



سجش از دور

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران
Iranian Remote Sensing & GIS

سال سیزدهم، شماره اول، بهار ۱۴۰۰
Vol.13, No. 1, Spring 2021

۳۳-۵۴

مقاله پژوهشی

دقت الگوریتم‌های جریان و DEMهای استر (ASTER)، SRTM و نقشه‌های توپوگرافی ۱/۲۵۰۰۰ در استخراج بعد فراکتال شبکه زهکشی

مژده محمدی خشوئی^{۱*}، محمدرضا اختصاصی^۲، علی طالبی^۳، سید زین‌العابدین حسینی^۳

۱. دکتری آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه یزد

۲. استاد دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه یزد

۳. استادیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه یزد

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۱۰

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۴/۰۹

چکیده

اجرای موفقیت‌آمیز انواع مدل‌های در مقیاس منطقه‌ای به انتخاب نوع داده و الگوریتم مناسب بازمی‌گردد. این نکته، در کنار ممکن نبودن اندازه‌گیری تمامی اجزای طبیعت، منجر به شکل‌گیری تحولی بزرگ در شیوه درک پدیده‌ها شده است. در این شیوه، می‌توان هر جزء از طبیعت را به صورت یک عدد کمی هندسه فراکتال درآورد. در پژوهش حاضر، به منظور بررسی بعد فراکتال شبکه زهکشی روی سازندهای زمین‌شناسی حوضه دشت یزد- اردکان، هم‌زمان روی الگوریتم‌های جریان یک‌سویه و چندسویه و DEMهای SRTM و استر (ASTER) و نقشه‌های توپوگرافی ۱/۲۵۰۰۰ تمرکز شده است تا، در نهایت، مقادیر بعد فراکتال از نقشه شبکه زهکشی نزدیک به واقعیت زمینی استخراج شود. با مقایسه نتایج، کمترین اختلاف، در مقادیر طول و رتبه آبراهه، متعلق به نقشه‌های توپوگرافی ۱/۲۵۰۰۰ و بعد از آن، مدل رقومی استر و الگوریتم چندسویه است. هرچند الگوریتم چندسویه جزئیات بیشتری از شبکه زهکشی نشان می‌دهد؛ از نظر تعداد رتبه‌های آبراهه، به‌ویژه رتبه ۱، با نقشه واقعیت زمینی تفاوت دارد. بنابراین، با توجه به حساسیت بعد فراکتال به کوچک‌ترین تغییر در شبکه زهکشی، شبکه زهکشی نقشه‌های توپوگرافی با بیشترین انطباق با واقعیت زمینی انتخاب شد. میانگین بعد فراکتال ۱/۱۴۹ و ۱/۱۱۶ و ۱/۲۰۷، به ترتیب، نشان‌دهنده سازند آهک تفت، گرانیت و کهر است. در واقع، بین بعد فراکتال و حساسیت سازندهای زمین‌شناسی ارتباط معنی‌داری وجود دارد (سطح ۰.۹۹)؛ به نحوی که، با افزایش حساسیت سنگ‌شناسی و به تبع آن، تراکم زهکشی، عدد فراکتال افزایش می‌یابد. بنابراین، می‌توان ادعا کرد که تحلیل ابعاد فراکتال شبکه زهکشی روی سازندهای زمین‌شناسی بررسی سریع و دقیقی از فرسایش‌پذیری واحدها ارائه می‌کند.

کلیدواژه‌ها: مدل رقومی ارتفاع، شبکه زهکشی، الگوریتم جریان، بعد فراکتال.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه یزد. تلفن: ۰۹۳۵۷۹۶۹۹۶۲

۱- مقدمه

D ∞ (Costa- Cabral & Burges, 1994) DEMON
Orlandini & Tarboton, 1997) D ∞ -LTD و (Moretti, 2009)
۳. جهت جریان چندسویه کامل^۵،
شامل MD8^۶ (Quinn et al., 1991). روش‌های MD ∞
(Seibert & McGlynn, 2007) (محمدی، ۱۳۹۶).

هدف تمامی الگوریتم‌ها پیشنهاد روشی است که با
مدل واقعی انطباق بیشتری داشته باشد اما همیشه
شبکه‌های زهکشی‌ای که به‌طور اتوماتیک مشخص
می‌شوند مطابقت خوبی با نوع دستی از خود نشان
نمی‌دهند (Garcia & Camarasa, 1999). نتیجه
بررسی‌ها حاکی از این است که قابلیت الگوریتم‌های
استخراج شبکه‌های زهکشی، در مناطق کم‌شیب، ناتوان
و در مناطق پرشیب، با خطاهایی همراه است
(Poggio & Soille, 2011). ارزیابی تأثیر دو الگوریتم
روندیابی یک‌سویه و چندسویه در شبیه‌سازی رواناب
روزانه در مدل TOPPMODEL نشان داد که نوع
الگوریتم جریان مورد استفاده در محتوای رطوبتی خاک
تأثیر درخور توجهی دارد و چنانچه هدف از کاربرد مدل
TOPPMODEL شبیه‌سازی تغییرات مکانی
ویژگی‌های هیدرولوژیکی باشد، الگوریتم جریان
چندسویه مناسب‌تر از الگوریتم جریان یک‌سویه
است (Bhawan, 2001). در پژوهشی با استفاده از
مدل رقومی ارتفاع، مسیرهای حرکت جریان روی
دامنه پیش‌بینی شد. نتایج این بررسی نشان داد که
دقت پیش‌بینی‌های مدل‌های توزیعی با توجه به
صحت مسیرهای جریان برآوردی مشخص می‌شود
(Quinn et al., 1991) و خطاهای بزرگ در شبیه‌سازی

شبکه‌های زهکشی، علاوه بر هیدرولوژیست‌ها، از نظر
زمین‌شناسان و ژئومورفولوژیست‌ها و دیگر محققان
علوم محیطی اهمیت دارند. برای آماده کردن برنامه‌های
جامع آبخیزداری، لازم است وضعیت توپوگرافی،
فرسایشی و الگوهای زهکشی منطقه مورد مطالعه
شناسایی و ارزیابی شود. اما برآورد دقیق ویژگی‌های
کمی و کیفی شبکه‌های زهکشی از طریق عملیات
میدانی مستلزم صرف زمان و هزینه زیادی است؛ به
همین خاطر، بیشتر تحلیل‌ها براساس داده‌های
استخراجی از نقشه‌های توپوگرافی و تصاویر ماهواره‌ای
انجام می‌گیرد (رضائی‌مقدم و احمدی، ۱۳۸۵). در
مقیاس حوزه آبخیز، توپوگرافی عامل اصلی
کنترل‌کننده هیدرولوژی به حساب می‌آید و توزیع
مکانی عوامل گوناگون محیطی مانند آب‌وهوا،
شکل‌گیری خاک، الگوهای رطوبتی خاک و حتی تنوع
زیستی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. توپوگرافی منطقه را
می‌توان، با استفاده از مجموعه‌ای از مقادیر ارتفاعی،
مدل کرد. مدل‌های رقومی ارتفاع^۱، که حاصل
جمع‌آوری داده‌های ارتفاعی به روش‌های سنجش از دور
است، طی دهه‌های اخیر، کاربرد وسیعی در
ژئومورفولوژی و دیگر علوم محیطی داشته و به کمک
الگوریتم‌های رایانه‌ای، همچنان رو به توسعه است. در
سایه پیشرفت تکنولوژی محاسباتی، در دهه ۱۹۸۰ م،
از DEM برای استخراج و تجزیه و تحلیل عددی شبکه
زهکشی استفاده شد. سوابق مطالعاتی انجام‌گرفته
نشان‌دهنده این است که برای تولید اتوماتیک شبکه‌های
زهکشی، اغلب از DEM، نقشه‌های جهت جریان و
نقشه‌های تجمعی جریان استفاده می‌شود. برای تهیه این
پارامترها، الگوریتم‌های متعددی وجود دارد که در این
سه دسته کلی قرار می‌گیرند: ۱. جهت جریان یک‌سویه^۲،
شامل روش‌های D8^۳ (O'Callaghan and Mark, 1984)
و D8-LTD (Orlandini et al., 2003)؛ ۲. جهت جریان
چندسویه متوسط^۴، شامل روش‌های لی (Lea, 1992)،

1. Digital Elevation Model (DEM)
2. Single Flow Direction (SFD) or Single Neighbour Flow (Non Dispersive)
3. Steepest Decent Routing or Eight- Direction
4. Multiple Flow Direction (MFD) or Multiple Neighbour Flow (Moderately Dispersive Method)
5. Multiple Flow Direction (MFD) or Multiple Neighbour Flow (Fully Dispersive Method)
6. Multiple-D8

از DEMهای نوع استر و SRTM، نشان داد دقت دو نوع DEM برابر با نقشه‌های توپوگرافی ۱/۵۰۰۰۰ است و در مطالعه لاهار، DEMهای SRTM، با وجود درشتی بیشتر، دقت بیشتری دارد (Huggel et al., 2008). در دو حوزه آبخیز در کشور هند (Thomas et al., 2014) و سه حوزه آبخیز در ایران (آقاپاهر و همکاران، ۱۳۹۴)، مدل رقومی SRTM، صرف‌نظر از قدرت تفکیک کمتر در مقایسه با سنجنده استر، به نسبت نقشه‌های توپوگرافی ۱/۵۰۰۰۰ (مدل رقومی ارتفاع ۲۰ متری) دقت عمودی تقریباً مناسب‌تری دارد. همچنین، بررسی‌ها در شمال شرق تونس (Ouerghi et al., 2015)، شمال شرق مراکش (Lahsaini et al., 2018) و شهر نجران عربستان سعودی (Elkhrachy, 2018) نشان داد که داده‌های SRTM، در مقایسه با داده‌های استر، دقتی نزدیک‌تر به واقعیت زمینی دارند. اما بررسی DEMهای متفاوت، با استفاده از تحلیل پارامترهای مورفومتریک آبراهه در حوزه آبخیز سوپین‌آپر، نشان داد DEMهای مستخرج از نقشه‌های توپوگرافی ۱/۵۰۰۰۰ و استر دقتی بیشتر از مدل رقومی SRTM، در استخراج شبکه آبراهه، دارند (Das et al., 2016). کیفیت مدل رقومی استر در ارتباط مستقیم با شیب زمین است (Sefercik, 2012) و برای افزایش دقت مطالعات مدیریت و حفاظت از منابع آب و خاک، کاهش زمان و هزینه کاربرد این داده ارتفاعی پیشنهاد می‌شود (مروج و همکاران، ۱۳۹۴). نتایج حاصل از مقایسه مدل‌های رقومی SRTM و استر حاکی از این است که این مدل‌ها، در استخراج الگوی زهکشی دامنه‌ها در نواحی فشرده جنگلی جنوب بهشهر، دقت مناسب و بالایی ندارند (شریفی‌کیا و همکاران، ۱۳۹۷). با اینکه در تولید و تحلیل DEM پیشرفت‌هایی صورت گرفته است؛ انتخاب نوع داده

هیدرولوژیکی اغلب به دلیل تخمین اشتباه ارتفاع عوارض و شیب اتفاق می‌افتد (Thompson et al., 2001). روندیابی رودخانه‌های فصلی حوضه کارون الگوریتم D8 را به دلیل سادگی و پراکندگی نداشتن جریان، روشی مناسب در تعیین امتداد جریان نشان داد (حیدری، ۱۳۸۸) و در پیمایش جریان حوزه آبخیز یولو در کشور تایوان، ویژگی‌های پراکندگی جریان، با استفاده از الگوریتم MD8، واضح‌تر از الگوریتم D8 مشاهده شد (Huang & Lee, 2016). مقایسه نتایج بررسی الگوریتم جریان چندسویه و یک‌سویه در حوضه کاخک نشان‌دهنده برتری الگوریتم چندسویه است؛ چرا که این الگوریتم تحت تأثیر مستقیم خصوصیات فیزیکی حوضه‌ها، به‌ویژه توپوگرافی سطحی و تحدب و تقعر دامنه‌ها، قرار دارد و از آن تبعیت می‌کند (طالبی و همکاران، ۱۳۹۳). در گذشته، مطالعات روی الگوریتم‌های رایانه‌ای متمرکز بوده ولی، در سال‌های اخیر، بیشتر به DEMها پرداخته شده است. منابع تولید DEM تنوع بسیاری دارد و دقت‌های متفاوتی را از چندصد متر تا ۰.۵ متر، دربر می‌گیرد. هرچند به‌نظر می‌رسد درستی و دقت تجزیه و تحلیل‌های مبتنی بر DEMها تا حد زیادی به قدرت تفکیک DEMهای اولیه بازمی‌گردد؛ بنا به اظهار نظر بسیاری از پژوهشگران، نمی‌توان پذیرفت DEMهای دارای ابعاد سلولی کوچک‌تر همیشه نتایج رضایت‌بخش‌تری دارند (Li & Wong, 2010). ارزیابی مدل‌های رقومی SRTM، LIDAR، استر^۱ و نقشه‌های توپوگرافی به‌دست‌آمده از برداشت‌های زمینی بر عملکرد مدل‌های یک بعدی HEC-RAS و دوبعدی LISFLOOD در رودخانه جوهور، واقع در کشور مالزی، نشان داد کاربرد مدل‌های رقومی ارتفاع متفاوت تأثیر بسیار مهمی در خروجی مدل‌های هیدرولیکی دارد؛ به طوری که اثر منبع تهیه DEM تأثیری به‌مراتب بیشتر از توان تفکیک DEM در پارامترهای هیدرولیکی شبیه‌سازی شده دارد (Ali et al., 2015). مدل‌سازی فرایند لاهار، با استفاده

1. ASTER

جریان یک‌سویه D8 و چندسویه MD8 و DEM‌های SRTM و استر و نقشه‌های توپوگرافی ۱/۲۵۰۰۰ تمرکز شده است تا، در نهایت، مقادیر بعد فراکتال از نقشه شبکه زهکشی نزدیک به واقعیت زمینی استخراج شود.

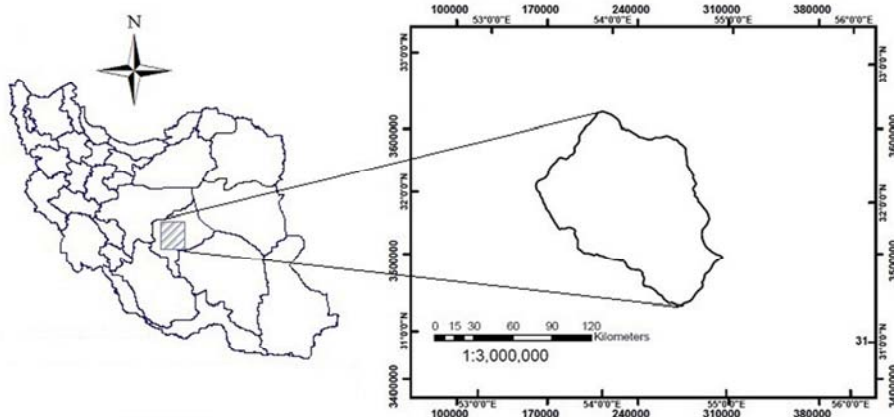
۲- موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز دشت یزد- اردکان در مختصات جغرافیایی ۴۸° ۳۱' تا ۳۲° ۱۳' عرض شمالی و طول شرقی ۵۷° ۵۲' تا ۵۴° ۵۹' فلات مرکزی ایران گسترده شده است. این حوضه یکی از مهم‌ترین حوضه‌های استان یزد، از دیدگاه منابع طبیعی، به‌شمار می‌رود. تراکم پوشش گیاهی آن از ۰ تا ۲۰٪ متغیر است و بیش از ۴۰٪ مساحت دشت را اراضی لخت و بدون پوشش گیاهی، با تراکم کمتر از ۲٪، تشکیل می‌دهد. این منطقه، به‌دلیل قرارداشتن زیر مرکز فشار زیاد جنب استوایی، دارای بارندگی کم و نوسانات درجه حرارت زیاد است. میزان بارش منطقه، کمتر از ۶۵ میلی‌متر در حوالی کویر سیاه‌کوه تا بیش از ۲۵۰ میلی‌متر در ارتفاعات شیرکوه، متفاوت است. در حوضه مورد مطالعه، آثار قدیمی‌ترین واحدهای زمین‌شناسی مربوط به پرکامبرین تا جدیدترین آن، یعنی پادگانه‌های آبرفتی و نهشته‌های ماسه‌بادی، به چشم می‌خورد. قدیمی‌ترین سازند موجود در منطقه به‌صورت سنگ‌های دگرگونی متشکل از فیلیت، شیل و شیست سبز و سیاه سازند کهر مربوط به پرکامبرین است که بیشتر در جنوب‌غرب یزد مشاهده می‌شود. گرانیت تا گرانودیوریت شیرکوه، مربوط به دوره ژوراسیک، بخش وسیعی از مناطق کوهستانی حوضه را شامل می‌شود. دوره کرتاسه، با رخساره آهکی مربوط به سازند غیررسمی آهک تفت، نیز محدوده وسیعی از دامنه‌های شمالی جبال شیرکوه، اغلب ارتفاعات ۱۶۰۰ تا ۴۰۰۰ متری، را دربر می‌گیرد. این رخساره، پس از گرانیت شیرکوه، بخش وسیعی از مناطق کوهستانی جنوب و جنوب‌شرق حوضه را دربر گرفته است (محمدی، ۱۳۹۶).

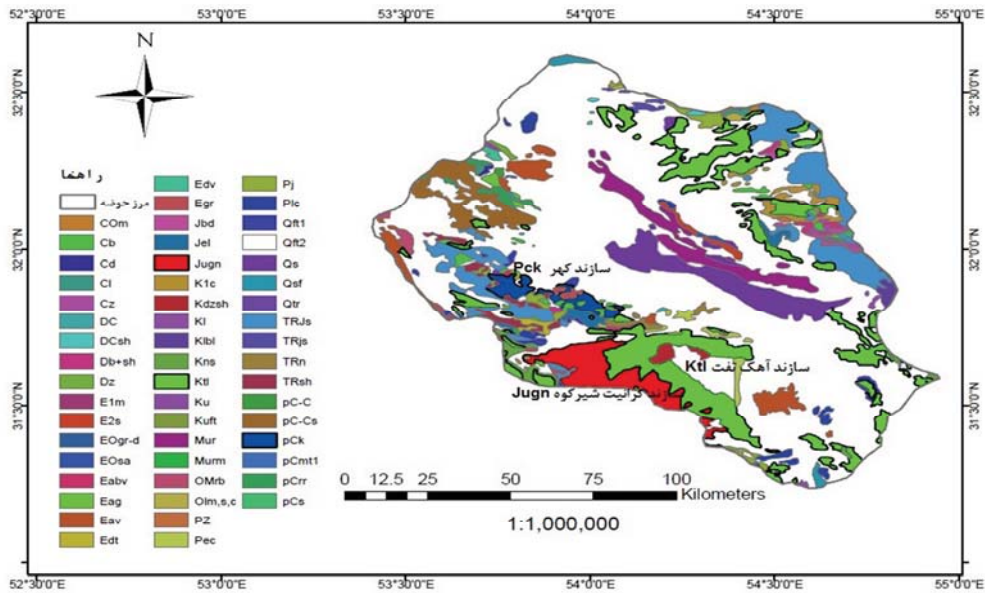
مناسب برای اهداف خاص، دسترسی به داده‌های باکیفیت در مقیاس منطقه‌ای و خطاهای DEM از جمله چالش‌های اصلی در مدل‌سازی فرایندهای طبیعی شمرده می‌شوند. علاوه‌براین، بسیاری از پدیده‌های طبیعی دارای متغیرهای فراوانی‌اند که برقراری روابط بین آنها، با استفاده از روش‌های معمول ریاضی، مشکل است. این نکته، در کنار نبود امکان اندازه‌گیری تمامی اجزای طبیعت، منجر به ایجاد تحولی بزرگ در شیوه درک و تبیین پدیده‌ها شد. در این شیوه، از طریق هندسه فراکتال^۱ و طبق این نظریه که بسیاری از پدیده‌های جهان طبیعت، در عین بی‌نظمی، دارای نظم‌اند، می‌توان هر جزء از طبیعت را به‌صورت یک عدد کمی هندسه فراکتال درآورد. پدیده‌های ژئوفیزیکی مانند شبکه‌های زهکشی ساختارهای درخت‌مانند فراکتالی هستند که روابط توانی بسیاری بین اجزای ژئومورفیک آنها برقرار است (Pelletier, 2007). درواقع، هندسه فراکتال (Mandelbrot, 1983)، یا همان زبان ریاضی طبیعت، ابزاری کمی برای بررسی ژئومورفولوژی شبکه‌های زهکشی و مدل‌سازی بسیاری از پدیده‌های پیچیده طبیعی است (خسروی و همکاران، ۱۳۹۵؛ محمدی، ۱۳۹۶؛ محمدی و همکاران، ۱۳۹۸) (Hui & Changxing, 2017; Kusák, 2014; Khanbabaee et al., 2013). به‌منظور بررسی ژئومورفولوژی شبکه‌های زهکشی، در پژوهش حاضر، از مدل‌های رقومی استر و SRTM استفاده شده است. از مهم‌ترین دلایل استفاده گسترده از این DEM‌ها دسترسی رایگان و پوشش وسیع آنهاست. بنابراین، ارزیابی صحت این داده‌ها برای کاربرد نتایج آنها در مدل‌سازی شبکه‌های زهکشی اهمیت فراوانی دارد. اما، در بیشتر مطالعات برآورد بعد فراکتال شبکه زهکشی و مدل‌سازی حوضه، خروجی‌های به‌دست‌آمده از نرم‌افزارها بدون توجه به بررسی میزان مطابقت آنها با نقشه واقعیت زمینی به‌کار می‌رود. از این‌رو، در پژوهش حاضر، به‌منظور بررسی بعد فراکتال شبکه زهکشی روی سازندهای زمین‌شناسی در حوضه دشت یزد- اردکان، هم‌زمان روی الگوریتم‌های

1. Fractal Geometry

دقت الگوریتم‌های جریان و DEMهای استر (ASTER)، SRTM و ...



شکل ۱. موقعیت کشوری و استانی محدوده مطالعاتی- حوزه آبخیز دشت یزد- اردکان



شکل ۲. پراکنش سازندهای زمین‌شناسی حوزه آبخیز دشت یزد- اردکان

۳- مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر از پنج بخش اصلی تشکیل شده است.

۳-۱- جمع‌آوری نقشه و داده‌های مورد نیاز

در این بخش، نقشه‌های توپوگرافی رقومی با مقیاس ۱/۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور، به تعداد نه شیت، واقع در چهار بلوک نائین (بلوک ۶۹)، اردکان (بلوک ۷۰)، آباده (بلوک ۷۹) و یزد (بلوک ۸۰) و نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰ از

سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور تهیه شد. همچنین، در پژوهش حاضر، از داده‌های رقومی ارتفاع استر و SRTM، به دلیل دسترسی آسان و رایگان، استفاده شد؛ چرا که سوابق مطالعاتی انجام‌شده این دو داده رقومی را برای بررسی‌های کمی شبکه زهکشی و مطالعات ژئومورفولوژی، مناسب نشان دادند (Smith & Pain, 2009). از میان سازندهای زمین‌شناسی حوزه دشت یزد- اردکان، سه سازند زمین‌شناسی کهر،

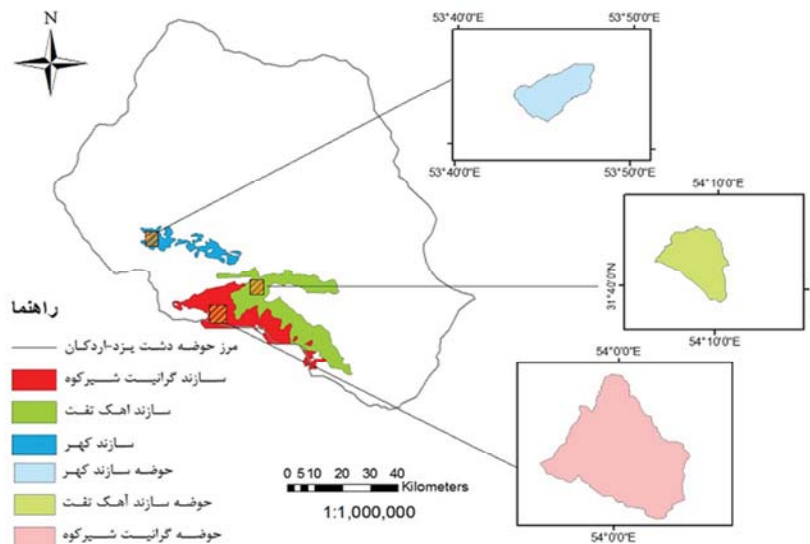
۳-۳- مسیریابی جریان روی مدل رقومی ارتفاع

به منظور استخراج شبکه زهکشی از مدل های رقومی ارتفاع، دو الگوریتم جریان یک سوئیچ D8 و جریان چند سوئیچ MD8 به کار گرفته شد. الگوریتم D8، به دلیل سرعت بالای محاسبات و تطبیق بهتر با مدل های رقومی ارتفاع، اغلب برای استخراج شبکه های زهکشی استفاده می شود (Chen et al., 2012). محاسبه شبکه زهکشی، با استفاده از الگوریتم های جریان یک سوئیچ و چند سوئیچ، در محیط نرم افزار الیوس^۱ انجام شد. این نرم افزار دارای امکانات منحصربه فردی است که می توان آن را بهترین نرم افزار متن باز^۲، از سری نرم افزار های GIS، برشمرد. نرم افزار مورد اشاره، با رعایت استانداردهای سختگیرانه در تحلیل های مبتنی بر داده ها و لایه های رستری، در مقایسه با نرم افزار ArcGIS، توانایی و دقت عمل بیشتری در محاسبه توزیع جریان با الگوریتم های یک سوئیچ و چند سوئیچ دارد. روندیابی

گرانیت شیرکوه و آهک تفت انتخاب شد. انتخاب این سه سازند، به دلیل گستردگی مکانی و پراکنده نبودن آنهاست که این نکته امکان نمونه برداری تصادفی را در سطحی وسیع و همگن، مقدور می کند. به همین منظور، مسیریابی جریان و بررسی کمی شبکه های زهکشی در سه زیرحوضه انتخابی حوضه دشت یزد- اردکان، که به ترتیب روی این سه سازند زمین شناسی قرار گرفته اند، انجام شد.

۳-۲- تصحیح مدل رقومی ارتفاع

پیش از روندیابی، باید پیش پردازشی روی مدل رقومی استر و SRTM انجام بشود. این کار به منظور حذف خطاهای موجود، مانند چاله ها و گودال های غیرطبیعی، است که طی محاسبات رستری به وجود می آید. عملیات تصحیح مدل رقومی ارتفاع، از طریق پر کردن چاله ها و گودال ها، با دستور Fill Sink انجام شد (محمدی، ۱۳۹۶).



شکل ۳. موقعیت حوضه های انتخابی روی سه سازند زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

1. Integrated Land and Water Information System (ILWIS)
2. Open Source

اصلی N، S، W، E و چهار جهت فرعی NE، NW، SE، SW را می‌پذیرد. به عبارت بهتر، الگوریتم مزبور جریان را در جهت‌هایی هدایت می‌کند که مضر بی از ۴۵ درجه باشند (محمدی، ۱۳۹۶).

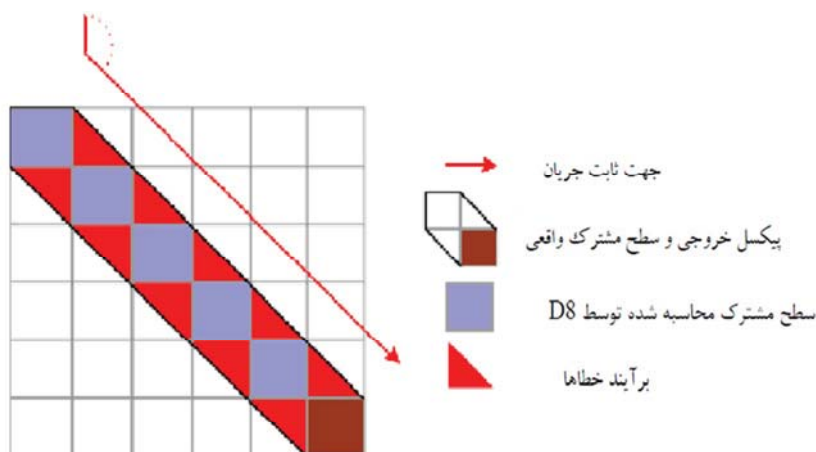
۳-۳-۲- الگوریتم جریان چندسویه MD8

این الگوریتم برای رفع محدودیت روش D8 مطرح شده است. در روش MD8، جریان به تمامی سلول‌های دارای ارتفاع کمتر از سلول مرکزی جریان می‌یابد. سهم هر سلول با توجه به میزان شیب آن مشخص می‌شود و شیب تمامی سلول‌های پایین دست محاسبه می‌شود و در تعیین امتداد جریان تأثیرگذار است. در روش D8، اختلاف تراز ناچیز بین دو سلول همسایه تأثیر پررنگی در یکی از دو سلول، که تمامی جریان به آن وارد شده است، می‌گذارد. اما استفاده از روش MD8 تفاوت تراز تأثیرگذاری کمتری دارد زیرا هر دو سلول سهم یکسانی از سطح انباشتگی جریان دارند. در عین حال، اشکال روش MD8 این است که جریان یک سلول به تمامی سلول‌های پایین دست جاری می‌شود و در نتیجه، زاویه پراکندگی جریان بسیار وسیع نیست. در این روش، سهم هر پیکسل از جریان براساس تابع وزن آن مشخص می‌شود (Quinn et al., 1991).

جریان سطحی براساس الگوریتم جریان چندسویه برای محیط GIS در نرم‌افزار الویس براساس عملیات همسایگی و ربطی تعریف و اجرا شد. در عملیات همسایگی، محاسبات هر پیکسل باید با توجه به همسایگانش انجام گیرد. این عملیات در پنجره‌ای ۳×۳ انجام می‌شود. در این پنجره، هر پیکسل یک شماره یا کد می‌گیرد و شماره‌گذاری از گوشه بالای سمت چپ پنجره آغاز می‌شود که پیکسل مرکزی است (طالبی و همکاران، ۱۳۹۳).

۳-۳-۱- الگوریتم جریان یکسویه D8

الگوریتم جریان یکسویه جریان را از هر سلول، فقط به یکی از هشت سلول همسایه، که دارای میزان شیب بیشتری است، هدایت می‌کند (O'Callaghan & Mark, 1984). روش D8 سریع‌ترین و ساده‌ترین روشی است که تا کنون در مورد انواع گوناگون مدل‌های رقومی ارتفاع به کار رفته است. این الگوریتم، به رغم همه ایرادهای ذاتی‌اش، به منزله الگوریتم ردیابی جریان سطحی، در اغلب بسته‌های نرم‌افزاری استفاده می‌شود. در این روش محاسبه، جهت جریان تابع همسایه‌هاست و جریان هر سلول به یکی از هشت سلول مجاور خود می‌ریزد و یا آنها را تخلیه می‌کند. الگوریتم D8 چهار جهت



شکل ۴. خطای محاسبه سطح مشترک در الگوریتم D8

منبع: حیدری، ۱۳۸۸

تراکم زهکشی، رتبه آبراهه و میزان جابه‌جایی آبراهه‌ها با نقشه واقعیت زمینی حاصل از گوگل‌ارث مقایسه شد. به همین منظور، مقایسه در نه پلات ۱×۱ کیلومترمربعی در نظر گرفته شده روی شبکه‌های زهکشی به‌دست‌آمده انجام شد. در نظر گرفتن مقیاس پلات به این دلیل است که ارزیابی‌های بعدی مرتبط با شبکه آبراهه‌ای در سطح پلات صورت گرفت.

۳-۵- استخراج بعد فراکتال شبکه زهکشی منتخب

مقادیر بعد فراکتال در ۳۳ پلات ۱×۱ کیلومترمربعی سه سازند زمین‌شناسی کهر، گرانیب شیرکوه و آهک تفت به‌دست آمد. انتخاب اندازه پلات ۱×۱ کیلومترمربعی به این دلیل بود که بشود، با توجه به وسعت سازندهای زمین‌شناسی در منطقه مورد مطالعه، میانگین دقیق‌تری از بعد فراکتال شبکه زهکشی به‌دست داد زیرا در اندازه‌های بیشتر، امکان حذف سازند زمین‌شناسی از روند مطالعاتی و انجام‌نشدن بررسی دقیق شبکه زهکشی وجود داشت. همچنین، در پلات‌های با اندازه کمتر از ۱×۱ کیلومترمربعی، امکان بررسی تمامی درجات آبراهه‌ها وجود نداشت و شکل کاملی از یک شبکه آبراهه حاصل نمی‌شد. با توجه به اینکه در مطالعه مورد اشاره سطح پلات ۱×۱ در نظر گرفته شده است، مقدار مجموع طول کل آبراهه‌ها همان تراکم زهکشی محسوب می‌شود. در هر سازند

هولمگرن^۱ (۱۹۹۴) رابطه‌ای تجربی برای سهم سلول‌های پایین دست سلول مرکزی، براساس میزان شیب، پیشنهاد کرد (رابطه (۱)).

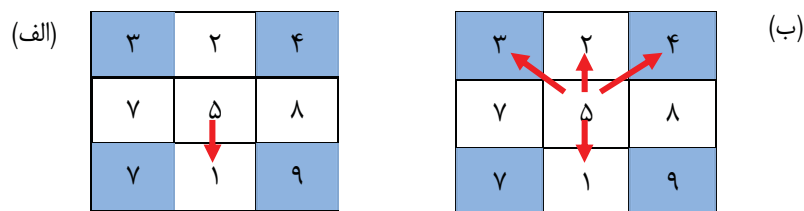
رابطه (۱)

$$F_i = \tan(\beta_i)^x / \sum_{j=1}^n \tan(\beta_j)^x \quad \tan(\beta) > 0$$

i و z جهت‌های جریان به سلول‌های همسایه (۱، ۲، ...، ۸) و F_i نسبت جریان در جهت i و $\tan(\beta_i)$ میزان شیب بین سلول مرکزی و سلول واقع در جهت i است. X توان رابطه، فاکتور همگرایی است و ویژگی همگرایی و واگرایی جریان را تعریف می‌کند. با تغییر آن از $0 \rightarrow \infty$ ، الگوریتم تعیین جهت جریان از MD8 به D8 تغییر می‌کند. هنگامی که این فاکتور برابر با ۱ باشد، توزیع جریان براساس الگوریتم جریان چندسویه خواهد بود اما، اگر مقدار این فاکتور به سمت بی نهایت میل کند و از ۱۰ فراتر باشد، توزیع جریان براساس الگوریتم جریان یک‌سویه محاسبه می‌شود. به‌طور کلی، فاکتور همگرایی رابطه بین شیب و توزیع جریان را نشان می‌دهد (Freeman, 1991; Holmgren, 1994).

۳-۴- مقایسه شبکه‌های زهکشی مستخرج از DEM

نقشه‌های خروجی به‌دست‌آمده از مدل‌های رقومی و الگوریتم‌های رایانه‌ای (جریان یک‌سویه و چندسویه) و نقشه‌های شبکه آبراهه‌ای استخراج‌شده از نقشه‌های توپوگرافی ۱/۲۵۰۰۰ از لحاظ طول آبراهه،



شکل ۵. توزیع جریان یک‌سویه (SFD) (الف)؛ توزیع جریان چندسویه (MFD) (ب)

زمین‌شناسی، بعد فراکتال به روش شمارش جعبه‌ای^۱ با استفاده از نرم‌افزار Fractalyse محاسبه و با استفاده از روش ترسیم (فخار ایزدی و همکاران، ۱۳۹۴)، تعداد پلات مورد نیاز در هر سازند مشخص شد؛ به این ترتیب که ابتدا، مقدار میانگین بعد فراکتال دو پلات محاسبه می‌شود و این روند میانگین دوتایی‌ها ادامه می‌یابد تا جایی که دیگر میانگین بعد فراکتال تغییری نداشته باشد و ثابت بماند. با رسم نمودار محل تغییر شیب، نقطه عطف نمودار کاملاً مشخص می‌شود و پس از آن، نقطه نمودار به مقدار ثابتی می‌رسد و بدون نوسان باقی می‌ماند و به منزله تعداد پلات مورد نیاز در نظر گرفته می‌شود. سپس، با مشخص شدن تعداد پلات مورد نیاز در هر سازند، میانگین بعد فراکتال در هر سازند به دست آمد (محمدی، ۱۳۹۶).

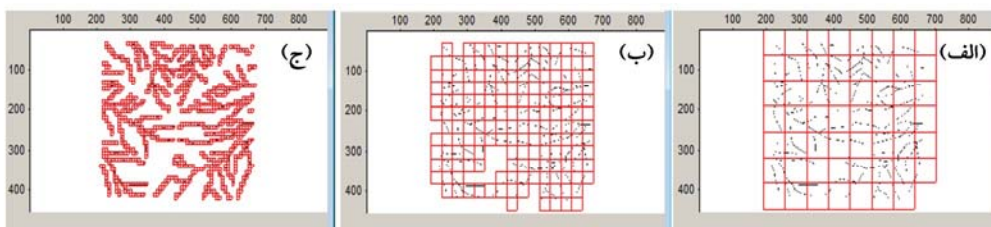
۳-۵-۱- بعد فراکتال

واژه «فراکتال» را مندلبرت^۲ در سال ۱۹۶۷، برای توصیف اشیای هندسی پیچیده، ابداع کرد که درجه بالایی از خودتشابهی دارند. «فراکتال» شکلی هندسی است که می‌توان آن را به بخش‌هایی تقسیم کرد که هریک از آنها کپی تعدیل‌یافته‌ای، از لحاظ اندازه، از کل است. وقتی این اشیا بزرگ‌نمایی شوند، به نظر می‌رسد که بین اجزای آنها تشابه دقیقی برقرار است و این

شباهت جزء به جزء تا بی‌نهایت ادامه می‌یابد. هریک از فراکتال‌ها درجات متفاوتی از خودتشابهی را پشتیبانی می‌کند. روش‌های گوناگونی برای محاسبه بعد فراکتال مطرح شده است که در این میان، روش شمارش جعبه‌ای، به دلیل توانایی محاسبه بعد فراکتالی تمامی عناصر و ابعاد و اشکال متفاوت و سرعت بالای محاسبات، معروف‌ترین روش است. علاوه بر این، الگوریتم آن قابلیت استخراج نتایجی با اطمینان بالا را فراهم می‌آورد. در این روش، شبکه‌ای از خانه‌های مربع‌شکل روی تصویر مورد نظر قرار داده می‌شود. اندازه شبکه با ϵ مشخص می‌شود که معیاری از مقیاس است. تعداد مربعاتی که هر بخش از منحنی مورد نظر را پوشش می‌دهند محاسبه می‌شود و به صورت مجازی، ضخامت خطوط شبکه صفر در نظر گرفته می‌شود. این کار برای مربع‌های دارای اضلاع گوناگون تکرار می‌شود. حد نهایی این بخش زمانی است که ϵ به صفر میل می‌کند. شمارش و حاصل این شمارش $N\epsilon$ تعداد مربعات خواهد بود.

$$D = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\log(N\epsilon)}{\log(1/\epsilon)} \quad (2)$$

مرحله بعد ترسیم مقادیر $\log(N\epsilon)$ در مقابل $\log(1/\epsilon)$ است. شیب خط مستقیم، که به بهترین وجه اطلاعات را به نمایش می‌گذارد، تقریباً برابر با بعد فراکتال است. بنابراین، برای محاسبه بعد فراکتال، لازم است نمودار غیرخطی بعد فراکتال رسم شود. در این نمودار،



شکل ۶. نحوه محاسبه بعد فراکتال شبکه زهکشی روی سازند کهر، با تغییر مقیاس اندازه جعبه ۸ (الف)؛ اندازه جعبه ۱۶ (ب)؛ اندازه جعبه ۳۲ (ج)

1. Box Counting
2. Mandelbrot

نتایج عددی حاصل از این نقشه‌ها شامل طول و تعداد آبراهه‌ها، در تعداد نه پلات، در جدول‌های ۱ و ۲ آمده است. با توجه به نتایج، الگوریتم MD8 طول و تعداد آبراهه‌ها را بیشتر برآورد کرده است. با توجه به ابتدای بحث که اشاره شد، طول و تعداد آبراهه‌ها در الگوریتم MD8 نسبت به الگوریتم D8 بیشتر به دست آمده است. عامل این اختلاف را می‌توان ناشی از تعداد سلول‌های بیشتر الگوریتم MD8 نسبت به D8 بر روی مدل رقومی ارتفاع عنوان کرد. (شریفی‌کیا و همکاران، ۱۳۹۷). همچنین، مشخص شد که نتایج مدل رقومی استر و الگوریتم چندسویه، در برآورد مجموع طول و رتبه آبراهه‌ها، بسیار متفاوت با نتایج استر و الگوریتم یک‌سویه و SRTM و الگوریتم‌های یک‌سویه و چندسویه بوده است؛ درحالی‌که دقت دیگر نقشه‌ها، در نمایش ویژگی‌های توپوگرافی منطقه مورد مطالعه، نزدیک‌به‌هم است (جدول‌های ۱ و ۲). مقادیر برآوردی نقشه‌ها، به سمت آبراهه‌های دارای رتبه‌های بیشتر، به هم نزدیک‌تر شدند.

محور xها اندازه شبکه و محور yها نشان‌دهنده نقاط موجود در هر مربع است. سپس این نمودار، با منحنی نظریه فراکتال، برازش داده می‌شود تا همبستگی میان دو نمودار به دست آید. طی این کار، همبستگی بین تعداد و اندازه شبکه نشان داده می‌شود.

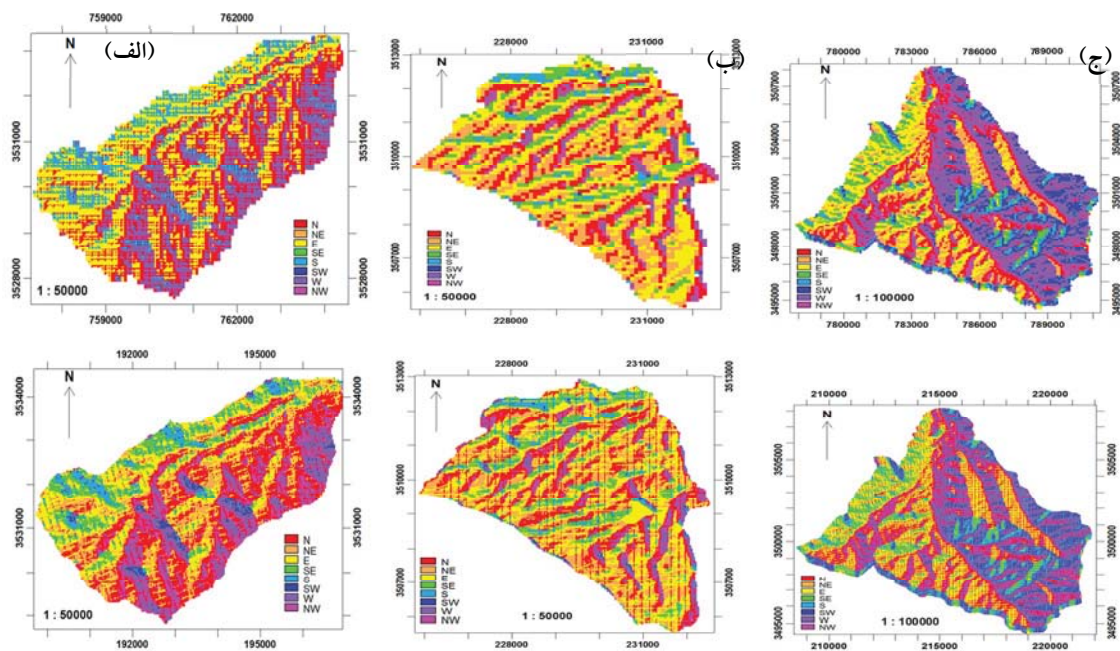
$$N = \epsilon D + c \quad (3)$$

در این رابطه، D بعد فراکتال و یا همان همبستگی بعد و c ضریب ثابت است (Mandelbrot, 1983).

۴- نتایج و بحث

۴-۱- مسیریابی جریان روی DEM

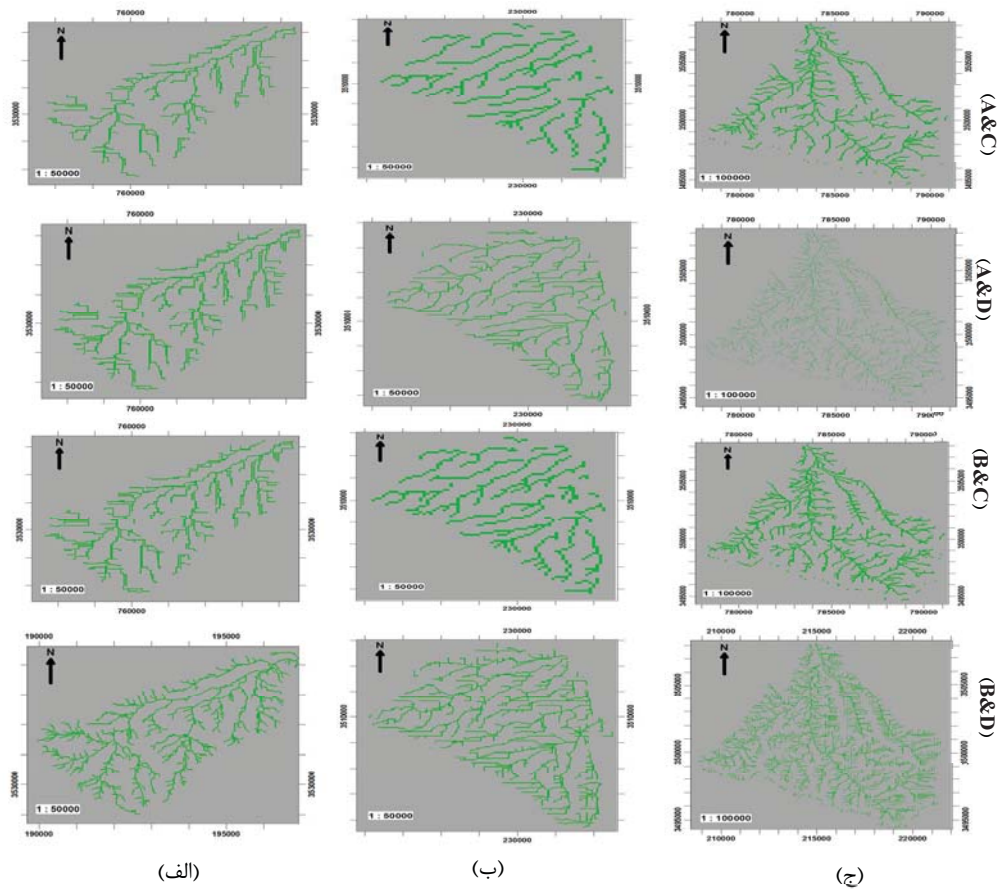
به منظور استخراج شبکه زهکشی، از مدل رقومی SRTM و استر و الگوریتم‌های جریان D8 و MD8 استفاده شد. براساس الگوریتم‌های جریان، نقشه جهت جریان (مقدار نسبی جریان خروجی از هر پیکسل در جهت اصلی)، نقشه تجمع جریان و در نهایت، نقشه شبکه زهکشی حوضه‌های انتخابی روی سازندهای زمین‌شناسی کهر، آهک تفت و گرانیت شیرکوه، در محیط نرم‌افزار الویس، به دست آمد (شکل‌های ۷ و ۸).



شکل ۷. نقشه جهت جریان براساس الگوریتم جریان یک‌سویه

در مدل رقومی SRTM (بالا) و استر (پایین): سازند کهر (الف)؛ سازند آهک تفت (ب)؛ سازند گرانیت شیرکوه (ج)

دقت الگوریتم‌های جریان و DEMهای استر (ASTER)، SRTM و ...



شکل ۸. نقشه شبکه زهکشی براساس الگوریتم جریان یک‌سویه (A) و جریان چندسویه (B) در مدل رقومی SRTM (C) و استر (D): سازند کهر (الف)؛ سازند آهک تفت (ب)؛ سازند گرانیت شیرکوه (ج)

جدول ۱. میزان طول و تعداد آبراهه‌های استخراج‌شده، با استفاده از الگوریتم جریان یک‌سویه

| پلات | ASTER | | | | | SRTM | | | تعداد آبراهه | طول آبراهه |
|------|-------|------|------|------|-----|------|------|------|--------------|------------|
| | جمع | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | جمع | ۱ | ۲ | | |
| ۱ | ۲۵ | ۱۹ | ۵ | ۱ | - | ۶ | ۵ | ۱ | - | ۲۵ |
| ۲ | ۴۳۱۲ | ۳۰۸۸ | ۱۲۲۴ | - | - | ۱۷۲۸ | ۱۴۸۶ | ۲۴۲ | - | ۴۳۱۲ |
| ۳ | ۳۶۸۳ | ۱۵۷۵ | ۱۱۰۱ | ۱۰۰۷ | - | ۲۱۹۳ | ۱۸۴۵ | ۳۴۸ | - | ۳۶۸۳ |
| ۴ | ۴۳۰۷ | ۱۹۷۷ | ۱۷۷۱ | ۵۵۹ | - | ۲۱۴۲ | ۲۰۴۸ | ۹۴ | - | ۴۳۰۷ |
| ۵ | ۲۴۴۸ | ۱۹۸۹ | ۳۳۱ | ۱۲۸ | - | ۲۳۸۶ | ۱۷۲۱ | ۴۶۳ | ۲۰۳ | ۲۴۴۸ |
| ۶ | ۵۹۰۲ | ۲۹۱۸ | ۱۶۳۱ | ۱۲۵۷ | ۹۶ | ۴۶۸۲ | ۲۵۳۹ | ۱۲۳۴ | ۹۰۹ | ۵۹۰۲ |
| ۷ | ۵۰۴۹ | ۲۹۶۳ | ۱۴۱۲ | ۶۷۴ | - | ۳۲۳۱ | ۲۶۳۷ | ۵۷۳ | ۲۱ | ۵۰۴۹ |
| ۸ | ۵۲۱۷ | ۳۳۰۷ | ۱۰۳۴ | ۷۶۱ | ۱۱۵ | ۳۶۲۰ | ۲۹۷۱ | ۶۰۳ | ۴۶ | ۵۲۱۷ |
| ۹ | ۴۱۶۰ | ۲۷۰۳ | ۹۷۵ | ۴۸۲ | - | ۳۲۱۳ | ۲۱۰۱ | ۱۰۰۷ | ۱۰۵ | ۴۱۶۰ |

جدول ۲. میزان طول و تعداد آبراهه‌های استخراج‌شده، با استفاده از الگوریتم جریان چندسویه

| پلات | ASTER | | | | | SRTM | | | | | |
|------|--------------|------|------|------|------|------|------|----|-----|------|------|
| | جمع | ۴ | ۳ | ۲ | ۱ | جمع | ۴ | ۳ | ۲ | ۱ | |
| ۱ | طول آبراهه | ۶۰۶۶ | - | ۶۵ | ۱۶۳۴ | ۴۳۶۷ | ۴۰۰۲ | ۳۳ | ۲۰۸ | ۱۳۹۵ | ۲۳۶۶ |
| ۱ | تعداد آبراهه | ۵۱ | - | ۲ | ۱۸ | ۳۱ | ۲۸ | ۲ | ۸ | ۶ | ۱۲ |
| ۲ | طول آبراهه | ۶۵۴۷ | ۲۳۳ | ۸۲۲ | ۱۴۲۰ | ۴۰۷۲ | ۳۰۱۰ | - | ۵۷ | ۸۴۶ | ۲۱۰۷ |
| ۲ | تعداد آبراهه | ۴۱ | ۳ | ۷ | ۱۱ | ۲۰ | ۱۲ | - | ۱ | ۵ | ۶ |
| ۳ | طول آبراهه | ۵۰۷۳ | - | ۸۱ | ۱۳۴۵ | ۳۶۴۷ | ۲۱۱۷ | - | - | ۲۴۲ | ۱۸۷۵ |
| ۳ | تعداد آبراهه | ۴۶ | - | ۹ | ۱۱ | ۲۶ | ۹ | - | - | ۲ | ۷ |
| ۴ | طول آبراهه | ۴۴۱۸ | - | ۱۰۶ | ۱۸۲۱ | ۲۴۹۱ | ۳۷۵۵ | ۱۱ | ۶۱۸ | ۱۸۴۲ | ۱۲۸۴ |
| ۴ | تعداد آبراهه | ۲۰ | - | ۱ | ۷ | ۱۲ | ۱۲ | ۱ | ۱ | ۳ | ۷ |
| ۵ | طول آبراهه | ۴۹۱۳ | - | ۲۵۰ | ۱۸۷۳ | ۲۷۹۰ | ۲۵۶۲ | - | ۲۲۶ | ۲۷۱ | ۲۰۶۵ |
| ۵ | تعداد آبراهه | ۲۵ | - | ۵ | ۵ | ۱۵ | ۱۳ | - | ۲ | ۲ | ۹ |
| ۶ | طول آبراهه | ۵۲۶۷ | - | ۳۱۵ | ۱۷۵۳ | ۳۱۹۹ | ۲۹۹۶ | - | ۳۴ | ۸۱۵ | ۲۱۴۷ |
| ۶ | تعداد آبراهه | ۴۴ | - | ۷ | ۱۴ | ۲۳ | ۱۲ | - | ۲ | ۳ | ۷ |
| ۷ | طول آبراهه | ۶۳۶۸ | ۲۴۱ | ۸۱۷ | ۱۶۲۳ | ۳۶۸۷ | ۲۸۳۰ | - | ۵۱ | ۹۰۲ | ۱۸۷۷ |
| ۷ | تعداد آبراهه | ۳۳ | ۳ | ۴ | ۱۱ | ۱۵ | ۱۳ | - | ۳ | ۲ | ۸ |
| ۸ | طول آبراهه | ۵۸۴۸ | - | ۸۷ | ۱۶۳۱ | ۴۱۳۰ | ۲۹۱۱ | - | ۳۰۵ | ۲۴۸ | ۲۳۵۸ |
| ۸ | تعداد آبراهه | ۳۴ | - | ۱ | ۵ | ۲۸ | ۹ | - | ۱ | ۳ | ۵ |
| ۹ | طول آبراهه | ۷۲۶۵ | ۱۰۰۲ | ۱۶۹۸ | ۸۱۱ | ۳۷۵۴ | ۳۱۵۰ | - | ۵۵۴ | ۸۹۱ | ۱۷۰۵ |
| ۹ | تعداد آبراهه | ۳۷ | ۸ | ۱۴ | ۶ | ۹ | ۱۲ | - | ۲ | ۴ | ۶ |

به طوری که نقشه‌های توپوگرافی در برآورد مجموع طول و رتبه آبراهه‌ها در نه پلات انتخابی روی سه سازند زمین‌شناسی انتخابی، در مقایسه با دیگر نقشه‌ها، به ترتیب، در حدود ۱۰۰ و ۹۰٪ موفقیت‌آمیز عمل کرده است. عملکرد نقشه‌های توپوگرافی، در ارتباط با مقادیر طول و رتبه آبراهه، برای آبراهه‌های رتبه ۱، ۹۰٪ و برای سایر رتبه‌ها، در حدود ۷۰٪ برآورد شد. شایان ذکر است که از سیزده نقشه استخراجی، فقط نقشه‌های توپوگرافی تا رتبه ۵ شبکه زهکشی را مطابق نقشه واقعیت زمینی، نشان می‌دهند. به منظور مقایسه تفاوت بین نتایج شبکه‌های زهکشی استخراج‌شده و تعیین سطح معنی‌داری، آزمون تجزیه واریانس یک‌طرفه، با استفاده از نرم‌افزار SPSS، انجام شد. از آن‌جاکه سطح معنی‌داری از ۰۰۵ کوچک‌تر است، با اطمینان ۰۰۹۵، بین مقادیر طول آبراهه (تراکم زهکشی) و رتبه آبراهه‌ها اختلاف معنی‌دار وجود دارد.

۲-۴- مقایسه شبکه‌های زهکشی استخراج‌شده از DEM با توجه به کاربرد مدل‌های رقمی ارتفاع و نیاز به استفاده از آنها در مطالعات، لازم است صحتشان بررسی شود. به همین منظور، برای تعیین شبکه زهکشی منتخب، نقشه‌های خروجی به دست آمده از نقشه‌های توپوگرافی ۱/۲۵۰۰۰ و دوازده نقشه شبکه زهکشی حاصل از الگوریتم‌های یک‌سویه و چندسویه و مدل‌های رقمی ارتفاع استر و SRTM، از لحاظ طول آبراهه (تراکم زهکشی) و رتبه و میزان جابه‌جایی آبراهه‌ها، در تعداد نه پلات، در منطقه مورد نظر و با نقشه واقعیت زمینی مقایسه شد (جدول ۳). مقایسه سیزده نقشه شبکه زهکشی به دست آمده با نقشه واقعیت زمینی حاصل از گوگل‌ارث صورت گرفت. نتایج مقایسه نشان داد که کمترین اختلاف، چه در مقادیر طول آبراهه (تراکم زهکشی) و چه در رتبه آبراهه، متعلق به نقشه شبکه زهکشی به دست آمده از نقشه‌های توپوگرافی ۱/۲۵۰۰۰ است.

جدول ۳. مقایسه شبکه زهکشی استخراج شده از الگوریتم‌ها و مدل‌های رقمی، با نقشه واقعیت زمینی

| پلات | شبکه زهکشی استخراجی | رتبه ۱ | | رتبه ۲ | | رتبه ۳ | | رتبه ۴ | | رتبه ۵ | | جمع | |
|------|------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | طول فراوانی | طول فراوانی | طول فراوانی | طول فراوانی | طول فراوانی | طول فراوانی | طول فراوانی | طول فراوانی | طول فراوانی | طول فراوانی | طول فراوانی | طول فراوانی |
| ۱ | توپوگرافی ۱/۲۵۰۰۰ | ۶ | ۱۲۰۷ | -۳ | -۳۲۹ | ۵ | ۶۴ | ۲ | ۱۰۷ | - | - | ۱۰ | ۱۵۱۸ |
| | SRTM یک‌سویه | ۳۹ | ۴۸۳۰ | ۱۷ | ۱۷۸۰ | - | - | - | - | - | - | ۶۹ | ۷۸۷۸ |
| | استر یک‌سویه | ۲۵ | ۴۲۸۸ | ۱۳ | ۸۲۴ | ۹ | ۵۳۳ | - | - | - | - | ۵۰ | ۵۳۳۲ |
| | SRTM چندسویه | ۳۲ | ۴۶۴۸ | ۱۲ | ۷۷۴ | ۲ | ۸۸۵ | ۱ | ۱۴۳ | - | - | ۴۷ | ۶۵۴۰ |
| | استر چندسویه | ۱۳ | ۲۶۴۷ | ۰ | ۵۳۵ | ۸ | ۱۰۲۸ | - | - | - | - | ۲۴ | ۴۳۸۶ |
| ۲ | توپوگرافی ۱/۲۵۰۰۰ | ۲ | ۶۸۷ | -۱ | -۲۹۹ | -۳ | -۴۲۵ | ۵ | ۱۴۱۳ | - | - | ۳ | ۱۳۷۶ |
| | SRTM یک‌سویه | ۱۷ | ۳۷۲۹ | ۹ | ۱۱۰۴ | - | - | - | - | - | - | ۳۸ | ۶۷۸۰ |
| | استر یک‌سویه | ۱۳ | ۲۱۳۷ | ۴ | ۱۲۲ | - | - | - | - | - | - | ۲۹ | ۴۱۹۸ |
| | SRTM چندسویه | ۱۶ | ۳۱۱۸ | ۵ | ۵۰۰ | ۳ | ۲۴۷ | - | - | - | - | ۳۲ | ۵۵۰۰ |
| | استر چندسویه | ۳ | ۱۱۵۳ | -۲ | -۷۴ | -۳ | -۵۱۸ | ۵ | ۱۴۰۲ | - | - | ۳ | ۱۹۶۳ |
| ۳ | توپوگرافی ۱/۲۵۰۰۰ | ۳ | ۴۶۲ | -۵ | ۳۷۹ | ۵ | -۱۲۰ | - | - | - | - | ۳ | ۱۰۵۴ |
| | SRTM یک‌سویه | ۱۶ | ۲۰۲۴ | ۹ | ۱۵۰۹ | - | - | - | - | - | - | ۳۲ | ۴۴۱۷ |
| | استر یک‌سویه | ۱۸ | ۲۲۹۴ | ۷ | ۷۵۶ | ۴ | ۲۱۳ | - | - | - | - | ۲۹ | ۲۹۳۰ |
| | SRTM چندسویه | ۱۸ | ۱۹۹۴ | ۸ | ۱۶۱۵ | - | - | - | - | - | - | ۳۳ | ۴۴۹۶ |
| | استر چندسویه | -۱ | ۲۲۲ | -۱ | ۵۱۲ | -۲ | ۸۰۶ | - | - | - | - | -۴ | ۱۵۴۰ |
| ۴ | توپوگرافی ۱/۲۵۰۰۰ | ۸ | ۵۸۸ | ۰ | -۴۶۰ | -۲ | -۴۴ | - | - | - | - | ۶ | ۴۴۰ |
| | SRTM یک‌سویه | ۱۷ | ۱۵۹۰ | ۶ | ۱۱۹۶ | - | - | - | - | - | - | ۲۷ | ۳۱۶۵ |
| | استر یک‌سویه | ۱۱ | ۱۶۶۱ | ۰ | -۴۸۱ | ۳ | -۱۷۶ | - | - | - | - | ۱۴ | ۱۰۰۴ |
| | SRTM چندسویه | ۱۳ | ۲۳۵۴ | ۴ | -۵۲۲ | ۳ | -۲۳۵ | - | - | - | - | ۱۹ | ۱۵۵۶ |
| | استر چندسویه | ۹ | ۱۱۴۷ | ۰ | -۵۳۱ | ۳ | ۲۷۷ | - | - | - | - | ۱۱ | ۸۹۳ |
| ۵ | توپوگرافی ۱/۲۵۰۰۰ | ۳ | ۱۸۴ | ۳ | ۱۸۵ | ۰ | -۱۸۵ | - | - | - | - | ۷ | ۱۸۴ |
| | SRTM یک‌سویه | ۷ | ۶۵۵ | ۱۰ | ۱۶۸۵ | ۱ | ۴۵۶ | - | - | - | - | ۱۷ | ۲۷۹۱ |
| | استر یک‌سویه | ۹ | ۳۸۷ | ۹ | ۱۸۱۷ | ۱ | ۵۳۱ | - | - | - | - | ۱۸ | ۲۷۳۵ |
| | SRTM چندسویه | ۶ | ۳۱۱ | ۱۰ | ۱۸۷۷ | ۱ | ۴۳۳ | - | - | - | - | ۱۶ | ۲۶۲۱ |
| | استر چندسویه | ۴ | -۴۱۴ | -۴ | ۲۷۵ | ۷ | ۴۰۹ | - | - | - | - | ۴ | ۲۷۰ |
| ۶ | توپوگرافی ۱/۲۵۰۰۰ | ۵ | ۲۴۱ | -۳ | ۱۲۱ | ۳ | ۶۵۲ | ۲ | ۲۱۴ | ۰ | ۷۴۳ | ۷ | ۱۷۰۵ |
| | SRTM یک‌سویه | ۱۷ | ۱۰۰۱ | ۷ | -۳۶۰ | ۱۰ | ۱۰۰۰ | - | - | - | - | ۴۰ | ۴۰۰۵ |
| | استر یک‌سویه | ۱۴ | ۶۲۲ | ۲ | -۲۷۶ | ۸ | ۸۸۴ | ۴ | ۹۵۱ | - | - | ۲۹ | ۲۷۹۱ |
| | SRTM چندسویه | ۱۶ | ۱۳۹۳ | ۶ | ۵۴۰ | ۹ | ۱۸۷۵ | - | - | - | - | ۳۷ | ۵۶۹۷ |
| | استر چندسویه | ۶ | ۴۸۵ | -۷ | -۳۹۸ | ۴ | ۱۵۹۴ | - | - | - | - | ۹ | ۳۴۲۶ |
| ۷ | توپوگرافی ۱/۲۵۰۰۰ | ۸ | ۱۱۴۶ | -۳ | -۱۵۱۷ | ۱ | ۹۱۴ | - | - | - | - | ۶ | ۵۴۳ |
| | SRTM یک‌سویه | ۲۳ | ۲۹۷۵ | ۵ | ۶۵۲ | ۸ | ۱۵۵۴ | - | - | - | - | ۳۶ | ۵۱۷۴ |
| | استر یک‌سویه | ۱۹ | ۲۶۴۹ | ۴ | -۱۸۷ | ۳ | ۹۰۱ | - | - | - | - | ۲۶ | ۳۳۶۳ |
| | SRTM چندسویه | ۲۳ | ۳۷۳۵ | ۶ | ۳۲۳ | ۷ | ۱۵۲۴ | - | - | - | - | ۳۶ | ۵۵۸۲ |
| | استر چندسویه | ۱۶ | ۱۹۲۵ | -۵ | -۳۹۸ | ۶ | ۷۵۸ | - | - | - | - | ۱۴ | ۲۰۴۴ |
| ۸ | توپوگرافی ۱/۲۵۰۰۰ | ۵ | ۱۹۷ | ۱۱ | ۱۳۴۲ | -۶ | ۶۶ | ۱ | ۱۵۴ | - | - | ۱۲ | ۱۷۵۹ |
| | SRTM یک‌سویه | ۲۴ | ۲۲۳۷ | ۲۷ | ۱۸۰۳ | -۸ | ۸۷ | - | - | - | - | ۴۶ | ۴۴۲۵ |
| | استر یک‌سویه | ۲۵ | ۱۹۰۱ | ۲۷ | ۱۳۷۲ | -۲ | -۶۲۸ | ۲ | ۱۹۱ | - | - | ۵۱ | ۲۸۳۶ |
| | SRTM چندسویه | ۲۸ | ۲۸۵۰ | ۲۶ | ۲۱۵۸ | ۰ | -۱۷۲ | - | - | - | - | ۵۷ | ۵۱۴۲ |
| | استر چندسویه | ۷ | ۱۰۷۸ | ۲۴ | ۷۷۵ | ۰ | ۴۶ | - | - | - | - | ۳۲ | ۲۲۰۵ |
| ۹ | توپوگرافی ۱/۲۵۰۰۰ | ۱۱ | ۱۰۰۳ | ۰ | ۱۷۳ | -۲ | -۱۱۷ | - | - | - | - | ۹ | ۱۰۵۹ |
| | SRTM یک‌سویه | ۲۸ | ۳۹۷۱ | ۱۵ | ۹۴۹ | ۳ | ۶۷۲ | - | - | - | - | ۴۶ | ۵۵۸۳ |
| | استر یک‌سویه | ۲۶ | ۳۳۶۹ | ۱۳ | ۹۸۱ | ۵ | ۲۹۵ | - | - | - | - | ۴۴ | ۴۶۴۵ |
| | SRTM چندسویه | ۲۷ | ۴۳۶۷ | ۱۲ | ۱۰۶۵ | ۸ | ۲۲۳ | - | - | - | - | ۴۷ | ۵۶۵۵ |
| | استر چندسویه | ۲۴ | ۲۳۱۸ | ۱۰ | ۱۱۴۵ | -۴ | -۹۲۱ | - | - | - | - | ۲۲ | ۱۵۴۰ |

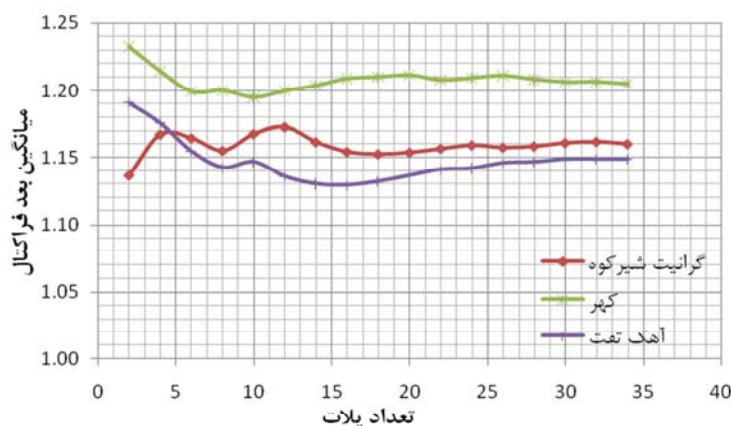
طول آبراهه‌ها کاهش می‌یابد و در مناطق با شیب بالا، داده‌های رقومی ارتفاع تطابق کمتری با واقعیت نشان می‌دهند. این مسئله در داده رقومی ارتفاع SRTM، به دلیل تفاوت زیاد در قدرت تفکیک مکانی، مشهودتر است (Gorokhovich & Voustianiouk, 2006; Jacobsen & Passini, 2010; Szabó et al., 2015). نکته بسیار مهم (فاطمی و علیزاده نائینی، ۱۳۹۶). دیگر میزان جابه‌جایی شبکه‌های آبراهه، در مقایسه با شبکه زهکشی واقعیت زمینی، است که در مدل رقومی ارتفاع استر، به طور میانگین، ۷۸ متر و در مدل رقومی ارتفاع SRTM در حدود ۴۰ متر است. در واقع، نتایج داده‌های SRTM در پژوهش حاضر، برخلاف سایر بررسی‌ها (Li & Wong, 2010; Lahsaini et al., 2018; Huggel et al., 2008; Thomas et al., 2014)، فقط در روندیابی شاخه اصلی شبکه زهکشی عملکرد مناسبی نشان داد. میزان جابه‌جایی در شبکه آبراهه حاصل از نقشه توپوگرافی ۱۰ متری (۱/۲۵۰۰۰) حدود ۵ به دست آمد. بنابراین، نتایج این پژوهش، به ویژه موفق نشدن در روندیابی رتبه‌های ۱ و طول آبراهه، نشان‌دهنده اهمیت فراوان تجزیه و تحلیل داده‌های رقومی به کاررفته برای انتخاب داده مناسب در مدل‌سازی شبکه زهکشی است. نتایج کاربرد الگوریتم‌های جریان یک‌سویه و جریان چندسویه نشان داد که الگوریتم جریان چندسویه، در مقایسه با الگوریتم جریان یک‌سویه، در روندیابی جریان بهتر عمل کرده است که تأثیر توپوگرافی سطح در روندیابی جریان سطحی را می‌رساند. هر چند اغلب نرم‌افزارهای موجود، به دلیل سادگی و حجم کم محاسبات، از الگوریتم جریان یک‌سویه استفاده می‌کنند؛ این الگوریتم توانایی لازم را برای شبیه‌سازی جریان، به ویژه در مناطق با توپوگرافی متغیر، دارا نیست. بنابراین، برای استخراج شبکه زهکشی از DEMها، توصیه می‌شود الگوریتم ساده D8، به دلیل خطاهای زیاد، با الگوریتم چندسویه جایگزین شود (Chen et al., 2012). نتایج حاصل از روندیابی جریان سطحی در حوضه زوجی کاخک (طالبی و

پس از نقشه‌های توپوگرافی ۱/۲۵۰۰۰، مدل رقومی استر و الگوریتم چندسویه و استر و الگوریتم یک‌سویه دقتی نزدیک به واقعیت زمینی نشان می‌دهند. در مجموع، طول آبراهه در نه پلات انتخابی، دقت استر و الگوریتم چندسویه پس از نقشه‌های توپوگرافی قرار می‌گیرد و در مورد مقادیر مجموع تعداد آبراهه، استر و الگوریتم یک‌سویه برآورد مناسبی از خود نشان دادند. به طور کلی، دقت برآوردهای استر و الگوریتم چندسویه مناسب‌تر از نقشه‌های دیگر به نظر می‌رسد. اما با اینکه الگوریتم چندسویه جزئیات بیشتری را از شبکه زهکشی نشان می‌دهد؛ از نظر تعداد رتبه‌های آبراهه، با نقشه واقعیت زمینی تفاوت دارد. تطابق نداشتن، به ویژه، در آبراهه‌های رتبه ۱ بیشتر نمایان است. همچنین، با اینکه مدل رقومی استر، در رتبه‌های ۲ و ۳، طول آبراهه را بهتر برآورد کرده است؛ این نتایج با نقشه واقعیت زمینی تطابق ندارد. نتایج پژوهش حاضر مشابه با بررسی DEMهای متفاوت، با استفاده از تحلیل پارامترهای مورفومتریک آبراهه در حوزه آبخیز سوپین‌آپر است. نتایج این بررسی نیز نشان داد که DEMهای مستخرج از نقشه‌های توپوگرافی ۱/۵۰۰۰۰ و استر، در استخراج شبکه آبراهه، دقتی بیشتر از مدل رقومی SRTM دارد (Das et al., 2016). اما نتایج حوزه آبخیز هند (Thomas et al., 2014) و مدل‌سازی فرایند لاهار در آتشفشانی در مکزیک (Huggel et al., 2008) حاکی از این است که داده‌های سنجنده استر و SRTM نمایش تقریباً یکسانی از وضعیت پستی و بلندی منطقه دارند و با مدل رقومی ارتفاع ۲۰ متری مطابقت دارند. این در حالی است که در پژوهش پیش رو، نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس ۱/۲۵۰۰۰ (مدل رقومی ارتفاع ۱۰ متری)، در مقایسه با داده‌های سنجنده استر و SRTM، بهترین انطباق را با نقشه واقعیت زمینی نشان داد. در این میان، مدل رقومی SRTM و الگوریتم‌های رایانه‌ای عملکرد مناسبی نداشتند. دلیل آن را می‌توان ماهیت کوهستانی منطقه دانست؛ چرا که در شیب‌های زیاد، دقت مدل‌های رقومی ارتفاع در برآورد تعداد و

۴-۳- بعد فراکتال

از عوامل مؤثر در شکل‌گیری نوع الگوی شبکه زهکشی در هر منطقه متغیرهای زمین‌شناسی است که به‌آسانی کمی‌سازی نمی‌شوند. با توجه به این نکته، میزان بعد فراکتال ۳۳ پلات ۱×۱ کیلومترمربعی، به‌صورت تصادفی-سیستماتیک، در سه سازند کهر و گرانیت شیرکوه و آهک تفت، محاسبه شد. با توجه به نتایج، تعداد پلات لازم، به‌ترتیب، برای سازند کهر و گرانیت شیرکوه و آهک تفت، ۱۶ و ۲۲ و ۲۶ عدد به‌دست آمد (شکل ۹). شایان توجه است که با توجه به لیتولوژی سازندها، الگوی شبکه زهکشی مشاهده‌شده روی هر سه سازند زمین‌شناسی الگوی شاخه‌درختی است. بیشترین و کمترین بعد فراکتال، به‌ترتیب، در سازندهای کهر و تفت به‌دست آمد. سازند کهر، از نظر فرسایش‌پذیری، فرسایش‌پذیرترین از میان این سه سازند محسوب می‌شود و میانگین بعد فراکتال آن ۱.۲۰۷ است که بیشترین میزان بعد فراکتال محسوب می‌شود (جدول ۴). میزان حساسیت به فرسایش در سازند کهر، که تناوبی از شیل و ماسه‌سنگ است، با روش پسایک (محمدی، ۱۳۹۶)، عدد ۸ بوده است؛ بنابراین، در طبقه حساس به فرسایش قرار می‌گیرد. عدد حساسیت به فرسایش دو سازند گرانیت شیرکوه و آهک تفت نیز، با روش پسایک، ۳ محاسبه شد.

همکاران، (۱۳۹۳)، شبیه‌سازی رواناب روزانه در مدل TOPPMODEL (Bhawan, 2001) و پیمایش جریان حوزه آبخیز یولو در کشور تایوان (Huang & Lee, 2016) نیز نشان داد جریان چندسویه، به‌دلیل تعریف عامل همگرایی که تحت تأثیر مستقیم توپوگرافی سطحی و تحذب و تقعر دامنه‌ها قرار دارد، مناسب‌تر است. اما روندیابی رودخانه‌های فصلی در حوضه کارون، از میان انواع الگوریتم‌های مورد استفاده، الگوریتم D8 را به‌علت سادگی و نداشتن پراکندگی جریان، نشان داد (حیدری، ۱۳۸۸). این بیان می‌کنند هنوز استخراج دقیق شبکه‌های زهکشی از مدل‌های رقومی ارتفاع و الگوریتم‌های رایانه‌ای به‌صورت چالش مانده است (Metz et al., 2011). در ادامه پژوهش، از شبکه زهکشی حاصل از نقشه‌های توپوگرافی ۱/۲۵۰۰۰، برای محاسبه بعد فراکتال شبکه زهکشی در سه سازند زمین‌شناسی کهر و آهک تفت و گرانیت شیرکوه، استفاده شد زیرا میزان تطابق نقشه‌های توپوگرافی ۱۰متری (۱/۲۵۰۰۰) با واقعیت زمینی بسیار بالاست و در مقایسه با عملکرد مدل‌های رقومی ارتفاع در استخراج شبکه آبراهه، دقت مطلوبی دارد. میزان جابه‌جایی، در شبکه آبراهه حاصل از نقشه توپوگرافی ۱۰متری، در حدود ۵ به‌دست آمد؛ میزان دقت آن در مقادیر طول آبراهه (تراکم زهکشی) و رتبه‌های آبراهه نیز مورد قبول است.



شکل ۹. تغییرات بعد فراکتال با تعداد پلات منتخب از هر سازند

رفتار کارستیک سازند آهک تفت و تأثیر انحلال و فرسایش در دوره‌های گذشته منجر به تشکیل آبراهه‌هایی با ابعاد و زوایای متنوع، در مقایسه با دو سازند کهر و گرانیته، شده است که از فعالیت‌های فرسایشی متأثرند و به همین علت، دامنه تغییرات در سازند آهک تفت بیشتر است. به منظور مقایسه تفاوت بین میانگین بعد فراکتال سه سازند زمین‌شناسی و تعیین سطح معنی‌داری نتایج، از آزمون تجزیه واریانس یک‌طرفه، با استفاده از نرم‌افزار SPSS، بهره گرفته شد. چون سطح معنی‌داری از ۰.۰۱ کوچک‌تر است، با اطمینان ۰.۹۹، بین میانگین بعد فراکتال سه سازند آهک تفت، گرانیته شیرکوه و سازند کهر اختلاف معنی‌دار وجود دارد. عدد رتبه آبراهه در سازند کهر تا ۶ می‌رسد اما، در سازند گرانیته و تفت، شبکه آبراهه، به ترتیب، تا رتبه ۴ و ۵ گسترش یافته است زیرا در سازندهای سست، به دلیل فرسایش‌پذیری بالا، تراکم شکستگی‌ها بیشتر است و شبکه آبراهه‌ای متراکم شکل می‌گیرد (جدول ۵). همچنین، نتایج نشان داد ارتباط بین بعد فراکتال و تراکم زهکشی در سازندهای زمین‌شناسی در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار است. بنابراین، می‌توان ادعا کرد که مقدار بعد فراکتال متأثر از جنس سازندها و ضریب فرسایش‌پذیر است.

بنابراین، دلیل بالابودن میزان بعد فراکتال سازند کهر فرسایش‌پذیری و سن بالای آن است (هرچه سن سازند بیشتر باشد، به علت تحمل تنش‌های بیشتر و توزیع متفاوت محلی آن، تراکم آبراهه بیشتری دارد) که منجر به تشکیل شبکه آبراهه متراکم با شاخه‌های متعدد شده است. دلیل مقدار پایین بعد فراکتال در سازند آهک تفت را می‌توان همگنی موجود در این سازند و مقاومت بالای آن در برابر فرسایش دانست. با توجه به وضعیت اقلیمی منطقه و قرارگیری آن در شرایط خشک و سرد، سازند گرانیته شیرکوه دارای مقاومتی کمتر از آهک تفت و مستعد هوازدگی است. هوازدگی شدید در این سازند به صورت پدیده دانه‌دانه‌شدن و تولید مواد رسوبی ریزدانه دیده می‌شود. این عامل چه بسا دلیل پایین‌بودن میانگین بعد فراکتال سازند گرانیته شیرکوه در مقایسه با سازند آهک تفت باشد.

نکته مهم دیگر هم‌خوانی و مطابقت تعداد پلات مورد نیاز و دامنه تغییرات بعد فراکتالی در این سه سازند است؛ به طوری که با افزایش دامنه تغییرات، تعداد پلات نیز آهنگ افزایشی دارد. کمترین دامنه تغییرات مربوط به سازند کهر است که کمترین تعداد پلات (۱۶ پلات) را برای محاسبه میانگین بعد فراکتال، لازم دارد. اما بیشترین دامنه تغییرات متعلق به سازند آهک تفت، با بیشترین تعداد پلات (۲۶ پلات)، است.

جدول ۴. مقادیر آماری بعد فراکتال در سه سازند زمین‌شناسی

| تعداد پلات | دامنه تغییرات | میانگین | حداکثر | حداقل | سازند |
|------------|---------------|---------|--------|-------|----------------|
| ۱۶ | ۰.۱۴ | ۱.۲۰۷ | ۱.۳ | ۱.۲ | کهر |
| ۲۲ | ۰.۱۵ | ۱.۱۶۱ | ۱.۲۲ | ۱.۰۷۳ | گرانیته شیرکوه |
| ۲۶ | ۱.۱۶۱ | ۱.۱۴۹ | ۱.۲۰۷ | ۱.۰۴۶ | آهک تفت |

جدول ۵. طول و رتبه شبکه زهکشی روی سه سازند زمین‌شناسی

| سازند | تعداد رتبه | | | | | | مجموع | طول رتبه | | | | | | |
|---------|------------|----|----|---|---|---|-------|----------|------|------|-----|-----|-----|-------|
| | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | |
| تفت | ۲۲ | ۱۰ | ۷ | ۵ | - | - | ۴۱ | ۴۸۰۶ | ۱۶۹۲ | ۹۰۷ | ۶۴۲ | - | - | ۷۶۴۷ |
| گرانیته | ۲۷ | ۱۱ | ۸ | ۸ | ۳ | - | ۴۹ | ۵۳۶۰ | ۱۴۵۱ | ۹۰۲ | ۹۳۳ | ۵۵۶ | - | ۸۰۰۳ |
| کهر | ۳۵ | ۱۵ | ۱۱ | ۷ | ۴ | ۳ | ۶۹ | ۶۱۲۴ | ۱۶۰۳ | ۱۲۸۲ | ۹۴۵ | ۶۲۷ | ۵۴۵ | ۱۰۱۷۱ |

زهکشی بیشتر است. درواقع، تعداد انشعابات از رتبه‌های متفاوت، سطح و طول این انشعابات از رابطه توانی و فراکتالی پیروی می‌کند (Kusák, 2014) (علمی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۳).

۵- نتیجه‌گیری

انتخاب نوع داده و الگوریتم مناسب، دسترسی به داده‌های با کیفیت در مقیاس منطقه‌ای و خطاهای DEM در استخراج شبکه زهکشی از معضلات اصلی ژئومورفولوژیست‌ها و هیدرولوژیست‌هاست زیرا دقت و وضوح DEM، در مقیاس منطقه‌ای، تأثیرات جدی در عملکرد موفقیت‌آمیز انواع مدل‌ها دارد. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که نقشه‌های توپوگرافی ۱/۲۵۰۰۰، در برآورد طول و رتبه آبراهه‌ها، موفقیت‌آمیزتر از دیگر نقشه‌ها عمل کرده است. پس از نقشه‌های توپوگرافی ۱/۲۵۰۰۰، مدل رقومی استر و الگوریتم چندسویه و استر و الگوریتم یک‌سویه دقتی نزدیک به واقعیت زمینی نشان می‌دهند. اما، با اینکه الگوریتم چندسویه جزئیات بیشتری از شبکه زهکشی را نشان می‌دهد، از نظر تعداد رتبه‌های آبراهه، با نقشه واقعیت زمینی تفاوت دارد و تطابق نداشتن، به‌طور ویژه، در آبراهه‌های رتبه ۱ بیشتر نمایان است. نتایج این پژوهش تأییدکننده این نکته است که استخراج شبکه زهکشی از مدل‌های رقومی ارتفاع برای مطالعات مقدماتی در حوزه آبخیز مناسب است. در تحقیقات تخصصی، که نیاز به داده دقیق و نزدیک به واقعیت زمینی است، استفاده از عکس‌های هوایی بزرگ‌مقیاس و تصاویر ماهواره‌ای توصیه می‌شود. نتایج پژوهش حاضر، به‌خصوص موفقیت‌نداشتن در روندیابی رتبه‌های ۱ و طول آبراهه، نشان‌دهنده اهمیت بالای تجزیه و تحلیل داده‌های رقومی مورد استفاده برای انتخاب داده مناسب در محاسبه بعد فراکتال شبکه زهکشی است؛ چرا که بعد فراکتال حساسیت بسیار زیادی در برابر شرایط اولیه دارد و با کمترین تغییر در شرایط شبکه زهکشی،

بیشترین طول آبراهه (تراکم زهکشی) متعلق به سازند کهر است. تراکم زهکشی یکی از مهم‌ترین پارامترهای ژئومورفولوژیکی حوزه آبخیز است که اغلب از آن به‌منزله شاخصی برای بیان وضعیت شبکه زهکشی استفاده می‌شود. درواقع، با بیشترشدن طول آبراهه (تراکم زهکشی)، میزان بعد فراکتال نیز افزایش می‌یابد. این در حالی است که مجموع طول کل آبراهه‌ها در سازند آهک تفت، به‌جز در رتبه ۲، تفاوت زیادی با سازند گرانیت و کهر ندارد. طول بلند آبراهه‌ها از ویژگی‌های سازندهای آهکی به‌شمار می‌رود. اما، با وجود این ویژگی، مقدار بعد فراکتال در سازند آهک تفت کمتر از دو سازند دیگر است که این ناشی از اندک‌بودن تعداد آبراهه رتبه ۱ و عدد رتبه آبراهه است؛ خود این نکته اهمیت حضور و تراکم آبراهه‌های رتبه ۱ را در مقدار عددی بعد فراکتال شبکه نشان می‌دهد. یکی از ویژگی‌های نظریه فراکتال حساسیت بسیار زیاد به شرایط اولیه است؛ به‌طوری‌که با کوچک‌ترین تغییر در شرایط شبکه زهکشی، تغییرات بزرگی در مقادیر بعد فراکتال کل شبکه ایجاد می‌شود. این نکته در نتایج این پژوهش به‌روشنی نشان داده شد؛ به‌این‌ترتیب که تعداد بالای آبراهه‌های رتبه ۱ در شبکه‌های زهکشی روی سازند کهر، برخلاف سازند آهک تفت، مقادیر بالای بعد فراکتال را به‌همراه داشته است. نتایج پژوهش حاضر منطبق بر نتایج دیگر پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه تحلیل فراکتالی شبکه زهکشی است. یافته‌های آن تحقیقات نیز نشان داد که بین بعد فراکتال و حساسیت سازندهای زمین‌شناسی ارتباط معنی‌داری وجود دارد و با افزایش حساسیت سنگ‌شناسی و به‌تبع آن، تراکم زهکشی، عدد فراکتال افزایش می‌یابد و در سازندهای دارای حساسیت بیشتر، تغییرات تراکم شبکه زهکشی بیشتر از سازندهای مقاوم بوده است (علمی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۳؛ علیمرادی و همکاران، ۱۳۹۷؛ ایلدرمی و سپهری، ۱۳۹۷؛ محمدی و همکاران، ۱۳۹۸) (Hui & Changxing, 2017). همچنین، بررسی‌ها نشان داد بعد فراکتالی بالا معرف تراکم

بعد فرکتال شبکه زهکشی (مطالعه موردی: دامنه‌های شمالی همدان)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ششم، شماره ۴، صص. ۷۰-۸۷.

حسین‌زاده، ر.، جهادی‌طرقی، م.، ۱۳۸۹، ارزیابی دقت مدل‌های رقومی ارتفاع DEM و الگوریتم‌های GIS در تحلیل‌های مورفومتری رودخانه‌ای، مجله جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای، شماره ۱۴، صص. ۱۸۳-۲۱۲.

حیدری، ع.، ۱۳۸۸، مسیریابی جریان با استفاده از الگوریتم جدید MODir8، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه باهنر کرمان.

خسروی، ع.، سپهر، ع.، عبدالله‌زاده، ز.، ۱۳۹۵، رفتار فرکتالی و ارتباط آن با خصوصیات هیدرومورفومتری حوضه‌های آبریز دامنه شمالی بینالود، هیدروژئومورفولوژی، دوره سوم، شماره ۹، صص. ۱-۲۰.

رضائی‌مقدم، م.، احمدی، م.، ۱۳۸۵، تحلیل ژئومورفولوژی کمی الگوی زهکشی شبکه آبراهه‌ای به کمک زاویه برخورد آن‌ها در زیر حوضه سریاس، استان کرمانشاه، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، شماره ۸۱، صص. ۸۴-۹۸.

شریفی‌کیا، م.، شایان، س.، یمانی، م.، عرب‌عامری، ع.، ۱۳۹۷، استخراج الگوی زهکشی دامنه‌ها در نواحی فشرده جنگلی جنوب بهشهر با استفاده از داده‌های فرکانس پایین راداری، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال هفتم، شماره ۲، صص. ۲۰۹-۲۲۳.

طالبی، ع.، عشقی‌زاده، م.، دستورانی، م.، عظیم‌زاده، ح.، ۱۳۹۳، بررسی تأثیر عملیات آبخیزداری بر توزیع جریان سطحی با استفاده از معرفی الگوریتم توزیع جهت متعدد، اکوهیدرولوژی، شماره ۲، صص. ۸۳-۹۷.

مقادیر بعد فراکتال شبکه تغییر می‌کند. از این رو، انتخاب شبکه زهکشی، که به واقعیت زمینی نزدیک باشد، بسیار مهم است. این نکته به خوبی در نتایج این پژوهش نشان داده شد؛ به این ترتیب که تعداد بالای آبراهه‌های رتبه ۱ در شبکه‌های زهکشی روی سازند کهر، برخلاف سازند آهک تفت، مقادیر بالای بعد فراکتال را به همراه داشته است. میانگین بعد فراکتال ۱.۱۴۹ نشان‌دهنده سازند آهک تفت، میانگین بعد فراکتال ۱.۱۶۱ مختص سازند گرانیس و مقدار ۱.۲۰۷ متعلق به سازند کهر است. بیشترین مقدار عددی بعد فراکتال در سازند فرسایش‌پذیر کهر (۱.۲۷۹) و کمترین آن در سازند مقاوم تفت (۱.۰۴۶) به دست آمد که بیان می‌کند، با افزایش حساسیت سنگ‌شناسی و به تبع آن، تراکم زهکشی، بعد فراکتال نیز افزایش می‌یابد. مقادیر به دست آمده از بعد فراکتال تفاوت در مقاومت به فرسایش سه سازند را به خوبی نشان می‌دهد. بنابراین، مقدار بعد فراکتال متأثر از جنس سازندها و ضریب فرسایش‌پذیری است. در واقع، تحلیل ابعاد فراکتال امکان بررسی سریع و بادقتی را از ویژگی‌های فرسایشی و حساسیت به فرسایش سازندهای منطقه مورد مطالعه، امکان‌پذیر می‌کند. این نتایج می‌تواند درک مناسبی از وضعیت فرسایشی و ژئومورفولوژیکی به دست دهد. از این رو، بعد فراکتال را می‌توان ابزاری مفید و کارآمد برای مدیریت حوزه آبخیز در نظر گرفت.

۶- منابع

آقاطاهر، ر.، صمدی، م.، لعلی‌نیت، ا.، نجفی، ا.، ۱۳۹۴، ارزیابی مقایسه ای صحت ارتفاعی مدل‌های رقومی ارتفاعی ASTER و SRTM، فصلنامه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی سپهر، دوره ۲۵، شماره ۹۹، صص. ۱۱۳-۱۰۳.

ایلدرمی، ع.، سپهری، م.، ۱۳۹۷، فرسایش‌پذیری سازندهای زمین شناسی با استفاده از تحلیل

- علمی‌زاده، ه.، ماه‌پیکر، ا.، سعادت‌مند، م.، ۱۳۹۳، بررسی نظریه فرکتال در ژئومورفولوژی رودخانه‌ای: مطالعه موردی زربینه‌رود، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال سوم، شماره ۲، صص. ۱۴۱-۱۳۰.
- علی‌مردادی، م.، اختصاصی، م.، تازه، م.، کریمی، ح.، ۱۳۹۷، محاسبه بعد فراکتال سازندهای زمین‌شناسی و بررسی ارتباط آن با حساسیت سازندها، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره پنجاهم، شماره ۲، صص. ۲۴۱-۲۵۳.
- فاطمی، س.ب.، علیزاده نائینی، ا.، ۱۳۹۶، ارزیابی مدل‌های ارتفاعی رقومی جهانی در قیاس با مدل‌های محلی از منظر ارتفاع و شیب، مجله علمی رایانش نرم و فناوری اطلاعات، دوره ششم، شماره ۱، صص. ۲۶-۳۵.
- فخار ایزدی، ن.، ناصری، ک.، مصداقی، م.، ۱۳۹۴، اثرات تعداد، سطح و شکل پلات روی صحت و دقت برآورد تولید چند علفزار با استفاده از شبیه‌سازی نمونه‌گیری، بوم‌شناسی کاربردی، دوره چهارم، شماره ۱۴، صص. ۵۱-۶۰.
- محمدی، م.، ۱۳۹۶، بررسی کمی الگوهای ژئومورفولوژی شبکه‌های زهکشی و بعد فراکتال آن در سازندهای زمین‌شناسی مناطق خشک (مطالعه موردی: حوضه دشت یزد- اردکان)، پایان‌نامه دکتری، دانشگاه یزد، دانشکده منابع طبیعی، گروه آب‌خیزداری.
- محمدی، م.، اختصاصی، م.ر.، طالبی، ع.، حسینی، س.ز.، ۱۳۹۸، کاربرد بعد فراکتال در تحلیل حساسیت پذیری سازندهای زمین‌شناسی مناطق خشک (مطالعه موردی: حوزه آبخیز دشت یزد- اردکان)، نشریه مهندسی اکوسیستم بیابان، دوره هشتم، شماره ۲۴، صص. ۱۸-۱.
- مروج، ک.، دلاور، م.، صادق‌بیگی، ا.، ۱۳۹۴، اهمیت انتخاب مدل رقومی ارتفاعی مناسب در مدیریت و حفاظت منابع خاک و آب (مطالعه موردی: سد تهم، استان زنجان)، تحقیقات کاربردی خاک، جلد سوم، شماره ۲، صص. ۴۲-۵۴.
- Ali, A.M., Solomatine, D. & Di Baldassarre, G., 2015, **Assessing the Impact of Different Sources of Topographic Data on 1-D Hydraulic Modelling of Floods**, Hydrology and Earth System Sciences, 19, PP. 631-643.
- Bhawan, V.J., 2001, **Comparison of Single and Multiple Flow Direction Algorithm for Computing Topographic Parameters in TOPMODEL**, National Institute of Hydrology, Roorkee, India.
- Chen, Y., Wilson, J.P., Zhu, Q. & Zhou, Q., 2012, **Comparison of Drainage-Constrained Methods for DEM Generalization**, Computers & Geosciences, 48, PP. 41-49.
- Costa-Cabral, M.C. & Burges, S.J., 1994, **Digital Elevation Model Networks (DEMON): A Model of Flow over Hillslopes for Computation of Contributing and Dispersal Areas**, Water Resources Research, 30, PP. 1681-1692.
- Das, S., Pravin Patel, P. & Sen Gupta, S., 2016, **Evaluation of Different Digital Elevation Models for Analyzing Drainage Morphometric Parameters in a Mountainous Terrain: A Case Study of the Supin-Upper Tons Basin, Indian Himalayas**, Springerplus, 5, P. 1544.
- Elkhrachy, I., 2018, **Vertical Accuracy Assessment for SRTM and ASTER Digital Elevation Models: A Case Study of Najran City, Saudi Arabia**, Ain Shams Engineering Journal, 9, PP. 1807-1817.
- Freeman, T.G., 1991, **Calculating Catchment Area with Divergent Flow Based on a Regular Grid**, Computers & Geosciences, 17, PP. 413-422.
- Garcia, M.J.L. & Camarasa, A.M., 1999, **Use of Geomorphological Units to Improve Drainage Network Extraction from a DEM**, ITC Journal, 3, PP. 187-195.

- Gorokhovich, Y. & Voustianiouk, A., 2006, **Accuracy Assessment of the Processed SRTM-Based Elevation Data by CGIAR Using Field Data from USA and Thailand and Its Relation to the Terrain Characteristics**, Remote Sensing of Environment, 104, PP. 409-415.
- Holmgren, P., 1994, **Multiple Flow Direction Algorithms for Runoff Modelling in Grid Based Elevation Models: An Empirical Evaluation**, Hydrological Processes, 8, PP. 327-334.
- Huang, P.-C., & Lee, K. T., 2016, **Distinctions of geomorphological properties caused by different flow-direction predictions from digital elevation models**. International Journal of Geographical Information Science, 30(2), 168-185.
- Huggel, C., Schneider, D., Miranda, P.J., Granados, H.D. & Käab, A., 2008, **Evaluation of ASTER and SRTM DEM Data for Lahar Modeling: A Case Study on Lahars from Popocatepetl Volcano, Mexico**, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 170, PP. 99-110.
- Hui, Y. & Changxing, S., 2017, **The Fractal Characteristics of Drainage Networks and Erosion Evolution Stages of Ten Kongdus in the Upper Reaches of the Yellow River, China**, Journal of Resources and Ecology, 8, PP. 165-174.
- Jacobsen, K. & Passini, R., 2010, **Analysis of ASTER GDEM Elevation Models**, Paper presented at the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences: [2010 Canadian Geomatics Conference And Symposium Of Commission I, ISPRS Convergence In Geomatics-Shaping Canada's Competitive Landscape] 38, Nr. Part 1.
- Khanbabaei, Z., Karam, A. & Rostamizad, G., 2013, **Studying Relationships between the Fractal Dimension of the Drainage Basins and Some of their Geomorphological Characteristics**, International Journal of Geosciences, 4, PP. 636-642.
- Kusák, M., 2013, **Morphometric Characteristics of Valley Nets in the Blue Nile Basin in the Ethiopian Highlands**, Praha, 97 P., The Diploma Thesis (Mgr.), Ph.D. Department of Physical Geography and Geoecology, Faculty of Science, Charles University in Prague.
- Kusák, M., 2014, **Review Article: Methods of Fractal Geometry Used in the Study of Complex Geomorphology Networks**, AUC Geographia, PP. 99-110.
- Lahsaini, M., Tabyaoui, H., Mounadel, A., Bouderkha, N. & Lakhili, F., 2018, **Comparison of SRTM and ASTER Derived Digital Elevation Models of Inaouene River Watershed (North, Morocco)—Arc Hydro Modeling**, Journal of Geoscience and Environment Protection, 6, PP. 141-156.
- Lea, N., 1992, **An Aspect Driven Kinematic Routing Algorithm, Overland Flow: Hydraulics and Erosion Mechanics** Aj Parsons, Ad Abrahams, Chapman and Hall, New York.
- Li, J. & Wong, D.W.S., 2010, **Effects of DEM Sources on Hydrologic Applications**, Computers, Environment and Urban Systems, 34, PP. 251-261.
- Mandelbrot, B.B., 1983, **The Fractal Geometry of Nature/ Revised and Enlarged Edition**, New York, WH Freeman and Co.
- Metz, M., Mitasova, H. & Harmon, R., 2011, **Efficient Extraction of Drainage Networks from Massive, Radar-Based Elevation Models with Least Cost Path Search**, Hydrology and Earth System Sciences, 15, PP. 667-678.
- O'Callaghan, J.F. & Mark, D.M., 1984, **The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data**, Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 28, PP. 323-344.
- Orlandini, S., Moretti, G., Franchini, M., Aldighieri, B. & Testa, B., 2003, **Path-Based Methods for the Determination of Nondispersive Drainage Directions in Grid-Based Digital Elevation Models**, Water Resources Research, 39, PP. 1-8.

- Orlandini, S. & Moretti, G., 2009, **Determination of Surface Flow Paths from Gridded Elevation Data**, Water Resources Research, 45, PP. 1-18.
- Ouerghi, S., ELsheikh, R.F.A., Achour, H. & Bouazi, S., 2015, **Evaluation and Validation of Recent Freely-Available ASTER-GDEM V. 2, SRTM V. 4.1 and the DEM Derived from Topographical Map over SW Grombalia (Test Area) in North East of Tunisia**, Journal of Geographic Information System, 7, PP. 266-279.
- Pelletier, J.D., 2007, **Fractal Behavior in Space and Time in a Simplified Model of Fluvial Landform Evolution**, Geomorphology, 91, PP. 291-301.
- Poggio, L. & Soille, P., 2011, **A Probabilistic Approach to River Network Detection in Digital Elevation Models**, Catena, 87, PP. 341-350.
- Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P. & Planchon, O., 1991, **The Prediction of Hillslope Flow Paths for Distributed Hydrological Modelling Using Digital Terrain Models**, Hydrological Processes, 5, PP. 59-79.
- Sefercik, U.G., 2012, **Performance Estimation of ASTER Global DEM Depending upon the Terrain Inclination**, Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 40, PP. 565-576.
- Seibert, J. & McGlynn, B.L., 2007, **A New Triangular Multiple Flow Direction Algorithm for Computing Upslope Areas from Gridded Digital Elevation Models**, Water Resources Research, 43, PP. 1-8.
- Smith, M. & Pain, C., 2009, **Applications of Remote Sensing in Geomorphology**, Progress in Physical Geography, 33, PP. 568-582.
- Szabó, G., Singh, S.K. & Szabó, S., 2015, **Slope Angle and Aspect as Influencing Factors on the Accuracy of the SRTM and the ASTER GDEM Databases**, Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 83, PP. 137-145.
- 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, PP. 309-319.
- Thomas, J., Joseph, S., Thirvikramji, K. & Arunkumar, K., 2014, **Sensitivity of Digital Elevation Models: The Scenario from Two Tropical Mountain River Basins of the Western Ghats, India**, Geoscience Frontiers, 5, PP. 893-909.
- Thompson, J.A., Bell, J.C. & Butler, C.A., 2001, **Digital Elevation Model Resolution: Effects on Terrain Attribute Calculation and Quantitative Soil-Landscape Modeling**, Geoderma, 100, PP. 67-89.
- Yang, H. & Shi, C., 2017, **The Fractal Characteristics of Drainage Networks and Erosion Evolution Stages of Ten Kongduis in the Upper Reaches of the Yellow River**, Journal of Resources and Ecology, 8, PP. 165-173.



نیشن از دور

GIS ایران

سال سیزدهم، شماره اول، بهار ۱۴۰۰
Vol.13, No. 1, Spring 2021

سنجش از دور و GIS ایران
Iranian Remote Sensing & GIS

33-54



The Accuracy of Flow Direction Algorithms and ASTER, SRTM DEMs and Topographic Maps of 1:25000 for Extracting Fractal Dimension of Drainage Networks

Mohammadi Khoshoui M.^{1*}, Ekhtesasi M.R.², Talebi A.², Hosseini S.Z.³

1. Ph.D. of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University
2. Prof. of Faculty of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University
3. Assistant Prof., Faculty of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University

Abstract

Digital elevation models and its derivatives are important factors for watershed modeling. It is obvious that DEM errors adversely affect the accuracy and thereby modeling of natural processes. This problem along with the impossibility of measuring all elements of nature, has led to a major evolution in the way of understanding and explaining phenomena. In this way, we can use the fractal geometry with the theory that many natural phenomena are order in the chaos. Each element of nature is represented as a fractal geometry number. The fractal geometry is a quantitative tool for studying the geomorphology of drainage networks and modeling many complex natural phenomena. In fact, geophysical phenomena such as drainage networks are fractal phenomena with fractal behavior. The purpose of this paper is to evaluate sensitivity of the drainage networks based on DEMs (ASTER & SRTM), flow direction algorithms (Single Flow Direction (D8) and Multiple Flow Direction (MD8)) and topographic maps of 1:25000 in order to study the fractal dimension of drainage network on geological formations of Yazd-Ardakan basin. The results showed that the least difference in the length and the rank of the stream belonged to the drainage network obtained from the topographic maps of 1:25000. After the topographic maps, ASTER and the multi-flow direction (MFD) algorithm and ASTER, and the single flow direction (SFD) algorithm are close to real ground map. Even though the multi-flow direction algorithm shows more detail on the drainage network. But it is not close to real ground map. The difference is particularly noticeable in the first rank of streams. SRTM and the flow direction algorithms showed only good results in routing the main rank of drainage networks. In fact, the results of this study demonstrate that accurate extraction of drainage networks from DEMs generated by remote sensing technologies such as SRTM or ASTER and SFD or MFD algorithms remains challenging. Therefore, the analysis of DEMs and flow direction algorithms should be considered as an important part of hydrological and geomorphological research. Due to the very high sensitivity of the fractal dimension to the smallest change in drainage network conditions, the drainage network obtained from topographic maps were used to calculate the fractal dimension. The mean fractal dimension of 1.149, 1.16 and 1.207, respectively, represents Taft, Granite and Kahar formations. There is a significant correlation between fractal dimension and sensitivity to erosion of geological formations (level 0.99). In fact, the fractal dimension increases with increasing the sensitivity to erosion along with the drainage density in geological formations. The results showed that fractal dimension allows for a quick and accurate analysis of sensitivity to erosion of the formations of this area.

Keywords: Digital elevation model, Drainage network, Flow direction algorithm, Fractal dimension.

* Correspondence Address: Faculty of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University. Tel: 09357969962
Email: m.mohammadi@stu.yazd.ac.ir