بررسی و آزمون تطابق هیدروگراف های واحد مصنوعی و طبیعی در حوضهٔ آبخیز سد زاینده‌رود «زیر حوضهٔ پلاسجان»

سید فرهاد موسوی، محمد نکویی مهر و محمد مهدوی *

چکیده

باتوجه به اهمیت هیدروگراف واحد در پیش‌بینی سیلاب رودخانه‌ها و به دلیل آن‌که 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 این‌رو تحقیقاتی در حوضهٔ آبخیز سد زاینده‌رود (زیر حوضهٔ 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 دراین روشها از ۲/۰۸۳ به ۱/۷۴ 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 طورکلی پس از اصلاح فرمول برآورد حداکثر دبی لحظه‌ای در روشهای SCS و مثلثی، می‌توان گفت که برای ساخت هیدروگراف واحد مصنوعی دراین 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، حوضهٔ آبخیز سد زاینده‌رود*

مقدمه

هیدروگراف واحد[1] عبارت است از هیدروگراف رواناب مستقیم ناشی از یک واحد (یک سانتیمتر یا یک اینچ) بارندگی مازاد[2] که از رگباری با شدت یکنواخت برروی حوضهٔ 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

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1377.2.2.7.3]

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 حوضهٔ آبخیز مستلزم داشتن هیدروگراف سیلاب و هیتوگراف باران همزمان آن برای سطح حوضه می‌باشد (دراین صورت، هیدروگراف واحد حاصله را طبیعی و یا مشاهده‌ای گویند). دو فرضیه مهم در تئوری هیدروگراف واحد وجود دارد : ۱) خطی بودن سیستم[1] و تناسب خروجی‌ها نسبت به ورودی‌های حوضه و ۲) درنظر گرفتن حوضه آبخیز به عنوان یک سیستم پیوسته و گرده‌ای[2] (۹ و ۱۴).

امروزه از هیدروگراف واحد در تخمین سیلهای حوضه های آبخیز و مدل‌سازی روابط بارندگی - رواناب استفاده فراوان می‌شود (۱۲، ۱۷، ۱۸ 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، حداکثر 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 اشتقاق 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 مجاورکه خصوصیاتی مشابه حوضه آبخیز موردنظر دارند، می‌توان از روش هیدروگراف واحد مصنوعی[3] (ساختگی) استفاده کرد (۱). ازجمله، اشنایدر (۲۰) روشی را ارائه می‌نماید که براساس خصوصیات مورفولوژیک حوضه می‌توان ویژگیهای هیدروگراف واحد مصنوعی را تعیین نمود. 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 دراین تحقیق سه پارامتر مهم هیدروگراف واحد را ارائه نمودکه عبارتند از : زمان تأخیر تا نقطهٔ حداکثر دبی، دبی حداکثر (لحظه‌ای) و زمان پایه.

تحقیق جداگانه‌ای توسط ادارهٔ 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 می‌کند :

- پارامتر بدون بُعد حاصل تقسیم زمان درهر لحظه به زمان تا اوج هیدروگراف
- پارامتر بدون بُعد حاصل تقسیم دبی در هر لحظه به دبی حداکثر 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 حوضهٔ آبخیز سد زاینده رود (زیر حوضهٔ پلاسجان) ، روشهای ساخت هیدروگراف واحد مصنوعی مورد آزمون و مقایسه قرارگرفت تا دقت 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 روشها

حوضهٔ آبخیز سد زاینده‌رود با مساحتی حدود ۴۳۰۰

1 - Basin linearity 2 - Lumped system 3 - Synthetic unit hydrograph

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1377.2.2.7.3]

جدول ۱ - مشخصات فیزیوگرافیک حوضهٔ آبخیز پلاسجان (۷)

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
مساحت(کیلومترمربع)	۱۵۷۸	ارتفاع میانه (متر)	۲۵۲۳
محیط (کیلومتر)	۱۷۶/۲	ارتفاع حداکثر (متر)	۳۸۹۰
ضریب گراولیوس	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

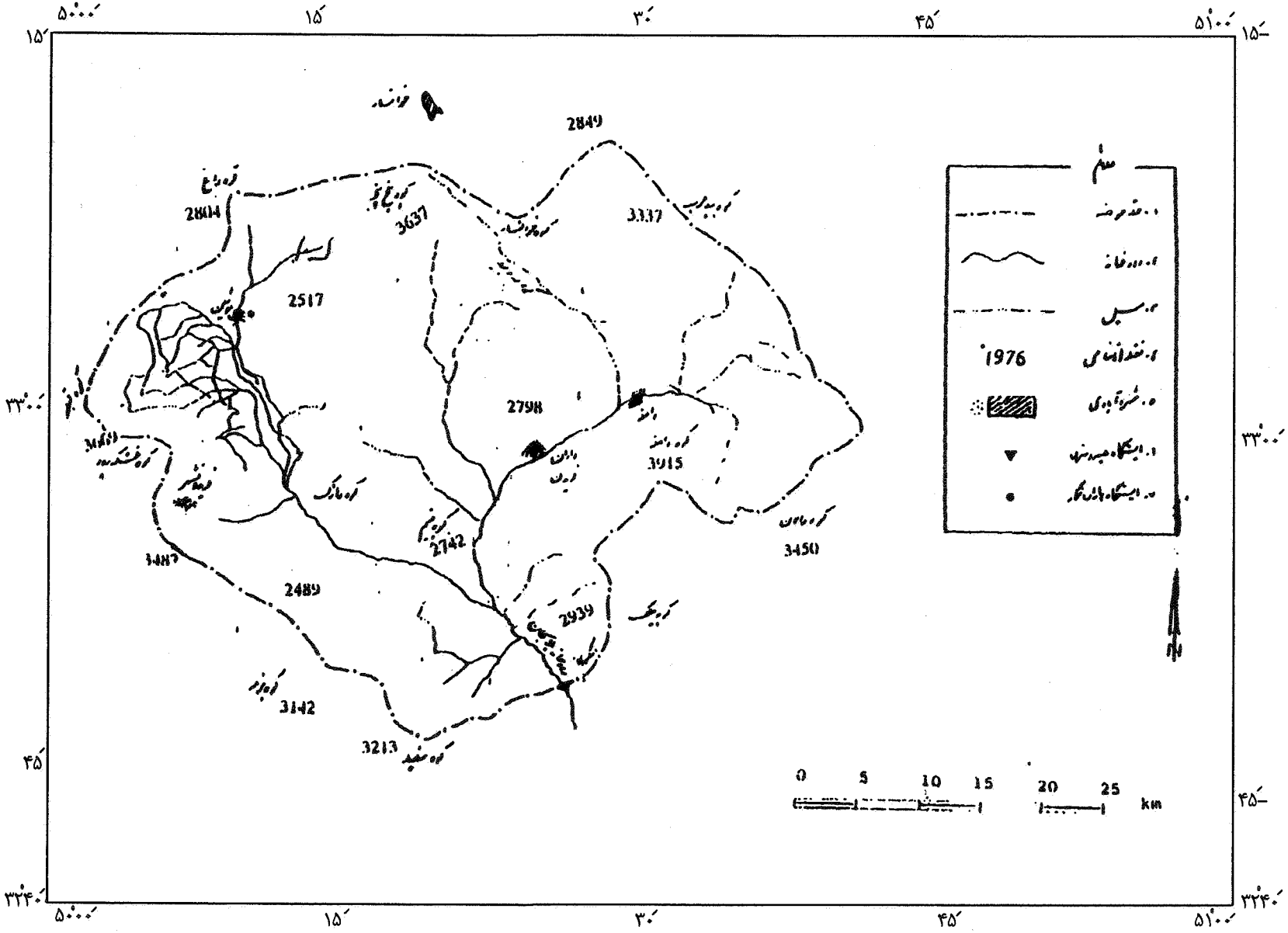
کیلومتر مربع بین طولهای جغرافیایی ′۵۴ °۴۹ و ′۴۵ °۵۰ شرقی و عرضهای جغرافیایی ′۱۸ °۳۲ و ′۱۲ °۳۳ شمالی قرار گرفته و از شمال به حوضهٔ آبخیز رودخانه گلپایگان، از جنوب به حوضه آبخیز رودخانه کارون، از شرق به حوضهٔ آبخیز رودخانه مرغاب و از غرب به حوضهٔ آبخیز رودخانه دز محدود می‌شود. حوضهٔ آبخیز سد زاینده‌رود شامل زیر حوضه‌های اصلی زاینده‌رود و پلاسجان می‌باشد. حوضهٔ آبخیز پلاسجان براساس نقشه‌های ۲۵۰۰۰۰ : ۱ در شکل ۱ ترسیم گردیده است (۸). این حوضه بین طولهای ′۲ °۵۰ و ′۴۱ °۵۰ شرقی و عرضهای ′۴۶ °۳۲ و ′۱۲ °۳۳ 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 برروی 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 است و از کوههای ذکر شده دراین قسمت تغذیه می‌گردد. شاخهٔ 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 دریاچهٔ سد زاینده‌رود منتهی می‌گردد. اقلیم منطقه براساس روش دومارتن از تیپ نیمه‌خشک تا بسیار مرطوب وبر اساس روش گوسن استپی سرد است. در جدول ۱ بعضی از خصوصیات فیزیوگرافیک حوضهٔ 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

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1377.2.2.7.3]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1377.2.2.7.3] [Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-08]



شکل ۱- حوضهٔ 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

هیدروگراف‌های کامل و نمونهٔ 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 موثر) تقسیم شود هیدروگراف واحد به دست می‌آید (۴، ۹ و ۱۱). از روی هیتوگراف بارندگی و با استفاده از شاخص نفوذ ϕ، 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 (مشاهده‌ای) حوضه برای زمانهای متفاوت تعیین گردید.

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

$$t_l = ۰/۷۵\ C_t\ (LL_c)^{۰/۳} \qquad [۱]$$

$$t_r = \frac{t_l}{۵/۵۰} \qquad [۲]$$

$$t_{lR} = t_l + \frac{t_R - t_r}{۴} \qquad [۳]$$

$$Q_p = ۲/۷۵\ \frac{C_p\ A}{t_{lR}} \qquad [۴]$$

$$t_b = ۵\ (t_{lR} + \frac{t_R}{۲}) \qquad [۵]$$

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1377.2.2.7.3]

$$t_p = t_{lR} + \frac{t_R}{۲} = \frac{۵/۵۶\ A}{Q_{PR}} \quad [۶]$$

$$Q_{PR} = \frac{t_l\ Q_p}{t_{lR}} \quad [۷]$$

$$W_{۵۰} = ۲/۱۴\ q_p^{-۱/۰۸} \quad [۸]$$

$$W_{۷۵} = ۱/۲۲\ q_p^{-۱/۰۸} \quad [۹]$$

که :

t_l = زمان تأخیر (ساعت)

C_t = ضریب ثابت مربوط به حوضه

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

L_c = طول آبراهه از نقطه خروجی حوضه تا نقطه‌ای در مقابل مرکز ثقل حوضه (کیلومتر)

t_r = مدت بارندگی (ساعت)

t_{lR} = 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)

$W_{۵۰}$, $W_{۷۵}$ = 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 می‌آید (۴ و ۹). روابط موجود در هیدروگراف واحد بدون بُعد، که می‌تواند برای سادگی امر به صورت مثلثی نیز درنظر گرفته شود، به قرار زیر می‌باشد :

$$q_p = \frac{۲/۰۸۳\ AQ}{t_p} \quad [۱۰]$$

$$t_p = \frac{\Delta D}{۲} + t_l \quad [۱۱]$$

$$t_l \cong ۰/۶\ t_c \quad [۱۲]$$

$$\Delta D = ۰/۲\ t_p \quad \text{و یا} \quad \Delta D = ۰/۱۳۳\ t_c \quad [۱۳]$$

$$t_b = ۵\ t_p \quad \text{(در هیدروگراف واحد بدون بُعد SCS)} \quad [۱۴]$$

$$t_b = ۲/۷۶\ t_p \quad \text{(در هیدروگراف واحد مثلثی)} \quad [۱۵]$$

که :

q_p = دبی حداکثر لحظه‌ای (مترمکعب بر ثانیه)

t_p = زمان رسیدن به دبی اوج (ساعت)

A = مساحت حوضه (کیلومترمربع)

Q = ارتفاع رواناب (سانتیمتر)

t_l = زمان تأخیر (ساعت)

t_c = زمان تمرکز (ساعت)

t_b = زمان پایه هیدروگراف واحد (ساعت)

ΔD = زمان مؤثر بارش (ساعت)

برای حل معادلات مربوط به هیدروگراف واحد بدون بُعد، داشتن زمان تمرکز حوضه (t_c) لازم است. دراین تحقیق، زمان تمرکز از روشهای SCS و برانزبی - ویلیامز محاسبه شده و با زمان تمرکز به دست آمده از هیدروگراف‌های مشاهده شده مورد مقایسه قرار گرفته است تا مناسب‌ترین مقدار انتخاب گردد. معادله برانزبی - ویلیامز عبارت است از (۱۴):

$$t_c = \frac{L}{۱/۵D}\ \left(\frac{A^۲}{S}\right)^{۰/۲} \quad [۱۶]$$

که :

t_c = زمان تمرکز (ساعت)

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1377.2.2.7.3]

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

A = مساحت حوضه (کیلومتر مربع)

D = قطره دایره معادل سطح حوضه (کیلومتر)

S = شیب متوسط حوضه (درصد)

و معادله SCS عبارت است از (۴):

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

$$t_c = 1.67 t_l \qquad [18]$$

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

که :

t_l = 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 حوضهٔ پلاسجان در شکلهای ۵ و ۶ آمده است.

برای حل معادلات [۱] تا [۹]، ابتدا باید به واسنجی ضرایب C_t و C_p پرداخت. محاسبه پارامترهای مورد نیاز برای واسنجی این ضرایب، باتوجه به هیدروگراف‌های واحد مشاهده شده و خصوصیات فیزیوگرافیک حوضه، به طور خلاصه در جدول ۳ آورده شده است. براساس جدول ۳، مقادیر میانگین ضرایب حوضه‌ای عبارتند از : C_t = ۱/۸ و C_p = ۰/۸۵.

نظربه این که پارامترهای A، L و L_c مشخص و ثابت هستند (به ترتیب ۱۵۷۸ کیلومترمربع، 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 برانزبی - 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 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 باتوجه 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.

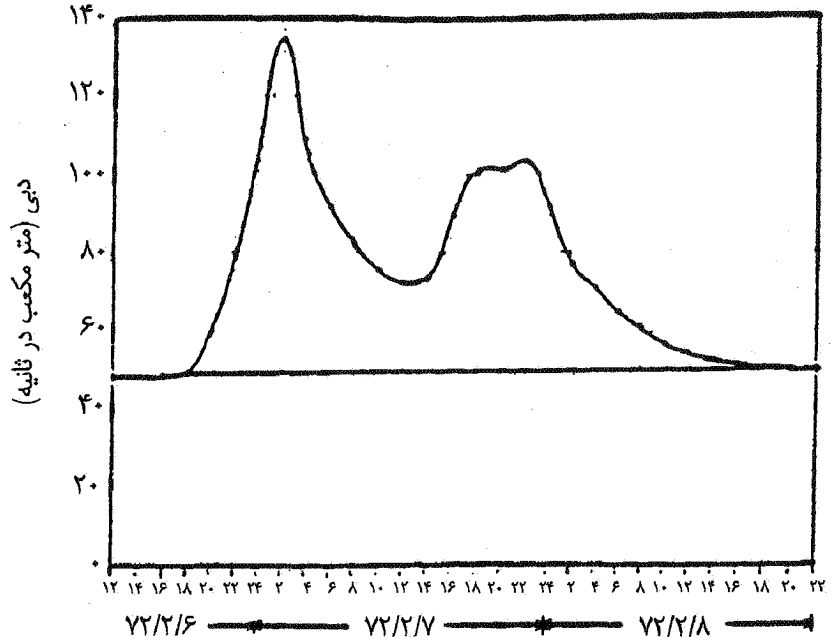
برای آزمون و بررسی تطابق بهینه هیدروگراف‌های واحد مصنوعی (اشنایدر، SCS و مثلثی) با هیدروگراف واحد معرف (طبیعی) حوضهٔ آبخیز پلاسجان از معیارهای مجموع مربع خطاهای دبی، درصد اختلاف دبی حداکثر لحظه‌ای محاسبه شده با مشاهده شده و درصد اختلاف زمان تا اوج (t_p) محاسبه شده با مشاهده شده استفاده گردید. اصولاً در برنامه ریزی خطی، تابع هدف تعیین هیدروگراف واحد بهینه عبارت است از به حداقل رسانیدن مجموع تفاوتهای مطلق[1] و به حداقل رسانیدن بیشترین تفاوت مطلق[2] (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 ۰/۰۱۷، ۰/۰۱۶ و ۰/۰۱۲. درصد اختلاف دبی‌های حداکثر لحظه‌ای

1 - Sum of absolute deviations

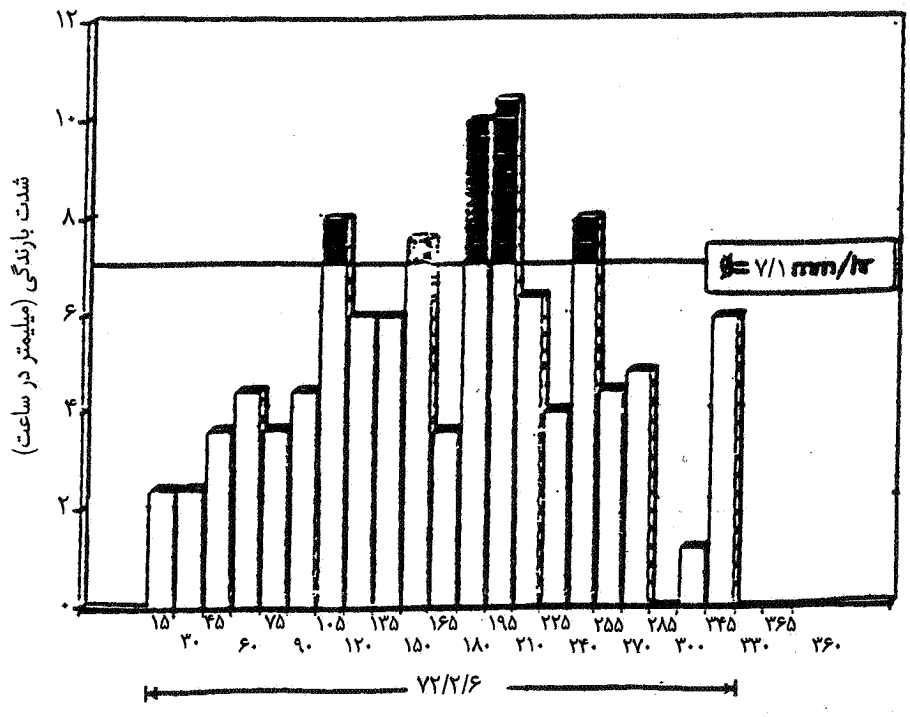
2 - Largest absolute deviation

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1377.2.2.7.3]



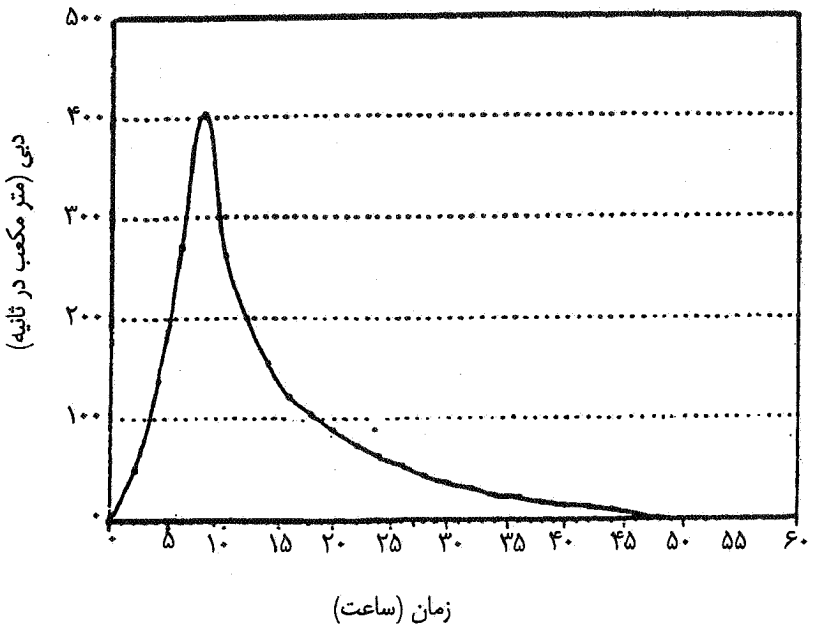
شکل ۲- هیدروگراف سیلاب مشاهده شده در تاریخهای ۶ الی ۸ اردیبهشت ۱۳۷۲ در ایستگاه اسکندری



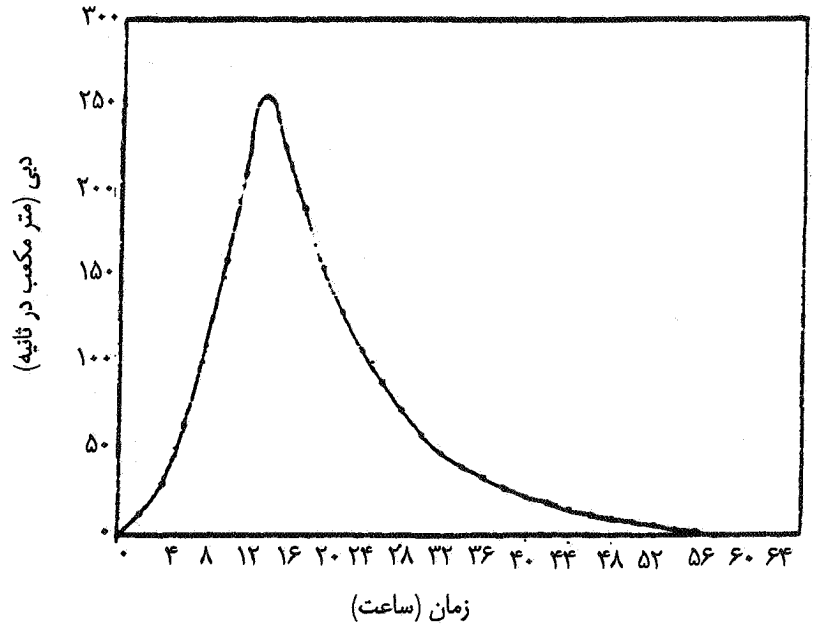
شکل ۳- هیتوگراف بارندگی در ایستگاه بوئین (مورخ ۶ اردیبهشت ۱۳۷۲)

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1377.2.2.7.3]



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



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

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 شده‌است.

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

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1377.2.2.7.3]

جدول ۳ - محاسبه ضرایب C_t و C_p

C_P	C_t	t_{LR} (km^2)	Q_P (m^3/s)	t_P (hr)	t_l (hr)	t_r (hr)	تاریخ وقوع سیلاب
۰/۷۱	۱/۸	۱۵/۹۶	۱۹۴/۵	۱۶	۱۵/۵	۱	۸و ۷و ۷۱/۲/۶
۰/۹۷	۲/۷	۲۴/۳	۱۷۴/۰	۲۴	۲۳/۵	۱	۱۸و۱۷/۱۲/۷۱
۰/۵۹	۰/۷۲	۶/۴	۴۰۴/۰	۸	۶/۷۵	۲/۵	۸و۷ و ۷۲/۲/۶
۱/۳۲	۲/۹	۲۶/۴	۲۱۷/۰	۲۶	۲۵/۵	۱	۱۷و ۱۶ و ۷۲/۱۲/۱۵
۰/۴۳	۱/۳۳	۱۱/۷۸	۱۵۹/۰	۱۲	۱۱/۵	۱	۲۷ و ۷۳/۸/۲۶
۰/۵۴	۰/۸۸	۷/۸۵	۲۹۹/۵	۹	۸/۰	۲	۳و ۷۳/۹/۲
۱/۱۰	۲/۱۹	۱۹/۳۷	۲۴۷/۶	۲۰	۱۹/۰	۲	۵ و ۷۳/۹/۴
۰/۸۲	۱/۶	۱۴/۲۶	۲۴۹/۵	۱۴	۱۳/۷۵	۰/۵	۱۱و ۱۰و ۷۳/۹/۹
۰/۸۵	۱/۸	مقادیر انتخابی					

جدول ۴ - مشخصات لازم برای تهیهٔ هیدروگراف واحد مصنوعی در روشهای SCS و مثلثی برای بارش مؤثر ۲ ساعته

زمان پایه (مثلثی) t_b (hr)	زمان پایه (SCS) t_b (hr)	دبی اوج Q_p (m^3/s)	زمان تا اوج t_p (hr)	مدت بارش مؤثر ΔD (hr)	زمان تاخیر t_l (hr)	زمان تمرکز t_c (hr)	شماره منحنی حوضه CN	مساحت حوضه A (km^2)
۳۲	۵۹	۲۷۸/۵	۱۱/۸	۲	۱۰/۸	۱۸	۸۵/۶۸	۱۵۷۸

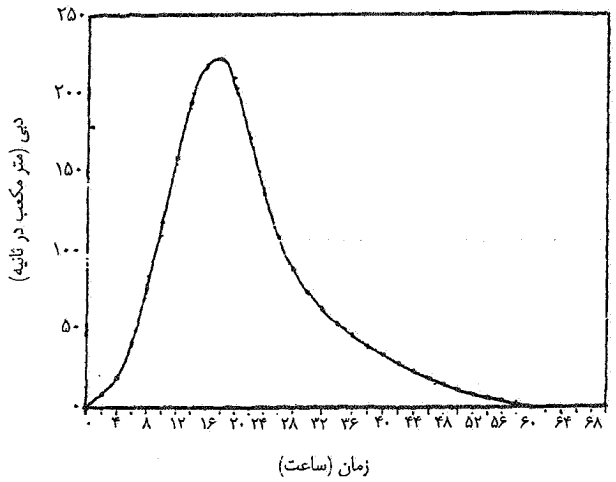
نکات زیر را روشن می‌سازد :

۱ - 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 مثلثی ۲۱/۱۹ + تا ۱۲/۰۲ + درصد می‌باشد . چون برآورد دبی حداکثر لحظه‌ای به روشهای مثلثی 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 حوضهٔ آبخیز استانهای زنجان، گیلان، مازندران و تهران توسط رضایی (۳) انجام گرفته روش SCS تطابق خوبی را 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 حوضه ها باعث تغییر تطابق روشهای ساخت هیدروگراف واحد مصنوعی می‌شود (۱۰ و ۱۶).

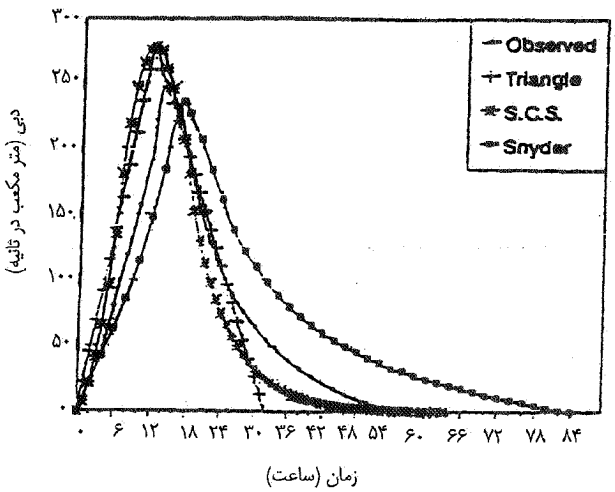
۲ - میانگین مطلق درصد اختلاف حداکثر دبی لحظه‌ای محاسبه شده در روش اشنایدر نسبت به مشاهده شده ۱/۲۲ درصد و در روشهای SCS و مثلثی ۱۶/۲۳ درصد می‌باشد. بنابراین روش اشنایدر دارای دبی اوج محاسبه شده نزدیک‌تر به

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-08]

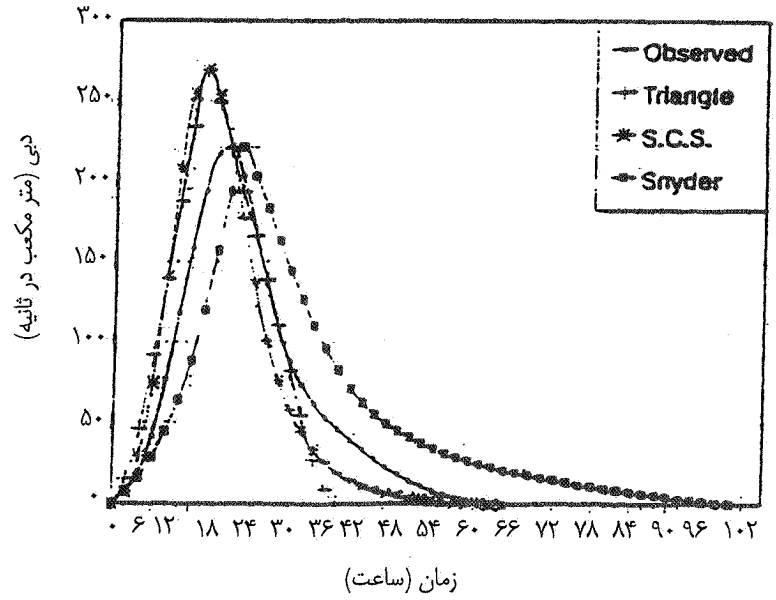
[DOR: 20.1001.1.22518517.1377.2.2.7.3]



شکل ۶- هیدروگراف واحد معرف ۶ ساعته حوضهٔ پلاسجان



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



شکل ۸- هیدروگراف های واحد مصنوعی ۶ ساعته (اشنایدر، SCS و مثلثی) در مقایسه با هیدروگراف واحد معرف ۶ ساعته (مشاهده‌ای) حوضه پلاسجان

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

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1377.2.2.7.3]

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

مدت بارش مؤثر	روش اشنایدر		روش SCS		روش مثلثی	
	درصد اختلاف دبی حداکثر	$\sum SS_x$	درصد اختلاف دبی حداکثر	$\sum SS_x$	درصد اختلاف 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 حوضهٔ پلاسجان

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

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1377.2.2.7.3]

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 دراین حوضهٔ 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 طویل المدت 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 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 SCSو 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 SCSو 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.

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 به کارگیری هیدروگراف واحد در تعیین سیلابها، مجموعه مقالات اولین کنفرانس هیدرولوژی ایران، مهاب قدس، تهران، ص ۲۰۶ تا ۲۲۹.

۳ - رضایی، ع. ۱۳۷۳. تعیین هیدروگراف‌های واحد سنتتیک و طبیعی در تعدادی از حوضه های 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 .

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1377.2.2.7.3]

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 hydrograh 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 .

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1377.2.2.7.3]