

جداسازی اثرات تغییرپذیری اقلیمی و فعالیت‌های انسانی بر رواناب حوضه آبخیز بختگان

حمیدرضا قره‌چایی^۱، علی‌رضا مقدم‌نیا^{۲*}، آرش ملکیان^۳، آزاده احمدی^۴

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج

۲. دانشیار، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج

۳. دانشیار، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج

۴. استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

(تاریخ دریافت ۱۳۹۴/۰۹/۱۷ تاریخ تصویب ۱۳۹۴/۱۲/۲۵)

چکیده

اکوسیستم‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک حساسیت بسیار زیادی در برابر تغییرات دارند. نوسانات در متغیرهای اقلیمی و افزایش فعالیت‌های انسانی دگرگونی در فرایندهای هیدرولوژیکی این اکوسیستم‌ها و به تبع آن تخریب ساختار آن‌ها را به دنبال دارد. در این پژوهش به منظور ارزیابی کمی تأثیرات تغییرپذیری اقلیمی و فعالیت‌های انسانی بر فرایندهای هیدرولوژیکی حوضه آبخیز بختگان، داده‌های هیدرو-اقلیمی این حوضه در دوره آماری ۱۳۵۱-۱۳۹۱ تجزیه و تحلیل شد. ترکیب آزمون‌های آماری در تحلیل روند و تعیین نقاط تغییر آشکار ساختند که رواناب حوضه در ۴۰ سال گذشته کاهش معناداری داشته است. نقطه تغییر رخ داده در رواناب در سال ۱۳۷۸؛ رواناب سالانه این حوضه را به دو دوره تقسیم کرد. دوره ۱۳۵۱-۱۳۷۸ به منزله دوره پایه برای واسنجی و اعتبارسنجی و دوره ۱۳۷۹-۱۳۹۱ دوره‌ای که تأثیرات فعالیت‌های انسانی بر رواناب مشهود بوده است، به منظور پردازش مدل استفاده شد. سپس روش تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی رویکردی بود که براساس بارش و تبخیر تعرق پتانسیل، تأثیرات تغییرپذیری اقلیمی و فعالیت‌های انسانی روی رواناب را ارزیابی کرد. با توجه به تحلیل‌های انجام شده سهم تغییرپذیری اقلیمی در کاهش رواناب حوضه آبخیز بختگان ۶۲/۴۵ درصد و سهم فعالیت‌های انسانی ۳۷/۵۵ درصد برآورد شد. این نتایج می‌تواند به منظور تهیه منبعی برای ارزیابی و مدیریت منابع آب و حفظ یکپارچگی اکوسیستم منطقه‌ای بسیار مفید باشد.

کلیدواژگان: تغییرپذیری اقلیمی، حوضه آبخیز بختگان، روش تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی، فعالیت‌های انسانی.

مقدمه

چرخه هیدرولوژی یک حوضه آبخیز فرایند پیچیده‌ای است که توسط تغییرپذیری اقلیم، ویژگی‌های فیزیکی حوضه و فعالیت‌های انسانی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. ارزیابی کمی تأثیرات تغییرپذیری اقلیمی و فعالیت‌های انسانی به‌عنوان دو محرک اصلی چرخه هیدرولوژی اهمیت زیادی در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب به‌منظور حفظ یکپارچگی اکوسیستم و توسعه پایدار جامعه دارند. با وخیم‌تر شدن مشکلات کمبود و افزایش بلایای مرتبط با آب در سطح جهان، تأثیرات تغییرپذیری اقلیمی و فعالیت‌های انسانی روی منابع آب، مدت‌هاست توجه هیدرولوژیست‌ها را به خود جلب کرده است [۲۶، ۱۳، ۲۸]. ژان و همکارانش (2014) با استفاده از روش الاستیسیته اقلیمی به تحلیل کمی تأثیرات تغییرپذیری اقلیمی و فعالیت‌های انسانی روی رواناب حوضه آبخیز وای چین پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که سهم تغییرپذیری اقلیمی در تغییر رواناب این حوضه ۴۰ درصد است و باقی به فعالیت‌های انسانی مربوط می‌شود [۳۶]. پنگ و همکارانش (2016) با استفاده از روش تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی به ارزیابی تأثیرات تغییرپذیری اقلیمی و فعالیت‌های انسانی بر رواناب حوضه دریاچه تایهو چین پرداختند [۲۱]. نتایج آن‌ها نشان داد که فعالیت‌های انسانی با سهمی معادل ۸۹ درصد نیروی محرکه اصلی تغییرات رواناب حوضه بوده‌اند. یوان و همکارانش (2016) تأثیرات تغییرپذیری اقلیمی و فعالیت‌های انسانی روی رواناب حوضه دریاچه دانگتینگ با استفاده از روش تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی بررسی کردند [۳۲]. نتایج آن‌ها نشان داد که در فاصله سال‌های ۲۰۰۳-۲۰۱۰ بیش از ۷۸/۳۳ درصد تغییرات رواناب تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی صورت پذیرفته در حوضه بوده است. کنگ و همکارانش (2016) با استفاده از روش‌های تجزیه و تحلیل پایه سهم کمی تغییرپذیری اقلیمی و فعالیت‌های انسانی بر رواناب رودخانه زرد چین را ارزیابی کردند که ۹۱/۷ درصد از تغییرات رواناب رودخانه زرد چین به فعالیت‌های انسانی نسبت داده شد [۱۴]. شن و همکارانش (2015) به بررسی روابط بین خشکسالی هیدرولوژیکی، تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی در رودخانه وایه‌ی چین پرداختند [۲۷]. نتایج آن‌ها نشان داد که بخش شایان

توجهی از کاهش رواناب حوضه به تأثیرات فعالیت‌های انسانی بر رواناب مرتبط می‌شود. از آنجاکه محیط‌های خشک و نیمه‌خشک، همچون نواحی گسترده‌ای از ایران حساسیت بیشتری به تغییرات دارند، با شناخت دقیق‌تر و ارزیابی کمی تأثیرات مختلف، به‌عنوان بخشی از ورودی‌های مورد نیاز برای تدوین برنامه‌های مد نظر می‌توان در سیاست‌ها و رویه‌های فعلی، سبک و شیوه مدیریت آب در ابعاد مختلف تغییر جدی ایجاد کرد که این امر در پی‌ریزی آینده مدیریت آب کشور به مدیران ما کمک شایانی خواهد کرد. بنابراین، در پژوهش حاضر به جداسازی سهم تغییرپذیری اقلیمی و فعالیت‌های انسانی اقدام شد تا علاوه بر آگاهی نسبت به میزان حساسیت رواناب به تغییرات بارش و تبخیر تعرق پتانسیل به‌عنوان دو فاکتور اصلی اقلیمی سهم فعالیت‌های انسانی در تغییرات رواناب حوضه در چهار دهه گذشته آشکار شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه شده

حوضه آبخیز بختگان در قسمت جنوب غربی ایران و در امتداد سلسله کوه‌های زاگرس واقع شده است. تالاب طشک و بختگان با مساحت ۱۲۶ هزار هکتار، درون این حوضه آبخیز واقع شده است. رودخانه کر و سیوند تنها رودخانه‌های دائمی این حوضه هستند که پس از پیوستن به یکدیگر در محل پل خان، پس از عبور از دشت مرودشت به تالاب‌های طشک و بختگان می‌ریزند و حیات این دو تالاب را تأمین می‌کنند. مساحت حوضه آبخیز طشک و بختگان ۲۳۶۲۱ کیلومترمربع و ارتفاع آن ۳۴۹۱-۱۵۲۵ متر است. اقلیم حوضه آبخیز طشک بختگان از سمت جنوب و جنوب شرق به شمال غرب از محدوده خشک سرد به نیمه‌خشک سرد و نیمه‌مرطوب سرد تغییر می‌کند. اقلیم غالب منطقه حدود ۶۳/۹ درصد مساحت حوضه نیمه‌خشک، حدود ۲۲ درصد مساحت حوضه در محدوده اقلیمی خشک قرار دارد. بقیه مساحت حوضه در محدوده اقلیمی مدیترانه‌ای و درصد ناچیزی در محدوده اقلیمی مرطوب قرار می‌گیرد. متوسط دمای سالانه حوضه آبخیز طشک بختگان ۱۵ درجه سانتی‌گراد، متوسط بارش سالانه از ۲۰۰ میلی‌متر در اطراف دریاچه بختگان در شرق حوضه تا ۸۰۰ میلی‌متر در نواحی شمال غربی حوضه

است. روش (TFPW)^۵ برای حذف تأثیر همبستگی متوالی آزمون من-کندال استفاده شده است [۳۴، ۳۵].

من-کندال

آزمون من-کندال [۱۹، ۱۵] به منظور تشخیص روند به ترتیب زیر انجام می‌شود:

$$S = \sum_{i=1}^t \sum_{j=i+1}^T \text{sig}(X_i - X_j) \quad (1)$$

که در آن X_i مقدار داده J ام، n تعداد داده‌ها و $\text{sgn}(X_i - X_j)$ تابع علامت است که از رابطه ۲ تعیین می‌شود:

$$\text{sign}(x_i - x_j) = \begin{cases} +1 & \text{if } (x_i - x_j) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_i - x_j) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_i - x_j) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

میانگین $E(S)$ و واریانس آماره به ترتیب زیر به دست می‌آید:

$$E(S) = 0 \quad (3)$$

$$\text{var}(s) =$$

$$\frac{n(n-1)(2n+1) - \sum_{p=1}^n tp(p)(p-1)(2p+5)}{18} \quad (4)$$

که t_p تعداد دنباله‌ها برای p امین مقدار و p تعداد مقادیر دنباله‌هاست. جزء دوم در فرمول بالا یک تعدیل برای دنباله یا داده‌های حساس است. آماره استانداردشده آزمون Z از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\text{var}(s)}}, & s > 1 \text{ if} \\ 0, & s > 0 \text{ if} \\ \frac{s+1}{\sqrt{\text{var}(s)}}, & s > -1 \text{ if} \end{cases} \quad (5)$$

مقدار مثبت Z روند افزایش و مقدار منفی Z روند کاهشی سری زمانی را نشان می‌دهد. همچنین برای آزمودن روند افزایش یا کاهش یکنواخت در سطح معناداری P ، اگر مقدار Z بزرگتر از $Z_{1-P/2}$ باشد (که معناداری $Z_{1-P/2}$ از جدول توزیع تجمعی نرمال استاندارد به دست می‌آید) فرض صفر رد می‌شود. برای این کار، سطح معنادار

متغیر است. بیشترین مقدار بارندگی در ماه‌های آذر تا اسفند رخ می‌دهد. متوسط تبخیر تعرق پتانسیل حوضه ۱۰۵۸/۲۱ است. نتایج آخرین پژوهش‌ها در زمینه تغییر کاربری اراضی حوضه آبخیز بختگان بیانگر کاهش ۸۲ درصدی سطح آب دریاچه در شهریورماه از سال ۱۳۶۶-۱۳۹۲ بوده است. این میزان کاهش در فروردین‌ماه سال ۱۳۶۶-۱۳۹۲ به میزان ۲۰ درصد بوده است. با کاهش سطح آب دریاچه در شهریورماه، میزان اراضی خاک بدون پوشش و شورزار به میزان ۳۹ درصد و ۳۷/۵ درصد افزایش داشته است. تغییرات میزان اراضی کشاورزی و مرتعی حوضه از سال ۱۳۶۶ تا ۱۳۹۲ به ترتیب ۲۸ درصد و ۳/۵ درصد کاهش داشته است [۱].

داده‌ها

میانگین جریان و بارش ماهانه بین سال‌های ۱۳۵۱-۱۳۹۱ از سازمان آب منطقه‌ای استان فارس اخذ و بازسازی و کنترل کیفیت و صحت آمار، آزمون همگنی با روش آزمون توالی^۱ انجام پذیرفت. در این مطالعه ۲۵ ایستگاه باران‌سنجی و سه ایستگاه سینوپتیک و ایستگاه هیدرومتری پل خان بررسی شدند. روش تیسن پلیگون^۲ به منظور برآورد متوسط سالانه بارش و تبخیر تعرق پتانسیل فائو پنمن مانیت [۴] حوضه استفاده شد. از ابزار Topology و Thiessen در نرم‌افزار Arc GIS 10.2 برای محاسبه مقادیر متوسط بارش و تبخیر تعرق پتانسیل حوضه استفاده شد.

آزمون روند

آزمون من-کندال^۳ [۱۹، ۱۵] می‌تواند برای جواب‌دادن به این سؤال که آیا مقدار مرکزی یا میانه یک سری زمانی به مرور زمان تغییر می‌کند یا نه، به کار رود. برای انجام آزمون من-کندال نیازی به نرمال‌بودن توزیع داده‌ها نیست، اما برای صحیح‌بودن P-value نباید همبستگی متوالی^۴ وجود داشته باشد [۱۲]. زیرا وجود همبستگی متوالی موجب افزایش شناسایی روند معنادار توسط آزمون من-کندال می‌شود، در صورتی که فرض صفر واقعاً صحیح

5. trend-free pre-whitening

1. Run test
2. Thiessen polygon
3. Mann-Kendall
4. outocorrelation

$$P_{OA} = \tau \exp \left\{ \frac{-\epsilon (K^+)^{\tau}}{(T^{\tau} + T^{\tau})} \right\} \quad (9)$$

$T \rightarrow \infty \text{ for}$

ارزیابی کمی تأثیرات تغییرپذیری اقلیمی و فعالیت‌های انسانی بر رواناب

چارچوب کلی

برای یک حوضه آبخیز، جریان می‌تواند به‌عنوان تابعی از متغیرهای اقلیمی و فعالیت‌های انسانی مدل‌سازی شود [۳۹، ۴۰].

$$Q = f(C, H) \quad (10)$$

که در آن Q دبی جریان، C نشان‌دهنده تأثیرات فاکتورهای اقلیمی در چرخه هیدرولوژی و H فاکتوری است که نشان‌دهنده تأثیرات یکپارچه فعالیت‌های انسانی بر رواناب است. به دنبال معادله ۱۴ تغییرات در رواناب در نتیجه تغییرپذیری اقلیمی و فعالیت‌های انسانی می‌تواند این چنین تقریب زده شود:

$$\Delta Q = f_C \Delta C + f_H \Delta H \quad (11)$$

که در آن ΔQ ، ΔC ، ΔH به ترتیب، تغییرات در رواناب، اقلیم و فعالیت‌های انسانی باشند. با

$$f_C = \frac{\partial Q}{\partial C} \quad (12)$$

$$f_H = \frac{\partial Q}{\partial H}$$

به‌عنوان یک دستور تقریبی اولیه، معادله ۲ را می‌توان چنین نوشت [۴۰].

$$\Delta Q_t = \Delta Q_C + \Delta Q_H \quad (13)$$

که ΔQ_C و ΔQ_H به ترتیب تغییرات در جریان در نتیجه تغییرپذیری اقلیمی و فعالیت‌های انسانی هستند.

گرچه تغییرپذیری اقلیمی و فعالیت‌های انسانی برای یک حوضه آبخیز کوچک با یکدیگر تداخل و تعامل دارند، تغییرپذیری اقلیمی بیشتر توسط فاکتورهای خارجی کنترل می‌شود. بنابراین، در مقیاس حوضه آبخیز، این دو عامل به‌عنوان متغیرهای مستقل از یکدیگر در نظر گرفته می‌شوند [۱۴].

مجموع تغییر در رواناب (ΔQ_t) را می‌توان از تفاضل متوسط جریان مشاهده‌شده در طول دوره پایه (ΔQ_{obs1}) از

یک یا پنج درصد به کار می‌رود. همچنین با استفاده از نرم‌افزار Xlstate 2015 برای تعیین شیب خط روند [۲۹، ۳۱] استفاده شد.

آزمون نقاط تغییر^۱

یکی از گام‌های اساسی در ارزیابی تأثیرات تغییرپذیری اقلیمی و فعالیت‌های انسانی بر رواناب، شناسایی نقاط تغییر رواناب است. آزمون‌های آماری پتیت [۲۵]، همگنی استاندارد نرمال [۲، ۳]، نسبت ون نئومن [۳۳] و دامنه بویشند [۸] رویکردهایی بودند که در این مطالعه به‌منظور تعیین نقاط تغییر استفاده شدند. در اینجا شرح آزمون پتیت آورده شده است.

آزمون پتیت

دنباله‌ای از متغیرهای تصادفی هیدروکلیماتولیکی X_i را در نظر بگیرید، که $i=1, 2, 3, \dots, T$ باشد. زمانی آزمون پتیت تغییر در نقطه τ را معنادار می‌داند که برای X_t برای $t=1, 2, 3, \dots, \tau$ دارای تابع توزیع $F_1(x)$ و برای $t=\tau+1, \tau+2, \tau+3, \dots, T$ دارای تابع توزیع $F_2(x)$ بوده و $F_1(x) \neq F_2(x)$ باشد. این آزمون دو فرض $H_0: \tau=T$ برای وجودنداشتن تغییر و $H_1: \tau \neq T$ برای وجود روند را مقابل هم و آماره KT (رابطه ۷) را برای تست دو نمونه (X_1, \dots, X_t) و (X_{t+1}, \dots, X_T) از یک جامعه در نظر می‌گیرد [۲۵].

تابع $U_{t,T}$ در رابطه ۶ با استفاده از رابطه ۷ به دست می‌آید.

$$K_T = \text{Max} |U_{t,T}|, 1 \leq t \leq T \quad (6)$$

$$U_{t,T} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sig}(X_i - X_j) \quad (7)$$

$$\text{sign}(x_i - x_j) = \begin{cases} +1 & \text{if } (x_i - x_j) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_i - x_j) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_i - x_j) < 0 \end{cases} \quad (8)$$

احتمال اهمیت تقریبی K_T با P_{OA} تعیین می‌شود. به‌طوری‌که P_{OA} احتمالی از تشخیص نقطه تغییر است.

1. Change points test
2. Pettitt
3. Standard normal homogeneity test (SNTH)
4. Von Neumann ratio
5. Buishand range test

ΔQ_{total} مجموع تغییرات در میانگین سالانه رواناب (mm/year).

$\Delta Q_{climate}$ تغییر در میانگین رواناب ناشی از تغییر اقلیم (mm/year).

ΔQ_{human} تغییر در میانگین رواناب ناشی از فعالیت‌های انسانی (mm/year).

بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل فاکتورهای تعیین‌کننده میانگین سالانه بیلان آبی هستند [۳۷؛ ۷]. تغییر در میانگین سالانه بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل، تغییر در رواناب سالانه را به دنبال دارد. و این ارتباط می‌تواند براساس رابطه زیر برآورد شود [۲۱؛ ۱۶].

$$\Delta Q_{climate} = \frac{\partial Q}{\partial P} + \frac{\partial Q}{\partial PET} \Delta PET \quad (17)$$

ΔP و ΔPET به ترتیب تغییر در بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل هستند (mm/year) و

$$\frac{\partial Q}{\partial P} = P^w - 1 (PET^w + P^w)^{1/w - 1} \quad (18)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial PET} = PET^w - 1 (PET^w + P^w)^{1/w - 1 - 1}$$

بدین ترتیب با مشخص بودن ΔQ_{total} ، ΔQ_{human} برآورد می‌شود.

بحث و نتایج

تغییرات در بارش، تبخیر تعرق و رواناب سالانه

روند طولانی‌مدت فرایندهای هیدرولوژیکی به‌طور بالقوه تحت تأثیر تغییرپذیری اقلیمی و فعالیت‌های انسانی قرار دارد. تحلیل روند تاریخی این فرایندها، می‌تواند به تأیید نقطه شروع افزایش تأثیرات فعالیت‌های انسانی بر سیستم‌های منابع آب کمک کند. آزمون من-کندال و شیب تخمینگر سن به‌منظور تعیین معناداری روند بارش، تبخیر تعرق پتانسیل و رواناب، و تحلیل متناظر روند فاکتورهای هواشناسی و تغییرات رواناب در ۴۰ سال گذشته به کار گرفته شدند (جدول ۱).

نتایج آزمون‌های روند نشان داد گرچه بارش حوضه آبخیز بختگان کاهش یافته، این کاهش معنادار نبوده است. تبخیر تعرق پتانسیل حوضه از روند افزایشی معنادار برخوردار بوده است. بنابراین، با توجه به معنادار نبودن روند کاهش بارش و

متوسط جریان سالانه مشاهده‌شده در طول دوره تغییر (ΔQ_{obs2}) برآورد کرد ($\Delta Q_t = \Delta Q_{obs2} - \Delta Q_{obs1}$) محاسبه کرد. به تبع آن جداکردن تأثیرات تغییرپذیری اقلیمی از فعالیت‌های انسانی چنانچه ΔQ_C و ΔQ_H معلوم باشند، می‌تواند حاصل شود.

روش تحلیل حساسیت هیدرولوژیک^۱

به‌منظور ارزیابی کمی‌کردن تأثیرات تغییرپذیری اقلیمی و فعالیت‌های انسانی، روش تحلیل حساسیت هیدرولوژیک توسط هلسل و هیریش (1992) و پنگ و همکارانش (2016) ارائه شد [۱۰ و ۲۱]. روش تحلیل حساسیت هیدرولوژیک را می‌توان به‌عنوان درصدی از تغییرات میانگین سالانه رواناب در پاسخ به تغییر در میانگین سالانه بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل توصیف کرد. این روش براساس معادله بیلان آبی یک حوضه طراحی شده است.

$$P = E + Q + \Delta S \quad (14)$$

که در این معادله، P بارش، E تبخیر تعرق واقعی، Q رواناب و ΔS تغییر در ذخیره آب حوضه است. برای یک دوره طولانی از زمان (۱۰ سال یا بیشتر)، قابل قبول است که ΔS را برابر صفر در نظر بگیریم.

میانگین تبخیر و تعرق واقعی سالانه را می‌توان براساس بارش و تبخیر تعرق پتانسیل برآورد کرد. در سال ۱۹۷۴، بودیکو بر پایه شاخص خشکیدگی (PET/P) چارچوبی را برای برآورد تبخیر تعرق واقعی ارائه کرد [۷]. وی با استفاده از ترکیب تحلیل‌های ابعادی با ادله ریاضی راه‌حلی تحلیلی برای تبخیر و تعرق واقعی سالانه ارائه داد.

$$\frac{E}{P} = 1 + \frac{PET}{P} - [1 + (\frac{PET}{P})^\omega]^{1/\omega} \quad (15)$$

ω پارامتری از مدل در ارتباط با نوع پوشش گیاهی، ویژگی‌های هیدرولوژیکی خاک و توپوگرافی است [۳۷].

به تبع این هم بارش و هم تبخیر و تعرق می‌توانند سبب تغییر در بیلان آبی شوند [۱۰]. به‌عنوان یک دستور اولیه کلیه تغییرات در میانگین سالانه رواناب چنین برآورد شد:

$$\Delta Q_{total} = \Delta Q_{climate} + \Delta Q_{human} \quad (16)$$

۱۳۶۵ تغییر کرده است. ترکیب چهار آزمون مشخص کرد که شروع تغییرات رواناب حوضه سال ۱۳۷۸ است که بازتاب‌کننده شروع هم‌زمان تأثیرات اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر رواناب حوضه باشد. بنابراین، دوره ۱۳۷۸-۱۳۵۱ به‌عنوان دوره پایه، دوره‌ای که فعالیت‌های انسانی در آن اندک بوده تشخیص داده شد. این دوره به‌عنوان دوره پایه برای واسنجی و اعتبارسنجی و دوره ۱۳۷۹-۱۳۹۱، دوره پس از تغییر، دوره‌ای که تأثیرات فعالیت‌های انسانی بر رواناب مشهود بوده، به‌منظور پردازش مدل استفاده شد.

افزایش معنادار روند تبخیر تعرق پتانسیل حوضه، کاهش معنادار رواناب، بدین مفهوم است متحرک‌های اقلیمی تنها فاکتورهای مؤثر بر کاهش رواناب حوضه نبوده‌اند.

آزمون‌های پتیت، همگنی استاندارد نرمال، ون نئومن و بویشنند رویکردهایی بودند که به‌منظور تعیین نقاط تغییر در سری‌های زمانی استفاده شدند، هر چهار آزمون بیانگر نتایج مشابهی بودند (جدول ۲).

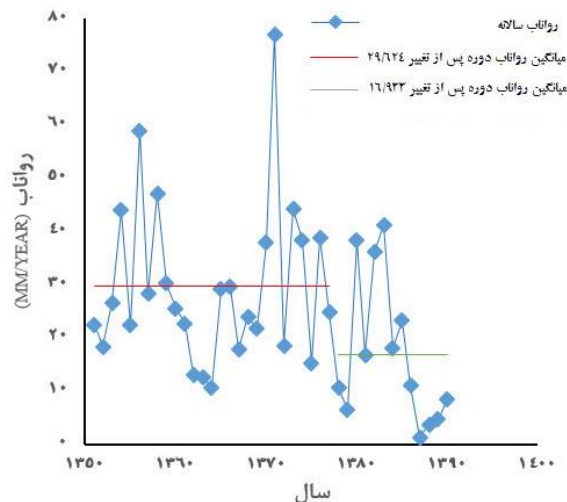
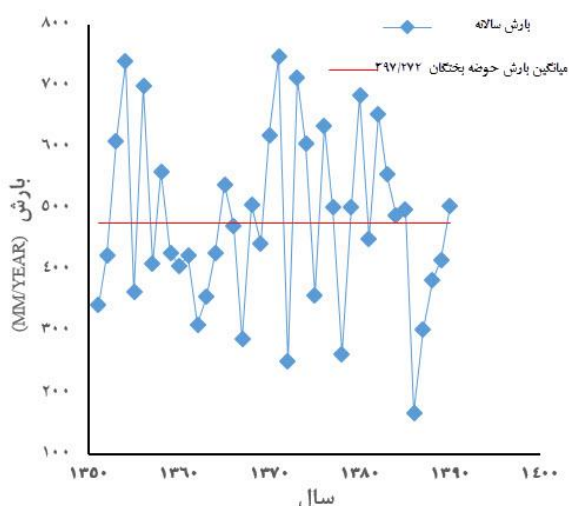
آزمون‌ها نشان دادند که در بارش حوضه تغییری روی نداده، در حالی که تبخیر تعرق پتانسیل حوضه، در سال

جدول ۱. نتایج آزمون من-کندال و شیب تخمینگر سن

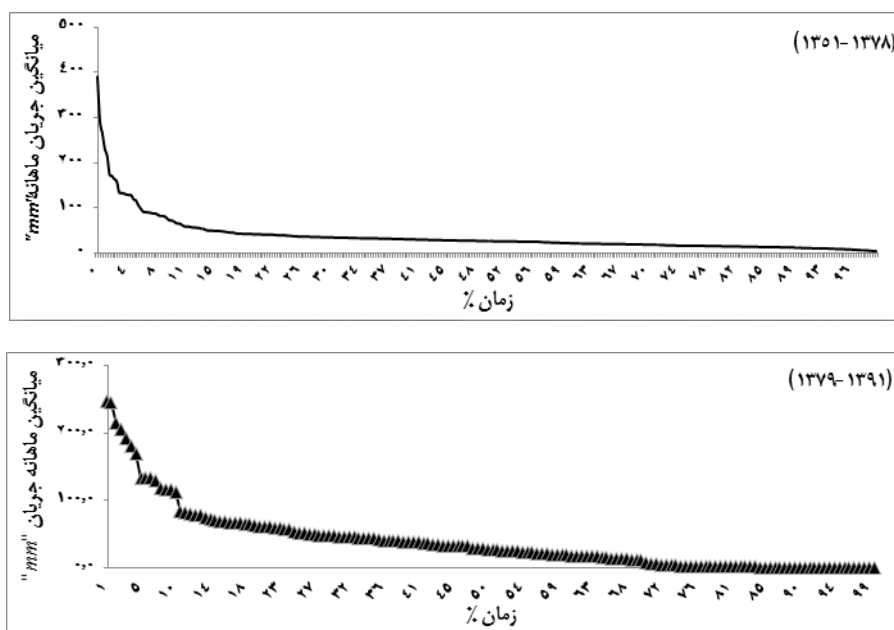
Sen's slope estimate	Kendall test Positive Significance	p-value	Kendall's tau	Mean annual (mm/year)	حوضه آبخیز بختگان
-۰/۱۲۸	-	۰/۹۶۸	-۰/۰۰۸	۴۷۷/۲۷۲	بارش
۲/۵۹۸	%۱	۰/۰۰۱	۰/۵۴	۱۰۸۵/۲۱۸	تبخیر تعرق پتانسیل
-۰/۴۷۸	%۱	۰/۰۲۳	-۰/۲۵۱	۶۰/۷۱	رواناب

جدول ۲. نتایج آزمون‌های تعیین نقاط تغییر

Von Neumann's	Buishand's	SNTH	Pettitt's	حوضه آبخیز بختگان
-	-	-	-	بارش
۱۳۶۵	۱۳۶۵	۱۳۶۵	۱۳۶۵	تبخیر تعرق پتانسیل
۱۳۷۸	۱۳۷۸	۱۳۷۸	۱۳۷۸	رواناب



شکل ۱. نتایج آزمون تعیین نقاط تغییر (آزمون پتیت)



شکل ۲. منحنی تداوم جریان برای دوره پیش از تغییر و پس از تغییر

داشته، در نظر گرفته شد. در روش تحلیل حساسیت هیدرولوژیک " ω " پارامتر اصلی مدل است. " ω " را به وسیله مقایسه تبخیر تعرق واقعی بلندمدت سالانه که از معادله ۱۶ به دست می‌آید و همچنین با استفاده از معادله ۱۶ بیان آبی دوره‌های طبیعی واسنجی کردیم. مقدار " ω " با نتایج تبخیر تعرق واقعی سالانه به دست آمده از معادله ۱۶ قابل قبول بود. بنابراین، " ω " برای حوضه آبخیز بختگان به کار گرفته شد. $\frac{\partial Q}{\partial P}$ و $\frac{\partial Q}{\partial PET}$ به ترتیب می‌توانند به عنوان ضریب حساسیت رواناب به تغییرات بارش و تبخیر تعرق پتانسیل در نظر گرفته شوند (در جدول نتایج، این علائم با α و β نشان داده شده‌اند). ضریب حساسیت بارندگی " $\frac{\partial Q}{\partial P}$ " یا " β " برای مقادیر کوچک " ω " بیشتر و با افزایش شاخص خشکی ($\phi = \frac{PET}{P}$)، کاهش می‌یابد و تغییر در بارندگی، در حوزه‌های با پوشش علفی نسبت به حوزه‌های جنگلی تغییرات بیشتری در رواناب را در پی خواهد داشت، چراکه حوزه‌های جنگلی مقادیر " ω " بزرگ‌تری دارند [۳۸]. مقدار $\frac{\partial Q}{\partial P}$ و $\frac{\partial Q}{\partial PET}$ ، در شرایط خیلی خشک به سمت صفر متمایل می‌شود. شاخص خشکی برای حوضه آبخیز بختگان، ۲/۵۳ به دست آمد. بنابراین، انتظار می‌رود که حوزه مطالعه شده حساسیت زیادی به بارندگی نشان دهد.

به دنبال نتایج حاصل از تحلیل روند و نقاط تغییر، از داده‌های ماهانه رواناب دوره‌های ۱۳۵۱-۱۳۷۸ و ۱۳۷۹-۱۳۹۱ به منظور رسم منحنی تداوم جریان استفاده شد. منحنی تداوم جریان رابطه بین بزرگی و فراوانی جریان روزانه، هفتگی و ماهانه (با فواصل زمانی دیگر) را برای یک حوضه مشخص و با برآوردی از درصد زمانی جریانی که مساوی و یا تجاوز از یک دوره تاریخی باشد ارائه می‌دهد [۳۲]. رابطه بین بزرگی و فراوانی متوسط رواناب ماهانه در شکل ۲ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که درصدی از زمان که رواناب متجاوز است در دوره پایه ۱۳۵۱-۱۳۷۸ نسبت به دوره تغییر ۱۳۷۹-۱۳۹۱ بزرگ‌تر است. همچنین نوسان رواناب در دو دوره به وضوح آشکار است.

واسنجی و اعتبارسنجی مدل تحلیل حساسیت هیدرولوژیک

در طول دوره طبیعی، فعالیت‌های انسانی آشفتگی‌های شایان توجهی در رواناب حوضه‌های آبخیز ایجاد نمی‌کند. بنابراین، می‌توانیم فرض کنیم که در طول دوره طبیعی فعالیت‌های انسانی هرگز رواناب را تحت تأثیر قرار نداده است. بر این اساس دوره طبیعی به عنوان یک مبنا به منظور برآورد تأثیرات تغییرپذیری اقلیمی و فعالیت‌های انسانی روی رواناب برای دوره‌ای که فعالیت‌های انسانی افزایش

روش تحلیل حساسیت هیدرولوژیک

رواناب ناشی از فرایندهایی است که درون یک حوضه آبخیز به وقوع می‌پیوندد و توسط فاکتورهای بسیاری تحت تأثیر قرار می‌گیرد. تغییرات در هر یک از فاکتورها مانند اقلیم و فعالیت‌های انسانی ممکن است به تغییر در رواناب منجر شود. با این حال، ارزیابی کمی این تأثیرات مشکل است چراکه تغییر در رواناب مرتبط با تغییر در هر دو این فاکتورهاست. تأثیرات تغییر پذیری اقلیمی روی رواناب با استفاده از متوسط بارش و تبخیر تعرق پتانسیل بررسی شد. مقایسه ضرایب حساسیت رواناب به بارش و تبخیر تعرق پتانسیل (α و β) در دوره ۱۳۵۱-۱۳۹۱ نشان داد

که رواناب حساسیت بیشتری به تغییرات بارش نسبت به تغییرات تبخیر تعرق پتانسیل دارد. افزایش ۱۰ درصدی در بارش حوضه افزایش ۲۴ درصدی در رواناب حوضه در پی خواهد داشت و کاهش ۱۰ درصدی در تبخیر تعرق پتانسیل حوضه افزایش ۵/۸ درصدی در رواناب را به دنبال دارد. همچنین نتایج نشان داد که تغییرپذیری اقلیمی سهم بزرگ‌تری در کاهش رواناب حوضه آبخیز بختگان دارد. تغییر متناسب در رواناب سالانه در نتیجه تغییرپذیری اقلیمی چیزی حدود ۶۲/۴۵ درصد و سهم فعالیت‌های انسانی در تغییر رواناب سالانه ۳۷/۵۵ برآورد شد (جدول ۳).

جدول ۳. تأثیرات تغییرپذیری اقلیمی و فعالیت‌های انسانی بر رواناب حوضه آبخیز بختگان

دوره	P	PET	ω	β	α	ΔQ_{total}		
						ΔQ_c	ΔQ_H	%
۱۳۷۹-۹۱	۴۵۲/۶۹	۱۱۱۵/۴۲	۱/۱۲۴	۰/۲۴	-۰/۰۵۸	-۳۰/۲۲	-۱۸/۸۷	۶۲/۴۵
	mm	mm				mm	mm	%
						mm	mm	%

بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه دوره طبیعی و دوره تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی توسط آزمون‌های آماری از یکدیگر تفکیک شدند. در دوره طبیعی فرض بر آن است که تأثیر فعالیت‌های انسانی بر رواناب بسیار ناچیز است. بنابراین، واسنجی و اعتبارسنجی مدل براساس دوره طبیعی و فرایند پردازش مدل براساس داده‌های دوره انسانی صورت می‌پذیرد. با توجه به اهمیت تفکیک صحیح این دو دوره از یکدیگر و کاهش نبود قطعیت‌های احتمالی در واسنجی و اعتبارسنجی مدل، چهار آزمون پتیتیت، همگنی استاندارد نرمال، نسبت ون نئومن و آزمون دامنه بوشند به کار گرفته شدند. همچنین دو آزمون من-کندال و شیب تخمینگر سن بدین منظور استفاده شدند که شناخت و درک درستی از نسبت تغییرات بارش و تبخیر تعرق پتانسیل به عنوان دو محرک اصلی تغییرات اقلیمی و رواناب حاصل شود. تأثیرات تغییرپذیری اقلیمی و فعالیت‌های انسانی روی رواناب به وسیله روش تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی برآورد شد. ترکیب آزمون‌های آماری آشکار ساختند که رواناب حوضه آبخیز بختگان از سال ۱۳۷۸ کاهش معناداری داشته در حالی که بارش حوضه در کل دوره آماری ۱۳۵۱-۱۳۹۱ تقریباً ثابت بوده است. همچنین افزایش معنادار تبخیر تعرق پتانسیل از سال

۱۳۶۵ (۱۳ سال بیش از کاهش معنادار رواناب) بیان می‌کند که بارش و تبخیر تعرق پتانسیل تنها فاکتورهای اثرگذار در کاهش رواناب حوضه نبوده‌اند. مقایسه ضریب حساسیت بارش (β) و ضریب حساسیت تبخیر تعرق پتانسیل (α)، مبنی بر کاهش ۱۰ درصدی در بارش حوضه کاهشی ۲۴ درصدی در رواناب و افزایش ۱۰ درصدی در تبخیر تعرق پتانسیل حوضه کاهشی ۵/۸ درصدی در رواناب بیانگر این است که رواناب حوضه حساسیت بیشتری به تغییرات بارش نسبت به تغییرات تبخیر تعرق پتانسیل دارد. بررسی‌های [۱] نشان داد که در سطح حوضه طی سال‌های ۱۳۶۶-۱۳۹۰ میزان اراضی خاک بدون پوشش و شوره‌زار ۳۹ و ۳۷/۵ درصد افزایش داشته است. تغییرات میزان اراضی کشاورزی و مرتعی از سال ۱۳۶۶ تا ۱۳۹۲ به ترتیب ۲۸ و ۳/۵ درصد کاهش داشته است. ترکیب نتایج به دست آمده از آزمون‌های آماری مبنی بر معنادار نبودن روند کاهشی بارش حوضه، وجود نداشتن تناسب در روند کاهشی متغیرهای اقلیمی و رواناب؛ کاهش معناداری همبستگی میان بارش و رواناب در دوره پس از تغییر نسبت به پیش از تغییر، نوسان و تفاوت معنادار در منحنی‌های تجمعی جریان دو دوره، وجود نوسانات آشکار رواناب طی سال‌های ۱۳۷۷-۱۳۷۸، تغییرات گسترده کاربری اراضی حوضه طی

- review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology* 310:28–61.
- [6]. Budyko, M. I. (1981). *Climate and Life*, Academic, San Diego, CA, 1974. Fuh, B. P.: On the calculation of the evaporation from land surface, *Sci. Atmos. Sinica*, 5, 23–31.
- [7]. Buishand, T. A. (1982). Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *Journal of Hydrology*, 58, 11–27.
- [8]. Dooge, JCI., Bruen, M., and Parmentier, B. (1999) A simple model for estimating the sensitivity of runoff to long-term changes in precipitation without a change in vegetation. *Adv Water Resour* 23:153–163.
- [9]. Gocic, M., and Trajkovic, S. (2013) Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia. *Global and Planetary Change*. 100, 172-182.
- [10]. Helsel, DR., and Hirsch, RM. (1992) *Statistical Methods in Water Resources*. Elsevier. Amsterdam. ISBN 0-444-88528-5.
- [11]. IPCC, (2007) *Climate change (2007). the physical science basis*. In: Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (eds) *Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press, Cambridge.
- [12]. Jiang., S. H., Ren., L. L., Yong, B., Singh., V. P., Yang. X. L., and Yuan., F. (2011). Quantifying the effects of climate variability and human activities on runoff from the Laohahe Basin in Northern China using three different methods, *Hydrol. Process*, 25, 2492–2505.
- [13]. Kendall, MG. (1975). *Rank correlation measures*. Charles Griffin, London.
- [14]. Kong, D., Miao, C., Wu, J., & Duan, Q. (2016). Impact assessment of climate change and human activities on net runoff in the Yellow River Basin from 1951 to 2012. *Ecological Engineering*, 91, 566-573.
- [15]. Lettenmaier, DP., Wood, EF., and Wallis., JR. (1994). Hydro-climatological Trends in the Continental United States, 1948-88. *J. Climat.* 7, 586-607.
- [16]. Ma, ZM., Kang, SZ., Zhang, L., Tong, L., and Su., XL. (2008). Analysis of impacts of climate change and human activity on streamflow for a river basin.
- سال‌های ۱۳۶۶-۱۳۹۰ که بدان اشاره شد آشکار می‌سازد که رواناب حوضه به‌وسیله فاکتورهای دیگری به‌جز متغیرهای اقلیمی تحریک و تحت تأثیر قرار گرفته‌اند. همچنین با مروری بر برنامه دوم توسعه (۱۳۷۴-۱۳۷۸) مبنی بر افزایش تأمین اعتبار در بخش آب و کشاورزی، خودکفایی در تأمین مواد غذایی و فرآورده‌های دامی مورد نیاز کشور (تبصره ۷۵ برنامه دوم توسعه) و با توجه به سیاست‌گذاری‌های صورت‌گرفته در بخش صنعت و کشاورزی طی دهه هفتاد، تغییر در فرایندهای هیدرولوژیک ناشی از فعالیت‌ها و مداخلات انسانی در حوضه‌های آبخیز کشور طی سال‌های ۱۳۷۴-۱۳۷۸ دور از انتظار نبود. بنابراین، نقطه شروع نوسانات در رواناب را می‌توان بازتاب‌کننده تأثیرات هم‌زمان اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر رواناب دانست. پس از قطعیت‌یافتن نسبت به تغییرات رواناب و نقطه شروع آن از داده‌های دوره پیش از تغییر به‌منظور واسنجی و اعتبارسنجی و از داده‌های دوره پس از تغییر به‌منظور فرایند پردازش مدل تحلیل حساسیت هیدرولوژیک، استفاده شد. مدل تحلیل حساسیت هیدرولوژیک در ارزیابی کمی از تأثیرات تغییرپذیری اقلیمی و فعالیت‌های انسانی در کاهش رواناب حوضه آبخیز بختگان، سهم تغییرپذیری اقلیمی را ۶۲/۴۵ درصد و سهم فعالیت‌های انسانی را ۳۷/۵۵ برآورد کرد.

منابع

- [۱]. کاظمی، محسن، ۱۳۹۳، بررسی حساسیت رسوبات دریاچه مهارلو به فرسایش بادی و تهدیدهای احتمالی برای شهرستان‌های اطراف، دانشگاه تهران، ۲۲۰.
- [2]. Alexandersson, H. (1986). A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of Climatology*, 6, 661–675.
- [3]. Alexandersson, H. and Moberg, A. 1997. Homogenization of Swedish temperature data, Part I: Homogeneity test for linear trends. *Int. J. Climatol*, 17(1): 25–34.
- [4]. Allen, RG., Pereira, LS., Raes, D., and Smith, M. (1998) *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No.56. FAO, Rome, Italy.
- [5]. Brown, AE., Zhang, L., McMahon, TA., Western, AW., and Vertessy, RA. (2005) A

- [17]. Mann, H.B. (1945). Non-parametric tests against trend. *Econometrica* 13:245–259.
- [18]. Milly, P.C.D., Dunne, K.A. (2002). Macro-scale water fluxes 2. Water and energy supply control of their inter-annual variability. *Water Resour Res* 38:1206.
- [19]. Niemann, J.D., Eltahir, E.A.B. (2005). Sensitivity of regional hydrology to climate changes, with application to the Illinois River basin. *Water Resources Research* 41: W07014.
- [20]. Novotny, V., Stefan, H.G. (2007). Stream flow in Minnesota: indicator of climate change. *Journal of Hydrology* 334: 319–333.
- [21]. Peng, D., Qiu, L., Fang, J., & Zhang, Z. (2016). Quantification of Climate Changes and Human Activities That Impact Runoff in the Taihu Lake Basin, China. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016.
- [22]. Pettitt, A. (1979). A nonparametric approach to the change-point problem, *Appl. Statist.*, 28, 126–135.
- [23]. Ren, L.L., Wang, M.R., Li, C.H., and Zhang, W. (2002). Impacts of human activity on river runoff in the northern area of China. *Journal of Hydrology* 261:204–217.
- [24]. Salas, J.D., Delleur, J.W., Yevjevich, V., and Lane, W.L. (1980). *Applied Modelling of Hydrologic Time Series*. Water Resources Publications, Littleton, CO, USA.
- [25]. Scanlon, B.R., Jolly, I., Sophocleous, M., and Zhang, L. (2007). Global impacts of conversion from natural to agricultural ecosystem on water resources: quantity versus quality. *Water Resour Res* 43: W03437.
- [26]. Sen, P.K. (1966). Estimation of the regression coefficients based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*. 63, 1379–1389.
- [27]. Shen, H., Ren, L., Yuan, F., & Yang, X. (2015). Comparative assessment of extreme climate variability and human activities on regional hydrologic droughts in the Weihe River basin, North China. *Proc. IAHS*, 369, 141–146.
- [28]. Tabari, H., and Marofi, S. (2011) Changes of pan evaporation in the west of Iran. *Water Resources Management* 25, 97–111.
- [29]. Theil, H., (1950). A rank invariant method of linear and Polynomial regression analysis, Part 3, *Netherlands Akademic van wetten schappen. Proceedings*. 53, 1379–1412.
- [30]. Vogel, R. M., and Fennessey, N. M. 1994. Flow-duration curves, I: New interpretation and confidence intervals, *J. Water Resour. Plan. Manage.*, 120, 485–504.
- [31]. Von Neumann, J. (1941). Distribution of the ratio of the mean square successive difference to the variance. *Annals of Mathematical Statistics*, 13, 367–395.
- [32]. Yuan, Y., Zhang, C., Zeng, G., Liang, J., Guo, S., Huang, L.,... & Hua, S. (2016). Quantitative assessment of the contribution of climate variability and human activity to streamflow alteration in Dongting Lake, China. *Hydrological Processes*.
- [33]. Yue, S., and Wang, C.Y. (2004). The Mann–Kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series. *Water Resour Manage.* 18, 201–218.
- [34]. Yue, S., and Wang, C.Y. (2002). Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test. *Water Resour Res* 38:1068.
- [35]. Zarghami, M., Abdi, A., Babaeian, I., Hassanzadeh, Y., and Kanani, R. (2011). Impacts of climate change on runoffs in East Azerbaijan, Iran. *Global and Planetary Change*, 78(3), 137–146.
- [36]. Zhan, C. S., Jiang, S. S., Sun, F. B., Jia, Y. W., Yue, W. F., and Niu, C. W. (2014). Quantitative contribution of climate change and human activities to runoff changes in the Wei River basin, China. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 11(2), 2149–2175.
- [37]. Zhang, L., Hickel, K., Dawes, W.R., Chiew, R.H.S., Western, A.W., Briggs, P.R. (2004). A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration. *Water Resources Research*. 40: W02502.
- [38]. Zhang, Q., Xu, C.Y., and Yang, T. (2009) Variability of water resource in the Yellow River Basin of past 50 years, China. *Water Resour Manag* 23:1157–1170.
- [39]. Zhang, X. P., Zhang, L., Zhao, J., Rustomji, P., and Hairsine, P. (2008). Response of streamflow to changes in climate and land use/cover in the Loess Plateau, China, *Water Resour. Res.*, 44, W00A07.