

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۹/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۰/۱۷

ص ۱-۱۵

تهیه مدل برآورد رسوب روزانه در حوزه آبخیز جنگلی

کجور

- ❖ ذکریا اسدالهی؛ دانشجوی کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس
- ❖ مهدی وفاخواه*؛ دانشیار گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس
- ❖ سید حمید رضا صادقی؛ استاد گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

امروزه، مدل‌های دینامیک، به عنوان مهم‌ترین ابزار بررسی پدیده فرسایش و رسوب‌گذاری، به دلیل دخالت عوامل زیاد و پیچیده‌بودن فرایند این پدیده مد نظر قرار گرفته‌اند. از این‌رو، تحقیق حاضر با هدف مدل‌سازی تغییرات روزانه رسوب حوزه آبخیز کجور، با استفاده از آمار بارندگی، دبی، و رسوب روزانه طی سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۸۹ انجام شد. فرایند مدل‌سازی برای کلیه داده‌ها به صورت یک‌جا و دسته‌بندی ماهانه و فصلی آن‌ها در آشکال خطی و غیرخطی صورت گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که مدل‌های روزانه روابط خطی و غیرخطی مناسبی ارائه نکردند و تقسیم‌بندی ماهانه و فصلی وقایع به دست‌یابی به روابط مناسب‌تری با ضریب تبیین معنی‌دار در سطح پنج درصد و خطای نسبی کمتر از ۴۰ درصد در بین معادلات به دست آمده منجر شد. رسوب روزانه حوزه آبخیز کجور از دبی روز واقعه و چهار روز قبل تأثیر پذیرفت و در ۸۰ درصد معادلات انتخابی ماهانه و فصلی دبی روز واقعه مؤثرترین عامل انتقال رسوب در منطقه بود. در ماه‌های تیر، شهریور، آذر، و اسفند و فصل پاییز مدل‌های غیرخطی و در سایر ماه‌ها و فصول مدل‌های خطی برآش بهتری با داده‌ها داشتند.

واژگان کلیدی: حوزه آبخیز جنگلی کجور، دبی روزانه، رسوب، مدل آماری.

مقدمه

کردند و، با استفاده از رگرسیون گام به گام، از ۱۷ متغیر برای مدل‌سازی استفاده نمودند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که چهار متغیر بارندگی روز واقعه و دو روز پیشین و دبی دو روز پیشین و رسوب روز پیشین متغیرهای مهمی هستند [۹]. در مطالعه‌ای دیگر، مدل دینامیک بارش-رواناب و تولید رسوب را برای حوزه آبخیز رودخانه رامگانگای هیمالیا در کشور هند تهیه کردند. داده‌های ورودی مدل آن‌ها عبارت بود از دبی همان روز و یک و دو روز قبل و رسوب روزانه یک و دو روز قبل. مقایسه نتایج شبیه‌سازی با مقادیر واقعی نشان‌دهنده دقت بالای مدل دینامیک غیرخطی تهیه شده بود [۱۰]. در پژوهشی، روشی مبتنی بر سامانه اطلاعات جغرافیایی را برای محاسبه رسوب‌دهی و تغییرات زمانی آن در طول رویدادهای رگبار منفرد، با استفاده از داده‌های سه حوزه آبخیز در هندوستان، پیشنهاد و آزمایش کردند. این روش پیشنهادی تخمین‌های رضایت‌بخشی از تغییرات زمانی رسوب‌دهی در طول رویدادهای بارندگی و رسوب‌دهی کل هر رگبار ارائه کرد [۸]. در پژوهشی دیگر، برای پیش‌بینی تولید رسوب، از رگرسیون و شبکه عصبی مصنوعی در حوزه آبخیز بانهای^۱ هند استفاده کردند. در مطالعه آن‌ها عوامل ورودی برای پیش‌بینی تولید رسوب عبارت بود از عوامل هیدرولوژیکی (بارش، دبی، و غلظت رسوب) و فیزیوگرافی. نتایج هر دو مدل نشان داد که عوامل دبی همان روز و تراکم زهکشی حوزه آبخیز، از بین سایر عوامل، مهم‌ترین عوامل در تولید رسوب بودند [۲۱]. در مطالعه‌ای، در بررسی تغییرپذیری زمانی رابطه میان بارش، دبی، و غلظت رسوب معلق در یک حوزه آبخیز کوهستانی در مدیترانه، ۹۱ سیلان به وقوع پیوسته در فاصله زمانی ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۳ را ارزیابی کردند و مشاهده نمودند که نسبت میان دبی جریان و حداقل غلظت رسوب

پدیده فرسایش و رسوب یکی از پیچیده‌ترین فرایندهای طبیعی است و عوامل زیادی در آن دخیل است و شناخت کامل عوامل مؤثر بر آن ضروری است [۲]. از طرفی، تعداد کم ایستگاه‌های رسوب‌سنگی در کشور و تعداد کم نمونه‌برداری‌ها جزء مشکلات همیشگی مطالعات رسوب است [۱۹]. از این رو، تهیه و ارائه روش‌ها و یا مدل‌های مناسب تخمین‌گر ضروری به نظر می‌رسد. مدل‌های تخمین رسوب شامل مدل‌های رگرسیونی^۱، دینامیکی^۲، پارامتری^۳، احتمالی^۴، و رسوب‌نمود^۵ است. از مجموعه موارد مذکور، مدل‌های دینامیک یا مدل‌های وابسته به زمان (حافظه‌دار) مدل‌هایی هستند که متغیر زمان به عنوان یکی از ورودی‌های مهم در آن‌ها تلقی می‌شوند و این مدل‌ها تأثیر هر یک از عوامل مؤثر در تولید رسوب بر اساس زمان وقوع را نشان می‌دهند [۶]. بر همین اساس، استفاده از مدل‌های دینامیک در مدل‌سازی هیدرولوژی در مقیاس آبخیز ضروری است، زیرا روابط بین متغیرهای هیدرولوژی از قبیل بارندگی، رواناب، و تولید رسوب در سیستم آبخیز دینامیک است. در همین زمینه، در رودخانه رامگانگا^۶ واقع در حوضه نئولای^۷ هند اثر سه واقعه پژوهشی، مدل خطی دینامیک تولید رسوب را بر اساس فرایند رواناب، بارندگی، و رسوب ارائه کردند و اثر دبی و رسوب روزانه را تا سه روز قبل در تولید رسوب مؤثر دانستند [۱۳]. در مطالعه‌ای، از مدل دینامیک روزانه برای برآورد رسوب‌دهی روزانه حوزه آبخیز رودخانه رامگانگای هیمالیا در هند استفاده

-
1. Regression model
 2. Dynamic model
 3. Parametric model
 4. Stochastic model
 5. Sedimentgraph model
 6. Ramaganga
 7. Naula

داده‌های مورد استفاده ایشان در مدل‌سازی شامل دبی و رسوب روزانه و دبی و رسوب یک روز قبل بود. ایشان به این نتیجه رسید که مدل نروفازی با استفاده از دبی روزانه تخمین بهتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد [۷]. در پژوهشی دیگر، به پیش‌بینی رسوب معلق روزانه با استفاده از مدل موجک^۱ و نروفازی در نیومکزیکوی^۲ امریکا پرداختند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که مدل موجک و نروفازی نتایج بهتری نسبت به مدل سنجه رسوب نشان می‌دهد. داده‌های ورودی مدل نروفازی رسوب و دبی به ترتیب یک تا سه و یک تا دو روز قبل بودند، که مدل نروفازی با ترکیب رسوب یک، دو، و سه روز قبل بهترین نتیجه را نسبت به سایر ترکیب‌های ورودی به این مدل نشان داد. آنان کارایی بالاتر این مدل را، نسبت به منحنی سنجه، برآورد دقیق‌تر مقادیر پایین و بالای رسوب دانستند [۱۵]. در مطالعه‌ای، مدل‌سازی دینامیک در حوزه آبخیز کسیلیان انجام شد. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که رسوب روزانه حوزه آبخیز مذکور از رسوب روزانه، بارش و دبی به ترتیب حداقل تا نه، ده، و ده روز قبل متمادی قبل تأثیر پذیرفته است [۱۹]. تخمین دبی رسوب با استفاده از رگرسیون چندمتغیره در حوزه آبخیز رودخانه آجی‌چای با استفاده از دبی و رسوب روزانه انجام شد. داده‌های ورودی شامل دبی روز واقعه و دبی روزهای قبل بود. نتایج نشان داد دبی روز واقعه مهم‌ترین عامل است و دبی تا شش روز قبل در مدل‌سازی مؤثر است [۱۷]. از بررسی سوابق تحقیق می‌توان استنباط نمود که برای تهیه مدل رسوب روزانه می‌توان از روش‌های متعددی استفاده کرد که هر یک از این روش‌ها نیازمند ورودی‌های متفاوتی برای تهیه مدل است. با توجه به وجود داده‌های دقیق اندازه‌گیری شده طی سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۸۹ در

معلق در مقیاس رگبار، از لحاظ آماری، معنی دار است، ولی غلظت رسوب معلق منحصراً وابسته به دبی نیست. آن‌ها بیشترین همبستگی را میان حجم رسوب و حجم رواناب و حجم رسوب و دبی اوج در طی فصل خشک مشاهده کردند [۱۱]. در چین به مدل‌سازی رسوب معلق با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، رگرسیون چندمتغیره، و منحنی سنجه رسوب پرداختند، به طوری که متغیرهای مستقل مورد بررسی شامل میانگین بارندگی، دما، شدت بارش، و دبی است که مدل با ورودی میانگین بارندگی، دما، و دبی همان روز دارای بیشترین کارایی، از لحاظ پارامترهای مورد بررسی، شناخته شد. همچنین آن‌ها شبکه عصبی مصنوعی را مدل بهتر معرفی کردند [۲۴]. در مطالعه‌ای، به مدل‌سازی رسوبات معلق با استفاده از رگرسیون چندمتغیره، منحنی سنجه رسوب، و الگوریتم ژنتیک پرداختند. در این مطالعه کارایی بیشتر مدل‌سازی بر اساس الگوریتم ژنتیک تأیید شد. داده‌های ورودی برای مدل‌سازی آن‌ها عبارت بود از دبی روز واقعه و دبی و رسوب یک و دو روز قبل. در مطالعات آن‌ها بر اساس رگرسیون چندمتغیره دبی روز واقعه و دبی و رسوب یک روز قبل به ترتیب دارای اهمیت بالاتری بودند [۳]. در پژوهشی، با استفاده از رگرسیون و الگوریتم ژنتیک در رودخانه می‌سی‌پی^۳، بر اساس داده‌های دبی و رسوب روزانه، به عنوان ورودی مدل، اقدام به پیش‌بینی بار رسوب کرد. ایشان کارایی بهتر الگوریتم ژنتیک را در پیش‌بینی بار رسوب با استفاده از ۳۶۵ داده هم‌زمان دبی و رسوب تأیید نمود و این کارایی بهتر الگوریتم ژنتیک نسبت به رگرسیون را در پیش‌بینی صحیح‌تر داده‌های با مقدار بالا دانست [۱]. در مطالعه‌ای، در ترکیه، به مقایسه مدل‌های مختلف شبکه عصبی مصنوعی، نروفازی، منحنی سنجه، و رگرسیون در پیش‌بینی بار معلق رسوبات پرداخت.

2. Wavelet model

3. New Mexico

1. Mississippi

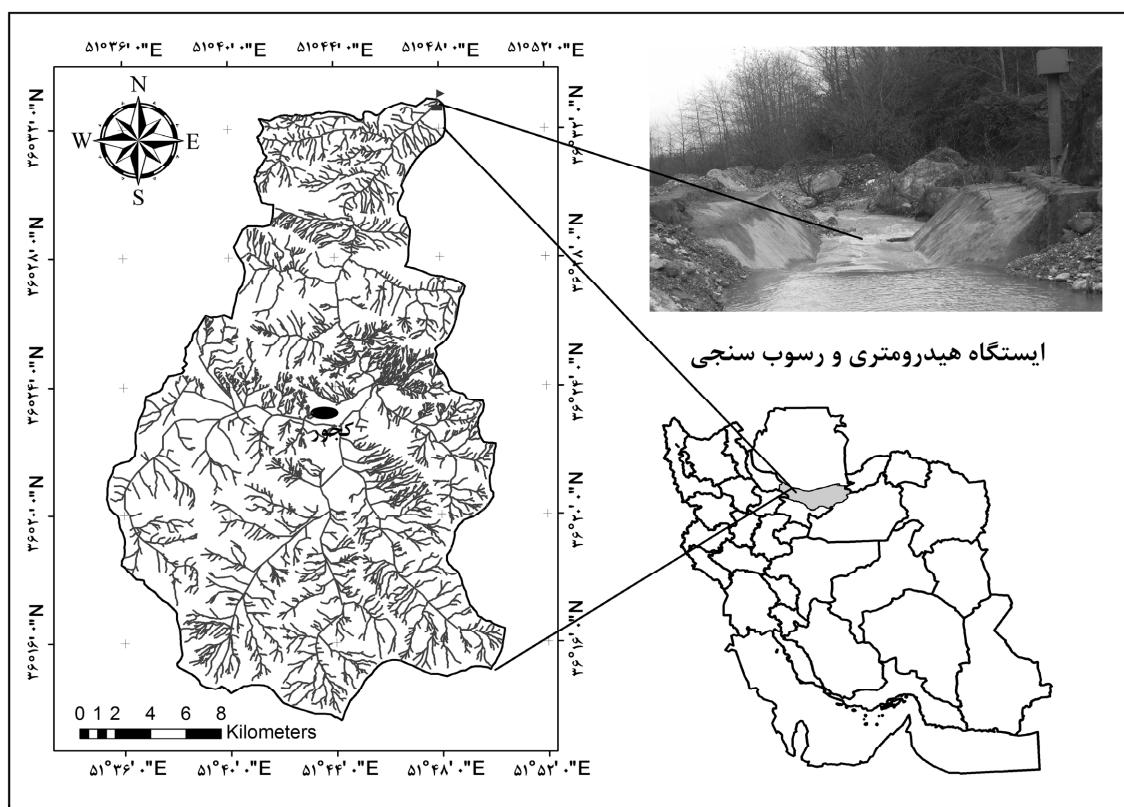
جغرافیایی "۳۵°۰۰' تا "۵۱°۰۰' شرقی و عرض‌های جغرافیایی "۳۰°۰۰' تا "۳۶°۳۰' شمالی واقع شده است. حداقل و حداکثر ارتفاع حوزه آبخیز به ترتیب ۲۵۶ و ۳۴۰۵ متر از سطح آب‌های آزاد است. اکثر دامنه‌ها در جهت شمال غربی-شمال شرقی قرار گرفته‌اند [۱۲]. گردیان بارندگی در حوزه آبخیز مورد مطالعه منفی است و در بخش ارتفاعات و در منطقه کجور به حدود ۲۴۰ میلی‌متر تقلیل می‌یابد. محیط، شیب متوسط، طول بزرگ‌ترین آبراهه، و زمان تمرکز حوزه آبخیز مورد مطالعه به ترتیب ۱۱۷ کیلومتر، ۳۴ درصد، ۴۵ کیلومتر، و ۹/۱۹ ساعت برآورده شده است [۱۲]. شکل ۱ موقعیت حوزه آبخیز کجور در شمال ایران را نشان می‌دهد.

حوزه آبخیز جنگلی کجور، هدف از این تحقیق استفاده از رگرسیون خطی و غیرخطی برای مدل‌سازی و آزمون مدل برآورده رسوب به صورت روزانه، ماهانه، و فصلی در حوزه آبخیز مذکور و مقایسه آن‌ها با همدیگر با استفاده از رسوب، بارندگی، و رواناب روزانه به عنوان ورودی است. تحقیق حاضر، با استفاده از مدل‌سازی، سعی در تخمین مناسب رسوب خروجی حوزه آبخیز کجور دارد و همچنین شناسایی میزان تأثیرگذاری عوامل متغیر مؤثر در رسوب دهد.

روش‌شناسی

منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز کجور یکی از آبخیزهای البرز مرکزی در ارتفاعات جنگلی کجور است که در بین طول‌های



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه و محل نمونه‌برداری

وزن فویل‌های اولیه، وزن رسوب نمونه برحسب گرم در لیتر محاسبه شد.

تهیه مدل تخمین رسوب روزانه

کلیه داده‌های مورد نیاز برای تهیه مدل—شامل آمار روزانه بارندگی، دبی، و رسوب—پس از ویرایش به محیط ۲۰۰۷ Excel وارد شد و صحت داده‌ها بررسی و در صورت نیاز اصلاح گردید. همچنین، بازسازی داده‌های ناقص انجام شد. برای تهیه مدل مناسب تخمین رسوب روزانه، به منظور تعیین تعداد روزهای مناسب تأخیر برای مدل‌سازی، خودهمبستگی جزئی^۲ داده‌های رسوب روزانه و همچنین همبستگی متقطع^۳ بین داده‌های بارندگی و رسوب روزانه و داده‌های دبی و رسوب روزانه با کمک نرم‌افزار Minitab ۱۴ به‌دست آمد.

مدل خطی

برای تهیه مدل نخست ساختار مدل به صورت خطی در نظر گرفته شد. ساختار مدل خطی به صورت رابطه ۱ است.

رابطه ۱

$$Y_t = A_0 + \sum_{i=1}^{t-1} A_i Q_{t+i-i} + \sum_{i=1}^t B_i Y_{t-i}$$

میزان پارامترهای مدل (A_0 ، A_i ، و B_i) به وسیله رگرسیون چندمتغیره تعیین می‌شود. به منظور تهیه مدل خلاصه‌تر و تعیین متغیرهای بالاترین مؤثر در تولید رسوب از رگرسیون گام به گام^۴ استفاده شد [۴]. توضیح این نکته لازم است که برای تهیه مدل‌های خطی رابطه ۱ سه نوع ساختار مدل در نظر گرفته شد، به طوری که مدل در مرحله اول فقط با استفاده از ورود داده‌های دبی مربوط به روز مورد نظر تا دبی ده روز پیش، و در مرحله دوم فقط با استفاده

2. Partial autocorrelation

3. Cross Correlation

4. Stepwise

روش تحقیق

به منظور اجرای تحقیق حاضر، بارندگی روزانه از تنها ایستگاه هواشناسی، که در حوزه آبخیز کجور و اطراف آن قرار دارد، به نام ایستگاه هواشناسی کجور دریافت شد. که تقریباً در مرکز ثقل آبخیز و روستای کجور واقع است. داده‌های این ایستگاه را اداره هواشناسی استان مازندران جمع‌آوری می‌کند. نمونه‌برداری روزانه با حضور در حوزه آبخیز از جریان آب رودخانه در محل ایستگاه هیدرومتری موجود و از کرانه چپ صورت گرفت. رسوب معلق با استفاده از بطريق دولیتری و به روش انگراسیون عمقی نمونه‌برداری شد [۵، ۱۹]. هم‌زمان با برداشت هر نمونه رسوب، دبی جریان رودخانه نیز با اندازه‌گیری سرعت، قرائت اشل، و اندازه‌گیری سطح مقطع انجام شد. خصوصیات هر نمونه رسوب—شامل تاریخ، ساعت، شماره نمونه، و اشل—ثبت گردید. پس از نمونه‌برداری، ظروف حاوی آب و رسوب به آزمایشگاه منتقل شد. برای اندازه‌گیری غلظت رسوب از روش تخلیه آب^۱ استفاده شد [۲۲]. در این روش نخست یک لیتر نمونه آب و رسوب را درون بشر می‌ریزند، سپس، آن را به مدت ۴۸ ساعت به حالت سکون نگه می‌دارند تا در این زمان رسوبات موجود آب در کف بشر تنشیش شود. پس از این مدت، به آرامی به تخلیه آب بالای رسوبات می‌پردازند. خالی کردن آب بالای نمونه تا حدی انجام می‌گیرد که رسوبات موجود در کف ظرف جدا نشود و به همراه آب خارج نشود [۲۰]. پس از خالی کردن آب اضافی، رسوبات موجود در کف ظرف را با آب مقطمر می‌شویند و درون فویل‌هایی که از قبل توزین شده است می‌ریزند و در آون در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک می‌کنند [۱۴]. با توزین نمونه‌های فویل همراه رسوب و کسرنامودن

1. Decetation

رابطه ۲

$$RE = \left| \frac{Y_o - Y_e}{Y_o} \right| \times 100$$

رابطه ۳

$$R^* = \frac{\sum_{i=1}^n ((Y_o - Y_{AVE-o}) \times (Y_e - Y_{AVE-e}))^*}{\sum_{i=1}^n (Y_o - Y_{AVE-o})^* \times \sum_i^n (Y_e - Y_{AVE-e})^*}$$

رابطه ۴

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

که در روابط بالا Y_o مقدار رسوب روزانه مشاهده‌ای است، Y_e مقدار رسوب روزانه تخمینی، n تعداد داده‌ها، Y_{AVE-e} میانگین رسوب روزانه تخمینی، و Y_{AVE-o} میانگین رسوب روزانه مشاهده‌ای. مقادیر $RMSE$ و R^* میزان اریبی را نشان می‌دهند و در حالت ایده‌آل باید به ترتیب مساوی صفر و یک یا منفی یک باشند. مقادیر قابل توجه مثبت $RMSE$ و کمتر از یک یا بیشتر از منفی یک R^* نشان‌دهنده برآورد بیشتر یا کمتر از مقدار واقعی‌اند.

تأیید مدل‌ها

در تحقیق حاضر، از کل داده‌ها در حدود دو سوم برای مدل‌سازی و در حدود یک سوم برای تأیید مدل کنار گذاشته شد و، پس از مدل‌سازی، از این داده‌ها برای ارزیابی و تأیید نهایی با محاسبه خطای نسبی، ضریب تبیین، و مجذور میانگین مربعات خطا استفاده گردید [۵].

نتایج و بحث

با توجه به روش تحقیق، نخست خودهمبستگی جزئی داده‌های رسوب روزانه (شکل ۲) و همبستگی متقطع بین داده‌های بارندگی و رسوب روزانه و داده‌های دبی و رسوب روزانه (جدول ۱) به‌دست آمد.

از رسوب مربوط به روز مورد نظر تا رسوب پنج روز پیش، و در مرحله سوم دبی مربوط به روز مورد نظر تا دبی ده روز پیش و رسوب مربوط به روز مورد نظر تا رسوب پنج روز پیش اجرا گردید. در نهایت، به منظور دست‌یابی به بهترین مدل یا مدل‌های روزانه رسوب، کلیه فرایندهای تجزیه و تحلیل برای ماه‌ها و فصول مختلف سال نیز انجام شد [۱۹]. برای مدل‌های ماهانه، نخست مجموع داده‌های روزانه هر ماه در سال‌های مورد بررسی برای مرحله مدل‌سازی محاسبه شد و میانگین آن‌ها به‌دست آمد. سپس، تأخیر لازم در داده‌ها داده شد و بهترین مدل دینامیک در هر ماه تهیه شد. برای مدل فصلی نیز نخست مقادیر میانگین سه ماه هر فصل برای مرحله مدل‌سازی به دنبال هم قرار داده شد و با استفاده از روش ذکر شده مدل رسوب بر اساس این مقادیر تهیه شد.

مدل غیر خطی

علاوه بر تهیه مدل‌های خطی، مدل‌های غیرخطی به صورت لگاریتمی و توانی نیز تهیه شد [۹].

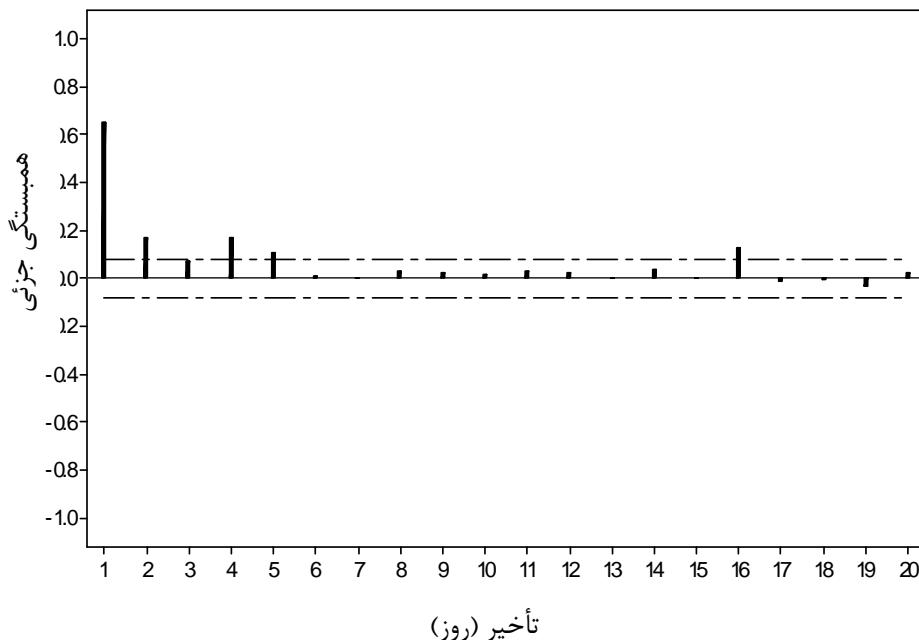
بررسی کارایی مدل‌ها

در هر مرحله با استفاده از معیارهای کمی خطای نسبی^۱ (RE)، کمتر از ۴۰ درصد ضریب تبیین^۲ (R²) معنی‌دار در سطح کمتر از ۵ درصد و ریشه میانگین مربعات خطای^۳ (RMSE) کمتر کارایی مدل‌ها مشخص گردید [۵]. روابط ۲ تا ۴ به ترتیب نحوه محاسبه خطای نسبی، ضریب تبیین، و ریشه میانگین مربعات خطای را نشان می‌دهد.

1. Relative error

2. Determination coefficient

3. Root mean sSquared error



شکل ۲. همبستگی جزئی و محدوده‌های معنی‌داری برای رسوب روزانه

جدول ۱. همبستگی متقطع بین داده‌های بارندگی و رسوب روزانه و داده‌های دبی و رسوب روزانه

متغیر / تأخیر (روز)	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
بارندگی و رسوب روزانه	-۰.۰۱۶	-۰.۰۲۰	-۰.۰۱۷	-۰.۰۲۰	-۰.۰۲۰	-۰.۰۲۰	-۰.۰۲۰	-۰.۰۲۱	-۰.۰۲۲	۰.۰۳۱	۰.۰۲۰
دبی و رسوب روزانه	۰.۴۶۴	۰.۳۸۰	۰.۳۳۴	۰.۳۰۴	۰.۲۶۰	۰.۲۴۵	۰.۲۵۵	۰.۲۳۱	۰.۲۴۶	۰.۲۲۵	۰.۲۲۰

و غلظت رسوب معلق به تعداد ۶۲۵ عدد طی دوره اندازه‌گیری (مهر ۱۳۸۶ تا خرداد ۱۳۸۹) ارائه شده است.

مدل‌های مناسب روزانه

از بین مدل‌های خطی و غیرخطی تهیه شده، مدل خطی (رابطه ۶) با ضریب تبیین ۰.۸۰، خطای نسبی ۰.۵۷ درصد، و ریشه میانگین مربعات خطای برابر ۰.۲۵ گرم در لیتر مناسب‌ترین مدل است.

رابطه ۶

$$Y_t = 0.758Q_t - 0.129Q_{t-4} - 0.064$$

در این رابطه Q_t و Q_{t-4} دبی بر حسب متر مکعب بر ثانیه به ترتیب در روزهای t و $t-4$ رسوب معلق در روز t بر حسب گرم در لیتر است. این رابطه نیز با توجه به خطای نسبی بالاتر از ۰.۴۰ درصد رابطه

با توجه به شکل ۲، تعداد روزهای تأخیر مناسب رسوب روزانه ۵ روز است. همچنین، بر اساس جدول ۱، همبستگی معنی‌داری بین رسوب روزانه و بارندگی روزانه وجود ندارد، به همین دلیل، در مراحل مدل‌سازی از بارندگی به عنوان ورودی استفاده نگردید. در رابطه با دبی روزانه، با توجه به جدول ۱، تأخیر بیشتر از ده روز را پیشنهاد می‌نماید. با توجه به بالارفتن تعداد متغیرهای مستقل تعداد تأخیر ده روز دبی روزانه برای مدل‌سازی در نظر گرفته شد. با توجه به این تعداد متغیرهای ورودی، شکل تابع به صورت رابطه ۵ خواهد شد.

رابطه ۵

$$Y = f(Q_1, Q_{t-1}, \dots, Q_{t-5}, Y_{t-5}, \dots, Y_{t-1})$$

در جدول ۲ آماره‌های توصیفی کلیه داده‌های دبی

عوامل مختلف دخیل در چرخه هیدرولوژیک از قبیل تغییر در وضعیت پوشش گیاهی، نوع نزولات جوی، و تغییرات غیرطبیعی رسوب رودخانه بر اثر برداشت شن و ماسه در ماههای مختلف است.

مناسبی نیست. از بررسی نتایج به دست آمده از مدل‌های روزانه مشخص شد که مدل‌های روزانه روابط خطی و غیرخطی مناسبی ارائه نکرده‌اند. این موضوع نمایانگر اختلاف در روند تولید رسوب طی فصول و ماههای مختلف است که ناشی از تأثیر سایر

جدول ۲. آماره‌های توصیفی دبی و غلظت رسوب معلق در حوزه آبخیز کجور

پایه زمان	رواناب											
	دبی (متر مکعب بر ثانیه)						غلظت رسوب معلق (گرم در لیتر)					
	تعداد	حداقل	میانگین	انحراف معیار	تعداد	حداقل	میانگین	انحراف معیار	تعداد	حداقل	میانگین	انحراف معیار
فروردين	۲۰	۰,۴۹	۱,۸۰	۰,۳۰	۰,۹۱	۰,۱۳	۰,۱۷	۰,۵۴	۰,۱	۲۰	۰,۱۷	۰,۰۳
اردبیهشت	۴۶	۰,۱۹	۱	۰,۱۵	۰,۶۲	۰,۲۴	۰,۴۵	۰,۷۸	۰,۱۷	۲۷	۰,۱۷	۰,۰۶
خرداد	۴۲	۰,۱۵	۰,۵۱	۰,۱۴	۰,۳۰	۰,۱۴	۰,۳۶	۰,۵۱	۰,۱۵	۲۳	۰,۱۵	۰,۰۱
شهریور	۱۸	۰,۱۸	۰,۱۹	۰,۰۰۶	۰,۱۷	۰,۱۹	۰,۱۸	۰,۱۸	۰,۱۸	۸	۰,۱۸	۰,۰۰۴
مهر	۲۱	۰,۱۴۳	۰,۷۲	۰,۰۸	۰,۵۹	۰,۰۸	۰,۳۲	۰,۹۸	۰,۱۷	۲۶	۰,۱۷	۰,۰۱۳
آبان	۴۰	۰,۱۷	۱,۰۶	۰,۳۹	۰,۸۳	۰,۳۹	۰,۳۲	۰,۹۸	۰,۱۷	۲۶	۰,۱۷	۰,۰۳۳
آذر	۳۴	۰,۲۰	۱,۱۴	۰,۳۷	۰,۳۷	۰,۱۷	۰,۱۹	۰,۳۷	۰,۲۰	۳۴	۰,۲۰	۰,۰۰۷
دی	۴۶	۰,۲۵	۰,۸۸	۰,۱۶	۰,۴۶	۰,۱۶	۰,۲۰	۰,۳۷	۰,۲۵	۲۵	۰,۲۵	۰,۰۲۰
بهمن	۴۶	۰,۱۳	۱,۹۰	۰,۴۲	۰,۴۲	۰,۱۳	۰,۱۲	۰,۴۴	۰,۱۳	۲۲	۰,۱۳	۰,۰۱۵
اسفند	۵۱	۰,۶۹	۱,۷۶	۰,۱۳	۱,۱۳	۰,۱۳	۰,۱۱	۰,۲۰	۱۱۱	۱۱۱	۰,۲۰	۰,۰۱۰
پايز	۱۱۱	۰,۱۱۴	۱,۱۴	۰,۱۴	۰,۱۴	۰,۱۱۴	۰,۱۱۴	۰,۱۴	۰,۱۲	۳۴	۰,۱۲	۰,۰۹۰
زمستان	۱۵۴	۰,۱۳	۴,۱۳	۰,۲۵	۴,۱۳	۰,۱۳	۰,۹۹	۰,۲۸	۰,۶۶	۶۰	۰,۱۳	۰,۰۴۶
بهار	۱۱۱	۰,۱۸۰	۱,۸۰	۰,۲۶	۰,۵۷	۱,۸۰	۰,۲۱	۰,۲۱	۰,۱۱	۶۶	۰,۱۱	۰,۰۹
تابستان	۵۸	۰,۳۳	۰,۳۳	۰,۳۱	۰,۲۱	۰,۳۳	۰,۲۱	۰,۳۳	۰,۱۴	۳۰	۰,۱۴	۰,۰۱۸
روزانه	۴۲۵	۰,۱۵	۴,۱۳	۰,۶۳	۰,۵۷	۴,۱۳	۰,۱۵	۰,۶۰	۰,۰۶	۲۰۰	۰,۱۵	۰,۰۲۹
تائيد	۲۰۰	۰,۱۷۶	۱,۷۶	۰,۳۴	۰,۳۴	۱,۷۶	۰,۱۵	۰,۱۵	۰,۰۶	۲۰۰	۰,۱۵	۰,۰۳۰

مدل‌های مناسب ماهانه

جدول ۳ مدل‌های مناسب ماهانه را نشان می‌دهد.

جدول ۳. مدل‌های مناسب رسوب روزانه در مقیاس ماهانه در حوزه آبخیز کجور

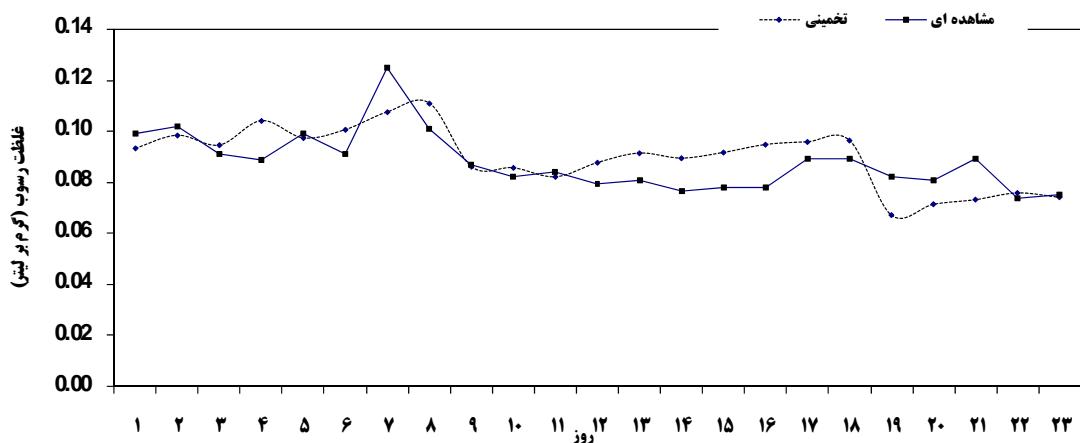
مرحله تایید							پایه زمانی	نوع مدل	رابطه
ریشه میانگین مربعات خطای مربعات خطای نسبی (%) تبیین	ضریب تبیین	معادله							
۰,۰۴	۳۸	۰,۰۲	$Y_t = +/۱۶۸Y_{t-۲} - /۲۵۳Y_{t-۴} + /۳۶۴Y_{t-۶} + /۰,۰۸۱$	۷	خطی	فروردين			
			مدلی انتخاب نگردید.			اردیبهشت			
۰,۰۱	۹	۰,۴۰*	$Y_t = -/۰,۰۹Q_{t-۱} - /۱۶۹Q_t + /۰,۱۸۸$	۸	خطی	خرداد			
۰,۰۳	۱۱	۰,۰۵	$Y_t = +/۰,۵۲\log Y_{t-۱} + /۰,۴۴\log Y_{t-۴} + /۰,۲۳۶$	۹	غیرخطی	تیر			
			به دلیل تعداد کم داده‌ها مدلی تهیه نشد.			مرداد			
۰,۹۸	۲۳	۰,۰۱	$Y_t = -/۲۷۷\log Q_{t-۱} + /۶۶۴\log Q_{t-۶} + /۹۹۸\log Q_t + /۸۴۵$	۱۰	غیرخطی	شهریور			
			به دلیل تعداد کم داده‌ها مدلی تهیه نشد.			مهر			
۰,۰۹	۲۸	۰,۷۳**	$Y_t = +/۵۸۹Y_{t-۱} + /۰,۱۷۵$	۱۱	خطی	آبان			
۰,۰۳	۱۶	۰,۸۷**	$Y_t = +/۲Q_{t-۸} + /۳۳۵Q_t + /۱۱۲$	۱۲	غیرخطی	آذر			
۰,۱۱	۳۴	۰,۷۵**	$Y_t = +/۸۵۹Q_t - /۰,۱$	۱۳	خطی	دی			
۰,۰۳	۱۱	۰,۷۹**	$Y_t = +/۳۳۸Y_{t-۱} + /۷۶۸Q_t - /۰,۲۸$	۱۴	خطی	بهمن			
۰,۱۲	۲۸	۰,۰۶	$Y_t = +/۷۲۲\log Q_{t-۵} + /۷۴۸\log Q_t + /۰,۲$	۱۵	غیرخطی	اسفند			

* در سطح پنج درصد و ** در سطح یک درصد معنی‌دار است. در کلیه روابط ارائه شده Q دبی روزانه بر متر مکعب بر ثانیه است، Y رسوب معلق گرم در لیتر، t نشان‌دهنده روز مورد نظر. اعداد ارائه شده نیز دلالت بر تعداد روزهای قبل از روز واقعه دارند.

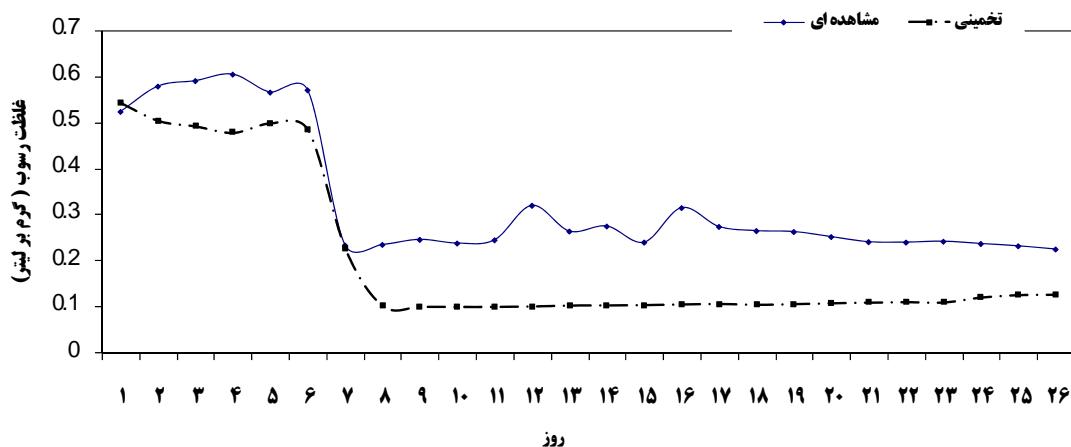
مورد استفاده در مدل‌سازی بیان کرد که اهمیت مدل‌سازی با تعداد سال‌های نمونه‌برداری بالا را نشان می‌دهد.

در خردادماه مدل خطی رابطه ۸ (جدول ۳) دارای خطای نسبی کمتر از ۴۰ درصد، ریشه میانگین مربعات خطای (RMSE) پایین، و ضریب تبیین معنی‌دار در سطح پنج درصد است که به عنوان مدل مناسب انتخاب گردید. در این مدل دبی روز واقعه و ده روز قبل در معادله مؤثر است. همچنین، با توجه به شکل ۳، در این مدل حداقل مقدار خطای ۲۱ درصد مربوط به رسوب روز نوزدهم (۰,۰۷۱ گرم در لیتر) را به مقدار ۰,۰۹۴ گرم در لیتر کمتر پیش‌بینی کرده است.

با توجه به جدول ۳، همه مدل‌های ماهانه دارای خطای نسبی کمتر از ۴۰ درصدند، به طوری که در چهار ماه- فروردین، تیر، شهریور، و اسفند- روابط دارای خطای نسبی کمتر از ۴۰ درصد و ریشه میانگین مربعات خطای کمی بوده، ولی ضریب تبیین پایینی دارند که در سطح یک و پنج درصد معنی‌دار نیستند. به همین دلیل، مدل‌های استخراج شده برای این ماه‌ها مورد پذیرش قرار نگرفت. در اردیبهشت‌ماه به دلیل بالابودن خطای نسبی مدل‌ها در مرحله تأیید مدلی به عنوان مدل مناسب انتخاب نشد. دلیل بالابودن خطای نسبی این مدل‌ها در اردیبهشت‌ماه را می‌توان در تفاوت میزان رسوب خروجی از آبخیز در یک سال مورد استفاده در تأیید نسبت به دو سال



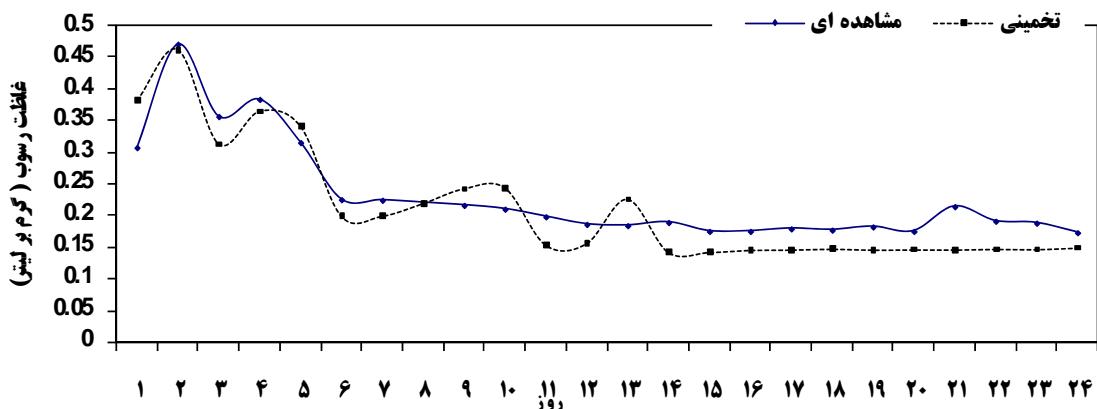
شکل ۳. مقادیر مشاهده‌ای و تخمینی مدل خطی خردامه سال ۱۳۸۸ در مرحله تأیید



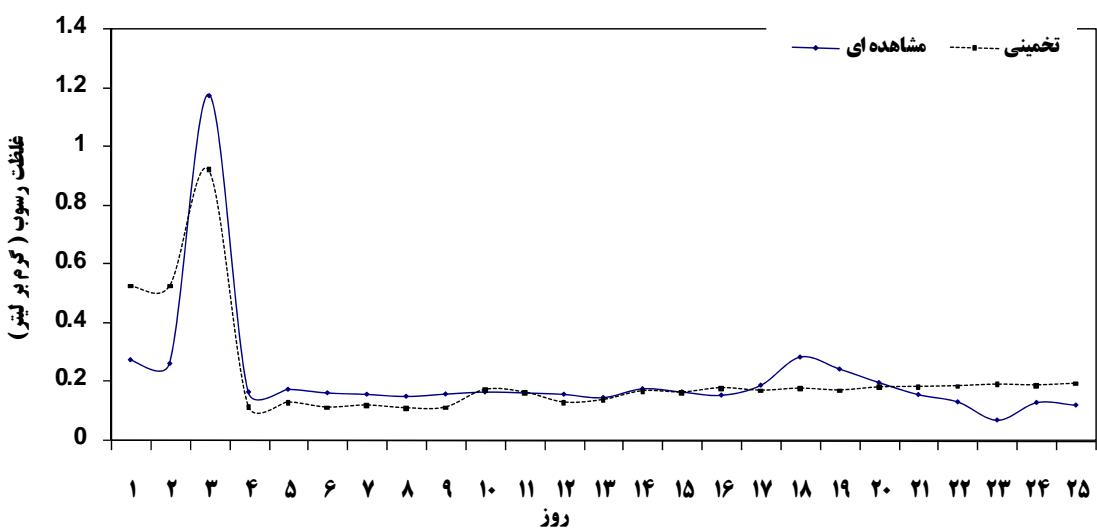
شکل ۴. مقادیر مشاهده‌ای و تخمینی مدل خطی آبان‌ماه سال ۱۳۸۸ در مرحله تأیید

در آذرماه معادله غیرخطی رابطه ۱۲ (جدول ۳) دارای خطای نسبی کمتر از ۴۰ درصد، ریشه میانگین مربعات خطأ (RMSE) پایین، و ضریب تبیین معنی‌دار در سطح یک درصد است که به عنوان مدل مناسب انتخاب گردید. در این مدل دبی روز واقعه و هشت روز قبل در معادله مؤثر است. با توجه به شکل ۵، در این مدل حداقل مقدار خطأ ۲۵ درصد مربوط به رسوب (۰,۱۹ گرم در لیتر) را به مقدار ۰,۱۴ گرم در لیتر کمتر پیش‌بینی کرده است.

در بین مدل‌های آبان‌ماه مدل غیرخطی رابطه ۱۱ (جدول ۳) دارای خطای نسبی کمتر از ۴۰ درصد، ریشه میانگین مربعات خطأ (RMSE) پایین، و ضریب تبیین معنی‌دار در سطح یک درصد است که به عنوان مدل مناسب انتخاب گردید. در این مدل رسوب یک روز قبل در معادله مؤثر است. با توجه به شکل ۴، در این مدل حداقل مقدار خطأ ۵۰ درصد مربوط به رسوب (۰,۲۳ گرم در لیتر) را به مقدار ۰,۱۱ گرم در لیتر کمتر پیش‌بینی کرده است.



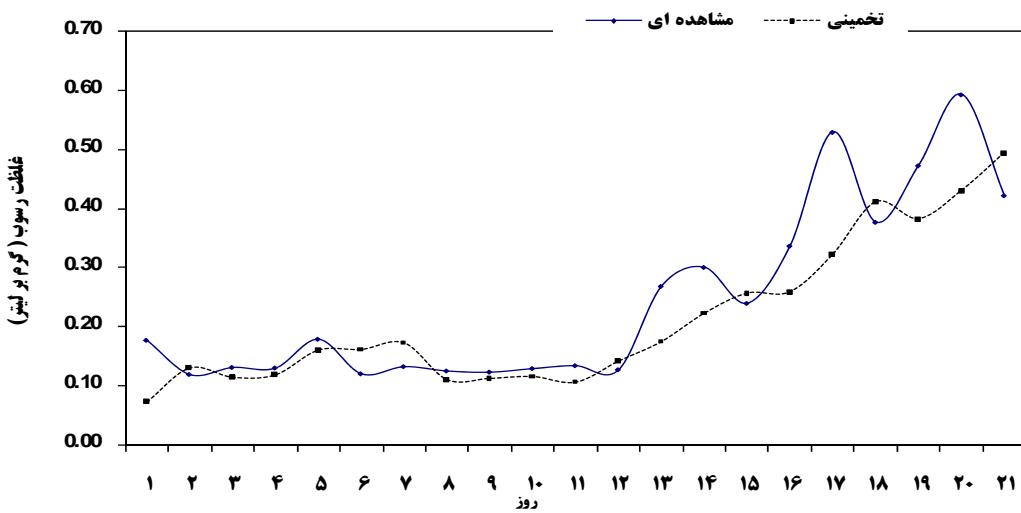
شکل ۵. مقادیر مشاهده‌ای و تخمینی مدل غیرخطی آذرماه سال ۱۳۸۸ در مرحله تایید



شکل ۶. مقادیر مشاهده‌ای و تخمینی مدل خطی دی‌ماه سال ۱۳۸۸ در مرحله تایید

لیتر بیشتر پیش‌بینی کرده است. در بهمن‌ماه مدل خطی رابطه ۱۴ (جدول ۳) دارای خطای نسبی کمتر از ۴۰ درصد، ریشه میانگین مربعات خطأ (RMSE) پایین، و ضریب تبیین معنی‌دار در سطح یک درصد است که به عنوان مدل مناسب انتخاب گردید. در این مدل رسوب روز مناسب انتخاب گردید. در این مدل رسوب روز پیشین و دبی روز واقعه در معادله مؤثر است. با توجه به شکل ۷، در این مدل حداقل مقدار خطا ۵۸ درصد مربوط به درصد مربوط به رسوب ($18/0$ گرم در لیتر) را به مقدار 0.07 گرم در لیتر پیش‌بینی کرده است.

در دی‌ماه معادله خطی رابطه ۱۳ (جدول ۳) دارای خطای نسبی کمتر از ۴۰ درصد، ریشه میانگین مربعات خطأ (RMSE) پایین، و ضریب تبیین معنی‌دار در سطح یک درصد است که به عنوان مدل مناسب انتخاب گردید. در این مدل دبی روز واقعه در معادله مؤثر است. در این ماه، به علت تغییرات مکرر آب و هوايی، دبی و رسوب روزهای قبل در مدل‌سازی تأثیرگذار نبوده‌اند. با توجه به شکل ۶، در این مدل حداقل مقدار خطا ۶۳ درصد مربوط به رسوب ($12/0$ گرم در لیتر) را به مقدار 0.19 گرم در



شکل ۷. مقادیر مشاهده‌ای و تخمینی مدل خطی بهمن ماه سال ۱۳۸۸ در مرحله تایید

مدل‌های مناسب فصلی

جدول ۴ مدل‌های مناسب فصلی را نشان می‌دهد.

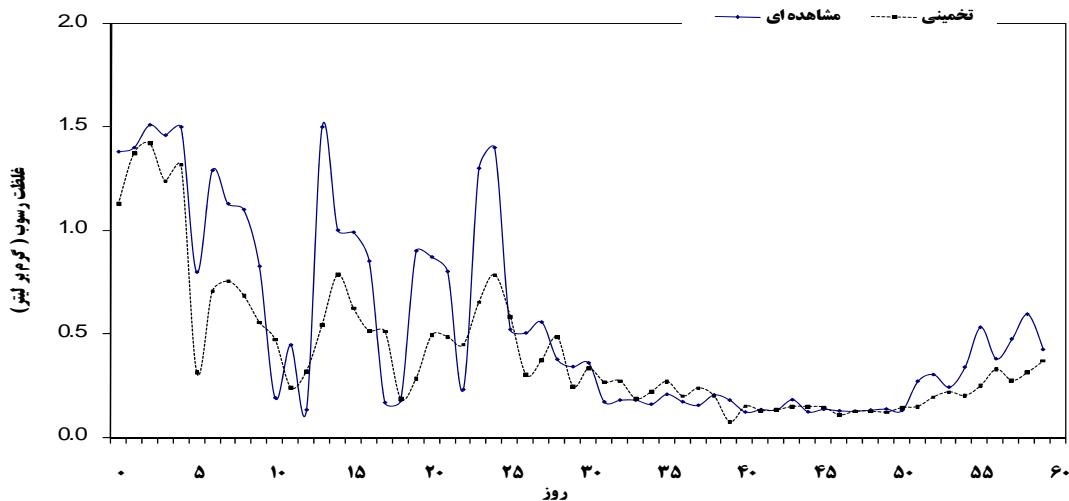
جدول ۴. مدل‌های مناسب رسوب روزانه در مقیاس فصلی در حوزه آبخیز کجور

مرحله تایید						
پیشۀ میانگین مربعات خطا (گرم بر لیتر)	خطای نسبی (%)	ضریب تبیین	معادله	رابطه	نوع مدل	پایه زمانی
۰/۰۷	۳۹	۰/۱	$Y_t = +/۴۲۷Y_{t-1} + /۴۲۸۲Y_{t-2} + /۰/۰۶$	۱۶	خطی	بهار
۰/۰۱	۳۱	۰/۱۳	$Y_t = -/۱۷۶Q_{t-2} - /۱۹۱Q_t + /۰/۱۲$	۱۷	خطی	تابستان
۰/۸۶	۲۹	۰/۱۱	$Y_t = -/۰/۷۹ \log Q_{t-9} - /۰/۳۰۵ \log Q_{t-1} - /۰/۴۰۳ \log Q_t + /۰/۵۶۴ \log Y_{t-1} + /۰/۴۰۳$	۱۸	غیرخطی	پاییز
۰/۲۸	۳۶	۰/۷۵**	$Y_t = /۱۲Q_{t-4} - /۲۱۶Q_{t-1} + /۰/۳۹۷Y_{t-1} + /۰/۳۹۳Q_t + /۰/۰۱$	۱۹	خطی	زمستان

* در سطح پنج درصد و ** در سطح یک درصد معنی‌دار است. در کلیه روابط ارائه شده Q دبی روزانه بر متر مکعب بر ثانیه است، Y رسوب معلق گرم در لیتر، و t نشان‌دهنده روز مورد نظر است. اعداد ارائه شده نیز دلالت بر تعداد روزهای قبل از روز واقعه دارند.

می‌توان در شرایط متغیر هیدرولوژیکی حوضه مذکور و شرایط متغیر رسوب در اثر دخالت‌های انسانی و برداشت شن و ماسه از بستر رودخانه دانست. در فصل زمستان مدل خطی رابطه ۹ دارای ضریب تبیین معنی‌دار در سطح یک درصد، خطای نسبی کمتر از ۴۰ درصد، و ریشه میانگین مربعات خطا کمی بوده و به همین علت مورد قبول واقع شد. در این فصل دبی روز واقعه یک و چهار روز قبل و رسوب روز پیشین در معادله تاثیرگذار هستند.

با توجه به جدول ۴، همه مدل‌های ماهانه دارای خطای نسبی کمتر از ۴۰ درصد هستند، به طوری که از بین معادلات خطی و غیرخطی معادلات فصول بهار، تابستان، و پاییز دارای خطای نسبی کمتر از ۴۰ درصد هستند و ریشه میانگین مربعات خطا کمی بوده، ولی ضریب تبیین پایینی دارند که در سطح پنج درصد معنی‌دار نبیستند، به همین دلیل، مدل‌های استخراج شده برای این ماهها مورد پذیرش قرار نگرفت. دلیل معنی‌دار نبودن معادلات در این فصول را



شکل ۸. مقادیر مشاهده‌ای و تخمینی مدل خطی زمستان در مرحله تأیید

هر ماه مرتبط دانست. در بین معادلات ماهانه نتایج به دست آمده بر اساس مقادیر خطای تخمین نشان می‌دهد که در ماه‌های تیر، شهریور، آذر، و اسفند مدل‌های غیرخطی مناسب‌ترند، در صورتی که در سایر ماه‌ها مدل‌های خطی برآش بهتری به داده‌ها ارائه کرده‌اند. با بررسی کلیه روابط روزانه، این نتیجه به دست آمد که متغیر مستقل دبی روز واقعه در اکثر مدل‌ها به عنوان یکی از متغیرهای مستقل تأثیر بسیار زیادی در معادله گذارده است که با تحقیقات پیشین [۳، ۷، ۹، ۱۰، ۱۷] مطابقت دارد. با توجه به نتایج حاصل از تحقیق فعلی، پیشنهاد می‌شود از سایر روش‌های مدل‌سازی رسوب روزانه (سری‌های زمانی، شبکه عصبی مصنوعی، فازی، و نروفازی) در منطقه مطالعاتی استفاده شود و کارایی آن‌ها با نتایج حاصل از تحقیق حاضر مقایسه شود و همچنین از مدل‌های به دست آمده در این تحقیق در حوزه‌های آبخیز با خصوصیات و اقلیم مشابه استفاده شود.

شکل ۸ مقادیر مشاهده‌ای و تخمینی این مدل را نشان می‌دهد. در این شکل حداقل مقدار خطای درصد مربوط به رسوب (۰،۱۶٪ در لیتر) را به مقدار ۰،۵۱٪ در لیتر بیشتر پیش‌بینی کرده است.

نتیجه گیری

در تحقیق حاضر مدل‌های رسوب روزانه، ماهانه، و فصلی خطی و غیرخطی تهیه شد، به طوری که مدل‌های روزانه از نوع خطی و غیرخطی در برآورد رسوب دارای دقت کافی نبودند که با تحقیقات پیشین [۱۰، ۱۳، ۱۹] هم خوانی دارد و می‌توان آن را با ثابت فرض کردن خصوصیات منطقه مرتبط دانست. همچنین، هر اندازه داده‌های مورد استفاده به صورت ماهانه و نیز فصلی تفکیک شوند خطای نسبی مدل‌ها کمتر می‌شود و دقت در تخمین رسوب آن‌ها بالاتر می‌رود که با نتایج تحقیقات پیشین [۱۰، ۱۳، ۱۹] هم خوانی دارد. مدل‌های ماهانه نسبت به سایر مدل‌ها نتایج بهتری را نشان دادند که می‌توان آن را با ثبات شرایط آب و هوایی و تغییرات کم پوشش گیاهی در

References

- [1] Altunkaynak, A. (2009). Sediment load prediction by genetic algorithms, *Advance Engineering Software*, 40 (9), 928-934.
- [2] Ahmadi, H., Jafari, M., Golkarian, A., Abrisham, A. and Lafin, J. (2007). Estimating water erosion and sediment using WEPP model (Case study Bar-Erieh watershed, Neyshabur), *Pajouhesh and Sazandegi*, 75, 161-172. (In Persian)
- [3] Aytek, A. and Kisi, O. (2008). A genetic programming approach to suspended sediment modelling, *Journal of Hydrology*, 351, 288-298.
- [4] Bighamta, R. and Zarechahoki, M.A. (2008). *Principal of Natural Resources Science Statistics*, First edition, University of Tehran Press. (In Persian)
- [5] Das, G. (2009). *Hydrology and Soil Conservation Engineering*. 2nd Edition, Prentice-hall of India Press.
- [6] Jansen, J.M.L. and Painter, R.B. (1974). Predicting sediment yield from climate and topography, *Journal of Hydrology*, 21 (4), 371-380.
- [7] Kisi, O. (2009). Suspended sediment estimation using neuro-fuzzy and neural network approaches. *Hydrological Sciences Journal*, 50 (4), 683-696.
- [8] Kothyari, U.C., Jain, M. and Ranga Raju, K. (2002). Estimation of temporal variation of sediment yield using GIS. *Hydrological Sciences Journal*, 479 (5), 693-706.
- [9] Kumar, A. and Das, G. (2000). Dynamic model of daily rainfall, runoff and sediment yield for a Himalayan watershed. *Journal of Agricultural Research*, 75 (2), 189-193.
- [10] Kumar, A. and Das, G. (2002). Dynamic model of daily runoff-sediment yield for a Himalayan sub-catchment of Ramganga River. ISCO 12th International Soil Conservation Organization Conference, Beijing, China, pp. 445-449.
- [11] Lana-Renault, N., Regues, D., Marti-Bono, C., Begueria, S., Latron, J., Nadal, E., Serrano, P. and Garcia-Ruiz, J.M. (2007). Temporal variability in the relationships between precipitation, discharge and suspended sediment concentration in a small Mediterranean mountain catchment. *Nordic Hydrology*, 38 (2), 139-150.
- [12] Natural resources organization in Mazandaran province. (2002). Koujor forestry project: third series of Aghozchal. 46th watershed, Ministry of Jihad-e-Agriculture, *Forests, range and watershed management organization of Iran*, 379 p. (In Persian)
- [13] Pyasi, S.K. (1997). Memory based input-output runoff and sediment yield models for upper Ramganga Himalayan catchment, Ph.D Thesis, G.B. Pant University of Agriculture and Technology, India, 189 p.
- [14] Putjaroon, W. and Pongewn, K. (1987). Amount of runoff and soil losses from various land use sampling plots in Sakonakorn Province, Thailand, Proceeding of Forest Hydrology and Watershed Management, IAHS-AISH Publication, pp. 167-198.
- [15] Rajaee, T., Mirbagheri, S.A., Nourani, V. and Alikhani, A. (2010). Prediction of daily suspended sediment load using wavelet and neuron-fuzzy combined model. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 7 (1), 93-110.
- [16] Refahi, H.Gh. (2006). *Soil Erosion by Water and Conservation*, 5th Edition, University of Tehran Press. (In Persian)
- [17] Romiyanfar, S. (2007). *Sediment estimation in Venyar station using artificial neural network*, *Clean Water Issues*, 43 p. (In Persian)
- [18] Sadeghi, S.H.R., Mizuyama, T., Miyata, S., Gomi, T., Kosugi, K., Ffukushima, T., Mizugaki, S. and Onda, Y. (2008). Development, evaluation and interpretation of sediment rating curves for a Japanese small mountainous reforested watershed, *Geoderma*, 144 (1-2), 198-211.

- [19] Sadeghi, S.H.R., Nikpour, A. and Ayyobzadeh, S.A. (2004). Daily sediment estimation using dynamic modeling in Kasilian watershed, *Journal of Iranian Natural Resources*, 60 (3), 391-402. (In Persian)
- [20] Sadeghi, S.H.R. and Saeydi, P. (2008). Suspended sediments: suitable forecasting for soil organic matter loss, *Water Soil Journal*, 23 (1), 221-228. (In Persian)
- [21] Sarangi, A. and Bhattacharya, A.K. (2005). Comparison of artificial neural network and regression models for sediment loss prediction from Banha watershed in India, *Agricultural Water Management*, 78 (3), 195-208.
- [22] Walling, D.E., Collins, A.L., Sichingabula, H.A. and Leeks, G.J.L. (2001). Integrated assessment of catchment suspended sediment budgets: a Zambian example. *Land Degradation Development*, 12 (5), 387-415.
- [23] Wischmeier, W.H. and Smith, D.D. (1965). Predicting rainfall erosion from crop land east of rocking mountain. U.S. Department of Agriculture, *Agriculture Handbook*, No 282, 48 p.
- [24] Zhu, X.X. and Zhou, L.Y. (2007). Suspended sediment flux modeling with artificial neural network: An example of the Longchuanjiang River in the Upper Yangtze Catchment, China. *Geomorphology*, 84, 111-125.