

اثر دقت مکانی مدل رقومی ارتفاع در تخمین هیدروگراف واحد ژئومورفولوژیک و ژئومورفوکلیماتیک در حوزه آبخیز امامه

فریبا اسماعیلی، مهدی وفاخواه* و وحید موسوی^۱

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۷/۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۵)

چکیده

مدل‌های رقومی ارتفاع (DEM) یکی از مهم‌ترین داده‌های مورد نیاز در مدل‌سازی حوزه آبخیز با مدل‌های هیدرولوژیکی است که دقت مکانی آن تأثیر بسزایی در صحت شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی دارد. در پژوهش حاضر اثر دقت مکانی پنچ DEM شامل نقشه توپوگرافی (TOPO) با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰، ALOS PALSAR، ASTER، SRTM و GTOPO به ترتیب با دقت‌های مکانی ۱۰، ۱۲/۵، ۳۰، ۹۰ و ۱۰۰۰ متر بر تخمین پارامترهای مدل‌های ژئومورفولوژیک و ژئومورفوکلیماتیک در حوزه آبخیز امامه ارزیابی شده است. برای این منظور از ۳۴ رویداد سیلاب منفرد طی سال‌های ۱۳۴۹ تا ۱۳۹۴ استفاده شد. نتایج نشان داد که در روش ژئومورفولوژیک استفاده از مدل رقومی ارتفاع TOPO و ALOS PALSAR بهترین نتایج را به ترتیب با ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) ۱/۷ و ۱/۸ مترمکعب بر ثانیه و مقدار نمایه نش- ساتکلیف ۰/۴ و ۰/۳ ارائه نمودند. در حالی که مدل رقومی ارتفاع GTOPO کمترین کارایی را با RMSE ۸/۲ مترمکعب بر ثانیه و نمایه نش- ساتکلیف ۲- داشت. به طور مشابه در روش ژئومورفوکلیماتیک کمترین و بیشترین RMSE به ترتیب ۳/۸ و ۱۸ متر مکعب بر ثانیه متعلق به مدل‌های رقومی ارتفاع TOPO و GTOPO با مقدار نمایه نش- ساتکلیف ۰/۲ و ۶- است. به طور کلی روش ژئومورفولوژیک نسبت به روش ژئومورفوکلیماتیک در تمام مدل‌های رقومی ارتفاع نتایج مطلوب‌تری را داشت.

واژه‌های کلیدی: قدرت تفکیک مکانی، دبی اوج، زمان تا اوج، مقیاس، هیدروگراف واحد لحظه‌ای

۱. گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: vafakhah@modares.ac.ir

مقدمه

شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب برای حفظ پایداری حوزه‌آبخیز و کاهش خسارات در شرایط سیلابی امری ضروری است (۴۰). از مهم‌ترین قدم‌هایی که در تجزیه و تحلیل‌های هیدرولوژی و تهیه هیدروگراف سیلاب طرح برداشته شده است، استفاده از هیدروگراف واحد است که اولین بار توسط شرمن (۳۶) پیشنهاد شد. عدم وجود و دسترسی به هیدروگراف واحد، به دلیل نبود ایستگاه‌های هیدرومتری در مناطق سیل‌خیز کشور، یکی از معضلات اساسی در مدیریت و کنترل سیلاب است. تئوری هیدروگراف واحد لحظه‌ای در سال ۱۹۳۰ توسط کمیته مهندسی بوستون ارائه شد و بیانگر توزیع رواناب سطحی حاصل از یک واحد بارش مازاد است که به‌طور آبی و لحظه‌ای در حوزه‌آبخیز اتفاق افتاده باشد. این هیدروگراف یک هیدروگراف تک اوجی است و مقدار آن برای هر حوزه‌آبخیز واحد است (۲) و (۲۸). این هیدروگراف فقط با داشتن خصوصیات فیزیوگرافی و ژئومورفولوژیکی حوضه (بدون نیاز به اطلاعات مربوط به بارندگی و مستقل از زمان) به دست می‌آید و با کمترین داده قادر به برآورد هیدروگراف سیلاب با دقت قابل قبول است. در ارتباط با هیدروگراف واحد لحظه‌ای مدل‌های متعددی توسعه پیدا کرده‌اند (۱۵). اولین بار رودریگز ایترب و والدز و رودریگز ایترب و همکاران (۳۰ و ۳۱) هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیک را ارائه دادند. سپس با قبول پایه‌های اصلی هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیک، سرعت اوج جریان را که تابعی از شدت و مدت باران است، از روابط حذف و شدت و مدت باران را در روابط منظور کردند و تئوری هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفوکلیماتیک را ارائه دادند. توانایی مدل‌های هیدرولوژیکی در ارائه و برآورد فرایندها و متغیرهای هیدرولوژیکی مانند رواناب به‌طور عمده به دقت مکانی داده‌های ورودی مدل بستگی دارد (۳۸). مدل‌های رقومی ارتفاع یکی از مهم‌ترین داده‌های مورد نیاز در مدل‌سازی

حوزه‌آبخیز با مدل‌های هیدرولوژیکی است که دقت مکانی آن تأثیر بسزایی در صحت شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی دارد (۱۸). با توجه به روند روزافزون استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) در مطالعات منابع طبیعی از یک‌سو و پیچیدگی سازوکارهای زیستی، زمین‌شناختی، ژئومورفولوژیکی و بوم‌شناختی از سوی دیگر، مقیاس به‌عنوان مبحث مهجورمانده و در عین حال بسیار تأثیرگذار و در حال شکوفایی است. از آنجا که در مطالعات منابع طبیعی بر اساس فاز مطالعه، از نقشه‌هایی با مقیاس‌های گوناگون استفاده می‌شود بنابراین، به‌منظور استفاده از نتایج به‌دست آمده از مطالعه در سیاست‌گذاری و مدیریت عرصه‌های منابع طبیعی، تعیین دقت (مقیاس) مطالعه و دامنه کاربرد نتایج آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (۳۲). در دهه‌های گذشته مطالعه‌های زیادی در ارتباط با کارایی هیدروگراف واحد لحظه‌ای به روش‌های مختلف، در حوزه‌های آبخیز مختلف جهان انجام گرفته است. به‌طور مثال ریگون و همکاران (۲۹) یک مرور کلی از نظریه‌های هیدروگراف ژئومورفولوژیک (GIUH) ارائه دادند. همچنین، کارایی این روش در هند (۲۰، ۲۱، ۳۹)، پاکستان (۱۴)، چین (۴۳)، عربستان (۴) و ایران (۱۱، ۱۳، ۱۷، ۲۲، ۲۶، ۳۴) مورد بررسی قرار گرفت که در اکثر آن‌ها نتایج مبنی بر کارایی مطلوب روش ژئومورفولوژیک است. هرچند در برخی مطالعه‌ها بیش تخمینی این روش در برآورد دبی اوج گزارش شده است (۲۱). این روش در مقایسه با روش‌های ژئومورفوکلیماتیک و نش نیز مورد بررسی قرار گرفت که نتایج نشان از برتری روش نش نسبت به دو روش دیگر است (۴۶). مطالعه‌های متعددی نیز بر روی سایر روش‌های هیدروگراف واحد لحظه‌ای همچون کلارک (۱۶، ۲۷، ۳۵، ۴۲ و ۴۴) و روسو (۵ و ۶) انجام شده است. همچنین، زکی‌زاده و همکاران (۴۷) برخی از مدل‌های هیدروگراف واحد لحظه‌ای همچون نش، روسو، ژئومورفولوژیک، ژئومورفوکلیماتیک و SCS را به‌منظور برآورد سیلاب مورد

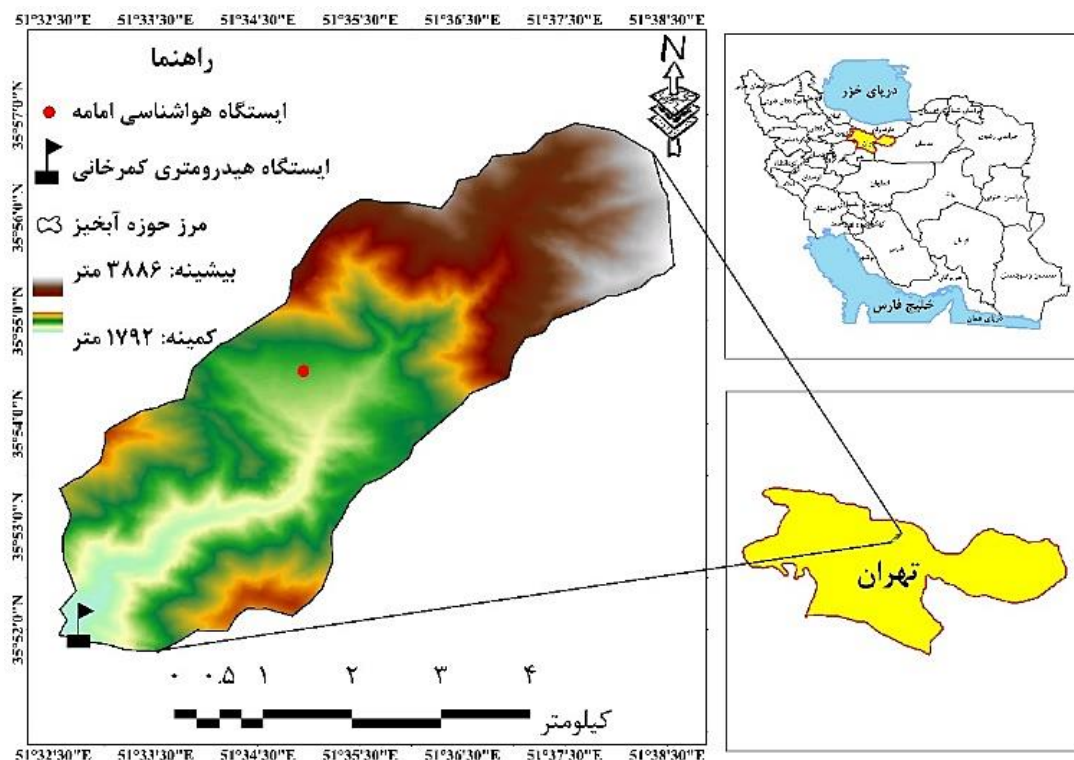
واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیک و ژئومورفوکلیماتیک برای برآورد هیدروگراف رواناب مستقیم حوزه‌های آبخیز امامه استفاده شد. همچنین، به منظور ارزیابی اثر مدل‌های رقومی ارتفاع بر روش‌های تخمین هیدروگراف واحد لحظه‌ای از مدل‌های رقومی ارتفاع ASTER, ALOS PALSAR, SRTM و GTOPO به ترتیب با دقت ۱۲/۵، ۳۰، ۹۰ و ۱۰۰۰ متر و از مدل رقومی ارتفاع حاصل از نقشه توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ (دارای دقت ۱۰ متر) استفاده شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز امامه با مساحت ۳۷/۲۵ کیلومتر مربع در شمال شرق تهران ما بین عرض جغرافیایی "۳۶' ۵۳' ۳۵° تا "۰۲' ۵۷' ۳۵° شمالی و طول جغرافیایی "۳۶' ۳۱' ۵۱° تا "۳۷' ۳۸' ۵۱° قرار گرفته است. حوزه آبخیز امامه که در سال ۱۳۴۷ به عنوان اولین حوزه آبخیز معرف کشور تجهیز شده است، از زیرحوضه‌های سد لتیان و یکی از مهم‌ترین سرشاخه‌های رودخانه جاجرود است. حداکثر و حداقل ارتفاع حوضه به ترتیب ۴۰۱۲ و ۱۸۰۰ متر است. این حوزه آبخیز در شرق جاده لشگرک- شمشک در فاصله ۲۸ کیلومتری شمال شرقی تهران قرار گرفته است و روستای امامه در این حوزه آبخیز قرار دارد. طول حوزه آبخیز از محل خروجی آن (از محل دهکده کلوگان و تنگ کمرخانی تا منتهی‌الیه خط‌الرأس شمال شرقی) تقریباً ۱۳ کیلومتر و حداکثر عرض آن در قسمت جنوب امامه در حدود ۴/۵ کیلومتر و کمترین عرض آن در دو قسمت شمالی ۲/۵ کیلومتر است. رودخانه امامه جریان اصلی حوضه از ارتفاعات شمالی آن سرچشمه گرفته و به رود جاجرود می‌پیوندد. طول این رود از خط‌الرأس تا محل تلاقی به جاجرود ۱۴/۲۰۵ کیلومتر است. رژیم رودخانه امامه از نوع برفی بوده و در فصل خشک آب آن از چشمه‌های واقع در قسمت بالائی حوضه تأمین می‌شود (۴۱). شکل ۱ موقعیت ایستگاه هواشناسی امامه و ایستگاه

مقایسه قرار داده اند. اما در رابطه با تأثیر مقیاس‌های مختلف مدل رقومی ارتفاعی بر روی هر یک روش‌های هیدروگراف واحد لحظه‌ای، مطالعات اندکی گزارش شده است. به طوری که دمورا و همکاران (۱۱) به ارزیابی هیدروگراف واحد لحظه‌ای نش و روسو با استفاده از مدل‌های مختلف رقومی ارتفاع TOPO ASTER, SRTM-30 و SRTM-90 در برزیل پرداختند و عزیزیان و همکاران (۱) به بررسی اثر توان تفکیک مدل‌های رقومی ارتفاع و همچنین آستانه‌های مختلف بر پارامترهای ژئومورفولوژیکی و نیز عملکرد یک مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیک مبتنی بر موج سینماتیک موسوم به KW-GIUH در حوزه آبخیز کسلیان پرداختند. نتیجه این پژوهش نشان داد که با کاهش توان تفکیک مدل‌های رقومی ارتفاع (افزایش ابعاد سلولی)، شیب متوسط زیرحوضه‌ها و تعداد آبراهه‌ها کاهش و مساحت زیرحوضه‌های منتهی به هر آبراهه و نیز طول جریان دامنه‌ای افزایش می‌یابد. به تازگی، نیز ی‌او و همکاران (۴۵) تأثیر مقیاس مکانی DEM بر عملکرد هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی بررسی کردند و کاهش عملکرد مدل را با افزایش ابعاد پیکسل‌های DEM نتیجه گرفتند. البته در این مطالعه تنها دقت‌های ۳۰ تا ۶۰۰ متر DEM بر روی یک مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای بررسی شده است. در برخی مطالعات نیز وابستگی هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی را به وضوح DEM بیان کرده اند (۹ و ۳۲). با این حال مطالعات انجام شده به ندرت مقیاس مکانی داده‌های ورودی را در شبیه‌سازی متغیرهای هیدروولوژیکی مورد توجه قرار داده‌اند و در ایران پژوهشی مبنی بر بررسی اثر دقت‌های مختلف مدل رقومی ارتفاع در هیدروگراف‌های واحد گزارش نشده است در حالی که توجه به این موضوع در مطالعات مختلف و در شرایط متفاوت هیدروولوژیکی یک ضرورت است (۸ و ۱۰). درحقیقت داده‌های ورودی مدل، منابع اولیه خطا در برآورد متغیرهای هیدروولوژیکی هستند (۳۷). بنابراین، در پژوهش حاضر روش‌های هیدروگراف



شکل ۱. موقعیت مکانی حوزه آبخیز امامه در استان تهران و ایران (رنگی در نسخه الکترونیکی)

هیدرومتری کمرخانی را نشان می دهد.

آبراهه از نقشه توپوگرافی سازمان نقشه برداری کشور و مدل های رقومی ارتفاع، بر اساس سیستم استراهلر شبکه آبراهه ها رتبه بندی شد، سپس به منظور محاسبه مساحت تحت پوشش آبراهه های هر رتبه از افزونه ArcHydro در نرم افزار ArcGIS استفاده شد. پس از آن تعداد، طول و مساحت حوزه آبخیز آبراهه های هر رده به منظور محاسبه نسبت های هورتونی مانند نسبت مساحت، نسبت انشعاب و نسبت طول در هر یک از دقت ها و مقیاس مورد نظر تعیین شد. به منظور شناخت خصوصیات حوضه، کمیت های ریخت سنجی شامل محیط، مساحت، شیب متوسط حوضه و طول آبراهه اصلی، با استفاده از نرم افزار ArcGIS، محاسبه شد. با مراجعه به شرکت سهامی آب منطقه ای استان تهران داده های سیلاب و رگبارهای به وقوع پیوسته در سال های مورد مطالعه دریافت شد. به منظور انتخاب رویدادهای سیلاب، هیدروگراف های سیلاب منفرد (دارای بارش متناظر) که نسبت به بقیه سیلاب ها از دقت و صحت بالاتری برخوردار بوده و در شرایط برفی نبوده مدنظر قرار گرفت (۲۴ و

جمع آوری اطلاعات پایه و محاسبه کمیت های ریخت سنجی حوزه آبخیز

نقشه توپوگرافی با مقیاس، ۱:۲۵۰۰۰ (دارای دقت ارتفاع ۱۰×۱۰ متر) از سازمان نقشه برداری ایران و مدل های رقومی ارتفاع (ALOS PALSAR (<https://search.asf.alaska.edu>) (دارای دقت مکانی ۱۲/۵×۱۲/۵ متر)، ASTER (<https://earthexplorer.usgs.gov>) (دارای دقت مکانی ۳۰×۳۰ متر)، SRTM (<https://srtm.csi.cgiar.org>) (دارای دقت مکانی ۹۰×۹۰ متر) و GEOTOP^۲ (دارای دقت مکانی ۱۰۰۰×۱۰۰۰ متر) از پایگاه های مربوطه گرفته شد. سپس سیستم تصویر هر کدام در نرم افزار ENVI5.6 از حالت سینوسی به UTM تغییر یافت. همچنین، پیکسل های ناقص یا از دست رفته اصلاح شد و در نهایت برای محاسبه کمیت های فیزیوگرافی به نرم افزار ArcGIS 10.7 معرفی شد. پس از استخراج شبکه

هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوکلیماتیک

رودریگز ایترب و همکاران (۳۱) با قبول پایه‌های اصلی هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیک، سرعت اوج جریان را که تابعی از شدت و مدت باران است، از روابط حذف و شدت و مدت باران را در روابط منظور کردند و تئوری هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوکلیماتیک را ارائه دادند. برای محاسبه دبی اوج و زمان اوج در این مدل از روابط ۵ و ۶ استفاده می‌شود.

$$q_p = 1.971 \Pi^{-0.4} \quad (5)$$

$$t_p = 0.2587 \Pi_i^{0.4} \quad (6)$$

در روابط بالا q_p دبی اوج (بر ساعت)، t_p زمان اوج (ساعت) است، Π_i پارامتر ژئومورفولوکلیماتیک است که به‌عنوان تابعی از اقلیم (شدت و مدت بارش مؤثر) و ژئومورفولوژی حوزه‌آبخیز، نقش اساسی در ویژگی‌های هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوکلیماتیک داشته و از روابط ۷ تا ۹ به‌دست می‌آید.

$$\Pi_i = \frac{L_{\Omega}^{2.5}}{i_r \cdot A_{\Omega} R_L a_{\Omega}^{1.5}} \quad (7)$$

$$Q = a_{\Omega} \times A^m \quad (8)$$

$$m = \frac{5}{3} \quad (9)$$

در روابط بالا L_{Ω} طول آبراهه با بزرگترین رتبه (کیلومتر)، i_r شدت بارش مؤثر (سانتی متر بر ساعت)، A_{Ω} مساحت حوزه‌آبخیز (کیلومترمربع)، R_L نسبت طول هورتون، Q دبی جریان، A سطح مقطع خیس شده و a_{Ω} پارامتر موج جنبشی است.

ارزیابی هیدروگراف‌های برآوردی و مشاهده‌ای

به‌منظور ارزیابی کارایی دو روش ژئومورفولوژیک و ژئومورفولوکلیماتیک در مدل‌های رقومی مختلف از شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تبیین (R^2) و نش- ساتکلیف (NSE) استفاده شد (۱۹ و ۲۵).

(۴۱). سپس دبی پایه هیدروگراف‌های سیلاب به روش خط مستقیم مطابق با پژوهش وفاخواه و همکاران (۴۱)، جدا شده و سپس ارتفاع رواناب مستقیم برای هر هیدروگراف سیلاب تعیین شد. در نهایت هایتوگراف بارش مازاد در هر رویداد تعیین شد. برای تعیین هایتوگراف مربوط به بارش مازاد از شاخص فی (φ)، به روش سعی و خطا استفاده شد (۲۳).

هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیک

تئوری هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیک اولین بار توسط رودریگز ایترب و والدز (۳۰) ارائه شد و روابط (۱) و (۲) برای برآورد دبی و زمان تا اوج هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیک توسط آن‌ها ارائه شد.

$$q_p = \frac{1.31 R_L^{0.43}}{L_{\Omega}} (V) \quad (1)$$

$$t_p = 0.44 L_{\Omega} \left(\frac{R_B}{R_A} \right)^{0.55} R_L^{-0.38} (V^{-1}) \quad (2)$$

در روابط فوق q_p دبی اوج (بر ساعت)، t_p زمان اوج (ساعت)، L_{Ω} طول رودخانه با بیشترین رتبه در حوزه‌آبخیز (کیلومتر)، V سرعت اوج جریان (متر بر ثانیه)، R_A ، R_L و R_B به‌ترتیب نسبت انشعاب، نسبت مساحت و نسبت طول هستند. چنانچه دبی به‌دست آمده از رابطه (۱) در مساحت حوزه آبخیز و ارتفاع بارش مؤثر ضرب شود، دبی تا اوج طبق رابطه ۳ برای هر رگبار محاسبه می‌شود.

$$QP = \frac{q_p}{3600} * \frac{i_r}{100} * A \quad (3)$$

در رابطه بالا QP دبی هیدروگراف رواناب (متر مکعب بر ثانیه) است.

زمان تا اوج هیدروگراف هر رویداد با استفاده از رابطه (۴) به‌دست می‌آید.

$$T_p = t_p + 0.75 t_r \quad (4)$$

در رابطه بالا T_p زمان تا اوج هیدروگراف خروجی (ساعت)، t_p زمان تا اوج هیدروگراف واحد ژئومورفولوژی (ساعت)، t_r زمان بارش (ساعت) مؤثر است.

روابط روش های ژئومورفولوژیک و ژئومورفوکلیماتیک، برای هر واقعه رگبار سیلاب منفرد ابعاد هیدروگراف واحد لحظه ای برآورد شد (جدول ۲ و ۳). به منظور مقایسه دو روش ژئومورفولوژیک و ژئومورفوکلیماتیک با مدل های رقومی ارتفاع مختلف، شاخص های آماری خطا برای دبی اوج تا دبی اوج تا اوج وقایع مختلف به شرح جدول ۴ محاسبه شد.

نتایج نشان می دهد در روش ژئومورفولوژیک، متغیر دبی اوج در تمام مدل های رقومی ارتفاع به جز GTOPO نتایج مشابهی به دست داده است به طوری که مقدار RMSE کمتر از دو مترمکعب بر ثانیه و نمایه کارایی نش- ساتکلیف بیش از ۰/۳ برآورد شد.

نتایج نشان می دهد در روش ژئومورفولوژیک، متغیر دبی اوج در تمام مدل های رقومی ارتفاع به جز GTOPO نتایج مشابهی به دست داده است به طوری که مقدار RMSE کمتر از دو مترمکعب بر ثانیه و نمایه کارایی نش- ساتکلیف بیش از ۰/۳ برآورد شد. از سوی دیگر (شکل ۴) پراکنش نقاط در بالا و پایین خط ۱:۱ حاکی از آن است که در این روش مدل های رقومی ارتفاع TOPO و ALOS PALSAR و GTOPO عمدتاً بیش تخمین بوده است در حالی که مدل های ASTER و SRTM کم تخمین بوده است. با این تفاسیر می توان گفت با کاهش دقت مکانی مدل های رقومی ارتفاع از ۱۰ متر به ۱۰۰۰ متر، دقت مدل ژئومورفولوژیک در تخمین هیدروگراف سیل کاهش می یابد که این با نتایج کاویان و محمدی (۱۸) و دمورا و همکاران (۱۱) هم خوانی دارد.

در روش ژئومورفوکلیماتیک نیز مقادیر ضریب تبیین بیش از ۰/۴ (جدول ۴) حاکی از ارتباط معنی دار مقادیر برآوردی و مشاهده ای در دبی اوج است که با نتایج نوری و ایلدرمی (۲۴) مطابقت دارد. از طرفی (شکل ۵) پراکنش نقاط اطراف خط ۱:۱ نشان می دهد به جز در دو مدل رقومی ارتفاع ALOS PALSAR و ASTER در سایر مدل ها روش مذکور دبی های اوج را بیشتر از مقادیر مشاهده ای برآورد کرده است،

$$R^2 = \left(\frac{\sum (X_i - \bar{X})(\bar{X})}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum (\bar{X})^2}} \right)^2 \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N}} \quad (11)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{\sum (X_i - \bar{X})^2} \quad (12)$$

که در روابط فوق X_i سری داده های مشاهداتی، \bar{X} میانگین سری داده های مشاهداتی، X_i سری داده های تخمینی، میانگین سری داده های تخمینی، N تعداد داده ها و \bar{X} متغیر نام است.

نتایج و بحث

محاسبه کمیتهای توپوگرافی و نسبت های هورتونی

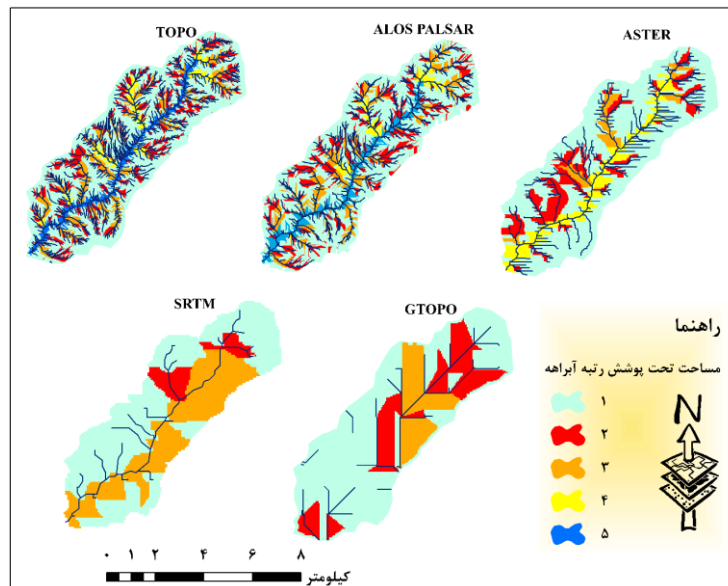
به منظور محاسبه ابعاد هیدروگراف واحد به روش ژئومورفولوژیک و ژئومورفوکلیماتیک، شاخص های توپوگرافی و مساحت تحت پوشش هر رتبه آبراهه محاسبه شد (شکل ۲). سپس نسبت های هورتونی برای پنج مدل رقومی ارتفاع به شرح جدول ۱ استخراج شد.

همانطور که انتظار می رود بالاترین رتبه آبراهه در مدل های رقومی ارتفاع TOPO و ALOS PALSAR به دلیل دقت بالا پنج محاسبه شد. این در حالی است که در مدل رقومی ارتفاعی ASTER بالاترین رتبه به چهار کاهش یافت. تراکم شبکه آبراهه در مدل های SRTM و GTOPO به نحوی بود که تنها سه رتبه شناسایی شد. بنابراین، می توان گفت عامل مقیاس مکانی تأثیر مستقیمی در تراکم و دقت شبکه زهکشی دارد. عاشورلو و همکاران (۳) نیز ادعان داشتند مدل رقومی ارتفاع با دقت بیشتر از ۳۰ متر شبکه زهکشی مطلوبی را ارائه نخواهد داد. در شکل ۳ اختلاف بین شبکه زهکشی و رتبه بندی آبراهه های حوزه آبخیز امامه در پنج مدل رقومی ارتفاع قابل مشاهده است.

هیدروگراف واحد لحظه ای حاصل از دو روش

ژئومورفولوژیک و ژئومورفوکلیماتیک

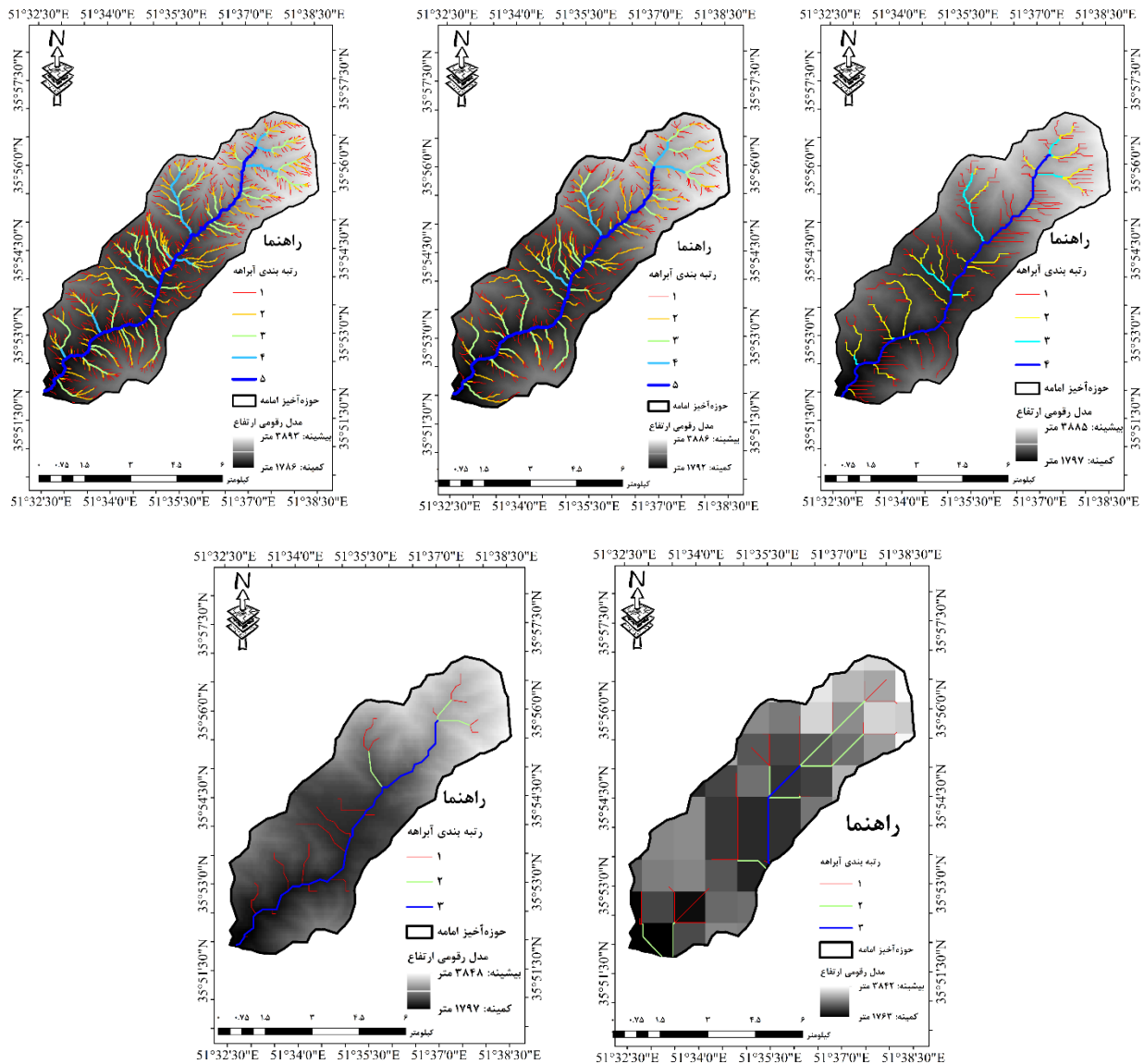
پس از محاسبه نسبت های هورتونی و قرارگیری آنها در



شکل ۲. مساحت تحت پوشش آبراهه‌های هر رتبه در مدل‌های رقومی ارتفاع مختلف (رنگی در نسخه الکترونیکی)

جدول ۱. شاخص‌های توپوگرافی و نسبت‌های هورتونی شبکه زهکشی حاصل از پنج مدل رقومی ارتفاع در حوزه آبخیز امامه

مدل رقومی ارتفاع	رتبه آبراهه	تعداد آبراهه	طول آبراهه (km)	متوسط طول آبراهه (km)	مساحت آبخیز بالادست (km ²)	متوسط مساحت آبخیز بالادست (km ²)	نسبت انشعاب	نسبت طول	نسبت مساحت
TOPO	۱	۷۴۵	۱۴۴/۶۱	۰/۱۹	۲۳/۲۲	۰/۰۳	۵/۴۱	۴/۴۴	۴/۳۵
	۲	۱۴۹	۵۳/۳۹	۰/۳۶	۶/۲۰	۰/۰۴			
	۳	۳۵	۲۹/۷۴	۰/۸۵	۴/۲۱	۰/۱۲			
	۴	۸	۸/۱۲	۱/۰۲	۱/۴۸	۰/۱۸			
	۵	۱	۱۲/۵۴	۱۲/۵۴	۲/۱۴	۲/۱۴			
ALOS PALSAR	۱	۵۱۵	۱۰۹/۰۲	۰/۲۱	۲۳/۱۳	۰/۰۴	۴/۸۸	۳/۷۹	۳/۸۴
	۲	۱۱۱	۴۳/۶۱	۰/۳۹	۵/۸۶	۰/۰۵			
	۳	۲۷	۲۴/۸۳	۰/۹۲	۴/۳۶	۰/۱۶			
	۴	۴	۴/۶۶	۱/۱۶	۱/۱۷	۰/۲۹			
	۵	۱	۱۱/۳	۱۱/۳	۲/۷۳	۲/۷۳			
ASTER	۱	۱۴۷	۷۲/۰۲	۰/۴۹	۲۵/۴۰	۰/۱۷	۵/۵۲	۵/۲۶	۵/۵۷
	۲	۲۴	۲۳/۲۷	۰/۹۷	۵/۵	۰/۲۳			
	۳	۷	۶/۶۲	۰/۹۴	۲/۱۱	۰/۳			
	۴	۱	۱۲/۱۳	۱۲/۱۳	۴/۲۴	۴/۲۴			
SRTM	۱	۱۵	۱۵/۳	۱/۰۲	۲۲/۲۳	۱/۴۸	۴/۷۵	۴/۲۱	۵
	۲	۲	۳/۱۹	۱/۵۹	۲/۷۲	۱/۳۶			
	۳	۱	۱۰/۹۳	۱۰/۹۳	۱۲/۳	۱۲/۳			
GTOPO	۱	۱۹	۲/۵۱	۰/۱۳	۲۳/۷۶	۱/۲۵	۴/۵۸	۷/۷۵	۲/۵۳
	۲	۶	۱۰/۷۴	۱/۷۹	۸/۱	۱/۳۵			
	۳	۱	۳/۵	۳/۵	۵/۳۷	۵/۳۷			



شکل ۳. شبکه زهکشی و رتبه‌بندی آبراه‌ها در پنج مدل رقومی ارتفاع (رنگی در نسخه الکترونیکی)

ارتفاع نتایج بهتری را ارائه داد. به‌طور مشابه گیائی و همکاران (۱۲) و ملکی و حافظ‌پرست (۲۲) کارایی بالایی روش ژئومورفولوژیک را تأیید می‌کنند. اما برخلاف نظر بیین و همکاران (۷) و سنجرى و همکاران (۳۳) روش ژئومورفولوژیک به دقت مدل رقومی ارتفاعی وابسته بوده و با کاهش دقت مدل رقومی ارتفاع، کارایی این روش کاهش می‌یابد. به‌طور کلی اختلاف در مقادیر تخمینی و مشاهداتی و منابع خطا در هر دو روش را می‌توان به تفکیک دبی پایه به روش خط مستقیم، برآورد سرعت جریان و خطا در ثبت داده‌های وقایع سیلاب نسبت داد.

بنابراین بیش تخمین بوده است. هرچند مقادیر RMSE در این روش نسبت به روش ژئومورفولوژیک افزایش یافت و میزان خطا در مدل‌های رقومی TOPO تا GTOPO نیز افزایش یافت. بنابراین، می‌توان گفت با کاهش دقت مدل رقومی ارتفاع خطا هیدروگراف‌های تخمینی افزایش می‌یابد و به‌طور کلی روش ژئومورفولوژیک نتایج بهتری نسبت به روش ژئومورفوکلیماتیک، در مدل‌های رقومی ارتفاع مختلف به‌دست داد. به‌طوری‌که هر دو شاخص RMSE و NSE در روش ژئومورفولوژیک و در همه مدل‌های رقومی

جدول ۲. دبی اوج و زمان تا اوج هیدروگراف واحد لحظه‌ای با استفاده از روش ژئومورفولوژیک حوزه‌آبخیز امامه

مقادیر مشاهده‌ای		GTOPO		SRTM		ASTER		ALOS PALSAR		TOPO		مدل رقومی ارتفاع	ردیف
Qp	Tp	Qp	Tp	Qp	Tp	Qp	Tp	Qp	Tp	Qp**	Tp*	تاریخ رگبار	
۴/۳	۱	۸/۶۶	۱/۱۶	۲/۶۹	۳/۰۹	۲/۶۲	۳/۳۶	۳/۹	۱/۶۲	۳/۷۷	۱/۶۷	۱۳۴۹/۲/۱۵	۱
۳/۵	۲	۱۵/۱۱	۱/۱۶	۴/۶۹	۳/۰۹	۴/۵۷	۳/۳۶	۶/۶	۱/۶۶	۶/۴۱	۱/۷۱	۱۳۴۹/۲/۴	۲
۳/۳۳	۶	۱۱/۲۱	۱/۵۴	۳/۴۸	۳/۴۷	۳/۳۹	۳/۷۳	۴/۹	۲/۰۵	۴/۷۲	۲/۰۹	۱۳۵۲/۱/۳۰	۳
۱۰/۴	۱۰	۲۳/۵۳	۱/۵۴	۷/۳۱	۳/۴۷	۷/۱۲	۳/۷۳	۱۱/۸	۱/۸۶	۱۱/۳۵	۱/۹۰	۱۳۵۵/۳/۱۷	۴
۶/۱۹	۱۲	۱۲/۳۳	۱/۳۵	۳/۸۳	۳/۲۸	۳/۷۳	۳/۵۴	۵/۸	۱/۷۵	۵/۶۰	۱/۸۰	۱۳۵۷/۲/۱۲	۵
۴/۴۹	۶	۱۰/۰۹	۲/۱۰	۳/۱۳	۴/۰۳	۳/۰۵	۴/۲۹	۴/۶	۲/۵۵	۴/۴۱	۲/۶۰	۱۳۵۸/۳/۲۶	۶
۳/۶۵	۴	۸/۹۷	۱/۱۶	۲/۷۹	۳/۰۹	۲/۷۱	۳/۳۶	۴/۰	۱/۶۵	۳/۸۲	۱/۷۰	۱۳۵۸/۸/۱۲	۷
۱۱/۰۹	۱۹	۲۱/۲۹	۱/۱۶	۶/۶۲	۳/۰۹	۶/۴۴	۳/۳۶	۱۰/۶	۱/۴۹	۱۰/۲۵	۱/۵۳	۱۳۵۹/۶/۲۰	۸
۳/۵۵	۱۳	۸/۹۷	۱/۷۲	۲/۷۹	۳/۶۵	۲/۷۱	۳/۹۲	۴/۰	۲/۲۲	۳/۸۱	۲/۲۷	۱۳۶۲/۱/۱۴	۹
۷/۵	۲	۱۹/۲۴	۱/۳۵	۵/۹۸	۳/۲۸	۵/۸۲	۳/۵۴	۹/۳	۱/۷۲	۸/۹۴	۱/۷۶	۱۳۶۲/۲/۱۳	۱۰
۱/۷۱	۲	۳/۵۸	۱/۱۶	۱/۱۱	۳/۰۹	۱/۰۸	۳/۳۶	۱/۴	۱/۸۱	۱/۳۸	۱/۸۶	۱۳۶۴/۸/۸	۱۱
۳/۵	۱	۶/۴۳	۱/۱۶	۲/۰۰	۳/۰۹	۱/۹۴	۳/۳۶	۲/۸	۱/۶۶	۲/۷۳	۱/۷۱	۱۳۶۷/۷/۱۰	۱۲
۴/۸۷	۷	۱۱/۲۱	۱/۳۵	۳/۴۸	۳/۲۸	۳/۳۹	۳/۵۴	۵/۱	۱/۷۹	۴/۹۵	۱/۸۴	۱۳۶۹/۴/۳	۱۳
۲/۱۵	۵	۹/۷۵	۱/۱۶	۳/۰۳	۳/۰۹	۲/۹۵	۳/۳۶	۴/۰	۱/۷۶	۳/۸۸	۱/۸۱	۱۳۷۱/۳/۱۵	۱۴
۱/۹۳	۶	۲/۳۴	۱/۱۶	۰/۷۳	۳/۰۹	۰/۷۱	۳/۳۶	۱/۰	۱/۷۸	۰/۹۲	۱/۸۳	۱۳۷۲/۴/۲۵	۱۵
۱/۳	۳	۳/۳۹	۱/۱۶	۱/۰۵	۳/۰۹	۱/۰۳	۳/۳۶	۱/۳	۱/۸۷	۱/۲۶	۱/۹۳	۱۳۷۳/۲/۱۳	۱۶
۹/۸	۷	۱۹/۰۵	۱/۳۵	۵/۹۲	۳/۲۸	۵/۷۶	۳/۵۴	۹/۵	۱/۶۸	۹/۱۳	۱/۷۲	۱۳۷۳/۷/۶	۱۷
۱	۳	۴/۶۶	۱/۱۶	۱/۴۵	۳/۰۹	۱/۴۱	۳/۳۶	۱/۷	۱/۹۴	۱/۶۷	۱/۹۹	۱۳۷۶/۶/۲۸	۱۸
۳/۷۲	۱۰	۷/۸۴	۱/۳۵	۲/۴۴	۳/۲۸	۲/۳۷	۳/۵۴	۳/۵	۱/۸۴	۳/۳۵	۱/۸۹	۱۳۷۷/۳/۲	۱۹
۵/۴۶	۱۰	۲۹/۱۴	۱/۷۲	۹/۰۵	۳/۶۵	۸/۸۱	۳/۹۲	۱۳/۵	۲/۱۵	۱۳/۰۵	۲/۱۹	۱۳۷۹/۷/۸	۲۰
۳/۴۵	۹	۱۴/۵۷	۱/۳۵	۴/۵۳	۳/۲۸	۴/۴۱	۳/۵۴	۶/۴	۱/۸۵	۶/۱۷	۱/۹۰	۱۳۸۰/۹/۱۲	۲۱
۳/۲	۱۳	۱۴/۶۶	۱/۱۶	۴/۵۵	۳/۰۹	۴/۴۳	۳/۳۶	۶/۴	۱/۶۸	۶/۱۵	۱/۷۳	۱۳۸۲/۲/۱۵	۲۲
۶/۱۵	۴	۱۵/۳۲	۱/۱۶	۴/۷۶	۳/۰۹	۴/۶۴	۳/۳۶	۷/۲	۱/۵۶	۶/۹۶	۱/۶۱	۱۳۸۵/۸/۱	۲۳
۲/۸۸	۸	۳/۷۸	۱/۱۶	۱/۱۷	۳/۰۹	۱/۱۴	۳/۳۶	۱/۶	۱/۷۰	۱/۵۶	۱/۷۵	۱۳۸۸/۱/۱۷	۲۴
۶/۵۵	۱۷	۱۴/۵۷	۱/۳۵	۴/۵۳	۳/۲۸	۴/۴۱	۳/۵۴	۶/۹	۱/۷۴	۶/۶۷	۱/۷۹	۱۳۸۸/۲/۲۵	۲۵
۴/۲۷	۲	۱۰/۰۹	۱/۱۶	۳/۱۳	۳/۰۹	۳/۴۷	۲/۹۸	۴/۵	۱/۶۳	۴/۳۹	۱/۶۷	۱۳۸۸/۸/۱۲	۲۶
۴/۹	۷	۱۶/۶۵	۱/۳۵	۵/۱۷	۳/۲۸	۵/۰۴	۳/۵۴	۷/۶	۱/۷۹	۷/۳۶	۱/۸۴	۱۳۸۸/۸/۲۵	۲۷
۱/۸۹	۵	۷/۰۳	۱/۳۵	۲/۱۸	۳/۲۸	۲/۱۳	۳/۵۴	۲/۹	۱/۹۷	۲/۷۵	۲/۰۲	۱۳۸۸/۸/۲۷	۲۸
۱/۴۲	۴	۴/۵۴	۱/۱۶	۱/۴۱	۳/۰۹	۱/۳۷	۳/۳۶	۱/۸	۱/۸۵	۱/۷۱	۱/۹۰	۱۳۸۹/۱/۲۹	۲۹
۳/۴۱	۱۱	۸/۹۷	۱/۳۵	۲/۷۹	۳/۲۸	۲/۷۱	۳/۵۴	۳/۹	۱/۸۵	۳/۷۹	۱/۹۰	۱۳۸۹/۵/۲۳	۳۰
۱/۳۳	۳	۴/۳۳	۱/۳۵	۱/۳۵	۳/۲۸	۱/۳۱	۳/۵۴	۱/۷	۲/۰۵	۱/۶۱	۲/۱۱	۱۳۹۰/۱/۱۶	۳۱
۱/۷۸	۲	۲/۲۲	۱/۵۴	۰/۶۹	۳/۴۷	۰/۶۷	۳/۷۳	۰/۹	۱/۹۹	۰/۸۶	۲/۲۳	۱۳۹۰/۱/۱۷	۳۲
۵/۸۵	۸	۱۲/۳۳	۱/۵۴	۳/۸۳	۳/۴۷	۳/۷۳	۳/۷۳	۵/۸	۱/۹۵	۵/۵۷	۱/۹۹	۱۳۹۰/۸/۲۹	۳۳
۳/۵۶	۴	۲/۷۸	۱/۹۱	۰/۸۶	۳/۸۴	۰/۸۴	۴/۱۱	۱/۲	۲/۴۱	۱/۱۸	۲/۴۶	۱۳۹۴/۹/۱۰	۳۴

* واحد آن بر حسب ساعت است.

** واحد آن بر حسب مترمکعب بر ثانیه است.

جدول ۳. دبی اوج و زمان تا اوج هیدروگراف واحد لحظه‌ای با استفاده از روش ژئومورفوکلیماتیک حوزه آبخیز امامه

مقادیر مشاهده‌ای		GTOPO		SRTM		ASTER		ALOS PALSAR		TOPO		مدل رقومی ارتفاع	
Qp	Tp	Qp	Tp	Qp	Tp	Qp	Tp	Qp	Tp	Qp**	Tp*	تاریخ رگبار	ردیف
۴/۳	۱	۲۱/۱۲	۰/۳۴	۶/۳۴	۰/۸۰	۶/۲۶	۰/۸۱	۱۱/۶	۰/۸۲	۵/۹۱	۰/۸۴	۱۳۴۹/۲/۱۵	۱
۳/۵	۲	۴۲/۹۹	۰/۳۱	۱۳/۶۲	۰/۶۸	۱۳/۴۴	۰/۶۸	۱۳/۱۳	۰/۷۰	۱۲/۷۱	۰/۷۱	۱۳۴۹/۲/۴	۲
۳/۳۳	۶	۱۴/۳۷	۰/۷۷	۵/۸۶	۱/۴۰	۵/۷۹	۱/۴۱	۵/۶۶	۱/۴۳	۵/۴۹	۱/۴۶	۱۳۵۲/۱/۳۰	۳
۱۰/۴	۱۰	۲۷/۷۹	۰/۷۲	۱۴/۸۳	۱/۲۰	۱۴/۶۶	۱/۲۱	۱۴/۳۶	۱/۲۲	۱۳/۹۴	۱/۲۵	۱۳۵۵/۳/۱۷	۴
۶/۱۹	۱۲	۱۹/۴۹	۰/۵۵	۶/۸۹	۱/۰۹	۶/۸۱	۱/۱۰	۶/۶۵	۱/۱۲	۶/۴۴	۱/۱۵	۱۳۵۷/۲/۱۲	۵
۴/۴۹	۶	۵/۶۶	۱/۴۲	۳/۳۸	۲/۳۰	۳/۳۴	۲/۳۲	۳/۲۸	۲/۳۵	۳/۱۸	۲/۳۹	۱۳۵۸/۳/۲۶	۶
۳/۶۵	۴	۲۱/۹۹	۰/۳۴	۶/۶۲	۰/۷۹	۶/۵۳	۰/۸۰	۶/۳۸	۰/۸۱	۶/۱۷	۰/۸۴	۱۳۵۸/۸/۱۲	۷
۱۱/۰۹	۱۹	۴۳/۷۹	۰/۳۱	۱۳/۸۹	۰/۶۷	۱۳/۷۱	۰/۶۸	۱۳/۴۰	۰/۶۹	۱۲/۹۶	۰/۷۱	۱۳۵۹/۶/۲۰	۸
۳/۵۵	۱۳	۸/۲۷	۱/۰۱	۳/۵۴	۱/۸۰	۳/۵۰	۱/۸۱	۳/۴۲	۱/۸۴	۳/۳۲	۱/۸۸	۱۳۶۲/۱/۱۴	۹
۷/۵	۲	۳۴/۹۳	۰/۵۲	۱۳/۸۰	۰/۹۶	۱۳/۶۳	۰/۹۷	۱۳/۳۳	۰/۹۸	۱۲/۹۲	۱/۰۱	۱۳۶۲/۲/۱۳	۱۰
۱/۷۱	۲	۶/۶۰	۰/۴۱	۱/۸۷	۱/۰۶	۱/۸۴	۱/۰۷	۱/۸۰	۱/۰۹	۱/۷۴	۱/۱۲	۱۳۶۴/۸/۸	۱۱
۳/۵	۱	۱۴/۳۲	۰/۳۶	۴/۲۰	۰/۸۷	۴/۱۴	۰/۸۸	۴/۰۵	۰/۹۰	۳/۹۱	۰/۹۳	۱۳۶۷/۷/۱۰	۱۲
۴/۸۷	۷	۱۸/۸۴	۰/۵۶	۶/۶۳	۱/۱۰	۶/۵۴	۱/۱۱	۶/۴۰	۱/۱۳	۶/۲۰	۱/۱۶	۱۳۶۹/۴/۳	۱۳
۲/۱۵	۵	۲۴/۵۹	۰/۳۳	۷/۴۵	۰/۷۷	۷/۳۵	۰/۷۸	۷/۱۸	۰/۷۹	۶/۹۵	۰/۸۱	۱۳۷۱/۳/۱۵	۱۴
۱/۹۳	۶	۳/۷۳	۰/۴۵	۱/۰۳	۱/۲۲	۱/۰۲	۱/۲۳	۱/۰۰	۱/۲۶	۰/۹۶	۱/۳۰	۱۳۷۲/۴/۲۵	۱۵
۱/۳	۳	۶/۱۵	۰/۴۱	۱/۷۳	۱/۰۸	۱/۷۱	۱/۰۹	۱/۶۷	۱/۱۱	۱/۶۱	۱/۱۴	۱۳۷۳/۲/۱۳	۱۶
۹/۸	۷	۳۴/۵۵	۰/۵۲	۱۳/۶۲	۰/۹۶	۱۳/۴۵	۰/۹۷	۱۳/۱۶	۰/۹۹	۱۲/۷۵	۱/۰۱	۱۳۷۳/۷/۶	۱۷
۱	۳	۹/۳۷	۰/۳۸	۲/۶۹	۰/۹۷	۲/۶۵	۰/۹۸	۲/۵۹	۱/۰۰	۲/۵۱	۱/۰۳	۱۳۷۶/۶/۲۸	۱۸
۳/۷۲	۱۰	۱۲/۲۵	۰/۵۸	۴/۰۸	۱/۲۱	۴/۰۲	۱/۲۲	۳/۹۳	۱/۲۵	۳/۸۱	۱/۲۸	۱۳۷۷/۳/۲	۱۹
۵/۴۶	۱۰	۱۸/۵۸	۰/۹۱	۱۷/۰۷	۱/۴۰	۱۶/۸۹	۱/۴۱	۱۶/۵۷	۱/۴۳	۱۶/۱۲	۱/۴۵	۱۳۷۹/۷/۸	۲۰
۳/۴۵	۹	۲۵/۵۳	۰/۵۴	۹/۴۵	۱/۰۳	۹/۳۳	۱/۰۴	۹/۱۲	۱/۰۶	۸/۸۴	۱/۰۸	۱۳۸۰/۹/۱۲	۲۱
۳/۲	۱۳	۴۱/۳۹	۰/۳۱	۱۳/۰۷	۰/۶۸	۱۲/۸۹	۰/۶۹	۱۲/۶۰	۰/۷۰	۱۲/۱۹	۰/۷۲	۱۳۸۲/۲/۱۵	۲۲
۶/۱۵	۴	۴۳/۷۷	۰/۳۱	۱۳/۸۹	۰/۶۷	۱۳/۷۰	۰/۶۸	۱۳/۳۹	۰/۶۹	۱۲/۹۶	۰/۷۱	۱۳۸۵/۸/۱	۲۳
۲/۸۸	۸	۷/۱۱	۰/۴۰	۲/۰۲	۱/۰۴	۱/۹۹	۱/۰۵	۱/۹۴	۱/۰۷	۱/۸۸	۱/۱۰	۱۳۸۸/۱/۱۷	۲۴
۶/۵۵	۱۷	۲۵/۵۸	۰/۵۴	۹/۴۷	۱/۰۳	۹/۳۵	۱/۰۴	۹/۱۵	۱/۰۵	۸/۸۶	۱/۰۸	۱۳۸۸/۲/۲۵	۲۵
۴/۲۷	۲	۱۷/۹۱	۰/۴۲	۵/۰۳	۱/۱۰	۷/۷۱	۰/۷۷	۷/۲۸	۰/۸۱	۵/۶۵	۰/۸۰	۱۳۸۸/۸/۱۲	۲۶
۴/۹	۷	۲۹/۷۶	۰/۵۳	۱۱/۳۵	۰/۹۹	۱۱/۲۱	۱/۰۰	۱۰/۹۶	۱/۰۲	۱۰/۶۲	۱/۰۴	۱۳۸۸/۸/۲۵	۲۷
۱/۸۹	۵	۱۰/۷۱	۰/۵۹	۳/۵۱	۱/۲۵	۳/۴۶	۱/۲۶	۳/۳۸	۱/۲۸	۳/۲۷	۱/۳۲	۱۳۸۸/۸/۲۷	۲۸
۱/۴۲	۴	۹/۰۵	۰/۳۹	۲/۶۰	۰/۹۸	۲/۵۶	۰/۹۹	۲/۵۰	۱/۰۱	۲/۴۲	۱/۰۴	۱۳۸۹/۱/۲۹	۲۹
۳/۴۱	۱۱	۱۴/۶۷	۰/۵۷	۴/۹۹	۱/۱۶	۴/۹۲	۱/۱۸	۴/۸۱	۱/۲۰	۴/۶۶	۱/۲۳	۱۳۸۹/۵/۲۳	۳۰
۱/۳۳	۳	۵/۸۳	۰/۶۴	۱/۸۱	۱/۴۴	۱/۷۸	۱/۴۵	۱/۷۴	۱/۴۸	۱/۶۸	۱/۵۲	۱۳۹۰/۱/۱۶	۳۱
۱/۷۸	۲	۵/۱۶	۰/۸۶	۱/۷۵	۱/۷۶	۱/۷۲	۱/۷۸	۱/۱۶	۱/۶۲	۱/۶۳	۱/۸۵	۱۳۹۰/۱/۱۷	۳۲
۵/۸۵	۸	۱۵/۴۶	۰/۷۷	۶/۴۳	۱/۳۸	۶/۳۵	۱/۳۹	۶/۲۲	۱/۴۱	۶/۰۳	۱/۴۴	۱۳۹۰/۸/۲۹	۳۳
۳/۵۶	۴	۸/۷۱	۱/۱۹	۵/۰۹	۱/۹۳	۵/۰۳	۱/۹۴	۴/۹۳	۱/۹۷	۴/۷۹	۲/۰۱	۱۳۹۴/۹/۱۰	۳۴

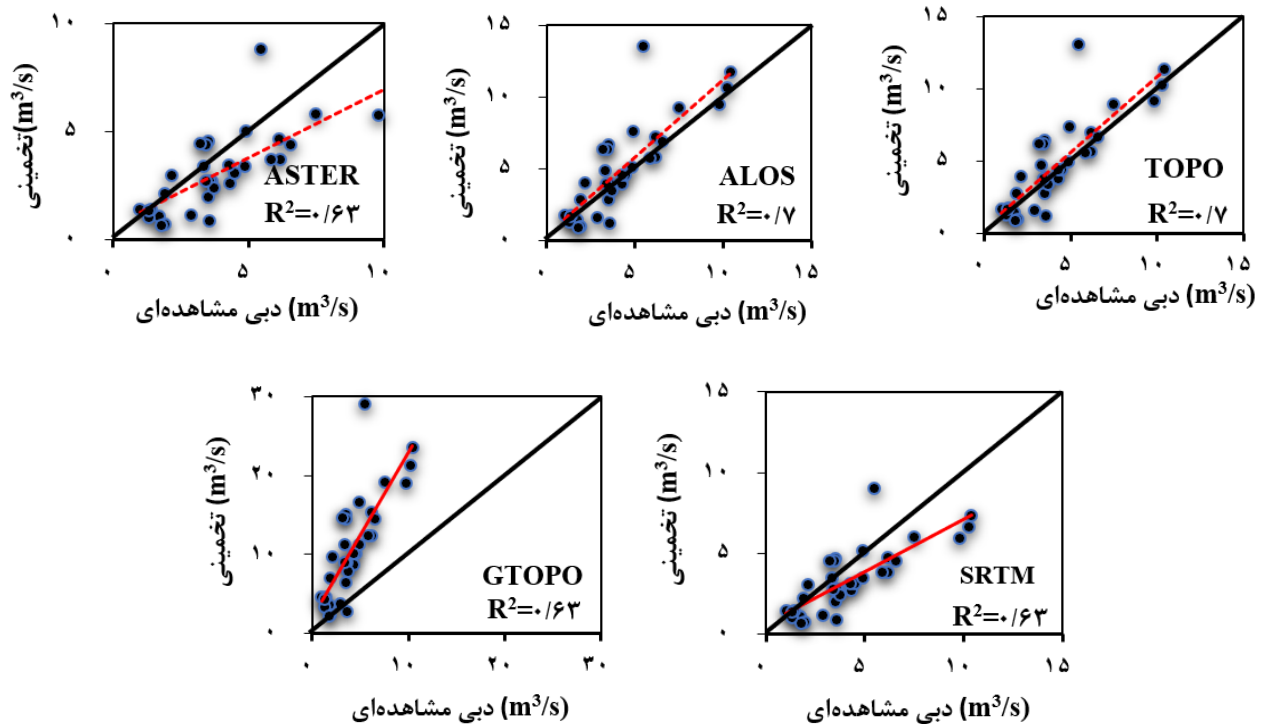
* واحد آن بر حسب ساعت است.

** واحد آن بر حسب مترمکعب بر ثانیه است.

جدول ۴. شاخص‌های آماری خطا برای دبی اوج تخمینی در روش‌های ژئومورفولوژیک و ژئومورفوکلیماتیک در پنج مدل رقومی ارتفاع

GTOPO		SRTM		ASTER		ALOS PALSAR		TOPO		روش
NSE	RMSE	NSE	RMSE	NSE	RMSE	NSE	RMSE	NSE	RMSE*	
-۲	۸/۲	۰/۴	۱/۹	۰/۴	۱/۹	۰/۳	۱/۸	۰/۴	۱/۷	ژئومورفولوژیک
-۶	۱۸	۰/۱	۴/۳	۰/۱	۴/۳	۰/۱	۴/۱	۰/۲	۳/۸	ژئومورفوکلیماتیک

* واحد آن مترمکعب بر ثانیه است.

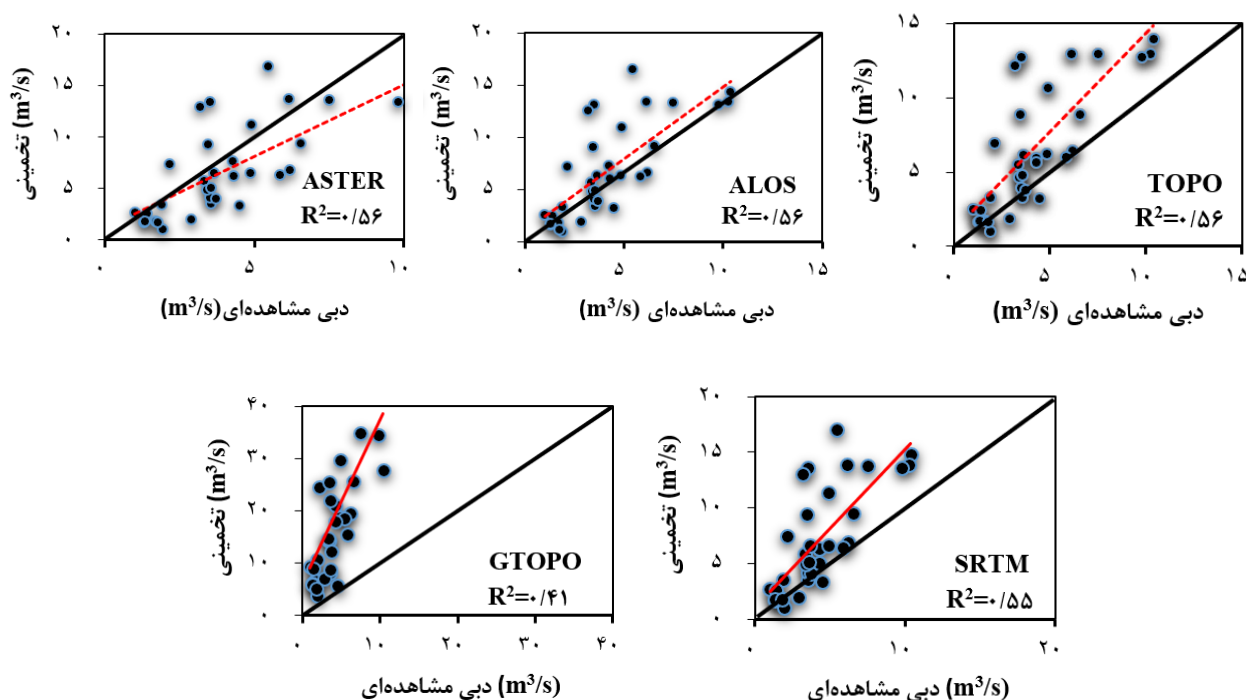


شکل ۴. مقایسه مقادیر برآوردی و مشاهده‌ای دبی اوج به روش ژئومورفولوژیک در مدل‌های رقومی ارتفاعی مختلف. خط مشکی رنگ بیانگر خط ۱:۱ و خط چین قرمز رنگ خط رگرسیون است. (رنگی در نسخه الکترونیکی)

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر اثر دقت مکانی پنج مدل رقومی ارتفاع شامل، مدل رقومی ارتفاع حاصل از نقشه توپوگرافی (TOPO) با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰، ASTER، ALOS PALSAR و SRTM و GTOPO به ترتیب با دقت ۱۰، ۱۲/۵، ۳۰، ۹۰ و ۱۰۰ متر در تخمین هیدروگراف واحد ژئومورفولوژیک و ژئومورفوکلیماتیک در حوزه آبخیز امامه ارزیابی شد. برای این منظور از ۳۴ رویداد سیلاب منفرد طی سال‌های ۱۳۴۹ تا ۱۳۹۴ استفاده شد. پس از رتبه‌بندی شبکه زهکشی هر کدام از

مدل‌های رقومی ارتفاع به روش استراهلر و برآورد مساحت تحت پوشش هر رتبه، نسبت‌های هورتونی شامل نسبت انشعاب، نسبت طول و نسبت مساحت برای هر کدام برآورد شد. در نهایت ابعاد هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیک و ژئومورفوکلیماتیک در پنج مدل رقومی ارتفاع برآورد شد. به منظور ارزیابی بررسی کارایی هیدروگراف‌های واحد لحظه‌ای و مقایسه نتایج به دست آمده از شاخص‌های آماری خطا شامل RMSE، R² و NSE استفاده شد. نتایج نشان داد دقت‌های مختلف مدل رقومی ارتفاع



شکل ۵. مقایسه مقادیر برآوردی و مشاهده‌ای دبی اوج به روش ژئومورفوکلیماتیک در مدل‌های رقومی ارتفاعی مختلف. خط مشکی رنگ بیانگر خط ۱:۱ و خط چین قرمز رنگ خط رگرسیون است. (رنگی در نسخه الکترونیکی)

SRTM تقریباً نتایج یکسان و حد واسطی را در هر دو روش به‌دست داد. به‌طور کلی روش ژئومورفولوژیک نسبت به روش ژئومورفوکلیماتیک در تمام مدل‌های رقومی ارتفاع نتایج مطلوب‌تری را برآورد کرد. نمایش بصری مقادیر برآوردی و مشاهده‌ای نیز موارد بحث شده را تأیید می‌کند. بنابراین، با توجه به ضرورت برآورد دبی اوج در تعیین ابعاد هیدروگراف واحد لحظه‌ای در حوزه‌آبخیز به‌منظور شبیه‌سازی دقیق و کنترل سیلاب‌های آتی، استفاده از روش ژئومورفولوژیک با مدل رقومی ارتفاع TOPO می‌تواند نتایج مطلوبی ارائه دهد.

می‌تواند تأثیر معنی‌داری در کارایی هر دو روش ژئومورفولوژیک و ژئومورفوکلیماتیک دارد. به‌طوری که در روش ژئومورفولوژیک استفاده از مدل رقومی ارتفاع TOPO و در درجه بعد ALOS PALSAR بهترین نتایج را با RMSE کمتر از دو متر مکعب بر ثانیه به‌دست داد حال آنکه مدل رقومی ارتفاع GETOPO به سبب داشتن کمترین دقت (۱۰۰۰ متر) کمترین کارایی را با خطای ۸/۲ متر مکعب بر ثانیه داشت. به‌طور مشابه در روش ژئومورفوکلیماتیک کمترین و بیشترین خطا به‌ترتیب ۳/۸ و ۱۸ متر مکعب بر ثانیه متعلق به مدل‌های رقومی TOPO و ALOS PALSAR است. دو مدل رقومی ارتفاع ASTER

منابع مورد استفاده

1. Azizian, A. and A. Shokohi. 2013. An investigation on the effects of DEM resolution and stream delineation thresholds on the performance of the kinematic-wave-based GIUH model. *Journal of Hydraulics* 8(3): 1-18 (In Farsi).
2. Alizadeh, A. 2015. Principles of Applied Hydrology, Emam Reza University Press, Mashhad, Iran (In Farsi).
3. Ashurlu, D. A., A. Matkan, Y. Kazem, A. Senseo, M. Azadbakht, M. Haji and A. Ghulampour. 2008. Determination of suitable pixel size for extracting physiographic parameter on Iran maps with scale of 1:25000. *Iranian Journal of*

- Geology* 2(8): 47-54 (In Farsi).
4. Bamufleh, S. A. Al-Wagdany, A. Elfeki and A. Chaabani. 2020. Developing a geomorphological instantaneous unit hydrograph (GIUH) using equivalent Horton-Strahler ratios for flash flood predictions in arid regions. *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 11(1): 1697-1723.
 5. Bayati, F., R. Mirabbasi, R. Fatahi and M. Radfar. 2019. The study of the effect of some used parameters on geomorphologic instantaneous unit hydrograph. *Journal of Wound Management and Research* 10 (20) :109-119 (In Farsi).
 6. Bayati, F., R. Mirabbasi, R. Fatahi Nafchi and M. Radfar. 2021. Performance assessment of Copula functions in estimation of rainfall losses and rainfall-runoff modelling (Case study: Kasilian Watershed). *Watershed Engineering and Management* 13(1): 125-136 (In Farsi).
 7. Bian, L. 1997. Multiscale nature of spatial data in scaling up environmental models. PP. 13-26. In: M.F. Goodchild and D. A. Quattrochi (Eds.), *Scale in Remote Sensing and GIS*, CRC Press, Taylor and Francis Group, New York, USA.
 8. Chaplot, V. 2005. Impact of DEM mesh size and soil map scale on SWAT runoff, sediment, and NO₃CN loads predictions. *Journal of Hydrology* 312(5): 207-222.
 9. Chavan, S. R. and V. V. Srinivas. 2015. Effect of DEM source on equivalent Horton-Strahler ratio based GIUH for catchments in two Indian river basins. *Journal of Hydrology* 528: 463-489.
 10. Chaubey, I., A. Cotter, T. Costello and T. Soerens. 2005. Effect of DEM data resolution on SWAT output uncertainty. *Hydrological Processes* 19: 621-628.
 11. De Moura, M. M., S. Beskow., F. da Silva Terra., C. R. de Mello., Z. A. da Cunha and F. Cassalho. 2021. Evaluation of geomorphological approaches combined with digital elevation models for the Nash's instantaneous unit hydrograph. *Journal of South American Earth Sciences* 107: 103-153.
 12. Ghiasy, N. and M. Roghani. 2006. Efficiency of instantaneous geomorphological unit hydrograph and its comparison with Snyder, Triangular and SCS artificial hydrographs in Kasilian watershed. *Pajohesh-va-Sazandegi* 19(1): 23-32 (In Farsi).
 13. Gholami Sowmée, F., A. Fakheri Fard and Y. Dinpashoh. 2011. Derivation a geomorphological unit hydrograph based on cascade linear reservoirs (Case study: Liqvan Catchment). *Irrigation Sciences and Engineering* 34(2): 83-94 (In Farsi).
 14. Ghumman, A. R., M. M. Ahmad, H. N. Hashmi and M. A. Kamal. 2012. Development of geomorphologic instantaneous unit hydrograph for a large watershed. *Environmental Monitoring and Assessment* 184(5): 3153-3163.
 15. Golkarian, A., S. A. Naqibi and D. Davoodi Moghaddam. 2014. Capability assessment of GIUH method for predicting the dimension of instantaneous unit hydrograph and compare it with snyder, SCS and triangular methods. *Journal of Water and Soil* 28(2): 440-450 (In Farsi).
 16. Jahanbakhsh Asl, M., M. Rezaie Banfshah, A. Goodarzi, M. H. Ghafouri Rouzbehani and M. H. Mahdian. 2012. The assessment of time-area and Clark instantaneous unit hydrograph models in estimating flood discharge in Bazoft Karoon. *Journal of Geography and Planning* 16(41): 49-66 (In Farsi).
 17. Karami, F. and M. Esmailpour. 2015. Estimation the runoff for the ungauged basins using geomorphological instantaneous unit hydrograph (Case Study: Daryan Chay). *Hydrogeomorphology* 1(1): 145-157 (In Farsi).
 18. Kaviyan, A. and M. Mohammadi. 2019. Effects of digital elevation models (DEM) spatial resolution on hydrological simulation. *Journal of Watershed Management Research* 10(19): 36-45 (In Farsi).
 19. Kazemzadeh, M. and J. Akbari. 2020. Spatial accuracy analysis of TRMM satellite images in estimating meteorological drought index, case study: Iran. *Iranian Journal of Watershed Engineering and Management* 11(4): 903-916 (In Farsi).
 20. Kumar, A. 2015. Geomorphologic instantaneous unit hydrograph based hydrologic response models for ungauged hilly watersheds in India. *Water Resources Management* 29(3): 863-883.
 21. Kumar, J., R. Suresh and S. Hassan. 2017. Development of geomorphological instantaneous unit hydrograph (GIUH) model for a new un-gauged watershed. *International Journal of Agricultural Invention* 2(01): 54-59.
 22. Maleki, A. and M. Hafezparast. 2019. Efficiency of geomorphologic instantaneous unit hydrograph (GIUH), comparing to other models in Mereg Catchment, Kermanshah. *Geographic Space* 19(68): 59-74 (In Farsi).
 23. Mahdavi, M. 2001. *Applied Hydrology*. Tehran University Publications, Tehran, Iran (In Farsi).
 24. Mostafazadeh, R., A. Bahremand and M. Zabihi. 2015. Efficiency evaluation of disk method in derivation of instantaneous unit hydrograph in Jafar-Abad watershed, Golestan Province. *Iranian Journal of Ecohydrology* 2(2): (In Farsi).
 25. Mostafazadeh, R., S. Mirzaei and K. Haji. 2018. Determining the optimal input subset and response of hydrologic model of Nash to variations of input model parameter ranges in Jafar-abad mountainous watershed. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 49(3): 535-527.
 26. Nouri, H. and A. R. Ildarmi. 2013. The efficiency of geomorphology and geomorpho-climatology instantaneous unit

- hydrograph models in estimating flood discharges in Ekbatan of Hamedan watershed. *Geographic Space* 13(42): 209-227 (In Farsi).
27. Osman, S. and I. Abustan. 2011. Estimating the Clark instantaneous unit hydrograph parameters for selected gauged catchments in the west Coast of Peninsular Malaysia. *ASEAN Engineering Journal* 1(3): 126-141.
 28. Ramírez, J. A. 2000. Prediction and Modelling of Flood Hydrology and Hydraulics. Ellen Wohl Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
 29. Rigon, R., M. Bancheri, G. Formetta and de A. Lavenne. 2016. The geomorphological unit hydrograph from a historical-critical perspective. *Earth Surface Processes and Landforms* 41(1): 27-37.
 30. Rodríguez-Iturbe, I. and J. B. Valdés. 1979. The geomorphologic structure of hydrologic response. *Water Resources Research* 15(6): 1409-1420.
 31. Rodríguez-Iturbe, I., M. González-Sanabria and R. L. Bras. 1982. A geomorphoclimatic theory of the instantaneous unit hydrograph. *Water Resources Research* 18(4): 877-886.
 32. Sahoo, R. and V. Jain. 2018. Sensitivity of drainage morphometry based hydrological response (GIUH) of a river basin to the spatial resolution of DEM data. *Computers and Geosciences* 111: 78-86.
 33. Sanjari, M. 2018. Multi scale analysis of geomorphologic instantaneous unit hydrograph (GIUH). *Journal of Range and Watershed Management* 71(4): 963-971 (In Farsi).
 34. Saïdy, P., M. Niksokhan and K. Norouzi. 2015. Calculated geomorphologic instantaneous unit hydrograph (GIUH) and width-function based instantaneous unit hydrograph (WFIUH) in the ungauged watershed. *Iranian Journal of Eco Hydrology* 2(1): 51-62 (In Farsi).
 35. Shahedi, K., H. Asadi and M. Golshan. 2016. Comparison of time-area and Clark instantaneous unit hydrograph models efficiency to reconstruct flood hydrographs at Kasilian watershed. *Hydrogeomorphology* 3(7): 123-139 (In Farsi).
 36. Sherman, L. K. 1932. The relation of hydrographs of runoff to size and character of drainage-basins. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 13(1): 332-339.
 37. Shen, Z., L. Chen and T. Chen. 2013. The influence of parameter distribution uncertainty on hydrological and sediment modelling: A case study of SWAT model applied to the Daning watershed of the three Gorges Reservoir Region, China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 27(16): 235-251.
 38. Sivasena Reddy, A. and M. Janga Reddy. 2015. Evaluating the influence of spatial resolutions of DEM on watershed runoff and sediment yield using SWAT. *Indian Academy of Sciences* 124(7): 1517-1529.
 39. Sudharsanan, R., M. Krishnaveni and K. Karunakaran. 2010. Derivation of instantaneous unit hydrograph for a sub-basin using linear geomorphological model and geographic information systems. *Journal of Spatial Hydrology* 10(1): 30-40.
 40. Vafakhah, M. and A. R. Moghadamnia. 2018. Flood Control. Tarbiat Modares University Press, Tehran, Iran (In Farsi).
 41. Vafakhah, M., A. Fakhre Nikche and S. H. Sadeghi. 2018. Comparative effectiveness of different infiltration models in estimation of watershed flood hydrograph. *Paddy and Water Environment* 16(3): 411-424.
 42. Walega, A. 2014. The importance of the objective functions and flexibility on calibration of parameters of Clark instantaneous unit hydrograph. *Geomatics, Land Management and Landscape* 2: 75-85.
 43. Wang, W. S. and X. X. Ma. 2019. Determination of dynamic critical rainfall based on geomorphological instantaneous unit hydrograph and radial basis function neural network. *Applied Ecology and Environmental Research* 17(4): 8915-8930.
 44. Yannopoulos, S., Ch. Christidis., A. Loukas and I. Giannopoulou. 2013. A sensitivity analysis on the parameters of Clark instantaneous unit hydrograph. In: 8th International Conference of EWRA Water Resources Management in an Interdisciplinary and Changing Context, Porto, Portugal.
 45. Yao, C., Z. J. Li, K. Zhang, Y. C. Huang, J. F. Wang and S. Bastola. 2022. Evaluating performance dependency of a geomorphologic instantaneous unit hydrograph-based hydrological model on DEM resolution. *Water Science and Engineering* 15(3): 179-188.
 46. Zakizadeh, F. and H. Malekinezhad. 2016. Comparison of geomorphologic, geomorphoclimatic and Rosso instantaneous unit hydrographs and SCS unit hydrograph (Case study: Manshad Watershed). *Iranian Water Researches Journal* 10(1): 97-106 (In Farsi).
 47. Zakizadeh, F. and H. Malekinezhad. 2015. Comparison of methods for estimation of flood hydrograph characteristics. *Russian Meteorology and Hydrology* 40(12): 828-837.

Effect of Spatial Resolution of Digital Elevation Model on the Estimation of Geomorphological and Geomorphoclimatic Unit Hydrographs in Amameh Watershed, Iran

F. Esmaeili, M. Vafakhah* and V. Moosavi¹

(Received: September 28-2022 ; Accepted: December 26-2022)

Abstract

Digital elevation models (DEMs) are one of the most important data required in watershed modeling with hydrological models and their spatial resolution has a significant impact on the accuracy of simulating hydrological processes. In the present study, the effect of spatial resolution of five DEMs derived from the topographic map (TOPO) with a scale of 1:25000, ALOS PALSAR, ASTER, SRTM, and GTOPO with a spatial accuracy of 10, 12.5, 30, 90, and 1000 m, respectively, on the estimation of parameters of geomorphological and geomorphoclimatic unit hydrographs models has been evaluated in Amameh watershed. Thirty-four single flood events were used during the years 1970 to 2015. The results showed that in the GUH method, the application of the TOPO and ALOS PALSAR DEMs had the best results with root mean square error (RMSE) of 1.7 and 1.8 m³/s and Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) of 0.4 and 0.3, respectively. While the GTOPO DEM had the least efficiency with RMSE of 2.8 m³/s and NSE of -2. Similarly, the lowest and highest RMSE in the GCUH method belonged to TOPO and GTOPO DEMs with RMSE of 3.8 and 18 m³/s and NSE of 0.2 and -6, respectively. Generally, the GUH method had more favorable results than the GCUH method in all DEMs.

Keywords: Spatial resolution, Peak flow, Time to peak, Scale, Instantaneous unit hydrograph

1. Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

*: Corresponding author, Email: vafakhah@modares.ac.ir