

واژه‌های کلیدی: آنالیز حساسیت، روش لسی، GIS, SPSS.

## مقدمه

هرگاه شدت بارندگی از ظرفیت نفوذ خاک بیشتر باشد، بخشی از بارندگی در سطح حوزه در امتداد شیب جاری می‌شود و توسط رودها از حوزه‌ها خارج می‌شود، به این بخش از بارندگی که مقدار آن در رودخانه‌ها قابل اندازه‌گیری است، رواناب سطحی گویند [۱]. یکی از نیازهای اساسی در طراحی پروژه‌های آبی و خاکی، برآورد مقدار رواناب ناشی از بارندگی است که برای این منظور می‌توان از روش‌های مختلف استفاده نمود (مانند روش‌های تورک، کوتاین، خوزلا و...). بارش را می‌توان مهمترین عاملی دانست که به‌طور مستقیم در چرخه هیدرولوژی دخالت دارد. تعیین رواناب حاصل از بارش یکی از موارد بسیار مهم در تحلیل مسائل هیدرولوژی و مدیریت منابع آب می‌باشد. ارتباط بارش و رواناب یک ارتباط کاملاً پیچیده و غیر خطی است که به عوامل متعددی وابسته می‌باشد. پیش‌بینی و تعیین میزان کمی رواناب تولید شده و انتقال یافته به نقطه خروجی حوزه آبخیز از اهمیت خاصی برخوردار است [۷، ۹ و ۱۹]. برای کنترل و هدایت رواناب و تخلیه جریان‌های سطحی و انتقال آنها به محل مناسب و خارج از منطقه، مدل‌های متفاوتی توسط محققین سازمان‌های مطالعاتی-تحقیقاتی در کشورهای مختلف جهان ارائه و مورد استفاده قرار گرفته است [۱۲ و ۱۷]. اهمیت رواناب و سیلاب‌های سطحی در مناطق خشک از نظر تأمین آب فوق‌العاده زیاد است. سیلاب‌های نواحی خشک و نیمه‌خشک معمولاً کوتاه مدت بوده، جریان‌های پایه نیز بسیار ناچیز یا اصلاً وجود ندارد، زیرا رودخانه‌ها عمدتاً از نوع سیلابی و موقتی می‌باشند. استفاده از مدل‌های تجربی به منظور برآورد رواناب سالانه در حوزه‌هایی که فاقد ایستگاه‌های آب‌سنجی می‌باشد از دیر باز در مطالعات هیدرولوژی مورد توصیه قرار گرفته است و هر مدل تجربی برای یک حوزه خاص به‌دست می‌آید [۲]. همچنین لازم است که صحت و کارایی یک مدل قبل از استفاده در حوزه‌های دیگر مورد بررسی و آزمون قرار گیرد. در مناطق خشک، چرخه آب در غیاب مدیریت پوشش گیاهی، خاک و آب شکل گرفته و شتابی فزاینده می‌گیرد [۱۸]. بررسی‌های اخیر نشان می‌دهد که فرسایش خاک و رواناب به‌ترتیب تابع شدت و مقدار بارش، پوشش زمین و پوشش گیاهی بوده و تأثیرپذیری فرسایش خاک بیش از رواناب است [۱۶].

داوری راد [۴] در بررسی کارایی روابط تجربی تورک، کوتاین،

 ارزیابی روابط برآورد ارتفاع رواناب با استفاده از  
 آزمون‌های آماری  
 (مطالعه موردی: حوزه آبخیز بنادک سادات، یزد)

 معصومه بحر<sup>۱\*</sup>، خه بات خسروی<sup>۲</sup> و عطا صفری<sup>۲</sup>  
 تاریخ دریافت: ۹۳/۶/۲۹ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۰/۱۶

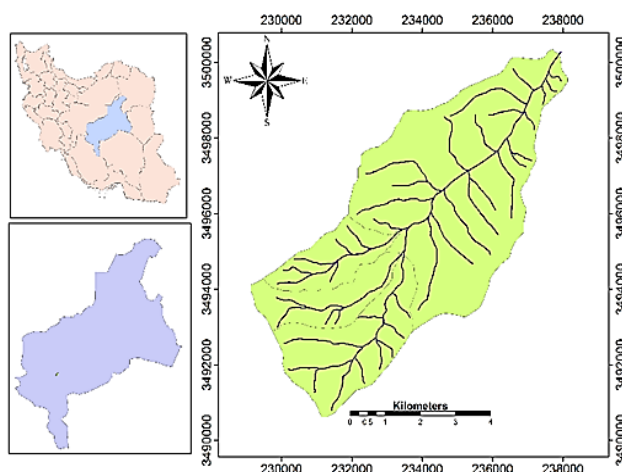
## چکیده

برآورد رواناب حاصل از بارش‌های جوی، پایه و مبنای مطالعات بسیاری از طرح‌های مختلف توسعه و بهره‌برداری از منابع آب را تشکیل می‌دهد. بنابراین اندازه‌گیری و محاسبه آن به دلیل تنگناهای محیطی، همواره دارای مشکلات فراوانی می‌باشد. در نتیجه با توجه به اهمیت برآورد رواناب خروجی و حجم سیل در حوزه‌های آبخیز جهت پیشبرد مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز کشور در این مطالعه سعی شده است ۹ روش تجربی برآورد رواناب در حوزه آبخیز بنادک سادات اجرا گردد. نتایج حاصل با مقدار رواناب اندازه‌گیری شده در ایستگاه هیدرومتری واقع در خروجی حوزه با استفاده از آزمون‌های t جفتی MD، BIAS، RE و RMSE مورد ارزیابی قرار گرفت و مناسب‌ترین مدل با بیشترین دقت و کارایی برای برآورد ارتفاع رواناب در حوزه آبخیز مورد مطالعه انتخاب گردید. پس از تهیه نقشه‌های لازم در محیط GIS و انجام آزمون‌های آماری در محیط SPSS نتایج حاصل نشان داد روش لسی با مقادیر MD، BIAS، RE و RMSE به‌ترتیب ۰/۰۱۶، ۰/۰۰۷، ۴/۳۶ و ۰/۰۲۶ و همچنین عدم اختلاف معنی‌دار با مقدار مشاهده‌ای در سطح اطمینان ۹۵ درصد، با ارتفاع رواناب معادل ۱/۵۳ سانتی‌متر، حجم رواناب برابر با ۲/۲۹ میلیون متر مکعب و ضریب رواناب ۱۸/۷۹ درصد مناسب‌ترین روش تجربی برآورد رواناب در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. در نهایت، آنالیز حساسیت برای مدل لسی، جهت تعیین تأثیرگذارترین بازه‌ها به کار گرفته شد که طبق نتایج حاصل، پارامتر F/Z در بازه‌های ۶ تا ۸، ۸ تا ۱۰ و ۱۸ تا ۲۰ بیشترین تأثیر را در خروجی مدل دارد.

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشگاه یزد

\* نویسنده مسئول: bahri.masoumeh@yahoo.com

۲- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز بنادک سادات

و باغی تشکیل می‌دهد. از نظر توپوگرافی، بخش بالادست حوزه شامل ارتفاعات کاملاً سنگی و صخره‌ای با شیب زیاد و انشعاب آبراه‌های کم بوده که از جنس آهک و گرانیت است و تقریباً فاقد خاک می‌باشد. موقعیت حوزه مورد مطالعه در استان و ایران در شکل ۱ نشان داده شده است.

### روش تحقیق

ارتفاع رواناب مناطق خشک، در زمان بارندگی، حاصل تفریق مقدار بارش و تبخیر و آب نفوذی است، که برای برآورد آن باید ابتدا متوسط بارندگی سطح حوزه را محاسبه کرد. ارقام ثبت شده در هر ایستگاه هواشناسی، منحصراً مقدار بارندگی نقطه‌ای همان ایستگاه را نشان می‌دهد. برای تعیین مقدار بارندگی سطح حوزه، باید از بارندگی ثبت شده در ایستگاه‌های مستقر در داخل و خارج از محدوده، میانگین گرفت که یکی از روش‌های میانگین‌گیری، روش چند وجهی تیسن است [۱۳].

### بررسی مدل‌های تجربی در برآورد رواناب سالانه

مدل‌های تجربی شامل روابط و معادلاتی می‌باشند که با استفاده از تجزیه و تحلیل آمار و اطلاعات محدود و خصوصیات یک منطقه تعیین گردیده و جهت تخمین پارامترهای احتمالاتی خاص مورد استفاده قرار می‌گیرد. اغلب این روش‌ها برای منطقه یا حوزه آبخیز خاصی کاربرد داشته و لذا نمی‌توان از آنها در سایر نقاط بهره گرفت. ولی برخی از این روش‌ها دامنه وسیع‌تری داشته و می‌توان با اعمال اصلاحات یا انتخاب ضرایب مناسب، در سایر مناطق مشابه به کار گرفت. تا کنون مدل‌های تجربی متعددی جهت برآورد رواناب سطحی (جریان مازاد) ابداع گردیده است. این روش‌ها به ۴ گروه تقسیم‌بندی می‌شوند:

۱. ضریب رواناب سطحی
۲. روابط بین بارندگی و رواناب

ایکار، جاستین، خوزلا و لیزی در حوزه آبخیز دریاچه نمک عنوان نموده که روش‌های ایکار، کوتاین، جاستین و تورک به ترتیب از صحت و دقت بیشتری نسبت به روش‌های دیگر برخوردار هستند و روش خوزلا مناسب نبوده است. زارع و همکاران [۲۱] ضمن بر شمردن فرمول‌های خوزلا، کوتاین، تورک و لانگین اظهار داشته‌اند که این متدها با روش‌های ثابت جهانی، در پاره‌ای از اوقات دارای خطا می‌باشند. همچنین، بررسی و اندازه‌گیری مقدار رواناب و دبی جریان در حوزه‌های آبخیز حائز اهمیت بوده، لذا برای حوزه‌های فاقد ایستگاه اندازه‌گیری، استفاده از روابط تجربی برآورد رواناب را ملزم می‌نماید.

هدف از این تحقیق بکارگیری روش‌های مختلف تجربی برآورد رواناب در حوزه آبخیز بنادک سادات و ارزیابی آنها با توجه به مقادیر مشاهده‌ای و با استفاده از آزمون‌های آماری می‌باشد. همچنین هدف دیگر پس از تعیین روش مناسب، انجام آنالیز حساسیت بر روی مدل انتخاب شده و تعیین تأثیر گذارترین پارامتر در مدل می‌باشد تا به منظور افزایش دقت محاسبه رواناب در حوزه آبخیز مذکور، به هنگام اندازه‌گیری مؤثرترین پارامتر، دقت بیشتری را به کار بست و نتایج مطلوب‌تری حاصل گردد.

### مواد و روش‌ها

#### منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه به مساحت ۳۹/۳۲ کیلومتر مربع در جنوب غربی شهرستان مهریز در استان یزد واقع گردیده است. از لحاظ جغرافیایی محدوده حوزه بین عرض‌های جغرافیایی  $31^{\circ} 31' 8''$  تا  $31^{\circ} 31' 30''$  شمالی و طول‌های جغرافیایی  $54^{\circ} 10' 8''$  تا  $54^{\circ} 14' 7''$  شرقی واقع شده است. محیط محدوده مورد مطالعه ۲۹/۴۵ کیلومتر، بیشترین ارتفاع منطقه ۳۹۶۰ متر و کمترین ارتفاع معادل ۱۸۸۰ متر از سطح دریا می‌باشد. در داخل محدوده مطالعاتی سه روستا وجود دارد و قسمت اعظم دامنه‌های حوزه را اراضی مرتعی

۳. روش‌های مربوط به کمبود جریان سطحی

۴. روش‌های مربوط به استفاده از مشخصات فیزیوگرافی

که ضریب رواناب سطحی و روابط بین بارندگی و رواناب جنبه محلی داشته و فقط با شرایط خاص فیزیکی و آب و هوایی همان حوزه‌ها قابل کاربرد می‌باشد. روش‌های مربوط به کمبود جریان سطحی و روش‌های مربوط به استفاده از مشخصات فیزیوگرافی با در نظر گرفتن عوامل فیزیکی و اقلیمی نتایج قابل قبول‌تری ارائه می‌دهد.

### ۱) ضریب رواناب سطحی

ساده‌ترین روش برای برآورد میزان رواناب سطحی، استفاده از ضرایب سطحی می‌باشد. به عبارت دیگر، در این روش برآورد رواناب سطحی به صورت درصدی از بارندگی با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر بر رواناب است. مهمترین ضرایب ارائه شده در این روش توسط استرنج، بارلو، بینی و رودیر در مناطق مختلف ارائه شده است که در این روش ضرایب بارلو برای مناطق گرمسیر توصیه شده است [۳].

### ۲) روابط بین بارندگی و رواناب سطحی

تعدادی از دانشمندان علم هیدرولوژی نتایج به دست آمده از تحقیقات خود را با در نظر گرفتن اینکه خصوصیات فیزیکی حوزه آبخیز نسبتاً ثابت می‌باشد، به صورت رابطه بین بارندگی و رواناب سطحی سالانه ارائه نموده‌اند. در این زمینه روابط بی‌شماری وجود دارد، از جمله روابط انگلی-دی سوزا، دهیر-اهیوجا-ماجومدار، دپارتمان آبیاری هندوستان، انستیتو تحقیقات آبیاری هندوستان، پاکر و غیره.

### ۱-۲) رابطه انگلی-دی سوزا

این دو دانشمند روابط زیر را به عنوان نتایج مطالعاتشان در دشت‌ها و کوهستان‌های منطقه ماهاراشترا واقع در کشور هندوستان ارائه نمودند [۱۴]:

برای مناطق کوهستانی:

$$R = 0.85 \times P - 30.5 \quad \text{رابطه ۱-}$$

برای مناطق دشتی:

$$R = \frac{(P - 17.8) \times P}{254} \quad \text{رابطه ۲-}$$

P: بارندگی سالانه بر حسب سانتی‌متر، R: رواناب سالانه بر حسب سانتی‌متر.

### ۲-۲) رابطه دپارتمان آبیاری هندوستان

مدیریت طرح ریچاند از دپارتمان آبیاری هندوستان رابطه زیر را بین میزان بارندگی و رواناب سالانه رودخانه ریچاند ارائه نمود [۱۵]:

$$R = P - 1.17 \times P^{0.86} \quad \text{رابطه ۳-}$$

P: بارندگی سالانه بر حسب سانتی‌متر، R: رواناب سالانه بر حسب سانتی‌متر.

### ۳) روابط مربوط به کمبود جریان سطحی سالانه

در این روابط فرض می‌شود مقدار رواناب سطحی که از نقطه تمرکز یک حوزه آبخیز خارج می‌شود، معادل تفاضل بین بارندگی و کمبود جریان سطحی سالانه (تلفات آب) می‌باشد. به طور کلی کمبود جریان سالانه شامل تبخیر فیزیکی و فیزیولوژیکی بوده که خود تحت تأثیر عواملی نظیر درجه حرارت، توپوگرافی، زمین‌شناسی و بالاخره پوشش گیاهی می‌باشد. مهمترین روش‌ها در این زمینه شامل روش‌های تورک، کوتاین و خوزلا می‌باشند.

### ۱-۳) رابطه تورک

آقای تورک بر اساس نتایج به دست آمده از مطالعات بر روی ۲۵۴ حوزه آبخیز در شرایط آب و هوایی مختلف رابطه زیر را برای حوزه‌هایی با مساحت کمتر از ۳۰۰ کیلومتر مربع ارائه داد [۱۱]:

$$D = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \left(\frac{P}{LT}\right)^2}} \quad \text{رابطه ۴-}$$

$$LT = 300 + 25T + 0.05T^3 \quad \text{رابطه ۵-}$$

$$R = P - D \quad \text{رابطه ۶-}$$

P: بارندگی سالانه بر حسب سانتی‌متر، T: درجه حرارت متوسط بر حسب سانتی‌گراد، R: رواناب سالانه بر حسب سانتی‌متر، D: کمبود جریان سالانه.

### ۲-۳) رابطه کوتاین

کوتاین نیز همانند تورک پس از مطالعات فراوان بر روی حوزه‌های آبخیز مختلف رابطه عمومی زیر را ارائه نمود [۱۱]:

$$D = P - \lambda \times P^2 \quad \text{رابطه ۷-}$$

$$\lambda = \frac{1}{0.8 + 0.14 \times T} \quad \text{رابطه ۸-}$$

$$R = P - D \quad \text{رابطه ۹-}$$

P: بارندگی سالانه بر حسب متر، T: درجه حرارت متوسط بر حسب سانتی‌گراد، R: رواناب سالانه بر حسب متر، D: کمبود جریان سالانه. شرط استفاده از روش کوتاین آن است که مقدار P بر حسب متر بین  $\frac{1}{2\lambda}$  تا  $\frac{1}{8\lambda}$  باشد.

### ۳-۳) روش خوزلا

در این روش مقدار رواناب متوسط سالانه حوزه از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$R = P - \frac{T}{3.74} \quad \text{رابطه ۱۰-}$$

R: رواناب متوسط سالانه بر حسب سانتی‌متر، P: بارندگی متوسط سالانه بر حسب سانتی‌متر، T: درجه حرارت متوسط سالانه بر حسب سانتی‌گراد.

### ۴) محاسبه رواناب با استفاده از مشخصات فیزیوگرافی

مشخصات فیزیوگرافی هر حوزه آبخیز از قبیل شیب، طول آبراهه

## جدول ۱- ضرایب پیشنهادی روش لیسی

دوام بارش			نوع اراضی حوزه آبخیز
طولانی	متوسط	کوتاه	
۶	۴	۲	شامل فلات‌ها، دشت‌های مسطح با خاک‌های عمیق و پوشش گیاهی مناسب.
۲/۵	۱/۶۷	۰/۸۳	تا حدودی مسطح با خاک نیمه‌عمیق و پوشش گیاهان مرتعی.
۱/۵	۱	۰/۵	تپه‌های نسبتاً مرتفع با خاک کم‌عمق و پوشش گیاهی نسبتاً ضعیف.
۰/۸۸	۰/۵۸	۰/۲۳	ارضای شنی همراه با مقدار زیادی سنگریزه با شیب زیاد در ارتفاعات.
۰/۴۳	۰/۲۸	۰/۱۴	ارضای سنگلاخی با ارتفاع و شیب بسیار زیاد و بدون پوشش گیاهی.

داده‌های ایستگاه هیدرومتری موجود در حوزه آبخیز مجاور، می‌توان از اطلاعات یاد شده جهت برآورد ضریب  $K$  استفاده کرد. پارامترهای مزبور شامل، متوسط بارندگی سالانه  $(P)$  و متوسط درجه حرارت سالانه  $(t)$  می‌باشد که از این طریق ضریب  $K$  قابل محاسبه خواهد بود. محاسبات انجام شده حاصل از حجم سیلاب متوسط سالانه که از روی ارقام متوسط دبی روزانه در طول دوره آماری استخراج گردیده رقمی در حدود  $۰/۶۳$  را برای ضریب  $K$  نشان می‌دهد.

### ۴-۳) رابطه لیسی

لیسی دانشمند هندی بر اساس بررسی‌هایی که در چندین حوزه به عمل آورد رابطه زیر را جهت برآورد رواناب سالانه ارائه نمود:

$$R = \frac{P}{1 + \frac{304.8}{P} \times \left(\frac{F}{Z}\right)} \quad \text{رابطه ۱۴-}$$

$R$ : رواناب سالانه بر حسب سانتی‌متر،  $P$ : متوسط بارندگی سالانه بر حسب سانتی‌متر،  $F$ : پارامتر مربوط به دوام بارش،  $Z$ : ضریب مربوط به مشخصات فیزیوگرافی. مقادیر مربوط به ضریب  $\left(\frac{F}{Z}\right)$  در جدول شماره ۱ ارائه شده است.

### ۴-۴) رابطه سازمان هواشناسی جهانی (W.M.O)

این روش مبتنی بر مطالعاتی است که در مناطق خشک و بیابانی ایالات متحده آمریکا انجام پذیرفته و بنابر توصیه سازمان هواشناسی جهانی برای سایر مناطق مشابه دنیا قابل استفاده می‌باشد. به عبارت دیگر این روش برای مناطقی که درجه حرارت متوسط ماهانه همواره بالای صفر است کاربرد دارد [۲۰].

$$R = 10^{(0.027 \times T + 0.886)} \quad \text{رابطه ۱۵-}$$

با استفاده از نسبت‌های برآورد شده در جدول (۲) می‌توان رواناب سالانه را محاسبه نمود.

### آزمون‌های آماری

در این تحقیق، به منظور ارزیابی نتایج و تعیین مدل مناسب، از آزمون  $t$  جفتی، میانگین انحراف (MD)، میانگین اختلاف (BIAS)، درصد خطای نسبی (RE) و ریشه میانگین مربع خطا (RMSE) استفاده گردید. در زیر به‌طور مختصر به هر یک از

اصلی، نوع خاک و پوشش گیاهی مهمترین عوامل کنترل‌کننده پتانسیل تولید رواناب سطحی بوده و در نتیجه می‌توان بین رواناب سطحی سالانه حوزه‌های آبخیز و عوامل فوق‌الذکر یک رابطه تعیین نمود.

مهمترین روابط ارائه شده شامل انجمن تحقیقات کشاورزی هندوستان، جاستین، لیسی، سازمان هواشناسی جهانی و سازمان حفاظت خاک آمریکا می‌باشد. در این بین روش سازمان حفاظت خاک آمریکا رواناب حاصل از بارش‌های منفرد را برآورد می‌نماید، لذا در این تحقیق مورد نظر نمی‌باشد.

### ۴-۱) روش انجمن تحقیقات کشاورزی هندوستان (I.C.A.R)

این روش بر اساس نتایج به‌دست آمده از بررسی میزان رواناب سالانه ۱۷ حوزه آبخیز در منطقه نیل‌گیری توسط انجمن تحقیقات کشاورزی هندوستان به شرح زیر ارائه شده است [۱۴]:

$$R = \frac{P^{1.44} \times A^{0.63} \times \Delta H^{0.66}}{15.19 \times F_f^{2.05} \times L_a^{2.05} \times T^{1.2}} \quad \text{رابطه ۱۱-}$$

$P$ : بارندگی سالانه بر حسب سانتی‌متر،  $R$ : رواناب سالانه بر حسب سانتی‌متر،  $A$ : مساحت حوزه آبخیز بر حسب کیلومتر مربع،  $\Delta H$ : حداکثر اختلاف ارتفاع حوزه بر حسب متر،  $F_f$ : فاکتور شکل حوزه آبخیز،  $T$ : درجه حرارت متوسط سالانه بر حسب سانتی‌گراد،  $L_a$ : طول آبراه اصلی بر حسب کیلومتر.

### ۴-۲) رابطه جاستین

جاستین تحقیقات گسترده‌ای بر روی رابطه بین میزان بارندگی و رواناب سالانه، تعداد زیادی حوزه آبخیز در شرایط آب و هوایی مختلف به عمل آورده و نتایج خود را به صورت فرمول عمومی زیر ارائه نمود:

$$R = K \times S^{0.155} \times \frac{P^2}{(1.8 \times T + 32)} \quad \text{رابطه ۱۲-}$$

$$S = \frac{\Delta H}{A^{0.5}} \quad \text{رابطه ۱۳-}$$

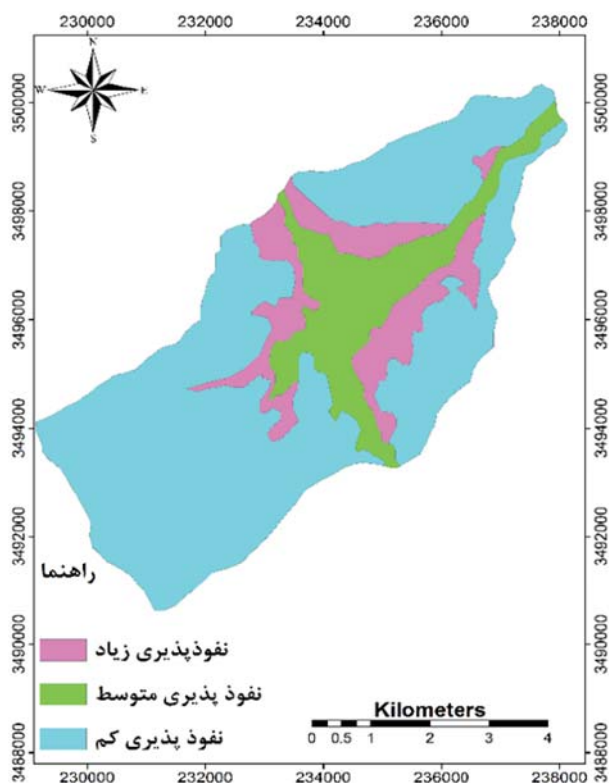
$K$ : ضریب منطقه‌ای،  $A$ : مساحت حوزه بر حسب متر مربع،  $\Delta H$ : حداکثر اختلاف ارتفاع حوزه بر حسب متر،  $S$ : شیب حوزه،  $T$ : دما بر حسب سانتی‌گراد،  $P$  و  $R$ : به ترتیب بارش و رواناب بر حسب سانتی‌متر. جهت محاسبه ضریب منطقه‌ای  $K$  با توجه به وجود

جدول ۲- نسبت‌های برآورد شده در رابطه سازمان هواشناسی

جهانی

$R/LT$	$P/LT$
۰/۰۰۹	۰
۰/۰۲۶	۱
۰/۰۷۵	۲
۰/۲	۳
۰/۴۱۵	۴
۱	۵
۱/۹	۶
۲/۷	۷
۳/۴	۸
۵	۱۰
۷	۱۲
۹	۱۴

P: متوسط بارندگی سالانه بر حسب سانتی‌متر، T: متوسط درجه حرارت سالانه بر حسب سانتی‌گراد و R: متوسط رواناب سطحی بر حسب سانتی‌متر.



شکل ۲- نقشه نفوذپذیری حوزه آبخیز بنادک سادات

این روش‌ها اشاره شده است.

- آزمون t جفتی:

رابطه کلی این آزمون به صورت زیر می‌باشد:

رابطه ۱۵-

$$t = \frac{\bar{d}}{S_d}$$

$\bar{d}$ : میانگین تفاضل جفت مشاهده‌ها،  $S_d$ : اشتباه معیار تفاوت‌ها.

که این آزمون با استفاده از نرم افزار SPSS-۱۸ انجام پذیرفت.

- میانگین انحراف (MD):

رابطه ۱۶-

$$MD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Q_o - Q_e]$$

$Q_o$ : مقادیر مشاهده‌ای،  $Q_e$ : مقادیر برآوردی، n: تعداد نمونه.

- میانگین اختلاف (BIAS):

رابطه ۱۷-

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{E_o - E_e}{E_o}$$

$E_o$ : مقادیر مشاهده‌ای،  $E_e$ : مقادیر برآوردی، n: تعداد نمونه

- درصد خطای نسبی (RE):

رابطه ۱۸-

$$RE = \left| \frac{Q_o - Q_e}{Q_e} \right| \times 100$$

جدول ۳- مشخصات فیزیوگرافی هر یک از واحدهای هیدرولوژیک مورد مطالعه

زمان تمرکز کریچ (دقیقه)	ضرایب شکل حوضه			طول آبره اصلی (کیلومتر)	شیب متوسط وزنی	ارتفاع حداقل (متر)	ارتفاع حداکثر (متر)	مساحت (کیلومتر مربع)	بارش بر حسب سانتی‌متر	متوسط دما بر حسب درجه سانتی‌گراد	واحد هیدرولوژیک
	میلر	گراویلبوس	هورتون								
۲۳	۰/۵۳	۱/۳۵	۰/۳۲	۴/۹۸	۵۷/۱۷	۲۲۸۰	۳۵۰۰	۷/۳۶	۳۱/۷	۱۵/۵	A
۱۸	۰/۴	۱/۵۶	۰/۲	۴/۴۶	۵۷/۲۴	۲۳۰۰	۳۹۶۰	۳/۹۹	۳۴/۸	۱۴/۸	B
۱۷	۰/۵۱	۱/۳۸	۰/۲۲	۳/۹۹	۶۱/۰۶	۲۲۶۰	۳۷۰۰	۳/۷۶	۳۳/۷۴	۱۵	C
۵۲	۰/۵۴	۱/۳۴	۰/۳۳	۸/۶۸	۵۲/۳۶	۱۸۸۰	۳۰۲۰	۲۳/۹۴	۲۸/۶۶	۱۶/۲	INT
۵۶	۰/۱۴	۲/۵۷	۰/۲۸	۱۲/۲۵	۵۵/۹۲	۱۸۸۰	۳۹۶۰	۳۹/۳۲	۳۱/۱	۱۵/۶	TOTAL

جدول ۴- نتایج محاسبات فرمول‌های تجربی در زیرحوزه‌های بنادک سادات

TOTAL	INT	C	B	A	مؤلفه‌های مختلف اندازه‌گیری شده	روابط تجربی مورد استفاده
۱/۶۲	۱/۲۲	۲/۱۱	۲/۳۲	۱/۷۳	ارتفاع رواناب (cm)	انگلی-دی سوزا
۰/۶۳	۰/۲۹	۰/۰۷۹	۰/۰۹۲	۰/۱۲۷	حجم رواناب (MCM)	
۵/۲	۴/۲۵	۶/۲۵	۶/۶۶	۵/۴۵	ضریب رواناب (/.)	
۸/۶۱	۷/۶۹	۹/۶۱	۱۰/۰۲	۸/۸۳	ارتفاع رواناب (cm)	دپارتمان آبیاری هندوستان
۳/۳۸	۱/۸۴	۰/۳۶۱	۰/۳۹۹	۰/۶۵	حجم رواناب (MCM)	
۲۷/۶۸	۲۶/۸۳	۲۸/۴۸	۲۸/۷۹	۲۷/۵۸	ضریب رواناب (/.)	
۳۸/۰۸	۰	۹۶/۷۳	۱۲۳/۴۵	۴۹	ارتفاع رواناب (cm)	تورک
۱/۵	-	۰/۳۶	۰/۴۹	۰/۳۶	حجم رواناب (MCM)	
۰/۱۲	-	۰/۲۹	۰/۳۵	۰/۱۵	ضریب رواناب (/.)	
۲۶/۹۲	۲۴/۳۲	۲۹/۷۲	۳۰/۸۴	۲۷/۵۵	ارتفاع رواناب (cm)	
۱۰/۵۸	۵/۸۲	۱/۱۱	۱/۲۳	۲/۰۲	حجم رواناب (MCM)	خوزلا
۸۶/۵۵	۸۴/۸۵	۸۸/۰۸	۸۸/۶۲	۸۶/۹	ضریب رواناب (/.)	
۳/۱۶	۲/۷۶	۴/۳۳	۴/۵۹	۳/۶۴	ارتفاع رواناب (cm)	
۱/۲۴	۰/۶۶	۰/۱۶	۰/۱۸	۰/۲۷	حجم رواناب (MCM)	ایکار
۱۰/۱۸	۹/۶۲	۱۲/۸۴	۱۳/۲	۱۱/۴۷	ضریب رواناب (/.)	
۸/۶۱	۶/۸۰	۱۱/۷۰	۱۲/۷۴	۹/۴۱	ارتفاع رواناب (cm)	
۳/۳۹	۱/۶۳	۰/۴۴	۰/۵۱	۰/۶۹	حجم رواناب (MCM)	جاستین
۲۷/۷۰	۲۳/۷۴	۳۴/۶۷	۳۶/۶۱	۲۹/۶۸	ضریب رواناب (/.)	
۵/۸۴	۲/۹۶	۲۴/۱	۷/۱۳	۵/۹۷	ارتفاع رواناب (cm)	
۲/۲۹۸	۰/۷۱۰	۰/۹۰۳	۰/۲۸۴	۰/۴۳۹	حجم رواناب (MCM)	لیسی
۱۸/۷۹	۱۰/۳۵	۷۱/۱۸	۲۰/۴۹	۱۸/۸۴	ضریب رواناب (/.)	
۱/۵۳	۰/۵۴	۱/۴۶	۱/۴۴	۱/۵۱	ارتفاع رواناب (cm)	
۰/۶۰۱	۰/۰۱۲	۰/۰۵۴	۰/۰۵۷	۰/۱۱۱	حجم رواناب (MCM)	هوشناسی جهانی
۴/۹۱	۱/۸۸	۴/۳۲	۴/۱۳	۴/۷۶	ضریب رواناب (/.)	
۳/۲۴	۲/۶۸	۳/۹۳	۴/۲۲	۳/۳۸	ارتفاع رواناب (cm)	
۱/۲۷	۰/۶۴	۰/۱۵	۰/۱۷	۰/۲۵	حجم رواناب (MCM)	کوتاین
۱۰/۴۲	۹/۳۴	۱۱/۶۳	۱۲/۱۲	۱۰/۶۷	ضریب رواناب (/.)	

Q<sub>o</sub>: مقادیر مشاهده‌ای، Q<sub>e</sub>: مقادیر برآوردی.

- میانگین مربع خطا (RMSE):

رابطه ۱۹-

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(Q_o - Q_e)^2}{Q_o}}$$

Q<sub>o</sub>: مقادیر مشاهده‌ای، Q<sub>e</sub>: مقادیر برآوردی، n: تعداد نمونه.

همچنین، از عوامل مؤثر در میزان رواناب جاری شده میزان

نفوذپذیری و شیب می‌باشد که نقشه‌های این دو پارامتر در محیط GIS تهیه گردیده است (اشکال ۲ و ۳).

### نتایج

مشخصات فیزیوگرافی اصلی و مورد نیاز حوزه در جدول ۳ ارائه گردیده است.



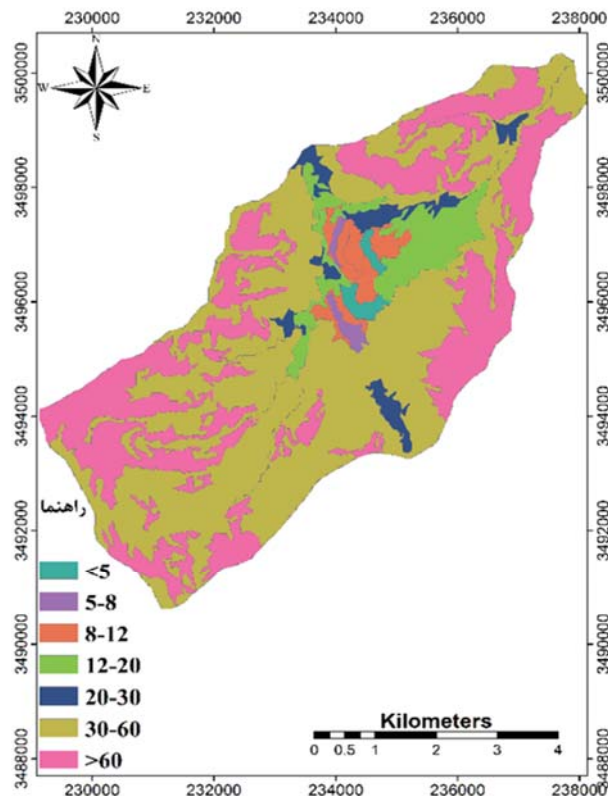
## آزمون‌های آماری مورد استفاده

با توجه به روابط شرح داده شده در قسمت قبل برای هر کدام از زیرحوزه‌های حوزه آبخیز بنادک سادات محاسبات ارتفاع رواناب، حجم رواناب و ضریب رواناب محاسبه گردید که نتایج آنها در جدول ۴ نشان داده شده است. نتایج حاصل از روش‌های آماری مورد استفاده در این تحقیق برای تمامی مدل‌های تجربی مورد آزمون در جداول ۵ تا ۷ ارائه گردیده است. نتایج حاصل از آزمون t جفتی با نرم‌افزار SPSS در جدول ۵ و نتایج حاصل از سایر روش‌های آماری مورد استفاده شامل MD، BIAS، RE و RMSE در جدول ۶

نشان داده شده است. لازم به ذکر است که نتایج جدول ۶ در سطح ۹۵ درصد معنی‌دار می‌باشند.

## ارزیابی روابط تجربی برآورد رواناب در حوزه آبخیز

با توجه به معیارهای مقایسه، در هر معیار برای مناسب‌ترین روش رتبه پائین و برای نامناسب‌ترین آن رتبه بالاتری انتخاب شده است. با قرار دادن نتایج نهایی این معیارها در جدول، می‌توان روشی را که در همه معیارها دارای رتبه پائین‌تری بوده است به عنوان مناسب‌ترین روش در نظر گرفت که نتایج در جدول ۷ ارائه گردیده است [۵].



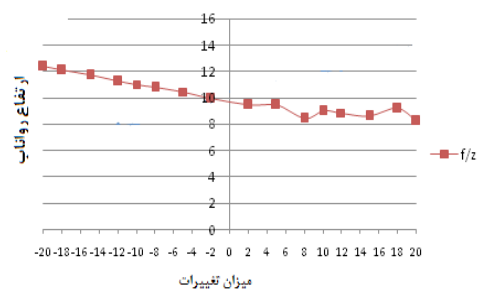
شکل ۳- نقشه شیب حوزه آبخیز بنادک سادات

جدول ۵- نتایج آماری آزمون t جفتی برای روش‌های برآورد رواناب با داده‌های مشاهده‌ای در حوزه آبخیز بنادک سادات

روش مورد آزمون	میانگین	انحراف معیار	اشتباه معیار		درجه آزادی	فاصله اطمینان ۹۵٪		سطح معنی‌دار
			اختلاف میانگین	انحراف معیار		حد بالا	حد پایین	
انگلی دی سوزا	۱/۸۴	۰/۴۸	۰/۲۴	۰/۴۸	۳	-۱/۳۱	۰/۲۲	۰/۱۰۹
دپارتمان آبیاری دهندوستان	۹/۰۴	۱/۰۳	۰/۵۱	۱/۰۳	۳	۵/۰۲	۸/۲۸	۰/۰۰۱
تورک	۶۷/۲۹	۵۴/۴۱	۲۷/۲۱	۵۴/۴۱	۳	-۲۱/۶۸	۱۵۱/۴۵	۰/۰۱۷
خوزلا	۲۸/۱۱	۲/۸۷	۱/۴۴	۲/۸۷	۳	۲۱/۱۵	۳۰/۲۹	۰/۰۰۰
ایکار	۳/۸۳	۰/۸۲	۰/۴۱	۰/۸۲	۳	۰/۱۴	۲/۷۴	۰/۰۳۹
جاستین	۰/۸۲	۰/۵۵	۰/۲۸	۰/۵۵	۳	-۲/۴۵	-۰/۶۹	۰/۰۱۱
لیسی	۱۰/۰۴	۹/۵۳	۴/۷۷	۹/۵۳	۳	-۷/۵۲	۲۲/۸۲	۰/۲۰۷
هواشناسی جهانی	۱/۲۴	۰/۴۷	۰/۲۳	۰/۴۷	۳	-۱/۸۹	-۰/۴۱	۰/۰۱۶
کوتاین	۳/۵۵	۰/۶۸	۰/۳۴	۰/۶۸	۳	۰/۰۸	۲/۲۴	۰/۰۴۲

جدول ۶- نتایج روش‌های آماری MD، RE، BIAS و RMSE برای مدل‌های

تجربی مورد استفاده در حوزه آبخیز بنادک سادات				
RE	RMSE	BIAS	MD	روش مورد آزمون
۸/۷۷۸	۰/۰۶۰	۰/۰۱۶	۰/۰۳۸	انگلی دی سوزا
۷۲/۲۴	۱/۶۴۲	۰/۴۳۵	۱/۰۳۶	دپارتمان آبیاری هندوستان
۹۳/۷۲	۹/۴۲۴	۲/۴۸۸	۵/۹۴۸	تورک
۹۱/۱۲	۶/۴۷۷	۱/۷۱۰	۴/۰۸۸	خوزلا
۹۲/۵۸	۰/۳۰۳	۰/۰۸۰	۱/۱۹۱	ایکار
۷۲/۲۵	۱/۶۴۳	۰/۴۳۴	۱/۰۳۵	جاستین
۴/۳۶	۰/۰۲۶	۰/۰۰۷	۰/۰۱۶	لیسی
۵۶/۲۰	۰/۲۲۷	۰/۰۶۰	۰/۱۴۳	هواشناسی جهانی
۲۶/۲۳	۰/۲۲۴	۰/۰۵۹	۰/۱۴۵	کوتاین



شکل ۴- نمودار آنالیز حساسیت مدل لیزی

جدول ۷- نتیجه نهائی رتبه‌بندی روش‌های مختلف برآورد رواناب در حوزه آبخیز بنادک سادات

معیار ارزیابی	انگلی دی سوزا	دپارتمان آبیاری هندوستان	تورک	خوزلا	ایکار	جاستین	لیسی	هواشناسی جهانی	کوتاین
RMSE	۲	۶	۹	۸	۵	۷	۱	۴	۳
BIAS	۲	۷	۹	۸	۵	۶	۱	۴	۳
MD	۲	۶	۹	۸	۷	۵	۱	۳	۴
RE	۲	۵	۹	۷	۸	۶	۱	۴	۳
مجموع	۸	۲۴	۳۶	۳۱	۲۵	۲۴	۴	۱۵	۱۳
رتبه	۲	۵	۸	۷	۶	۵	۱	۴	۳

ارزیابی قرار گرفت. هدف این مطالعه، تعیین مناسب‌ترین مدل از بین مدل‌های مورد آزمون در حوزه آبخیز مورد مطالعه بوده که با استفاده از آزمون t جفتی، MD، BIAS، RE و RMSE انجام پذیرفت.

نتایج حاصل از ارزیابی مدل‌های مورد استفاده در این مطالعه در جداول ۵، ۶ و ۷ نشان‌دهنده این است که مدل لیزی با مقادیر RE، BIAS، MD و RMSE به ترتیب ۰/۰۱۶، ۰/۰۰۷، ۴/۳۶ و ۰/۰۲۶ مناسب‌ترین مدل (با ارتفاع رواناب معادل ۱/۵۳ سانتی‌متر، حجم رواناب برابر با ۲/۲۹ میلیون متر مکعب و ضریب رواناب معادل ۱۸/۷۹ درصد) برای برآورد ارتفاع رواناب در حوزه آبخیز بنادک سادات بوده و از بیشترین دقت و کارایی برخوردار است. همچنین، با توجه به اجرای آزمون t جفتی، عدم وجود اختلاف معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد، بین نتایج مدل مذکور و داده‌های مشاهده‌ای صحت یافته‌های فوق را تأیید می‌نماید که با نتایج بشول [۳]، فتح‌زاده [۶] و قضاوی [۸] مطابقت و هم‌خوانی دارد. قضاوی [۸] روش کوتاین و روش اصلاح شده لانگین را برای مناطق خشک مناسب ندانسته است و خسروشاهی [۱۰] در تحقیق خود در حوزه‌های آبخیز خراسان جنوبی نیز به این مسئله اشاره نموده است که معمولاً روش ایکار برآوردهایی بیش از ارقام مشاهداتی به

## آنالیز حساسیت

برای انجام آنالیز حساسیت یک پارامتر بین حد بالا و پایین خود تغییر می‌کند، در صورتی که پارامتر دیگر (یا پارامترهای دیگر) در میانگین خود ثابت باقی می‌ماند و با هر تغییر ارتفاع رواناب محاسبه می‌گردد. بدین ترتیب می‌توان اثرات تغییر یک پارامتر بر روی خروجی را به دست آورد که در شکل ۴ نمودار آنالیز حساسیت نشان داده شده است. هر خطی که دارای شیب بیشتر باشد دارای حساسیت بیشتری می‌باشد، همان‌طور که از شکل نام‌برده مشخص می‌باشد در آنالیز حساسیت رابطه لیزی برای پارامتر F/Z با تغییر در بازه‌های مورد نظر می‌توان دید که در میزان تغییر ۶ تا ۸، ۸ تا ۱۰ و ۱۸ تا ۲۰ درصد، مدل لیزی به پارامتر F/Z دارای حساسیت بسیار زیادی می‌باشد.

## بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، ۹ مدل تجربی برآورد رواناب در حوزه آبخیز بنادک سادات اجرا و با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای و اندازه‌گیری شده در ایستگاه هیدرومتری خروجی حوزه بنادک سادات مورد



Science and Engineering. (In Persian)

6- Fathzadeh, A., 2008. Comparison of Kotain and Turc method with its conversion methods in dry land, master's thesis, TarbiatModarres University, college of Natural Resources and Marine Sciences. (In Persian)

7- Ghaffari, G., Karimizadeh, K., Fathi, G., & Heydari, 2010. Articles Collections of the Sixth National Conference on Watershed Management Science and Engineering, Tarbiat Modarres University. (In Persian)

8- Ghazavi, Gh., & Abasali, V., 2003. Determination of best estimation annual runoff empirical method no station watershed in semi-arid land in darab city. Journal of Natural resources and agriculture science, 10(3): 10-25. (In Persian)

9- Khayam, M., & Molavi, A., 2004. Runoff Quantitative Analysis in Saeeadabadchai watershed. Journal of Geography and development, 376: 78-91. (In Persian)

10- Khosroshahi, M., 1991. Water balance Calculation in small watershed areas and no hydrometric stations using empirical formulas in Khorasan region, M.Sc. Thesis, Department of Natural Resources, Tehran University. (In Persian)

11- Mahdavi, M., 2006. Applied Hydrology, Vol 1, Tehran University press. (In Persian)

12- Minras, J.R., 1975. Principle of Hydrology, Sedghi, H., Shahid Chamran University press. (In Persian)

13- Mohamadi, M., & Jandaghi, N., 2010. Comparison between runoff output from Khozla method and observation data in west Golestan province watersheds. Articles Collections of the 5th National Conference on Watershed Management Science and Engineering. (In Persian)

14- Mutereja, K.N., 1986. Applied Hydrology. Tata McGraw- Hill, pp. 498-506.

15- W.M.O., 1994. Guide to Hydrological practice, fifth edition, pp., 447-448.

16- Nearing, M.A., Jetten, V., Baffaut, C., Cerdan, O., Couturier, A., Hernandez, M., Lebissonias, Y., Nicols, M.H., Nunes, J.P., Renschler, C.S., Souchere, V., & VanOost, K., 2005. Modelling response of soil erosion and runoff to change in precipitation and cover. Catena, 61, 131-154

17- Neshat, M., 2001. Utility of SCS method to estimation of water propulsion & suction condition and design flood hydrograph, Agriculture College of Neshat, AS. In 1380. SCS method for estimating the absorption and excretion of

همراه خواهد داشت و این مسئله در حوزه‌های آبخیز بزرگتر از ۲۰۰ کیلومتر مربع نمود بیشتری پیدا خواهد کرد. همچنین، فتح‌زاده [۳۱] در قالب تحقیق خود روش‌های کلاسیک تورک و کوتاین را برای مناطق خشک و نیمه‌خشک نامناسب و همراه با خطاهای فاحش برشمرد. در این تحقیق، بر طبق یافته‌ها و نتایج آزمون‌های آماری، بعد از مدل لیزی، مدل انگلی-دی سوزا در حوزه مورد مطالعه به عنوان بهترین مدل جهت محاسبه رواناب معرفی می‌گردد. نتایج بالا همچنین با نقشه‌های به‌دست آمده (اشکال ۲ و ۳) از منطقه مورد مطالعه تطابق داشته که جهت صحت بیشتر نتایج مدل لیزی می‌تواند به کار رود.

ویژگی و مزیت مدل لیزی کاربرد تأثیر توام عوامل مربوط به مدت دوام بارش و خصوصیات فیزیکی حوزه می‌باشد. طبیعت سیلابی رودخانه‌های مناطق خشک و نیمه خشک مؤید بارش‌های با شدت زیاد و مدت کم می‌باشد، لذا دخالت ندادن عامل مدت دوام بارش در تولید رواناب توسط روش انگلی-دی سوزا و دیگر روش‌های مربوطه مسئله مهمی است که نمی‌توان از آن به سادگی گذشت. در کل روش‌های مبتنی بر ضرایب رواناب سطحی و رابطه بین بارندگی و رواناب، بیشتر جنبه محلی داشته و فقط با شرایط خاص فیزیکی و آب و هوایی همان حوزه‌ها قابل کاربرد می‌باشد. اما روش‌های برآورد رواناب با استفاده از کمبود جریان سطحی و مشخصات فیزیوگرافی با در نظر گرفتن عوامل فیزیکی و اقلیمی نتایج قابل قبول‌تری را ارائه می‌دهند.

## منابع

- 1- Alizade, A., 1989. Principle of Applied Hydrology. Mashhad, Ghods Boniad application. (In Persian)
- 2- Bajlan, A., Mahmoudian shooshtary, M & avlipoor, M., 2005. Monthly runoff predictions with artificial neural network (ANN) and compare its results with empirical methods in Kasilian watershed, 5th Iranian Hydraulic Conference, 877-885. (In Persian)
- 3- Bashoul, R., 2002. Empirical models usage to estimate annual runoff of rivers in arid and semi-arid of Iran, Articles Collections of the Sixth Seminar on River Engineering, Shahid Chamran University. (In Persian)
- 4- Davarirad, A.A., 2006. Calibration of empirical relations for estimating runoff and compare them with mathematical models to estimate the height of elevation. Second Conference on Water Resources Management. (In Persian)
- 5- Esmaili Ouri, A & Samiei, M., 2011. Assessment of empirical methods of runoff estimation in Tangesoye watershed in Fars province, Articles Collections of the Seventh National Conference on Watershed Management

20- W.M.O. 1994. Guide to Hydrological Practice, Fifth Edition, pp: 447-448.

21- Zare, S., Abbasi, N., Jandagh, A., & Hezbi, A., 2008. Survey and determine of monthly, quarterly and annual Discharge and snow in Tolbane watershed in Gorgan province, the first climate change on ecosystems Caspian conference, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources. (In Persian)

water and flood hydrograph lands in the catchment area in the garden of the property, in permeable land in Baghemalek Watershed. Drainage & Irrigation Master's thesis, Islamic Azad University, Research Science. (In Persian)

18- Rahbar, A., & Masoudi, M., 2008. Trend of river runoff Changes in the Kordan watershed. Iranian journal of Range and desert Research. 16 (2): 173-161. (In Persian)

19- Velayati, S., 2002. Water geographical. Jahad press of Mashhad University. Gupta, B.I., 1992. Engineering Hydrology, second edition, Estimation of runoff, Vol 4, pp: 63-64. (In Persian)

**Abstract****Assessment of Empirical Methods of Runoff Estimation by Statistical test  
(Case study: Banadak Sadat Watershed, Yazd Province)**M. Bahri<sup>1\*</sup>, Kh. Khosravi<sup>2</sup> and A. Safari<sup>2</sup>

Received: 2014. 09. 20 Accepted: 2015. 01. 06

Estimation of runoff resulted from precipitation is the basis of studies in many plans of development and utilization of water resource. Therefore, its measurement and calculation always has plenty problems due to the environmental limitations. Consequently, considering the importance of output runoff and flood volume estimation in watersheds to advance integrated watershed management of Iran, in this study, it has been attempted to implement nine empirical methods of runoff estimation in Banadak Sadat watershed. The achieved results are evaluated by the measured runoff at a hydrometric station located at the watershed outlet, using paired t-test, MD, BIAS, RE and RMSE tests. Then, the best model was selected to estimate runoff elevation having the maximum accuracy and efficiency in the studied watershed. After preparation of the required maps using GIS software and statistical tests implementation by SPSS software, the results showed that LACEY method was determined as the most appropriate empirical method for runoff estimation in the studied area, with MD, BIAS, RE and RMSE values by 0.016, 0.007, 4.36, 0.026 respectively, and also no significant difference with the observed data at 95% confidence level, runoff elevation by 1.53 cm, runoff volume by 2.29 million m<sup>3</sup>, and runoff coefficient by 18.79%. Then, the sensitivity analysis was conducted using Excel software for LACEY model to determine the most effective reaches. According to the achieved results, the parameter F/Z has the maximum impact on the model output at reaches 6-8, 8-10 and 18-20.

**Keywords:** *Runoff Estimation, Empirical method, Banadaksadat Watershed, GIS, SPSS, Sensitivity Analysis*

1. M.Sc. graduated of Watershed Management, University of Yazd  
bahri.masoumeh@yahoo.com

2. Ph.D. candidate of Watershed Management, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources