

# بررسی و آزمون تطابق هیدروگراف‌های واحد مصنوعی و طبیعی در حوضه آبخیز سد زاینده‌رود «زیر حوضه پلاسجان»

سید فرهاد موسوی، محمد نکویی مهر و محمد مهدوی\*

## چکیده

باتوجه به اهمیت هیدروگراف واحد در پیش‌بینی سیلاب رودخانه‌ها و به دلیل آن که استخراج هیدروگراف واحد در یک حوضه مستلزم داشتن هیدروگراف سیلاب و هیتوگراف ریزش باران همزمان آن می‌باشد، متخصصین هیدرولوژی برای مناطقی که قادر چنین داده‌های هیدروکلیماتولوژی هستند استفاده از روش‌های هیدروگراف واحد مصنوعی را معمول دانسته‌اند. از این‌رو تحقیقاتی در حوضه آبخیز سد زاینده‌رود (زیر حوضه پلاسجان)، انجام گرفت تا قابلیت کارایی هیدروگراف‌های واحد مصنوعی (اشتايدر، SCS و مثلثی) در ارزیابی‌های هیدرولوژیک آزمون گردد. برای این منظور، هیدروگراف‌های واحد طبیعی و مصنوعی فوق‌الذکر با استفاده از مجموعه داده‌های مورفولوژیکی، باران سنگی و هیدرومتری حوضه و توسل به تجزیه و تحلیل هیدرولوژیک تعیین شد و سه روش ساخت هیدروگراف واحد مصنوعی نسبت به هیدروگراف‌های واحد طبیعی (مشاهده‌ای) حوضه مورد مقایسه و بررسی قرار گرفت.

نتایج به دست آمده نشان داد که روش‌های مثلثی و SCS تطابق بهتری نسبت به روش اشتایدر در ساخت شکل هیدروگراف واحد و تبعیت از آهنگ تغییرات هیدروگراف واحد معرف حوضه دارند، لیکن در اکثر موارد میزان حداقل دبی لحظه‌ای را نسبت به مقدار مشاهده شده بیشتر نشان می‌دهند. لذا توصیه می‌شود در این حوضه آبخیز مقدار عدد ثابت در فرمول برآورده حداقل دبی لحظه‌ای در این روشها از ۰/۸۳ به ۱/۷۴ کاهش یابد. اگرچه روش اشتایدر در برآورده حداقل دبی لحظه‌ای نسبت به روش‌های SCS و مثلثی از نوسان بیشتری برخوردار می‌باشد، اما دارای دبی اوج محاسبه شده نزدیک‌تر به مقادیر مشاهده شده است. به طورکلی پس از اصلاح فرمول برآورده حداقل دبی لحظه‌ای در روش‌های SCS و مثلثی، می‌توان گفت که برای ساخت هیدروگراف واحد مصنوعی در این حوضه، روش‌های مثلثی، SCS و اشتایدر از اولویت اول تا سوم برخوردارند.

واژه‌های کلیدی - هیدروگراف واحد، هیدروگراف سیلاب، هیدروگراف معرف، هیتوگراف بارندگی، هیدروگراف واحد مصنوعی، روش اشتایدر، روش مثلثی، حوضه آبخیز سد زاینده‌رود

## مقدمه

هیدروگراف واحد<sup>۱</sup> عبارت است از هیدروگراف رواناب مستقیم ناشی از یک واحد (یک سانتی‌متر یا یک اینچ) بارندگی

\* به ترتیب دانشیار گروه آبیاری دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان، کارشناس ارشد آبخیزداری، مرکز تحقیقات منابع طبیعی و امور دام چهار محال و بختیاری و دانشیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

1 - Unit hydrograph    2 - Excess rainfall

روش اشنایدر حاصل تحقیقات انجام یافته در مورد چندین حوضه آبخیز در ارتفاعات آپالاچین آمریکا می‌باشد. سطح حوضه‌های مورد بررسی ۲۵ تا ۲۵۰۰۰ کیلومتر مربع بوده است. اشنایدر در این تحقیق سه پارامتر مهم هیدروگراف واحد را ارائه نمود که عبارتند از: زمان تأخیر تا نقطهٔ حداقل دبی، دبی حداقل (لحظه‌ای) و زمان پایه.

تحقیق جداگانه‌ای توسط اداره حفاظت خاک آمریکا (SCS) در تعداد بسیار زیادی از حوضه‌های آبخیز دارای آمار و اطلاعات لازم انجام گرفته است. حاصل این تحقیق پیدایش روش هیدروگراف واحد بدون پُعد (روش SCS) بوده است (۲۱). این روش سه پارامتر مهم هیدروگراف واحد مصنوعی را به شرح زیر ارائه می‌کند:

- پارامتر بدون پُعد حاصل تقسیم زمان دره را لحظه به زمان تا اوج هیدروگراف
- پارامتر بدون پُعد حاصل تقسیم دبی در هر لحظه به دبی حداقل لحظه‌ای هیدروگراف
- پارامتر مجموع حجم سیلاب که برابر با عمق واحد در سطح حوضه آبخیز می‌باشد

در عملیات حفاظت آب و خاک، برای محاسبه دبی اوج از روش ساده هیدروگراف واحد مثلثی استفاده می‌شود (۴).

در تحقیق حاضر، همزمان با ساخت و بهره‌گیری از هیدروگراف‌های واحد طبیعی با زمانهای مختلف در حوضه آبخیز سد زاینده رود (زیر حوضهٔ پلاسجان)، روشهای ساخت هیدروگراف واحد مصنوعی مورد آزمون و مقایسه قرار گرفت تا دقیق و کارایی آنها مورد ارزیابی قرار گیرد و بهترین روش هیدروگراف واحد مصنوعی، که بیشترین تطابق را با هیدروگراف‌های واحد طبیعی داشته باشد پیشنهاد گردد.

#### مواد و روشهای

حوضه آبخیز سد زاینده‌رود با مساحتی حدود ۴۳۰۰

عموماً از اطلاعات جریان آب در رودخانه و توزیع زمانی بارندگی مازاد و یا اطلاعات فیزیوگرافی حوضه به دست می‌آید. بنابراین، استخراج هیدروگراف واحد دریک حوضه آبخیز مستلزم داشتن هیدروگراف سیلاب و هیتوگراف باران همزمان آن برای سطح حوضه می‌باشد (در این صورت، هیدروگراف واحد حاصله را طبیعی و یا مشاهده‌ای گویند). دو فرضیه مهم در تئوری هیدروگراف واحد وجود دارد: ۱) خطی بودن سیستم<sup>۱</sup> و تناسب خروجی‌ها نسبت به ورودی‌های حوضه و ۲) درنظر گرفتن حوضه آبخیز به عنوان یک سیستم پیوسته و گردۀ‌ای<sup>۲</sup> (۹ و ۱۴).

امروزه از هیدروگراف واحد در تخمین سیلهای حوضه‌های آبخیز و مدل‌سازی روابط بارندگی - رواناب استفاده فراوان می‌شود (۱۲، ۱۸، ۱۷ و ۱۹). برای تعیین هیدروگراف واحد معرف حوضه، هیدروگراف‌های واحد چندین سیل را باید به دست آورد زیرا زمان تا اوج و دبی اوج هیدروگراف واحد ممکن است بستگی به محل رگبار در حوضه، حداقل دبی سیل و زمان وقوع رگبار داشته باشد. اگر تفاوت بین هیدروگراف‌های واحد حاصل تصادفی باشد و از روند خاصی پیروی نکند، یک هیدروگراف واحد متوسط رسم می‌شود (۱۳ و ۱۴). از روشهای ماتریسی (۹)، برنامه‌ریزی خطی (۹ و ۲۲)، برنامه‌ریزی غیرخطی (۱۵) و حداقل مربعات (۲۳) نیز می‌توان در اشتقاء هیدروگراف واحد استفاده کرد.

هیدروگراف واحدی که از اطلاعات بارندگی و دبی رودخانه یک حوضه آبخیز به دست می‌آید فقط برای آن حوضه آبخیز و همان نقطه رودخانه کاربرد دارد. برای سایر نقاط آن رودخانه و یا حوضه‌های آبخیز مجاور که خصوصیاتی مشابه حوضه آبخیز موردنظر دارند، می‌توان از روش هیدروگراف واحد مصنوعی<sup>۳</sup> (ساختگی) استفاده کرد (۱). از جمله، اشنایدر (۲۰) روشی را ارائه می‌نماید که براساس خصوصیات مورفو‌لوژیک حوضه می‌توان ویژگی‌های هیدروگراف واحد مصنوعی را تعیین نمود.

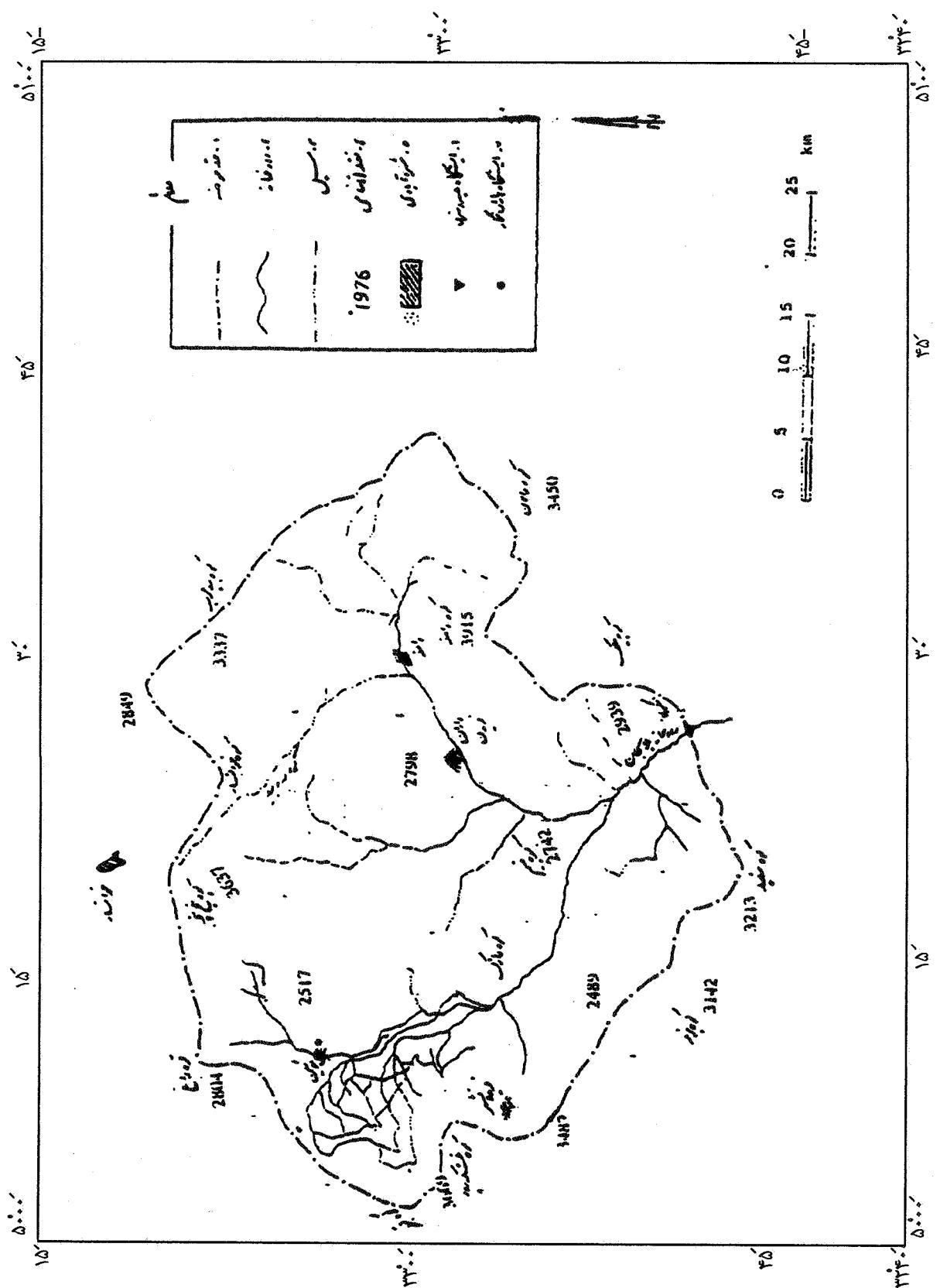
جدول ۱ - مشخصات فیزیوگرافیک حوضه آبخیز پلاسجان (۷)

پارامتر	پارامتر	مقدار	مقدار	مقدار
مساحت(کیلومترمربع)	ارتفاع میانه (متر)	۱۵۷۸	۲۵۲۳	
محیط (کیلومتر)	ارتفاع حداکثر (متر)	۱۷۶/۲	۳۸۹۰	
ضریب گراولیوس	ارتفاع حداقل (متر)	۱/۲۴	۲۱۴۰	
طول مستطیل معادل (کیلومتر)	عامل کشیدگی	۶۱/۶	۰/۴۵	
عرض مستطیل معادل (کیلومتر)	نسبت برجستگی	۲۶/۶	۰/۹۹	
طولانی ترین شاخه (کیلومتر)	شاخص شبیح حوضه (درصد)	۶۰/۵	۱۳/۲	
قطر دایره معادل (کیلومتر)	اندیس شبیح کلی حوضه (درصد)	۴۵/۷	۱/۴۶	
متوسط ارتفاع (متر)	متوسط شبیح حوضه (درصد)	۲۵۲۳	۲/۸	

است و از کوههای ذکر شده در این قسمت تغذیه می‌گردد. شاخه دیگر، از کوههای غرب و جنوب غرب حوضه سرچشمه می‌گیرد و در قسمت غربی حوضه جاری می‌باشد. دو شاخه فوق الذکر در قسمت جنوب حوضه به یکدیگر پیوسته و رودخانه پلاسجان را تشکیل می‌دهند که در ایستگاه هیدرومتری اسکندری میزان آورد آبهای سطحی آن اندازه‌گیری می‌شود. رودخانه پلاسجان سرانجام به دریاچه سد زاینده‌رود متنه می‌گردد. اقلیم منطقه براساس روش دومارتن از تیپ نیمه‌خشک تا بسیار مريطوب و بر اساس روش گوسن استپی سرد است. در جدول ۱ بعضی از خصوصیات فیزیوگرافیک حوضه آبخیز رودخانه پلاسجان در بالادست ایستگاه اسکندری آورده شده است (۷).

به منظور تعیین هیدروگراف‌های واحد طبیعی حوضه، داده‌های اولیه مورد نیاز، نظیر گزارش‌های سیل استخراج شده از کاغذهای لیمنوگراف مربوط به ایستگاه هیدرومتری اسکندری و همچنین کاغذهای باران نگار ایستگاه بوئین مربوط به ریزش‌های جوی همزمان، تهیه شد. چون ایستگاه بوئین تنها ایستگاه ثبات باران در منطقه است، آمار آن به کل مساحت حوزه تعمیم داده شد. مسلماً وجود ایستگاه‌های بیشتر می‌توانست در نتیجه این تحقیق مفیدتر باشد. اطلاعات جمع آوری شده مورد بررسی مجدد قرار گرفت و تعدادی از

کیلومتر مربع بین طولهای جغرافیایی  $۴۵^{\circ} ۵۴'$  و  $۴۹^{\circ} ۵۴'$  شرقی و عرضهای جغرافیایی  $۳۲^{\circ} ۱۲'$  و  $۳۳^{\circ} ۱۸'$  شمالی قرار گرفته و از شمال به حوضه آبخیز رودخانه گلپایگان، از جنوب به حوضه آبخیز رودخانه کارون، از شرق به حوضه آبخیز رودخانه مرغاب و از غرب به حوضه آبخیز رودخانه دز محدود می‌شود. حوضه آبخیز سد زاینده‌رود شامل زیر حوضه‌های اصلی زاینده‌رود و پلاسجان می‌باشد. حوضه آبخیز پلاسجان براساس نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰۰ در شکل ۱ ترسیم گردیده است (۸). این حوضه بین طولهای  $۵۰^{\circ} ۴۱'$  و  $۵۰^{\circ} ۲۰'$  شرقی و عرضهای  $۳۲^{\circ} ۴۶'$  و  $۳۳^{\circ} ۱۲'$  شمالی واقع است. قسمت اعظم سطح حوضه را زمینهای نسبتاً هموار تشکیل می‌دهد و سلسه ارتفاعاتی که بیشتر در شمال و جنوب غرب حوضه واقع است آن را احاطه نموده است. بلندترین کوههای شمالی حوضه بید عرب، خوانسار، دره بید و پنج پنجه نام دارند و بلندترین نقطه آن در کوه دره بید متجاوز از  $۳۶۳۰$  متر ارتفاع دارد. در قسمت جنوب غربی، کوههای سفید، بزم، سنبله و قبله قرار دارند که حداکثر ارتفاع آنها به  $۳۹۰۰$  متر می‌رسد. ارتفاع بلندترین نقطه داخلی حوضه  $۳۹۱۵$  متر است که بر روی سلسه ارتفاعات دلان کوه می‌باشد. زهکشی منطقه توسط دو شاخه اصلی سواران و بوئین میاندشت انجام می‌گیرد که شاخه سواران در قسمت شمال و شمال شرق منطقه جاری



## شکل ۱ - حوزه آبخیز رویدخانه پلاسجان در ایستگاه اسکندری

جدول ۲ - مشخصات سیلابهای انتخاب شده

ردیف	سیلاب	تاریخ وقوع (مترمکعب) در ثانیه)	دبه حداکثر لحظه‌ای	زمان رسیدن به اوج	زمان پایه	بارش	زمان بارش مازاد
	(میلیمتر)	(ساعت)	(ساعت)	(ساعت)	(ساعت)	متوسط وارد بر حوضه	(ساعت)
۱	۱۰	۴۸	۱۶	۲۵/۰	۷۱/۲/۶		
۲	۲۰/۳	۵۸	۲۴	۲۲/۷	۷۱/۱۲/۱۷		
۳	۲۶/۹	۴۸	۸	۱۳۵/۰	۷۲/۲/۶		
۴	۲۸/۳	۷۶	۲۶	۶۱/۸	۷۲/۲/۱۵		
۵	۵۴/۳	۵۶	۱۲	۹/۷	۷۳/۸/۲۵		
۶	۱۸/۶	۴۳	۹	۳۲/۲	۷۳/۹/۲		
۷	۲۵/۲	۵۲	۱۶	۴۴/۰	۷۳/۹/۴		
۸	۲۵/۸	۴۲	۱	۱۴/۲	۷۳/۹/۹		

(مشاهده‌ای) حوضه برای زمانهای متفاوت تعیین گردید. برای ساخت هیدروگراف واحد مصنوعی از سه روش اشتایدر، SCS و مثلثی استفاده شد. در روش اشتایدر، از معادلات مبتنی بر ضرایب مورفلوژیک حوضه استفاده می‌شود. مشخصات هیدروگراف واحد از معادلات زیر استخراج می‌گردد (۹) :

$$t_l = 0.75 C_t (LL_c)^{0.3} \quad [1]$$

$$t_r = \frac{t_l}{0.50} \quad [2]$$

$$t_{IR} = t_l + \frac{t_R - t_r}{4} \quad [3]$$

$$Q_p = 2/75 \frac{C_p A}{t_{IR}} \quad [4]$$

$$t_b = 5 (t_{IR} + \frac{t_R}{2}) \quad [5]$$

هیدروگراف‌های کامل و نمونه سیل انتخاب شد. در انتخاب سیلابها سعی شد که بارش همزمان آن موجود و تا حد امکان آب حاصل از ذوب برف در آنها تأثیر نداشته باشد. در جدول ۲ مشخصات سیلابهای انتخاب شده نشان داده شده است. سپس شدت بارندگی از نمودارهای باران سنج ثبات ایستگاه بوئین استخراج و هیتوگراف بارش نظیر هر سیلاب ترسیم شد. از روی هیدروگراف‌های سیل با جدا کردن جریان پایه (به صورت خط مستقیمی که نقطه شروع رواناب را به نقطه انتهای آن وصل می‌کند) از کل هیدروگراف، هیدروگراف حاصل از بارندگی به دست می‌آید. اگر ابعاد این هیدروگراف بر ارتفاع رواناب مستقیم (بارندگی موثر) تقسیم شود هیدروگراف واحد به دست می‌آید (۴، ۹ و ۱۱). از روی هیتوگراف بارندگی و با استفاده از شاخص نفوذ  $\phi$  مدت زمان بارش مؤثر مربوط به هر سیلاب محاسبه شد. به منظور تهیه هیدروگراف واحد حوضه، با استفاده از منحنی  $S$  مدت بارش مؤثر هیدروگراف‌های واحد یکسان گردید و با میانگین‌گیری، هیدروگراف‌های واحد معرف

$$\text{در نظر گرفته شود، به قرار زیر می‌باشد:} \quad t_p = t_{IR} + \frac{t_R}{2} = \frac{5/56 A}{Q_{PR}} \quad [6]$$

$$q_p = \frac{2/0.83 A Q}{t_p} \quad [10] \quad Q_{PR} = \frac{t_l Q_p}{t_{IR}} \quad [7]$$

$$t_p = \frac{\Delta D}{2} + t_l \quad [11] \quad W_{50} = 2/14 q_p^{-1/0.8} \quad [8]$$

$$t_l \approx 0.6 t_c \quad [12] \quad W_{75} = 1/22 q_p^{-1/0.8} \quad [9]$$

$$\Delta D = 0/133 t_p \quad [13] \quad \text{که: } t_l = \text{زمان تأخیر (ساعت)}$$

$$t_b = 5 t_p \quad [14] \quad (\text{در هیدروگراف واحد بدون بُعد SCS}) \quad \text{C}_l = \text{ضریب ثابت مربوط به حوضه}$$

$$t_b = 2/76 t_p \quad [15] \quad (\text{در هیدروگراف واحد مثلثی}) \quad L = \text{طول بزرگترین مسیر آب از نقطه خروجی تا مرتفع ترین نقطه حوضه (کیلومتر)}$$

$$\text{که: } L_c = \text{طول آبراهه از نقطه خروجی حوضه تا نقطه‌ای در مقابل مرکز ثقل حوضه (کیلومتر)}$$

$$t_r = \text{مدت بارندگی (ساعت)} \quad t_{IR} = \text{زمان تأخیر اصلاح شده (ساعت)}$$

$$t_R = \text{مدت بارندگی برای ساختن هیدروگراف واحد (ساعت)} \quad Q_p = \text{دبی اوج، (مترمکعب بر ثانیه)}$$

$$C_p = \text{ضریب ثابت مربوط به حوضه} \quad A = \text{مساحت حوضه (کیلومتر مربع)}$$

$$t_c = \text{زمان تمرکز (ساعت)} \quad t_b = \text{زمان پایه هیدروگراف واحد (ساعت)}$$

$$t_b = \text{زمان رساندن به اوج (ساعت)} \quad t_p = \text{زمان رساندن به اوج (ساعت)}$$

$$W_{75}, W_{50} = \text{پهنه‌ای هیدروگراف واحد در ۵۰ درصد و ۷۵ درصد دبی اوج}$$

$$q_p = \text{دبی اوج هیدروگراف در واحد سطح حوضه (مترمکعب بر ثانیه بر کیلومتر مربع)}$$

$$\text{در روشهای SCS و مثلثی برای تعیین هیدروگراف واحد مصنوعی، کافی است که زمان رساندن به دبی اوج و مقدار دبی اوج محاسبه شود. مختصات نقاط هیدروگراف واحد از جدول}$$

$$\text{یا نمودار بدون بُعدی که برای این منظور تهیه شده است به دست می‌آید (۴ و ۹). روابط موجود در هیدروگراف واحد}$$

$$\text{بدون بُعد، که می‌تواند برای سادگی امر به صورت مثلثی نیز}$$

$$t_c = \frac{L}{1/5D} \left( \frac{A^2}{S} \right)^{0.2} \quad [16]$$

$$\text{که: } t_c = \text{زمان تمرکز (ساعت)}$$

$$C_p = 0.85 \quad C_t = 1/8$$

نحوه‌ای عبارتند از:  $C_p = 0.85$  و  $C_t = 1/8$ . نظریه این که پارامترهای  $A$ ،  $L$  و  $C_t$  مشخص و ثابت هستند (به ترتیب ۱۵۷۸ کیلومتر مربع،  $60/5$  کیلومتر و  $23/65$  کیلومتر)، لذا با استفاده از معادلات [۱] تا [۶] می‌توان مشخصات هیدروگراف واحد اشنايدر را استخراج نمود. در شکل‌های ۷ و ۸ نمونه‌ای از هیدروگراف واحد تعیین شده از روش اشنايدر به همراه هیدروگراف واحد طبیعی آورده شده است.

با قراردادن مقادیر معلوم در معادلات [۱] و [۲] زمان تمرکز از روش برانزی - ویلیامز برابر  $16/9$  ساعت و از روش SCS برابر  $16/7$  ساعت به دست می‌آید. بررسی هیدروگراف‌های مشاهده شده نشان می‌دهد که زمان تمرکز حوضه را می‌توان معادل ۱۸ ساعت درنظر گرفت و چنانچه ملاحظه می‌گردد ارقام به دست آمده اختلاف چندانی ندارند. در جدول ۴ مشخصات تعیین شده برای هیدروگراف واحد مصنوعی به روشهای SCS و مثلثی با توجه به کمیت  $t_c$  آورده شده است. در شکل‌های ۷ و ۸ نمونه‌ای از هیدروگراف واحد تعیین شده از روشهای SCS و مثلثی نیز نشان داده شده است.

برای آزمون و بررسی تطابق بهینه هیدروگراف‌های واحد مصنوعی (اشنايدر، SCS و مثلثی) با هیدروگراف واحد معرف

(طبیعی) حوضه آبخیز پلاسجان از معیارهای مجموع مربع خطاهای دبی، درصد اختلاف دبی حداقل لحظه‌ای محاسبه شده با مشاهده شده و درصد اختلاف زمان تا اوچ ( $t_p$ ) (محاسبه شده با مشاهده شده استفاده گردید. اصولاً در برنامه ریزی خطی، تابع هدف تعیین هیدروگراف واحد بهینه عبارت است از به حداقل رسانیدن مجموع تفاوت‌های مطلق<sup>۱</sup> و به حداقل رسانیدن بیشترین تفاوت مطلق<sup>۲</sup> (۲۲). به طور مثال، در این تحقیق مجموع مربع خطاهای هیدروگراف‌های واحد مصنوعی ۲ ساعته به روشهای اشنايدر، SCS و مثلثی نسبت به هیدروگراف واحد طبیعی به ترتیب برابر است با  $0/17$ ،  $0/16$  و  $0/12$ ٪. درصد اختلاف دبی‌های حداقل لحظه‌ای

$$L = \text{طول بزرگترین مسیر آب از نقطه خروجی تا مرتفع ترین نقطه حوضه (کیلومتر)}$$

$$A = \text{مساحت حوضه (کیلومتر مربع)}$$

$$D = \text{قطره دایره معادل سطح حوضه (کیلومتر)}$$

$$S = \text{شیب متوسط حوضه (درصد)}$$

و معادله SCS عبارت است از (۴):

$$t_p = \frac{L^{1/8} (S+1)^{1/4}}{1900y^{1/5}} \quad [۱۷]$$

$$t_c = 1/67t_p \quad [۱۸]$$

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad [۱۹]$$

که:

$$t_p = \text{زمان تاخیر (ساعت)}$$

$$L = \text{طول رودخانه اصلی (فوت)}$$

$$y = \text{شیب متوسط حوضه (درصد)}$$

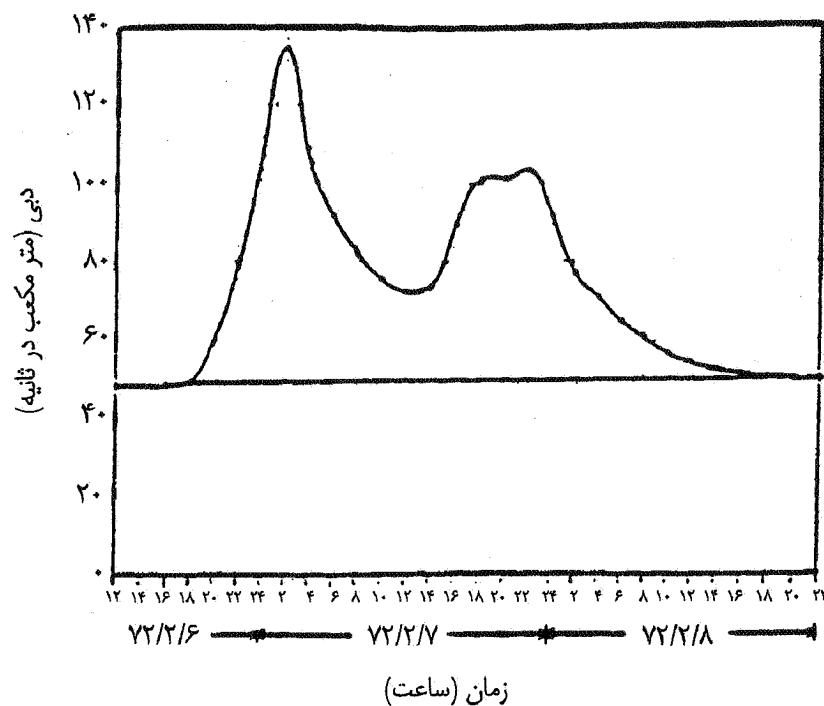
$$S = \text{ضریب نگهداشت}$$

$$CN = \text{شماره منحنی}$$

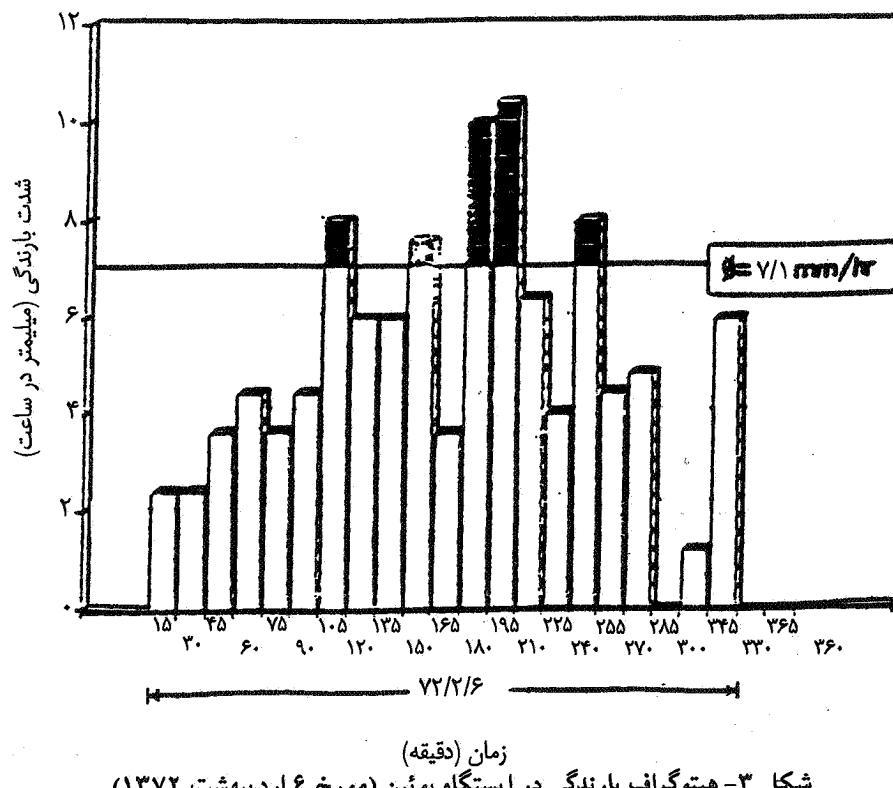
## نتایج و بحث

در شکل‌های ۲ تا [۶] به ترتیب نمونه‌ای از هیدروگراف سیلان، هیتوگراف بارش نظیر و هیدروگراف واحد استخراج شده از آن نشان داده شده است. همچنین نمونه‌ای از هیدروگراف واحد معرف ۱ و ۶ ساعته حوضه پلاسجان در شکل‌های ۵ و ۶ آمده است.

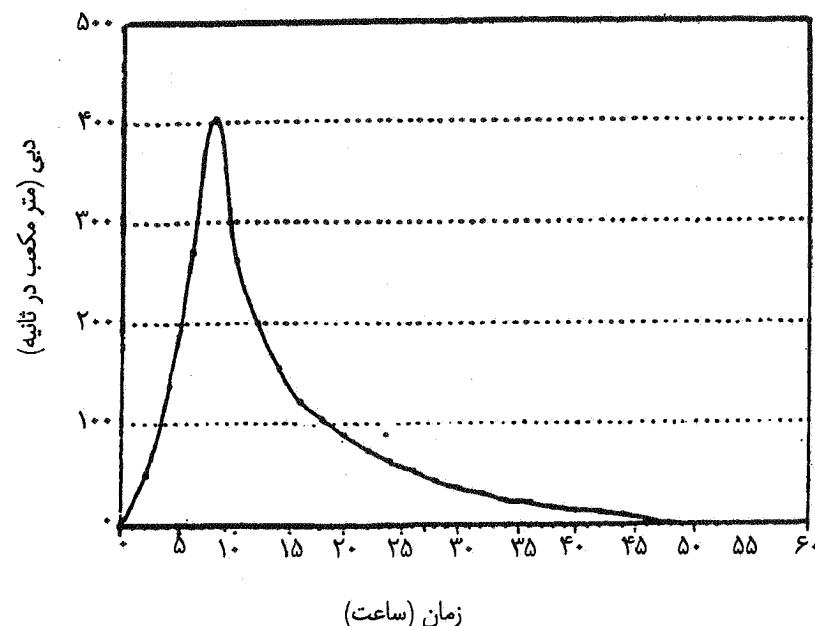
برای حل معادلات [۱] تا [۶]، ابتدا باید به واسنجی ضرایب  $C_p$  و  $C_t$  پرداخت. محاسبه پارامترهای مورد نیاز برای واسنجی این ضرایب، با توجه به هیدروگراف‌های واحد مشاهده شده و خصوصیات فیزیوگرافیک حوضه، به طور خلاصه در جدول ۳ آورده شده است. براساس جدول ۳، مقادیر میانگین ضرایب



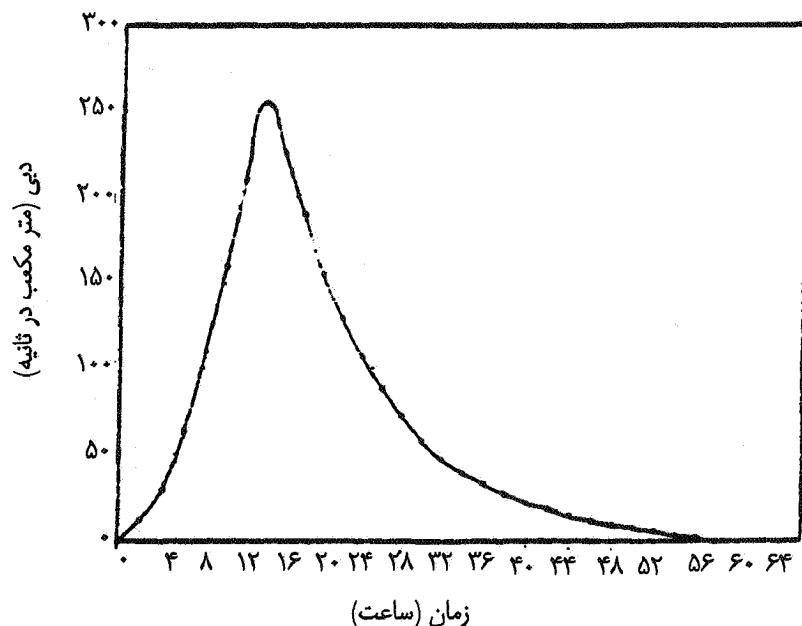
شکل ۲- هیدروگراف سیلاب مشاهده شده در تاریخهای ۶ الی ۸ اردیبهشت ۱۳۷۲ در ایستگاه اسکندری



شکل ۳- هیتوگراف بارندگی در ایستگاه بوئین (مورخ ۶ اردیبهشت ۱۳۷۲)



شکل ۴- هیدروگراف واحد ۲/۵ ساعته مستخرج از هیدروگراف سیلان شکل ۲



شکل ۵- هیدروگراف واحد معرف ۱ ساعته زیر حوضه پلاسجان از حوضه آبخیز سد زاینده رود

بررسی نتایج به دست آمده از استخراج هیدروگراف‌های واحد معرف حوضه پلاسجان و آزمون هیدروگراف‌های واحد مصنوعی در تطابق با هیدروگراف‌های واحد مشاهده شده،

محاسبه شده با مشاهده شده و درصد اختلاف زمان تا اوج محاسبه شده و مشاهده شده به ترتیب در جداول ۵ و ۶ نشان داده شده است.

جدول ۳ - محاسبه ضرایب  $C_t$  و  $C_p$ 

تاریخ وقوع سیلاب	$t_r$ (hr)	$t_l$ (hr)	$t_p$ (hr)	$Q_p$ ( $m^3/s$ )	$t_{LR}$ ( $km^2$ )	$C_t$	$C_p$
۷۱/۲/۶ و ۷/۸	۱	۱۵/۰	۱۶	۱۹۴/۵	۱۵/۹۶	۱/۸	۰/۷۱
۷۱/۱۲/۱۷ و ۱۸	۱	۲۳/۰	۲۴	۱۷۴/۰	۲۴/۳	۲/۷	۰/۹۷
۷۲/۲/۶ و ۷/۸	۲/۵	۶/۷۰	۸	۴۰۴/۰	۶/۴	۰/۷۲	۰/۵۹
۷۲/۱۲/۱۵ و ۱۶ و ۱۷	۱	۲۵/۰	۲۶	۲۱۷/۰	۲۶/۴	۲/۹	۱/۳۲
۷۳/۸/۲۶ و ۲۷	۱	۱۱/۰	۱۲	۱۵۹/۰	۱۱/۷۸	۱/۳۳	۰/۴۳
۷۳/۹/۲ و ۳	۲	۸/۰	۹	۲۹۹/۵	۷/۸۵	۰/۸۸	۰/۵۴
۷۳/۹/۴ و ۵	۲	۱۹/۰	۲۰	۲۴۷/۶	۱۹/۳۷	۲/۱۹	۱/۱۰
۷۳/۹/۹ و ۱۰ و ۱۱	۰/۵	۱۳/۷۰	۱۴	۲۴۹/۵	۱۴/۲۶	۱/۶	۰/۸۲
مقدادیر انتخابی							۱/۸
مقدادیر انتخابی							۰/۸۵

جدول ۴ - مشخصات لازم برای تهیه هیدروگراف واحد مصنوعی در روش‌های SCS

و مثلى برای بارش مؤثر ۲ ساعته

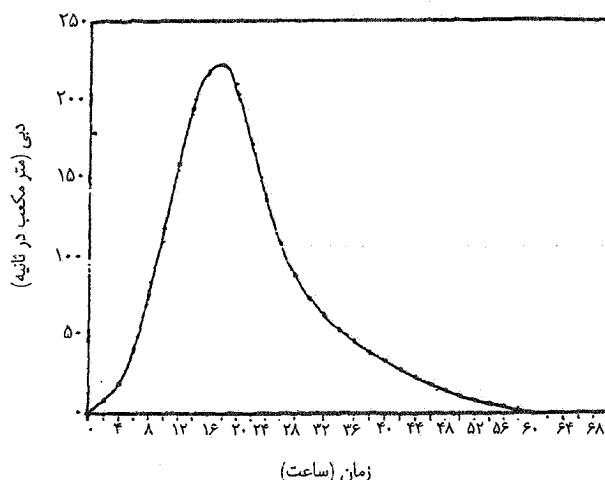
A حوضه CN	مساحت حوضه ( $km^2$ )	شماره منحنی حوضه	زمان تمركز $t_c$	زمان تاخیر $t_l$	زمان مدت $\Delta D$	زمان اوچ $t_p$	دبی اوچ $Q_p$ ( $m^3/s$ )	زمان پایه (SCS) $t_b$	زمان پایه $t_b$
								زمان پایه $t_b$	زمان پایه $t_b$
								زمان پایه $t_b$	زمان پایه $t_b$
۱۵۷۸	۸۵/۶۸	۱۸	۱۰/۸	۲	۱۱/۸	۲۷۸/۵	۵۹	۳۲	

نسبت به روش اشنایدر در ساخت هیدروگراف واحد به دست آورده، ولی در اکثر موارد میزان دبی حداکثر لحظه‌ای را نسبت به دبی مشاهده شده کمتر نشان داده است. این نکته نشان می‌دهد که تفاوت در خصوصیات حوضه‌ها باعث تغییر تطابق روش‌های ساخت هیدروگراف واحد مصنوعی می‌شود (۱۰ و ۱۶).

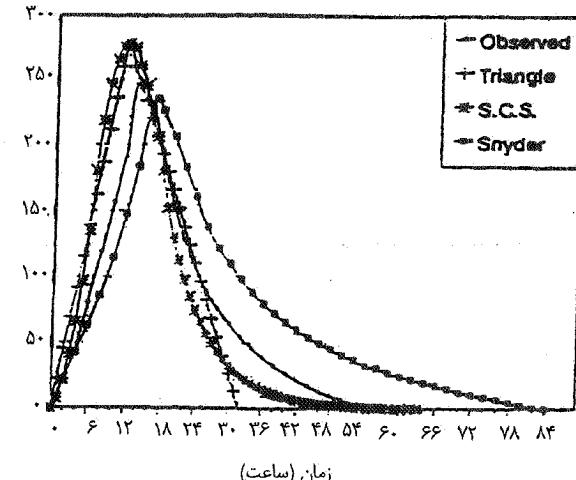
۲ - میانگین مطلق درصد اختلاف حداکثر دبی لحظه‌ای محاسبه شده در روش اشنایدر نسبت به مشاهده شده ۱/۲۲ درصد و در روش‌های SCS و مثلي ۱۶/۲۳ درصد می‌باشد. بنابراین روش اشنایدر دارای دبی اوچ محاسبه شده نزدیک‌تر به

نکات زیر را روشن می‌سازد :

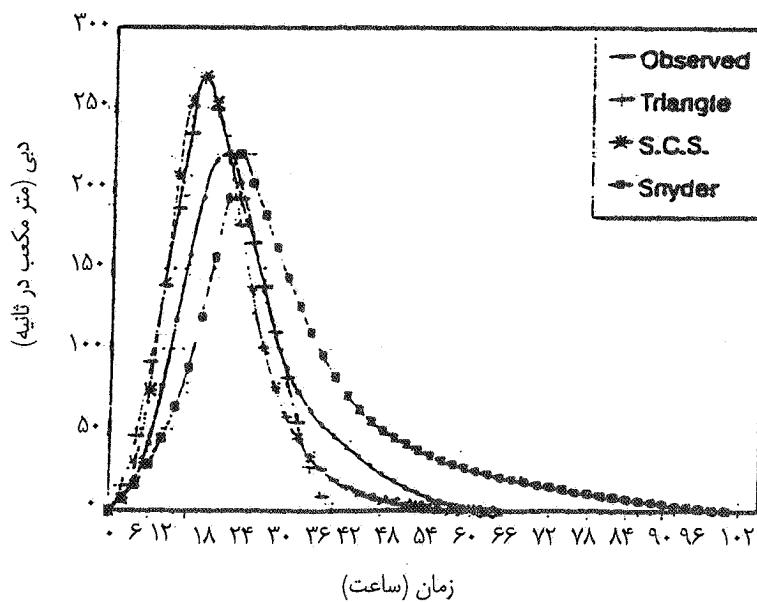
- بیشترین دامنه نوسان اختلاف دبی حداکثر لحظه‌ای نسبت به دبی لحظه‌ای مشاهده شده در روش اشنایدر ۸/۲۱ + تا ۶/۰۷ درصد و در روش‌های SCS و مثلي ۲۱/۱۹ + تا ۱۲/۰۲ درصد می‌باشد. چون برآورد دبی حداکثر لحظه‌ای به روش‌های مثلي و SCS عمده‌اً از دبی حداکثر لحظه‌ای مشاهده شده بیشتر است، لذا برای اصلاح آن توصیه می‌شود مقدار عدد ثابت فرمول [۱۰] از ۲/۰۸۳ به ۱/۷۴ کاهش یابد. در تحقیقی که در ۹ حوضه آبخیز استانهای زنجان، گیلان، مازندران و تهران توسط رضایی (۳) انجام گرفته روش SCS تطابق خوبی را



شکل ۶- هیدروگراف واحد معرف ۶ ساعته حوضه پلاسجان



شکل ۷- هیدروگراف‌های واحد مصنوعی ۲ ساعته (اشنايدر، SCS و مثاثی) در مقایسه با هیدروگراف واحد معرف ۲ ساعته (مشاهده‌ای) حوضه پلاسجان



شکل ۸- هیدروگراف‌های واحد مصنوعی ۶ ساعته (اشنايدر، SCS و مثاثی) در مقایسه با هیدروگراف واحد معرف ۶ ساعته (مشاهده‌ای) حوضه پلاسجان

تجربی از هماهنگی مطلوبی برخوردار بوده و قابل استفاده است.  
۳- مجموع مربع خطاهای دبی ( $\sum SSx$ ) در روش اشنایدر فقط در مورد بارش یک ساعته کمتر از روش‌های مثاثی و SCS می‌باشد و در بارشهای طولانی تر به ترتیب روش مثاثی و روش

مقادیر مشاهده شده می‌باشد. بهادری خسروشاهی (۲) نیز در تحقیق خود در حوضه آبخیز رودخانه جاجروم با وسعت حدود ۱۷۷۴ کیلومترمربع و تیپ کوهستانی نتیجه گرفته است که هیدروگراف واحد اشنایدر در مقایسه با SCS نسبت به موارد

جدول ۵ - درصد اختلاف دبی حداکثر لحظه‌ای و مجموع مربع خطاهای ( $SS_{\text{g}}$ ) حاصل از مقایسه هیدروگراف‌های واحد طبیعی حوضه پلاسجان با هیدروگراف‌های واحد مصنوعی

روش مثلثی	SCS روش			روش اشتایدر		مدت بارش مؤثر
	$\sum SS_x$	درصد اختلاف دبی حداکثر	$\sum SS_x$	درصد اختلاف دبی حداکثر	$\sum SS_x$	
۰/۰۲۱	+ ۱۶/۰۷	۰/۰۲۵	+ ۱۶/۰۷	۰/۰۱۴	- ۶/۰۷	۱ ساعته
۰/۰۱۲	+ ۱۲/۰۲	۰/۰۱۶	+ ۱۲/۰۲	۰/۰۱۷	- ۵/۴۷	۲ ساعته
۰/۰۱۴	+ ۱۴/۳۰	۰/۰۱۷	+ ۱۴/۳۰	۰/۰۲۲	- ۴/۳۷	۳ ساعته
۰/۰۱۴	+ ۲۱/۱۹	۰/۰۱۵	+ ۲۱/۱۹	۰/۰۱۸	- ۰/۳۶	۶ ساعته
۰/۰۰۵	+ ۱۸/۲۰	۰/۰۰۵	+ ۱۸/۲۰	۰/۰۳۲	+ ۰/۷۴	۱۲ ساعته
۰/۰۰۲	+ ۱۵/۶۰	۰/۰۰۲	+ ۱۵/۶۰	۰/۰۴۱	+ ۸/۲۱	۱۸ ساعته
۰/۰۱۱	۱۶/۲۳	۰/۰۱۳	۱۶/۲۳	۰/۰۲۴	۱/۲۲	میانگین (مطلق)

جدول ۶ - برآورد درصد اختلاف زمان تا اوج محاسبه شده از طریق روش‌های مصنوعی با زمان تا اوج هیدروگراف‌های واحد طبیعی حوضه پلاسجان

روش مثلثی	SCS روش			روش اشتایدر		زمان تا اوج مشاهده شده در هیدروگراف واحد معرف	مدت بارش مؤثر (ساعت)
	$\sum SS_x$	زمان تا اوج دبی اوج (ساعت)	$\sum SS_x$	زمان تا اوج دبی اوج (ساعت)	$\sum SS_x$	زمان تا اوج دبی اوج (ساعت)	
- ۲۱/۴	۱۱/۰	- ۲۱/۴	۱۱/۰	+ ۱۴/۳	۱۶/۰	۱۴/۰	۱
- ۱۴/۳	۱۲/۰	- ۱۴/۳	۱۲/۰	+ ۲۱/۴	۱۷/۰	۱۴/۰	۲
- ۱۲/۳	۱۳/۰	- ۱۳/۳	۱۳/۰	+ ۱۳/۳	۱۷/۰	۱۵/۰	۳
- ۲۲/۲	۱۴/۰	- ۲۲/۲	۱۴/۰	+ ۱۱/۱	۲۰/۰	۱۸/۰	۶
- ۱۰/۰	۱۸/۰	- ۱۰/۰	۱۸/۰	+ ۲۰/۰	۲۴/۰	۲۰/۰	۱۲
۰/۰	۲۲/۰	۰/۰	۲۲/۰	+ ۳۱/۸	۲۹/۰	۲۲/۰	۱۸
- ۱۲/۵		- ۱۲/۵		+ ۱۸/۶		میانگین	

روشهای SCS و مثلثی، با افزایش طول مدت بارش مؤثر، به طور متوسط مجموع مربع خطاهای کاهش می‌یابد.

۷ - در روش اشتایدر، درصد اختلاف زمان تا اوج محاسبه شده نسبت به مقدار مشاهده شده مثبت است و در همه موارد این روش زمان تا اوج را بزرگتر از مقدار واقعی برآورد می‌نماید. در روشهای SCS و مثلثی، درصد اختلاف زمان تا اوج محاسبه شده نسبت به مشاهده شده منفی است و در همه موارد این دو روش زمان تا اوج را کوچک‌تر از مقادیر مشاهده‌ای برآورد می‌نمایند.

۸ - در روشهای SCS و مثلثی به طور متوسط با افزایش مدت بارش مؤثر، درصد اختلاف زمان تا اوج محاسبه شده نسبت به مقدار مشاهده شده کاهش می‌یابد به طوری که در بارش ۱۸ ساعته زمان تا اوج محاسبه شده با مقدار مشاهده شده یکسان گردیده است.

SCS دارای کمترین مجموع مربع خطاهای هستند. بنابراین روشهای مثلثی و SCS نسبت به روش اشتایدر تطابق بهتری در ساخت شکل هیدروگراف واحد و تبعیت از آهنگ تغییرات آن در این حوضه آبخیز دارند.

۴ - به طور کلی، روش مثلثی به میزان ۵۴/۱ درصد و روش SCS به میزان ۴۵/۸ درصد مجموع مربع خطاهای کمتری نسبت به روش اشتایدر دارد. برای ساخت هیدروگراف واحد مصنوعی روشهای مثلثی SCS و اشتایدر از اولویت یک تا سه برخوردارند.

۵ - دو روش SCS و مثلثی اختلاف کمی در مجموع مربع خطاهای دارند و در بارشهای طویل المدت این دو روش تقریباً شرایط یکسانی دارند.

۶ - در روش اشتایدر، با افزایش طول مدت بارش مؤثر، مجموع مربع خطاهای حاصل از مقایسه هیدروگراف‌های واحد معروف حوضه با هیدروگراف‌های مصنوعی افزایش می‌یابد. در

#### منابع مورد استفاده

- ۱ - باقری، ر. ۱۳۷۱. تعیین دبی ماکریم لحظه‌ای در حوضه‌های آبریز فاقد آمار سد زاینده‌رود، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۴۵ صفحه.
  - ۲ - بهادری خسروشاهی، ف. ۱۳۷۰. بررسی قابلیت به کارگیری هیدروگراف واحد در تعیین سیالبها، مجموعه مقالات اولین کنفرانس هیدرولوژی ایران، مهاب قدس، تهران، ص ۲۰۶ تا ۲۲۹.
  - ۳ - رضایی، ع. ۱۳۷۳. تعیین هیدروگراف‌های واحد سنتیک و طبیعی در تعدادی از حوضه‌های آبخیز کوچک، پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران.
  - ۴ - علیزاده، ا. ۱۳۷۴. اصول هیدرولوژی کاربردی. انتشارات دانشگاه امام رضا، چاپ ششم، ص ۴۰۸ تا ۴۴۸.
  - ۵ - مهدوی، م. ۱۳۷۱. هیدرولوژی کاربردی، جلد دوم، انتشارات دانشگاه تهران، ص ۱۹۳ تا ۲۳۱.
  - ۶ - نجمایی، م. ۱۳۶۸. هیدرولوژی مهندسی، انتشارات سارا، جلد دوم، ص ۱ تا ۸۵.
  - ۷ - نکوبی‌مهر، م. ۱۳۷۵. بررسی کاربرد هیدروگراف‌های واحد با زمانهای متفاوت در تجزیه و تحلیل سیالبها در حوضه آبخیز سد زاینده‌رود، پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، ۲۶۶ صفحه.
  - ۸ - نوربخش، م. ۱۳۷۵. هیدرولوژی‌ماتولوژی حوضه آبی سواران (زیر حوضه پلاسجان)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد جغرافیای طبیعی، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه اصفهان، ۲۳۷ صفحه.
- 9 - Chow, V.T., D.R. Maidment and L.W. Mays. 1988. Applied Hydrology. McGraw-Hill International Edition, N.Y., pp. 201 - 236 .
- 10- Edwards, D.R. and C.T. Hann. 1990. Combining site and regional information to reduce uncertainty in peak flow estimates . Trans. ASAE, 33(4) : 1208 - 1216 .
- 11- Environmental Protection Agency. 1990. Ground Water Handbook. Vol. I : Ground Water and Contamination. USEPA /625/6-90016a, pp. 56 - 62 .

- 12- Hjelmfelt, A.T. Jr., and L.A. Kramer. 1988. Unit hydrograph variability for a small agricultural watershed. Modeling Agricultural, Forest , and Rangeland Symposium, Dec. 12 - 13 , Hyatt Regency Chicago, Illinois, pp. 357 - 366 .
- 13- Hjelmfelt, A. and M. Wang. 1994. General stochastic unit hydrograph. ASCE, J. Irrig. and Drain. Eng. 120(1) : 138 - 148 .
- 14- Maidment, D.R. 1993. Handbook of Hydrology. McGraw-Hill Inc., N.Y., pp. 16.1 - 16.41 .
- 15- Mays, L.W. and C.K. Taur. 1982. Unit hydrographs via nonlinear programming. Water Resour. Res. 18(4): 744 - 752 .
- 16- McCuen, R.H., and T.R. Bondelid. 1983. Estimating unit hydrograph peak rate factors. ASCE, J. Irrig. and Drain. Eng. 109(2) : 238 - 250 .
- 17- Nalbantis, I., C. Obled and J.Y. Rodriguez. 1995. Unit hydrograph and effective precipitation identification. J. Hydrology, 168 : 127 - 157 .
- 18- Savani, A.K., P.M. Modi and J.B. Panchal. 1985. Developing synthetic unit hydrograph for large catchment. Proc. of Formulation and Appraisal of Irrigation Projects Symposium, March 28 - 30, Patna University, pp . II - 19 - II - 30 .
- 19- Shouze, Y. and Y. Delin. 1982. On the application of variable unit hydrograph to the regions without observed data . Proc. of Hydrological Research Basins and Their Use in Water Resources Planning Symposium, Sept. 21 - 23, Berne, Switzerland, pp. 617 - 626 .
- 20- Snyder, F.F. 1938. Synthetic unitgraphs. Trans. Am. Geophys. Union, 19th Annual Meeting, Part 2, p. 447.
- 21- Soil Conservation Service. 1964. Hydrology, Chapter 6, In : National Engineering Handbook, Sec. 4, Part 1, USDA, Washington D.C.
- 22- Zhao, B. and Y.K. Tung. 1994. Determination of optimal unit hydrographs by linear programming. Water Resour. Mang. 8 (2) : 101 - 119 .
- 23- Zhao, B., Y.K. Tung and J.C. Yang. 1995. Estimation of unit hydrograph by ridge least - squares method. ASCE, J. Irrig. and Drain. Eng. 121(3) : 253 - 259 .