

بررسی الگوریتم توزیع جریان چند جهته در مقیاس حوزه آبخیز با استفاده از مدل LAPSUS

مسعود عشقی زاده^{۱*}، علی طالبی^۲، محمدتقی دستورانی^۳ و حمیدرضا عظیم زاده^۴

^۱ استادیار، مجتمع آموزش عالی گناباد، ^۲ استاد، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، ^۳ استاد، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، ^۴ دانشیار، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۰۴

چکیده

در این تحقیق مدل لاپسوس به عنوان یک مدل مناسب که روندیابی جریان سطحی را بر اساس الگوریتم توزیع جریان چند جهته انجام می دهد، معرفی شد. الگوریتم های توزیع جریان به دو گروه توزیع جریان چند جهته و تک جهته تقسیم می شود. مدل لاپسوس یک مدل تحول چشم انداز بوده که ورودی های لازم برای روندیابی جریان سطحی آن شامل مدل رقمی ارتفاع، مقدار رگبار، ضریب رواناب و مقدار عامل هم گرایی می باشد. این مدل در محیط برنامه نویسی C++ نوشته شده و ورودی های آن از طریق صفحه اجرای مدل تعریف می شدند. این مدل برای اولین بار در ایران برای روندیابی جریان سطحی در مقیاس حوزه آبخیز در حوضه زوجی کاخک شهرستان گناباد اجرا و مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق جریان های سطحی ایجاد شده بر اثر ۳۴ واقعه منجر به سیلاب طی سال های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۸ با استفاده از این مدل در مقیاس حوزه آبخیز و در زیرحوضه های نمونه و شاهد، شبیه سازی شد. نتایج حاصل نشان داد، روندیابی جریان چند جهته که به وسیله مدل لاپسوس صورت گرفته است با دقت بالایی قادر به شبیه سازی حجم کل جریان خروجی در مقیاس حوضه است. به طوری که مقدار RMSE نرمال شده برابر با ۳/۹ درصد می باشد.

واژه های کلیدی: جریان سطحی، روندیابی جریان، روندیابی چند جهته، مدل لاپسوس، C++

مقدمه

مجاور پایین دست منتقل می شود (شکل ۱). در حالی - که در الگوریتم توزیع جریان تک جهته، تمامی جریان از یک نقطه یا پیکسل تنها به یک نقطه یا پیکسل مجاور پایین دست که در راستای شیب قرار دارد، انتقال می یابد (شکل ۲). از رایج ترین روش های این الگوریتم می توان به روش الگوریتم توزیع روندیابی بیشترین شیب پایین دست^۳ و روش D₈^۴ اشاره کرد (Quinn و همکاران، ۱۹۹۱؛ McCabe و Wolock)

به طور کلی، در مبحث روندیابی جریان های سطحی، الگوریتم های توزیع جریان به دو گروه اصلی شامل الگوریتم توزیع جریان چند جهته^۱ (MFD) و الگوریتم توزیع جریان تک جهته^۲ (SFD) تقسیم می شود. در الگوریتم توزیع جریان چند جهته، جریان از یک نقطه یا پیکسل به بیش از یک نقطه یا پیکسل

* مسئول مکاتبات: m.eshghizadeh@gonabad.ac.ir

¹ Multiple Flow Direction

² Single Flow Direction

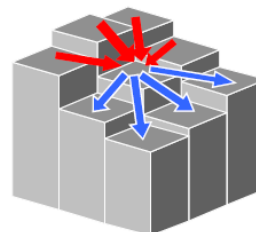
³ Steepest decent routing

⁴ Eight-move

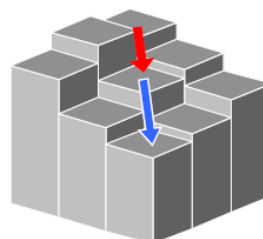
جریان سطحی را در تصمیم‌گیری‌های کلان طرح‌های کنترل سیلاب مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با معرفی روش‌های مختلف روندیابی از قبیل D_8 ، Rho_8 ، Lea ، MS ، $DEMON$ و D بی‌نهایت^۲، الگوریتم D_8 را در نرم‌افزار GEO_HMS به‌عنوان یک نرم‌افزار الحاقی در محیط $Arc-View_GIS$ برای روندیابی در منطقه بهبهان مورد استفاده قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد، استفاده از الگوریتم‌های روندیابی جریان به کمک GIS می‌تواند مسیرهای احتمالی جریان‌های سیلابی را شناسایی کرده و راه‌حل‌های مناسب برای کنترل و جلوگیری از بروز خسارت طرح‌ریزی شود. همچنین، $Gholami Dashtaki$ و همکاران (۲۰۱۳)، عملکرد الگوریتم‌های روندیابی جریان را به‌منظور شبیه‌سازی آبراهه‌های یک حوزه آبخیز با توجه به شاخص مساحت ویژه حوضه، در حوضه آزارود و کاظم‌رود استان مازندران مورد بررسی قرار دادند. برای این منظور، بر اساس پنج الگوریتم D_8 ، Rho_8 ، D بی‌نهایت، $DEMON$ و MFD در منطقه مورد مطالعه، نقشه‌های SCA تهیه شد و با توجه به این‌که هر چه یک الگوریتم بتواند با تعداد کمتری از پیکسل‌ها به شبکه آبراهه دست پیدا کند، از عملکرد بهتر و قوی‌تری برخوردار است، الگوریتم‌های به‌کار برده شده را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که به‌ترتیب الگوریتم‌های D_8 ، Rho_8 ، $DEMON$ ، D بی‌نهایت و MFD بهترین عملکرد را داشته‌اند.

از جمله مدل‌هایی که قابلیت محاسبه روندیابی جریان سطحی را دارد، مدل لاپسوس^۳ ($LAPSUS$) است. این مدل یک مدل تحول چشم‌انداز^۴ (LEM) دینامیک است. در مدل‌های تحول چشم‌انداز، تغییر شکل چشم‌انداز بر اثر فرایندهای تغییردهنده آن سبب تغییرات ارتفاعی سطح زمین می‌شود، این تغییرات بر روی یک لایه رقومی از ارتفاع که قابل به‌روزرسانی است، نشان داده می‌شود. در مورد تغییرات چشم‌انداز در اثر فرایندهای فرسایش و رسوبگذاری، تغییرات ارتفاع سطح زمین بر روی مدل رقومی ارتفاع (DEM) نشان داده می‌شود ($Schoorl$ و همکاران، ۲۰۰۰ و

۱۹۹۵؛ $Pilesjö$ و همکاران، ۱۹۹۸؛ Qin و همکاران، ۲۰۰۷؛ $Hasan$ ، ۲۰۱۱؛ $Shokoohi$ و همکاران، ۲۰۰۷؛ $Talebi$ و همکاران، ۲۰۱۴).



شکل ۱- توزیع جهت جریان چند جهته (MFD)



شکل ۲- توزیع جهت جریان تک جهته (SFD)

در مبحث روندیابی جریان سطحی، یکی از مهمترین ویژگی‌های حوزه‌های آبخیز که مربوط به توپوگرافی حوضه می‌باشد، جهت جریان رواناب‌های سطحی است که به شکل شبکه زهکشی در سطح حوضه خود را نشان می‌دهد. این امر سبب شده است که تعیین جهت جریان رواناب‌های سطحی یکی از پارامترهای اساسی در مدل‌سازی هیدرولوژیکی و روندیابی جریان به‌شمار رود. مدل رقومی ارتفاع^۱ (DEM) برای محاسبه روندیابی جریان یکی از ورودی‌های اصلی و پایه محسوب می‌شود ($Pilesjö$ و $Hasan$ ، ۲۰۱۴). الگوریتم‌های مختلف روندیابی جریان نسبت به ابعاد اندازه سلول‌های شبکه رستری حساس بوده که این اندازه به‌صورت مستقیم از طریق مدل رقومی ارتفاع تعیین می‌شود ($Gholami Dashtaki$ و $Shokoohi$ ، ۲۰۱۳).

در مورد روش‌های مختلف روندیابی جریان سطحی، مطالعات مختلفی صورت گرفته است. $Shokoohi$ و همکاران (۲۰۰۷) الگوریتم‌های روندیابی

² Deterministic infinity

³ Landscape ProcesS modelling atmUlti dimensions and scaleS

⁴ Landscape Evolution Model

¹ Digital Elevation Model

(۲۰۰۲).

به مسدود شدن مسیر آن و ایجاد سدهای طبیعی، برای دوره‌های بلند مدت مورد پایش قرار دادند. آن‌ها برای این منظور مدل لاپسوس را برای محاسبه رواناب، فرسایش و رسوبگذاری که قادر است گودشدگی‌های واقعی را در نظر گیرد، به کار گرفته شد. آن‌ها نتیجه گرفتند که موانعی که سال‌ها قبل به وجود آمده، می‌تواند امروزه بر روندیابی و الگوی آبراهه‌ها و شبکه زهکشی تاثیر کند. Eshghizadeh و همکاران (۲۰۱۶b)، مدل لاپسوس را در زیرحوضه‌های کوچک ۴۰۰ تا ۴۰۰۰ مترمربعی در حوضه نمونه کاخک اجرا کرده و نشان دادند، این مدل قادر به نشان دادن حجم رواناب و فرسایش و رسوب روندیابی شده در مقیاس‌های کوچک است.

در این تحقیق، با معرفی مدل لاپسوس قابلیت بالای این مدل در روندیابی جریان چند جهته در مقیاس حوزه آبخیز نشان داده شده است. هدف از این تحقیق، معرفی روندیابی جریان چند جهته به وسیله مدل لاپسوس در سطح حوزه‌های آبخیز است. علاوه بر این، معرفی مدل لاپسوس به عنوان یک مدل برای روندیابی جریان چند جهته می‌باشد.

مواد و روش‌ها

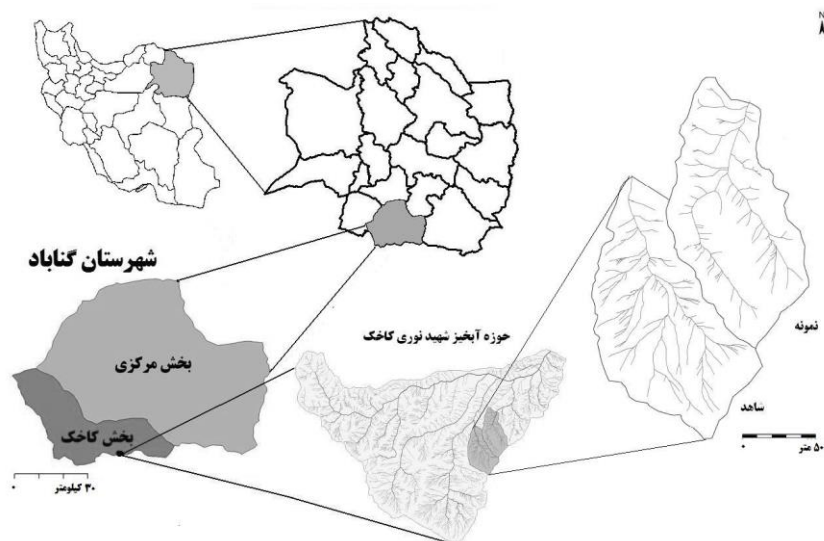
منطقه مورد پژوهش: حوضه زوجی کاخک واقع در فاصله ۳۵ کیلومتری جنوب شهر گناباد در خراسان رضوی و بین طول‌های $37^{\circ} 35' 58''$ الی $41^{\circ} 36' 00''$ شرقی و عرض‌های $01^{\circ} 04' 34''$ الی $07^{\circ} 05' 34''$ شمالی واقع شده است. این حوضه از زیرحوضه‌های حوزه آبخیز شهید مهدی نوری کاخک در طرح ملی حوضه‌های معرف و نمایشی کشور می‌باشد. در طرح ملی حوضه‌های معرف و نمایشی کشور که به وسیله سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری صورت گرفته است؛ دو حوضه که از هر نظر شبیه هم هستند، انتخاب شده و در یکی از حوضه‌ها انواع عملیات آبخیزداری و حفاظت خاک صورت می‌گیرد (حوضه نمونه) و حوضه دیگر ثابت و دست‌نخورده و تحت بهره‌برداری طبیعی خود باقی می‌ماند (شاهد). هر دو این حوضه‌ها تحت پایش مستمر پارامترهای هواشناسی، هیدرومتری، پوشش گیاهی، نفوذپذیری، فرسایش و رسوب قرار می‌گیرند.

این مدل برای اولین بار در سال ۲۰۰۱ میلادی در دانشگاه واخنینگن هلند به وسیله تیم تحقیقاتی Schoorl و Veldkamp معرفی و شروع به توسعه کرد. در نسخه اولیه مدل، تغییر و تحول چشم‌اندازها تنها با در نظر گرفتن فرایندهای فرسایش و رسوبگذاری و با استفاده از شبیه‌سازی رواناب سطحی صورت گرفت. اما در مراحل بعدی توسعه مدل، فرایندهای بیشتری به آن اضافه شد که عبارت‌اند از: هوازگی فیزیکی و بیولوژیکی، خزش خاک، سولفلیکسیون، اثرات پوشش گیاهی، تکتونیک، فرسایش حاصل از شخم، زمین لغزش و مکانیسم جریان اشباعی (Schoorl و همکاران، ۲۰۰۴؛ Claessens و همکاران، ۲۰۰۷؛ Buis و Veldkamp، ۲۰۰۸؛ Temme و Veldkamp، ۲۰۰۹؛ Baartman و همکاران، ۲۰۱۲؛ Eshghizadeh، ۲۰۱۶). در مورد مطالعات صورت گرفته با مدل لاپسوس که روندیابی جریان سطحی بر اساس الگوریتم توزیع جریان چند جهته بوده است، می‌توان به مطالعات زیر اشاره کرد.

Buis و Veldkamp (۲۰۰۸) مدل لاپسوس را برای نمایش توزیع مکانی آب در یک اقلیم مدیترانه‌ای کم باران مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنان نشان داد که حوضه‌ها پاسخ‌های متفاوتی به وقایع رگباری دارند که ناشی از خصوصیات مختلف سطح مخصوصاً پوشش گیاهی است. Lesschen و همکاران (۲۰۰۹) رواناب و فرسایش را برای یک حوضه نیمه‌خشک بر اساس اتصال هیدرولوژیکی در چند مقیاس مکانی مختلف با مدل لاپسوس مدل‌سازی کردند. اتصال هیدرولوژیکی، مسیر پیوسته آب و مواد موجود در آن از لحظه ورود به سطح حوضه در اثر بارش، تا هنگام خروج از آن در اثر جریان سطحی می‌باشد. نتایج حاصل نشان داد که توزیع مکانی پوشش گیاهی و تراس‌های کشاورزی تاثیر مهمی بر روندیابی جریان دارد. Keesstra و همکاران (۲۰۱۴) مدل لاپسوس را در مقیاس زمانی روزانه برای کاربرد در حوضه‌های متوسط (۲۰ تا ۲۰۰ کیلومتر مربع) مورد بررسی قرار دادند. نتایج روندیابی آن‌ها نشان داد که مدل لاپسوس به‌طور قابل اعتمادی می‌تواند دبی پیک را پیش‌بینی کند. Gorp و همکاران (۲۰۱۴) به منظور شبیه‌سازی پاسخ رودخانه

این حوضه را نشان می‌دهد (Eshghizadeh و همکاران، ۲۰۱۶a).

در حوضه زوجی کاخک، حوضه نمونه دارای مساحت ۱۰۶/۵ هکتار و حوضه شاهد دارای مساحت ۱۱۰/۶ هکتار می‌باشد. شکل ۳، موقعیت جغرافیایی-سیاسی



شکل ۳- موقعیت جغرافیایی-سیاسی منطقه مورد مطالعه

جریان چند جهته خواهد بود. اما هنگامی که مقدار این عامل به سمت بی‌نهایت سیر کند و از مقدار ۱۰ فراتر باشد، توزیع جریان بر اساس الگوریتم جریان تک جهته محاسبه می‌شود (Hasan و همکاران، ۲۰۱۱). ورودی‌های لازم برای محاسبه روندیابی جریان چند جهته به وسیله مدل لاپسوس به شرح زیر می‌باشد (Eshghizadeh، ۲۰۱۶).

الف) مدل رقومی ارتفاع (DEM) حوضه: مدل لاپسوس یک مدل بر پایه شبکه سلولی بوده، تمامی محاسبات در سطح پیکسل‌ها صورت می‌گیرد. لذا، وجود یک مدل رقومی ارتفاعی که دارای دقت مناسب و قابل اطمینان باشد از ورودی‌های پایه برای مدل لاپسوس بوده و بدون آن امکان اجرای محاسبات وجود ندارد.

برای تعریف لایه مدل رقومی ارتفاع به مدل لاپسوس، این لایه باید به فرمت اسکی باشد. اندازه پیکسل‌های این لایه تعیین کننده اندازه پیکسلی محاسبات در مدل لاپسوس می‌باشد. برای تعریف مدل رقومی ارتفاعی حوضه‌های نمونه و شاهد حوضه زوجی کاخک، مدل رقومی ارتفاعی تهیه شده از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ هر یک از این زیرحوضه‌ها که

روش پژوهش: در مدل لاپسوس پس از محاسبه دبی بر اساس بارش موثر، این دبی به طرف پیکسل‌های پایین دست بر اساس الگوریتم توزیع جریان چند جهته روندیابی می‌شود. در روندیابی جریان چند جهته درصد دبی خارج شده از یک پیکسل به هر یک از پیکسل‌های پایین دست مجاور با استفاده از یک عامل وزنی مشخص برای هر جهت محاسبه می‌شود. این نسبت در هر جهت از رابطه (۱) محاسبه می‌شود (Freeman، ۱۹۹۱؛ Holmgren، ۱۹۹۴؛ Quinn و همکاران، ۱۹۹۱).

$$F_i = \frac{(\tan \beta)_i^p}{\sum_{j=1}^{\max 8} (\tan \beta)_j^p} \quad (1)$$

که در آن، F_i نسبت جریان در جهت i که بین صفر تا یک می‌باشد، β زاویه شیب بین پیکسل مرکزی و پیکسل پایین دست در جهت i ، P عامل هم‌گرایی و i و j جهت اصلی و فرعی جریان به پیکسل‌های مجاور است.

بر اساس مقدار عامل هم‌گرایی دو نوع الگوریتم توزیع جریان چند جهته و تک جهته به وسیله این مدل قابل تعریف است. هنگامی که مقدار این عامل برابر با یک باشد، توزیع جریان بر اساس الگوریتم

است که در سطح زمین تبدیل به رواناب می‌شود. مقدار ضریب رواناب برای هر واقعه بارشی در زیرحوضه‌های مورد مطالعه، با استفاده از داده‌های مشاهداتی حجم جریان حاصل از هر واقعه رگباری منجر به رواناب و سطح ایجاد کننده آن، محاسبه شد. جدول ۱ وقایع رگباری مشاهداتی، حجم جریان و ضریب رواناب حاصل از رگبارهای به‌وقوع پیوسته در زیرحوضه‌ها را نشان می‌دهد.

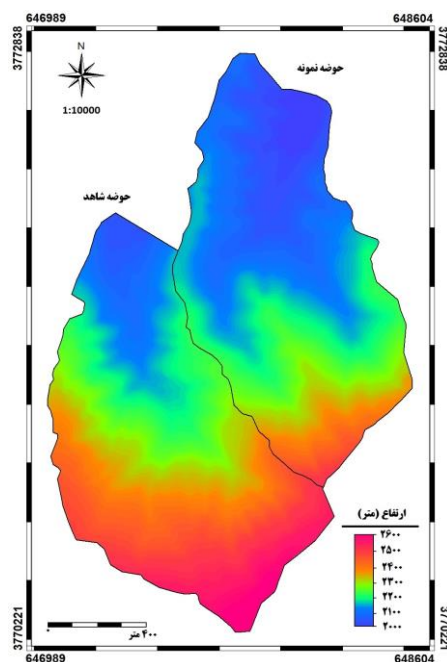
د) مقدار عامل هم‌گرایی (p): نوع روندیابی جریان در مدل لاپسوس با استفاده از تعریف مقدار عامل هم‌گرایی برای مدل تعیین می‌شود. بیشینه مقدار این عامل ۱۰ بوده که در این حالت روندیابی جریان سطحی به‌صورت جریان تک جهته محاسبه می‌شود. کمینه مقدار آن نیز یک است که در این حالت جریان به‌صورت کامل تحت الگوریتم توزیع جریان چند جهته روندیابی می‌شود (Holmgren, ۱۹۹۴؛ Schoorl, ۲۰۰۲؛ Temme و همکاران, ۲۰۰۶؛ Buis و Veldkamp, ۲۰۰۸؛ Temme و Veldkamp, ۲۰۰۹؛ Baartman و همکاران, ۲۰۱۲). در این تحقیق، با توجه به بررسی روندیابی جریان چند جهته، مقدار یک برای عامل هم‌گرایی به مدل وارد شد.

در مدل لاپسوس پس از محاسبه دبی بر اساس بارش موثر، این دبی به طرف پیکسل‌های پایین دست دامنه بر اساس الگوریتم جریان چند جهته روندیابی شده و مقدار تجمعی آن برای هر پیکسل سطح شبکه و انتهای دامنه محاسبه می‌شود. این محاسبات در خروجی مدل به‌صورت یک لایه رستری با فرمت اسکی است که جهت مشاهده مقادیر لازم است به محیط‌های GIS وارد شود.

ورودی‌های لازم برای محاسبه روندیابی جریان چند جهته به‌وسیله مدل لاپسوس در محیط برنامه‌نویسی C++ تعریف شده و با تعیین ورودی‌های مدل، این مقادیر از صفحه اجرای مدل به‌وسیله کاربر وارد مدل می‌شود.

پس از محاسبه روندیابی وقایع داده شده به مدل این نتایج با مقادیر مشاهداتی مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. برای این منظور نتایج حاصل با معیارهای ضریب تبیین و RMSE نرمال شده مورد بررسی قرار گرفت.

دارای اندازه پیکسلی ۲۵ متر مربعی بود، به فرمت اسکی تبدیل شد. شکل ۴ مدل رقومی ارتفاعی زیرحوضه‌های نمونه و شاهد را نشان می‌دهد.



شکل ۴- مدل رقومی ارتفاعی زیرحوضه‌های نمونه و شاهد

ب) مقدار بارش: در مدل لاپسوس مقدار بارش به‌صورت مستقیم از صفحه اجرایی مدل به‌وسیله کاربر وارد می‌شود. برای این منظور، مقادیر بارش هر یک از وقایع ثبت شده در طول یک دوره آماری ۲۰ ساله (۲۰۰۸ تا ۲۰۱۸) که دارای جریان سطحی در حوضه زوجی کاخک بوده، برای ورود به مدل انتخاب شد. جدول ۱، مشخصات وقایع رگباری و جریان‌های سطحی ثبت شده در ایستگاه‌های هیدرومتری نمونه و شاهد حوضه زوجی کاخک را نشان می‌دهد.

ج) ضریب رواناب: مدل لاپسوس در ابتدا بارش موثر را برای محاسبه رواناب سطحی، در هر پیکسل سطح شبکه محاسبه کرده و سپس آن را روندیابی می‌کند. بارش موثر یا بارش مازاد یک اصلاح هیدرولوژیکی است و از نظر هیدرولوژیکی بخشی از باران است که در سطح زمین تبدیل به رواناب می‌شود. محاسبه بارش موثر در مدل لاپسوس با استفاده از وارد کردن مقدار ضریب رواناب هر واقعه بارشی صورت می‌گیرد (Schoorl و Veldkamp, ۲۰۰۱؛ Buis و Veldkamp, ۲۰۰۸؛ Lesschen و همکاران, ۲۰۰۹؛ Baartman و همکاران, ۲۰۱۲). ضریب رواناب درصدی از بارندگی

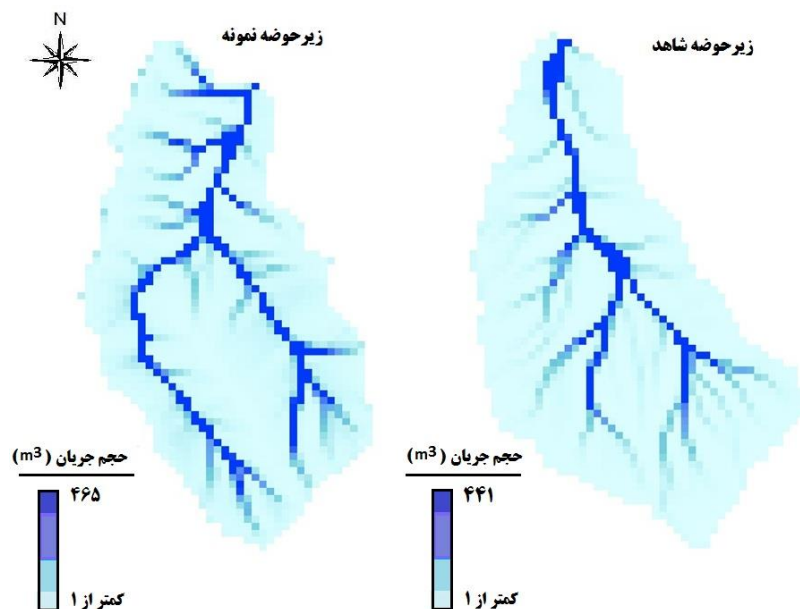
جدول ۱- مشخصات جریان‌ها و رگبارهای ایجاد کننده آن (۲۰۰۸-۲۰۱۸)

| واقعۀ | فلوم | سال | ماه | روز | مقدار رگبار (میلی‌متر) | حجم کل بارش دریافتی (متر مکعب) | حجم کل جریان (متر مکعب) | ضریب رواناب (درصد) |
|-------|-------|------|--------|-----|---------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| ۱ | شاهد | ۲۰۰۹ | مارس | ۳۱ | ۳۶ | ۳۹۸۲۰/۲ | ۲۴۵/۲ | ۰/۶۲ |
| ۲ | شاهد | ۲۰۱۰ | فوریه | ۲۱ | ۱۰/۸ | ۱۱۹۴۶/۱ | ۱/۳ | ۰/۰۱ |
| ۳ | شاهد | ۲۰۱۰ | فوریه | ۲۱ | ۷ | ۷۷۴۲/۸ | ۴/۳ | ۰/۰۶ |
| ۴ | شاهد | ۲۰۱۰ | فوریه | ۲۵ | ۱۵/۸ | ۱۷۴۷۶/۶ | ۷/۳ | ۰/۰۴ |
| ۵ | شاهد | ۲۰۱۰ | فوریه | ۲۶ | ۳/۲ | ۳۵۳۹/۶ | ۱/۳ | ۰/۰۴ |
| ۶ | شاهد | ۲۰۱۰ | فوریه | ۲۷ | ۹ | ۹۹۵۵ | ۲/۲ | ۰/۰۲ |
| ۷ | شاهد | ۲۰۱۰ | مارس | ۲ | ۱۱/۴ | ۱۲۶۰۹/۷ | ۶/۸ | ۰/۰۵ |
| ۸ | شاهد | ۲۰۱۰ | آوریل | ۱۱ | ۹ | ۹۹۵۵ | ۱/۸ | ۰/۰۲ |
| ۹ | شاهد | ۲۰۱۰ | آوریل | ۱۷ | ۵/۳ | ۵۸۶۲/۴ | ۱/۲ | ۰/۰۲ |
| ۱۰ | شاهد | ۲۰۱۰ | آوریل | ۲۹ | ۳/۲ | ۳۵۳۹/۶ | ۱ | ۰/۰۳ |
| ۱۱ | شاهد | ۲۰۱۰ | می | ۳ | ۴/۸ | ۵۳۰۹/۴ | ۲/۲ | ۰/۰۴ |
| ۱۲ | شاهد | ۲۰۱۰ | می | ۶ | ۴/۲ | ۴۶۴۵/۷ | ۲/۵ | ۰/۰۷ |
| ۱۳ | شاهد | ۲۰۱۲ | فوریه | ۲ | ۸۵/۹ | ۹۵۰۱۵/۴ | ۲۸۱۹۷ | ۲۹/۷ |
| ۱۴ | نمونه | ۲۰۱۲ | فوریه | ۲ | ۸۵/۹ | ۹۱۴۸۰/۳ | ۱۶۷۶۰/۴ | ۱۸/۳ |
| ۱۵ | شاهد | ۲۰۱۲ | فوریه | ۲۶ | ۶۰/۶ | ۶۷۰۳۰/۷ | ۳۷۰۸/۴ | ۵/۵ |
| ۱۶ | نمونه | ۲۰۱۲ | فوریه | ۲۶ | ۶۰/۶ | ۶۴۵۳۶/۸ | ۹۱۹/۵ | ۱/۴ |
| ۱۷ | شاهد | ۲۰۱۲ | آوریل | ۱۷ | ۱۴/۳ | ۱۵۸۱۷/۵ | ۲۱۸۷/۷ | ۱۳/۸ |
| ۱۸ | نمونه | ۲۰۱۲ | آوریل | ۱۷ | ۱۴/۳ | ۱۵۲۲۹ | ۶۹ | ۰/۴ |
| ۱۹ | شاهد | ۲۰۱۳ | فوریه | ۱ | ۴۰/۵ | ۴۴۷۹۷/۷ | ۲۰۱۴/۶ | ۴/۷ |
| ۲۰ | نمونه | ۲۰۱۳ | فوریه | ۱ | ۴۰/۵ | ۴۳۱۳۱ | ۱۱۰/۶ | ۰/۲۶ |
| ۲۱ | شاهد | ۲۰۱۴ | مارس | ۱۶ | ۲۲/۸ | ۲۵۲۱۹/۵ | ۸۸/۸ | ۰/۳۵ |
| ۲۲ | شاهد | ۲۰۱۴ | نوامبر | ۴ | ۴۳/۱ | ۴۷۶۷۳/۶ | ۴۰۰ | ۰/۸ |
| ۲۳ | نمونه | ۲۰۱۴ | نوامبر | ۵ | ۴۳/۱ | ۴۱۸۵۳ | ۳۶۸ | ۰/۹ |
| ۲۴ | شاهد | ۲۰۱۵ | فوریه | ۲۱ | ۱۰۰ | ۱۱۰۶۱۲ | ۱۵۶۶۰/۴ | ۱۴/۲ |
| ۲۵ | نمونه | ۲۰۱۵ | فوریه | ۲۱ | ۱۰۰ | ۱۰۶۴۹۶ | ۲۱۳۰/۹ | ۲ |
| ۲۶ | شاهد | ۲۰۱۶ | می | ۱۰ | ۱۷ | ۱۸۸۰۴ | ۲۴۷۵ | ۱۳/۲ |
| ۲۷ | شاهد | ۲۰۱۷ | فوریه | ۲ | ۳۷ | ۴۰۹۲۶/۳ | ۲۳۱۰ | ۵/۶ |
| ۲۸ | نمونه | ۲۰۱۷ | فوریه | ۲ | ۳۷ | ۳۹۴۰۳/۶ | ۱۶۴۸ | ۴/۲ |
| ۲۹ | شاهد | ۲۰۱۷ | فوریه | ۱۳ | ۷۴/۲ | ۸۲۰۷۴ | ۲۵۵۰ | ۳/۱ |
| ۳۰ | نمونه | ۲۰۱۷ | فوریه | ۱۳ | ۷۴/۲ | ۷۹۰۲۰/۳ | ۱۸۲۳/۵ | ۲/۳ |
| ۳۱ | شاهد | ۲۰۱۷ | فوریه | ۱۵ | ۲۶ | ۲۸۷۵۹ | ۱۵۴۰ | ۵/۳ |
| ۳۲ | نمونه | ۲۰۱۷ | فوریه | ۱۵ | ۲۶ | ۲۷۶۸۹ | ۱۰۹۸/۶ | ۴ |
| ۳۳ | شاهد | ۲۰۱۷ | فوریه | ۱۷ | ۹۹ | ۱۰۹۵۰۵/۶ | ۱۸۱۳۵ | ۱۶/۵ |
| ۳۴ | نمونه | ۲۰۱۷ | فوریه | ۱۷ | ۹۹ | ۱۰۵۴۳۱ | ۱۲۹۵۳/۱ | ۱۲/۳ |

نتایج و بحث

روندیابی جریان چند جهته در مدل لاپسوس برای ۳۴ واقعه منجر به رواناب طی سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۸ را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج حاصل روندیابی جریان چند جهته به وسیله مدل لاپسوس با بالاترین رقم ۹۵/۷ درصد و کمترین رقم ۶۷/۶ درصد قادر به برآورد حجم کل جریان خروجی طی سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۸ میلادی در حوضه زوجی کاخک است. این نتایج توانایی بالای توزیع جریان چند جهته را در شبیه‌سازی جریان سطحی حوضه‌های آبخیز نشان می‌دهد.

پس از ورود داده‌های لازم برای اجرای مدل لاپسوس نتایج حاصل از روندیابی جریان به وسیله مدل به صورت لایه با فرمت اسکی است که برای مشاهده مقادیر لازم است تا در محیط GIS وارد شده و حجم کل جریان خروجی روندیابی شده از مقدار پیکسل خروجی حوضه قرائت شود. شکل ۵، نقشه نمونه خروجی مدل لاپسوس برای روندیابی جریان بر اساس الگوریتم توزیع جریان چند جهته را برای دو زیرحوضه نمونه و شاهد برای واقعه نوامبر ۲۰۱۴ نشان می‌دهد. جدول ۲ نیز مقادیر حجم جریان خروجی بر اساس



شکل ۵- نمونه خروجی مدل لاپسوس جهت روندیابی جریان بر اساس الگوریتم توزیع جریان چند جهته برای دو زیرحوضه نمونه و شاهد برای واقعه نوامبر ۲۰۱۴

نتیجه‌گیری

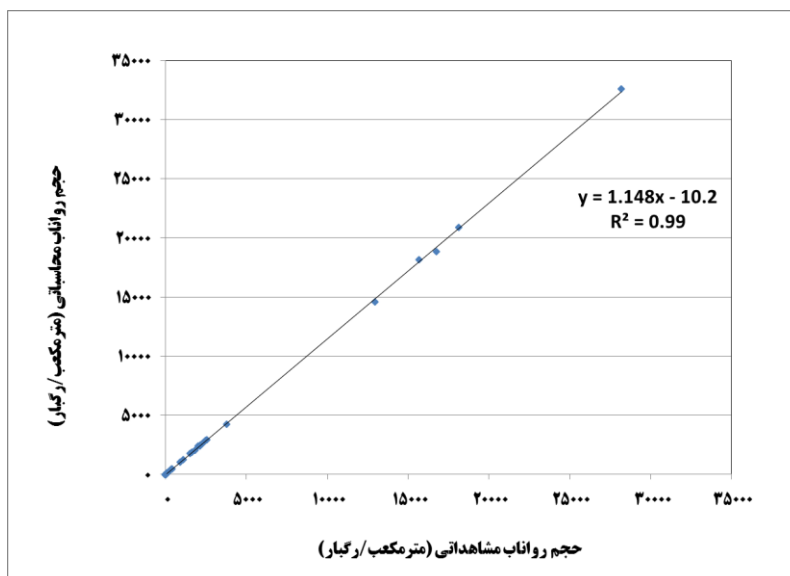
نتایج این تحقیق نشان داد، مدل لاپسوس قابلیت خوبی در روندیابی جریان با استفاده از روندیابی جریان چند جهته دارد. این قابلیت مدل به وسیله تعریف مقدار عامل هم‌گرایی در مدل فراهم شده است. به طور کلی، عامل هم‌گرایی رابطه بین شیب و توزیع جریان را نشان می‌دهد (Pilesjö و همکاران، ۱۹۹۸). روندیابی جریان چند جهته ویژگی‌های واگرایی جریان را روی سطوح محدب و ویژگی‌های هم‌گرایی جریان را روی سطوح مقعر شبیه‌سازی می‌کند. بنابراین، این

اعتبارسنجی مقادیر روندیابی شده جریان برای وقایع داده شده به مدل قابلیت بالای مدل لاپسوس را در روندیابی جریان سطحی بر اساس الگوریتم توزیع جریان چند جهته نشان داد. مقدار ضریب تبیین ۰/۹۹ و RMSE نرمال شده برابر با ۳/۹ درصد محاسبه شد که نشان دهنده دقت بالای روندیابی جریان چند جهته با استفاده از مدل لاپسوس می‌باشد. شکل ۶، مقدار ضریب تبیین مقادیر روندیابی شده به روش جریان چند جهته را نسبت به مقادیر مشاهداتی نشان می‌دهد.

نوع شبیه‌سازی شرایط واقعی تری از سطوح طبیعی را
در نظر می‌گیرد (Quinn و همکاران ۱۹۹۱؛ Schoorl و همکاران، ۲۰۰۰).

جدول ۲- مقادیر حجم جریان خروجی بر اساس روندیابی جریان چند جهته در مدل لاپسوس (۲۰۰۸-۲۰۱۸)

| واقعۀ | فلوم | سال | ماه | روز | حجم کل دبی خروجی مشاهده‌ای (متر مکعب) | حجم کل دبی خروجی مدل لاپسوس (متر مکعب) | نسبت جریان سطحی برآوردی مدل به مشاهده‌ای (درصد) |
|-------|-------|------|--------|-----|---|--|---|
| ۱ | شاهد | ۲۰۰۹ | مارس | ۳۱ | ۲۴۵/۲ | ۲۵۸/۲ | ۸۶ |
| ۲ | شاهد | ۲۰۱۰ | فوریه | ۲۱ | ۱/۳ | ۱/۴ | ۹۲/۹ |
| ۳ | شاهد | ۲۰۱۰ | فوریه | ۲۱ | ۴/۳ | ۵/۴ | ۷۹/۶ |
| ۴ | شاهد | ۲۰۱۰ | فوریه | ۲۵ | ۷/۳ | ۸/۱ | ۹۰/۱ |
| ۵ | شاهد | ۲۰۱۰ | فوریه | ۲۶ | ۱/۳ | ۱/۶ | ۸۱/۳ |
| ۶ | شاهد | ۲۰۱۰ | فوریه | ۲۷ | ۲/۲ | ۲/۳ | ۹۵/۷ |
| ۷ | شاهد | ۲۰۱۰ | مارس | ۲ | ۶/۸ | ۷/۳ | ۹۳/۲ |
| ۸ | شاهد | ۲۰۱۰ | آوریل | ۱۱ | ۱/۸ | ۲/۳ | ۷۸/۳ |
| ۹ | شاهد | ۲۰۱۰ | آوریل | ۱۷ | ۱/۲ | ۱/۳ | ۹۲/۳ |
| ۱۰ | شاهد | ۲۰۱۰ | آوریل | ۲۹ | ۱ | ۱/۲ | ۸۳/۳ |
| ۱۱ | شاهد | ۲۰۱۰ | می | ۳ | ۲/۲ | ۲/۴ | ۹۱/۷ |
| ۱۲ | شاهد | ۲۰۱۰ | می | ۶ | ۲/۵ | ۳/۷ | ۶۷/۶ |
| ۱۳ | شاهد | ۲۰۱۲ | فوریه | ۲ | ۲۸۱۹۷ | ۳۲۵۹۴/۱ | ۸۶/۵ |
| ۱۴ | نمونه | ۲۰۱۲ | فوریه | ۲ | ۱۶۷۶۰/۴ | ۱۸۸۴۵/۴ | ۸۸/۹ |
| ۱۵ | شاهد | ۲۰۱۲ | فوریه | ۲۶ | ۳۷۰۸/۴ | ۴۲۵۸/۲ | ۸۸/۸ |
| ۱۶ | نمونه | ۲۰۱۲ | فوریه | ۲۶ | ۹۱۹/۵ | ۱۰۱۷/۱ | ۹۰/۴ |
| ۱۷ | شاهد | ۲۰۱۲ | آوریل | ۱۷ | ۲۱۸۷/۷ | ۲۵۲۱/۲ | ۸۶/۸ |
| ۱۸ | نمونه | ۲۰۱۲ | آوریل | ۱۷ | ۶۹ | ۷۷/۱ | ۸۹/۵ |
| ۱۹ | شاهد | ۲۰۱۳ | فوریه | ۱ | ۲۰۱۴/۶ | ۲۴۳۱/۹ | ۸۲/۸ |
| ۲۰ | نمونه | ۲۰۱۳ | فوریه | ۱ | ۱۱۰/۶ | ۱۲۶/۲ | ۸۷/۶ |
| ۲۱ | شاهد | ۲۰۱۴ | مارس | ۱۶ | ۸۸/۸ | ۱۰۱/۹ | ۸۷/۱ |
| ۲۲ | شاهد | ۲۰۱۴ | نوامبر | ۴ | ۴۰۰ | ۴۴۰/۵ | ۹۰/۸ |
| ۲۳ | نمونه | ۲۰۱۴ | نوامبر | ۵ | ۳۶۸ | ۴۶۵ | ۷۹/۱ |
| ۲۴ | شاهد | ۲۰۱۵ | فوریه | ۲۱ | ۱۵۶۶۰/۴ | ۱۸۱۴۱/۷ | ۸۶/۳ |
| ۲۵ | نمونه | ۲۰۱۵ | فوریه | ۲۱ | ۲۱۳۰/۹ | ۲۳۹۷/۷ | ۸۸/۹ |
| ۲۶ | شاهد | ۲۰۱۶ | می | ۱۰ | ۱۸۸۰/۴ | ۲۸۶۷ | ۸۶/۳ |
| ۲۷ | شاهد | ۲۰۱۷ | فوریه | ۲ | ۴۰۹۲۶/۳ | ۲۶۴۷ | ۸۷/۳ |
| ۲۸ | نمونه | ۲۰۱۷ | فوریه | ۲ | ۳۹۴۰۳/۶ | ۱۸۶۳ | ۸۸/۵ |
| ۲۹ | شاهد | ۲۰۱۷ | فوریه | ۱۳ | ۸۲۰۷۴ | ۲۹۳۸/۷ | ۸۶/۸ |
| ۳۰ | نمونه | ۲۰۱۷ | فوریه | ۱۳ | ۷۹۰۲۰/۳ | ۲۰۴۵/۹ | ۸۹/۱ |
| ۳۱ | شاهد | ۲۰۱۷ | فوریه | ۱۵ | ۲۸۷۵۹ | ۱۷۶۰/۵ | ۸۷/۵ |
| ۳۲ | نمونه | ۲۰۱۷ | فوریه | ۱۵ | ۲۷۶۸۹ | ۱۲۴۶/۸ | ۸۸/۱ |
| ۳۳ | شاهد | ۲۰۱۷ | فوریه | ۱۷ | ۱۰۹۵۰۵/۶ | ۲۰۸۶۹/۳ | ۸۶/۹ |
| ۳۴ | نمونه | ۲۰۱۷ | فوریه | ۱۷ | ۱۰۵۴۳۱ | ۱۴۵۹۸ | ۸۸/۷ |



شکل ۶- رابطه بین مقادیر روندیابی شده جریان سطحی به روش روندیابی جریان چند جهته نسبت به مقادیر مشاهداتی

واقعی تری از سطوح طبیعی را در نظر می‌گیرد. اما Tarboton (۱۹۹۷) بیان داشته که کاربرد توزیع جریان تک جهته به دلیل سهولت در انجام محاسبات معمول تر و راحت تر است. با این وجود، این مدل دارای توانایی لازم برای شبیه‌سازی جریان در مناطق مسطح و دارای جریان‌های واگرا و موازی نیست (Qin و همکاران، ۲۰۰۷). در مقایسه با روش روندیابی چند جهته، روندیابی جریان تک جهته با در نظر گرفتن تنها یک خروجی برای هر پیکسل، سبب اعمال غیرمنطقی و ساده‌سازی بیش از حد در روندیابی جریان می‌شود (Pilesjö و همکاران، ۱۹۹۸). Pilesjö و Hasan (۲۰۱۴) در مطالعه خود نشان دادند، الگوریتم توزیع جریان چند جهته به دلیل توانایی در مسیریابی جریان سطحی، یک بستر مناسب برای شبیه‌سازی دینامیک جریان سطحی می‌باشد.

با استفاده از مدل لاپسوس می‌توان روندیابی جریان سطحی را برای سطوح پرشیب و هم‌گرا و سطوح کم شیب و واگرا و تعدب و تعقر سطوح طبیعی محاسبه کرد. در ادامه تحقیقات صورت گرفته بر روی مدل لاپسوس، می‌توان عملکرد روندیابی جریان را با روش‌های چند جهته و تک جهته مورد مقایسه و ارزیابی قرار داد و نوع روش روندیابی را برای مدل بر اساس تغییرات مقدار عامل هم‌گرایی بررسی کرد. همچنین، در مورد تغییرات مکانی عامل هم‌گرایی و توزیعی نمودن آن در سطح حوضه تحقیقات جدیدی

روندیابی جریان سطحی در سطح حوضه‌ها به‌طور مستقیم تحت تاثیر توپوگرافی سطح قرار داشته، از آن تبعیت می‌کند. الگوریتم توزیع جریان چند جهته زمانی نتایج قابل قبول و نزدیک به واقعیت خواهد داشت که شرایط توپوگرافی سطحی در نظر گرفته شود.

نتایج این تحقیق نشان داد، مدل لاپسوس در حوزه‌های آبخیز که دارای شبکه زهکشی و یک خروجی مشخص هستند، روش روندیابی جریان چند جهته توانایی محاسبه حجم کل جریان خروجی از سطح حوضه‌ها را با دقت بالایی دارد. روندیابی جریان چند جهته با توانایی که تعریف مقدار عامل هم‌گرایی برای آن ایجاد می‌کند، می‌تواند شرایط توپوگرافی پیچیده‌تری از سطوح طبیعی را شبیه‌سازی کند (Buis و Veldkamp، ۲۰۰۸).

در این تحقیق، به‌منظور بررسی الگوریتم توزیع جریان چند جهته، مقدار یک عامل هم‌گرایی در نظر گرفته شد تا توزیع جریان به‌طور کامل بر اساس الگوریتم توزیع جریان چند جهته صورت گیرد.

Quinn و همکاران (۱۹۹۱) و Schoorl و همکاران (۲۰۰۰) در معرفی الگوریتم توزیع جریان چند جهته بیان داشته‌اند، روندیابی جریان چند جهته ویژگی‌های واگرایی جریان را روی سطوح محدب و ویژگی‌های هم‌گرایی جریان را روی سطوح مقعر شبیه‌سازی می‌کند. بنابراین، این نوع شبیه‌سازی شرایط

می‌تواند صورت گیرد.

محترم سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور
دفتر حوضه‌های معرف و زوجی و اداره کل منابع
طبیعی و آبخیزداری خراسان رضوی و شهرستان
گناباد قدردانی می‌شود.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از همکاری صمیمانه کارشناسان

منابع مورد استفاده

1. Baartman, J.E.M., W. Van Gorp, A.J.A.M. Temme and J.M. Schoorl. 2012. Modelling sediment dynamics due to hillslope–river interactions: incorporating fluvial behavior in landscape evolution model LAPSUS. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37: 923-935.
2. Buis, E., and A. Veldkamp. 2008. Modelling dynamic water redistribution patterns in arid catchments in the Negev Desert. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33(1): 107-122.
3. Claessens, L., A. Knapen, M.G. Kitutu, J. Poesen and J.A. Deckers. 2007. Modelling landslide hazard, soil redistribution and sediment yield of landslides on the Ugandan footslopes of Mount Elgon. *Geomorphology*, 90(1-2): 23-35.
4. Eshghizadeh, M. 2016. Vegetation cover impact on runoff generation and sediment yield by developing the LAPSUS Model. PhD Thesis, Yazd University, 125 pages.
5. Eshghizadeh, M., A. Talebi, M.T. Dastorani and H.R. Azimzadeh. 2016a. Effect of natural land covers on runoff and soil loss at the hill-slope scale. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 2(2): 125-134.
6. Eshghizadeh, M., A. Talebi, M.T. Dastoorani and H.R. Azimzade. 2016b. The use of LAPSUS model to estimate the runoff and sediment in the Kakhk paired catchment of Gonabad. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 3: 107–119.
7. Freeman, T.G. 1991. Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. *Computers and Geosciences*, 17(3): 413-422.
8. Gorp, W.V., A.J.A.M. Temme, J.E.M. Baartman and J.M. Schoorl. 2014. Landscape evolution modelling of naturally dammed rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39: 1587–1600.
9. Hasan, A., P. Pilesjö and A. Persson. 2011. Estimating surface flow over digital elevation models using a new improved form-based algorithm. *River Basin Management*, VI, 146: 201-211.
10. Holmgren, P. 1994. Multiple flow direction algorithms for runoff modelling in grid based elevation models: An empirical evaluation. *Hydrological Processes*, 8: 327-334.
11. Gholami Dashtaki, P., M. Goorani and A.R. Shokoohi. 2013. Performance of the routing algorithms for the simulation of flow in a channel network of the SCA parameters. 9th International River Engineering Conference, Shahid Chamran University, Ahwaz.
12. Gholami Dashtaki, P. and A.R. Shokoohi. 2013. Comparison of the flow routing algorithms in topographic indices extraction. 3rd National Conference on Comprehensive Resources Management, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari.
13. Keesstra, S.D., A.J.A.M. Temme, J.M. Schoorl and S.M. Visser. 2014. Evaluating the hydrological component of the new catchment-scale sediment delivery model LAPSUS-D. *Geomorphology*, 212: 97-107.
14. Lesschen, J.P., J.M. Schoorl and L.H. Cammeraat. 2009. Modelling runoff and erosion for a semi-arid catchment using a multi-scale approach based on hydrological connectivity. *Geomorphology*, 109: 174–183.
15. Qin, C.Z., A.X. Zhu, T. Pei, B. Li, C. Zhou and L. Yang. 2007. An adaptive approach to selecting a flow-partition exponent for a multiple-flow-direction algorithm. *International Journal of Geographical Information Science*, 33: 443-458.
16. Quinn, P., K. Beven, P. Chevallier and O. Planchon. 1991. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. *Hydrological Processes*, 5: 59-79.
17. Pilesjö, P. and A. Hasan. 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): 108-124.
18. Pilesjö, P., Q. Zhou and L. Harrie. 1998. Estimating flow distribution over digital elevation models using a form-based algorithm. *Geographic Information Science*, 4: 44-51.
19. Schoorl, J.M. 2002. Addressing the Multi-scale Lapsus of Landscape. PhD Thesis, Wageningen University, 172 pages.
20. Schoorl, J.M., M.P.W. Sonneveld and A. Veldkamp. 2000. Three-dimensional landscape process modelling: the effect of DEM resolution. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25: 1025-1034.
21. Schoorl, J.M. and A. Veldkamp. 2001. Linking land use and landscape process modelling: a case

- study for the Alora region (South Spain). *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 85: 281-292.
22. Shokoohi, A.R., M.B. Nahvi, M. Noee, A. Arian and Sh. Daneshvar. 2007. Application of flow tracing algorithms in flood control project planning. 7th International River Engineering Conference, Shahid Chamran University, Ahwaz.
 23. Talebi, A., M. Eshghizadeh, M.T. Dastorani and H.R. Azimzadeh. 2014. Effect of watershed management on surface runoff distribution by introducing the multiple flow direction algorithms. *Ecohydrology*, 1(2): 83-97.
 24. 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): 309-319.
 25. Temme, A.J.A.M., J.M. Schoorl and A. Veldkamp. 2006. Algorithm for dealing with depressions in dynamic landscape evolution models. *Computers and Geosciences*, 32: 452 - 461.
 26. Temme, A.J.A.M. and A. Veldkamp. 2009. Multi-process late quaternary landscape evolution modelling reveals lags in climate response over small spatial scales. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(4): 573-589.
 27. Wolock, D.M. and Jr.G.J. McCabe. 1995. Comparison of single and multiple flow direction algorithms for computing topographic parameters in TOPMODEL. *Water Resources Research*, 31(5): 1315-1324.