

تهیه DEM هیدرولوژیک و کاربرد آن در تولید نقشه پیوسته جریان رودخانه

(مطالعه موردی حوضه بالادست سد کرخه)

بهزاد حصاری^{۱*}، سجاد کریم زادگان^۲

۱- استاد یار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه

۲- کارشناس ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه

*نویسنده عهده دار مکاتبات: ارومیه، بلوار دانشگاه، دانشگاه نازلو ارومیه، دانشکده مهندسی آب،

پست الکترونیکی: b.hessari@urmia.ac.ir. شماره تماس: ۰۹۱۴۳۴۶۵۳۸۳

چکیده

روش‌های اصلاح مدل رقومی ارتفاعی (DEM) برای بهبود کیفیت آن و جهت استفاده در شبیه‌سازی و مدل‌سازی هیدرولوژیک سلولی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله، روش‌های اصلاح DEM و تهیه DEM هیدرولوژیک با استفاده از الحاقیه ArcHydro10.2 بررسی و در ۵۳ زیر حوضه کرخه مورد ارزیابی قرار گرفت و یکی از کاربردهای آن در برآورد "رواناب پیوسته" پیاده شد. اطلاعات آبدهی در محل ایستگاه‌های هیدرومتری به صورت نقطه‌ای قابل دسترس است، برای تعیین مقدار آبدهی به صورت پیوسته و در هر نقطه از مسیر و سرشاخه‌های رودخانه، به تجمعی کردن نقشه رواناب نیاز داریم. مدل جهت هشتگانه ریزش هر نقطه (D_n)، یک مدل پایه برای استخراج شبکه رودخانه از روی سلول‌های تجمعی شده DEM است. با این روش جهت جریان هر سلول به یکی از هشت سلول مجاور در DEM "هیدرولوژیک" تعیین می‌گردد. در نقشه DEM هیدرولوژیک سلول‌های تجمعی در مسیر رودخانه به صورت پیوسته و افزایشی قرار می‌گیرند. با استفاده از الگوریتم Agree و با آزمون و خطا مدل رقومی ارتفاعی اصلاح گردید و مساحت حاصل از تجمع سلول‌های بالادست هر سلول با مقادیر مساحت وکتوری زیر حوضه‌ها مورد مقایسه قرار گرفت به طوری که ضریب همبستگی برابر ۰/۹۹۷۵ حاصل گردید. بعد از تولید نقشه رواناب، در نهایت نقشه جریان تجمعی هر نقطه از مسیر این رودخانه در سلول‌های ۲۰۰ متری تهیه و نقشه پیوسته جریان ارائه گردید. نتایج حاکی است که خطای دبی حاصل از این روش و مقادیر مشاهداتی در ۵۳ ایستگاه هیدرومتری بین ۰/۲۸٪ تا ۳/۱٪ می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: هیدرولوژی سلولی، مدل رقومی هیدرولوژیک، نقشه رواناب، رواناب پیوسته، رودخانه کرخه،

Preparing hydrologic DEM and its application to produce a accumulated flow map (A Case study at Upstream of Karkheh dam)

Behzad Hessari¹ and Sajjad Karimzadgan²

¹Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Urmia, Urmia, Iran

²M.Sc., Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Urmia, Urmia, Iran

*Correspondence Address: Behzad Hessari, Danshgah blv, Urmia university, Water engineering faculty, Email address: b.hessari@urmia.ac.ir, Tell: ۰۹۱۴۳۴۶۵۳۸۳

Abstract:

Digital elevation model (DEM) reconditioning methods are being used to improve its quality to be used in simulation and cellular hydrological modeling. In this paper, methods of improving DEM and creating "Hydrologic DEM" with using the ArcHydro 10.2 extension were studied and also evaluated in 53 subbasins of Karkheh river basin (KRB) and one of its applications in "accumulation runoff map" was implemented. Streamflow information is available at hydrometric stations as points but for determining the amount of river discharge continually at any point along the river and branches, it is needed to accumulate the runoff map. The λ direction method ($D\lambda$) is the basic model for river network delineation from DEM accumulated cells. In this algorithm, the flow of each cell pours to one of the eight adjacent cells in the "hydrologic DEM". In hydrologic DEM the accumulated cells in the river line forward to the downstream increase continuously. With "Agree algorithm" and with trial and error the DEM improved and the upstream area of accumulation cells, have been compared with a vector area in each subbasin which correlation coefficient was 0.9975. After preparing runoff map of the basin, accumulation flow (accumulated runoff map) using a weighted cumulative flow function was created with 200 m cell size then the continuous flow map was presented. The results indicate that the error between estimated discharge from accumulated flow map with observed discharge in 53 subbasins varies between 0.28 to 3.1 percent.

Keywords: cellular hydrology, hydrological DEM, runoff map, continuous flow map, Karkheh river basin.

۱- مقدمه

نمونه ای از تحلیل های مکانی هر منطقه، ساخت مدل ارتفاعی رقومی (DEM) است اما برای تحلیل های دقیق سلولی، نیاز به اصلاح و رفع خطاهای ذاتی است. علاوه بر دقت و مقیاس داده های ورودی، روش های درون یابی نیز باعث ایجاد خطا می شود. بنابراین تحلیل های سلولی نیاز به ساخت مدل رقومی ارتفاعی هیدرولوژیک و ارزیابی دقت آن دارد. اخیراً با گذر از هیدرولوژی توده ای^۱ و نیز توسعه تکنیک ها و ابزار سامانه اطلاعات جغرافیایی شاهد شتابی قابل توجه در بحث مدل سازی سلولی هیدرولوژیک و شبیه سازی سلولی هستیم (Wilson et al., 2001). ArcGIS به عنوان قالب کاری برای ذخیره و مدیریت داده های مکانی و ابزار مدل سازی سلولی استفاده می شود (Olivera et al., 1996). مدیریت منابع آب یک مشکل مکانی است، بنابراین بحث هیدرولوژی مکانی^۲، که با استفاده از مفاهیم و اصول ساده تحلیل گر فضائی^۳ به شبیه سازی و توصیف خصوصیات هیدرولوژیکی یک سطح معین می پردازد، به یک بحث و ابزار ثابت نرم افزارهای GIS تبدیل شده است. توابع و روش های بکار رفته در ArcGIS بر مدل سازی سلولی^۴ استوارند، که به عنوان داده های ورودی مدل های هیدرولوژیک جهت ایجاد شبکه رودخانه و ترسیم مرز حوضه از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) و استخراج خصوصیات فیزیکی و هندسی حوضه ها مورد استفاده قرار می گیرد. این مفهوم، نقطه ای آغازین برای تحلیل های هیدرولوژیک مثل ترسیم مسیر حرکت آب، انتقال رسوب، آلودگی و مدل سازی هیدرولوژیکی است (Olivera et al., 1996). امروزه بحث بیان منطقه ای و تهیه نقشه هم جریان، توسعه فراوانی داشته است. هدف از جمععی کردن نقشه رواناب (نقشه هم جریان)، تعیین دبی در مسیر آبراهه ها و رودخانه اصلی و مابین ایستگاه های هیدرومتری و حوضه های بدون ایستگاه است. پروژه های آبی و خصوصاً مدیریت و برنامه ریزی خشک سالی ها نیاز به برآورد آب قابل دسترس بصورت موضعی

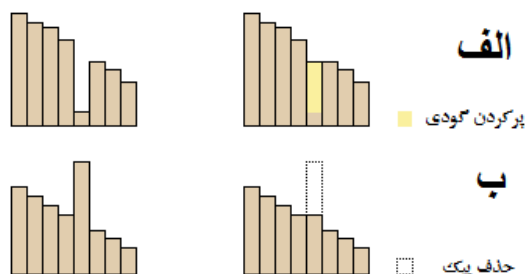
^۱ Lumped Hydrology

^۲ Spatial Hydrology

^۳ Spatial Analyst

^۴ Cell-Based Modeling

دارند (Maidment, ۱۹۹۶). روش‌های گوناگونی از درون‌یابی و برازش سطح از خطوط کانطور و ساخت DEM وجود دارد. علت جاری نشدن طبیعی آب به پایین دست خط‌هایی از قبیل: Sink و Peak است که داخل سلول‌های DEM خام وجود دارد، بنابراین در برابر DEM خام، DEM هیدرولوژیک وجود دارد (حصاری، ۱۳۹۲). روش‌های سوزاندن آبراهه^۱ و بهبود DEM^۲ برای اصلاح مدل ارتفاعی رقومی و ساخت مدل رقومی هیدرولوژیک مورد استفاده قرار می‌گیرند. Sink یا گودی محدوده‌ای است که توسط مقادیر ارتفاعی بالا محصور شده است که به Pit، معروف است. اگر همه سلول‌های مجاور بالاتر از سلول مورد نظر باشد یا دو سلول به یکدیگر جریان یابند، و همچنین اگر تغییر Z در چند جهت یکسان باشد این سلول‌ها، "گودی" نامیده می‌شوند و نمی‌توان به آن‌ها جهت جریان تخصیص داد. گاهی نواحی صاف قابل توجه در اثر خط‌های نمونه‌ای سیستماتیک در مراحل ایجاد DEM باعث ایجاد Sink می‌گردد (شکل ۱). این گودی‌ها آثار نامطلوبی در جهت جریان ایجاد می‌کند. تعداد گودی‌ها در مدل رقومی ارتفاعی به‌طور طبیعی در قدرت تفکیک و اندازه سلولی درشت، زیاد است بگونه‌ای که در DEM با اندازه سلولی ۳۰ متر ۰/۹ تا ۴/۷٪ و در قدرت تفکیک ۳ ثانیه یا ۹۰ متر بیشتر از ۵٪ سلول‌ها گودی خواهد بود (Tarboton, ۱۹۹۱). یکی از کلیدهای استخراج خصوصیات هیدرولوژیک یک سطح، قابلیت تعیین جهت جریان هر سلول در شبکه سلول‌هاست (حصاری، ۱۳۹۲).



شکل ۱ - نمای پروفیل طولی آبراهه قبل و بعد از دستور Fill (الف) خطا گودی (ب) خطای پیک (منبع ۲۰۱۶، ESRI)

مدل جهات هشتگانه ریزش هر نقطه (D₈)، یک مدل پایه برای تعیین جهت جریان هر سلول به یکی از هشت سلول مجاور است. جهت خروجی با توجه به هشت سلول مجاور که به‌صورت قطری در جهتی با تندترین شیب تعیین می‌گردد (Resources.arcgis.com, ۲۰۱۷). گالاک و مارک در سال ۱۹۸۴ این مدل را بنام D₈ (جهت جریان هشت‌گانه) معرفی کردند. که بعدها بصورت فراگیر بکار گرفته شد (Tarboton, ۱۹۹۱; Olivera, ۱۹۹۶). روش D₈ نقصی نیز دارد، که جهت جریان را تنها در یکی از جهات هشتگانه که با زاویه ۴۵ درجه تفکیک شده‌اند مشخص می‌کند. اخیراً روش‌های جهات جریان چندگانه^۳ برای حل کردن محدودیت‌های مدل D₈ ارائه شده است (Tarboton, ۱۹۹۷). روش D₈ نسبت به دیگر روش‌ها کاربرد بیشتری دارد و روش‌های دیگر در مراحل تحقیق قرار دارند. در این تحقیق از روش D₈ استفاده شده و برای تعاریف و بحث‌های پایه لازم است به منابع (Tarboton, ۱۹۹۷, ۱۹۸۹, ۱۹۹۱) رجوع گردد. ابزار موجود در نرم‌افزارهای GIS طوری طراحی شده که فرض می‌کند سطوح دارای اریب ارتفاعی کافی هستند تا مسیر جریان را تعیین کنند در حالی که با این فرض، مدل‌سازی جریان شبکه زهکشی انجام نخواهد شد. محققان تلاش‌های زیادی برای اصلاح DEM انجام داده‌اند. متکان و همکاران (۱۳۸۶) برای بررسی روش‌های حذف خط‌های مدل ارتفاع رقومی، سه الگوریتم را مورد مقایسه قرار دادند، نتایج نشان داد که مناسب‌ترین روش، الگوریتمی

^۱ Stream Burning

^۲ DEM Reconditioning

^۳ Multiple Flow Direction

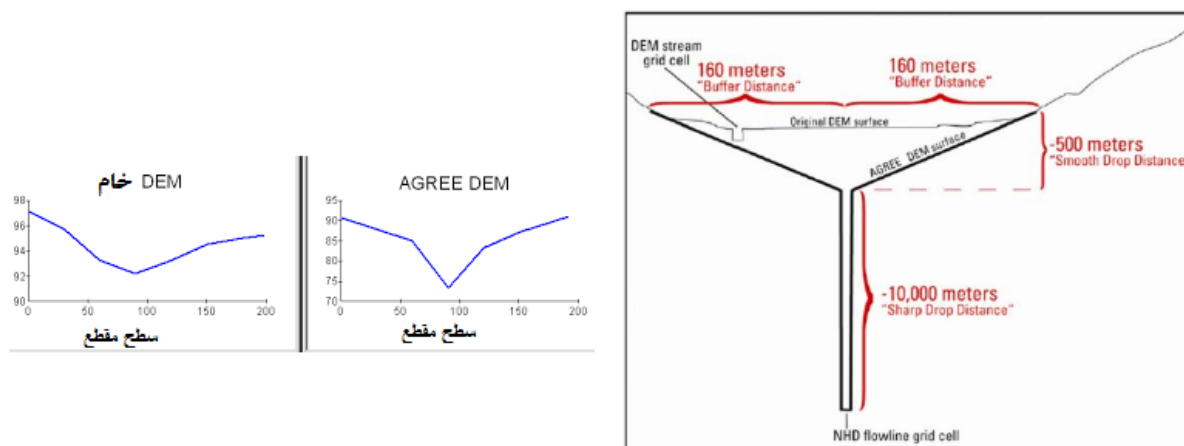
است که در آن ابتدا عملیات تحمیل آبراهه^۱ و حذف گودال^۲ به شیوه مرسوم در برخی از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی اجرا گردد^۳. مرکز تحقیقات منابع آب دانشگاه تگزاس CRWR نشان داده که استخراج آبراهه با استفاده از روش اصلاح شده بسیار بهتر است از شبکه آبراهه‌ای که تنها از DEM خام به دست می‌آید (Akmansoy, ۱۹۹۸). فرایند اصلاح شامل: ۱- تبدیل خط آبراهه رقومی شده به Grid (با تخصیص مقدار ۱ به سلول‌های آبراهه و No Data به بقیه). ۲- اطمینان از این که شبکه تهیه شده آبراهه، کاملاً پیوسته است (بدون شکاف و جاافتادگی). ۳- اضافه کردن یک مقدار ثابت به DEM (مثلاً ۵۰۰۰۰). ۴- Merge دو شبکه باهم به طوری که شبکه آبراهه در بالای شبکه ارتفاعی اصلاح شده قرار گیرد تا DEM سوخته به دست آید. الگوریتم سوزاندن سلول‌های رودخانه باعث می‌شود آب در رودخانه باقی بماند نه اینکه مجبور به جریان یابی به سوی پائین دست گردد. این فرایند مثل حفر ترانشه آبراهه‌های موجود است. ۵- Pitها با استفاده از دستور Fill Sink پر می‌شود. در این صورت همه Pitها که کمتر از پایین‌ترین همسایه مجاور هستند پر خواهد شد تا به ارتفاع نقاط ریزش خودش برسد. ۶- جهت جریان بر اساس تندترین شیب نزولی و از دستور Flow Direction تعیین می‌گردد. ۷- دستور Accumulated Flow؛ تعیین می‌کند چند سلول به یک سلول جریان می‌یابد. با این مشخصه می‌توان مرز حوضه و شبکه آبراهه را به طور خودکار ترسیم نمود (Cederstrand and Reen, ۱۹۹۶). سلول‌هایی با مقدار جریان تجمع یافته صفر با ارتفاعات توپوگرافی بالا به عنوان ستیغ و مرز حوضه هستند. با ابزار Stream and Watershed Delineation مرز حوضه یا آبراهه از روی نقشه DEM بر اساس الگوریتم جهت هشت‌گانه بدون رقومی نمودن، امکان پذیر است (Olivera, ۱۹۷۷). در الگوریتم بکار رفته در نرم‌افزار ILwis ۳.۷ و بهبود DEM در ArcHydro ۱۰.۲ بر اساس روش Agree سعی دارد بیشتر از اطلاعات آبراهه موجود استفاده کند، مثلاً با در نظر گرفتن افتادگی کند و تند در مقطع عرضی آبراهه با فاصله معین از خط آبراهه، به تصحیح و بهینه‌سازی DEM بپردازد. الگوریتم Agree سیستم تقویت سطحی مدل رقومی ارتفاعی است که سیستم سطح ارتفاع DEM را به صورت پوشش وکتوری تعدیل می‌کند. پوشش وکتوری می‌تواند آبراهه یا خط‌الرأس باشد (Hellweger, ۱۹۹۷)، پارامترهای این روش عبارت‌اند از: افت یا برآمدگی ارتفاع طبق خطوط وکتوری به مقدار معین (SmoothDist) ۲- دستور Buffer وکتوری ۳- اختصاص ارتفاع به سلول‌های داخلی حریم به طوری که امکان اتصال یک مسیر خط مستقیم از خط وکتور به ارتفاعی اصلی در بیرون از حریم وجود داشته باشد. ۴- افت یا برآمدگی ارتفاع طبق خطوط وکتوری به مقدار معین. روش آزمون وخطا برای تعیین اثر مطلوب تصحیح DEM خام (SharpDist) پیشنهاد شده است (شکل ۲). بهترین حالت وقتی به دست می‌آید که مساحت حاصل از جریان تجمعی^۴ با مساحت حوضه‌ها و زیر حوضه‌ها هم‌خوانی مطلوبی داشته باشد.

^۱ Drainage Enforcement

^۲ Fill sink

^۳ TARDEM in Hydrology.usu.edu. (۲۰۱۷).

^۴ Flow Accumulation



شکل ۲- پارامترهای الگوریتم AGREE (منبع Hellweger, ۱۹۹۷)

اگرچه به خاطر تغییر دستی و مصنوعی DEM، روش‌های بالا مورد انتقاد است، اما در محیط ArcMap ۱۰.۴ سعی بر آن است که DEM هیدرولوژیک اصلاح‌شده در مراحل اولیه با در نظر گرفتن مسیر آبراهه و نقاط اضافی هدایت‌گر ایجاد گردد (حصاری، ۱۳۹۲) و (ESRI-ArcMap ۱۰.۴). کالو و همکاران^۱ (۲۰۰۷) اذعان داشته‌اند که روش‌های سوزاندن آبراهه و بهبود DEM باعث افزایش شیب حوضه می‌شوند بنابراین برای استخراج پارامترهای فیزیوگرافی حوضه استفاده از DEM خام توصیه شده است. یکی از موارد کاربرد DEM هیدرولوژیک تجمعی نمودن رواناب در آبراهه است. اگر وزن هر سلول بجای عدد ۱، دبی آن سلول باشد با تجمعی کردن دبی سلول‌ها، دبی در هر شاخه رودخانه به دست می‌آید. مراحل تهیه نقشه رواناب با GIS در منابع حصاری و همکاران (۸۳) و میدمنت (۲۰۱۶) ارائه شده است. ملانکون و همکاران^۲ (۱۹۹۹) تخمین‌هایی از بارهای غیر نقطه‌ای منبع آلودگی منتهی به منبع آب را با استفاده از کاربرد جریان تجمعی وزنی در منطقه‌ای به مساحت ۷۰۰۰ کیلومترمربع را در رودخانه میسیون تگزاس در محیط نرم‌افزاری GIS انجام داده‌اند. ایشان بر اساس نقشه کاربری اراضی، متوسط برآوردی غلظت EMC^۳ رسوب و آلوده‌کننده‌ها را برآورد کرده‌اند به طوری که با اعمال نقشه رستری غلظت در نقشه رواناب، نقشه بار غلظت سالانه به شرح (رابطه ۱) حاصل گردید:

$$Load = Flow \times Concentration \quad \text{رابطه (۱)}$$

یا

$$L(\text{mass}/\text{time}) = Q(\text{volume}/\text{time}) \times C(\text{mass}/\text{volume})$$

در نهایت با بکار بردن تابع Flow Acc^۴ به نقشه سلولی، بار غلظت متوسط سالانه در رودخانه میسیون را به طور پیوسته برآورد کرده‌اند. مون دی^۵ (۲۰۰۳) نیز فرآیند مشابه را با استفاده از ArcView انجام داد. استفان و همکاران^۶ (۲۰۰۷) روش SCS و جریان تجمعی وزنی را برای بررسی رواناب و کیفیت غیر نقطه‌ای متناظر با آن مورد استفاده قرار داده‌اند. آنها با استفاده از شاخص پتانسیل رواناب PRI^۷ نسبت پتانسیل رواناب غیر نقطه‌ای را که از یک محدوده باز^۸ سرچشمه می‌گیرد، مورد بررسی قرار داده‌اند.

^۱ Callow et al.

^۲ Callow et al.

^۳ Estimated Mean Concentration

^۴ Flow Accumulation

^۵ Munn D

^۶ Stephen et al.

^۷ Potential Runoff Index

^۸ Landscape

مروید^۱ (۲۰۱۸) از ابزار ArcHydro برای استخراج مرز حوضه و رودخانه حوضه سان موراکس از روی DEM استفاده کرد و الگوریتم Agree را با مقدار = ۱۰ Sharp Drop Parameter برای تقویت DEM برگزید. وردین و گرین لی^۲ (۲۰۰۳) با استفاده از تجمع جریان وزنی رابطه (۲) را در سطح کشوری پیاده کردند:

$$Q_m = e^{-10.18} \times A^{1.00269} \times P^{1.86412} \times T^{-1.1579} \quad \text{رابطه (۲)}$$

Q_m: دبی میانگین سالانه (m^۳/sec). برای تعیین متوسط بارش و درجه حرارت بالای هر سلول از رابطه (۳) استفاده شده است:

$$US_Precip = Accum_Precip / (Trueflow_Acc + 1) \quad \text{رابطه (۳)}$$

US_Precip: متوسط بارش سالانه بالادست هر سلول، Accum_Precip: بارش تجمعی شده، Trueflow_Acc: مقدار سلول‌های بالادست حاصل از تابع جریان تجمعی.

شربت‌زاده (۱۳۹۰) با استفاده از ۹ لایه، مدل رسوب پسیاک اصلاح‌شده در حوضه نازلو را تهیه نمود و با کمک Dem هیدرولوژیک و استفاده از تابع Flow Accumulation نسبت به تهیه نقشه پیوسته رسوب اقدام کرد. مروید (۲۰۱۸) ابزار ArcHydro را یکی از مدل‌های پایگاه داده‌ی زمینی^۳ معرفی کرد و آن را برای ذخیره‌سازی داده‌های زمانی و مکانی هیدرولوژی و ساخت پایگاه داده زمینی در سطح کشوری معرفی کرد.

هدف از این تحقیق کاربرد روش‌های اصلاح DEM خام حاصل از درون‌یابی برای تهیه مدل رقومی ارتفاعی هیدرولوژیک و استفاده از آن در پیاده‌سازی رواناب پیوسته رودخانه در این حوضه است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- موقعیت جغرافیایی و نحوه دسترسی به منطقه

رودخانه کرخه سومین رودخانه بزرگ ایران است و حوضه آبریز آن به وسعت حدود ۴۳ هزار کیلومترمربع شامل استان‌های همدان و کرمانشاه و کردستان ایلام لرستان و خوزستان است. سرشاخه‌های اصلی تشکیل‌دهنده رودخانه کرخه، رودخانه‌های سیمره، کشکان، قره‌سو، گاماسیاب و چرداول هستند. در شکل (۳) موقعیت حوضه کرخه، موقعیت استان‌ها، رودخانه‌های اصلی، ایستگاه‌های تحقیقاتی پروژه، چالش آب برای غذا و موقعیت سد کرخه نشان داده شده است. مقدار بارش درازمدت حوضه از حدود ۶۷۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر از سرشاخه‌ها تا محل سد کرخه تغییر و متوسط بارش و انحراف معیار آن به ترتیب برابر ۴۵۲ و ۵۸ میلی‌متر است. بررسی ۵۴ ساله دبی ورودی در ایستگاه پای پل (محل سد کرخه) در دوره ۱۳۳۹ تا ۱۳۹۳ نشان می‌دهد حداکثر، متوسط و حداقل دبی با ضریب تغییرات ۰,۴۶، به ترتیب برابر ۳۹۸، ۱۷۰ و ۴۹ مترمکعب بر ثانیه است. ضریب تغییرات بالا نشانگر نوسان بالای دبی است که این ضریب تغییرات برای مناطق خشک و نیمه خشک عددی منطقی است.

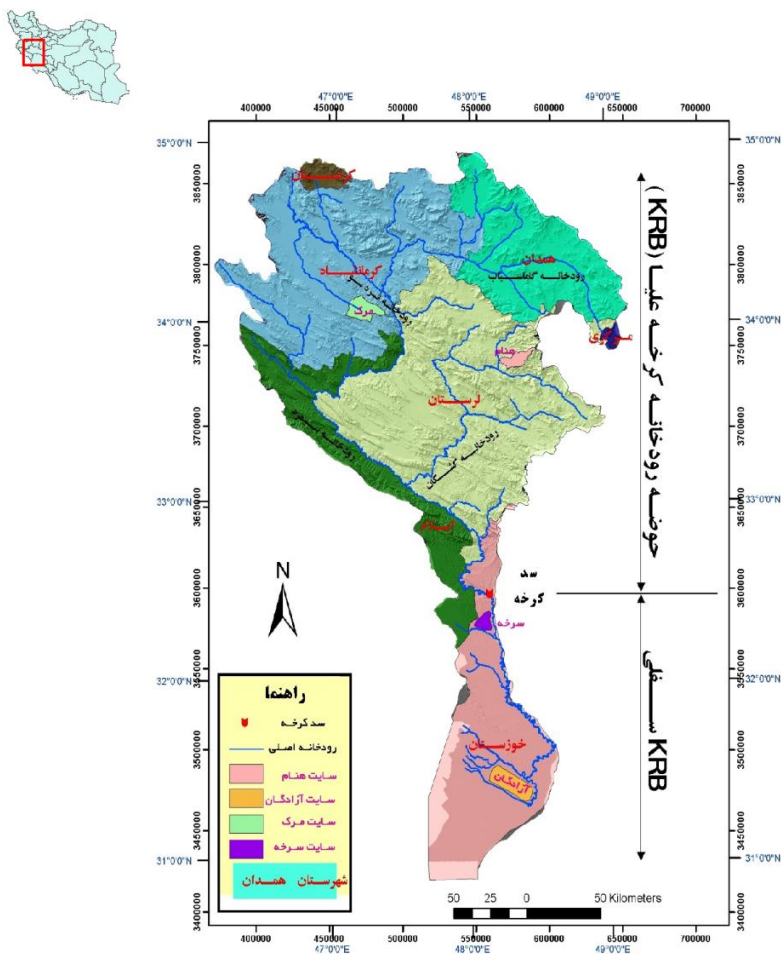
این تحقیق شامل سه مرحله جداگانه است. ابتدا از مدل رقومی ارتفاعی خام، با استفاده از الگوریتم AGREE، مدل رقومی ارتفاعی هیدرولوژیک حوضه تهیه گردید. برای ارزیابی این کار، مقادیر مساحت حاصل از مدل و مساحت زیرحوضه‌ها در ۵۳ ایستگاه هیدرومتری مقایسه گردید. در مرحله دوم نقشه رواناب توزیعی حوضه براساس مقادیر بارش، دبی مشاهده شده و گسترش یک رابطه تجربی رگراسیونی تهیه گردید. نتایج رابطه تجربی پس از اعمال به رابطه توزیعی بارش با رواناب مشاهده شده هر زیرحوضه و اسنجی گردید. در مرحله آخر با استفاده از نتایج دو نقشه در دو مرحله قبل، و با استفاده از مدل DA

^۱ Merwade et al.

^۲ Verdin, K. L., & Greenlee, S. K.

^۳ Geodatabase

دستورات Flow Direction و Flow Accumulation نقشه جریان تجمعی بدست آمد. برای ارزیابی نتایج این نقشه هم از مقادیر مشاهداتی دبی در ۵۳ ایستگاه هیدرومتری استفاده گردید.



شکل ۳ موقعیت حوضه رودخانه کرخه (KRB)^۱

۲-۲- تهیه DEM هیدرولوژیک:

DEM خام این حوضه از تصاویر دریافتی سنجنده SRTM^۲ با اندازه سلولی ۰/۰۰۸۳ آرک (۹۰ متر) تهیه شد. در بررسی اولیه مشخص شد به خاطر وجود خطا، مسیر آبراهه ها و شبکه جریان تجمعی، همخوانی خوبی ندارند لذا اقدام به تهیه DEM هیدرولوژیک از روی DEM خام این حوضه گردید. برای رفع خطای DEM، با استفاده از الحاقیه ۱۰،۲ ArcHydro و با استفاده از الگوریتم Agree نسبت به پر کردن گودی ها و حذف Peak ها اقدام و در هر بار نقشه جهت جریان و جریان تجمعی تهیه شد. برای اینکار با آزمون و خطا، مقادیر مختلف تابع Reconditioning با سه پارامتر Buffer، Smooth Drop/Rise و Sharp Drop/Rise طی چندین بار تکرار اعمال گردید و در هر مرحله با مقادیر مساحت و کتوری ۵۳ زیر حوضه کنترل گردید.

۲-۳- تهیه نقشه هم جریان:

^۱ Karkheh River Basin

^۲ Shuttle Radar Topographic Mission(Srtm.csi.cgiar.org , ۲۰۱۷)

در این فرآیند ابتدا نقشه بارندگی سالانه تهیه گردید. پس از برآورد میانگین بارش هر حوضه، مقدار رواناب درازمدت هر زیر حوضه برحسب میلی‌متر نیز تعیین گردید. در این مرحله بین بارش هر زیر حوضه و مقدار رواناب هر زیر حوضه رابطه بارش و رواناب حوضه برآزش داده شد. رابطه به دست آمده پس از کنترل صحت آن از نظر آماری به نقشه بارش اعمال و نقشه رواناب مورد انتظار به دست آمد. متوسط رواناب مورد انتظار هر زیر حوضه از نقشه مشاهداتی کم و به نقشه رواناب مورد انتظار توزیعی اضافه گردید که نقشه اخیر رواناب واقعی نامیده خواهد شد. بدین ترتیب، رواناب هر حوضه با مقدار مشاهده شده واسنجی گردید (حصاری و همکاران، ۱۳۸۵؛ حصاری، ۱۳۹۲، ۱۹۹۷; Reed, ۱۹۹۷; Reed et al., ۱۹۹۷)

۴-۲- تهیه نقشه پیوسته جریان رودخانه:

نقشه رواناب با استفاده از تابع "جریان تجمعی وزنی"^۱ در الحاقیه ۱۰.۲ ArcHydro، بصورت تجمعی تهیه گردید. در مناطق خشک و حوضه‌هایی مثل کرخه که برداشت آب در دشت زیاد است، قسمتی از نقشه رواناب منفی خواهد شد که فرآیند تهیه نقشه دبی تجمعی متفاوت خواهد بود. منفی بودن دبی خالص بدین مفهوم است که در این مناطق نه تنها دبی تولید نمی‌شود بلکه این مقدار از آب‌های زیرزمینی یا بالادست تأمین می‌گردد. به‌طور کلی دو روش عمده برای تجمیع نقشه‌هایی که سلول‌ها و وزن‌های منفی دارند وجود دارد. در روش اول به همه مقادیر نقشه رواناب، عددی اضافه خواهد شد بگونه‌ای که همه اعداد غیر منفی شوند. نقشه تجمعی جریان برای هر دو نقشه یکی با وزن‌های تعدیل‌شده و دیگری با وزن‌هایی با مقدار ثابت تهیه‌شده و دومی از اولی کسر می‌گردد. در روش دوم تجمعی کردن، یک‌بار فقط وزن‌های مثبت در نظر گرفته‌شده و مقادیر منفی به صفر تغییر داده می‌شود و یک‌بار قدر مطلق مقادیر منفی استفاده‌شده و مقادیر مثبت به صفر تغییر داده می‌شود و در نهایت نقشه دومی از اولی کسر می‌شود. روش دوم به خاطر دقت عددی بالا، نتایج بهتری دارد که در این تحقیق روش دوم مورد استفاده قرار گرفت.

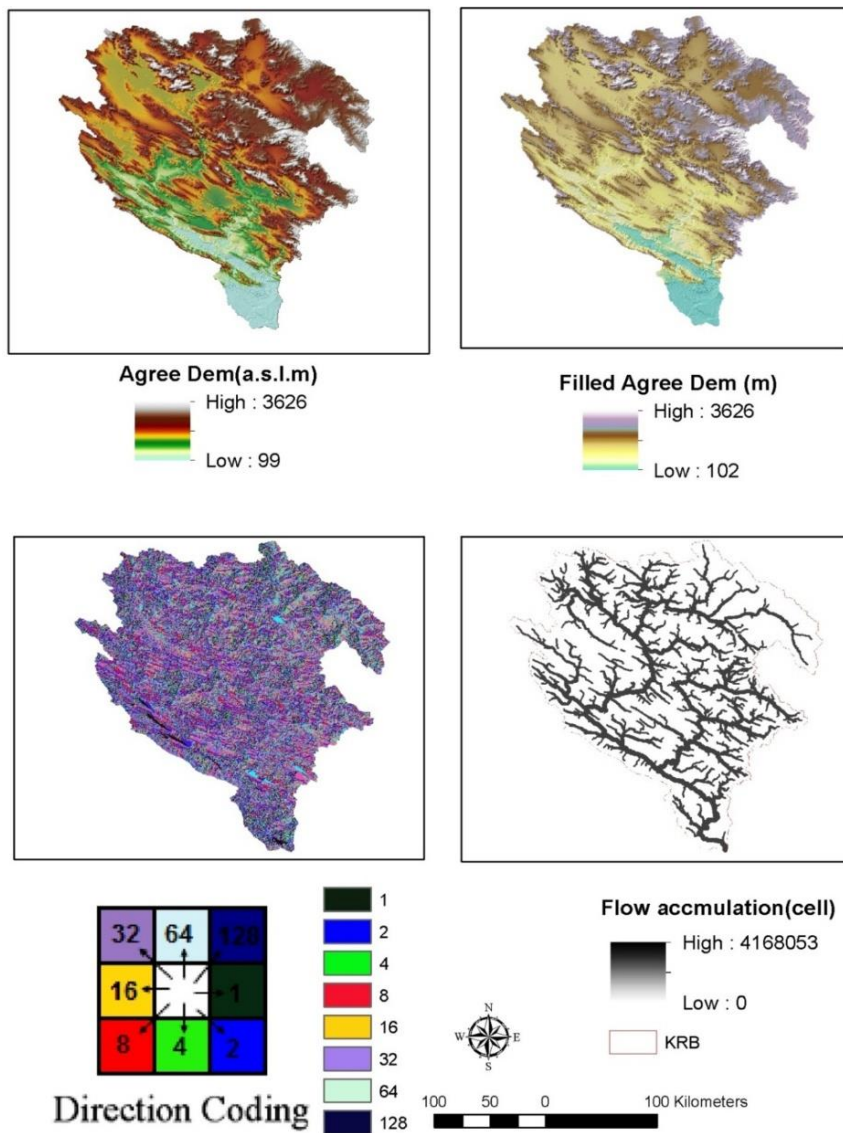
۳- یافته‌ها و بحث

برنامه‌های بسیار متنوعی در سیستم اطلاعات جغرافیایی در مدل‌سازی هیدرولوژیک وجود دارد که الگوریتم آن‌ها پیچیده نبوده و قابل بسط هستند. در حالت‌های مختلف آزمون‌وخطا برای استفاده از تابع Reconditioning بیش از ۲۰ حالت، مورد آزمون قرار گرفت و در هر مورد فرآیند پر کردن گودی‌ها، فرآیند جهت جریان و سلول‌های بالادست هر سلول انجام شد. بهترین نتیجه در Sharp Drop=۰ با خطای ۱۵۲۳ کیلومترمربع یا ۳/۶ درصد حاصل گردید (مساحت واقعی حوضه ۴۲۹۰۸ کیلومترمربع است). در شکل (۴) DEM خام، DEM هیدرولوژیک، نقشه جهت جریان و نقشه تجمعی جریان کرخه ارائه شده است. با قرار دادن زیر حوضه ایستگاه‌های هیدرومتری به‌عنوان قالب کاری این طرح، ۵۳ زیر حوضه با استفاده از بانک اطلاعات تمام در سطح حوضه شناسایی و مرز هر زیر حوضه از روی نقشه‌های ۱:۵۰۰۰۰ تهیه و به محیط GIS انتقال یافت (شکل ۵). در شکل (۶) مقایسه مساحت زیر حوضه‌ها با مساحت واقعی و کتوری مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که ضریب همبستگی ۰/۹۹۹ و ضریب خط ۰/۹۷ است این امر شکل نشان می‌دهد که این تفاوت به مقادیر تجمعی جریان نیز منتقل خواهد شد و با یک تخمین کم^۲ در دبی تجمعی نیز مواجه خواهیم شد که علت آن می‌تواند خطای ذاتی نقاط ارتفاعی داده‌های SRTM و ناپیوستگی آبراهه‌های ریز در لایه رودخانه کرخه باشد. هر انحراف از نیمساز نمودار نشان می‌دهد در کدام زیر حوضه، گسستگی آبره‌ها زیاد بوده و مدل نتوانسته شبکه آبراهه‌ها را درست استخراج^۳ کند.

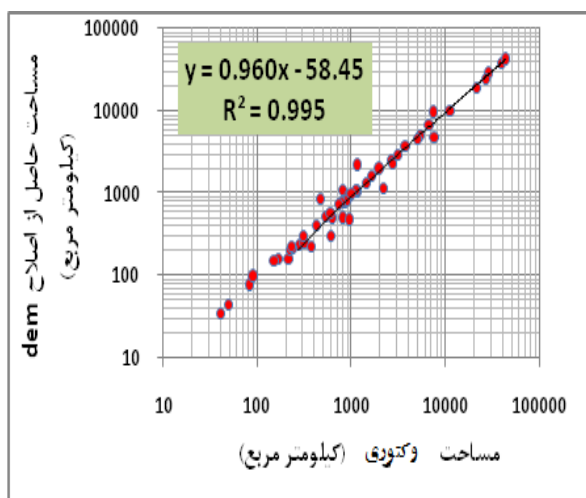
^۱ Weighted flow accumulation

^۲ Under steam

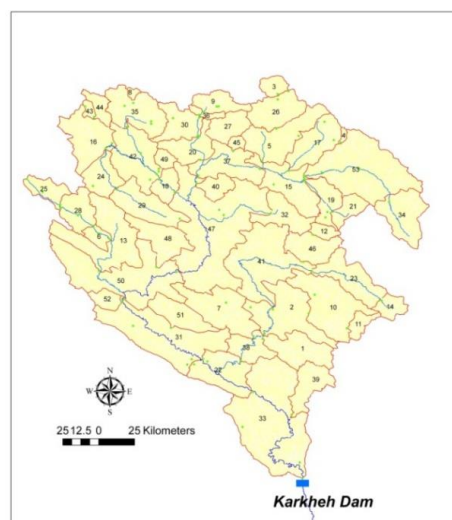
^۳ Drainage network delineation



شکل ۴- فرآیند پردازش و اصلاح DEM و ساخت DEM هیدرولوژیک

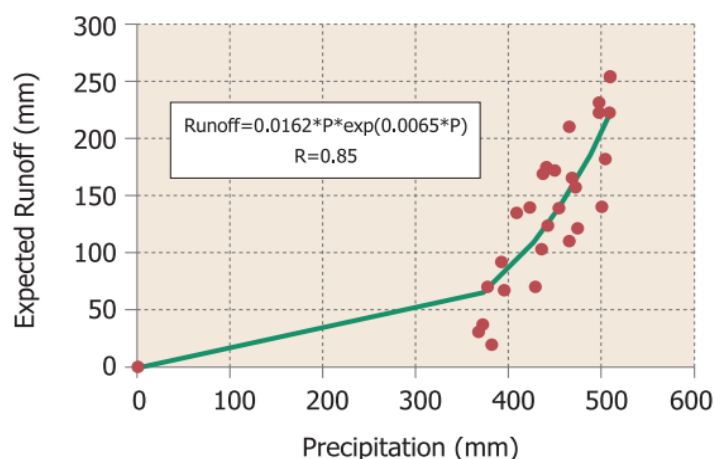


شکل ۶- مقایسه مساحت واقعی با مساحت حاصل از اصلاح DEM

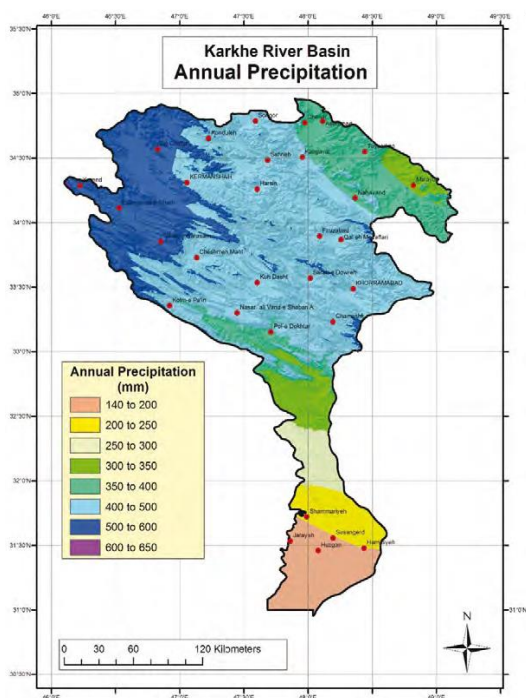


شکل ۵- زیر حوضه های منتخب

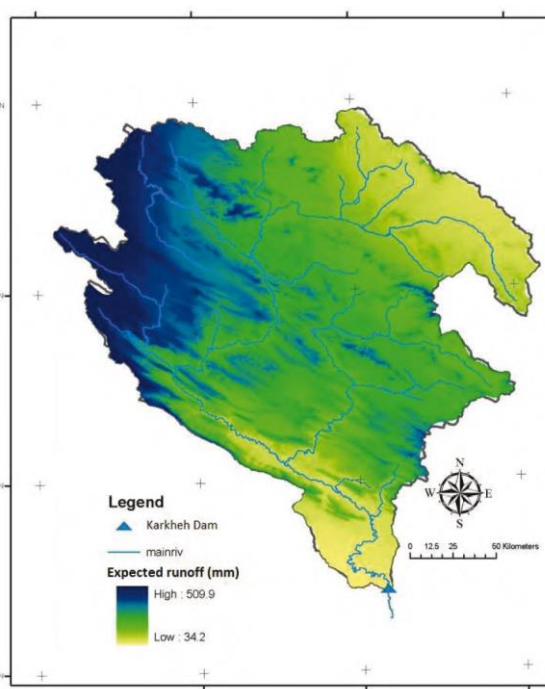
پس از برآورد میانگین بارش هر حوضه مقدار رواناب درازمدت هر زیر حوضه برحسب میلی‌متر تعیین گردید. از روی این مقادیر، نقشه رواناب خالص مشاهداتی به دست می‌آید. با رسم میانگین بارندگی و رواناب خالص هر زیر حوضه، رابطه بارش و رواناب حاصل می‌گردد. در شکل (۷) رابطه بین بارش و رواناب درازمدت ۳۰ ساله این حوضه ارائه شده است. رابطه به دست آمده در سطح ۱٪ معنی‌دار است. در شکل (۸) نقشه بارندگی سالانه بلندمدت حوضه رودخانه کرخه ارائه شده است. با اعمال رابطه حاصل شده بارش-رواناب به نقشه توزیعی بارش، نقشه رواناب مورد انتظار حاصل گردید که در شکل (۹) ارائه گردید. متوسط رواناب مورد انتظار هر زیر حوضه از نقشه مشاهداتی کم و به نقشه رواناب مورد انتظار توزیعی اضافه می‌گردد که نقشه اخیر رواناب واقعی نامیده خواهد شد. با این روش، نقشه رواناب واقعی توزیعی که با مقدار رواناب خالص واسنجی شده بدست می‌آید که در شکل (۱۰) ارائه شده است.



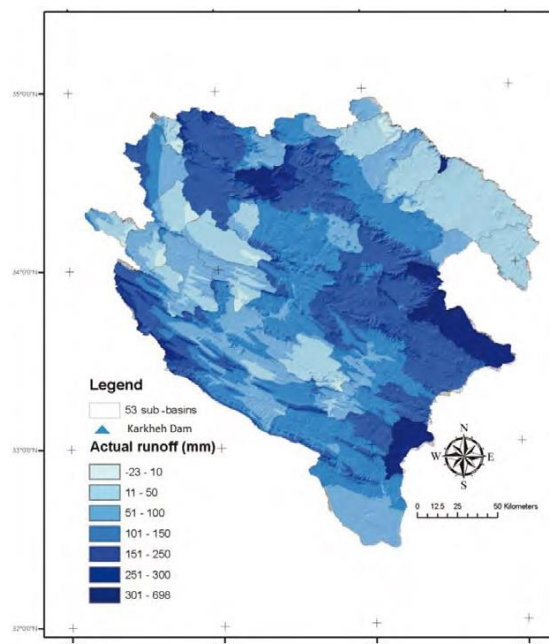
شکل ۷- رابطه بین دبی و بارش سالانه در حوضه کرخه



شکل ۸- نقشه بارندگی سالانه حوضه

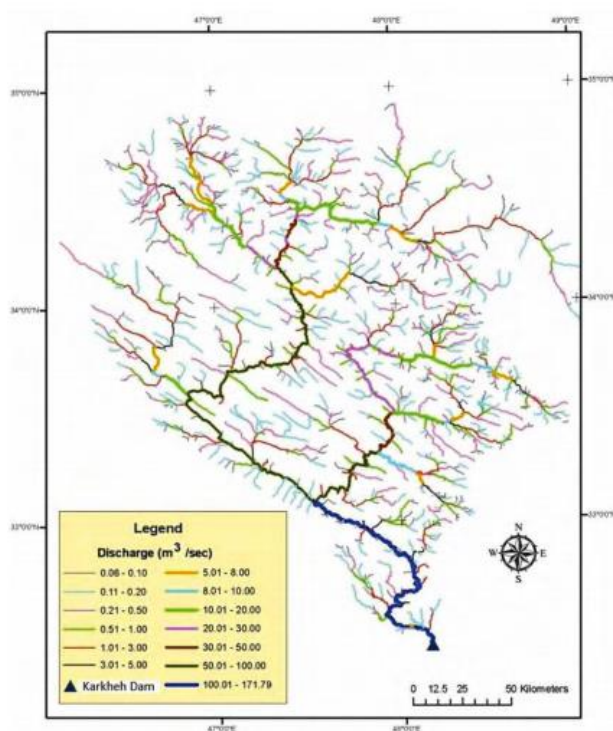


شکل ۹- نقشه رواناب مورد انتظار حوضه



شکل ۱۰- نقشه رواناب واقعی حوضه

نقشه رواناب واقعی با استفاده از تابع "جریان تجمعی وزنی" بصورت تجمعی تهیه گردید و با اعمال ضریب تعدیل بر حسب متر مکعب بر ثانیه تبدیل شد و بدین ترتیب نقشه پیوسته جریان حاصل گردید که نتایج در شکل (۱۱) ارائه شده است. نقشه پیوسته جریان با به کارگیری روش دوم تجمعی کردن تهیه گردیده است.



شکل ۱۱- نقشه تجمعی و پیوسته دبی جریان سالانه کرخه

در این روش هر خطای مرحله اول (خطای مساحت تجمعی DEM هیدرولوژیک) به نقشه دبی نیز منتقل می گردد. مقادیر دبی در ۵۳ ایستگاه با نتایج دبی نقشه تجمعی مورد مقایسه قرار گرفت و نتایج نشان داد در حوضه کرخه این خطا کمتر از

۰/۲۸٪ تا ۰/۳۱٪ بوده است. دقت این روش نسبت به مدل‌های رگرسیونی رایج، به مراتب بالاست. مقایسه دبی‌ها نشان می‌دهد در نقشه‌های تجمعی رواناب، برداشت‌ها در مسیر آبراهه‌ها به‌طور مناسبی شبیه‌سازی و برآورد می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، نحوه پیاده‌سازی و کاربرد روش‌های اصلاح DEM و تهیه DEM هیدرولوژیک با استفاده از الحاقیه ArcHydro10.2 در آرک جی‌آی‌اس ۱۰.۴ بررسی شد و یکی از کاربردهای آن در برآورد رواناب پیوسته رودخانه کرخه مورد مطالعه قرار گرفت. اگرچه اطلاعات آینده‌ی در محل ایستگاه‌های هیدرومتری و خروجی زیر حوضه‌ها به‌صورت نقطه‌ای قابل‌دسترس است پس از تهیه نقشه رواناب و تجمعی کردن، مقادیر آینده‌ی به‌صورت پیوسته و در هر نقطه از مسیر و سرشاخه‌های رودخانه، حاصل می‌شود. در نقشه‌های مذکور برداشت‌ها در مسیر آبراهه‌ها به‌طور مناسبی شبیه‌سازی می‌شود. نتایج کلی این تحقیق حاکی از این است که دبی خروجی حوضه کرخه در دوره دراز مدت ۳۰ ساله برابر ۱۷۰ مترمکعب بر ثانیه است در حالی که در این روش مقدار ۱۷۱/۸ مترمکعب بر ثانیه در خروجی حاصل شده است. در ۵۳ ایستگاه مورد استفاده نیز اختلاف دبی مشاهداتی درازمدت و دبی نقشه تجمعی جریان، بین ۰/۲۸٪ تا ۰/۳۱٪ بوده است که حاکی از نتایج خوب و همخوانی نتایج است. احتمال وجود خطا در زیرحوضه‌هایی که برداشت نامتعارف دارند و یا از نظر هیدرولوژیک نرمال نیستند و یا در آنها تغییرات زیاد فعالیت‌های انسانی باشد وجود خواهد داشت. یکی از خطای اصلی به دلیل پیوسته نبودن آبراهه‌ها و خطای جزئی از زمین مبنا کردن^۱ است که در ساختار داده‌های سنجنده STRM وجود دارد. هر خطای مساحت تجمعی به دبی نیز منتقل خواهد شد. توزیع رواناب نیز می‌تواند با استفاده از روش‌های بهتری انجام گیرد و خطاهای جزئی مرتفع گردد. دقت این روش نسبت به مدل‌های رگرسیونی رایج به مراتب بالاست. لازم است پس از تراکم شدن شبکه ایستگاه‌ها و تکمیل تر شدن داده‌برداری در ایستگاه‌های هیدرومتری و باران‌سنجی نقشه هم‌جریان با قدرت تفکیک‌پذیری بالا تهیه و روش‌های فوق و مدل‌های چندگانه جهت جریان مورد آزمون قرار گیرد. می‌توان نتایج را در هر مرحله بررسی کرد و DEM‌های با دقت بالا را مورد استفاده قرار داد. DEM اصلاح‌شده و هیدرولوژیک حوضه آماده استفاده در مدل‌های شبیه‌سازی سلولی است که قبلاً به چند مورد از موارد کاربرد آن اشاره شده است. آماده‌سازی DEM هیدرولوژیک بسیار وقت‌گیر است و توصیه می‌شود از داده‌های توپوگرافی ۱/۵۰۰۰ و ۱/۲۵۰۰۰ بافاصله خطوط ۲۰ متر و ۱۰ متر برای تولید DEM هیدرولوژیک استفاده و نتایج، مورد مقایسه قرار گیرد. همچنین بجای مدل DA، مدل‌های چندگانه و (D بی‌نهایت) نیز مورد استفاده و مقایسه قرار گیرد. نتایج کلی حاکی است که از این روش می‌توان با دقت قابل قبولی، برای برآورد آینده‌ی سطحی رودخانه‌های بدون داده، بهره جست. نقشه تجمعی جریان، توزیع مکانی جریان در حوضه را نشان داده و برآورد خوبی از آینده‌ی در آبراهه‌های اصلی و فرعی نشان می‌دهد. برای دوره‌های تر و خشک یا هر سال مشخص بایست روابط بارش رواناب مستقلی تهیه و مراحل کار تکرار گردد.

۵- منابع

حصاری ب، ۱۳۹۲، بررسی اثرات هیدرولوژیکی بالادستی و پایین‌دستی توسعه آبیاری تکمیلی مناطق دیم در حوضه کرخه، پایان‌نامه دکتری، دانشگاه اهواز، دانشکده مهندسی آب، گروه هیدرولوژی، ۲۲۲ ص.

^۱ Geo-reference

حصاری ب.، ک. خلیلی، ا. قهرمانی، ع. حیدری، ر. غنی پور، ۱۳۸۳، تعیین بیلان آبی استان آذربایجان غربی با استفاده از تکنیک GIS، سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان غربی و سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان، ۴ جلد، شماره ۴۰۶/۲۲۲۶.

حصاری ب.، ک. خلیلی، ا. قهرمانی، ۱۳۸۵، تهیه نقشه هم جریان استان آذربایجان غربی با استفاده از GIS، اولین کنفرانس منابع آب ایران، دانشگاه تهران، تهران.

شربت زاده و.، ۱۳۹۰، برآورد فرسایش و رسوب زایی حوضه آبریز نازلو چای به روش MPSIAC در GIS، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بوعلی سینا، ۱۳۰ ص.

متکان ع. ا.، ع. ر. شکیب، د. عاشور لو، ۱۳۸۶، مقایسه تطبیقی روش‌های حذف خطاهای مدل ارتفاعی رقومی (DEM) نمونه موردی، حوضه آبریز اکباتان، مجله علوم محیط زیستی، سال چهارم، شماره سوم، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.

Akmansoy, S. and McKinney, D.C., ۱۹۹۸. **Aral Sea water rights**, Doctoral dissertation, Center for Research in Water Resources, University of Texas at Austin.

Callow, J., Van Niel, K. and Boggs, G. ۲۰۰۷. **How does modifying a DEM to reflect known hydrology affect subsequent terrain analysis**. Journal of Hydrology, ۳۳۲(۱-۲), pp.۳۰-۳۹.

Cedrerstrand J. R, and Reen A. ۱۹۹۶. **Watershed boundaries and DEM of Oklahoma – AWRE** – [Http://www.awra.org](http://www.awra.org).

ESRI. (۲۰۱۶). **ArcMap ۱۰٫۴ Help**, ESRI.INC. Available online at:

<http://doc.arcgis.com/en/arcgis-online/analyze/create-watersheds.htm>, [Accessed ۲۵, April ۲۰۱۶].

Hellweger, F., ۱۹۹۷, **Agree-DEM surface reconditioning system**. Center for Research in Water Resources

Hydrology.usu.edu. (۲۰۱۷). **TARDEM, A suite of programs for the Analysis of Digital Elevation Data**. [online] Available at: <http://hydrology.usu.edu/tardem/tardem۴٫۰/> [Accessed ۱۷ Jul. ۲۰۱۷].

Maidment, D.R., ۱۹۹۶, **GIS and hydrologic modeling-an assessment of progress**. In Third International Conference on GIS and Environmental Modeling, Santa Fe, New Mexico.

Melancon, P.A., Maidment, D.R. and Barrett, M.E., ۱۹۹۹. **A GIS based watershed analysis system for Tillamook Bay, Oregon** (Doctoral dissertation, Center for Research in Water Resources, **University of Texas** at Austin).

Merwade, V., ۲۰۱۸. **Building ArcHydro using National Hydrography Dataset** [online] Available at:

<http://web.ics.purdue.edu/~vmerwade/tutorial.html>, Accessed ۰۵, April ۲۰۱۶.

Munn D., (۲۰۰۳), **Non-point Source Pollution: Prediction and Analysis in ArcView ۳٫۰**, Texas A&M University - Department of Civil Engineering. Available online at:

<https://ceprofs.civil.tamu.edu/folivera/TxAgGIS/Spring۲۰۰۳/Munn/Munn.htm>, Accessed ۰۵, April ۲۰۱۶.

Olivera, F. and Maidment, D.R., ۱۹۹۶, **Runoff computation using spatially distributed terrain parameters**. In North American Water and Environment Congress & Destructive Water (pp. ۳۲۱۲-۳۲۱۷). ASCE.

Reed, S., Maidment, D. and Patoux, J., ۱۹۹۴. **Spatial Water Balance in Texas**. Texas Water Resources Institute. Center for Research in Water Resources University of Texas , Austin.

Resources.arcgis.com. ۲۰۱۷. **Surface Water** | ArcGIS Resource Center. [Online] Available at:

<http://resources.arcgis.com/en/communities/hydro/>htm [Accessed ۵ Aug. ۲۰۱۷].

Stephen M. Carpenedo, Kramer E., Lee J., Samples K., ۲۰۰۷, **Using GIS to model the effects of potential wetland mitigation sites on water quality in Gorgia**, Proceedings of the ۲۰۰۷ Georgia Water Resources Conference, University of Georgia. Georgia Institute of Technology.

Srtm.csi.cgiar.org. (۲۰۱۷). **CGIAR-CSI SRTM ۹۰m DEM Digital Elevation Database.** [Online] Available at:

http://srtm.csi.cgiar.org/SRTM_FAQ.asp [Accessed ۱۷ Jul. ۲۰۱۷].

Tarboton, D.G., ۱۹۸۹. **The analysis of river basins and channel networks using digital terrain data.** Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology.

Tarboton, D.G., ۱۹۹۷. **A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models.** Water resources research, ۳۳(۲), pp.۳۰۹-۳۱۹.

Tarboton, D.G., Bras, R.L. and Rodriguez-Iturbe, I., ۱۹۹۱. **On the extraction of channel networks from digital elevation data.** Hydrological processes, ۵(۱), pp.۸۱-۱۰۰.

Verdin, K.L. and Greenlee, S.K., ۲۰۰۳, July. **Continuous Basin Characterization using EDNA.** In ۲۳rd Annual ESRI International User Conference.

Wilson, J.P., Mitasova, H. and Wright, D.J., ۲۰۰۰. **Water resource applications of geographic information systems.** Urisa Journal, ۱۲(۲), pp.۶۱-۷۹.