ارزیابی روش‌های مختلف مدل‌سازی روابط مؤلفه‌های باران‌نگار و آب‌نگار واحد

محبوبه معتمدنیا، سیدحمیدرضا صادقی*، حمیدرضا مرادی و هانیه اسدی[۱]

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۱/۱۹ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۱۲/۱۲)

چکیده

تهیه و اجرای طرح‌های آب و خاک نیازمند مجموعه‌ای از اطلاعات مربوط به بارندگی و روان‌آب است. از طرفی آب‌نگارهای واحد، مبنای مناسبی برای تهیه آب‌نگارهای سیلاب و تأمین اطّلاعات جامع برای برنامه‌ریزان و مدیران محسوب می‌شوند. حال آن‌که تهیه آن برای تمامی حوزه‌های آبخیز به‌سادگی امکان‌پذیر نمی‌باشد. از این‌رو مدل‌سازی مناسب برای شبیه‌سازی آب‌نگار واحد با استفاده از داده‌های قابل دست‌رس باران و به‌شیوه‌های آماری قابل اعتماد از ضروریات است. حال آن‌که اعتمادسنجی لازم برای روش‌های مختلف مدل‌سازی آماری در هیدرولوژی و هم‌چنین تهیه آب‌نگار واحد به‌ندرت صورت گرفته است. در همین راستا، تحقیق موجود درصدد مقایسه کارایی روش‌های مختلف مدل‌سازی تهیه ارتباط آب‌نگار واحد معرف ۲ ساعته حوزهٔ آبخیز کسیلیان با زمان تمرکز حدود ۱۰ ساعت با استفاده از داده‌های بارندگی می‌باشد. برای انجام تحقیق موجود، تحلیل روابط بین ۳۶ ویژگی باران‌نگار و آب‌نگار واحد برای ۲۳ رگبار طی چهار فصل در یک دورهٔ زمانی ۳۳ ساله به‌شکل‌های مختلف رگرسیون دو و چند متغیره مد نظر قرار گرفت. بر اساس نتایج به‌دست آمده میانه خطای تأیید مقادیر حاصل برای کلیه متغیرهای وابسته آب‌نگار واحد ۲ ساعته بین ۳۷ تا ۸۸ درصد برآورد شد. نتایج نشان داد که در رگرسیون دو متغیره، مدل‌های درجه سوم و خطی و در رگرسیون چند متغیره، مدل‌های لگاریتمی بیشترین توانایی در تعیین ارتباط هیدروگراف واحد و مؤلفه‌های مختلف بارندگی در حوزهٔ آبخیز مذکور را داشته‌اند. هم‌چنین دقت مدل‌های حاصل از تجزیه و تحلیل عاملی در رگرسیون چند متغیره کاهش پیدا کرد. با توجه به آماره‌های ارزیابی مورد استفاده در این تحقیق از بین دو روش پس‌رو و پیش‌رو در اکثر مواقع روش پس‌رو و در شاخص‌های زمانی رابط بین آب‌نگار واحد و باران‌نگار روش پیش‌رو از نتایج بهتری برخوردار بوده است.

واژه‌های کلیدی: تجزیه و تحلیل عاملی، شبیه‌سازی آب‌نگار واحد، حوزهٔ آبخیز کسیلیان، مدل‌سازی رگرسیونی

۱. به‌ترتیب کارشناس ارشد، دانشیار، استادیار و کارشناس ارشد مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: sadeghi@modares.ac.ir

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-06-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1389.14.52.3.8]

مقدمه

تعیین عوامل هیدرولوژیکی از دید ایمنی، جنبه اقتصادی طرح و عملکرد سازه‌های هیدرولیکی از اهمیت فراوانی برخوردار است. در همین راستا، ارزیابی روان‌آب به‌دلیل محدودیت‌های مختلفی همچون کافی نبودن ایستگاه‌های آب‌سنجی و هزینه‌بر بودن جمع‌آوری داده‌ها غالباً با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی صورت می‌گیرد (۷ و۱۲). از طرفی تهیه اطلاعات جامع در قالب آب‌نگارها یکی از موارد اساسی برای مدیریت صحیح منابع آب و خاک تلقی می‌شود، حال آن‌که دست‌یابی به این اطلاعات در حوزه‌های آبخیز فاقد ایستگاه‌های آب‌سنجی و یا زیرحوزهای آبخیزهای بالادست به‌عنوان مناطق اصلی اجرای اقدامات آبخیزداری ساده نمی‌باشد. در همین راستا اغلب مدل‌های هیدرولوژی تخمین روان‌آب نیز بر اساس خصوصیات فیزیکی زودیافت حوزه‌های آبخیز و یا ویژگی‌های موجود و معمول بارش تهیه شده‌اند. در این خصوص می‌توان به تحقیقات گری (۱۶) در تهیه آب‌نگار واحد (Unit Hydrograph) در حوزه‌های آبخیز غرب امریکا، رودریگز و والد (۲۴) در تهیه آب‌نگار سیل در ایالات شرقی امریکا، گوپتا و همکاران (۱۸) در تهیه مدل آب‌نگار واحد لحظه‌ای در هلند، جنا و تایواری (۲۰) در مدل‌سازی بین پارامترهای آب‌نگار واحد مصنوعی و پارامترهای ژئومورفولوژیکی دو حوزه و زیر حوزه‌های آنها در هندوستان و کلیولند و همکاران (۱۵) در تهیه آب‌نگار واحد در ۱۲۶ حوزهٔ آبخیز در تگزاس اشاره نمود.

در ایران نیز عمدتاً از روش‌های مختلف آب‌نگار واحد ژئومورفولوژیک، ژئومورفوکلیماتیک در حوزه‌های آبخیز مختلف امامه (۱۱)، کسیلیان (۴)، زاینده‌رود (۱۳)، خانمیرزا (۹)، خوزستان (۵)، بازفت (۶) و هرمزگان (۱۲) برای تهیه آب‌نگار سیل استفاده و بعضاً نتایج به‌دست آمده با سایر روش‌های برآورد سیلاب مقایسه شده است. هم‌چنین صادقی و همکاران (۸) با استفاده از اجزای مختلف بارندگی مبادرت به شبیه‌سازی موفّق آب‌نگار در حوزهٔ آبخیز کسیلیان نمودند. نتایج آنها نشان داد که با استفاده از مدت بارش مازاد می‌توان به‌ساده‌ترین شکل آب‌نگار سیل دست یافت.

بررسی سوابق به‌دست آمده نشان داد که اغلب تحقیقات انجام شده در خصوص تهیه آب‌نگارهای واحد در زمینه تهیه مدل‌های منطقه‌ای مبتنی بر خصوصیات فیزیکی حوزهٔ آبخیز صورت پذیرفته است. حال آن‌که ویژگی‌های پویای بارش در تبیین آب‌نگارها کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در صورتی که ضرورت استفاده از اطلاعات زودیافت و یا موجود بارش در حوزه‌های آبخیز فاقد ایستگاه‌های اندازه‌گیری از ضروریات غیرقابل انکار تلقی می‌شود. هم‌چنین مقایسه بین روش‌های مختلف آماری و در مراحل مختلف فرآیند مدل‌سازی بسیار محدود و مربوط به‌سال‌های اخیر می‌باشد. در این ارتباط تنها می‌توان به تحقیق صادقی و همکاران (۷) در رابطه با ارزیابی کارایی روش‌های مختلف تجزیه و تحلیل آماری در مدل‌سازی مؤلفه‌های اصلی آب‌نگار سیل با استفاده از مشخصات باران‌نگار و توانایی بیش‌تر مدل‌های رگرسیونی دو متغیره و دقت بالاتر رگرسیون‌های چند متغیره بدون تجزیه و تحلیل عاملی و نیز شیوه پس‌رو در حوزهٔ آبخیز کسیلیان اشاره نمود. از این‌رو تحقیق حاضر با هدف مقایسه روش‌های مختلف مدل‌سازی رگرسیونی و انتخاب روش برتر جهت دست‌یابی به مدل بهینه تعیین مؤلفه‌های آب‌نگار واحد معرف حوزهٔ آبخیز کسیلیان با استفاده از متغیرهای قابل دست‌رس باران‌نگار و طبعاً ارزیابی مدل‌های تهیه شده، انجام پذیرفته است.

مواد و روش‌ها

تحقیق فعلی در حوزهٔ آبخیز کسیلیان به‌دلیل برخورداری از داده‌های دراز مدت بارش و روان‌آب و طبعاً شرایط اولیه مطالعه انجام گرفته است. حوزهٔ آبخیز مذکور دارای توپوگرافی نسبتاً پیچیده و شکلی کشیده و با مساحت ۶۶/۷۸ کیلومترمربع، دامنه ارتفاعی ۱۱۰۰ تا ۲۷۰۰ متر از سطح دریا، میانگین بارندگی سالانه حدود ۸۱۴ میلی‌متر و اقلیم نیمه‌مرطوب تا مرطوب است (۴). حوزهٔ آبخیز کسیلیان به‌دلیل واقع شدن در دامنه شمالی البرز

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-06-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1389.14.52.3.8]

دارای پوشش غالب جنگلی است که به‌مرور زمان در اثر افزایش جمعیت روستاها بر میزان وسعت کاربری‌های دیگر اراضی افزوده و از وسعت جنگل‌ها کاسته شده است. اراضی زراعی حدود ۱۹ درصد از وسعت کل حوزهٔ آبخیز را شامل می‌شود (۷). حوزهٔ آبخیز مذکور دارای یک ایستگاه هواشناسی ثبات (سنگده) و آب‌سنجی ثبات (ولیک‌بن) به‌ترتیب در مرکز و خروجی آن می‌باشد (شکل ۱). داده‌های حاصل از ایستگاه‌های ثبّات مذکور طی دورهٔ زمانی ۱۳۵۴ تا ۱۳۸۶ برای انجام تحقیق حاضر مورد استفاده قرار گرفته است.

برای دست‌یابی به اهداف تحقیق از آمار و اطلاعات آب‌نگار و بارانگار مربوط به ۲۳ رگبار در دورهٔ آماری ۳۳ ساله (۳) استفاده شد. برای تهیه آب‌نگار واحد بعد از جداسازی آب پایه با استفاده از خط شیب روبه بالا، حجم روان‌آب مستقیم محاسبه و از تقسیم آن به سطح حوزه، ارتفاع متوسط روان‌آب تعیین و نهایتاً آب‌نگار واحد مرتبط با آن به‌دست آمد (۱۰). سپس آب‌نگارها واحد متوسط ۲ ساعته به‌دلیل رعایت شرط زمانی مناسب بارش مؤثر به‌عنوان ۰/۲ تا ۰/۳ زمان تأخیر ۹ ساعته حوزهٔ آبخیز (۲۶ و ۲۷) برای حوزهٔ آبخیز مورد مطالعه تهیه شد.

در ادامه ۳۶ مشخصه برای هر رگبار در سه دسته کلی اجزای بارانگار، آب‌نگار واحد و شاخص‌های رابط بین بارانگار و آب‌نگار واحد محاسبه شد. اجزای بارانگار شامل مقدار بارش کل، دوام بارش کل، مقدار بارش مازاد، دوام بارش مازاد، شدت متوسط، بیشینه شدت ۳۰ دقیقه‌ای، بیشینه شدت ۱۵ دقیقه‌ای، زمان وقوع بیشینه شدت ۳۰ دقیقه‌ای، زمان وقوع بیشینه شدت ۱۵ دقیقه‌ای، مقدار بارش در چارک اول، دوم، سوم و چهارم، مرکز ثقل بارانگار کل و مرکز ثقل بارانگار مازاد بود. تمام متغیرهای بارش کل و مازاد به‌ترتیب از تحلیل بارانگار کامل و بارانگار مازاد حاصل از کاربرد شاخص فی محاسبه شد. متغیرهای تعیین کننده مهم شکل کلیه آب‌نگارهای واحد نیز شامل دبی اوج، عرض‌های ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد از دبی اوج، زمان تا اوج، زمان پایه، مرکز ثقل آب‌نگار واحد، دبی در نقطه عطف و فاصله زمانی آن تا اوج انتخاب و برای ارزیابی آنها در رابطه با شکل آب‌نگار واحد استفاده شد. شاخص‌های مختلف زمانی رابط بین بارانگار کل و مازاد با آب‌نگار واحد ۲ ساعته شامل فاصله زمانی بین انتهای بارانگار تا نقطه عطف آب‌نگار واحد، فاصله زمانی بین مرکز ثقل بارانگار تا مرکز ثقل آب‌نگار واحد، فاصله زمانی بین مرکز ثقل بارانگار تا اوج آب‌نگار واحد، فاصله زمانی بین انتهای بارانگار تا مرکز ثقل آب‌نگار واحد، فاصله زمانی بین انتهای بارانگار تا اوج آب‌نگار واحد و فاصله زمانی بین ابتدای بارانگار تا ابتدای آب‌نگار واحد مد نظر قرار گرفت (شکل ۲).

در مرحله بعد به‌منظور دست‌یابی به‌شیوهٔ تجزیه و تحلیل آماری مناسب برای مدل‌سازی روابط متغیرهای مستقل و وابسته از رگرسیون دو و چند متغیره و پس از تقسیم کل داده‌ها به‌ترتیب به تعداد ۱۶ و ۷ رگبار برای مراحل واسنجی و تأیید استفاده شد. در رگرسیون دو متغیره، ارتباط بین تک‌تک متغیرهای وابسته شامل ۹ ویژگی آب‌نگار واحد و هم‌چنین ۱۲ شاخص زمانی رابط بین بارانگار و آب‌نگار واحد، با متغیرهای مستقل شامل ۱۵ ویژگی از بارانگار به‌شکل دوتایی و پس از تهیه بانک اطّلاعاتی در نرم‌افزار Excel 2003 و SPSS 12 بررسی شد.

تهیه مدل‌های رگرسیونی در واقع از بررسی ارتباط مستقیم متغیرها با یک‌دیگر و یا شکل‌های تغییر یافته آنها و به‌صورت تصادفی و از دو سوم داده‌های موجود (۱۶ رگبار) و در حالت‌های خطی، لگاریتمی، معکوس، درجه دو، درجه سه، ترکیبی، توانی، حالت S، منحنی رشد و نمایی (۷ و ۸) به صورت ارائه شده در زیر مورد بررسی قرار گرفت.

[۱] مدل خطی $Y = b_0 + b_1 x$

[۲] مدل لگاریتمی $Y = b_0 + b_1 Logx$

[۳] مدل معکوس $Y = b_0 + b_1 / x$

[۴] مدل درجه دوم $Y = b_0 + b_1 x + b_2 x^2$

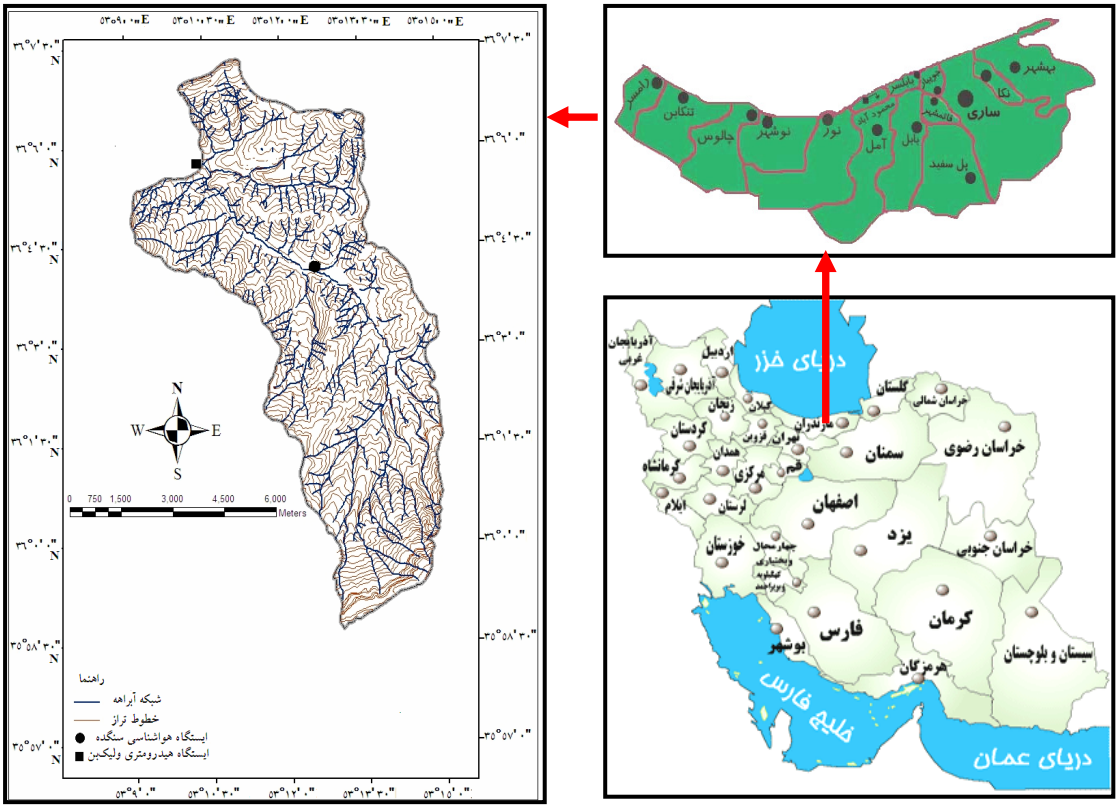
[۵] مدل درجه سوم $Y = b_0 + b_1 x + b_2 x^2 + b_3 x^3$

[۶] مدل ترکیبی $Y = b_0 b_1^{\,x}$

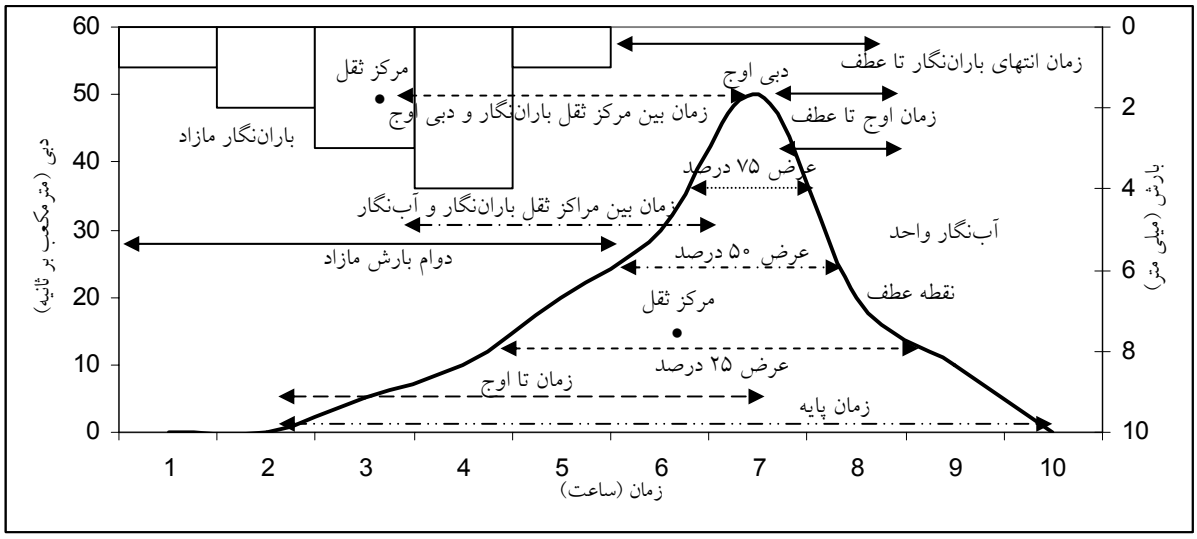
[۷] مدل توانی $Y = b_0 x^{b_1}$

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-06-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1389.14.52.3.8]



شکل ۱. سیمای عمومی و موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی و آب‌سنجی حوزهٔ آبخیز کسیلیان



شکل ۲. نمایش برخی از اجزای مهم بارانگار، آب‌نگار واحد و شاخص‌های رابط بین بارانگار و آب‌نگار واحد رگبار

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-06-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1389.14.52.3.8]

جدول ۱. نتایج حاصل از کاربرد رگرسیون‌های دو و چند متغیره برای شبیه‌سازی مؤلفه‌های آب‌نگار واحد ۲ ساعته با استفاده از متغیرهای باران در حوزهٔ آبخیز کسیلیان

متغیر وابسته	نوع رگرسیون	روش آماری مورد استفاده	ضریب تبیین	سطح معنی‌داری	درصد خطا	
					تخمین	تأیید
زمان پایه	دو متغیره	داده‌های ساده	۰/۵۶	۰/۰۱	۱۴/۴۴	۲۳/۵۵
	چند متغیره	داده تغییر شکل‌یافته/ پیش‌رو	۰/۲۸	۰/۰۳	۴۵/۶۸	۴۵/۱۳
		داده‌های ساده/ پس‌رو	۰/۹۸	۰/۰۰	۰/۵۲	۳۵/۴۸
زمان تا اوج	دو متغیره	داده‌های ساده	۰/۶۷	۰/۰۰	۸۴/۹۲	۷۹/۸۲
	چند متغیره	داده تغییر شکل‌یافته/ پیش‌رو	۰/۳۱	۰/۰۱	۸۳۶/۷۴	۶۵۶/۴۰
		داده‌های ساده/ پس‌رو	۰/۹۲	۰/۰۱	۱۳/۸۴	۸۷/۸۳
دبی اوج	دو متغیره	داده‌های ساده	۰/۵۳	۰/۰۲	۲۷/۶۴	۴۳/۸۳
	چند متغیره	داده تغییر شکل‌یافته/ پیش‌رو	۰/۳۶	۰/۰۵	۲۸/۴۰	۲۵/۷۶
		داده‌های ساده/ پس‌رو	۰/۹۶	۰/۰۱	۵/۳۰	۴۸/۹۱
دبی تا نقطهٔ عطف	دو متغیره	داده‌های ساده	۰/۵۸	۰/۰۱	۲۱/۵۲	۲۵/۵۹
	چند متغیره	داده تغییر شکل‌یافته/پیش‌رو	۰/۳۰	۰/۰۱	۹/۷۲	۱۰/۷۲
		داده تغییر شکل‌یافته/پس‌رو	۰/۹۸	۰/۰۰	۱/۶۳	۴۰/۵۳
فاصله زمانی دبی تا نقطهٔ عطف	دو متغیره	داده‌های ساده	۰/۳۳	۰/۰۲	۵۳/۳۱	۶۴/۴۸
	چند متغیره	داده تغییر شکل‌یافته/ پیش‌رو	۰/۲۸	۰/۰۳	۲۳/۰۳	۳۱/۰۰
		داده تغییر شکل‌یافته/ پس‌رو	۰/۴۲	۰/۰۲	۲۲/۳۹	۱۰/۵۹
عرض ۲۵٪ هیدروگراف	دو متغیره	داده‌های ساده		هیچ رابطه‌ای برقرار نشد.		
	چندمتغیره	داده تغییر شکل‌یافته/ پیش‌رو		هیچ رابطه‌ای برقرار نشد.		
		داده‌های ساده/ پس‌رو	۰/۹۴	۰/۰۰	۸/۱۳	۱۰۱/۸۶
عرض ۵۰٪ هیدروگراف	دو متغیره	داده‌های ساده		هیچ رابطه‌ای برقرار نشد.		
	چند متغیره	داده تغییر شکل‌یافته/ پیش‌رو		هیچ رابطه‌ای برقرار نشد.		
		داده‌های ساده/ پس‌رو	۰/۹۸	۰/۰۱	۳/۴۳	۱۴۶/۰۷
متغیّر وابسته	نوع رگرسیون	روش آماری مورد استفاده	ضریب تبیین	سطح معنی‌داری	درصد خطا	
					تخمین	تأیید
عرض ۷۵٪ هیدروگراف	دو متغیره	داده‌های ساده		هیچ رابطه‌ای برقرار نشد.		
	چند متغیره	داده تغییر شکل‌یافته/پیش‌رو		هیچ رابطه‌ای برقرار نشد.		
		داده‌های ساده / پس‌رو	۰/۵۶	۰/۰۱	۲۳/۹۲	۹۲/۱۰
مرکز ثقل هیدروگراف	دو متغیره	داده‌های ساده	۰/۴۲	۰/۰۰	۵۹/۴۴	۳۲/۸۰
	چند متغیره	داده تغییر شکل‌یافته/ پیش‌رو	۰/۳۷	۰/۰۰	۲۹/۷۳	۲۲/۷۱
		داده تغییر شکل‌یافته/ پس‌رو	۰/۳۴	۰/۰۲	۳۲/۲۷	۲۲/۶۰
انتهای بارش کل تا نقطهٔ عطف هیدروگراف	دو متغیره	داده‌های ساده	۰/۳۵	۰/۰۱	۱۳۱/۱۳	۶۶/۳۹
	چند متغیره	داده تغییر شکل‌یافته/ پیش‌رو	۰/۳۶	۰/۰۱	۲۲/۱۲	۲۷/۴۴
		داده تغییر شکل‌یافته/ پس‌رو	۰/۴۵	۰/۰۲	۲۹/۰۹	۳۷/۳۷
مرکز ثقل بارش کل تا مرکز ثقل هیدروگراف	دو متغیره	داده‌های ساده	۰/۳۸	۰/۰۱	۴۴/۶۵	۸۸/۹۹
	چند متغیره	داده تغییر شکل‌یافته/ پیش‌رو	۰/۲۲	۰/۰۴	۲۳/۷۵	۴۸/۲۲
		داده تغییر شکل‌یافته/ پس‌رو	۰/۲۷	۰/۰۳	۲۳/۷۵	۴۸/۲۲

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-06-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1389.14.52.3.8]

ادامه جدول۱.

مرکز ثقل بارش کل تا اوج هیدروگراف	دو متغیره	داده‌های ساده		هیچ رابطه‌ای برقرار نشد.		
	چندمتغیره	داده تغییر شکل‌یافته/ پیش‌رو	۰/۲۷	۰/۰۴	۴۱/۹۶	۳۴/۱۴
		داده تغییر شکل‌یافته/ پس‌رو	۰/۷۴	۰/۰۰	۱۸/۳۶	۲۸/۹۹
انتهای بارش کل تا مرکز ثقل هیدروگراف	دو متغیره	داده‌های ساده	۰/۳۱	۰/۰۲	۶۹/۳۶	۶۲/۸۲
	چند متغیره	داده تغییر شکل‌یافته/ پیش‌رو	۰/۴۶	۰/۰۱	۲۸/۰۴	۲۶/۹۰
		داده تغییر شکل‌یافته/ پس‌رو	۰/۹۰	۰/۰۰	۳۱/۲۲	۳۱/۵۱
انتهای بارش کل تا اوج هیدروگراف	دو متغیره	داده‌های ساده	۰/۵۲	۰/۰۵	۱۸۷/۶۳	۸۴/۴۳
	چند متغیره	داده تغییر شکل‌یافته/ پیش‌رو	۰/۴۹	۰/۰۱	۲۴/۱۸	۳۱/۹۲
		داده تغییر شکل‌یافته/ پس‌رو	۰/۵۶	۰/۰۱	۲۳/۰۱	۳۹/۷۲
ابتدای بارش کل تا ابتدای هیدروگراف	دو متغیره	داده‌های ساده	۰/۳۸	۰/۰۰	۷۳/۴۱	۱۶۷/۶۸
	چند متغیره	داده‌های ساده/ پیش‌رو	۰/۳۸	۰/۰۱	۴۶/۶۷	۱۹۱/۹۸
		داده تغییر شکل‌یافته/ پس‌رو	۰/۷۹	۰/۰۰	۱۱/۹۷	۳۱/۳۱
انتهای بارش مازاد تا نقطه عطف	دو متغیره	داده‌های ساده	۰/۳۷	۰/۰۱	۷۴/۰۸	۵۷/۴۰
	چند متغیره	داده تغییر شکل‌یافته/ پیش‌رو	۰/۶۶	۰/۰۰	۱۴/۵۱	۲۳/۶۶
		داده تغییر شکل‌یافته/ پس‌رو	۰/۸۷	۰/۰۰	۱۱/۹۱	۲۸/۷۹
مرکز ثقل بارش مازاد تا مرکز ثقل هیدروگراف	دو متغیره	داده‌های ساده	۰/۲۴	۰/۰۵	۶۰/۱۷	۱۰۹/۸۵
	چند متغیره	داده تغییر شکل‌یافته/ پیش‌رو	۰/۳۴	۰/۰۱	۲۰۵/۶۹	۶۶۴/۲۰
		داده تغییر شکل‌یافته/ پس‌رو	۰/۴۹	۰/۰۳	۱۶/۸۲	۴۰/۲۹
مرکز ثقل بارش مازاد تا اوج هیدروگراف	دو متغیره	داده‌های ساده		هیچ رابطه‌ای برقرار نشد.		
	چند متغیره	داده تغییر شکل‌یافته/ پیش‌رو	۰/۳۰	۰/۰۱	۲۱۷/۹۱	۱۳۹۲/۵۴
		داده تغییر شکل‌یافته/ پس‌رو	۰/۹۸	۰/۰۰	۴۱/۹۸	۹۲۲/۶۷
انتهای بارش مازاد تا مرکز ثقل هیدروگراف	دو متغیره	داده‌های ساده	۰/۵۰	۰/۰۴	۴۰/۲۷	۷۲/۲۸
	چند متغیره	داده تغییر شکل‌یافته/ پیش‌رو	۰/۴۴	۰/۰۰	۱۵/۹۴	۳۱/۱۶
		داده تغییر شکل‌یافته/ پس‌رو	۰/۷۲	۰/۰۰	۱۴/۰۴	۳۰/۲۶
انتهای بارش مازاد تا اوج هیدروگراف	دو متغیره	داده‌های ساده	۰/۴۹	۰/۰۴	۱۳۴/۳۶	۴۵۷/۶۸
	چند متغیره	داده تغییر شکل‌یافته/ پیش‌رو	۰/۲۶	۰/۰۴	۳۴/۵۷	۱۴/۰۲
		داده تغییر شکل‌یافته/ پس‌رو	۰/۲۶	۰/۰۴	۳۴/۵۷	۱۴/۰۲
ابتدای بارش مازاد تا ابتدای هیدروگراف	دو متغیره	داده‌های ساده	۰/۲۴	۰/۰۵	۱۰۲/۵۸	۱۱۸/۸۱
	چند متغیره	داده تغییر شکل‌یافته/ پیش‌رو	۰/۴۱	۰/۰۰	۴۴۱/۲۸	۸۵/۲۷
		داده‌های ساده/ پس‌رو	۰/۹۶	۰/۰۰	۴/۴۶	۳۶/۳۶

[۸] مدل S شکل $Y = e^{b_0 + b_1 / x}$

[۹] مدل منحنی رشد $Y = e^{b_0 + b_1 x}$

[۱۰] مدل نمایی $Y = b_0 e^{b_1 x}$

هم‌چنین کارایی رگرسیون چند متغیره برای تأمین هدف تحقیق استفاده شد. در این تحقیق از روش آماری تجزیه و تحلیل بدون عاملی و تجزیه و تحلیل عاملی به‌منظور کاهش تعداد متغیرهای مستقل استفاده گردید. نهایتاً رگرسیون چند متغیره به روش پس‌رو و پیش‌رو اجرا شد. رگرسیون چند متغیره حاصل برای حالت‌های خطی، لگاریتمی، معکوس، توان دوم و توان سوم نیز محاسبه و نهایتاً مدل‌های نهایی با استفاده از آماره‌های

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-06-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1389.14.52.3.8]

ارزیابی انتخاب شدند. در نهایت مدل‌های با ضریب همبستگی بالاتر، خطای تخمین و تائید کمتر و غالباً زیر ۴۰ درصد (رابطه ۱۱)، مجذور میانگین مربعات خطای کمتر (رابطه ۱۲) و ضریب کارایی بالاتر و ترجیحاً بیش از ۶۰ درصد (رابطه ۱۳) به‌عنوان مدل‌های نهایی انتخاب شد (۱، ۷، ۱۷ و ۲۱).

$$RE=\left|\frac{Yo-Ye}{Yo}\right|\times 100 \qquad [11]$$

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=1}(Yo-Ye)^2}{n}} \qquad [12]$$

$$CE=\frac{\frac{1}{n}\sum_{n}^{i=1}(Y_o-\overline{Y}_o)^2-\frac{1}{n}\sum_{n}^{i=1}(Y_o-Y_e)^2}{\frac{1}{n}\sum_{n}^{i=1}(Y_o-\overline{Y}_o)^2} \qquad [13]$$

در روابط بالا RE خطای نسبی به درصد، RMSE مجذور میانگین مربعات خطا، CE ضریب کارایی، Y_o مقدار مشاهده‌ای متغیر، $\overline{Y_o}$ میانگین مقادیر مشاهده‌ای متغیر، Y_e مقدار تخمینی متغیر و n تعداد مشاهدات متغیر وابسته مورد بررسی می‌باشد. در مرحله بعد ضمن تحلیل نهایی نتایج به‌دست آمده در خصوص اختلاف متصوّر تخمین، مدل برتر به‌همراه استدلال‌های منطقی برای منطقه مورد مطالعه ارائه شد.

نتایج

تحقیق فعلی با هدف ارزیابی مقایسه‌ای روش‌های مختلف مدل‌سازی رگرسیونی در تهیه آب‌نگار واحد با استفاده از مؤلفه‌های باران در حوزهٔ آبخیز کسیلیان انجام شد. نتایج ارزیابی نرمال بودن داده‌ها دلالت بر نرمال بودن تمامی داده‌های مورد مطالعه و ضرورت نرمال‌سازی زمان وقوع بیشینه شدت ۳۰ دقیقه‌ای رگبار، زمان وقوع بیشینه شدت ۱۵دقیقه‌ای رگبار برای آب‌نگار واحد ۲ ساعته از طریق لگاریتم‌گیری داشتند. در نهایت از بین بیش از ۵۰۰۰۰ مدل، تعداد ۵۵ مدل به‌دلیل برخورداری از ضریب تبیین معنی‌دار در حد احتمال کمتر از ۵ درصد و عملکرد برتر بر اساس معیارهای ارزیابی انتخاب شدند. نتایج حاصل از مدل‌های مذکور به‌همراه جزئیات مربوطه در جدول ۱ خلاصه شده است. نتایج حاصل از کاربرد تجزیه و تحلیل عاملی و کاهش داده‌های مستقل در رگرسیون چند متغیره و استفادهٔ متعاقب شیوه‌های پیش‌رو و پس‌رو در تمامی حالات منجر به دست‌یابی به مدل‌های با عملکرد کلی نسبی کمتر به‌واسطه مقادیر خطای نسبی و مجذور میانگین مربعات خطای به‌ترتیب بیش از چند ۲۵۶۹۸۰/۹۰ و ۲۱۷۹۴/۴۶ درصد گردیده و لذا از ارائه نتایج آنها خودداری شده است.

بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به‌دست آمده از کاربرد مدل‌های مختلف، میانه خطای تأیید مقادیر حاصل برای کلیّه متغیرهای وابسته با استفاده از رگرسیون دو متغیره، چند متغیره بدون تجزیه و تحلیل عاملی به‌شیوهٔ پس‌رو، با تجزیه و تحلیل عاملی به‌شیوهٔ پس‌رو، بدون تجزیه و تحلیل عاملی به‌شیوهٔ پیش‌رو و بالاخره با تجزیه و تحلیل عاملی به‌شیوهٔ پیش‌رو برای آب‌نگار واحد ۲ ساعته به‌ترتیب ۶۹/۳۴، ۸۷/۷۹، ۳۷/۳۷، ۳۹/۶۴، ۳۷/۳۹ درصد در حوزهٔ آبخیز کسیلیان برآورد شد. با توجّه به جدول ۱ مشخص می‌گردد که کمترین درصد خطای تأیید مربوط به رگرسیون دو متغیره با مقدار عددی ۲۳/۵۵ درصد بوده است. هم‌چنین در رگرسیون چند متغیره در آب‌نگار واحد ۲ ساعته، روش پس‌رو بدون تجزیه و تحلیل عاملی دارای درصد خطای تأیید کمتری (۲۸/۵۱ درصد) نسبت به حالت با تجزیه و تحلیل عاملی بوده است. در حالی‌که روش پیش‌رو دارای خطای تأیید کمتر و در حد ۹۴/۸۷ درصد بوده است. به‌طور کلی در آب‌نگار واحد ۲ ساعته با انجام تجزیه و تحلیل عاملی و کاربرد شیوه پس‌رو، درصد خطای تأیید بیشتر اما در روش پیش‌رو کمتر بوده است.

میزان درصد خطای تخمین در رگرسیون چند متغیره به‌جز در شرایط استفاده از شیوهٔ پیش‌رو، میزان درصد خطای نسبی در آب‌نگارهای واحد ۲ ساعته با انجام روش تجزیه و تحلیل عاملی افزایش پیدا کرده است که با نظرات صادقی و همکاران (۷) مبنی بر عدم توانایی تجزیه و تحلیل عاملی در افزایش دقت

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-06-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1389.14.52.3.8]

مدل‌سازی بارش-روان‌آب در حوزهٔ آبخیز کسیلیان هم‌خوان است، حال‌آن‌که با یافته‌های وفاخواه (۱۴) در تحلیل منطقه‌ای سیلاب و افضلی (۲) در مدل‌سازی منطقه‌ای مؤلفه‌های هیدروگراف واحد مصنوعی با استفاده از پارامترهای فیزیکی حوزهٔ آبخیز هم‌سو نمی‌باشد.

به‌طور کلی تعداد مدل‌های حاصل برای متغیرهای وابسته در شیوهٔ پیش‌رو نسبت به پس‌رو کمتر و تفاوت درصد خطای نسبی تخمین و تأیید نیز کمتر بوده اما روابط حاصل از مشارکت تعداد کمتر متغیرهای مستقل در فرآیند تهیه مدل منجر به تهیه مدل‌های منطقی‌تر گردیده که دلالت بر حذف ارتباط درونی متغیرهای مستقل داشته است. با توجه به نتایج به‌دست آمده، روش رگرسیون دو متغیره کمترین درصد خطای نسبی تأیید نسبت به روش رگرسیون چند متغیره را داشته است که نشان‌دهندهٔ توانایی قابل توجّه مدل‌های رگرسیونی ساده دو متغیره بوده است. یافته مذکور ضمن مغایرت با اظهارات صادقی و همکاران (۷) در تحلیل ارتباط مؤلفه‌های آب‌نگار و باران‌نگار در حوزهٔ آبخیز کسیلیان بر ضرورت مدل‌سازی‌های مناسب و متناسب با متغیرهای مورد بررسی دلالت دارد.

در رگرسیون دو متغیره به‌ترتیب مدل‌های درجه سه و خطی بیشترین توانایی در تعیین مدل‌های مناسب جهت اهداف تحقیق داشته‌اند. هم‌چنین در راستای تأکیدات صادقی و همکاران (۷) و افضلی (۲) توانایی مدل‌های رگرسیون چند متغیره با شیوهٔ پس‌رو در تحلیل رگرسیون چند متغیره به‌خصوص در مورد متغیرهای رابط زمانی بین باران‌نگار و آب‌نگار واحد مورد تأیید قرار گرفت. علاوه بر یافته‌های فوق، ارتباط غیر خطی اغلب روابط دو و چند متغیره در تبیین خصوصیات آب‌نگار واحد ۲ ساعته تأیید شد که با نظرات سینگ (۲۶)، ثقفیان (۲۵) و نیز اظهارات موسوی و همکاران (۱۳) و افضلی (۲) مبنی بر ارتباط غیر خطی متغیرهای هیدرولوژیکی هم‌خوانی دارد.

هم‌چنین بررسی خطاها نشان می‌دهد که خطای تخمین در روابط دو متغیره آب‌نگار واحد از ۱۴/۴۴ تا ۱۸۷/۴۳ و با میانه ۶۴/۷۷ و خطای تأیید از ۲۳/۵۵ تا ۴۵۷/۶۸ درصد برآورد شد. حال‌آن‌که خطای تخمین حاصل از کاربرد رگرسیون چند متغیره بسته به نوع پارامترهای مورد بررسی و نیز روش آماری مورد استفاده از ۰/۵۲ تا ۸۳۶۸/۴ و با میانه از ۱۲/۱۵ تا ۴۳/۸۲ و خطای تأیید از ۲۸/۵۱ تا ۹۲۲/۶۷ درصد بوده است. خطای تأیید برآوردی در روابط چند متغیره نیز بسته به نوع پارامترهای مورد بررسی و هم‌چنین روش آماری مورد استفاده از ۲/۹۵ تا چندین ده‌هزار و با میانه از ۱۵/۸۵ تا ۶۰/۱۷ و خطای تأیید از ۳/۴۵ تا چندین صدهزار درصد متغیر بوده است. با توجه به جدول ۱ بیشترین مشارکت متغیرهای مستقل در رگرسیون دو و چند متغیره به‌ترتیب مربوط به بیشینه شدت ۳۰ دقیقه و زمان وقوع آن و دوام بارش بوده در حالی‌که کمترین آن مربوط به چارک سوم و چهارم است که اصلاً در مدل‌سازی دو متغیره وارد نشده‌اند. این موضوع مشخصاً بر نقش شدت بارندگی بر کنترل روان‌آب مازاد و طبعاً تشکیل آب‌نگار مستقیم و نهایتاً آب‌نگار واحد تأکید داشته است که ضمن توافق با فلسفه‌های حاکم بر تهیه آب‌نگار واحد (۲۶) و نیز تئوری‌های پیشنهادی در رابطه با تولید روان‌آب (۲۷) با نتایج تحقیق صادقی و همکاران (۸) در رابطه با تهیه آب‌نگار سیل با استفاده از مؤلفه مدت زمان بارش مؤثر و مقدار بارش مازاد و زمان وقوع بیشینه ۱۵ دقیقه‌ای در حوزهٔ آبخیز کسیلیان هم‌راستا می‌باشد. در رگرسیون چند متغیره، حالت معکوس هیچ مدلی برای متغیرهای وابسته به‌دست نیامده و به‌طور کلی با لگاریتم‌گیری و بالطبع کوچک‌تر شدن تمامی متغیرها، مدل‌های بهتری به‌دست آمد. در حالی که حالت توان ۳ به‌دلیل بزرگ‌تر شدن تمامی متغیرها، معیارهای ارزیابی مناسب در اکثر موارد به‌دست نیامد. این یافته هم‌چنین بر عدم توانایی رگرسیون‌های درجه دو و بالاتر در رابطه با ارائه روند مشخّص در متغیرهای وابسته دلالت داشته که با تأکیدات و نتایج به‌دست آمده توسط ملچینگ (۲۲) مبنی بر درصد خطای تخمین و تأیید کمتر مدل‌های تغییر شکل‌یافته، ممیکو و رآو (۲۳) و نیز هلوگ و همکاران (۱۹) در این راستا مطابقت دارد. هم‌چنین دامنه خطای زیاد گزارش شده طی تحقیق نیز مؤید ضرورت انتخاب دقیق

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-06-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1389.14.52.3.8]

رگبارها (۷) و دسته‌بندی آنها از لحاظ نوع بارش و یا زمان آنها بوده و به‌این ترتیب انجام تحقیقات گسترده در این خصوص را تأکید می‌نماید.

در جمع‌بندی تحقیق حاضر با هدف بررسی کارایی مدل‌های رگرسیونی حاکم بین مؤلفه‌های مختلف آب‌نگار واحد و بارانگار در حوزهٔ آبخیز معرف کسیلیان می‌توان اظهار نمود که عملکرد مدل‌های مختلف و شیوه‌های تجزیه و تحلیل آماری بسته به نوع متغیر مورد بررسی متفاوت بوده و ضرورت انجام تحقیقات جداگانه و دقیق و هم‌چنین عدم تبعیت صرف از نتایج به‌دست آمده طی تحقیقات گذشته را ایجاب می‌نماید. از طرفی می‌توان اذعان نمود که انتخاب شیوه مناسب مدل‌سازی الزاماً با پیچیدگی روش و شیوهٔ انتخاب شده هم‌خوان نبوده بلکه عملکرد موفق و یا برتر آن از جهات مختلف حائز توجه می‌باشد. به‌این ترتیب ضمن تأکید بر تداوم تحقیقات مشابه در سایر حوزه‌های آبخیز و مقوله‌های مختلف هیدرولوژی، انجام مطالعات گسترده‌تر و معرفی سایر شیوه‌های مدل‌سازی ریاضی از قبیل شبکه عصبی مصنوعی به‌منظور ارزیابی عملکرد آنها و نیز ارائه جمع‌بندی‌های جامع و نهایی پیشنهاد می‌شود.

منابع مورد استفاده

۱. ابریشمی، ح. و ت. محمدی. ۱۳۷۴. *کاربرد تحلیلی رگرسیون*. چاپ سوم، انتشارات دانشگاه تهران.

۲. افضلی، ع. ۱۳۸۶. مدل‌سازی منطقه‌ای مؤلفه‌های هیدروگراف واحد مصنوعی با استفاده از پارامترهای فیزیکی حوزهٔ آبخیز. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشگاه تربیت مدرس، نور.

۳. اسدی، ه . ۱۳۸۷. ارزیابی روش‌های تهیه منحنی‌های زمان- مساحت در تخمین سیلاب حاصل از آبنمود واحد لحظه‌ای در حوزهٔ آبخیز کسیلیان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشگاه تربیت مدرس، نور.

۴. حشمت پور، ع.، م. محسنی‌ساروی، ا. سعدالدین و م. عرفانیان. ۱۳۸۱. بررسی کارایی هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیک و ژئومورفوکلیماتیک در برآورد دبی سیلاب. مجله منابع طبیعی ایران ۵۵ (۱): ۳- ۲۵.

۵. شاه‌محمدی حیدری، ز. و ع. بهنیا. ۱۳۸۴. تعیین مدل منطقه‌ای برآورد سیلاب حداکثر در حوزه‌های فاقد آمار شرق و جنوب شرق جلگه خوزستان. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی ۱۲(۵): ۱۰-۱۶.

۶. صادقی، س. ح. ر. و م. دهقانی. ۱۳۸۵. دقت روش‌های تخمین ضریب ذخیرهٔ آبنمود واحد لحظه‌ای در بازسازی آبنمود واحد سیل. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی ۱۳(۳): ۱۵۲-۱۶۰.

۷. صادقی، س. ح. ر.، ح. ر. مرادی، م. مزین و م. وفاخواه. ۱۳۸۴. کارایی روش‌های مختلف تجزیه و تحلیل آماری در مدل‌سازی بارش- رواناب (مطالعه موردی: حوزهٔ آبخیز کسیلیان). مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی ۱۲(۳): ۸۱-۹۰.

۸. صادقی، س.ح.ر.، م. مزین و ح.ر. مرادی. ۱۳۸۶. تهیه آبنمود با استفاده از اجزای مختلف بارندگی در حوزهٔ آبخیز کسیلیان. منابع طبیعی ایران ۶۰(۱): ۳۳-۴۳.

۹. عبداللهی، خ. ۱۳۸۱. مدل‌سازی رواناب بر اساس ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی برای حوزهٔ آبخیز خانمیرزا با استفاده از GIS. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی آبخیزداری، دانشگاه تربیت مدرس، نور.

۱۰. علیزاده، ا. ۱۳۸۲. *اصول هیدرولوژی کاربردی*. چاپ شانزدهم، انتشارات دانشگاه امام رضا.

۱۱. غیاثی، ن.ق. ۱۳۷۵. واسنجی هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژی و ژئومورفوکلیماتولوژی در حوزهٔ آبخیز امامه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

۱۲. مرید، س. و د. ریاضتی. ۱۳۸۲. مقایسه مدل‌های تحلیل منطقه‌ای سیلاب و بارش- رواناب در شرق استان هرمزگان. مجله علوم و فنون

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-06-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1389.14.52.3.8]

کشاورزی و منابع طبیعی ۱۰(۲): ۱۸۱-۱۹۳.

۱۳. موسوی، س.ف.، م. نکویی‌مهر و م. مهدوی. ۱۳۷۷. بررسی و آزمون تطابق هیدروگراف‌های واحد مصنوعی و طبیعی در حوزهٔ آبخیز سد زاینده رود (زیر حوزه پلاسجان). مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی ۲(۲): ۹۳-۱۰۶.

۱۴. وفاخواه، م. ۱۳۷۸. شناخت عوامل مؤثر در سیلاب به‌منظور مهار آنها با استفاده از تجزیه و تحلیل عاملی در رودخانه قره‌چای. پژوهش و سازندگی ۴۵: ۷۲-۷۵.

15. Cleveland, G.T., D.B. Thompson, X. Fang and X. He. 2008. Synthesis of Unit Hydrographs from a Digital Elevation Model. J. Irrig. and Drain. Eng. 134(2): 212-221.
16. Gray, D. M. 1961. Synthetic unit hydrograph for small watersheds. J. Hydraul. Div. ASCE 87(4): 33-54.
17. Green, I.R.A. and D. Stephenson. 1986. Criteria for comparison of single event model. Hydrol. Sci. J. 31:395-411.
18. Gupta, V.K., E. Waymire and I. Roddriguez-Iturbo. 1986. On Scales Gravity and Network Structure in Basin Runoff. PP. 159-180. *In*: Gupta, V., Rodriguez- Iturbo, I. and Wood. E. (Eds.), Scale Problems in Hydrology. D. Rcidel. Dordrecth. Holland.
19. Helweg, O.J., J. Amorcho and R.H. Finch. 1983. Improvement of nonlinear rainfall-runoff model. J. Hydraul. Div. 108(7):813-822.
20. Jena, S.K. and K.N. Tiwari. 2006. Modeling synthetic unit hydrograph parameters with geomorphologic parameters of watersheds. J. Hydrol. 319: 1-14.
21. Liu, X. and J. Li. 2008. Application of SCS model in estimation of runoff from small watershed in Loess Plateau of China. Chinese Geograph. Sci. 18(3): 235–241.
22. Melching, C.S. 1991. Output Reliability as Guide for Selecting of Rainfall-runoff Models. J. Water Resour. Plan. and Manag. 117(3):91-105.
23. Memikou, M. and A.R. Rao. 1983. Regional Monthly Rainfall-Runoff Model. J. Water Resour. Plan. and Manag. 117(3):383-393.
24. Roddriguez-Iturbo, I. and J. B. Valdes. 1979. The geomorphologic structure of hydrologic response. Water Resour. Res. 15(6):1409-1420.
25. Saghafian, B. 2006. Nonlinear transformation of unit hydrograph J. Hydrol. 330: 596–603.
26. Singh, V.P. 1992. Elementary Hydrology. Economy Edition, New Delhi, India.
27. Subramanya, K. 2001. Engineering Hydrology. Tata McGraw-Hill, USA.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-06-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1389.14.52.3.8]