر روندیابی جریان سطحی با استفاده از معرفی الگوریتم توزیع جریان متعدد، در حوضه زوجی کاخک شهرستان گناباد بررسی شد. افزون بر این، نحوه پیاده‌سازی الگوریتم جریان متعدد و محاسبه مقدار تجمعی جریان با استفاده از این الگوریتم در محیط GIS بیان شد. برای این منظور جریان‌های سطحی ایجاد شده طی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۴ با استفاده از الگوریتم توزیع جریان متعدد برای دو سناریوی تحت عملیات آبخیزداری و فاقد عملیات آبخیزداری شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد روش روندیابی جریان متعدد با نسبت حداکثر ۹۷/۱ و حداقل ۶۴/۳ درصد، حجم کل جریان خروجی را برای وقایع بررسی شده شبیه‌سازی کرد و حجم کل جریان در خروجی حوضه برآورد شد. همچنین نتایج نشان داد که در رگبارهای با مقدار بارش کم که حجم جریان اندک است، اجرای عملیات آبخیزداری به‌طور ۱۰۰ درصد بر کاهش جریان خروجی از حوضه تأثیر داشته است، اما در جریان‌های با حجم بیشتر بین ۳۸/۲ تا ۷۴/۲ درصد سبب کاهش حجم جریان خروجی شده است.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم، جریان متعدد، جریان منفرد، روندیابی.

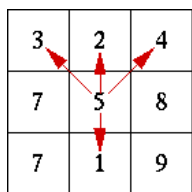
## مقدمه

سطح زمین عاملی اساسی در تنظیم فرایندهای اتمسفری، ژئومورفیکی، هیدرولوژیکی و اکولوژیکی در سطح زمین یا نزدیک به آن است. ژئومورفولوژی نوین بر استخراج مقادیر شاخص‌های سطح زمین و اشکال ویژه (موضوعات سطح زمین) از توپوگرافی رقومی تمرکز دارد [۲۲]. مدلسازی هیدرولوژیکی فناوری مناسب و توسعه‌یافته‌ای است که به‌طور گسترده‌ای در تحقیقات و کاربردهای مختلف از قبیل مطالعات ژئومورفولوژی، علوم خاک، هیدرولوژی و کاربری اراضی استفاده شده است. در سال‌های گذشته، روش‌ها و مدل‌های ریاضی متعددی گسترش یافته و فناوری کامپیوتر برای شبیه‌سازی فرسایش خاک و فرایندهای ژئومورفولوژیکی، ارزیابی قابلیت و تناسب اراضی به‌کار گرفته شده است. با وجود این، نیاز به داده‌های مشاهداتی و به‌ویژه داده‌های مکانی، کاربرد این مدل‌ها را محدود می‌کند. به‌طور کلی مهم‌ترین مجموعه داده مکانی مورد نیاز برای مدلسازی هیدرولوژیکی، اطلاعات ارتفاع از سطح زمین است که به‌شکل مدل‌های عوارض دیجیتال (DTM)<sup>۱</sup> نمایش داده می‌شود. این مدل‌ها به توپوگرافی سطحی حوضه آبخیز وابسته‌اند. توپوگرافی سطحی، شیب مسیرهای جریان و جریان سطحی را کنترل می‌کند و الگوهای جریان‌های زیرسطحی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. شاخص مهم در توپوگرافی حوضه، جهت جریان است که نشان‌دهنده نحوه پراکنش جریان سطحی در سطح حوضه است. تعیین جهت جریان در سطح زمین یکی از اندازه‌گیری‌های مهم در مدلسازی هیدرولوژیکی است. کاربرد مدل رقومی ارتفاع (DEM)<sup>۲</sup> محاسبه توزیع جهت جریان را در هر مکان روی سطح زمین ممکن کرده است. براساس محاسبه توزیع جهت جریان در هر مکان که با استفاده از مدل رقومی ارتفاع نمایش داده می‌شود، الگوی شبکه زهکشی در یک منطقه و همچنین شاخص‌های مختلف هیدرولوژیکی از قبیل مساحت حوضه و جریان تجمعی می‌تواند مدل شود [۱۸]. یک روش معمول برای محاسبه توزیع جریان، مدلسازی جریان هیدرولوژیکی است که به‌طور گسترده‌ای در مسائل هیدرولوژیکی و ژئومورفولوژیکی کاربرد دارد. در این

مدلسازی یک شبکه مربعی به‌صورت چندین ردیف و ستون، یک ماتریس را تشکیل می‌دهد. به هر یک از خانه‌های این شبکه، پیکسل گفته می‌شود که مبنای محاسبات اند [۱۷]. این روش براساس قوانین پایه زیر بنا شده است:

- یک کانال زهکشی از نزدیک‌ترین پیکسل به خط‌الرأس شروع می‌شود؛
- در هر نقطه از یک کانال، جریان هیدرولوژیکی به یک یا چند جهت پایین‌دست جریان می‌یابد؛
- کانال‌های زهکشی از یکدیگر عبور نمی‌کنند؛
- جریان هیدرولوژیکی تا زمانی که به یک نقطه گود (pit,sink) یا خروجی سیستم (outlet) برسد، ادامه می‌یابد.

به‌طور کلی الگوریتم‌های توزیع جریان به دو گروه اصلی شامل الگوریتم جهت جریان متعدد (MFD)<sup>۳</sup> و الگوریتم جهت جریان منفرد (SFD)<sup>۴</sup> تقسیم می‌شود. در الگوریتم جریان متعدد، توزیع جریان از یک نقطه یا پیکسل به بیش از یک نقطه یا پیکسل مجاور در نظر گرفته می‌شود (شکل ۱). درحالی که در الگوریتم جریان منفرد کل جریان از یک نقطه یا پیکسل تنها به یک نقطه یا پیکسل مجاور که دارای کمترین ارتفاع است جریان می‌یابد (شکل ۲). این الگوریتم توزیع را روندیابی بیشترین شیب پایین‌دست<sup>۵</sup> یا  $D_8$ <sup>۶</sup> نیز می‌نامند [۲۳، ۱۶، ۱۲، ۱۱، ۵].



شکل ۱. توزیع جهت جریان متعدد (MFD)



شکل ۲. توزیع جهت جریان منفرد (SFD)

3. Multiple Flow Direction  
4. Single Flow Direction  
5. Steepest decent routing  
6. Eight-direction

1. Digital Terrain Models  
2. Digital Elevation Models

آبخیزداری بر توزیع جریان سطحی با استفاده از معرفی الگوریتم توزیع جریان متعدد و بررسی آن جهت روندیابی جریان سطحی در مقیاس حوضه آبخیز برای یکی از مناطق نیمه خشک ایران است. علاوه بر این نحوه پیاده سازی الگوریتم جریان متعدد و محاسبه مقدار تجمعی جریان با استفاده از این الگوریتم در محیط GIS<sup>۱</sup> بیان می شود.

## مواد و روش ها

### منطقه تحقیق

حوضه زوجی کاخک در فاصله ۳۵ کیلومتری جنوب شهر گناباد در خراسان رضوی واقع بوده و جزئی از حوضه آبخیز شهید مهدی نوری کاخک است. این حوضه بین طول های "۵۸°۳۵'۳۷" تا "۵۸°۳۶'۴۱" شرقی و عرض های "۳۴°۰۴'۰۱" تا "۳۴°۰۵'۰۷" شمالی قرار دارد. حوضه زوجی از دو زیرحوضه نمونه و شاهد تشکیل شده است که از نظر توپوگرافی، زمین شناسی، آب و هوایی، هیدرولوژی، خاک و ... شبیه اند و تنها از نظر اجرای عملیات آبخیزداری تفاوت دارند. مساحت حوضه نمونه ۱۰۶/۵ هکتار است که انواع عملیات آبخیزداری (مکانیکی، بیومکانیکی، بیولوژیک و مدیریتی) در آن انجام گرفته است. مساحت حوضه شاهد ۱۱۰/۶ هکتار است که هیچ نوع عملیات آبخیزداری در آن صورت نگرفته است. شکل ۳ موقعیت جغرافیایی - سیاسی این حوضه را نشان می دهد. این حوضه دارای تجهیزات هیدرومتری، هواشناسی سینوپتیک، فرسایش و رسوب است. جدول ۱ عملیات اجرا شده در حوضه زوجی کاخک را نشان می دهد. جدول ۲ ویژگی های فیزیکی زیرحوضه های نمونه و شاهد را نشان می دهد [۴].

### روش کار

- تعریف الگوریتم توزیع جریان متعدد در محیط GIS  
به منظور بررسی تأثیر عملیات آبخیزداری بر توزیع جریان سطحی در سطح حوضه، روندیابی جریان سطحی براساس توزیع جریان متعدد برای محیط GIS در نرم افزار الویس<sup>۲</sup> تعریف شد. نرم افزار الویس (ILWIS) توسط مؤسسه ITC هلند نوشته شده و توسعه یافته است. این برنامه دارای قابلیت های منحصر به فردی است، به طوری که می توان آن

در جدیدترین مطالعات اخیر پیلسجو و حسن [۱۳] به منظور ایجاد و ارزیابی یک الگوریتم جریان که قادر به شبیه سازی مسیر جریان سطحی با استفاده از یک مدل رقومی رستری باشد، الگوریتم جریان متعدد پایه مثلثی را معرفی کردند. آنها جریان را روی هر پیکسل منفرد با تقسیم هر پیکسل به هشت سطح مثلثی کوچک، تجزیه و تحلیل کرده و مسیرهای جریان سطحی را روی یک مدل رقومی ارتفاعی رستر پایه برآورد کردند. آنها الگوریتم جریان متعدد پایه مثلثی را با هشت الگوریتم رایج با برآورد سطح ویژه حوضه برای چند شکل ریاضی و یک مدل رقومی ارتفاعی واقعی شبیه سازی کردند. نتایج آنها نشان داد که الگوریتم جریان متعدد پایه مثلثی خروجی های نزدیک تری به مقادیر نظری سطح ویژه در مقایسه با دیگر الگوریتم های رایج مانند توزیع جهت جریان منفرد داشته است. لیوو و همکاران روی یک نوع مدل هیدرولوژیکی که هم جریان سطحی و هم جریان کانالی را روندیابی می کرد، تمرکز کردند. آنها یک نگرش لایه ای برای محاسبه موازی پیشنهاد کردند. در این نگرش واحدهای شبیه سازی براساس جهت جریان به لایه هایی تقسیم شده و در هر لایه محاسبات به طور مستقل و موازی انجام گرفت. نتایج آنان نشان داد این نگرش کارایی و سرعت محاسبات را بالاتر می برد [۹].  
سولیس یک روش شبکه سلولی ساده شده بر پایه سیستم اطلاعات جغرافیایی را با استفاده از جهت جریان و تجمعی جریان برای مدلسازی هیدرولوژیکی توزیعی توسعه داد. مهم ترین ویژگی این روش سادگی و بازدهی آن معرفی شد [۱۴]. علاوه بر این نتایج حاصل از سلول های شبکه به صورت سریالی می تواند برای هر گام زمانی ارزیابی شود که این امر سبب بهبود بخشیدن به اجرا و ساده سازی به کارگیری مدل های هیدرولوژیکی می شود. بررسی حد تأثیر عملیات مختلف آبخیزداری بر جریان های سطحی حوضه های آبخیز یکی از مسائل مهم در بحث برنامه ریزی و مدیریت حوضه های آبخیز است. بسیاری از بسته های نرم افزاری و مطالعات از الگوریتم جهت جریان منفرد به دلیل سادگی و حجم کم محاسبات برای روندیابی جریان سطحی در حوضه های آبخیز استفاده می کنند. نوری و همکاران در مطالعه خود نشان دادند عملیات آبخیزداری سبب کاهش متوسط ۱۰ درصدی ضریب رواناب برای ماه های مختلف شده است [۱۲]. هدف از این تحقیق بررسی تأثیر عملیات

1. Geographic Information System

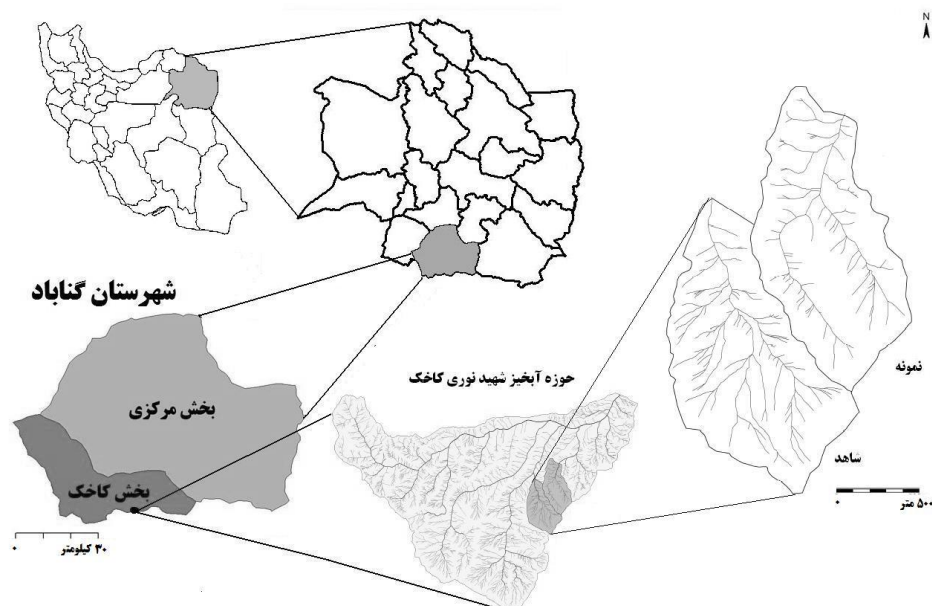
2. Integrated Land and Water Information System

جدول ۱. نوع و مساحت عملیات آبخیزداری اجرا شده در حوضه نمونه کاخک

عملیات مکانیکی			عملیات بیولوژیکی و مدیریتی	
نوع عملیات	تعداد	حجم کل مخزن ( $m^3$ )	نوع عملیات	مساحت (هکتار)
گابیون	۱۹	۱۹۴۰	بانکت‌بندی همراه با نهالکاری	۴/۲
خشکه چین	۷	۶۳	کپه‌کاری و بذریاشی	۱۰۶/۵
			قرق	۱۰۶/۵

جدول ۲. ویژگی‌های فیزیکی زیرحوضه‌های نمونه و شاهد حوضه زوجی کاخک

زیر حوضه		عنوان
شاهد	نمونه	
۱۱۰/۶	۱۰۶/۵	مساحت (هکتار)
۵۵/۴	۵۲/۹	شیب متوسط وزنی (درصد)
۱/۸	۱/۸	طول آبراهه (کیلومتر)
۳۲	۳۶	زمان تمرکز (دقیقه)
۱۳/۵	۱۰/۲	تراکم شبکه هیدروگرافی
۲۳۲۵	۲۱۷۱	ارتفاع متوسط (متر)
۰/۰۲۹	۰/۰۲۷	حجم آب جاری شده (میلیون مترمکعب)
۱۵	۵/۸	فرسایش (تن در هکتار)
۲۴۳		متوسط بارندگی سالانه (میلی‌متر)
۱۴/۲		متوسط دمای سالانه (سانتی‌گراد)
شمشک		سازند عمده زمین‌شناسی
۱۶۴۵		تبخیر سالانه (میلی‌متر)
چمن پیازی، جاروی وحشی، گوش بره، کما، کنگر، گون، درمنه		پوشش گیاهی غالب



شکل ۳. موقعیت جغرافیایی - سیاسی منطقه تحقیق

نقشه پایه و اصلی در محاسبات توزیع جریان مدل رقومی ارتفاعی حوضه است. این نقشه در یک شبکه پیکسلی تعریف می‌شود و محاسبات لازم برای توزیع جهت جریان منفرد و جریان متعدد براساس عملیات همسایگی و ربطی بر روی آن اجرا می‌شود. برای این منظور مدل رقومی ارتفاعی حوضه در شبکه پیکسلی ۱ مترمربعی برای منطقه تحقیق تهیه شد [۱۷].

پس از تهیه مدل رقومی ارتفاعی حوضه مراحل محاسبات توزیع جهت جریان متعدد صورت گرفته در نرم‌افزار الویس به شرح زیر است:

#### - تصحیح مدل رقومی ارتفاعی

قبل از اجرای روندیابی، باید یک پیش‌پردازش بر روی مدل رقومی ارتفاعی به منظور حذف اشتباهات احتمالی آن مانند چاله‌ها و گودال‌های غیرطبیعی (Sinks, Pits) که در طی محاسبات رستری به وجود می‌آید صورت گیرد [۲۱، ۱۰، ۱۵، ۸]. شکل ۵ نمونه‌ای از اشتباهات احتمالی را که ممکن است بر روی یک مدل رقومی ارتفاعی به وجود آید نشان می‌دهد. تصحیح مدل رقومی ارتفاعی از طریق پر کردن گودال‌ها و چاله‌ها در نرم‌افزار الویس نسخه ۳/۶ از طریق عملگر آن<sup>۴</sup> فراهم شده است [۶].



شکل ۵. نمونه‌ای از اشتباهات احتمالی بر روی یک مدل رقومی ارتفاع

#### - محاسبه نقشه جهت جریان منفرد

براساس الگوریتم توزیع جهت جریان منفرد، تمامی جریان وارد شده به یک پیکسل به سمت پیکسلی که ارتفاع کمتر و بیشترین شیب را دارد جریان می‌یابد و به آن وارد می‌شود. بنابراین در این الگوریتم ابتدا باید اختلاف ارتفاع پیکسل مرکزی با ۸ پیکسل مجاور و سپس با توجه به فاصله مرکز پیکسل مرکزی و پیکسل مجاور شیب به طرف هر یک از ۸ پیکسل مجاور تعیین شود. پس از محاسبه شیب، جهت جریان از پیکسل مرکزی به سمت پیکسلی خواهد بود که دارای بیشترین شیب باشد.

را بهترین نرم‌افزار متن باز<sup>۱</sup> از سری نرم‌افزارهای سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) نام برد. حجم کم نرم‌افزار، نصب آسان و تحلیل‌های آماری منحصربه‌فرد آن در جدول‌های محاسباتی از جمله ویژگی‌هایی است که سبب شده محققان و دانشجویان در اجرای پروژه‌های تحقیقاتی و مطالعاتی از آن استفاده کنند. از دیگر ویژگی‌های برنامه الویس که برای متخصصان GIS ملموس‌تر است، رعایت استانداردهای سختگیرانه در تحلیل‌های مبتنی بر داده‌ها و لایه‌های رستری است. بسیاری از نرم‌افزارهای کاربرپسند (ArcGIS) با حذف محدودیت‌های نمایش لایه‌ها سبب شده‌اند اغلب کاربران ضرورت مفاهیم پایه را نادیده بگیرند و در نتیجه در تحلیل‌های مبتنی بر لایه‌های رستری دچار مشکلات جدی شوند. بنابراین با توجه به ماهیت لازم شبکه در محاسبه توزیع جریان براساس روش‌های جریان متعدد و منفرد، این محاسبات در نرم‌افزار الویس پیاده‌سازی شد.

الگوریتم این محاسبات در نرم‌افزار الویس براساس عملیات همسایگی<sup>۲</sup> و ربطی<sup>۳</sup> طرح‌ریزی شد. این عملیات ویژگی‌های ناحیه‌ای در اطراف یک موقعیت خاص را بررسی و ارزیابی می‌کنند. در عملیات همسایگی محاسبات یک پیکسل با توجه به همسایگانش باید انجام گیرد. از این رو این عملیات می‌تواند به صورت چهارطرفه یا هشت‌طرفه صورت گیرد و نتایج در پیکسل مرکزی ذخیره شود. این محاسبات پیکسل به پیکسل پیش می‌رود و گاهی نیز لازم است یک محاسبه کلی و درونی نیز انجام گیرد. این عملیات در یک پنجره ۳×۳ انجام می‌گیرد. در این پنجره هر پیکسل یک شماره یا کد می‌گیرد و شماره‌گذاری از گوشه بالای سمت چپ پنجره آغاز می‌شود که کد پیکسل مرکزی برابر با ۵ است (شکل ۴).

۱	۲	۳
۴	۵	۶
۷	۸	۹

شکل ۴. کدهای پیکسل‌ها در پنجره ۳×۳ برای اجرای عملیات همسایگی و ربطی در محیط رستری

4. Fill Sink

1. Open source  
2. Neighborhood  
3. Connectivity

پیکسل، اختلاف ارتفاع بر فاصله بین آن دو تقسیم می‌شود که در مدل رقومی ارتفاع با اندازه پیکسلی ۱ متر مربعی مقدار فاصله برابر ۱ متر است.

در مرحله بعد در این پنجره بیشترین شیب بین پیکسل مرکزی و پیکسل‌های مجاور تعیین و جهت آن برای پیکسل مرکزی در نظر گرفته می‌شود. سپس پنجره ۳×۳ به اندازه یک پیکسل بر روی مدل رقومی ارتفاع جابه‌جا شده و این عملیات تا هنگامی که بر روی کل مدل رقومی ارتفاع انجام گیرد، تکرار می‌شود. بدین ترتیب نقشه جهت جریان محاسبه می‌شود. این مراحل محاسباتی در نسخه ۳/۶ الویس به صورت عملگر جهت جریان<sup>۱</sup> وارد شده است. این عملگر جهت جریان را به هر پیکسل براساس مدل رقومی ارتفاع تعیین می‌کند. شکل ۶ نمونه‌ای از خروجی حاصل از این عملگر را در نرم‌افزار الویس ۳/۶ نشان می‌دهد.

?	?	?	?	?	?
?	S	S	S	SW	?
?	S	SW	S	S	?
?	S	S	SE	SE	?
?	S	SW	E	E	?
?	?	?	?	?	?

ب

بر روی مدل رقومی ارتفاع تهیه‌شده حوضه که دارای اندازه پیکسلی ۱ متر مربعی است؛ در هر پنجره ۳×۳ ابتدا اختلاف ارتفاع بین پیکسل مرکزی (کد ۵) و هر یک از ۸ پیکسل مجاور آن محاسبه شد. برای هر پیکسل مجاور اگر اختلاف ارتفاع مثبت باشد، پیکسل مرکزی از آن پیکسل همسایه دارای ارتفاع بیشتری است و امکان انتقال جریان به آن پیکسل وجود دارد. پس از تعیین اختلاف ارتفاع، بر روی پیکسل‌هایی که ارتفاع کمتری از پیکسل مرکزی دارند، اگر پیکسل مجاور در گوشه‌ها (کدهای ۱، ۳، ۷ و ۹) قرار گیرد، برای محاسبه شیب بین پیکسل مرکزی و آن پیکسل، اختلاف ارتفاع بر فاصله بین آن دو تقسیم می‌شود. در مدل رقومی ارتفاع با اندازه پیکسلی ۱ متر مربعی مقدار فاصله برابر ۱/۴ متر است، در صورتی که پیکسل مجاور به صورت افقی (کدهای ۲، ۴، ۶ و ۸) قرار گیرد، برای محاسبه شیب بین پیکسل مرکزی و آن

58	52	55	53	56	58
55	40	42	45	51	55
48	33	35	33	48	52
33	23	28	27	25	38
17	17	17	22	17	12
12	10	15	18	16	14

الف

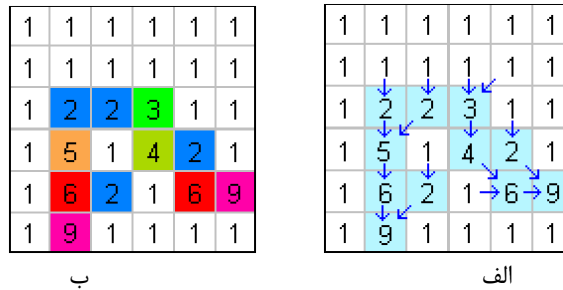
شکل ۶. نمونه‌ای از خروجی حاصل از عملگر توزیع جهت جریان منفرد در نرم‌افزار الویس الف) محاسبه جهت جریان از مدل رقومی ارتفاع؛ ب) نقشه جهت جریان

در یک محیط رستری عملگر تجمعی جریان تعداد تجمعی پیکسل‌هایی را که به‌طور طبیعی براساس نقشه توزیع جریان به سمت خروجی زهکشی می‌شود محاسبه می‌کند. با استفاده از این عملگر علاوه بر این می‌توان الگوی شبکه زهکشی را تعیین کرد. نقشه خروجی حاصل مقادیر تجمعی جریان هیدرولوژیکی را نشان می‌دهد که برابر با تعداد پیکسل‌های ورودی به هر پیکسل خروجی است، به‌طوری که بزرگ‌ترین رودخانه و آبراهه، بزرگ‌ترین مقدار تجمعی را به خود می‌گیرد که برابر با تعداد پیکسل‌هایی است که به آن زهکشی می‌شود. شکل ۷ نمونه‌ای از خروجی حاصل از این عملگر را در نرم‌افزار الویس ۳/۶ نشان می‌دهد.

#### – محاسبه نقشه تجمعی جریان منفرد

پس از تعیین جهت جریان، مقدار تجمعی جریان براساس عملگر تجمعی جریان<sup>۲</sup> قابل محاسبه است. مقدار تجمعی جریان، سطح زهکشی در نظر گرفته می‌شود. برای این منظور مسیرهای زهکشی روی سطح زمین باید مشخص و ردیابی شده و تعداد پیکسل‌هایی که آب را به پیکسل‌های پایین‌دست منتقل می‌کند محاسبه شود. این عمل با یک تابع جست‌وجو<sup>۳</sup> از پیکسل‌های راسی آغاز می‌شود [۱۲]. براساس این عملگر، تعداد کل پیکسل‌هایی که به‌وسیله خروجی‌ها زهکشی می‌شود از روی نقشه جهت جریان محاسبه می‌شود.

1. The Flow direction operation
2. Flow accumulation operation
3. Search function



شکل ۷. نمونه‌ای از خروجی حاصل از این عملگر تجمعی جریان منفرد در نرم‌افزار الویس الف) محاسبه تجمعی جریان؛ ب) نقشه تجمعی جریان

این مقدار با توجه به مقیاس مورد مطالعه (دامنه، حوضه) و شرایط غالب توپوگرافی منطقه تحقیق (شیب و همگرا و واگرایی جریان) تنها یک مقدار بین ۱ تا ۱۰ در نظر گرفته می‌شود [۲۱، ۱۹، ۱۵، ۷، ۲، ۱]. با توجه به هدف تحقیق که بررسی الگوریتم توزیع جریان متعدد است، کمترین مقدار برای فاکتور همگرایی در نظر گرفته شد تا توزیع جریان به صورت کامل براساس الگوریتم توزیع جریان متعدد صورت گیرد.

برای روندیابی جریان سطحی براساس الگوریتم توزیع جریان متعدد در محیط الویس، درصد جریان خروجی از هر پیکسل ( $F_i$ ) براساس رابطه ۱ و نقشه جهت جریان منفرد به صورت زیر تعیین شد.

- تبدیل نقشه جهت جریان منفرد به نقشه کدهای

معادل جهت (کدهای ۱ تا ۹)؛

- تعیین فاصله بین مرکز پیکسل در جهت  $i$  و پیکسل

مرکزی در هر پنجره  $3 \times 3$ ؛

- محاسبه شیب ( $\tan\beta$ ) بین مرکز پیکسل در جهت  $i$  و

پیکسل مرکزی در هر پنجره  $3 \times 3$ ؛

- محاسبه شیب ( $\tan\beta$ ) بین مرکز هر پیکسل در جهت

$z$  و پیکسل مرکزی در هر پنجره  $3 \times 3$ ؛

- محاسبه نسبت جریان در جهت  $i$  ( $F_i$ ).

#### - محاسبه نقشه تجمعی جریان متعدد

پس از محاسبه درصد جریان خروجی از یک پیکسل ( $F_i$ ) با ضرب این نقشه در نقشه تجمعی جریان منفرد، نقشه جدید حاصل می‌شود که این نقشه تعداد پیکسل‌هایی را که در جهت شیب اصلی پایین دست اقدام به زهکشی سطح خود می‌کنند با در نظر گرفتن درصد جریان خروجی از هر کدام از آنها ( $F_i$ ) نشان می‌دهد. بدین ترتیب با در نظر گرفتن درصد جریان خروجی از هر پیکسل، توزیع جریان

#### - محاسبه نقشه جهت جریان متعدد

براساس الگوریتم توزیع جهت جریان متعدد، جریان وارد شده به یک پیکسل به یک یا چند پیکسل (حداکثر ۸ پیکسل) که ارتفاع کمتری از پیکسل مرکزی دارند، زهکشی می‌شود. برای این منظور در روندیابی جریان متعدد درصد دبی خارج شده از یک پیکسل به هر یک از پیکسل‌های پایین دست مجاور با استفاده از یک فاکتور وزنی مشخص برای هر جهت محاسبه می‌شود. این نسبت در هر جهت از رابطه ۱ محاسبه می‌شود: [۲۴، ۱۶، ۷].

$$F_i = \frac{(\tan \beta)_i^p}{\sum_{j=1}^{\max \Lambda} (\tan \beta)_j^p} \quad (1)$$

$F_i$ : نسبت جریان در جهت  $i$  که بین ۰ تا ۱ است؛

$B$ : زاویه شیب بین پیکسل مرکزی و پیکسل

پایین دست در جهت  $i$ ؛

$P$ : فاکتور همگرایی؛

$i$  و  $z$ : جهت اصلی و فرعی جریان به پیکسل‌های

مجاور.

فاکتور همگرایی ( $p$ ) ویژگی واگرایی و همگرایی جریان را تعریف می‌کند. به طور کلی فاکتور همگرایی رابطه بین شیب و توزیع جریان را نشان می‌دهد [۱۲]. براساس مقدار فاکتور همگرایی، دو نوع الگوریتم توزیع جریان متعدد و منفرد قابل تعریف است. هنگامی که مقدار این فاکتور برابر با ۱ باشد، توزیع جریان براساس الگوریتم جریان متعدد خواهد بود، اما هنگامی که مقدار این فاکتور به سمت بی‌نهایت سیر کند و از ۱۰ فراتر باشد، توزیع جریان براساس الگوریتم جریان منفرد محاسبه می‌شود [۵].

حداکثر این فاکتور در دامنه‌ها و سطوح دارای شیب تند که جریان همگراست ۱۰ و حداقل آن در سطوح کم شیب و صاف و محدب که جریان واگراست، ۱ است. اما

سپس با توجه به خصوصیات و شرایط فیزیکی مشابه این دو حوضه، با تغییر ضریب رواناب‌های دو حوضه به جای یکدیگر، با بازسازی شرایط فاقد اجرای عملیات برای حوضه نمونه و اجرای عملیات برای حوضه شاهد، تأثیرات ناشی از اجرای عملیات آبخیزداری بر توزیع جریان سطحی بررسی شد.

### نتایج

#### - بررسی الگوریتم روندیابی جریان متعدد

براساس الگوریتم توزیع جهت جریان متعدد، پس از تعیین نقشه جهت جریان، مقدار نسبی جریان خروجی از هر پیکسل در جهت اصلی (fi)، محاسبه شد. شکل ۸ نقشه مقادیر نسبی جریان خروجی از هر پیکسل در جهت اصلی (fi) را براساس الگوریتم توزیع جریان متعدد برای حوضه‌های نمونه و شاهد نشان می‌دهد. پس از محاسبه نقشه fi نقشه تجمعی سطح زهکشی شده هر حوضه براساس روندیابی توزیع جریان متعدد محاسبه شد. درصد مساحت زهکشی جریان سطحی براساس الگوریتم توزیع جریان متعدد، به شرح جدول ۴ است. براساس این نتایج در حوضه نمونه ۸۹/۹۵ درصد و در حوضه شاهد ۸۷/۹ درصد از سطح حوضه، مساحت کمتر از ۱۰۰۰ متر مربع بالادست خود را زهکشی می‌کنند. همچنین در حوضه نمونه ۰/۳ درصد از پیکسل‌های سطح حوضه، مساحت بیشتر از ۱۰۰ هکتار بالادست خود را زهکشی می‌کنند؛ در حالی که نتایج نشان داد در حوضه شاهد بیشتر از ۱۰۰ هکتار زهکشی نمی‌شود. این مقادیر تنها به خصوصیات فیزیکی حوضه وابسته است و عملیات آبخیزداری بر آن تأثیرگذار نیست.

نقشه روندیابی جریان سطحی براساس روندیابی‌های جریان منفرد و متعدد برای وقایع رگبار منجر به سیلاب در حوضه زوجی تهیه و حجم جریان خروجی از هر حوضه محاسبه شد. جدول ۵ مقادیر حجم جریان خروجی براساس روندیابی جریان متعدد و مشاهده شده طی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۴ را نشان می‌دهد. براساس نتایج حاصل روش روندیابی جریان متعدد با نسبت حداکثر ۹۷/۱ و حداقل ۶۴/۳ درصد، حجم کل جریان خروجی را برای هر واقعه بررسی شده شبیه‌سازی کرده است.

از حالت منفرد به حالت متعدد تغییر می‌یابد. سپس برای محاسبه حجم جریان واقعی حاصل از یگ رگبار، باید مقدار تجمعی به دست آمده برای هر پیکسل در مقدار بارش مؤثر و مساحت پیکسل ضرب شود (رابطه ۲).

$$FA_i = FAC_i \times EP_i \times A_i \quad (2)$$

FA<sub>i</sub>: حجم جریان تجمعی در یک پیکسل؛

FAC<sub>i</sub>: جریان تجمعی محاسبه شده در یک پیکسل؛

EP<sub>i</sub>: بارش مؤثر در سطح آن پیکسل؛

A<sub>i</sub>: مساحت پیکسل.

بارش مؤثر عبارت است از مقدار بارندگی که به رواناب مستقیم در سطح پیکسل منجر می‌شود. بارش مؤثر در روش توزیع جریان متعدد براساس خصوصیات نفوذپذیری محاسبه می‌شود. در صورت در نظر گرفتن شرایط ساده و همگن می‌توان مقدار نفوذپذیری ثابتی در نظر گرفت و بارش مؤثر براساس یک درصد ثابت تلفات حاصل از تبخیر و نفوذ محاسبه شود. اما به منظور نمایش بهتر تغییرات مکانی نفوذپذیری، ضریب رواناب برای محاسبه بارش مؤثر معرفی شده است. ضریب رواناب نسبت ارتفاع رواناب به ارتفاع بارش است [۱، ۲، ۳، ۱۰، ۲۱].

برای محاسبه ضریب رواناب متوسط هیدروگراف جریان‌های ثبت شده در فلوم مستقر در خروجی حوضه نمونه و شاهد طی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۴ استخراج شد. این فلوم‌ها مجهز به لیمنوگراف خودکارند و اطلاعات آن به وسیله دستگاه تالمیدس<sup>۱</sup> در بازه‌های زمانی ۵ دقیقه‌ای ثبت می‌شود. پس از استخراج هیدروگراف‌های جریان، رگبارهای ایجادکننده آنها از باران سنج وزنی دیجیتالی مستقر درون حوضه که ارتفاع بارش را در بازه‌های زمانی ۵ دقیقه‌ای ثبت می‌کند، هایتوگراف رگبارها استخراج شد. مشخصات جریان‌ها و رگبارهای مشاهداتی به شرح جدول ۳ است.

#### - تعیین تأثیر عملیات آبخیزداری بر توزیع جریان سطحی

به منظور بررسی تأثیر عملیات آبخیزداری بر توزیع جریان سطحی، ابتدا توزیع حجم جریان سطحی حاصل از هر رگبار منجر به رواناب سطحی براساس روندیابی توزیع جریان متعدد در دو حوضه نمونه و شاهد محاسبه شد.

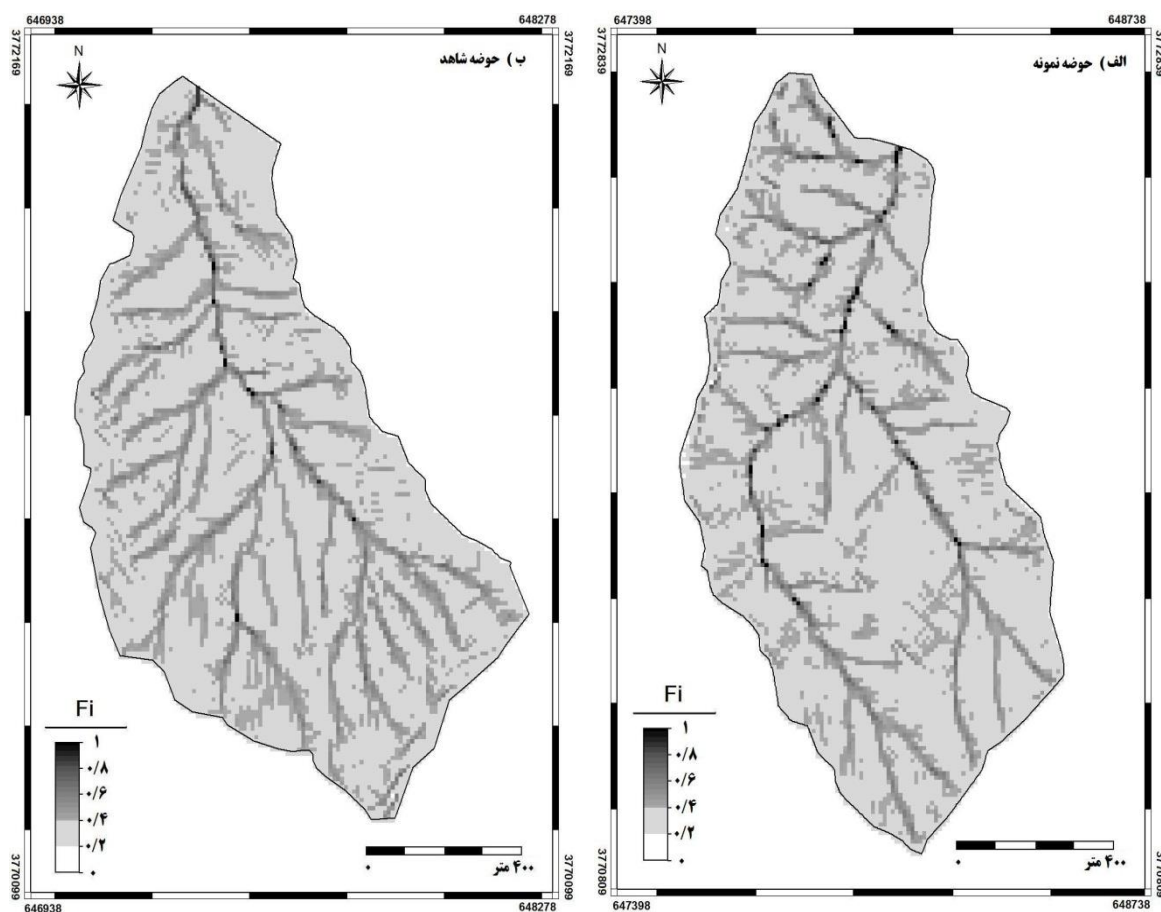


جدول ۳. مشخصات جریان‌ها و رگبارهای مشاهده‌شده طی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۴ در حوضه‌های نمونه و شاهد

واقعه	سال	ماه	روز	مقدار رگبار (میلی‌متر)	حوضه	حجم کل بارش دریافتی (متر مکعب)	حداکثر دبی (مترمکعب بر ثانیه)	حجم کل دبی (مترمکعب)	ضریب رواناب (درصد)	ارتفاع بارش مؤثر (میلی‌متر)
۱	۲۰۰۹	مارس	۳۱	۳۶	شاهد	۳۹۸۲۰/۲	۰/۱۲۶	۲۴۵/۲۰۱	۰/۶۲	۰/۲۲
					نمونه	.	.	.	.	.
۲	۲۰۱۰	فوریه	۲۱	۱۰/۸	شاهد	۱۱۹۴۶/۱	۰/۰۰۰۲	۱/۲۵۸	۰/۰۱	۰/۰۰۱
					نمونه	.	.	.	.	.
۳	۲۰۱۰	فوریه	۲۱	۷	شاهد	۷۷۴۲/۸۲	۰/۰۰۰۲	۴۳۰۳	۰/۰۶	۰/۰۰۴
					نمونه	.	.	.	.	.
۴	۲۰۱۰	فوریه	۲۵	۱۵/۸	شاهد	۱۷۴۷۶/۶۵	۰/۰۰۰۲	۷/۳۰۹	۰/۰۴	۰/۰۱
					نمونه	.	.	.	.	.
۵	۲۰۱۰	فوریه	۲۶	۳/۲	شاهد	۳۵۳۹/۵۷۴	۰/۰۰۰۲	۱/۲۹۸	۰/۰۴	۰/۰۰۱
					نمونه	.	.	.	.	.
۶	۲۰۱۰	فوریه	۲۷	۹	شاهد	۹۹۵۵/۰۵۳	۰/۰۰۰۲	۲/۲۵۴	۰/۰۲	۰/۰۰۲
					نمونه	.	.	.	.	.
۷	۲۰۱۰	مارس	۲	۱۱/۴	شاهد	۱۲۶۰۹/۷۳۴	۰/۰۰۰۲	۶/۸۳۱	۰/۰۵	۰/۰۰۶
					نمونه	.	.	.	.	.
۸	۲۰۱۰	مارس	۴	۱/۳	شاهد	۱۴۳۷/۹۵۲	۰/۰۰۰۲	۰/۸۲	۰/۰۶	۰/۰۰۰۷
					نمونه	.	.	.	.	.
۹	۲۰۱۰	مارس	۵	۱	شاهد	۱۱۰۶/۱۱۷	۰/۰۰۰۲	۰/۴۱	۰/۰۴	۰/۰۰۰۴
					نمونه	.	.	.	.	.
۱۰	۲۰۱۰	آوریل	۱۱	۹	شاهد	۹۹۵۵/۰۵۳	۰/۰۰۰۲	۱/۸۴۴	۰/۰۲	۰/۰۰۲
					نمونه	.	.	.	.	.
۱۱	۲۰۱۰	آوریل	۱۷	۵/۳	شاهد	۵۸۶۲/۴۲	۰/۰۰۰۲	۱/۱۶۱	۰/۰۲	۰/۰۰۱
					نمونه	.	.	.	.	.
۱۲	۲۰۱۰	آوریل	۱۸	۰/۸	شاهد	۸۸۴/۸۹۳	۰/۰۰۰۲	۰/۰۶۸	۰/۰۱	۰/۰۰۰۱
					نمونه	.	.	.	.	.
۱۳	۲۰۱۰	آوریل	۲۹	۳/۲	شاهد	۳۵۳۹/۵۷۴	۰/۰۰۰۲	۱/۰۲۵	۰/۰۳	۰/۰۰۰۹
					نمونه	.	.	.	.	.
۱۴	۲۰۱۰	می	۳	۴/۸	شاهد	۵۳۰۹/۳۶۱	۰/۰۰۰۲	۲/۱۸۶	۰/۰۴	۰/۰۰۲
					نمونه	.	.	.	.	.
۱۵	۲۰۱۰	می	۴	۱/۹	شاهد	۲۱۰۱/۶۲۲	۰/۰۰۰۲	۱/۷۷۶	۰/۱	۰/۰۰۲
					نمونه	.	.	.	.	.
۱۶	۲۰۱۰	می	۵	۲/۴	شاهد	۲۶۵۴/۶۸	۰/۰۰۰۲	۱/۲۳	۰/۰۵	۰/۰۰۱
					نمونه	.	.	.	.	.
۱۷	۲۰۱۰	می	۶	۱/۱	شاهد	۱۲۱۶/۷۲۸	۰/۰۰۰۲	۰/۶۱۵	۰/۱	۰/۰۰۱
					نمونه	.	.	.	.	.
۱۸	۲۰۱۰	می	۶	۴/۲	شاهد	۴۶۴۵/۶۹۱	۰/۰۰۰۲	۲/۵۲۷	۰/۱	۰/۰۰۲
					نمونه	.	.	.	.	.
۱۹	۲۰۱۲	فوریه	۲	۸۵/۹	شاهد	۹۵۰۱۵/۴۵	۲/۵۶۷	۲۸۱۹۶/۹۸	۲۹/۶۸	۲۵/۴۹
					نمونه	۹۱۴۸۰/۳۲۲	۳/۴۶۲	۱۶۷۶۰/۴۲	۱۸/۳۲	۱۵/۷
۲۰	۲۰۱۲	فوریه	۲۶	۶۰/۶	شاهد	۶۷۰۳۰/۶۹	۳/۱۳	۳۷۰۸/۴۰۹	۵/۵۳	۳/۳۵
					نمونه	۶۴۵۳۶/۷۵۸	۰/۱۵۲	۹۱۹/۴۵۷	۱/۴۲	۰/۸
۲۱	۲۰۱۲	آوریل	۱۷	۱۴/۳	شاهد	۱۵۸۱۷/۴۷۳	۰/۰۹۶	۲۱۸۷/۷۰۶	۱۳/۸۳	۱/۹۸
					نمونه	۱۵۲۲۸/۹۷۱	۰/۰۳۶	۶۸/۹۹۸	۰/۴۵	۰/۰۶
۲۲	۲۰۱۳	فوریه	۱	۴۰/۵	شاهد	۴۴۷۹۷/۷۳۹	۰/۱۶۹	۲۱۰۴/۶۱	۴/۷	۱/۹
					نمونه	۴۳۱۳۱/۰۰۱	۰/۰۳۶	۱۱۰/۵۸۹	۰/۲۶	۰/۱
۲۳	۲۰۱۴	مارس	۱۶	۲۲/۸	شاهد	۲۵۲۱۹/۴۶۷	۰/۰۰۴۳	۸۸/۷۹۴	۰/۳۵	۰/۰۸
					نمونه	.	.	.	.	.

جدول ۴. پراکنش توزیع تجمعی جریان براساس روندیابی جریان متعدد

حوضه شاهد	حوضه نمونه	مساحت زهکشی شده بالادست (مترمربع)
درصد مساحت توزیع تجمعی جریان	درصد مساحت توزیع تجمعی جریان	
سطحی	سطحی	
۸۷/۹	۸۹/۹۵	کمتر از ۱۰۰۰
۸/۰۵	۶/۹۲	۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰
۲/۸۴	۱/۶۳	۱۰۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰
۱/۲۲	۱/۴۷	۱۰۰۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰۰
.	۰/۰۳	بیشتر از ۱۰۰۰۰۰۰



شکل ۸. نقشه مقادیر نسبی جریان خروجی از هر پیکسل در جهت اصلی (fi) براساس الگوریتم توزیع جریان متعدد الف) حوضه نمونه؛ ب) حوضه شاهد

جدول ۵. مقادیر حجم جریان خروجی براساس روندیابی جریان متعدد

واقعۀ سال	ماه	روز	حوضه	حجم کل دبی خروجی مشاهده شده (مترمکعب)	حجم کل دبی خروجی براساس روندیابی جریان متعدد (مترمکعب)	درصد دبی خروجی کل روندیابی شده به مشاهده شده
۲۰۰۹	مارس	۳۱	شاهد	۲۴۵/۲۰۱	۲۱۰/۳۰۶	۸۵/۸
			نمونه	.	.	.
۲۰۱۰	فوریه	۲۱	شاهد	۱/۲۵۸	۰/۹۵۶	۷۶
			نمونه	.	.	.
۲۰۱۰	فوریه	۲۱	شاهد	۴/۳۰۳	۳/۸۲۴	۸۸/۹
			نمونه	.	.	.
۲۰۱۰	فوریه	۲۵	شاهد	۷/۳۰۹	۹/۵۵۹	۷۶/۵
			نمونه	.	.	.
۲۰۱۰	فوریه	۲۶	شاهد	۱/۲۹۸	۰/۹۵۶	۷۳/۷
			نمونه	.	.	.
۲۰۱۰	فوریه	۲۷	شاهد	۲/۲۵۴	۱/۹۱۲	۸۴/۸
			نمونه	.	.	.
۲۰۱۰	مارس	۲	شاهد	۶/۸۳۱	۵/۷۳۵	۸۴
			نمونه	.	.	.
۲۰۱۰	مارس	۴	شاهد	۰/۸۲	۰/۶۶۹	۸۱/۶
			نمونه	.	.	.
۲۰۱۰	مارس	۵	شاهد	۰/۴۱	۰/۳۸۲	۹۳/۲
			نمونه	.	.	.
۲۰۱۰	آوریل	۱۱	شاهد	۱/۸۴۴	۱/۹۱۲	۹۶/۴
			نمونه	.	.	.
۲۰۱۰	آوریل	۱۷	شاهد	۱/۱۶۱	۰/۹۵۶	۸۲/۳
			نمونه	.	.	.
۲۰۱۰	آوریل	۱۸	شاهد	۰/۰۶۸	۰/۰۹۶	۷۰/۸
			نمونه	.	.	.
۲۰۱۰	آوریل	۲۹	شاهد	۱/۰۲۵	۰/۸۶	۸۳/۹
			نمونه	.	.	.
۲۰۱۰	می	۳	شاهد	۲/۱۸۶	۱/۹۱۲	۸۷/۵
			نمونه	.	.	.
۲۰۱۰	می	۴	شاهد	۱/۷۷۶	۱/۹۱۲	۹۲/۹
			نمونه	.	.	.
۲۰۱۰	می	۵	شاهد	۱/۲۳	۰/۹۵۶	۷۷/۷
			نمونه	.	.	.
۲۰۱۰	می	۶	شاهد	۰/۶۱۵	۰/۹۵۶	۶۴/۳
			نمونه	.	.	.
۲۰۱۰	می	۶	شاهد	۲/۵۲۷	۱/۹۱۲	۷۵/۷
			نمونه	.	.	.
۲۰۱۲	فوریه	۲	شاهد	۲۸۱۹۶/۹۸	۲۴۳۶۶/۸۴۷	۸۶/۴
			نمونه	۱۶۷۶۰/۴۲	۱۶۲۷۳/۵۸۶	۹۷/۱
۲۰۱۲	فوریه	۲۶	شاهد	۳۷۰۸/۴۰۹	۳۲۲۳/۱۹	۸۶/۹
			نمونه	۹۱۹/۴۵۷	۸۸۹/۱۵۴	۹۶/۷
۲۰۱۲	آوریل	۱۷	شاهد	۲۱۸۷/۷۰۶	۱۹۰۱/۴۵۷	۸۶/۹
			نمونه	۶۸/۹۹۸	۶۲/۰۳۴	۸۹/۹
۲۰۱۳	فوریه	۱	شاهد	۲۱۰۴/۶۱	۱۸۲۹/۲۵۶	۸۶/۹
			نمونه	۱۱۰/۵۸۹	۱۰۳/۳۹	۹۳/۵
۲۰۱۴	مارس	۱۶	شاهد	۸۸۷۹۴	۷۶/۴۷۵	۸۶/۱
			نمونه	.	.	.

براساس روندیابی توزیع جریان متعدد محاسبه شد و با قرار دادن ضریب رواناب‌های دو حوضه به‌جای یکدیگر، دو سناریوی اجرای عملیات و عدم اجرای عملیات بازسازی شد. نتایج نشان داد که در رگبارهای با مقدار بارش کم که دارای حجم جریان اندک است، اجرای عملیات آبخیزداری به‌طور ۱۰۰ درصد بر کاهش جریان خروجی از حوضه تأثیر داشته است. اما در جریان‌های با حجم بیشتر بین ۳۸/۲ تا ۷۴/۲ درصد سبب کاهش حجم جریان خروجی شده است. جدول ۶ مقادیر حجم جریان خروجی براساس روندیابی جریان متعدد را برای دو سناریوی تحت عملیات و فاقد عملیات آبخیزداری نشان می‌دهد.

#### - بررسی تأثیر عملیات آبخیزداری بر توزیع جریان سطحی

داده‌های مشاهده‌شده ثبت‌شده طی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۴ در فلوم‌های نمونه و شاهد به‌خوبی تأثیر عملیات آبخیزداری بر جریان‌های سطحی را نشان می‌دهند. به‌طوری که در حوضه شاهد که فاقد اجرای هر گونه عملیات آبخیزداری بود، ۲۳ واقعه ثبت شده است؛ درحالی که در حوضه نمونه که تحت اجرای کامل عملیات بود، تنها چهار واقعه ثبت شده است که هر چهار واقعه دارای دبی حداکثر و کل کمتر از حوضه شاهدند. نتایج توزیع حجم جریان سطحی برای این وقایع

جدول ۶. مقادیر حجم جریان خروجی براساس روندیابی جریان متعدد برای دو سناریوی عملیات آبخیزداری اجرا شده و اجرا نشده

واقعه	سال	ماه	روز	حوضه	تحت عملیات آبخیزداری	بدون اجرای عملیات آبخیزداری	درصد کاهش دبی خروجی کل روندیابی شده در اثر اجرای عملیات
۱	۲۰۰۹	مارس	۳۱	شاهد	۰	۲۱۰/۳۰۶	۱۰۰
				نمونه	۰	۲۲۹/۱۹۲	۱۰۰
۲	۲۰۱۰	فوریه	۲۱	شاهد	۰	۰/۹۵۶	۱۰۰
				نمونه	۰	۱/۱۳۷	۱۰۰
۳	۲۰۱۰	فوریه	۲۱	شاهد	۰	۳/۸۲۴	۱۰۰
				نمونه	۰	۴/۰۳۲	۱۰۰
۴	۲۰۱۰	فوریه	۲۵	شاهد	۰	۹/۵۵۹	۱۰۰
				نمونه	۰	۶/۸۲۴	۱۰۰
۵	۲۰۱۰	فوریه	۲۶	شاهد	۰	۰/۹۵۶	۱۰۰
				نمونه	۰	۱/۲۴۱	۱۰۰
۶	۲۰۱۰	فوریه	۲۷	شاهد	۰	۱/۹۱۲	۱۰۰
				نمونه	۰	۲/۰۶۸	۱۰۰
۷	۲۰۱۰	مارس	۲	شاهد	۰	۵/۷۳۵	۱۰۰
				نمونه	۰	۶/۴۱	۱۰۰
۸	۲۰۱۰	مارس	۴	شاهد	۰	۰/۶۶۹	۱۰۰
				نمونه	۰	۰/۷۲۴	۱۰۰
۹	۲۰۱۰	مارس	۵	شاهد	۰	۰/۳۸۲	۱۰۰
				نمونه	۰	۰/۴۱۴	۱۰۰
۱۰	۲۰۱۰	آوریل	۱۱	شاهد	۰	۱/۹۱۲	۱۰۰
				نمونه	۰	۱/۷۵۸	۱۰۰
۱۱	۲۰۱۰	آوریل	۱۷	شاهد	۰	۰/۹۵۶	۱۰۰
				نمونه	۰	۱/۰۳۴	۱۰۰
۱۲	۲۰۱۰	آوریل	۱۸	شاهد	۰	۰/۰۹۶	۱۰۰
				نمونه	۰	۰/۱۰۳	۱۰۰
۱۳	۲۰۱۰	آوریل	۲۹	شاهد	۰	۰/۸۶	۱۰۰
				نمونه	۰	۰/۹۳۱	۱۰۰
۱۴	۲۰۱۰	می	۳	شاهد	۰	۱/۹۱۲	۱۰۰
				نمونه	۰	۲/۰۶۷	۱۰۰
۱۵	۲۰۱۰	می	۴	شاهد	۰	۱/۹۱۲	۱۰۰
				نمونه	۰	۱/۶۵۴	۱۰۰
۱۶	۲۰۱۰	می	۵	شاهد	۰	۰/۹۵۶	۱۰۰

ادامه جدول ۶. مقادیر حجم جریان خروجی براساس روندیابی جریان متعدد برای دو سناریوی عملیات آبخیزداری اجرا شده و اجراننده

واقعۀ سال	ماه	روز	حوضه	تحت عملیات آبخیزداری	بدون اجرای عملیات آبخیزداری	درصد کاهش دبی خروجی کل روندیابی شده در اثر اجرای عملیات
			نمونه	۰	۱/۱۳۷	۱۰۰
۱۷	۲۰۱۰	می	شاهد	۰	۰/۹۵۶	۱۰۰
		۶	نمونه	۰	۰/۶۲	۱۰۰
۱۸	۲۰۱۰	می	شاهد	۰	۱/۹۱۲	۱۰۰
		۶	نمونه	۰	۲/۳۱۸	۱۰۰
۱۹	۲۰۱۲	فوریه	شاهد	۱۵۰۴۶/۴۵۶	۲۴۳۶۶/۸۴۷	۳۸/۳۵
		۲	نمونه	۱۶۲۷۳/۵۸۶	۲۶۳۵۶/۰۷۵	۳۸/۳۵
۲۰	۲۰۱۲	فوریه	شاهد	۸۲۲/۱۰۶	۲۳۸۲/۱۰۱	۶۵/۴۸
		۲۶	نمونه	۸۸۹/۱۵۴	۲۵۷۶/۳۷۵	۶۵/۴۸
۲۱	۲۰۱۲	آوریل	شاهد	۵۷/۳۵۶	۲۱۹/۴۸۳	۷۳/۸۶
		۱۷	نمونه	۶۲/۰۳۴	۲۳۷/۳۸۳	۷۳/۸۶
۲۲	۲۰۱۳	فوریه	شاهد	۹۵/۵۹۴	۳۷۰/۹۰۴	۷۴/۳۲
		۱	نمونه	۱۰۳/۳۹	۴۰۱/۱۵۳	۷۴/۳۲
۲۳	۲۰۱۴	مارس	شاهد	۰	۷۶/۴۷۵	۱۰۰
		۱۶	نمونه	۰	۸۳/۰۲۲	۱۰۰

### بحث و نتیجه‌گیری

از تفسیر، برای اولین بار در محیط GIS (نرم‌افزار الویس) تعریف و به کار گرفته شد. الگوریتم توزیع جریان متعدد با توانایی‌ای که تعریف مقدار فاکتور همگرایی برای آن ایجاد می‌کند، می‌تواند شرایط توپوگرافی پیچیده‌تری از سطوح طبیعی را شبیه‌سازی کند. به طوری که هر چه شیب پیکسل اصلی در جهت  $i$  نسبت به شیب پیکسل‌های مجاور بیشتر شود، مقدار  $p$  (فاکتور همگرایی) بیشتر خواهد بود و با افزایش مقدار آن، روندیابی جریان از حالت جریان متعدد به جریان منفرد تغییر خواهد یافت. بنابراین در فاکتور همگرایی بالاتر که روندیابی جریان براساس الگوریتم توزیع جریان منفرد صورت می‌گیرد، تمرکز رواناب بیشتر است [۱]. در این تحقیق، به منظور بررسی الگوریتم توزیع جریان متعدد، مقدار حداقل برای فاکتور همگرایی در نظر گرفته شد؛ زیرا توزیع جریان به طور کامل براساس الگوریتم توزیع جریان متعدد صورت می‌گیرد. بررسی درصد پراکنش جریان روندیابی شده در سطح حوضه در این تحقیق نشان داد توزیع جریان متعدد قادر است علاوه بر نشان دادن محل‌های تمرکز جریان، مساحت سطوح زهکشی‌کننده بالادست یک نقطه و حجم جریان ورودی به آن را محاسبه کند. این امر می‌تواند در تعیین پتانسیل و قابلیت یک محل برای یک کاربری خاص استفاده شود. همچنین می‌توان در اولویت‌بندی نقاط

نتایج این تحقیق به خوبی تأثیر عملیات آبخیزداری بر توزیع جریان سطحی را با استفاده از الگوریتم توزیع جریان متعدد نشان داد. در این تحقیق با به کارگیری ضریب رواناب واقعی حوضه براساس داده‌های مشاهده شده، نتایج روندیابی جریان متعدد در سطح حوضه‌های آبخیز بررسی شد. در روش‌های روندیابی جریان سطحی، جریان روندیابی شده به طور مستقیم تنها تحت تأثیر خصوصیات فیزیکی حوضه‌ها به ویژه توپوگرافی سطح قرار دارد و از آن تبعیت می‌کند. بنابراین روش‌های روندیابی جریان سطحی، زمانی نتایج پذیرفتنی و نزدیک به واقعیت خواهد داشت که شرایط توپوگرافی سطحی را در نظر گیرند. در این بین نتایج روش روندیابی جریان متعدد به دلیل تعریف فاکتور همگرایی که به طور مستقیم تحت تأثیر توپوگرافی سطحی و تحدب و تعقر دامنه‌ها قرار دارد، به مقادیر واقعی بسیار نزدیک‌تر است. نتایج بخش اول این تحقیق که معرفی الگوریتم توزیع جریان متعدد بود، نشان داد که در حوضه‌های آبخیز دارای شبکه زهکشی و یک خروجی مشخص، روش روندیابی جریان متعدد توانایی محاسبه حجم کل جریان خروجی از سطح حوضه‌ها را با دقت زیادی دارد (حداکثر ۹۷/۱ و حداقل ۶۴/۳ درصد). در این تحقیق کد برنامه‌نویسی شده برای اجرای این الگوریتم پس

توسعه الگوریتم توزیع جریان متعدد، توزیعی کردن فاکتور همگرایی در سطح حوضه پیشنهاد می‌شود. نتایج بخش دوم این تحقیق نیز به خوبی تأثیر عملیات آبخیزداری را بر حجم جریان سطحی خروجی از حوضه‌های آبخیز نشان داد. این نتایج نشان داد در صورتی که حوضه نمونه فاقد اجرای عملیات آبخیزداری می‌بود، جریان خروجی بیشتری نسبت به حوضه شاهد الگوریتم داشت. اما اجرای این عملیات سبب شد در تمامی موارد دارای دبی خروجی کمتری نسبت به حوضه شاهد باشد. این تحقیق به خوبی تأثیر عملیات آبخیزداری را بر کاهش ضریب رواناب متوسط حوضه نشان می‌دهد.

#### منابع

1. Baartman J. E. M., Temme A.J.A. M., Veldkamp T., Jetten V. G., Schoorl G.M., 2013, Exploring the role of rainfall variability and extreme events in long-term landscape development, *Catena*, 109, pp.25-38.
2. Baartman J.E.M., Van Gorp W., Temme A.J.A.M., and Schoorl J.M., 2012, Modelling sediment dynamics due to hillslope-river interactions: incorporating fluvial behaviour in landscape evolution model LAPSUS, *Earth Surface Processes and Landforms*, 37, pp.923-935.
3. Buis E., and Veldkamp A., 2008, Modelling dynamic water redistribution patterns in arid catchments in the Negev Desert, *Earth Surface Processes and Landforms*, 33(1), pp.107-122.
4. Eshghizadeh M., 2012, Plan review of Kakhk paired catchment, Forests, Range & Watershed Management Organization of Iran. (in persian)
5. Freeman T.G., 1991, Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid, *Computers & Geosciences*, 17(3), pp.413-422.
6. Hasan A., Pilesjö P., and Persson A., 2011, Estimating surface flow over digital elevation models using a new improved form-based algorithm, *River Basin Management VI*, 146, pp.201-211.
7. Hengle T., and I.Reuter H., 2009, *Geomorphometry Concepts, Software, Applications, Developments in Soil Science*, Amsterdam, Netherlands.

جهت عملیات حفاظت آب و خاک با دقت بیشتری تصمیم‌گیری کرد. فاکتور همگرایی در الگوریتم جریان متعدد قابلیت محاسبه توزیع جریان منفرد را نیز ایجاد می‌کند. بنابراین این الگوریتم را می‌توان یک الگوریتم تکمیلی تر نسبت به الگوریتم جریان منفرد جهت محاسبات روندیابی توزیع جریان قلمداد کرد که دربرگیرنده هر دو نوع الگوریتم توزیع جریان سطحی است. در حال حاضر بسیاری از بسته‌های نرم‌افزاری GIS تنها الگوریتم توزیع جریان منفرد را به دلیل حجم کمتر محاسبات و ساده بودن پشتیبانی می‌کنند و الگوریتم توزیع جریان متعدد به صورت کدنویسی شده در برنامه‌هایی مانند ++C اجرا می‌شود. این نوع شبیه‌سازی شرایط واقعی تری از سطوح طبیعی را در نظر می‌گیرد. کاربرد توزیع جریان منفرد به دلیل سهولت در محاسبات معمول تر و راحت تر است [۲۰]، اما توانایی لازم را برای شبیه‌سازی جریان در مناطق مسطح و دارای جریان‌های واگرا و موازی ندارد [۱۱]. در نظر گرفتن تنها یک خروجی برای هر پیکسل در این الگوریتم، سبب اعمال غیرمنطقی و ساده‌سازی بیش از حد در روندیابی جریان می‌شود [۱۲]. اما در نظر گرفتن یک مقدار ثابت برای فاکتور همگرایی در کل سطح حوضه، الگوریتم توزیع جریان متعدد را به یک مدل متوسط تبدیل می‌کند و مانع حالت توزیعی آن می‌شود. از آنجا که در روندیابی جریان متعدد از یک مقدار ثابت برای فاکتور همگرایی (p) استفاده می‌شود، همه شرایط توپوگرافی شامل سطوح صاف و شیبدار و واگرا و همگرا به صورت یکسانی مدل می‌شوند. در نتیجه در مناطق با پیچیدگی سطوح طبیعی این مقدار ثابت نمی‌تواند تأثیرات مکانی شرایط توپوگرافی را روی توزیع جریان مدل کند [۱۱]. با وجود این، پیلسجو و حسن [۱۳] در مطالعه خود نشان دادند که الگوریتم توزیع جریان متعدد به دلیل توانایی در مسیریابی جریان سطحی، بستر مناسبی برای شبیه‌سازی دینامیک جریان سطحی است. در صورتی که فاکتور همگرایی از تغییرات مکانی توپوگرافی تبعیت کند و دارای توزیع مکانی در سطح حوضه باشد، با استفاده از الگوریتم توزیع جریان متعدد، هر دو نوع توزیع جریان متعدد و جریان منفرد برای سطوح پرشیب و همگرا و سطوح کم‌شیب و واگرا و تحدب و تعقر سطوح طبیعی قابل محاسبه خواهد بود؛ از این رو برای مطالعات آبی در راستای

8. Holmgren P., 1994, Multiple flow direction algorithms for runoff modelling in grid based elevation models: An empirical evaluation, *Hydrological processes*, 8, pp.327-334
9. Jenson S.K., and Domingue J.O. , 1988, Extracting topographic structure from digital elevation data for geographical information system analysis, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(11), pp.593–1600.
10. Lesschen J.P., Schoorl J.M., Cammeraat L.H., 2009, Modelling runoff and erosion for a semi-arid catchment using a multi-scale approach based on hydrological connectivity, *Geomorphology*, 109, pp.174–183.
11. Liu J., Zhu A-X., Liu Y., Zhu T., and Qin Ch-Z., 2014, A layered approach to parallel computing for spatially distributed hydrological modeling, *Environmental Modelling & Software*, 51, pp.221-227.
12. Noori H., Khoshhal J., Vali A., 2007, The Study of Watershed Measures Impact on Runoff Coefficient in semi-arid region. 10th Soil Science Congress of Iran. Tehran.
13. Pilesjö p., and Hasan A., 2014, A Triangular Form-based Multiple Flow Algorithm to Estimate Overland Flow Distribution and Accumulation on a Digital Elevation Model. *Transactions in GIS*, 18(1), pp.108-124.
14. Pilesjö P., Zhou Q., and Harrie L., 1998, Estimating flow distribution over Digital Elevation Models using a Form-Based Algorithm, *Geographic Information Science*, 4, pp.44-51.
15. Pilesjö P., and Zhou Q., 1996, A multiple flow direction algorithm and its use for hydrological modelling, in *Geoinformatics '96 Proceedings*, April 26-28, West Palm Beach, FL, pp.366-376.
16. Qin C.Z., and Zhan L.J., 2012, Parallelizing flow-accumulation calculations on graphics processing units e from iterative DEM preprocessing algorithm to recursive multiple-flow-direction algorithm, *Comput. Geosciences*, 43, pp.7-16.
17. Qin C.Z., Zhu A-X., Pei T., Li B., Zhou C., and Yang L., 2007, An adaptive approach to selecting a flow-partition exponent for a multiple-flow-direction algorithm, *Geogr. Inf. Sci.*, pp.443-458.
18. Quinn P., Beven K., Chevallier P., and Planchon O., 1991, The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models, *Hydrological Processes*, 5, pp.59-79.
19. Schoorl J.M., 2002, Addressing the Multi-scale Lapsus of Landscape, Ph.D, thesis, Wageningen University.
20. Schoorl J.M., Sonneveld M.P.W., and Veldkamp A., 2000, Three-dimensional landscape process modelling: the effect of DEM resolution. *Earth Surf.Proc, Landforms*, 25, pp.1025-1034.
21. Schoorl J. M., Veldkamp A., 2001, Linking land use and landscape process modelling: a case study for the Alora region (South Spain), *Agric.Ecosyst.Environ*, 85, pp.281-292.
22. Soulis K.X., 2013, Development of a simplified grid cells ordering method facilitating GIS-based spatially distributed hydrological modeling, *Computers & Geosciences*, 54, pp.160–163.
23. Tarboton D.G., 1997, A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models, *Water Resources Research*, 33(2), pp.309–319.
24. Wolock D.M., and McCabe Jr.G.J., 1995, Comparison of single and multiple flow direction algorithms for computing topographic parameters in TOPMODEL, *Water Resources Research*, 31(5), pp.1315-1324.