

## بررسی اثر شیب در استخراج مصنوعی آبراهه‌ها در الگوریتم‌های مختلف مسیریابی جریان

علیرضا شکوهی<sup>۱\*</sup>، پوریا غلامی<sup>۲</sup>

۱- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین  
۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات

\* قزوین، کد پستی ۳۴۱۴۹-۱۶۸۱۸  
shokoohi@ikiu.ac.ir

**چکیده-** مدل‌سازی پدیده‌های هیدرولوژیکی نیازمند استخراج مصنوعی شبکه رودخانه‌ای می‌باشد. در این پژوهش پنج الگوریتم معروف مسیریابی جریان شامل الگوریتم‌های D8، D $\infty$ ، RHO8، MFD و DEMON مورد بررسی قرار گرفتند. چون این الگوریتم‌ها بر مبنای گرادیان شیب، جریان را مسیریابی می‌کنند، تأثیر شیب بر عملکردشان بررسی شد. مطالعه موردی انجام شده نشان داد که در شیب‌های بالاتر از ۵ درصد تفاوت میان الگوریتم‌ها کم بوده و در شیب‌های کمتر، تمامی الگوریتم‌ها با ساختن جریان‌های موازی دچار اشکال می‌شوند. نتایج حاصل بر توانایی نسبی D8 صحنه گذاشته و شبکه آبراهه حاصل از آن را با وجود انتقادهای وارده، قابل قبول میدانند. D $\infty$  برتری خاصی بر سایر روش‌ها نداشته و RHO8 در صورت حل مشکل احتمالاتی بودن سه نحوی که قادر باشد همواره یک الگو را برای شبکه برگرداند- می‌تواند گزینه‌ای مناسب برای مناطق کم شیب تلقی شود.

**کلیدواژگان:** الگوریتم‌های D8، D $\infty$ ، RHO8، MFD و DEMON، مسیریابی جریان، شیب بحرانی.

### ۱- مقدمه

مدل‌سازی هیدرولوژیکی چه از نوع یک‌پارچه<sup>۱</sup> و چه از نوع توزیعی<sup>۲</sup> نیازمند استخراج حوضه و شبکه آبراهه مصنوعی است. اهمیت این موضوع بدان حد است که الحاقیه‌هایی مانند GEOHMS و Arc Hydro برای ArcGIS از ملزومات مطالعات هیدرولیک، هیدرولوژی و مهندسی رودخانه تلقی می‌شوند. الگوریتم D8<sup>۳</sup> در اغلب

نرم‌افزارهای GIS<sup>۴</sup> برای استخراج شبکه آبراهه استفاده می‌شود. این الگوریتم با وجود استفاده گسترده، به دلیل برخی کاستی‌ها از جمله نداشتن کارایی در شیب‌های کم مورد انتقاد محققان بوده است.

نقش حیاتی الگوریتم‌های مسیریابی جریان برای مدل‌سازی توزیعی و نیمه توزیعی غیر قابل انکار است. Todini (۱۹۸۸) در توجیه نیاز به مدل‌های توزیعی بیان نمود که در مدل‌سازی یک‌پارچه فرایندهای هیدرولوژیکی، تنها

1. Lumped
2. Distributed
3. Deterministic – Eight Node

4. Geographic Information System

تعداد محدودی از پارامترهای ضروری برای شبیه‌سازی یک سیستم هیدرولوژیکی مورد توجه قرار می‌گیرد. Brath و همکاران (۱۹۸۹) به این نتیجه رسیدند که تهیه مدل‌های رقمی ارتفاعی<sup>۱</sup> از حوضه‌های آبریز، امکان بررسی شرایط توپوگرافی و عوامل مرتبط با پستی و بلندیهای حوضه را در مقیاس مناسب در مدل‌های هیدرولوژیکی میسر می‌سازد. Palacios-Velez و همکاران (۱۹۹۸) به این نتیجه دست یافتند که استفاده از DEM در کنار سایر پارامترهای بدست آمده از حوضه آبریز منجر به ایجاد مجموعه‌ای از اطلاعات مفید برای تشریح جزء به جزء شرایط مرفولوژیکی و هیدرولوژیکی حوضه آبریز می‌شوند. واقعیت آن است که در دهه گذشته توجه به مدل‌های رقمی ارتفاعی با شبکه مربعی<sup>۲</sup> افزایش یافته است. این امر را می‌توان از یک طرف مرهون ساختار ساده ماتریس ارتفاعی DEM و از طرف دیگر بکارگیری کامپیوترهای پر سرعت دانست (Wilson and Gallant, 2000).

مدل‌های تحلیل و برآورد حجم رواناب در حوضه‌های آبریز توسط Jenson و Domingue (۱۹۸۸)، Chorovicz و همکاران (۱۹۹۲)، La Barbera و همکاران (۱۹۹۲) و Jullien و همکاران (۱۹۹۵) توسعه یافت. بسیاری از اندکس‌های توپوگرافی که در زمینه کاربردهای هیدرولوژیکی، مورفولوژیکی و اکولوژیکی مورد استفاده وسیع قرار دارند (نظیر شیب، مساحت ویژه، شیب دامنه و انحنا) پروفیل) را می‌توان از داده‌های ارتفاعی رقمی بدست آورد. به طور کلی داده‌های سلولی به علت آنکه می‌توانند در کنار بسیاری از دیگر انواع اطلاعات مورد استفاده در مدل‌سازی بارش- رواناب مورد استفاده قرار گیرند، در مهندسی منابع آب از جایگاه ویژه‌ای برخوردارند (Bhattari and Dutta, 2007; Bahremand).

الگوریتم D8 در ابتدا توسط O'Callaghan و Mark (۱۹۸۴) پیشنهاد شد. اولین کاربرد حرفه‌ای الگوریتم D8 توسط Maidment (۱۹۹۲) گزارش شد که توانست به کمک نقشه‌های رقمی زمین و استفاده از این الگوریتم، مسیر جریان و لذا طول پیمایش هر سلول را با فرض برقراری جریان یکنواخت و ماندگار به دست آورد. تلاش‌های این محقق و همکارانش نهایتاً منجر به توسعه یکی از معروفترین ابزارهای تهیه اطلاعات برای مدل‌های هیدرولوژیکی یعنی Arc Hydro شد که الگوریتم D8 در آن به عنوان الگوریتم مسیریابی جریان مورد استفاده قرار می‌گیرد (Maidment, 2002). Arc Hydro به عنوان یک الحاقیه در نرم‌افزار ArcGIS قابل استفاده می‌باشد (ESRI, 2011).

حصاری و همکاران (۱۳۸۸) برای تهیه نقشه پیوسته جریان آب رودخانه حوضه بالادست سد کرخه از Arc Hydro و الگوریتم D8 استفاده کردند. آنها برای ساخت DEM اولیه از نقشه‌های<sup>۳</sup> SRTM با سلول‌هایی به ابعاد ۹۰ متر استفاده کردند و نقشه جریان تجمعی را با سلول‌های ۲۰۰ متری ارائه نمودند. آنها استفاده از دیگر الگوریتم‌های مسیریابی جریان نظیر الگوریتم "مسیر جریان چندگانه"<sup>۴</sup> را برای تولید نقشه جریان تجمعی مورد تأکید قرار دادند. قزمزچشمه و همکاران (۱۳۸۴) برای تعیین اثر ابعاد

3. Shuttle Radar Topographic Mission  
4. Multiple Flow Directoin: MFD

1. Digital Elevation Model (DEM)  
2. Square -Grid DEM

براین اساس، Rho8 در واقع عبارت است از افزودن یک مؤلفه احتمالی به الگوریتم D8 تا بدین وسیله جهت جریان را به زاویه شیب دامنه واقعی نزدیک کند. توزیع احتمالاتی که Fairfield و Leymarie برای جهت جریان تعریف کردند چنان است که امید ریاضی آن معادل زاویه شیب دامنه باشد (Moore, 1996). تلاش این دو تن تا حدودی موفق بود و توانست مشکل انحراف مسیر D8 را با تقریب قابل قبول حل نمایند (Costa-Cabral and Burges, 1994). اما در این روش جریان‌های موازی خطوط جریان مجاور به موازات هم حرکت نمی‌کنند، بلکه حرکت آنها به صورت اتفاقی و زیگزاگ بوده و لذا در نهایت همدیگر را قطع می‌کنند. بدین ترتیب در جهت پایین دست هر لحظه بر خطاها افزوده می‌شود (Costa-Cabral and Burges, 1994). در چنین وضعیتی مساحت کل زهکشی<sup>۲</sup> برای برخی از سلول‌ها بیش از حد و برای برخی دیگر کمتر از حد بر آورد می‌شود. علاوه بر این با توجه به آنکه انتخاب مسیر در الگوریتم Rho8 تصادفی می‌باشد، معلوم نیست که در شبیه‌سازی مجدد یک حوضه بتوان به همان جواب‌های حاصل از اجرای مدل در دفعات قبل دست یافت. یعنی امکان آن وجود دارد که در هر بار شبیه‌سازی برای جهت جریان جوابی متفاوت بدست آید (Costa-Cabral and Burges, 1994).

الگوریتم MFD توسط Freeman (۱۹۹۱) برای غلبه بر بزرگترین مشکل و محدودیت روش D8 یعنی نمایش یک بعدی جریان و تخصیص تمام جریان هر سلول به تنها یک سلول در پایین دست، معرفی شد. در این روش به هر یک از سلول‌های مجاور، بخشی از جریان بر حسب توانی از شیب تخصیص می‌یابد. بر این اساس در محاسبه TCA برای هر سلول از DEM ممکن است تنها درصدی از جریان سلول‌های بالا دست اختصاص داده شود. Quinn و همکاران به این نتیجه رسیدند که الگوریتم D8 به

سلول‌ها روی دقت نقشه DEM و آبراهه‌های استخراج شده، از نقشه ۱:۵۰۰۰۰ استفاده نمودند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش اندازه سلول‌ها میزان خطای DEM در محدوده آبراهه‌ها از خطای کل حوضه کمتر می‌شود. در همین مطالعه در مقایسه آبراهه‌های مستخرج از DEM با آبراهه‌های نقشه ۱:۵۰۰۰۰، میزان خطای حاصل با افزایش درجه آبراهه زیاد می‌شد. این محققین از نرم‌افزار مورد استفاده و الگوریتم مسیریابی جریان اطلاعاتی منتشر نکرده‌اند. Saghaian و همکاران (۲۰۰۵) با استفاده از ILWIS GIS و الگوریتم D8 به ارزیابی اثر اندازه سلول بر مجموعه‌ای از مشخصات ژئومورفولوژیکی مورد استفاده در مدل‌سازی هیدرولوژیکی و منجمله دقت آبراهه‌های مصنوعی قابل استخراج از DEM پرداختند. آنها در این تحقیق از نقشه ۱:۵۰۰۰۰ استفاده کرده و به این نتیجه رسیدند که میزان خطا از اندازه سلول ۶۰ متر به بالا افزایش می‌یابد. در ارتباط با تعیین شیب عمومی حوضه نیز اندازه ۵۰ متر برای سلول‌های DEM بهینه تشخیص داده شد. شکوهی (۱۳۸۵) توانست ارزش استخراج آبراهه‌ها را در تعیین سیمای طرح‌های منابع آب نشان دهد. وی برای استخراج آبراهه‌ها از الحاقیه GEOHMS در محیط ArcView GIS و الگوریتم D8. بر اساس نقشه‌های رقومی ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری و ابعاد سلول DEM ۵۰ متر استفاده کرد.

Fairfield و Leymarie با ارائه الگوریتم Rho8<sup>۱</sup> تلاش نمودند تا بر بزرگترین مشکل الگوریتم D8 یعنی انحراف الگوی جریان از امتداد شیب دامنه واقعی و گیرافتادن جریان در مناطق تقریباً مسطح غلبه نمایند. آنها به راستای حرکت به سمت هر یک از سلول‌های مجاور احتمالی متناسب با شیب را اختصاص دادند (Tarboton, 1997; Fairfield and Leymarie, 1991). بدین ترتیب می‌توان Rho8 را نسخه احتمالاتی D8 دانست (Moore, 1996).

2. Total Contributing Area (Tca)

1. Random - Eight Node

سلول در جهت امتداد شیب دامنه به سمت سلولی دیگر حرکت می‌نماید. در این الگوریتم، بر چهار گوشه سلول - که خود از متوسط ارتفاع مرکز چهار سلول اطراف بدست آمده‌اند- صفحه‌ای برآزش داده شده و امتداد شیب دامنه برحسب شیب صفحه مزبور تعریف می‌شود. با اینکه الگوریتم Lea تحولی در زمان خود بود و مبنای توسعه مدل دو بعدی DEMON قرار گرفت، مورد استفاده واقع نشد.

الگوریتم<sup>۱</sup> DEMON توسط Costa-Cabral و Burges (۱۹۹۴) ارائه شد. این مدل، جریان را دو بعدی در نظر گرفته و به جای تجمع در مرکز سلول در سراسر آن پخش می‌نماید. جریان در یک لوله یا نوار به سمت پایین دست حرکت می‌کند و جهت آن با توجه به امتداد شیب دامنه موجود تعیین می‌شود. یکی از مهمترین مزایای این روش آن است که به عنوان یک مدل شبکه سلولی، از توانایی مدل‌های برداری برخوردار است. یعنی عرض جریان می‌تواند به صورت تابعی از شرایط توپوگرافی تغییر کند. استفاده از DEMON اصلاح شده در نرم‌افزار TAPES-G توسط Moore (۱۹۹۶) گزارش شده است. اما DEMON نیز اشکالاتی دارد. نحوه برآزش صفحه بر چهارگوشه هر سلول چنان است که علاوه بر امکان ایجاد سطوح ناهماهنگ در محل اتصال صفحات سلول‌ها، می‌تواند لوب‌هایی بی‌انتهای در مسیر جریان ایجاد نماید. در این مورد Tarboton اظهار داشت که DEMON نمی‌تواند برای هر نوع DEM به جواب برسد و از نظر برنامه نویسی بسیار مشکل است (Tarboton, 1997). الگوریتم DEMON را جابجا کرده و در گوشه‌های صفحه از تقریب عددی استفاده می‌کند. نحوه عملکرد دو بعدی DEMON عملاً این الگوریتم را در مقابل مناطق مسطح حساس ساخته و باعث می‌شود نتواند از مناطق مزبور بطور اتوماتیک عبور کند (Tarboton, 2000). علاوه بر این، این الگوریتم خود تولید کننده گودال‌های مصنوعی است.

خصوص در دامنه تپه‌ها و مناطق دارای حالت واگرا از دقت لازم برخوردار نمی‌باشد (Quinn et al., 1995). آنها به این نتیجه رسیدند که در دامنه‌های شیب‌دار، نتایج روش MFD بسیار مقرون به واقعیت و به همان نسبت D8 دور از واقعیت است. در مقابل، زمانی که جریان به آبراهه‌ها می‌رسد، D8 با توجه به یک جهته بودن، واقعیت وجود آبراهه را بیشتر نشان می‌دهد حال آنکه روش MFD بدون توجه به جهت اصلی جریان به پخش آن در جهات مختلف ادامه می‌دهد. در صورتی که استخراج آبراهه‌ها با استفاده از این الگو مورد نظر باشد، وضوح نقشه‌ها به حد وضوح نقشه‌های حاصل از اعمال روش D8 نخواهد بود. Quinn et al. (1995) راه حل تحمیل نقشه آبراهه‌ها بر DEM و عدم اعمال روش MFD روی سلول‌های موجود در آبراهه‌ها را پیشنهاد می‌کنند. بزرگترین اشکال روش MFD آن است که جریان را به تمام سلول‌های همسایه با ارتفاع کمتر توزیع کرده و به این علت میزان پخشیدگی جریان در حوضه را بیش از واقعیت بدست می‌دهد (Tarboton, 1997). مشکل دیگر این روش این است که TCA هر سلول در روش MFD دربرگیرنده تمام سلول‌هایی است که درون یک مثلث جای می‌گیرند. براین اساس، TCA محاسبه شده زمانی درست خواهد بود که سلول مورد نظر به اندازه کافی از مرزهای جانبی حوضه دور باشد. در غیر این صورت مثلث مزبور کامل نشده و TCA کمتر از حالت نرمال برآورد می‌شود. به دلیل این اشکالات، استفاده از الگوریتم MFD برای ردیابی مواد آلاینده و نیز توزیع رواناب توصیه نمی‌شود (Costa-Cabral and Burges, 1994).

Lea (۱۹۹۲) الگوریتمی به نام Aspect Driven algorithm را مطرح نمود تا بتواند به کمک آن، مشکل محدود بودن مسیرهای جریان در الگوریتم D8 را برطرف کند و جریان را در جهت امتداد شیب دامنه واقعی هدایت نماید. وی جریان را همچون تویی غلطان تعریف می‌کند که از مرکز

اساس درصدی از زاویه ۴۵ درجه انجام می‌شود. این نحوه تقسیم جریان در مقابل الگوریتم‌های Lea و DEMON مبنای تئوریک ندارد.

در تحقیق حاضر تلاش شده است که علاوه بر شناساندن الگوریتم‌های موجود برای مسیریابی جریان به محققان هیدرولوژی و منابع آب، به چند سؤال مهم در ارتباط با الگوریتم‌های موجود برای تعیین مسیر و تقسیم جریان (تقسیم جرم) پاسخ داده شود. اولین سؤال این است که جایگاه این روش‌ها در مقایسه با هم چیست و مواردی که توسعه دهندگان هر الگوریتم در مورد دیگر الگوریتم‌ها به عنوان نقد روش ارائه کرده‌اند تا چه حد صحیح است؟ پاسخ به این سؤال از این دیدگاه مهم است که در مطالعات انجام شده با این وسعت پرداخته نشده و عملاً تصمیم‌گیری برای استفاده از الگوریتم‌ها مبتنی بر نظر کارشناسی و یا در دسترس بودن یک نرم‌افزار ویژه است. سؤال دیگر این است که آیا مهمترین پارامتر حاصل از توپوگرافی یعنی شیب که عامل حرکت و توزیع جریان در همه این الگوریتم‌ها است، حساسیتی به الگوریتم ندارد و فرقی میان مناطق کم‌شیب و پرشیب از دیدگاه بررسی راندمان این الگوریتم‌ها وجود ندارد؟ اگر حساسیتی در این میان وجود دارد آیا آستانه‌ای برای آن قابل تعریف است؟ یعنی می‌توان به درصدی از شیب رسید که در بالاتر از آن نتوان تمایزی میان الگوریتم‌ها قائل شد؟ در پایین‌تر از این آستانه کدام الگوریتم، الگوی واقع‌گرایانه‌تری از توزیع جریان را بدست می‌دهد؟ این سؤالی است که با وجود اهمیت زیاد، تاکنون جواب روشنی برای آن بدست نیامده است. در این تحقیق با استفاده از کدهای توسعه داده شده برای مسیریابی جریان توسط هر کدام از ۵ الگوریتم یاد شده، به این سؤالات پاسخ داده می‌شود.

## ۲- روش تحقیق

در این تحقیق از ۵ الگوریتم مسیریابی جریان، مطابق آنچه

مؤلفان در کار با این الگوریتم، به دفعات این موضوع را مشاهده کردند. این امر سبب می‌شود که DEM هیدرولوژیکی تولید شده در این روش، تغییرات زیادی داشته باشد.

در الگوریتم معرفی شده توسط Tarboton (۱۹۹۷) و  $D_{\infty}$  بنام  $D_{\infty}$  سعی شده است تا واقعیت انتقال جریان به دو سلول پایین‌دست استفاده شود و در عین حال از برازش صفحه بر چهار گوشه سلول خودداری شود. الگوریتم یاد شده به جای استفاده از مفهوم لوله جریان<sup>۱</sup>، از شیب سلول‌ها استفاده می‌کند. این الگوریتم سعی دارد با تخصیص فقط یک جهت به جریان، از سادگی مدل D8 برای روندیابی جریان برخوردار شود.

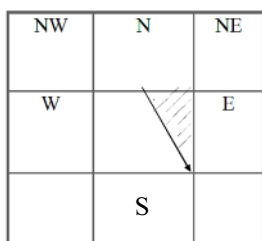
بعد از D8 شاید به جرأت بتوان گفت که  $D_{\infty}$  بیشترین کاربرد را در مهندسی آب دارد. به عنوان مثال می‌توان از مطالعات Yang و همکاران (۲۰۰۵) برای استخراج سطوح کاربری خاک با استفاده از DEM و لایه‌های کاربری اراضی به کمک روش  $D_{\infty}$  و بکارگیری نرم‌افزار TauDEM نام برد. در آخرین تلاشی که توسط Tarboton و همکاران صورت گرفته است از الگوریتم‌های D8 و  $D_{\infty}$  برای معرفی یک مدل محاسبه و توزیع جریان به سمت پایین‌دست به نام flow algebra استفاده شده است.

گزارش جدیدی که الگوریتم  $D_{\infty}$  را نقد کرده باشد در دست نیست. ظاهراً سادگی روش در حد سادگی الگوریتم  $D_{\infty}$  و توانایی‌هایش در حد توانایی مدل دو بعدی DEMON و بدون اشکالات روش‌های دیگر است، ولی چند نکته در مورد این مدل لازم به توضیح می‌باشد:

۱- با وجود تخصیص جریان به یک یا دو سلول، هنوز جریان در مرکز گره‌ها تجمع یافته و سپس توزیع می‌شود (بدون بعد؛ نقطه‌ای<sup>۲</sup>) -۲- به علت محدودیت تصمیم‌گیری به یک مثلث از هشت مثلث برازش داده شده بر صفحه سلول، توزیع جریان از هر سلول به سلول‌های دیگر بر

1. Flow Tube  
2. Non-Dimensional, Point Source

که سهمی از جریان سلول تحت مطالعه را دریافت می‌نمایند، تعیین می‌شود. به ماتریس حاصل، ماتریس تأثیر<sup>۲</sup> می‌گویند. ماتریس تأثیر برای تمامی سلول‌های DEM تعیین شده و سپس با جمع کردن مقادیر تجمعی جریان برای هر سلول، TCA سلول‌ها بدست می‌آید. نکته مهم در مورد الگوریتم DEMON آن است که جریان به سلول‌های قطری به طور مستقیم منتقل نمی‌شود و انتقال جریان به این سلول‌ها از سلول‌های جانبی صورت می‌گیرد. جریانی که در قسمت مثلثی شکل ۲ بوجود می‌آید، به سلول E و بقیه جریان به سلول S تخلیه می‌شود.

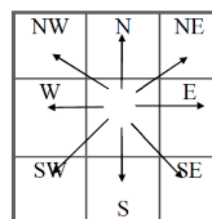


شکل ۲ نحوه توزیع جریان در الگوریتم DEMON

به منظور انجام روندیابی در الگوریتم D $\infty$ ، مانند شکل ۳ برای هر سلول یک پنجره ۳×۳ در نظر گرفته شده و با اتصال مرکز سلول‌های مجاور به مرکز سلول مورد نظر، هشت مثلث تشکیل می‌شود (Tarboton et al., 2009). در ابتدا شیب هر یک از مثلث‌ها تعیین می‌شود و سپس بر شیب‌ترین مثلث انتخاب شده و بر حسب زاویه‌ای که در مثلث دارای شیب حداکثر برای جریان بدست می‌آید، جریان به تناسب بین دو سلول مجاور تقسیم می‌شود. اگر شیب موجود چنان باشد که جهت جریان مضربی از  $\pi/4$  و  $\pi/2$  نیز صفر شود، جریان تنها به یک سلول و در غیر این صورت متناسب با نزدیکی خط جریان به خط متصل کننده مراکز دو سلول مجاور به مرکز سلول مورد نظر، بین آنها تقسیم می‌شود. از دو سلول یاد شده که جریان را

که در بخش مقدمه ذکر گردید، استفاده شده است. برای آشنایی با نحوه عملکرد این الگوریتم‌ها به طور خلاصه روش تحلیل سه الگوریتم D8، DEMON و D $\infty$  تشریح می‌شود.

در روش D8، سلول‌ها روی گره‌های نقشه DEM تشکیل شده و جریان هر سلول به یکی از هشت سلول مجاور خود می‌ریزد و یا آنها را تخلیه می‌کند. در این الگوریتم تخلیه و یا سرریز در جهت بزرگترین شیب صورت می‌پذیرد (شکل ۱). الگوریتم D8 فقط چهار جهت اصلی E, W, S, N و چهار جهت فرعی NE, NW, SE, SW را می‌پذیرد. به عبارت بهتر این الگوریتم جریان را در جهت‌هایی که مضربی از ۴۵ درجه باشند هدایت می‌کند. به عنوان مثال اگر زاویه شیب دامنه<sup>۱</sup> روی یک سطح بین ۳۳۷/۵ تا ۲۲/۵ درجه باشد جریان به سمت شمال هدایت خواهد شد. در این صورت الگوریتم D8 جریان‌ها را به صورت خطوطی موازی در امتدادهای خاص هدایت می‌کند. Fairfield و Leymarie (۱۹۹۱) و همچنین Moore (1996) وجود چنین موردی را گزارش کرده‌اند و در مطالعات خود به این نتیجه رسیده‌اند که چنین پدیده‌ای از خواص و طبیعت روش D8 بوده و تغییر ابعاد و اندازه‌های سلول‌ها تأثیری در نتیجه نخواهد داشت.



شکل ۱ مسیرهای ۸ گانه هدایت جریان در الگوریتم D8

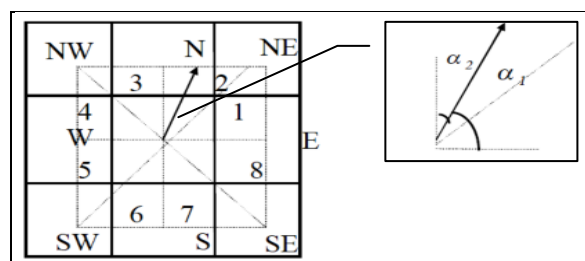
نحوه محاسبه TCA در DEMON به این صورت است که برای هر سلول، ابتدا کل منطقه تحت تأثیر یعنی سلول‌هایی

دریافت می‌کنند همواره یک سلول در جهت اصلی و یک سلول قطری خواهد بود. بر اساس این توضیح، مدل مزبور از توانایی مدل Lea برای شبیه‌سازی پیوسته جریان (بین صفر و ۳۶۰ درجه) برخوردار است. به همین علت، Tarboton الگوریتم پیشنهادی خویش را  $D_{\infty}$  نامیده است. در شکل ۳ سلول‌های E و N متناسب با زوایای  $\alpha_1$  و  $\alpha_2$  از سلول مرکزی جریان خود را دریافت خواهند کرد. ضرورت استفاده از الگوریتم‌های روندیابی جریان در بستر GIS وجود لایه رقمی ارتفاعی DEM. به دست آوردن یک DEM قابل قبول به عوامل مختلفی از جمله حجم داده‌های نقطه‌ای و برداری برداشت شده، ابعاد سلول‌ها و روش بر آورد نقاط مجهول بستگی دارد. برای بررسی دقیق‌تر موضوع اصلی تحقیق و عدم دخالت عواملی مانند اثر روش میان‌یابی برای تولید DEM، روش تولید لایه سلولی ارتفاعی در همه حالت‌ها یکسان در نظر گرفته شده است. برای ساخت لایه رقمی ارتفاعی از ابزار Topo To Raster در Arc Toolbox و در محیط ArcMap استفاده شد. برای تولید DEM از لایه‌های توپوگرافی، نقاط ارتفاعی و نیز شکستگی‌های موجود در سطح زمین استفاده به عمل آمد.

سلول‌های گود افتاده<sup>۱</sup> موجود "پر"<sup>۲</sup> شده و از اختلال در امر مسیریابی آبراهه‌ها جلوگیری می‌شود. برای تولید این DEM از ابزار Fill Sink موجود در Arc Toolbox استفاده شد. ArcGIS برای پرکردن گودال‌ها از الگوریتمی استفاده می‌کند که در آن سلول مربوط به گود افتادگی با توجه به سلول‌های مجاور آنقدر بالا آورده می‌شود که بتواند جریان خود را به یکی از سلول‌های پایین‌دست منتقل نماید. بدیهی است که در اثر این کار و درون‌یابی جدید بر اساس ارتفاع تخصیص داده شده به سلول گود افتاده، توپوگرافی اطراف سلول دست خواهد خورد و تا حدودی با واقعیت موجود در زمین متفاوت خواهد بود (Poggio and Soille, 2012).

در ادامه کار، برای هر DEM هیدرولوژیکی تولید شده، در ابتدا با توجه به الگوریتم مورد نظر لایه جهت جریان<sup>۳</sup> و تجمع جریان<sup>۴</sup> تولید می‌شود. سپس با ابزار اختصاصی Channel Network و با تعریف حد آستانه جریان<sup>۵</sup> که می‌تواند درصدی از عدد تجمع جریان در هر سلول از لایه مزبور باشد شبکه آبراهه‌ها استخراج می‌شود. عدد موجود در هر سلول از لایه تجمع جریان، معرف تعداد سلول‌هایی است که به سلول مورد نظر تخلیه می‌شوند. برخی از متخصصان این عدد را به عنوان کل جریان مشارکت کننده تا سلول مورد مطالعه خوانده‌اند. با توجه به اینکه مناطق مورد مطالعه از تنوع توپوگرافی خاصی برخوردار بودند، اثر شیب‌های مختلف در نحوه عملکرد آبراهه‌ها ارزیابی شد. لایه شیب بر حسب درصد و با استفاده از دستور Slope در نوار ابزار Spatial Analyst تهیه می‌شود. با توجه به توزیع آبراهه‌های تولیدی در سطح منطقه با استفاده از Symbology کردن لایه شیب و طبقه‌بندی آنها، نحوه استخراج آبراهه‌ها در هر

دریافت می‌کنند همواره یک سلول در جهت اصلی و یک سلول قطری خواهد بود. بر اساس این توضیح، مدل مزبور از توانایی مدل Lea برای شبیه‌سازی پیوسته جریان (بین صفر و ۳۶۰ درجه) برخوردار است. به همین علت، Tarboton الگوریتم پیشنهادی خویش را  $D_{\infty}$  نامیده است. در شکل ۳ سلول‌های E و N متناسب با زوایای  $\alpha_1$  و  $\alpha_2$  از سلول مرکزی جریان خود را دریافت خواهند کرد. ضرورت استفاده از الگوریتم‌های روندیابی جریان در بستر GIS وجود لایه رقمی ارتفاعی DEM. به دست آوردن یک DEM قابل قبول به عوامل مختلفی از جمله حجم داده‌های نقطه‌ای و برداری برداشت شده، ابعاد سلول‌ها و روش بر آورد نقاط مجهول بستگی دارد. برای بررسی دقیق‌تر موضوع اصلی تحقیق و عدم دخالت عواملی مانند اثر روش میان‌یابی برای تولید DEM، روش تولید لایه سلولی ارتفاعی در همه حالت‌ها یکسان در نظر گرفته شده است. برای ساخت لایه رقمی ارتفاعی از ابزار Topo To Raster در Arc Toolbox و در محیط ArcMap استفاده شد. برای تولید DEM از لایه‌های توپوگرافی، نقاط ارتفاعی و نیز شکستگی‌های موجود در سطح زمین استفاده به عمل آمد.

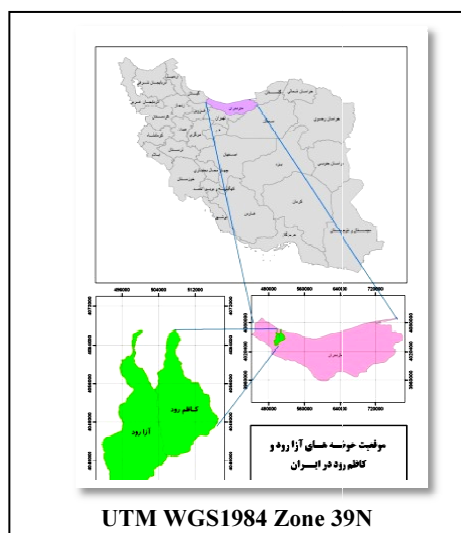


شکل ۳ تشکیل مثلث‌های هشت‌گانه به منظور تعیین جهت جریان در الگوریتم  $D_{\infty}$

اکنون نیاز است که DEM تولید شده اصلاح و به DEM هیدرولوژیکی ارتقاء یابد. در DEM هیدرولوژیکی،

1. Sink
2. Fill
3. Flow Direction
4. Flow Accumulation
5. Stream Threshold

طول جغرافیایی "۳۰' ۵۲' ۵۰" تا "۳' ۱۵' ۵۱" و عرض جغرافیایی "۲۶' ۲۲' ۳۶" تا "۲۸' ۵۲' ۵۰" قرار گرفته‌اند. ارتفاعات این منطقه دارای تغییرات شدید بوده و از سمت جنوب به شمال از مقدار آن کم می‌شود تا سرانجام به دریای خزر منتهی می‌شود. شکل ۴ موقعیت حوضه‌های مطالعاتی را در کشور نشان می‌دهد. در این تحقیق برای مناطق یاد شده با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی سازمان نقشه‌برداری کشور اقدام به تهیه DEM شد. سپس با استفاده از کدهای توسعه داده شده، لایه‌های جهت جریان و تجمع جریان با پنج روش و برای آستانه‌های مختلف جریان، شبکه آبراهه‌ها استخراج شدند.



شکل ۴ موقعیت منطقه مطالعاتی

کلاس شیب به دقت بررسی شد و در شیب‌های مختلف، آبراهه‌های تولید شده مقایسه شدند. نتایج حاصل از این بررسی نشان دادند که در تمامی روش‌های مورد بررسی، آبراهه‌ها در شیب‌های زیر ۵ درصد با ایجاد آبراهه‌های موازی و اختلال در مسیریابی جریان دچار مشکل می‌شوند. این امر در نقشه‌های تولید شده با نشان دادن ۲ کلاس شیب (زیر ۵ درصد و بالای ۵ درصد) نشان داده شده است. برای بررسی میزان انطباق آبراهه‌ها با آبراهه‌های سازمان نقشه‌برداری، از نقشه‌های ۱: ۲۵۰۰۰ این سازمان که به صورت دو و سه بعدی و با پسوند DGN ارائه می‌شود استفاده شد. برای این مقایسه، ابتدا لایه وکتوری آبراهه‌های سازمان نقشه‌برداری با استفاده از دستور vector to raster به فرمت رستر تبدیل شد. روی هم‌گذاری لایه‌ها با استفاده از ابزار Spatial Analyst و ابزار Raster Calculator انجام می‌شود. با ضرب لایه‌های مورد نظر در همدیگر فقط سلول‌های مشترک باقی می‌ماند که در نهایت تعداد سلول‌های مشترک برای هر الگوریتم را به دست می‌دهد. برای بررسی کیفیت کار الگوریتم‌های یاد شده، خروجی حوضه، براساس شناسایی سلولی که دارای بالاترین مقدار تجمع جریان می‌باشد، تعیین و سپس با خروجی روی نقشه برداری مقایسه می‌شود. نهایتاً مساحت حوضه با توجه به نقشه TCA توسط الگوریتم‌ها برآورد شده و با مساحت پلیگون معرف حوضه روی نقشه برداری مقایسه می‌شود.

### مناطق مورد مطالعه

به منظور مطالعه و انجام مقایسه‌های لازم، دو حوضه آبریز که در مطالعات طرح جامع مهندسی رودخانه‌های مازندران مورد توجه بوده‌اند (شرکت آب انرژی محیط، ۱۳۹۰) و تغییرات مناسبی از شیب در آنها به خوبی قابل تشخیص است بررسی شدند. دو حوضه منتخب، حوضه‌های آزا رود و کاظم رود در استان مازندران می‌باشند که در فاصله

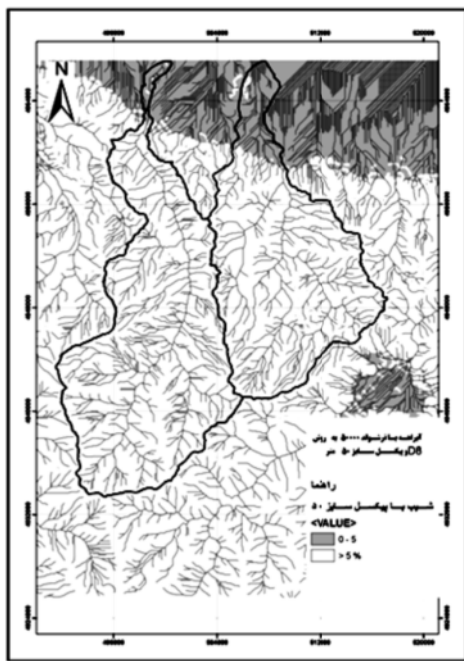
### ۳- تجزیه و تحلیل نتایج

برداشت اولیه در مورد تأثیر عامل شیب بر الگوی آبراهه‌ها این است که در صورت بالا بودن گرادیان شیب، تکلیف جریان مشخص بوده و با هر الگوریتمی که مورد استفاده قرار گیرد، جریان دارای جهتی معین خواهد بود. نکته مهمی که در صورت صحت این ادعا باید به آن پرداخت، پیدا کردن شیب بحرانی است که بعد از آن، اثر عامل

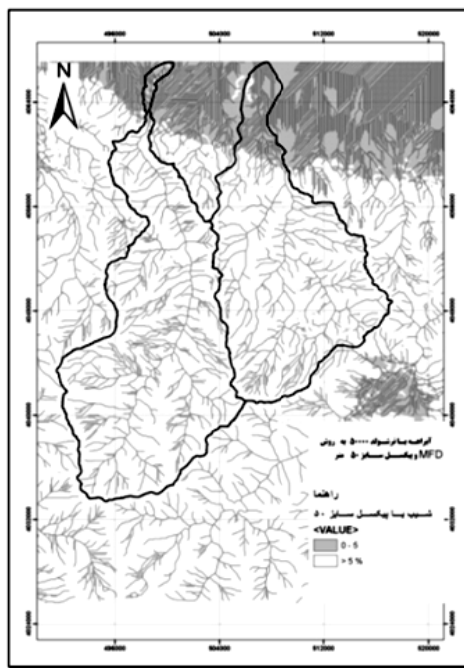


گرادیان حذف شده و تفاوت میان روشها آشکار می‌شود. برای بررسی اثر شیب روی توانایی الگوریتم‌های مختلف در استخراج آبراهه‌ها نقشه شیب به دست آمد و آبراهه‌ها

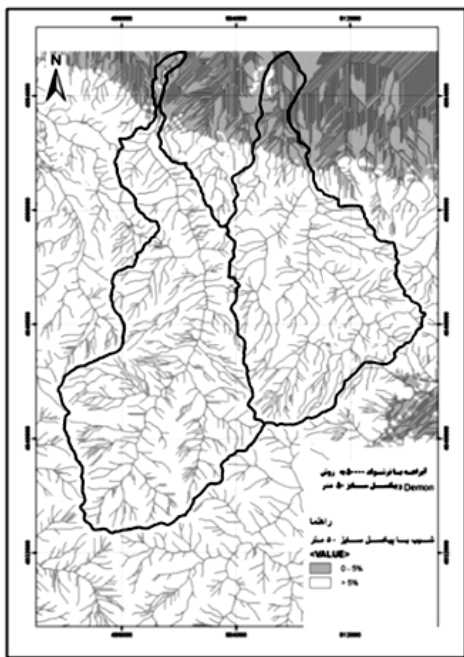
بر روی آن قرار داده شدند. شکل‌های ۵ تا ۹ نتیجه اعمال الگوریتم‌های یاد شده بر دو حوضه آبریز آزارود و کاظم رود را نشان می‌دهند.



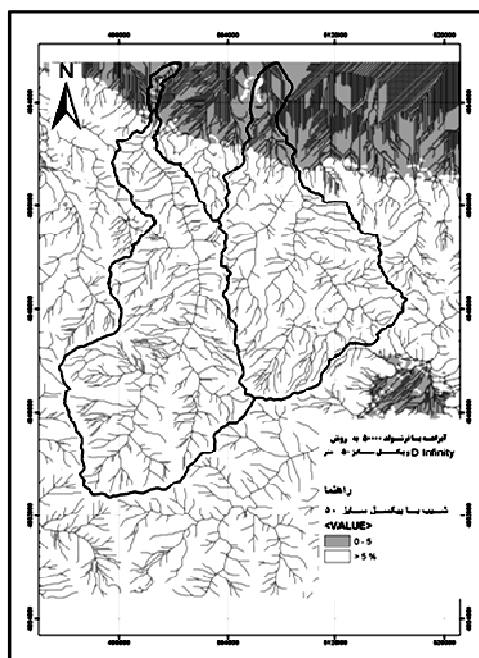
شکل ۶ آبراهه‌های حاصل از روش MFD



شکل ۵ آبراهه‌های حاصل از روش D8



شکل ۸ آبراهه‌های حاصل از روش DEMON



شکل ۷ آبراهه‌های حاصل از روش D∞

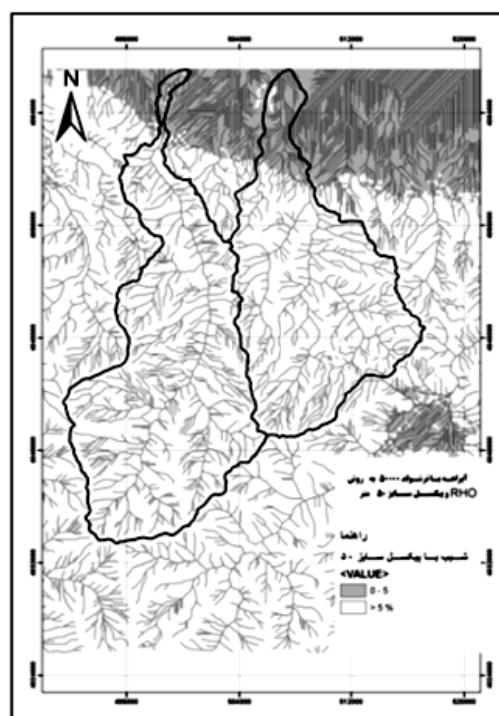
۴- برای بررسی وضعیت پخشیدگی جریان در دامنه‌های پرشیب، شکل ۱۰ تهیه شده است که در واقع بخشی از نقشه TCA در قسمت پرشیب دوحوضه مورد مطالعه می‌باشد. در این تصویر عملاً تفاوتی در مسیر اصلی جریان بین الگوریتم‌ها دیده نمی‌شود ولی پخشیدگی جریان در مورد MFD در اینجا نیز به خوبی مشاهده می‌شود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود RHO8 و DEMON دارای کمترین پخشیدگی بوده و پس از آنها D8، D∞ و نهایتاً MFD قرار می‌گیرند.

۵- برای بررسی مسئله پخشیدگی جریان در قسمت‌های کم شیب، شکل ۱۱ تهیه گردید که در آن وضعیت TCA برای همه الگوریتم‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در این بخش نتایج حاصل شده که ادعاهای مطرح شده در بخش مقدمه در مورد الگوریتم‌های مورد بحث را تأیید نمی‌کند. همان‌طور که دیده می‌شود الگوریتم‌های RHO8 و DEMON در مقایسه با روش‌های D8 و MFD پخشیدگی زیادی ندارند. در عین حال می‌توان دید که بین دو الگوریتم MFD و D8، با وجود تولید جریان‌های موازی کمتر در روش MFD، این D8 بوده که توانسته است با حفظ الگوی عمومی جریان خود را به خروجی اصلی حوضه نزدیک برساند. براساس نتایج حاصل می‌توان از نظر میزان پخشیدگی در قسمت کم شیب حوضه، الگوریتم‌ها را به این صورت رتبه‌بندی کرد:

۱- DEMON - ۲- RHO8 - ۳- D∞ - ۴- D8 - ۵- MFD.

### صحت‌سنجی نتایج الگوریتم‌ها

برای برآورد میزان دقت الگوریتم‌ها در استخراج آبراهه‌ها، از نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه برداری کشور استفاده شد. برای هر یک از الگوریتم‌ها، لایه سلولی مربوط به آبراهه‌ها بدست آورده شد و سپس با لایه آبراهه‌های سازمان نقشه‌برداری کشور - که برای انجام مقایسه با همان اندازه سلول مورد استفاده برای الگوریتم‌ها سلولی شد-



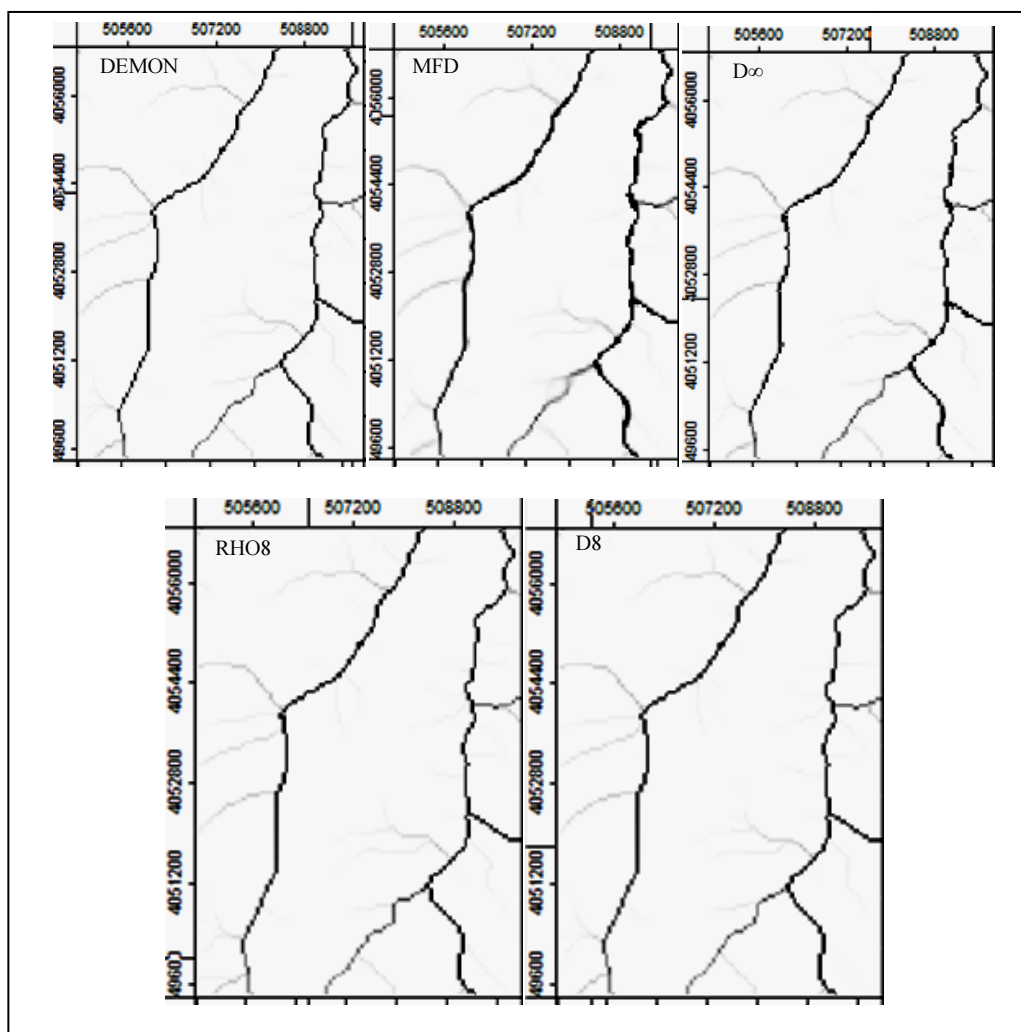
شکل ۹ آبراهه‌های حاصل از روش RHO8

همان‌طور که ملاحظه می‌شود:

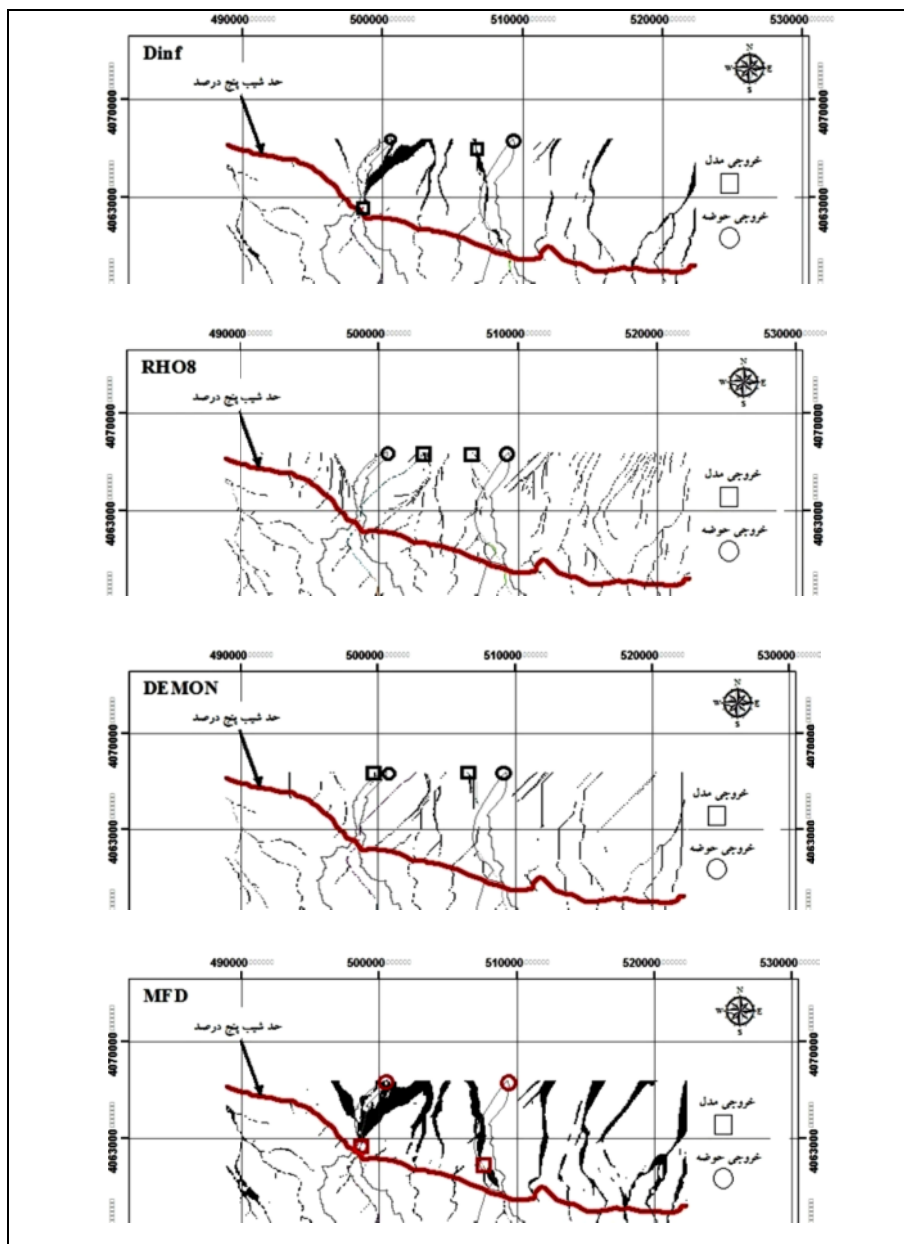
- ۱- در شیب‌های زیاد و در مناطق کوهستانی، الگوریتم‌های مختلف تفاوت چندانی به لحاظ مسیر جریان روندیابی شده نسبت به یکدیگر ندارند.
- ۲- برای دو ناحیه مورد مطالعه در شیب‌های کمتر از ۰.۵٪، الگوریتم‌های مختلف با اشکال مواجه شده، مسیر آبراهه‌ها را گم کرده و باعث به وجود آمدن جریان‌های موازی می‌شوند. این امر بیانگر این مطلب است که به طور کلی در استفاده از نتایج الگوریتم‌های مختلف مسیریابی جریان در شیب‌های کمتر از ۰.۵٪ باید جانب احتیاط را رعایت کرد.
- ۳- ادعای صورت گرفته در مورد الگوریتم RHO8 مبنی بر زیگزاگ شدن مسیر در جریان‌های موازی قابل اثبات نیست. در حالی که این مشکل برای هر دو حوضه مورد مطالعه باید برای شیب‌های کم رخ دهد، اما بررسی مسیرهای جریان بدست آمده در الگوریتم RHO8 نقطه ضعف خاصی را در مقام مقایسه با دیگر روش‌ها نشان نمی‌دهد.

سلول‌ها (مساحتی) است که باید به یک سلول تخلیه شود تا سلول آبراهه‌ای محسوب شود. براین اساس برای سه حد آستانه ۵۰۰۰، ۵۰۰۰۰ و ۲۰۰۰۰۰، آبراهه‌های مصنوعی استخراج و با آبراهه‌های نقشه ۱:۲۵۰۰۰ مقایسه شدند. این محدوده‌های بالا و پایین صرفاً با آزمون و خطا تعیین شده و از تئوری خاصی برای تعیین آنها استفاده نشد. با آستانه پایین‌تر از ۵۰۰۰، دو روش MFD و DEMON نتوانستند شبکه آبراهه مناسب تولید نمایند و برای آستانه‌های بالاتر از ۲۰۰۰۰۰ عملاً تفاوتی در شکل آبراهه‌ها و تعداد سلول‌های مشترک میان الگوریتم‌ها و سلول‌های آبراهه نقشه ۱:۲۵۰۰۰ ملاحظه نشد.

روی هم‌گذاری و تعداد سلول‌های مشترک برای هر مورد شمارش گردید. شکل ۱۲ نمونه‌ای از نحوه انطباق شبکه آبراهه مصنوعی و شبکه آبراهه‌های نقشه ۱:۲۵۰۰۰ را نشان می‌دهد. جدول ۱ خلاصه‌ای از نتایج شمارش سلول‌های مشترک را بدست می‌دهد. نکته قابل توجه در تهیه این جدول آن است که برای لایه‌های مختلف هیچ آستانه خطایی در نظر گرفته نشده است و فقط سلول‌هایی شمارش شده‌اند که کاملاً با لایه آبراهه‌های ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری منطبق بوده‌اند. برای تولید آبراهه لازم است که آستانه‌ای برای سلول‌های آبراهه تعیین کرد. این آستانه معرف تعداد



شکل ۱۰ نمایش پخشیدگی جریان در الگوریتم‌های مختلف در منطقه پرشیب



شکل ۱۱. نمایش پخشیدگی جریان در منطقه کم‌شیب

شبکه مناسبی از آبراهه‌ها را تولید کند، حال آنکه شکل‌های ۱۰ و ۱۲ نشان از موفقیت این الگوریتم در تولید آبراهه‌هایی نزدیک به آبراهه‌های نقشه ۱:۲۵۰۰۰ به خصوص در محدوده شیب بزرگتر از ۵ درصد دارند. با استفاده از اطلاعات جدول ۱، شکل ۱۳ برای نمایش تأثیر انتخاب آستانه روی میزان انحراف الگوریتم‌های مختلف از آبراهه‌های تعریف شده روی نقشه ۱:۲۵۰۰۰

نکته مهمی که لازم است در مورد نتایج مندرج در جدول ۱ مورد توجه قرار گیرد آن است که ارقام جدول معرف توانایی و یا عدم توانایی الگوریتم‌ها در شبیه‌سازی الگوی زهکشی حوضه نمی‌باشند. به عنوان مثال میزان انطباق مطلق روش D8 و آبراهه‌های سازمان نقشه‌برداری برای آستانه جریان ۲۰۰۰۰۰ معادل ۱۴ درصد می‌باشد. برآورد اولیه از این رقم آن است که این الگوریتم نتوانسته

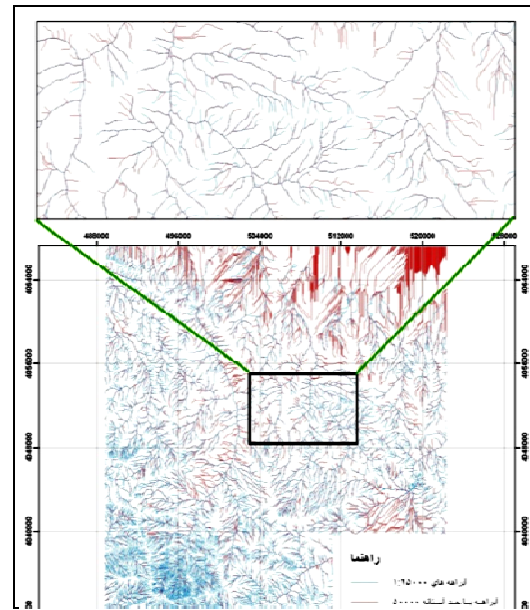
خروجی تولید شده، از خروجی موجود روی نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰ ارزیابی کرد. از این دیدگاه می‌توان الگوریتم‌ها را به این صورت رتبه‌بندی کرد: ۱- DEMON ۲- D8 ۳- RHO8 ۴- D<sub>∞</sub> ۵- MFD.

عامل سومی که می‌تواند به ارزیابی صحت عملکرد الگوریتم‌ها کمک نماید، مقایسه مساحت حوضه آبریز بدست آمده از آنها با مساحت پلیگون معرف حوضه روی نقشه برداری می‌باشد. در واقع بزرگترین مقدار TCA بدست آمده در هر الگوریتم مبین مساحت حوضه آبریز منتهی به آن نقطه می‌باشد. جدول ۲ خلاصه نتایج حاصله و شکل ۱۴ مساحت حوضه‌های مورد مطالعه را به تفکیک منطقه پرشیب و کم شیب نشان می‌دهد.

جدول ۱ تعداد سلول‌های مشترک آبراهه در روش‌های مختلف، آستانه‌های مختلف و نقشه ۱:۲۵۰۰۰

الگوریتم	تعداد سلول‌های کاملاً منطبق	تعداد کل سلول‌ها	درصد سلول‌های کاملاً منطبق	آستانه تولید آبراهه
MFD	۸۴۰۱	۶۱۱۱۸	۱۳/۷۵	۲۰۰۰۰
DEMON	۹۳۹۷	۶۷۹۹۰	۱۳/۸۲	
RHO8	۹۵۷۰	۶۸۹۳۳	۱۳/۸۸	
D <sub>∞</sub>	۸۹۶۴	۶۴۳۵۳	۱۳/۹۲	
D8	۹۴۲۲	۶۵۲۲۷	۱۴/۴۴	
RHO8	۱۳۳۷۴	۱۲۰۵۸۹	۱۱/۰۹	۵۰۰۰۰
DEMON	۱۳۳۱۴	۱۱۵۶۶۶	۱۱/۵۱	
MFD	۱۲۷۸۷	۱۰۹۳۲۳	۱۱/۷۰	
D8	۱۳۰۵۳	۱۰۹۱۲۱	۱۱/۹۶	
D <sub>∞</sub>	۱۲۴۲۹	۱۰۲۴۳۱	۱۲/۱۳	
DEMON	۱۳۳۱۴	۲۷۷۳۴۷	۴/۸۰	۵۰۰۰
MFD	۲۰۲۶۲	۲۷۵۶۰۵	۷/۳۵	
RHO8	۱۹۸۸۳	۲۶۶۱۹۵	۷/۴۷	
D <sub>∞</sub>	۲۰۳۴۶	۲۷۱۰۸۴	۷/۵۱	
D8	۲۰۰۶۱	۲۶۴۴۱۵	۷/۵۹	

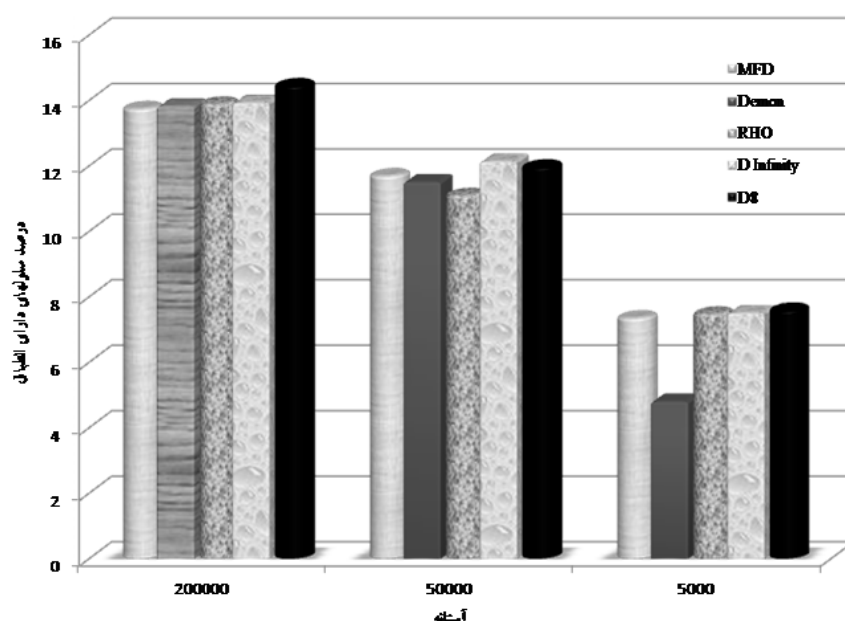
تهیه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با کاهش آستانه جریان (که به مفهوم کمتر کردن تعداد سلول‌های مشارکت کننده لازم برای تولید آبراهه می‌باشد)، میزان تطابق آبراهه‌های استخراج شده توسط الگوریتم‌ها و نقشه ۱:۲۵۰۰۰ کاهش می‌یابد.



شکل ۱۲ مقایسه میزان انطباق آبراهه‌های استخراج شده توسط الگوریتم D8 و نقشه ۱:۲۵۰۰۰

در هر حال به دلیل معنی‌دار نبودن تفاوت میان الگوریتم‌های مختلف در میزان سلول‌های منطبق شده می‌توان بار دیگر این نتیجه را مورد تأکید قرار داد که در شیب‌های بالاتر از شیب آستانه، تفاوت معنی‌داری میان الگوریتم‌های مختلف در تولید شبکه آبراهه‌ها دیده نمی‌شود.

عامل دوم قابل استناد در ارزیابی کار الگوریتم‌ها تعیین درست محل خروجی حوضه می‌باشد. خروجی حوضه طبق تعریف سلولی است که دارای بیشترین TCA باشد. همان‌طور که در شکل ۱۱ ملاحظه می‌شود الگوریتم‌های مختلف به نتایج گوناگونی رسیده‌اند و بر این اساس می‌توان موفقیت آنها را با توجه به دوری و نزدیکی



شکل ۱۳ نمایش تأثیر انتخاب آستانه روی میزان انطباق الگوریتم‌های مختلف با آبراهه‌های تعریف شده روی نقشه ۱:۲۵۰۰۰

آستانه برای حوضه آزارود خود گواه این امر می‌باشد. مشخصاً، بهترین نتیجه در همه حالت‌ها از آن روش RHO8 و پس از آن DEMON است. حاصل کار روش‌های MFD و  $D_{\infty}$  برای حوضه آزارود ظاهراً مناسب است ولی نزدیکی نتایج، نه به دلیل دقت این روش‌ها و بلکه ناشی از برآورد اشتباه موقعیت خروجی حوضه در نزدیکی محل شیب آستانه به جای خروجی واقعی است (شکل ۱۱). وضعیت D8 در زیاد برآورد کردن مساحت حوضه آزارود در مقابل دیگر روش‌ها نیز در این میان قابل توجه می‌باشد. نکته جالب دیگر که این بررسی به آن رسیده است وضعیت بسیار مناسب DEMON در مقابل  $D_{\infty}$  و اثبات نشدن ایراداتی است که Tarboton (۱۹۹۷) و (۲۰۰۰) به نفع  $D_{\infty}$  بر این الگوریتم وارد نموده است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

مسئله مدل‌سازی هیدرولوژیکی و استفاده از مدل‌های رقمی ارتفاعی سبب توسعه الگوریتم‌های مختلف مسیریابی جریان از سه دهه پیش به این طرف شده است. استخراج مرزهای حوضه و شبکه مصنوعی آبراهه‌ها هر چند در

همان‌طور که ملاحظه می‌شود در مورد هر دو حوضه آزارود و کاظم‌رود الگوریتم‌ها نتوانسته‌اند دقیقاً همان مساحت موجود در نقشه برداری را برگردانند ولی میزان خطا در مورد حوضه کاظم‌رود بیشتر است. علت این امر هم آن است که در حوضه کاظم‌رود مساحت موجود در بخش کم شیب، بیشتر از رودخانه آزارود است.

جدول ۲ مساحت برآورد شده توسط الگوریتم‌های مختلف مسیریابی

الگوریتم	کاظم رود		آزارود	
	در محل شیب آستانه	در انتهای آبراهه اصلی	در محل شیب آستانه	در انتهای آبراهه اصلی
برداری	۱۵۶	۱۶۴	۲۲۸	۲۳۱/۶
D8	۱۵۳	۱۸۶	۲۳۰	۲۳۴
$D_{\infty}$	۱۵۳	۱۸۰	۲۲۹/۵	۲۳۰
RHO8	۱۵۳/۲	۱۸۵	۲۲۹/۵	۲۳۲/۲
DEMON	۱۵۳/۴	۱۸۵/۶	۲۲۹/۵	۲۳۱/۳
MFD	۱۵۰	۱۶۰	۲۲۹/۵	۲۳۰

کم‌بودن خطای مساحت برآورد شده در محدوده شیب

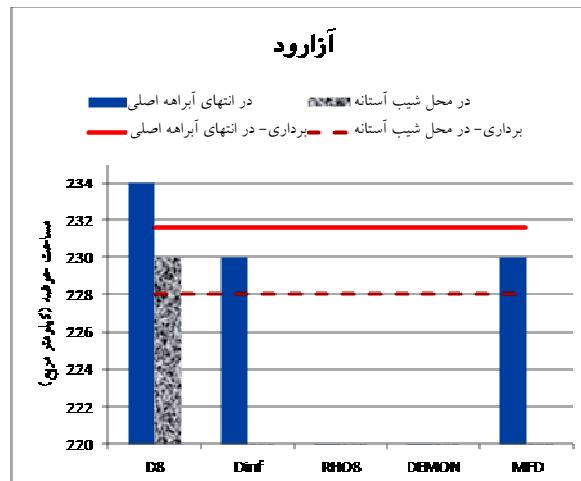
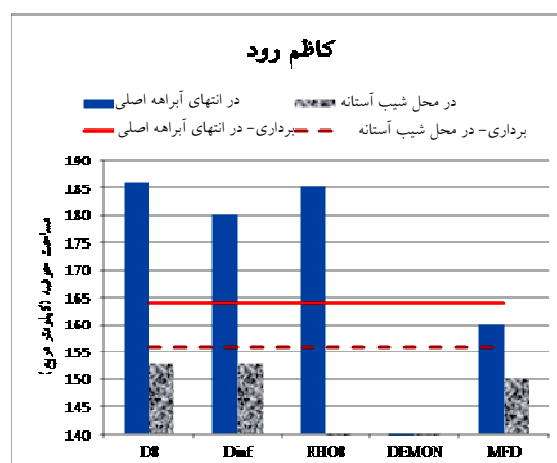
آمد. در این راستا تفاوت روشهای یاد شده در شیبهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه این مطالعه یک شیب آستانه را برای همه الگوریتمهای مورد بررسی بدست داد. مطابق نتایج حاصل در شیبهای بالاتر از ۵ درصد، همه روشها در استخراج شبکه آبراههای نسبتاً موفق ولی در شیبهای کمتر دچار معضل تولید آبراههای غیر واقعی و موازی می‌باشند. هر چه یک الگوریتم بتواند از پخشیدگی جریان در مناطق کم شیب اجتناب نماید، از توانایی بیشتری برای استخراج آبراهها و نزدیکی به واقعیت برخوردار است. از این نظر در بخش پر شیب دو حوضه مورد مطالعه (بیشتر از شیب آستانه ۵٪) کمترین پخشیدگی از آن RHO8 و DEMON و پس از آن D8، D $\infty$  و نهایتاً MFD می‌باشد و در منطقه کم شیب می‌توان به ترتیب الگوریتمهای ۱- DEMON -۲- RHO8 -۳- D $\infty$  -۴- D8 و -۵- MFD را دارای بهترین عملکرد دانست.

در این تحقیق بررسی توأم همه الگوریتمهای مهم مسیریابی جریان در کنار یکدیگر میسر شده و لذا امکان بررسی شبهاتی که در مورد تواناییها و نقاط ضعف الگوریتمهای مختلف توسط توسعه دهندگان الگوریتمهای یاد شده منتشر شده است، فراهم گردید. براساس نتایج بدست آمده در تعیین نقطه خروجی، از سلول دارای بالاترین TCA استفاده به عمل آمد. روش MFD عملاً نتوانست مسیر آبراه اصلی را تا خروجی حوضه که در نقشه‌های برداری قابل استخراج است تعقیب نماید. از دیدگاه دوری و نزدیکی سلول مزبور به خروجی حوضه می‌توان الگوریتمها را به این صورت رتبه‌بندی کرد:

MFD، D $\infty$ ، RHO8، D8، DEMON

برای سه حد آستانه ۵۰۰۰، ۵۰۰۰۰ و ۲۰۰۰۰۰ آبراههای مصنوعی استخراج و با آبراههای نقشه ۱:۲۵۰۰۰ مقایسه شدند. این محدوده‌های بالا و پایین صرفاً با آزمون و خطا تعیین شدند و از تئوری خاصی برای تعیین آنها استفاده

توسعه مدل‌های ریاضی تأثیر زیادی داشته است ولی صحت الگوی بدست آمده و تبعیت آنها از الگوی شبکه رودخانه‌ای واقعی همواره سبب نگرانی محققان بوده است. پیچیدگی روشهای مختلف استخراج مصنوعی شبکه رودخانه‌ای مانعی بر سر راه آزمون سلامت روشهای یاد شده و همچنین مقایسه آنها با یکدیگر شده است.



شکل ۱۴ نمایش تفاوت مساحت برآورد شده حوضه با استفاده از الگوریتمهای مختلف مسیریابی جریان

در این تحقیق با فراهم نمودن بستر لازم برای بکارگیری پنج الگوریتم شناخته شده مسیریابی و استخراج شبکه مصنوعی آبراهها یعنی D8، RHO8، DEMON، D $\infty$  و MFD در محیط GIS امکان مقایسه این الگوریتمها فراهم

برای همه حالت‌های متنوع توپوگرافی و به خصوص در شیب‌های کم باشد.

## ۵- تشکر و قدردانی

این تحقیق با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) و تحت اعتبار پژوهشی شماره ۹۱-۷۵۱۰۳۶ انجام شده است.

## ۶- منابع

آب انرژی محیط (مهندسان مشاور). (۱۳۹۰). "گزارش مهندسی رودخانه طرح جامع مهندسی رودخانه‌های غرب مازندران"، مشارکت خزر آب-آب انرژی محیط، شرکت سهامی آب منطقه‌ای مازندران، وزارت نیرو.

حصاری، ب.، آخوند علی، م. و قرمز چشمه، ب. (۱۳۸۸). "اصلاح DEM جهت تهیه نقشه پیوسته جریان آب رودخانه (مطالعه موردی حوضه بالادست سد کرخه)"، دومین همایش اثرات خشکسالی و راهکارهای مدیریت آن، اصفهان.

شکوهی، علیرضا. (۱۳۸۵). "استفاده از مدل‌های ریاضی و GIS در تعیین سیمای طرح‌های کنترل سیل"، مجله آب و فاضلاب، ۵۹، صص. ۸۴-۸۹.

قرمزچشمه، ب.، تقفیان، ب. و اختاری، ر. (۱۳۸۴). "بررسی تأثیر اندازه شبکه سلولی بر دقت مدل رقومی ارتفاع (DEM)"، دومین کنفرانس آبخیزداری و مدیریت منابع آب و خاک، کرمان.

Bhattarai, R., Dutta, D. (2007). "Estimation of soil erosion and sediment yield using GIS at catchment scale", *Water Resources Management*, 21, pp. 1635-1647.

Bahremand, A. and Smedt, B. (2008). "Distributed Hydrological Modeling and Sensitivity Analysis in Torysa Watershed, Slovakia", *Water Resource Manage*, 22, pp. 393-408.

Brath, A. P., La. Barbera, M. Mancini, and Rosso, R. (1989). "The use of distributed rainfall-runoff models based on GIS at different scales of information", *ASCE, Hydr. Div., 3rd Nat. Conf. on Hydraulic Engineering*, New Orleans, USA.

نشد. برای حد آستانه زهکشی ۵۰۰۰ سلول برای تعیین سلول‌های آبراهه دو روش MFD و DEMON نتوانستند شبکه آبراهه‌ها را استخراج نمایند. برای آستانه‌های بالاتر از ۲۰۰۰۰۰ عملاً تفاوتی در شکل آبراهه‌ها و تعداد سلول‌های مشترک میان الگوریتم‌ها و سلول‌های آبراهه نقشه ۲۵۰۰۰ : ۱ ملاحظه نشد. به دلیل معنی‌دار نبودن تفاوت میان الگوریتم‌های مختلف در میزان سلول‌های منطبق شده می‌توان بار دیگر این نتیجه را مورد تأکید قرار داد که در شیب‌های بالاتر از شیب آستانه، تفاوت معنی‌داری میان الگوریتم‌های مختلف در تولید شبکه آبراهه‌ها دیده نمی‌شود. در آزمون مساحت حوضه تعیین شده توسط الگوریتم‌های مختلف در مقایسه با مساحت حوضه در نقشه برداری میزان خطای حاصله برای حوضه‌ای که مساحت بیشتری را در بخش کم شیب دارا بود، بیشتر بود. پخشیدگی جریان و ضعف الگوریتم‌ها برای مسیریابی جریان در بخش کم شیب را می‌توان علت اصلی این امر دانست. بهترین نتیجه در همه حالت‌ها از آن روش RHO8 و پس از آن DEMON بود. D8 با وجود ایجاد پخشیدگی زیاد برای حوضه کم شیب‌تر دارای عملکرد بهتری نسبت به D $\infty$  و MFD بود.

به این ترتیب با بررسی تمامی نتایج بدست آمده در حال حاضر می‌توان الگوریتم D8 را بطور نسبی قابل قبول قلمداد نموده و استفاده از آن را با قید احتیاط و تلاش در افزایش دقت نقشه با برداشت نقاط کمکی حساس در شیب‌های کمتر از ۵ درصد توصیه نمود. در همین حال ملاحظه می‌شود که الگوریتم D $\infty$  علی‌رغم ادعاهای صورت گرفته از برتری خاصی بر روش D8 و RHO8 برخوردار نیست. بر اساس نتایج بدست آمده، الگوریتم RHO8 از توان مناسبی در استخراج آبراهه‌ها برخوردار می‌باشد و اگر بتوان مسأله احتمالاتی بودن آن را چنان حل کرد که بتواند با هر بار اجرای برنامه یک الگوی ثابت را برای شبکه آبراهه‌ها برگرداند، می‌تواند گزینه‌ای مناسب



- Elevation Model", *J. Water Resources Research*, 29(12), pp. 3925-3934.
- Moore, I D. (1996). " Hydrologic modeling and GIS", In *GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues*. Goodchild , M F., Steyaert, L. T., Parks, B. O., Johnston, C., Maidment, D., Crane, M. and Glendinning, S. (eds). USA.
- O'Callaghan, J.F. and Mark, D.M. (1984). "The extraction of drainage network from digital elevation data", *J. Computer division, Graphics and Image Processing*, 28, pp. 393-344.
- O'Callaghan, J. F. and Mark, D. M. (1984). "The extraction of drainage networks from digital elevation data", *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 28, pp. 323-344.
- Poggio, L. and Soille, P. (2012). "Influence of pit removal methods on river network position", *J. Hydrological processes*, 26(13), pp. 1984-1990.
- Palacios-Velez, O., Gandoy-Bernasconi, W., and Cuevas-Renaud, B. (1988). "Geometric analysis of surface runoff and the computation order of unit elements in distributed hydrological models", *J. Hydrology*, 211, pp. 266-274.
- Quinn, P. F., Beven, K. J. and Lamb, R. (1995). "The  $\ln(a/\tan\beta)$  index: How to calculate it and how to use it within TOPMODEL framework", *J. Hydrological Processes*, 9, pp. 161-82.
- Saghafian, B., Pouraghniaei, M.J. and Ghermezcheshmeh, B. (2005). "Effect of Pixel Size on Physiographic Parameters Extracted from Digital Elevation Model (DEM)", *Proc. Of IAMG: GIS and Spatial analysis*, Toronto, Canada.
- Tarboton , D. G. (2000). "Watershed and stream network delineation", *HydroGIS short course*. Utha State University, USA.
- Tarboton, D. G. (1997). "A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid Digital Elevation Models", *J. Water Resources Research*, 33, pp. 309-19.
- Tarboton, D.G., Schreuders, K.A.T., Watson, D.W. and Baker, M.E. (2009). "Generalized terrain-based flow analysis of digital elevation models", In: 18th World IMACS/MODSIM Congress, Cairns, Australia.
- Todini, E. (1988). "Rainfall-runoff modeling-past, present, and future." *Journal of Hydrology*, 100, pp. 341-352.
- Costa-Cabral, M. C. and 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. 1681-92.
- Chorowicz, J., Ichoku, C., Riazanoff, S., Kim, Y. J., and Cervelle, B. (1992). "A combined algorithm for automated drainage network extraction", *Water Resources Research*, 28(5), pp. 1293-1302.
- ESRI. (2011). *Arc Hydro Tools, Manual*, CA. USA.
- Fairfield, J. and Leymarie, P. (1991). "Drainage networks from grid Digital Elevation Models", *J. Water Resources Research*, 27, pp. 709-17.
- Freeman, G. T. (1991). "Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid", *Computers and Geosciences*, 17, pp. 413-22.
- Gallant, J C. and Wilson, J P. (1996). "TAPES-G: A grid-based terrain analysis program for the environmental sciences", *J. Computers and Geosciences*, 22(7), pp. 713-22.
- Jenson S. K. and Domingue, J. O. (1988). "Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(11), pp. 1593-1600.
- Julien, P. Y., Saghafian, B. and Ogden, F. L. (1995). "Raster-based hydrologic modeling of spatially-varied surface runoff", *Water Resources Bulletin*, 31(3), pp. 523-536.
- La Barbera, P., Lanza, L., Siccardi, F. (1993). "Hydrological oriented GIS and application to rainfallrunoff distributed modeling, case study of the Arno basin", *Hydro GIS 93, Proceedings of the Vienna Conference*.
- Lea, N. L. (1992). "An aspect driven kinematic routing algorithm", In *Parsons, A. J. and Abrahams, A. D. (eds). Overland Flow: Hydraulics and Erosion Mechanics*. London, University College London Press.
- Maidment, D.R. (1992). "Grid-based Computation of Run off; A Preliminary Assessment", Report to U.S Army Corp of Engineers, HEC, Under Contract DACW 05-92-P-1983.
- Maidment, D.R. (2002). "ARC HYDRO: GIS for water resources", Center for Research in Water Resources, University of Texas at Austin. USA.
- Montgomery, I.R. and Fofoula-Georgiou, E. (1993). "Channel network representation for Digital

Yang, X., Chapman, G.A., Young, M.A., Gray, J.M. (2005). "Using compound topographic index to delineate soil landscape facets from digital elevation models for comprehensive coastal assessment", In: Zerger, A., Argent, R.M. (eds). MODSIM, International Congress on Modelling and Simulation. Modeling and Simulation Society of Australia and New Zealand.

Wilson, J. P. and Gallant, J. C. (2000). "Terrain Analysis: Principles and Applications", John Wiley and Sons, New York, USA.

Wu, S., Li, J. and Huang, G.H. (2008). "Characterization and evaluation of elevation data uncertainty in water resources modeling with GIS", J. Water Resources Manage, 22, pp. 959-972.