

# بررسی و آزمون تطابق هیدروگراف های واحد مصنوعی و طبیعی در حوضه آبخیز سد زاینده رود «زیر حوضه پلاسجان»

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

## چکیده

باتوجه به اهمیت هیدروگراف واحد در پیش بینی 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 فاقد چنین داده‌های هیدروکلیماتولوژی هستند استفاده از روشهای هیدروگراف واحد مصنوعی را معقول دانسته‌اند. از این رو تحقیقاتی در حوضه آبخیز سد زاینده رود (زیر حوضه پلاسجان) انجام گرفت تا قابلیت کارایی هیدروگراف‌های واحد مصنوعی (اشنایدر، SCS و مثلثی) در ارزیابیهای هیدرولوژیک آزمون گردد. برای این منظور، هیدروگراف‌های واحد طبیعی و مصنوعی فوق‌الذکر با استفاده از مجموعه داده‌های مورفولوژیکی، باران سنجی 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 اشنایدر در ساخت شکل هیدروگراف واحد و تبعیت از آهنگ تغییرات هیدروگراف واحد معرف حوضه دارند، لیکن در اکثر موارد میزان حداکثر دبی لحظه‌ای را نسبت به مقدار مشاهده شده بیشتر نشان می‌دهند. لذا توصیه می‌شود در این حوضه آبخیز مقدار عدد ثابت در فرمول برآورد حداکثر دبی لحظه‌ای در این روشها از  $2/083$  به  $1/74$  کاهش یابد. اگرچه روش اشنایدر در برآورد دبی حداکثر 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 طور کلی پس از اصلاح فرمول برآورد حداکثر دبی لحظه‌ای در روشهای SCS و مثلثی، می‌توان گفت که برای ساخت هیدروگراف واحد مصنوعی در این حوضه، روشهای مثلثی، SCS و اشنایدر از اولویت اول تا سوم برخوردارند.

واژه‌های کلیدی - هیدروگراف واحد، هیدروگراف سیلاب، هیدروگراف معرف، هیتوگراف بارندگی، هیدروگراف واحد مصنوعی، روش اشنایدر، روش SCS، 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

مازاد<sup>۲</sup> که از رگباری با شدت یکنواخت بر روی حوضه آبخیز و مدت معلوم حاصل شده باشد (۹ و ۱۴). هیدروگراف واحد

\* 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 شنایدر حاصل تحقیقات انجام یافته در مورد چندین حوضه آبخیز در ارتفاعات آپالچین آمریکا می باشد. سطح حوضه های مورد بررسی ۲۵ تا ۲۵۰۰۰ کیلومتر مربع بوده است. شنایدر در این تحقیق سه پارامتر مهم هیدروگراف واحد را ارائه نمود که عبارتند از: زمان تأخیر تا نقطه حداکثر دبی، دبی حداکثر (لحظه ای) و زمان پایه.

تحقیق جداگانه ای توسط اداره حفاظت خاک آمریکا (SCS) در تعداد بسیار زیادی از حوضه های آبخیز دارای آمار و اطلاعات لازم انجام گرفته است. حاصل این تحقیق پیدایش روش هیدروگراف واحد بدون بُعد (روش SCS) بوده است (۲۱). این روش سه پارامتر مهم هیدروگراف واحد مصنوعی را به شرح زیر ارائه می کند:

- پارامتر بدون بُعد حاصل تقسیم زمان در هر لحظه به زمان تا اوج هیدروگراف

- پارامتر بدون بُعد حاصل تقسیم دبی در هر لحظه به دبی حداکثر لحظه ای هیدروگراف

- پارامتر مجموع حجم سیلاب که برابر با عمق واحد در سطح حوضه آبخیز می باشد

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

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

#### مسوا و روشها

حوضه آبخیز سد زاینده رود با مساحتی حدود ۴۳۰۰

عموماً از اطلاعات جریان آب در رودخانه و توزیع زمانی بارندگی مازاد و یا اطلاعات فیزیوگرافی حوضه به دست می آید. بنابراین، استخراج هیدروگراف واحد در یک حوضه آبخیز مستلزم داشتن هیدروگراف سیلاب و هیتوگراف باران همزمان آن برای سطح حوضه می باشد (در این صورت، هیدروگراف واحد حاصله را طبیعی و یا مشاهده ای گویند). دو فرضیه مهم در تئوری هیدروگراف واحد وجود دارد: (۱) خطی بودن سیستم<sup>۱</sup> و تناسب خروجی ها نسبت به ورودی های حوضه و (۲) در نظر گرفتن حوضه آبخیز به عنوان یک سیستم پیوسته و گرده ای<sup>۲</sup> (۹ و ۱۴).

امروزه از هیدروگراف واحد در تخمین سیلهای حوضه های آبخیز و مدل سازی روابط بارندگی - رواناب استفاده فراوان می شود (۱۲، ۱۷، ۱۸ و ۱۹). برای تعیین هیدروگراف واحد معرف حوضه، هیدروگراف های 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، حداکثر دبی سیل و زمان وقوع رگبار داشته باشد. اگر تفاوت بین هیدروگراف های واحد حاصل تصادفی باشد و از روند خاصی پیروی نکنند، یک هیدروگراف واحد متوسط رسم می شود (۱۳ و ۱۴). از روشهای ماتریسی (۹)، برنامه ریزی خطی (۹ و ۲۲)، برنامه ریزی غیرخطی (۱۵) و حداقل مربعات (۲۳) نیز می توان در اشتقاق هیدروگراف واحد استفاده کرد.

هیدروگراف واحدی که از اطلاعات بارندگی و دبی رودخانه یک حوضه آبخیز به دست می آید فقط برای آن حوضه آبخیز و همان نقطه رودخانه کاربرد دارد. برای سایر نقاط آن رودخانه و یا حوضه های آبخیز مجاور که خصوصیات مشابه حوضه آبخیز مورد نظر دارند، می توان از روش هیدروگراف واحد مصنوعی<sup>۳</sup> (ساختگی) استفاده کرد (۱). از جمله، شنایدر (۲۰) روشی را ارائه می نماید که براساس خصوصیات مورفولوژیک حوضه می توان ویژگیهای هیدروگراف واحد مصنوعی را تعیین نمود.

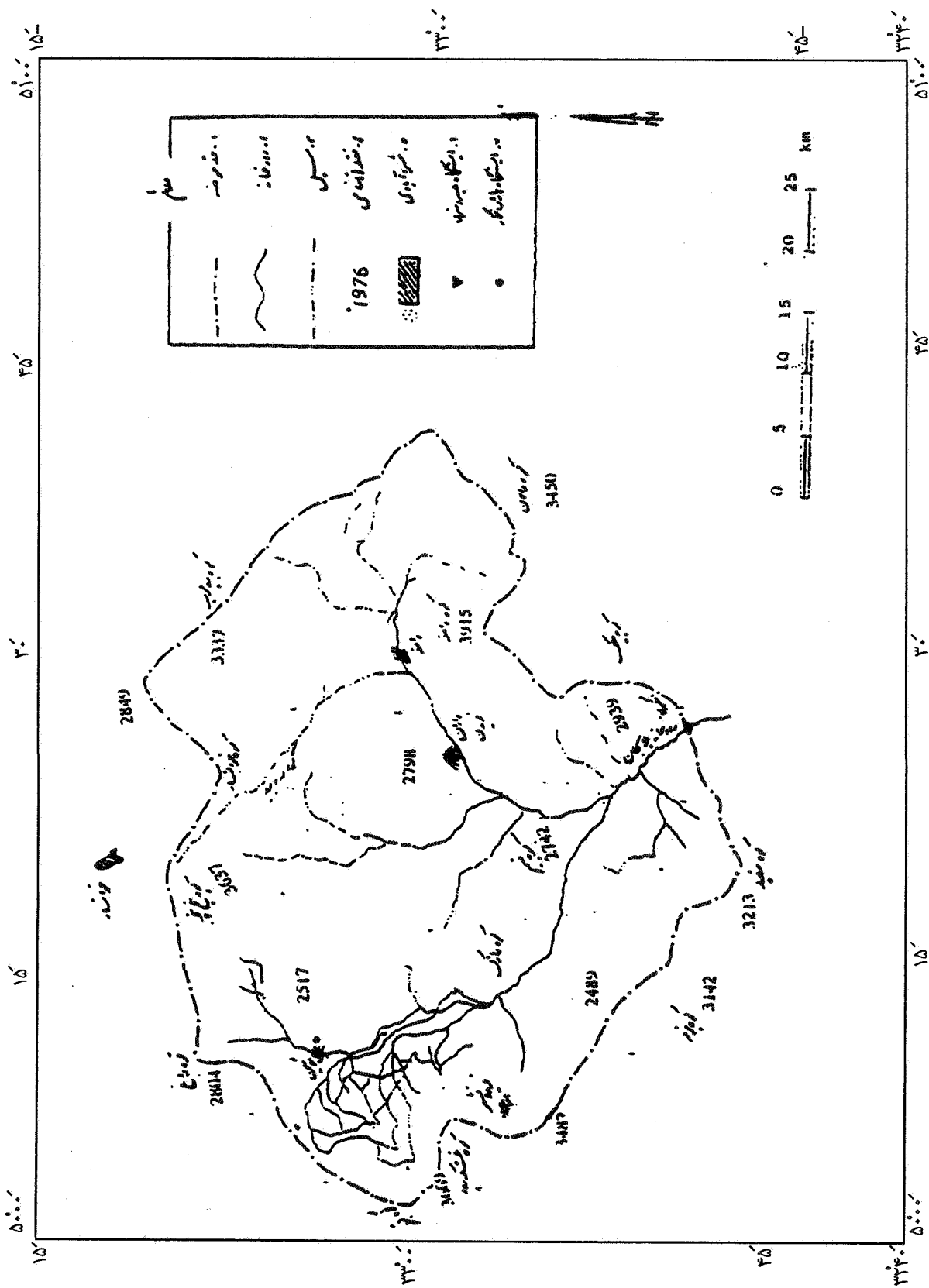
جدول ۱ - مشخصات فیزیوگرافیک حوضه آبخیز پلاسجان (۷)

| پارامتر                    | مقدار | پارامتر                   | مقدار |
|----------------------------|-------|---------------------------|-------|
| مساحت (کیلومتر مربع)       | ۱۵۷۸  | ارتفاع میانه (متر)        | ۲۵۲۳  |
| محیط (کیلومتر)             | ۱۷۶/۲ | ارتفاع حداکثر (متر)       | ۳۸۹۰  |
| ضریب گراولوس               | ۱/۲۴  | ارتفاع حداقل (متر)        | ۲۱۴۰  |
| طول مستطیل معادل (کیلومتر) | ۶۱/۶  | عامل کشیدگی               | ۰/۴۵  |
| عرض مستطیل معادل (کیلومتر) | ۲۶/۶  | نسبت برجستگی              | ۰/۹۹  |
| طولانی‌ترین شاخه (کیلومتر) | ۶۰/۵  | شاخص شیب حوضه (درصد)      | ۱۳/۲  |
| قطر دایره معادل (کیلومتر)  | ۴۵/۷  | اندیس شیب کلی حوضه (درصد) | ۱/۴۶  |
| متوسط ارتفاع (متر)         | ۲۵۲۳  | متوسط شیب حوضه (درصد)     | 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 فوق‌الذکر 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 منتهی می‌گردد. اقلیم منطقه براساس روش دومارتن از تیپ نیمه‌خشک تا بسیار مرطوب 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 جمع‌آوری شده مورد بررسی مجدد قرار گرفت و تعدادی از

کیلومتر مربع بین طول‌های جغرافیایی  $۴۹^{\circ} ۵۴'$  و  $۵۰^{\circ} ۴۵'$  شرقی و عرض‌های جغرافیایی  $۳۲^{\circ} ۱۸'$  و  $۳۳^{\circ} ۱۲'$  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 ۲۵۰۰۰۰ : ۱ در شکل ۱ ترسیم گردیده است (۸). این حوضه بین طول‌های  $۵۰^{\circ} ۲'$  و  $۵۰^{\circ} ۴۱'$  شرقی و عرض‌های  $۳۲^{\circ} ۴۶'$  و  $۳۳^{\circ} ۱۲'$  شمالی واقع است. قسمت اعظم سطح حوضه را زمینهای نسبتاً هموار تشکیل می‌دهد و سلسله 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، بزمه، سنبله و قبله قرار دارند که حداکثر ارتفاع آنها به ۳۹۰۰ متر می‌رسد. ارتفاع بلندترین نقطه داخلی حوضه ۳۹۱۵ متر است که بر روی سلسله ارتفاعات دالان 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- حوضه آبخیز رودخانه پلاسجان در ایستگاه اسکندری

جدول ۲ - مشخصات سیلابهای انتخاب شده

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

(مشاهده‌ای) حوضه برای زمانهای متفاوت تعیین گردید.

برای ساخت هیدروگراف واحد مصنوعی از سه روش اشنايدر، SCS و مثلثی استفاده شد. در روش اشنايدر، از معادلات مبتنی بر ضرایب مورفولوژیک حوضه استفاده می‌شود. مشخصات هیدروگراف واحد از معادلات زیر استخراج می‌گردد (۹):

$$t_1 = 0.75 C_t (LL_c)^{0.3} \quad [1]$$

$$t_T = \frac{t_1}{5/50} \quad [2]$$

$$t_{IR} = t_1 + \frac{t_R - t_T}{4} \quad [3]$$

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

$$t_b = 5 \left( t_{IR} + \frac{t_R}{4} \right) \quad [5]$$

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 جداکردن 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 مؤثر) 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  $k$  مدت بارش مؤثر هیدروگراف‌های واحد یکسان گردید و با میانگین‌گیری، هیدروگراف‌های واحد معرف

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

$$q_p = \frac{2/0.83 AQ}{t_p} \quad [10] \quad Q_{PR} = \frac{t_1 Q_p}{t_{IR}} \quad [7]$$

$$t_p = \frac{\Delta D}{2} + t_1 \quad [11] \quad W_{50} = 2/14 q_p^{-1/0.8} \quad [8]$$

$$t_1 \cong 0/6 t_c \quad [12] \quad W_{75} = 1/22 q_p^{-1/0.8} \quad [9]$$

$$\Delta D = 0/133 t_c \quad \text{یا} \quad \Delta D = 0/2 t_p \quad [13]$$

$$t_b = 5 t_p \quad \text{(در هیدروگراف واحد بدون بُعد SCS)} \quad [14]$$

$$t_b = 2/76 t_p \quad \text{(در هیدروگراف واحد مثلثی)} \quad [15]$$

که :  $t_1$  = زمان تأخیر (ساعت)

$C_t$  = ضریب ثابت مربوط به حوضه

$L$  = طول بزرگترین مسیر آب از نقطه خروجی تا مرتفع ترین

نقطه حوضه (کیلومتر)

$L_c$  = طول آبراهه از نقطه خروجی حوضه تا نقطه ای در

مقابل مرکز ثقل حوضه (کیلومتر)

$t_T$  = مدت بارندگی (ساعت)

$t_{IR}$  = زمان تأخیر اصلاح شده (ساعت)

$t_R$  = مدت بارندگی برای ساختن هیدروگراف واحد (ساعت)

$Q_p$  = دبی اوج، (مترمکعب بر ثانیه)

$C_p$  = ضریب ثابت مربوط به حوضه

$A$  = مساحت حوضه (کیلومتر مربع)

$t_b$  = زمان پایه هیدروگراف (ساعت)

$t_p$  = زمان رسیدن به اوج (ساعت)

$W_{50}, W_{75}$  = پهنای هیدروگراف واحد در ۵۰ درصد و ۷۵

درصد دبی اوج

$q_p$  = دبی اوج هیدروگراف در واحد سطح حوضه (مترمکعب

بر ثانیه بر کیلومتر مربع)

در روشهای SCS و مثلثی برای تعیین هیدروگراف واحد

مصنوعی، کافی است که زمان رسیدن به دبی اوج و مقدار دبی

اوج محاسبه شود. مختصات نقاط هیدروگراف واحد از جدول

یا نمودار بدون بُعدی که برای این منظور تهیه شده است به

دست می آید (۴ و ۹). روابط موجود در هیدروگراف واحد

بدون بُعد، که می تواند برای سادگی امر به صورت مثلثی نیز

$q_p$  = دبی حداکثر لحظه ای (مترمکعب بر ثانیه)

$t_p$  = زمان رسیدن به دبی اوج (ساعت)

$A$  = مساحت حوضه (کیلومتر مربع)

$Q$  = ارتفاع رواناب (سانتیمتر)

$t_1$  = زمان تأخیر (ساعت)

$t_c$  = زمان تمرکز (ساعت)

$t_b$  = زمان پایه هیدروگراف واحد (ساعت)

$\Delta D$  = زمان مؤثر بارش (ساعت)

برای حل معادلات مربوط به هیدروگراف واحد بدون بُعد،

داشتن زمان تمرکز حوضه ( $t_c$ ) لازم است. در این تحقیق، زمان

تمرکز از روشهای SCS و برانزبی - ویلیامز محاسبه شده و با

زمان تمرکز به دست آمده از هیدروگراف های مشاهده شده مورد

مقایسه قرار گرفته است تا مناسب ترین مقدار انتخاب گردد.

معادله برانزبی - ویلیامز عبارت است از (۱۴):

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

که :

$t_c$  = زمان تمرکز (ساعت)

حوضه‌ای عبارتند از:  $C_p = 0/85$  و  $C_t = 1/8$ .

نظریه این که پارامترهای  $L$ ،  $A$  و  $L_c$  مشخص و ثابت هستند (به ترتیب ۱۵۷۸ کیلومتر مربع، ۶۰/۵ کیلومتر و ۲۳/۶۵ کیلومتر)، لذا با استفاده از معادلات [۱] الی [۹] می‌توان مشخصات هیدروگراف واحد اشنایدر را استخراج نمود. در شکل‌های ۷ و ۸ نمونه‌ای از هیدروگراف واحد تعیین شده از روش اشنایدر به همراه هیدروگراف واحد طبیعی آورده شده است.

با قراردادن مقادیر معلوم در معادلات [۱۶] و [۱۸] زمان تمرکز از روش برانزی - ویلیامز برابر ۱۶/۹ ساعت و از روش SCS برابر ۱۶/۷ ساعت به دست می‌آید. بررسی هیدروگراف‌های مشاهده شده نشان می‌دهد که زمان تمرکز حوضه را می‌توان معادل ۱۸ ساعت در نظر 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 (اشنایدر، SCS و مثلثی) با هیدروگراف واحد (طبیعی) حوضه آبخیز پلاسجان از معیارهای مجموع مربع خطاهای دبی، درصد اختلاف دبی حداکثر لحظه‌ای محاسبه شده با مشاهده شده و درصد اختلاف زمان تا اوج ( $t_p$ ) 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 اشنایدر، SCS و مثلثی نسبت به هیدروگراف واحد طبیعی به ترتیب برابر است با ۰/۱۷، ۰/۱۶ و ۰/۱۲. درصد اختلاف دبی‌های حداکثر لحظه‌ای

$L$  = طول بزرگترین مسیر آب از نقطه خروجی تا مرتفع‌ترین نقطه حوضه (کیلومتر)

$A$  = مساحت حوضه (کیلومتر مربع)

$D$  = قطر دایره معادل سطح حوضه (کیلومتر)

$S$  = شیب متوسط حوضه (درصد)

و معادله SCS عبارت است از (۴):

$$t_1 = \frac{L^{0.8}(S+1)^{0.7}}{1900y^{0.5}} \quad [17]$$

$$t_c = 1/67 t_1 \quad [18]$$

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad [19]$$

که:

$t_1$  = زمان تاخیر (ساعت)

$L$  = طول رودخانه اصلی (فوت)

$y$  = شیب متوسط حوضه (درصد)

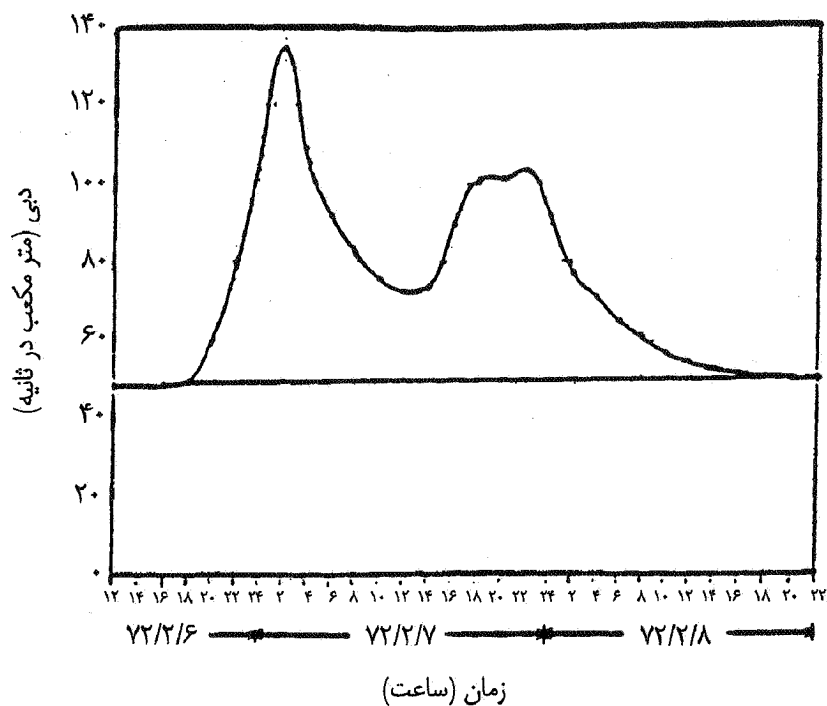
$S$  = ضریب نگهداشت

$CN$  = شماره منحنی

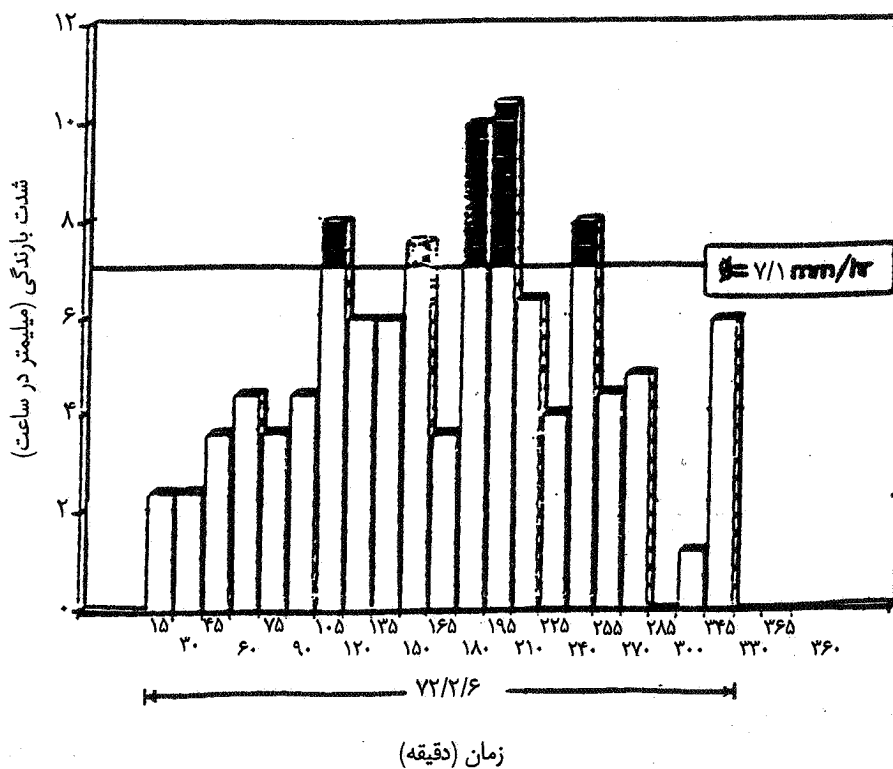
### نتایج و بحث

در شکل‌های ۲ الی ۴ به ترتیب نمونه‌ای از هیدروگراف سیلاب، 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 [۹]، 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

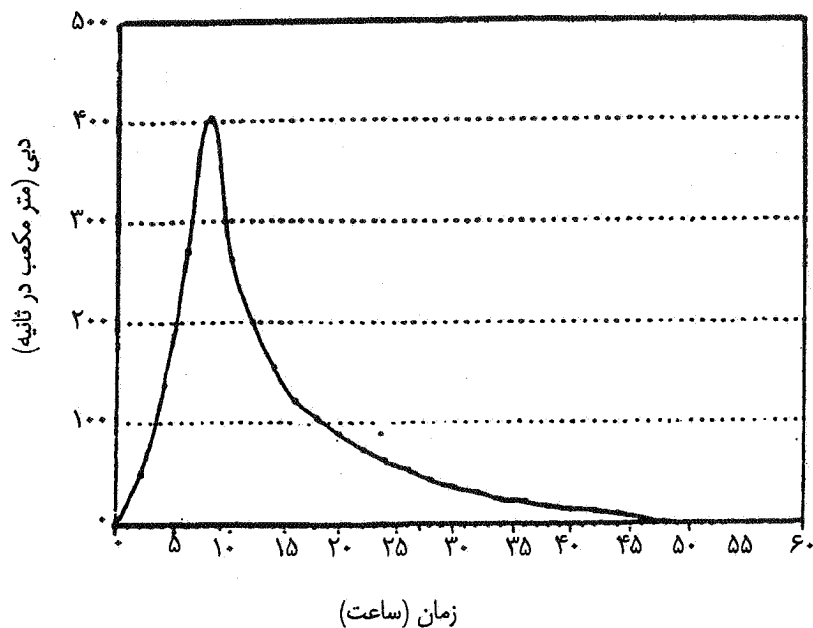


شکل ۲- هیدروگراف سیلاب مشاهده شده در تاریخهای ۶ الی ۸ اردیبهشت ۱۳۷۷ در ایستگاه اسکندری

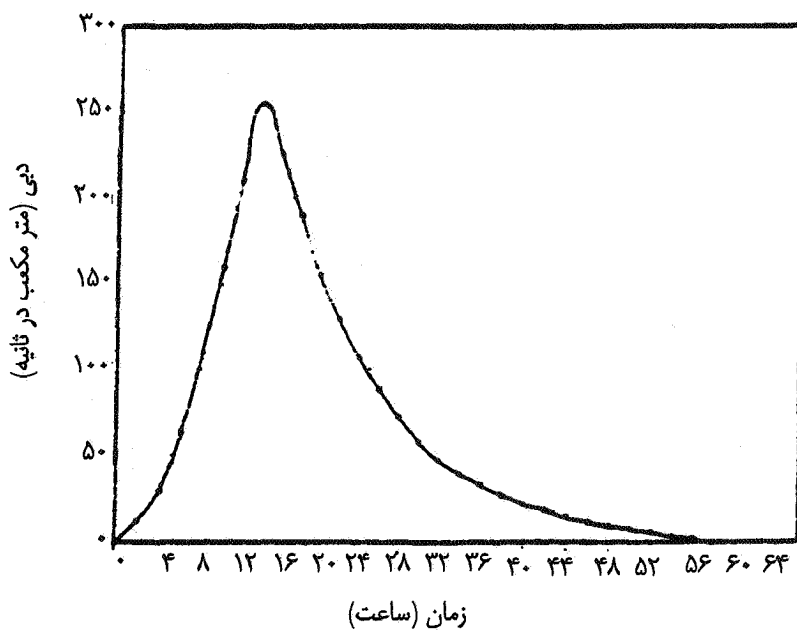


شکل ۳- هیتوگراف بارندگی در ایستگاه بوئین (مورخ ۶ اردیبهشت ۱۳۷۷)





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



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

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  $C_p$  و  $C_t$

| تاریخ وقوع سیلاب   | $t_r$<br>(hr) | $t_l$<br>(hr) | $t_p$<br>(hr) | $Q_p$<br>(m <sup>3</sup> /s) | $t_{LR}$<br>(km <sup>2</sup> ) | $C_t$ | $C_p$ |
|--------------------|---------------|---------------|---------------|------------------------------|--------------------------------|-------|-------|
| ۷۱/۲/۶ و ۷ و ۸     | ۱             | ۱۵/۵          | ۱۶            | ۱۹۴/۵                        | ۱۵/۹۶                          | ۱/۸   | ۰/۷۱  |
| ۷۱/۱۲/۱۷ و ۱۸      | ۱             | ۲۳/۵          | ۲۴            | ۱۷۴/۰                        | ۲۴/۳                           | ۲/۷   | ۰/۹۷  |
| ۷۲/۲/۶ و ۷ و ۸     | ۲/۵           | ۶/۷۵          | ۸             | ۴۰۴/۰                        | ۶/۴                            | ۰/۷۲  | ۰/۵۹  |
| ۷۲/۱۲/۱۵ و ۱۶ و ۱۷ | ۱             | ۲۵/۵          | ۲۶            | ۲۱۷/۰                        | ۲۶/۴                           | ۲/۹   | ۱/۳۲  |
| ۷۳/۸/۲۶ و ۲۷       | ۱             | ۱۱/۵          | 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           | ۱۳/۷۵         | ۱۴            | ۲۴۹/۵                        | ۱۴/۲۶                          | ۱/۶   | ۰/۸۲  |
| مقادیر انتخابی     |               |               |               |                              |                                | ۱/۸   | ۰/۸۵  |

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

و مثلی برای بارش مؤثر ۲ ساعته

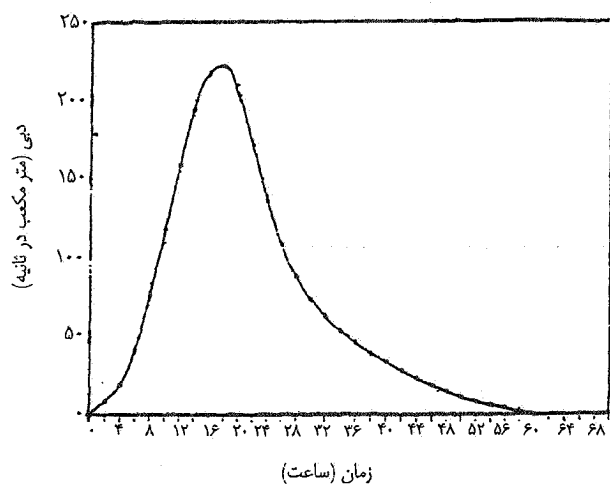
| مساحت<br>حوضه<br>A<br>(km <sup>2</sup> ) | شماره<br>منحنی<br>حوضه<br>CN | زمان<br>تمرکز $t_c$<br>(hr) | زمان<br>تاخیر $t_l$<br>(hr) | مدت<br>بارش<br>مؤثر<br>$\Delta D$<br>(hr) | زمان تا<br>اوج<br>$t_p$<br>(hr) | دبی اوج<br>$Q_p$<br>(m <sup>3</sup> /s) | زمان<br>پایه<br>(SCS)<br>$t_b$<br>(hr) | زمان<br>پایه<br>(مثلی)<br>$t_b$<br>(hr) |
|------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|
| ۱۵۷۸                                     | ۸۵/۶۸                        | ۱۸                          | ۱۰/۸                        | ۲                                         | ۱۱/۸                            | ۲۷۸/۵                                   | ۵۹                                     | ۳۲                                      |

نسبت به روش آشنایدر 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).

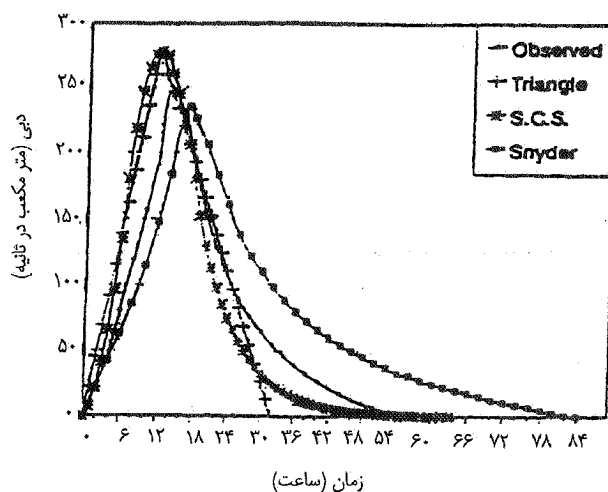
۲ - میانگین مطلق درصد اختلاف حداکثر دبی لحظه‌ای محاسبه شده در روش آشنایدر نسبت به مشاهده شده ۱/۲۲ درصد و در روشهای SCS و مثلی ۱۶/۲۳ درصد می‌باشد. بنابراین روش آشنایدر دارای دبی اوج محاسبه شده نزدیک‌تر به

نکات زیر را روشن می‌سازد:

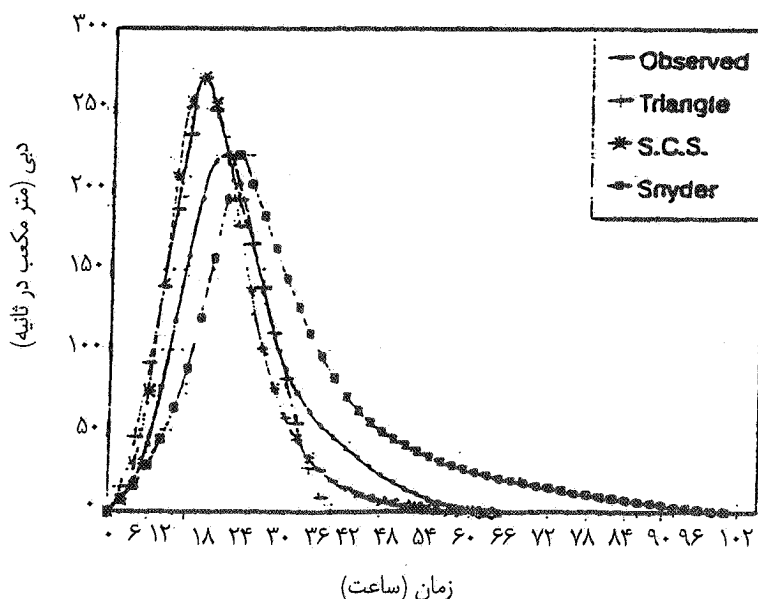
۱ - بیشترین دامنه نوسان اختلاف دبی حداکثر لحظه‌ای نسبت به دبی لحظه‌ای مشاهده شده در روش آشنایدر ۸/۲۱+ تا ۶/۰۷- درصد و در روشهای SCS و مثلی ۲۱/۱۹+ تا ۱۲/۰۲+ درصد می‌باشد. چون برآورد دبی حداکثر لحظه‌ای به روشهای مثلی و SCS عمدتاً از دبی حداکثر لحظه‌ای مشاهده شده بیشتر است، لذا برای اصلاح آن توصیه می‌شود مقدار عدد ثابت فرمول [۱۰] از ۲/۰۸۳ به ۱/۷۴ کاهش یابد. در تحقیقی که در ۹ حوضه آبخیز استانه‌های 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 مثلثی) در مقایسه با هیدروگراف واحد معرف ۲ ساعته (مشاهده‌ای) حوضه پلاسجان



شکل ۸- هیدروگراف‌های واحد مصنوعی ۶ ساعته (اشنايدر، SCS و مثلثی) 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 اشنايدر فقط در مورد بارش یک ساعته کمتر از روشهای مثلثی و SCS می باشد و در بارشهای طولانی تر به ترتیب روش مثلثی و روش

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

جدول ۵ - درصد اختلاف دبی حداکثر لحظه‌ای و مجموع مربع خطاهای ( $SS_x$ ) حاصل از مقایسه هیدروگراف‌های واحد طبیعی حوضه پلاسجان با هیدروگراف‌های واحد مصنوعی

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

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

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

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

۷- در روش اشنایدر، 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 خطاها هستند. بنابراین روشهای مثلثی و SCS نسبت به روش اشنایدر تطابق بهتری در ساخت شکل هیدروگراف واحد و تبعیت از آهنگ تغییرات آن در این حوضه آبخیز دارند.

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

۵- دو روش SCS و مثلثی اختلاف کمی در مجموع مربع خطاها دارند و در بارشهای طویل‌المدت این دو روش تقریباً شرایط یکسانی دارند.

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

#### منابع مورد استفاده

- ۱- باقری، ر. ۱۳۷۱. تعیین دبی ماکزیمم 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 به‌کارگیری هیدروگراف واحد در تعیین سیلابها، مجموعه مقالات اولین کنفرانس هیدرولوژی ایران، مه‌آب قدس، تهران، ص ۲۰۶ تا ۲۲۹.
- ۳- رضایی، ع. ۱۳۷۳. تعیین هیدروگراف‌های واحد سنتتیک 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- نکویی‌مهر، م. ۱۳۷۵. بررسی کاربرد هیدروگراف‌های واحد با زمانهای متفاوت در تجزیه و تحلیل سیلابهای حوضه آبخیز سد زاینده‌رود، پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، ۲۶۶ صفحه.
- ۸- نوربخش، م. ۱۳۷۵. هیدروکلیماتولوژی 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. Obed 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.