

## برآورد هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی (GIUH) و هیدروگراف واحد لحظه‌ای تابع عرض (WFIUH) در حوضه‌های فاقد آمار (مطالعه موردی: حوضه قروه)

یونه سعیدی<sup>۱</sup>، محمدحسین نیک‌سخن<sup>۲\*</sup>، خدیجه نوروزی<sup>۱</sup>

۱. دانشجوی دکتری مهندسی محیط زیست (منابع آب)، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران

۲. استادیار، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۱۶ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۰۳/۰۳)

### چکیده

هیدروگراف واحد در پیش‌بینی سیلاب رودخانه‌ها و طراحی سازه‌های کنترلی و حفاظتی در یک حوضه آبریز بسیار مهم است؛ از این رو در حوضه‌های فاقد ایستگاه هیدرومتری با استفاده از روابط ریاضی و تجربی و براساس داده‌های اقلیمی، برآوردی از مقدار آب در حوضه به عمل می‌آید. دو روش هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی و هیدروگراف واحد لحظه‌ای تابع عرض به دلیل بهره‌گیری از خصوصیات فیزیکی حوضه و نرم‌افزار GIS با دقتی پذیرفتنی، قابلیت پیش‌بینی هیدروگراف واحد لحظه‌ای حوضه‌های فاقد آمار را دارند. در این میان روش WFIUH به دلیل اختصاص سرعت جریان متفاوت در منطق چالاب‌های کوهپایه‌ای و کانال اصلی حوضه، با واقعیت هماهنگ‌تر است. در این مقاله هیدروگراف واحد لحظه‌ای حوضه قروه با وسعت ۶۷/۱۴ کیلومتر مربع در استان کردستان به کمک برنامه GIS و برنامه‌های الحاقی آن استخراج شد و نتایج دو روش با هم مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد درحالی که دو روش از همخوانی مطلوبی در تخمین زمان تمرکز حوضه در حدود ۴/۶ ساعت برخوردارند، روش WFIUH با بهره‌گیری از سرعت جریان متناسب با شیب، جزئیات بیشتری را تحت پوشش قرار می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** حوضه قروه، حوضه‌های فاقد آمار، هیدروگراف واحد لحظه‌ای تابع عرض (WFIUH)، هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی (GIUH).

## مقدمه

مطالعات هیدرولوژی، اغلب متکی بر داده های موجود در منطقه طرح یا اطراف آن است. در ایران با توجه به گستردگی و فراوانی حوضه های آبریز و نیز کمبود ایستگاه های هیدرومتری و هزینه زیاد ساخت و نگهداری، در بسیاری از مناطق آمار و اطلاعات هیدرولوژی مورد نیاز برای استخراج هیدروگراف های سیل و دبی جریان رودخانه وجود ندارد. از طرفی در کارهای مهندسی منابع آب و ساماندهی حوضه های آبریز، تعیین دبی سیلاب بسیار اهمیت دارد. در این گونه مناطق، استفاده از روش های تجربی و وابسته به خصوصیات مورفولوژی حوضه آبریز بسیار کارآمد و در مواردی از لحاظ اقتصادی نیز مقرون به صرفه است. این مدل ها براساس پارامترهای فیزیکی و هیدرولوژی هیدروگراف واحد را محاسبه می کنند [۱].

در بحث مطالعات هیدرولوژی یک حوضه آبریز همواره هزینه های نمونه برداری و پایش اطلاعات لازم با توجه به اهمیت حوضه شایان توجه است. به عبارتی در حوضه های آبریز دور از مناطق شهری یا حوضه های کوچک مقیاس با اثرگذاری غیرمستقیم بر طرح ها و مناطق مسکونی، کشاورزی و ... امکان سرمایه گذاری برای ایستگاه های پایش و ثبت اطلاعات همواره فراهم نیست.

همچنین در مطالعات اولیه مناطق فاقد آمار، روش های مقرون به صرفه برای مطالعات اولیه همواره ضرورت دارد. در این گونه موارد با استفاده از روابط ریاضی و تجربی می توان براساس بعضی داده های اقلیمی، مقدار آب در حوضه های فاقد آمار را برآورد کرد. دو روش هیدروگراف واحد لحظه ای ژئومورفولوژیکی و هیدروگراف واحد لحظه ای تابع عرض به دلیل بهره گیری از خصوصیات فیزیکی حوضه و نرم افزار GIS با دقت قابل قبولی، هیدروگراف واحد لحظه ای حوضه های فاقد آمار را پیش بینی می کنند. روش های مذکور در مناطق بسیاری از دنیا ارزیابی و استفاده شده و با داده های واقعی صحت سنجی و مقایسه شده اند. همخوانی قابل قبول این روش ها با داده های واقعی، وابستگی زیادی به اطلاعات مورفولوژی منطقه و خصوصیات حوضه آبریز دارد. بر این اساس در این مطالعه از دو روش مذکور در حوضه قروه در استان کردستان استفاده و نتایج با هم مقایسه شد.

در این پژوهش به منظور تخمین هیدروگراف واحد لحظه ای در حوضه مطالعاتی قروه از دو روش GIUH و

WFIUH براساس مطالعات گریمالدی استفاده شد [۱۱]. در روش GIUH به کمک برنامه GIS و برنامه جانبی ArcHydro اطلاعات لازم از نقشه مدل رقومی یا DEM<sup>۱</sup> این حوضه استخراج شد؛ در حالی که در روش WFIUH از برنامه PEM4PIT<sup>۲</sup> بر روی GIS استفاده شده و هیدروگراف لحظه ای از مدل رقومی حوضه قروه تهیه شد. در نهایت نتایج این دو روش مقایسه شد.

## پیشینه تحقیق

در سال ۱۹۸۴، روسو از مدل گامای دو پارامتری که برای استخراج هیدروگراف واحد Nash (1945) ارائه شده بود استفاده کرد. او با استفاده از نسبت مساحت RA، نسبت انشعاب RB، نسبت طول RL و طول آبراهه L که به نسبت های هورتون معروف اند و با به کارگیری دو رابطه برآورد دبی پیک و زمان تا اوج هیدروگراف واحد لحظه ای، پارامتر شکل  $\alpha$  و پارامتر مقیاس K را معرفی کرد.

رودریگوئز-ایتورب و والدس در سال ۱۹۷۹ براساس ارتباط عوامل ژئومورفولوژی، اقلیم و هیدرولوژی روشی تحت عنوان هیدروگراف واحد لحظه ای ژئومورفولوژی (GIUH)<sup>۳</sup> را معرفی کردند که با استفاده از پارامترهای کمی ژئومورفولوژی و سرعت جریان در اوج سیلاب در حوضه ها، هیدروگراف واحد را استخراج می کند [۱۶].

در سال ۱۳۸۵، غیثی و روغنی از روش GIUH در حوضه کسلیان استفاده کرده و یافته ها را با نتایج هیدروگراف واحد SCS، مصنوعی اشنايدر و مثلثی مقایسه کردند. در این مطالعه براساس تحلیل آماری و آزمون کارایی نسبی، روش GIUH بر دیگر روش ها برتری داشت [۳].

فرانکینی و اوکونل در سال ۱۹۹۶، روابط متفاوت تولید هیدروگراف واحد لحظه ای را بازنگری کرده و پارامتر دینامیک روش GIUH را بررسی کردند. آنان با اصلاح سرعت مورد استفاده GIUH براساس فیزیک حوضه و در نظر گرفتن تابع عرض به عنوان پارامتر تأثیرپذیر از طول آبراهه های حوضه، هیدروگراف واحد لحظه ای تابع عرض WFIUH<sup>۴</sup> را تعریف کردند [۷].

1. Digital Elevation Model

2. Physically Erosion Model for PIT and flat area correction

3. Geomorphological Instantaneous Unit Hydrograph

4. Width Function Instantaneous Unit Hydrograph

روش هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی و مقدار مشاهداتی وجود دارد.

با توجه به نتایج پژوهش‌های صورت‌گرفته در ایران و جهان در زمینه استفاده از خصوصیات ژئومورفولوژی برای استخراج هیدروگراف می‌توان گفت با وجود رایج بودن این مدل‌ها هنوز هم می‌توان با استفاده از معیارهای مختلف، کارایی این روش‌ها را بررسی کرد. از این‌رو در این پژوهش دو روش هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی و هیدروگراف واحد لحظه‌ای تابع عرض از لحاظ سرعت جریان در آبراه‌ها بررسی می‌شوند.

### مواد و روش‌ها

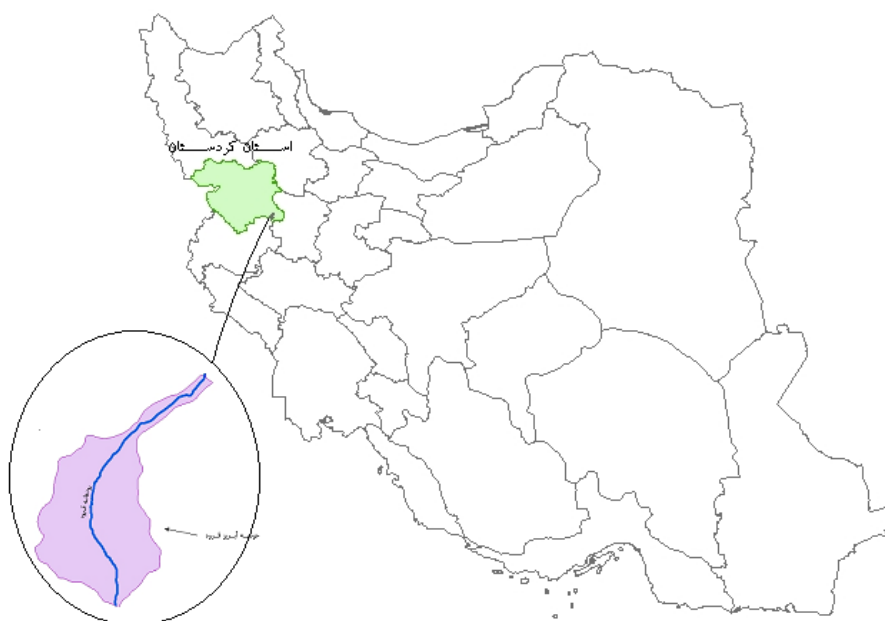
#### منطقه تحقیق

حوضه‌ها از نظر مساحت به سه دسته تقسیم می‌شوند: حوضه‌های کوچک با مساحتی کمتر از ۱۰۰ کیلومتر مربع، حوضه‌های متوسط که مساحت آنها بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلومتر مربع است و حوضه‌های بزرگ که مساحت آنها بالغ بر ۱۰۰۰ کیلومتر مربع است [۷]. منطقه تحقیق، حوضه قروه با وسعتی برابر ۶۷/۱۴ کیلومتر مربع است که در بخش غربی کشور در محدوده تقسیمات سیاسی استان کردستان، شهرستان قروه قرار گرفته است (شکل ۱). بلندترین نقطه منطقه تحقیق ۳۱۰۰ متر و پست‌ترین نقطه آن ۱۸۵۰ متر ارتفاع دارد [۵].

در سال ۲۰۰۴ کودیک و همکاران با بررسی رابطه بین پارامترهای ژئومورفولوژیک و هیدروگراف واحد از طریق توزیع پارامتری گاما، نتیجه گرفتند که بین پارامترهای ژئومورفولوژیک حوضه آبریز و پاسخ هیدروولوژیک آنی رابطه مستقیم وجود دارد [۶].

شیرزادی و همکاران در سال ۱۳۹۰ پارامترهای هیدروگراف واحد مصنوعی را در دو حوضه کانی سواران و مانج در سنندج با استفاده از روش اشنایدر استخراج کردند و میان پارامترهای هیدروگراف واحد مصنوعی و پارامترهای ژئومورفولوژی حوضه ماتریس همبستگی برقرار کردند و از چندین روش رگرسیونی برای همبستگی میان هیدروگراف واحد و هر یک از پارامترهای ژئومورفولوژی استفاده کردند [۲]. نتایج نشان داد که از بین پارامترهای مورد بررسی، سیزده پارامتر بیشترین ضریب همبستگی را با پارامترهای هیدروگراف واحد دارند.

کرمی و اسمعیل‌پور در سال ۱۳۹۳ از مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی برای برآورد رواناب حوضه دریان چای استفاده کردند. در این پژوهش معیارهایی مانند ضریب تعیین، درصد خطای مربوط به پیش‌بینی دبی اوج و زمان رسیدن به دبی اوج و ضریب بازده نش-ساتکلیف و درصد خطای حجم رواناب با هیدروگراف مشاهداتی مقایسه شد [۴]. نتایج این پژوهش نشان داد اختلاف کمی بین زمان اوج شبیه‌سازی شده با استفاده از



شکل ۱. موقعیت منطقه تحقیق

هیدرولوژیک ایستگاه‌های بالادست یا واقع در رودخانه‌های مجاور استفاده شده است [۵]. خصوصیات فیزیوگرافی و اقلیمی حوضه آبریز قروه به صورت جدول ۱ است.

براساس مطالعات صورت گرفته در محدوده مورد مطالعه، ایستگاه‌های هیدرومتری نصب و راه اندازی نشده است. بر این اساس در مطالعات ساماندهی این رودخانه همواره از اطلاعات

جدول ۱. خصوصیات فیزیوگرافی و اقلیمی حوضه آبریز قروه (مأخذ: وزارت نیرو ۱۳۸۵)

مشخصه	متوسط دمای سالانه	متوسط بارش سالانه	زمان تمرکز	شماره منحنی حوضه	شیب متوسط آبراهه اصلی	شیب متوسط حوضه	ارتفاع متوسط حوضه	ارتفاع محل خروجی حوضه	بلندترین نقطه حوضه	ضریب شکل	عرض مستطیل معادل	طول مستطیل معادل	ضریب گراویلوس	طول آبراهه اصلی	محیط حوضه
مقدار	۱۱/۴	۳۱۵	۳/۵	۷۵	۲/۹	۲۴/۱۲	۲۱۹۰	۱۸۳۰	۳۱۰۰	۵/۵۹	۳/۴۷	۱۹/۳۷	۱/۵۶	۱۹/۵۷	۴۵/۶۸
واحد	C	mm	hr	%	%	%	m	m	m		Km	Km	Km	Km	Km

تعریف شد تا بر این اساس سلول‌هایی که ارزش بیشتری از این آستانه دارند در شبکه هیدروگراف نهایی ظاهر شوند. در این مطالعه مقدار آستانه پیش فرض که برابر ۱ درصد بیشترین تراکم جریان است، انتخاب شد؛

• رتبه‌بندی آبراهه‌ها با تقسیم شبکه جریان ساخته شده به بخش‌های یکسان صورت گرفت؛

• خروجی، لایه آبراهه‌های رتبه‌بندی شده است که به صورت رستری است و برای استفاده از این لایه و محاسبه ضریب انشعاب هورتون به بردار تبدیل شد.

لایه‌های تولیدی در هر مرحله از این برنامه در شکل ۲ ارائه شده است.

گام دوم تعیین نسبت‌های هورتون است؛ در این مرحله نسبت مساحت RA، نسبت انشعاب RB، نسبت طول RL و طول آبراهه L (نسبت‌های هورتون) برای حوضه قروه محاسبه شد. از این ضرایب برای تعیین زمان تأخیر حوضه طبق فرمول ۱ استفاده شد. در جدول ۲ ابتدا براساس رتبه‌بندی انجام گرفته در مرحله قبل آبراهه‌ها مرتب شدند. رتبه‌بندی از سرشاخه‌ها شروع شد و با رسیدن به تقاطع دو آبراهه وارد رتبه بالاتر شده و در نهایت به آبراهه اصلی ختم شد و بزرگ‌ترین رتبه مربوط به کانال اصلی شد. در جدول ۲ اطلاعات استخراج شده از لایه‌های پردازش شده مرحله قبل برای محاسبه ضرایب هورتون مشاهده می‌شوند.

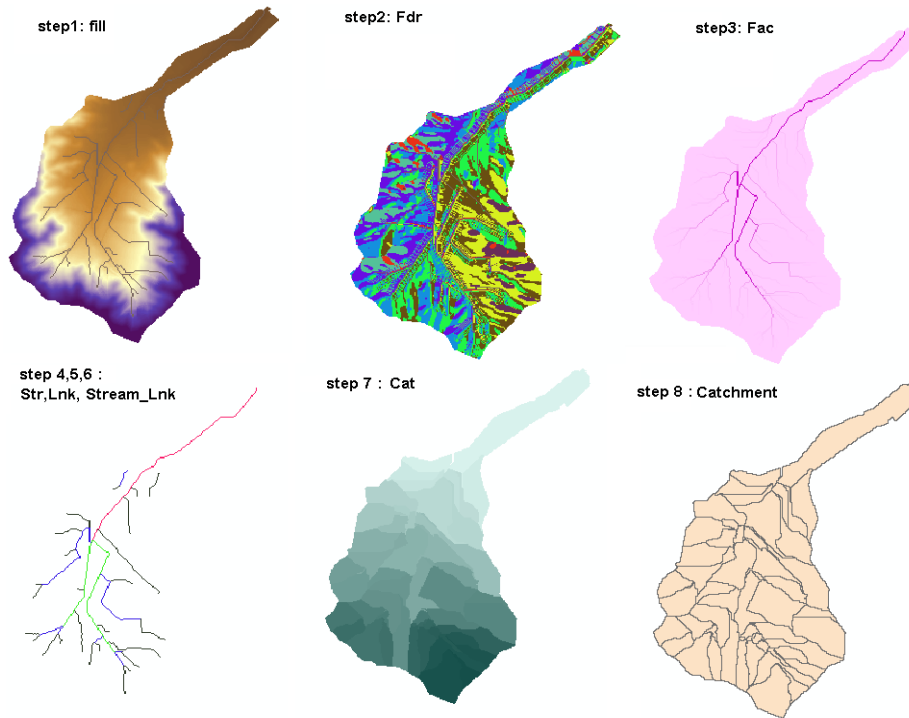
استخراج هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی (GIUH)

مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی، به معنای واکنش حوضه آبریز به ورود یک واحد بارش (به صورت مازاد و لحظه‌ای) است [۱۲]. در این روش با استفاده از رفتار هیدرولوژیکی شبکه جریان و براساس نسبت‌های هورتون، یکسان‌سازی خصوصیات پیچیده رواناب و سازوکار حرکت جریان با استفاده از سرعت متوسط در کانال که به‌طور کلی یک پارامتر غیرفیزیکی کالیبراسیون به حساب می‌آید، تعیین می‌شود [۸].

برای دستیابی به این هیدروگراف در حوضه آبریز قروه به کمک مدل ارتفاعی رقومی حوضه و نرم‌افزار ArcMap گام‌های زیر صورت گرفتند:

گام اول، تولید شبکه آبراهه‌ای حوضه است که با استفاده از روش‌های تحلیل مدل رقومی قابل تهیه است. در این مرحله با افزودن ابزار Arc Hydro به برنامه ArcMap تحلیل‌های زیر بر روی مدل رقومی صورت گرفت:

- مدل رقومی اولیه براساس آبراهه اولیه که منطبق بر رودخانه قروه است اصلاح شد؛
- چاله‌های به‌وجودآمده در فایل مدل رقومی تولیدشده در مرحله قبل پوشش داده شد (Fill Sink)؛
- جهت جریان استخراج و جریان تجمعی<sup>۱</sup> تولید شد؛
- در ادامه، آستانه‌ای برای تولید شبکه هیدروگراف



شکل ۲. لایه‌های تولیدشده برای حوضه آبریز قروه در روش GIUH

جدول ۲. محاسبه نسبت‌های هورتون

رتبه	تعداد آبراهه	$N_u/N_{u+1}$	متوسط طول رتبه	$\bar{L}_u$	$\bar{L}_u / \bar{L}_{u-1}$	متوسط مساحت رتبه	$\bar{A}_u$	$\bar{A}_u / \bar{A}_{u-1}$
۱	۲۸	۲/۳	۱۰۲۸/۳	۱۰۲۸/۳		۱۴۲۸۳۴۳	۱۴۲۸۳۴۳/۲	
۲	۱۲	۱/۳	۹۹۵/۳	۲۰۲۳/۷	۱/۹	۸۰۲۰۱۴/۵	۲۲۳۰۳۵۷/۸	۱/۵
۳	۹	۹	۱۱۵۲/۲	۳۱۷۵/۹	۱/۵	۹۳۷۶۴۹/۷	۳۱۶۸۰۰۷/۵	۱/۴
۴	۱		۱۰۴۰۴/۲	۱۳۵۸۰/۲	۴/۲	۲۶۹۴۷۲۶	۵۸۶۲۷۳۳/۲	۱/۸
ضریب هورتون	$R_b$	۴/۲		$R_L$	۲/۶		$R_a$	۱/۶

تا زمان اوج هیدروگراف است، تعیین و سپس از روی آن زمان تمرکز محاسبه شد.

$$t_{lag} = \frac{. / 269L^{. / \wedge} (S + 25 / 4)^{. / \gamma}}{1900y^{. / \Delta}} \quad (1)$$

$t_{lag}$ : زمان تأخیر حوضه برحسب ساعت، L: طول رودخانه اصلی برحسب متر،  $\gamma$ : متوسط شیب حوضه به درصد و S: نمایه نگهداشت آب در داخل حوضه (میلی متر) است که مقدار آن برابر است با:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (2)$$

گام سوم تعیین زمان تمرکز است. با توجه به اینکه حوضه قروه در دسته حوضه کوچک بدون آمار قرار دارد. ابتدا براساس رابطه سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) زمان تمرکز حوضه تعیین شد. این روش به روش زمان تأخیر معروف است و توسط کارشناسان سازمان حفاظت خاک آمریکا پیشنهاد شده است. فرمول این روش در واحد انگلیسی تعریف شده و پس از محاسبات لازم به سیستم متریک تبدیل شد. در این روش ابتدا زمان تأخیر که بنا به تعریف فاصله زمانی بین مرکز بارش (مرکز ثقل بارندگی)

در این رابطه،  $R_l$  نسبت طول،  $L_{max}$  طول بزرگ‌ترین رتبه بر حسب متر،  $V_p$  سرعت پیک بر حسب متر بر ساعت و  $T_c$  زمان تمرکز بر حسب ساعت است. براساس این رابطه، سرعت پیک ۱۱۰۲۶ متر بر ساعت یا ۳ متر بر ثانیه تعیین شد.

گام پنجم، محاسبه GIUH براساس رابطه بیان‌شده توسط روسو است. برای محاسبه مقدار GIUH از رابطه زیر استفاده می‌شود [۱۹]:

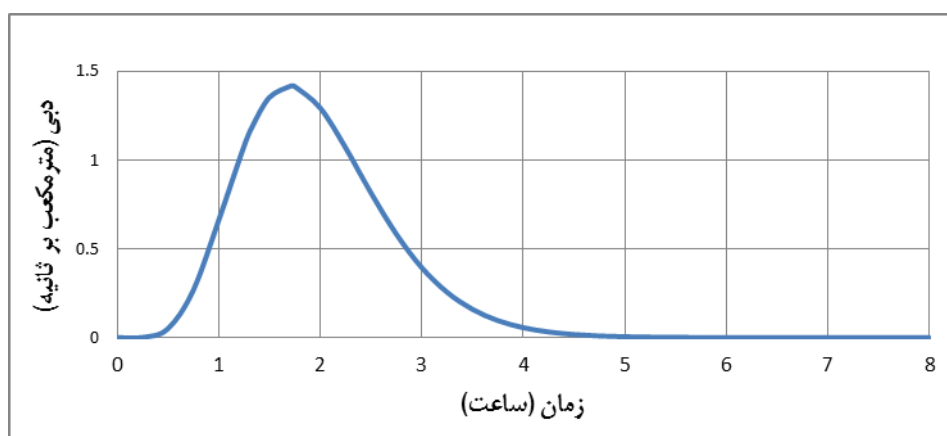
$$GIUH(t) = \frac{1}{k\Gamma(n)} \left(\frac{t}{k}\right)^{n-1} e^{-t/k} \quad (5)$$

که مقدار  $k$  و  $n$  براساس فرمول‌های زیر تعیین می‌شوند:

$$k = 0.7 \frac{L_{max}}{V_p} R_b^{-0.48} R_a^{-0.48} R_l^{-0.48} \quad (6)$$

$$n = 3.29 R_b^{-0.78} R_a^{-0.78} R_l^{-0.7} \quad (7)$$

مقدار  $n$  براساس رابطه ۷ برابر ۷/۵ و مقدار  $k$  طبق فرمول ۶ برابر ۰/۲۵ تعیین شد و بر این مبنا GIUH مطابق شکل ۳ به دست آمد.



شکل ۳. هیدروگراف واحد لحظه‌ای حوضه قروه به روش GIUH

هیدروگراف واحد لحظه‌ای تابع عرض (WFIUH) یک خاصیت بنیادی شبکه‌های زهکشی، دارا بودن یک مسیر یک‌بعدی منحصر به فرد است که در امتداد شدیدترین شیب، هر نقطه را به خروجی متصل می‌کند. به کسری از نقاط با فاصله مشابه از خروجی (در طول مسیر جریان) تابع عرض<sup>۱</sup> می‌گویند که به صورت زیر بیان می‌شوند [۱۷]:

CN: نمایه خصوصیات حوضه از نظر نفوذپذیری است و پس از محاسبه  $t_{lag}$  زمان تمرکز حوضه ( $t_c$ ) از معادله زیر محاسبه شد:

$$t_c = 1/67(t_{lag}) \quad (3)$$

با توجه به پوشش گیاهی مرتع منطقه و نفوذپذیری متوسط حوضه، مقدار ضریب CN برابر ۷۵ انتخاب شد. طول رودخانه با توجه به مشخصات فیزیوگرافی و اقلیمی حوضه آبریز قروه در گزارش وزارت نیرو ۱۹ کیلومتر، شیب متوسط حوضه ۲۴/۱۲ درصد و شیب متوسط آبراهه اصلی ۲/۹ درصد اعلام شده است. با استفاده از فرمول‌های بالا، زمان تمرکز ۴/۵ ساعت برآورد شده است.

گام چهارم محاسبه سرعت پیک به کمک فرمول پیشنهادی فرانکینی و اوکونل است [۷]. در این روش سرعت بر اساس زمان تمرکز محاسبه شده در مرحله قبل تعیین می‌شود:

$$V_p = L_{max} / (0.138 T_c R_l^{0.437}) \quad (4)$$

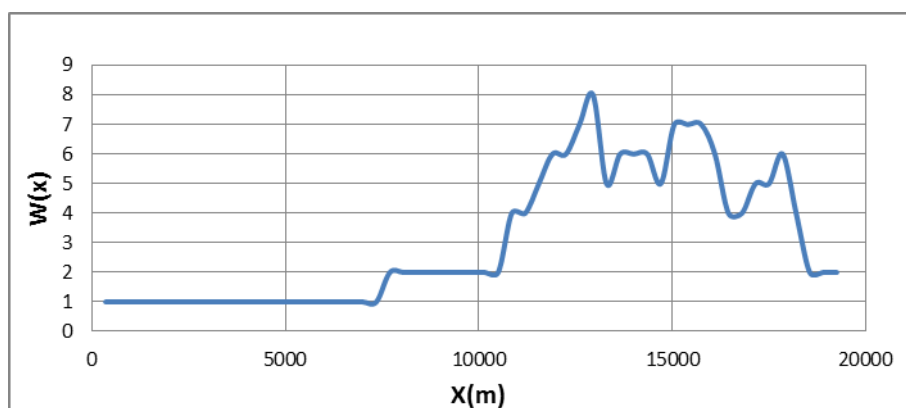
زمان تا اوج با استفاده از رابطه ۹ که توسط روسو بیان شده، محاسبه شد که برابر ۱/۷ ساعت است و دبی پیک براساس رابطه ۸ برابر ۱/۴ متر بر ثانیه تعیین شد [۱۹].

$$q_p = 0.384 / L_{\Omega} (R_L)^{0.437} \quad (8)$$

$$t_p = 0.44 L_{\Omega} (R_B \times R_A)^{0.55} (R_L)^{0.38} V^{-1} \quad (9)$$

کامل‌تر درباره این خصوصیات را در دیگر منابع می‌توان مطالعه کرد [۱۸].

با فرض تعادل در شیب، هندسه و زبری کانال در طول وقوع بارش‌هایی با دوره‌های بازگشت یکسان، سرعت در طول شبکه جریان ثابت باقی می‌ماند. بنابراین می‌توان فاصله را به صورت زمان ترسیم کرد و همزمان هر دو را در شکل ۴ نشان داد [۹].



شکل ۴. نمودار تابع عرض آبراهه‌های حوضه قروه

همان‌طور که رینالدو و همکاران نشان دادند، امکان محاسبه دو سرعت مجزا و تحلیل هیدرولیکی نتایج با استفاده از تابع عرض اصلاح‌شده وجود دارد [۱۴، ۱۵]. بنابراین در اینجا فرض می‌شود که  $c_h$  سرعت در چالاب‌های کوهپایه و  $C$  سرعت در کانال اصلی است و فاکتور جدیدی با نام  $x'$  در نظر گرفته می‌شود که با ضرب  $r$  در بخشی از فاصله تا خروجی که توسط چالاب‌ها پوشیده شده است، براساس فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$x' = x_c + r \times x_h \quad (14)$$

اگر تابع عرض با در نظر گرفتن این فاصله اصلاح‌شده به دست آید، تابع عرض حاصل را تابع عرض اصلاح‌شده می‌نامند که به واقعیت نزدیک‌تر است. در اینجا برای تولید فاکتور عرض اصلاح‌شده از روش ناردی و همکاران به وسیله الحاقیة PEM4PIT در نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد [۱۳]. برنامه PEM4PIT یک الحاقی در محیط GIS است که مانند برنامه ArcHydro پردازش‌های لازم برای تهیه هیدروگراف واحد لحظه‌ای را انجام می‌دهد؛ با این تفاوت که این برنامه به صورت اختصاصی به منظور محاسبه اصلاحات مورد نیاز روش WFIUH برای استخراج

$$W(x) \equiv \frac{1}{A} \mu \{a : d(a) = x\} \quad (10)$$

که در این فرمول  $A$  کل مساحت حوضه است و تابع  $\mu$  مساحت  $a$  در فاصله  $d(a)=x$  از خروجی را نرمالیز می‌کند. توابع عرض به ویژگی‌های ساختاری مسیر جریان بستگی دارند که خصوصیات شکل (fractal) شناخته می‌شوند و از خواص هندسی و ریاضی مسیر به دست می‌آیند. اطلاعات

با توجه به این بحث تابع عرض به هیدروگراف واحد لحظه‌ای تابع عرض براساس فرمول زیر تبدیل می‌شود:

$$WFIUH(t; c) = W(x(t)) \times c \quad (11)$$

$$x(t) = c \times t \quad (12)$$

در این فرمول برای نرمال‌سازی نیاز به ضرب سرعت در تابع عرض داریم.

$$\int_0^{\infty} WFIUH(t; c) dt = \int_0^{\infty} W(x) dx = 1 \quad (13)$$

در اینجا WFIUH شکل موج سیل است که توسط یک بارش مؤثر ناگهانی کوتاه‌مدت روی می‌دهد. فرمول بالا از لحاظ فیزیکی نادرست است؛ زیرا رواناب خارج از کانال اصلی و چالاب‌های کوهپایه<sup>۱</sup> سرعت کمتر و زمان ماند بیشتری نسبت به سرعت جریان در کانال اصلی دارد [۲۰]. سرعت موج جریان در کانال به طور معمول در حدود ۱ تا ۱۰ متر بر ثانیه است، در حالی که سرعت رواناب در چالاب‌های کوهپایه و آبراهه‌های غیردائمی تا ۱۰ برابر کمتر از این مقدار می‌شود.

1. Hillslope

نقشه‌های تولیدشده تا این مرحله در شکل ۵ ارائه شده است.

برای تعیین فاکتور عرض در این مرحله به دو گرید سرعت برای کانال اصلی و چالاب‌های کوهپایه‌ها نیاز است. برای دستیابی به این گرید از لایه شیب خروجی نقطه‌ای گرفته شد تا براساس شیب نقاط سرعت آنها محاسبه شود. برای جدا کردن نقاط کانال اصلی و چالاب‌ها از تطبیق لایه شبکه جریان و لایه نقاط شیب استفاده شد و به نقاط داخل کانال سرعت ثابت بین ۳ تا ۶ متر بر ثانیه داده شد (براساس نتایج سرعت حاصل از مرحله GIUH این دو دامنه انتخاب شدند) و سرعت در چالاب‌های کوهپایه‌ها براساس فرمول زیر محاسبه شد [۱۰]:

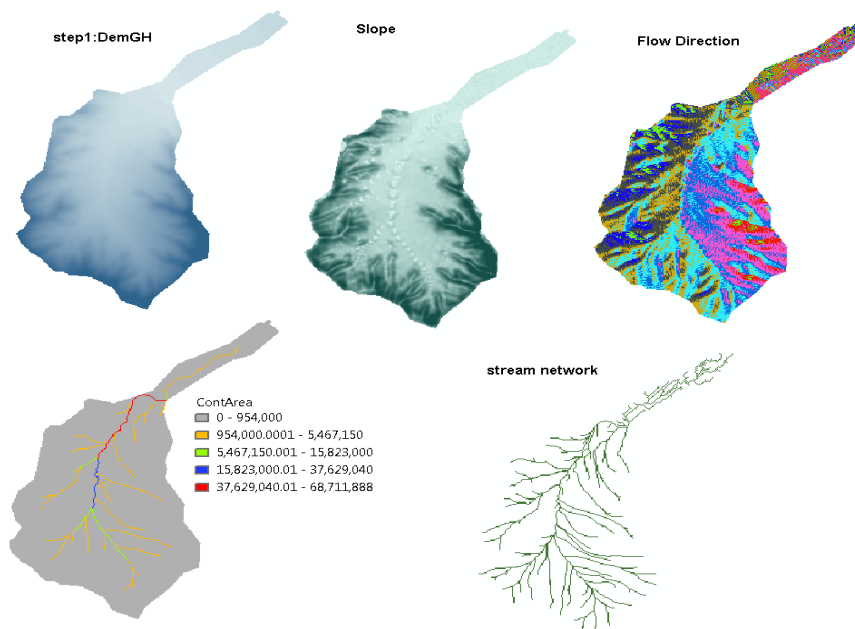
$$v_h = a\sqrt{S} \quad (15)$$

که در این رابطه سرعت در چالاب‌های کوهپایه است که با  $V_h$  نشان داده شده است و  $S$  شیب سلول‌های چالاب‌هاست؛  $a$  ضریبی است که براساس پوشش گیاهی و نوع خاک تعریف می‌شود. مقدار  $a$  براساس جدول ارائه‌شده توسط گرمالدی برای حوضه مورد مطالعه ۲/۵۹ تعیین شد [۱۰].

هیدروگراف واحد لحظه‌ای تابع عرض طراحی شده است. این برنامه امکان استفاده از بازه گسترده‌تری از روش‌های محاسباتی را فراهم کرده و به‌منظور تخمین سرعت متناسب با شیب توپوگرافی قابلیت اصلاح فرورفتگی‌های مصنوعی و اعمال مناطق مسطح را فراهم می‌کند.

برای استخراج هیدروگراف واحد تابع عرض ابتدا باید تابع عرض براساس سرعت متغیر با شیب اصلاح شود. در این مرحله فرورفتگی مصنوعی و مناطق مسطح از مدل رقومی با استفاده از برآورد پارامتر به‌صورت خودکار مدل PEM4PIT حذف شدند [۹]. سپس با معرفی مدل رقومی حوضه و تعریف پارامترهای لازم، مدل رقومی اصلاح‌شده زمین تهیه شد. شبکه شیب سلول‌ها، جهت جریان و نواحی تجمعی به‌کمک برنامه الحاقی تعیین شدند.

در ادامه شیب‌ها براساس معیار بیشترین سراشیبی استخراج شد. جهت جریان و مناطق درگیر با استفاده از روش D8-LTD<sup>۱</sup> طبقه‌بندی شدند [۷، ۸] بعد از تهیه نقشه شیب و جهت جریان و نواحی تجمعی، شبکه جریان با ترکیب آنالیز خودکار قطره رهاشده<sup>۲</sup> و روش مینای خمیدگی<sup>۳</sup> در برنامه PEM4PIT استخراج شد [۲۱].



شکل ۵. لایه‌های تولیدشده برای حوضه آبریز قروه در روش WFIUH

1. Eight Drainage Directions- Least Transversal Deviation
2. Automated drop analysis
3. Curvature based method



خصوصیات ژئومورفولوژیکی، با قابل چشم‌پوشی فرض کردن جریان‌های زیرسطحی، براساس رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$Q(t;c,r) = A_r \int_0^t WFIUH(t-\tau;c,r) J_{eff}(\tau) d\tau \quad (18)$$

که در این رابطه  $J_{eff}$  بارش مؤثر یا به عبارتی بارش بدون آب جدا شده توسط پوشش گیاهی است. نفوذ در خاک نیز اغلب جدا می‌شود، اما اگر نفوذ در حال تعادل با جریان سطحی داخل کانال فرض شود، می‌توان از آن چشم‌پوشید. اگر  $WFIUH$  از نظر زمانی ثابت فرض شود، بارش مؤثر براساس فرمول زیر حساب می‌شود:

$$J_{eff}(t) = \begin{cases} J_{eff} & 0 \leq t \leq t_p \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (19)$$

دبی براساس فرمول ۲۰ محاسبه می‌شود:

$$(20)$$

$$Q(t;c,r) = \begin{cases} J_{eff}(At;c,r) & 0 \leq t \leq t_p \\ J_{eff}[A(t;c,r) - A(t-t_p;c,r)] & t \geq t_p \end{cases}$$

که در آن  $A(t;c,r)$  مساحت درگیر با دبی خروجی در زمان  $t$  است [۱۷]. براساس رابطه بالا، نمودار  $WFIUH$  حوضه قروه مطابق شکل ۷ است.

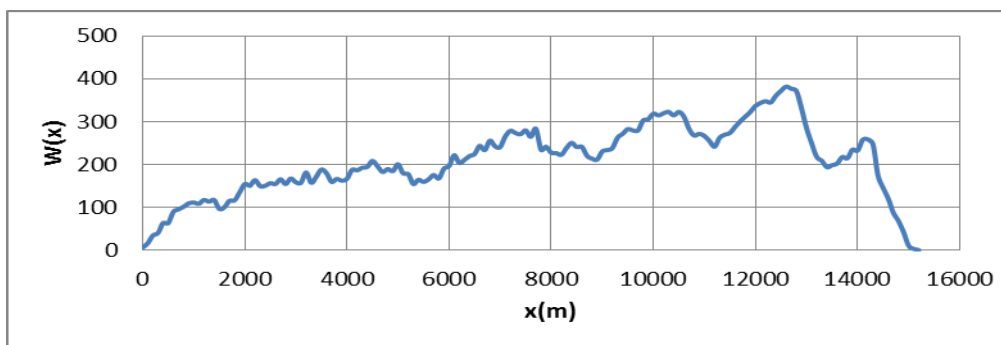
خروجی  $FT$  و  $FL$  که زمان جریان و طول جریان است با استفاده از داده‌های تولیدشده در مراحل قبل تهیه شد. فاکتور عرض در شبکه رودخانه‌ای براساس تخمین مسافت هیدرولوژیکی در طول مسیر بیشترین شیب براساس روش D8-LTD تعیین شد و برای چالاب‌های کوهپایه‌ها در برنامه PEM4PIT از روش D-method استفاده شد [۲۲]. با استفاده از خروجی این برنامه، نمودار تابع عرض جدید با سرعت وابسته به شیب در چالاب‌های کوهپایه‌ها به صورت شکل ۶ است.

تابع عرض جدید با تابع عرض قبل تفاوت‌های زیادی دارد؛ درحالی که تابع عرض اولیه تقریباً متقارن است، تابع عرض جدید بیشتر شبیه موج جریان حقیقی است. با اعمال فرمول ۱۶، اما با استفاده از تابع عرض جدید می‌توان به  $WFIUH$  واقعی‌تری برای یک رخداد سیل دست یافت [۱۷].

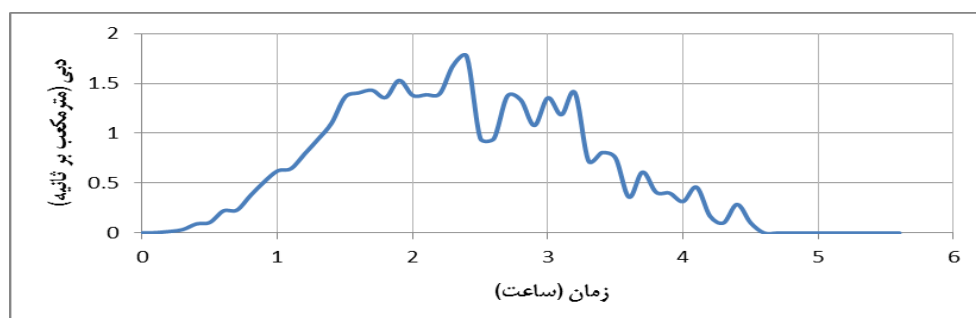
$$WFIUH(t;c) = W(x(t)) \times c \quad (16)$$

$$x(t) = c \times t \quad (17)$$

در نهایت، تابع عرض اصلاح‌شده و دبی خروجی برای هیدروگراف واحد تابع عرض محاسبه می‌شود. در این مرحله، دبی خروجی از حوضه براساس یک واحد بارش مؤثر و



شکل ۶. نمودار تابع عرض اصلاح‌شده برای سرعت وابسته به شیب در چالاب‌های کوهپایه‌ای حوضه قروه

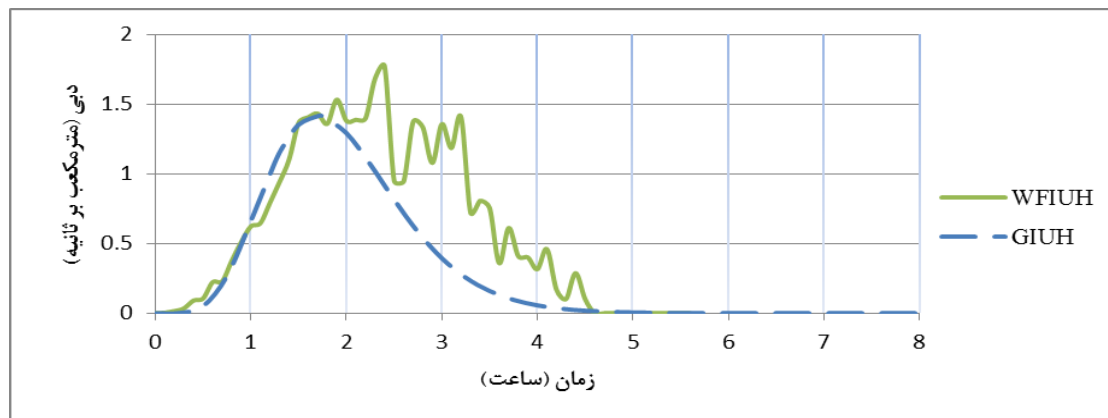


شکل ۷. هیدروگراف واحد لحظه‌ای حوضه قروه به روش  $WFIUH$

### بحث و نتیجه‌گیری

براساس نتایج مطالعات گرمالدی و همکاران [۱۰] در پنج حوضه آبریز و بررسی ۲۵ رخداد سیل، نتایج روش WFIUH عملکرد بهتری را هم در تعیین پارامترها و هم از نظر نزدیکی به واقعیت نشان داده است. در حوضه آبریز

قروه با توجه به نتایج، در روش WFIUH زمان تمرکز حوضه در حدود ۴/۶ ساعت تخمین زده شد که با زمان تمرکز حساب‌شده در روش GIUH که ۴/۵ ساعت بود همخوانی دارد، ولی دبی پیک دو روش، با توجه به شکل ۸ متفاوت است.



شکل ۸. مقایسه هیدروگراف واحد لحظه‌ای حوضه قروه حاصل از دو روش

روش به کاررفته در این مقاله، هر دو روش زمان تمرکز و شکل هیدروگراف واحد لحظه‌ای حوزه را با دقت قابل قبولی تعیین کرده‌اند، با توجه به رژیم برفابی در حوضه آبریز قروه و زمان رسیدن به پیک هیدروگراف، در حوضه مورد مطالعه، هیدروگراف واحد لحظه‌ای تابع عرض جزئیات بیشتری را با دقت بهتر نشان می‌دهد.

### پیشنهادها

با توجه به مطالعات صورت گرفته، به تأثیر تفاوت سرعت در آبراه‌های اصلی و مناطق دامنه‌ای و کوهپایه‌ای در اکثر مطالعات هیدروگراف واحد به روش‌های ژئومورفولوژیکی چندان توجه نشده است؛ حال آنکه با توجه به شرایط ارتفاعی ایران و توزیع ارتفاعی حوضه‌های آبریز توجه به این موضوع بسیار حائز اهمیت است. همچنین با توجه به در دسترس بودن اطلاعات لازم در روش WFIUH این روش در بسیاری از مناطق فاقد آمار مفید خواهد بود. بر این اساس پیشنهاد می‌شود در سایر حوضه‌های کشور به خصوص حوضه‌های دارای آمار مشاهداتی از این روش استفاده شود و صحت‌سنجی‌های لازم و خطاهای مشاهداتی استخراج شود تا به صورت روشی اصلاح شده در حوضه‌های فاقد آمار به کار گرفته شود.

دبی پیک و زمان پیک روش WFIUH بیشتر از روش GIUH تخمین زده شده است. همچنین شکل هیدروگراف واحد تابع عرض از ژئومورفولوژی حوضه تأثیر می‌گیرد و تغییرات ناشی از پستی و بلندی‌های حوضه را در نمودار نشان می‌دهد.

در روش‌های تجربی تعیین هیدروگراف واحد حوضه‌های بدون آمار، نتایج حوضه‌های متفاوت با توجه به نسبت‌ها و پارامترهای به کاررفته، ممکن است مشابه باشد و حتی در مواردی که شکل و توپوگرافی حوضه متفاوت است، گاهی نتایج بسیار نزدیک به هم تولید شود. در حالی که با استفاده از روش WFIUH که امکان اختصاص سرعت جریان متناسب با شیب منطقه را در مناطق مختلف حوضه آبریز فراهم می‌کند، نتایج خصوصی‌سازی شده و برای هر حوضه با توجه به ارتفاع، توپوگرافی و شیب منطقه‌ای آن، هیدروگراف واحد لحظه‌ای متفاوتی تولید می‌شود.

حوضه آبریز رودخانه قروه از لحاظ اطلاعات هیدرولوژیکی و هیدرولیکی جزو حوضه‌های کم‌آمار است. به عبارتی به دلیل نبود ایستگاه‌های پایش و داده‌های مناسب، استخراج هیدروگراف واحد مشاهداتی ممکن نیست. بر این اساس با توجه به مطالعات مرحله‌های اول و دوم ساماندهی رودخانه قروه [۹] و مقایسه با نتایج دو

- digital elevation models, *Advances in Water Resources*, vol. 30, pp. 2151–2158.
- [10]. Grimaldi, S., Petroselli, A., Nardi, F. and Alonso, G., 2010, Flow time estimation with variable hillslope velocity in ungauged basins, *Advances in Water Resources*, vol. 33(10), pp. 1216–1223.
- [11]. Grimaldi, S., Petroselli, A. and Nardi, F., 2012a, A parsimonious geomorphological unit hydrograph for rainfall–runoff modelling in small ungauged basins, *Hydrological Sciences Journal*, vol. 57(1), pp. 73–83.
- [12]. Grimaldi, S., Petroselli, A., Porfiri, M. and Tauro, F., 2012b, Time of concentration: a paradox of modern hydrology, *Hydrological Sciences Journal*, vol. 57(2), pp. 217–228.
- [13]. Nardi, F., Grimaldi, S., Santini, M., Petroselli, A. and Ubertini, L., 2008, Hydrogeomorphic properties of simulated drainage patterns using DEMs: the flat area issue, *Hydrological Sciences Journal*, vol. 53(6), pp. 1176–1193.
- [14]. Rinaldo, A., Marani, A. and Rigon, R., 1991, Geomorphological dispersion, *Water Resources Research*, vol. 27, pp. 513–525.
- [15]. Rinaldo, A., Vogel, G.K., Rigon, R. and Rodriguez-Iturbe, I., 1995, Can one gauge the shape of a basin, *Water Resources Research*, vol. 31, pp. 1119–1127.
- [16]. Rodriguez-Iturbe, I. and Valdes, J.B., 1979, The geomorphologic structure of hydrologic response, *Water Resources Research*, vol. 15, pp. 1409–1420.
- [17]. Rodríguez-Iturbe, I. and Rinaldo, A., *Fractal river networks: chance and self-organization*, Cambridge University Press, 1997, 570 p.
- [18]. Rodriguez-Iturbe, I., Gonzalez-Sanabria, M. and Bras, R.L., 1982, A geomorphoclimatic theory on the instantaneous unit hydrograph, *Water Resources Research*, vol. 18(4), pp. 877–886.
- [19]. Rosso, R., 1984, Nash model relation to Horton order ratios, *Water Resources Research*, vol. 20(7), pp. 914–920
- [20]. Tak, L. D. and Bras, R. L., 1990, Incorporating hillslope effects into the geomorphologic instantaneous unit hydrograph, *Water Resources Research*, vol. 26(10), pp. 2393–2400.
- [21]. Tarboton, D.G., Bras, R.L. and Rodriguez-Iturbe, I., 1991, On the extraction of channel networks from digital elevation data, *Hydrological Processes*, vol. 5(1), pp. 81–100.
- منابع**
- [۱]. جهانبخش، سعید؛ رضائی بنفشه، مجید؛ گودرزی، مسعود؛ غفوری روزبهانی، عبدالمحمد؛ مهدیان، محمدحسین، ۱۳۹۱، ارزیابی کاربرد روش زمان-سطح و هیدروگراف واحد لحظه‌ای کلارک در برآورد دبی سیلاب بازیافت کارون، نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی، سال ۱۶، شماره ۴۱: ۶۶–۴۹.
- [۲]. شیرزادی، عطالله؛ چپی، کامران؛ فتحی، پرویز، ۱۳۹۰، برآورد هیدروگراف واحد مصنوعی با استفاده از تحلیل منطقه‌ای سیلاب و پارامترهای ژئومورفولوژی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز مارج و کانی سواران، کردستان)، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، جلد ۱۵، شماره ۵۸: ۲۴۰–۲۳۱.
- [۳]. غیاثی، نجفقلی؛ روغنی، محمد، ۱۳۸۵، کارایی هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژی و مقایسه آن با هیدروگراف های مصنوعی اشنایدر، مثلثی و SCS در حوضه آبخیز کسلیان، مجله پژوهش و سازندگی، شماره ۷۰: ۳۲–۲۳.
- [۴]. کرمی، فریبا؛ اسمعیل‌پور، مرضیه، ۱۳۹۳، برآورد رواناب با استفاده از مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژی (مطالعه موردی: حوضه دریاچای)، مجله هیدروژئومورفولوژی، شماره ۱: ۱۵۷–۱۴۵.
- [۵]. وزارت نیرو، ۱۳۸۵، شرکت آب منطقه‌ای استان کردستان، مطالعات مرحله اول و دوم ساماندهی رودخانه قروه، گزارش مطالعات هیدرولوژی رودخانه قروه.
- [6]. Cudenec, C., Fouad, Y., Sumarjotot, I. and Duchesne, J., 2004, A geomorphological explanation of the unit hydrograph concept, *Hydrological Process*, vol. 18(4), pp. 603–621.
- [7]. Franchini, M. and O'Connell, P.E., 1996, An analysis of the dynamic component of the geomorphologic instantaneous unit hydrograph, *Journal of Hydrology*, vol. 175, pp. 407–428.
- [8]. Gupta, V.K., Waymire, E. and Wang, C.T., 1980, Representation of an instantaneous unit hydrograph from geomorphology, *Water Resources Research*, vol. 16(5), pp. 855–862.
- [9]. Grimaldi, S., Nardi, F., Di Benedetto, F., Istanbuluoglu, E. and Bras, R.L., 2007, A physically based method for removing pits in

[22] Tarboton, D.G. and Ames, D.P., 2001, Advances in the mapping of flow networks from digital elevation data, World water and

environmental resources congress, May, Orlando, USA.