

ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر مقادیر رسوب معلق در تعدادی از حوزه‌های آبخیز استان اردبیل

نیر آقابگی^۱

اباذر اسمعیلی عوری^۲

رئوف مصطفی‌زاده^۳

محمد گلشن^۴

چکیده

برآورد رسوب‌دهی رودخانه‌ها به دلیل تأثیرگذاری عوامل مختلف دارای پیچیدگی بالایی می‌باشد. استفاده از منحنی‌های سنجه‌رسوب و رابطه توانی برازش داده شده بین داده‌های دبی و غلظت رسوب معلق یکی از متداول‌ترین روش‌های تعیین میزان غلظت رسوب معلق است. هدف پژوهش حاضر به دست آوردن تغییرات رسوب طی دهه آینده (۲۰۳۰-۲۰۱۱) با استفاده از معادله سنجه‌رسوب می‌باشد. برای این منظور از مدل هیدرولوژیکی IHACRES و مدل اقلیمی LARS-WG استفاده شد. مدل IHACRES ابتدا برای ۷ ایستگاه هیدرومتری واسنجی و اعتبارسنجی شد سپس با به کارگیری مدل LARS-WG میزان تغییرات درجه حرارت حداقل، حداکثر و بارندگی برای دوره آینده به دست آمدند. این تغییرات به مدل IHACRES اعمال شدند و میزان دبی جریان دوره آتی تخمین زده شد. با استفاده از داده‌های دبی و رسوب مشاهداتی

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبخیزداری دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی

۲- دانشیار گروه منابع طبیعی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی (نویسنده مسئول)

Email: esmaliouri@uma.ac.ir- Tel:09144538623

۳- استادیار گروه منابع طبیعی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیل

۴- دانشجوی دکتری رشته آبخیزداری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

منحنی سنجه رسوب تهیه و مقادیر دبی رسوب معلق برای دوره آتی محاسبه شد. نتایج نشان داد مقدار بارندگی ۳/۶۸ درصد کاهش یافته و دمای حداقل ۱۶/۴۸ و دمای حداکثر نیز ۵/۳۹ درصد افزایش یافته است، که به‌طور کلی منجر به کاهش ۱۶ درصدی رواناب شده است. همچنین تعداد رخدادهای دبی اوج افزایش یافته که بیش‌ترین افزایش مربوط به ایستگاه هیدرومتری یامچی با دبی متوسط ۲/۰۹ و ۱۶ رخداد دبی اوج بالای ۶ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. این تغییرات اقلیمی به‌طور متوسط منجر به کاهش ۴۷ درصدی بار معلق رسوب در ایستگاه‌های مطالعاتی شده است. نتایج پژوهش نشان دهنده تأثیر قابل توجه تغییر اقلیم بر حوزه‌های آبخیز استان اردبیل می‌باشد و با توجه به اثرات زیست محیطی تغییر اقلیم لازم است راهکارهایی جهت مدیریت مناسب حوزه‌های آبخیز اتخاذ شود.

واژگان کلیدی: سنجه رسوب، تغییر اقلیم، LARS-WG، دبی، IHACRES

مقدمه

فرسایش و رسوب‌گذاری، یک فرآیند معمول در سطح اراضی و رودخانه‌ها است که امروزه تشدید این فرآیند منجر به از دست رفتن خاک حاصلخیز به‌صورت کاهش توان تولیدی و تخریب خصوصیات فیزیکی- شیمیایی خاک و ایجاد خسارت‌های هنگفت در طرح‌های منابع آب می‌شود (گیریلانو و همکاران، ۲۰۱۵: ۱۳۶). مشخصات ژئومورفولوژیکی، اقلیمی و فعالیت‌های کشاورزی مانند شخم در جهت شیب باعث تشدید فرسایش در حوضه‌های مدیرانه‌ای شده است (گومز و همکاران، ۲۰۰۹: ۷). با بروویستکایا^۱ و همکاران (۲۰۰۳: ۱۲۸) با تحلیل آماری و هیدرولوژیکی تغییرات بلندمدت رسوب معلق در رودخانه‌های بزرگ به این نتیجه رسیدند که تغییرات زمانی بار رسوب معلق به‌جای تغییرات اقلیمی بیش‌تر در ارتباط با فعالیت‌های انسانی بوده است. رسوب معلق رودخانه‌ها تا حد زیادی نشان‌دهنده وضعیت بالادست حوضه می‌باشد و از اطلاعات موجود می‌توان رابطه بین

فرسایش حوضه و رسوب معلق را مطالعه کرد (هایکس^۱، ۲۰۰۰: ۲۰۰۰: ۱۱۳۰؛ نیکولایدیس و همکاران، ۲۰۱۳: ۸۳۲).

بار معلق شاخصی از رسوب‌دهی کل سطح آبخیز است و بر اثر شستشوی اراضی حاصل‌خیز بالادست شکل می‌گیرد (کائو^۲، ۲۰۰۵: ۶۵۳). غالب ارزیابی‌های مقدار تولید رسوب حوزه‌های آبخیز با استفاده از نمونه‌برداری‌های پراکنده و نامنظم از رسوبات معلق رودخانه‌ها صورت می‌گیرد که در صورت عدم وجود اندازه‌گیری واقعی رسوب، از منحنی سنجه رسوب برای تخمین غلظت رسوب معلق استفاده می‌شود (هوروویتز^۳، ۲۰۰۳: ۳۳۸۷؛ گوپتا و چاکراپانی^۴، ۲۰۰۷: ۶۸۰). عوامل بسیاری چون اقلیم، کاربری اراضی، صحت آمار و نحوه تجزیه و تحلیل آماری بر شکل و شیب منحنی‌ها مؤثر می‌باشد (والینگ^۵، ۱۹۹۷: ۱۱۳).

وانگ و همکاران (۲۰۰۷: ۳۳۱) در تحقیقی به بررسی تغییرات رسوب معلق وارده به دریا از طریق رودخانه زردچین پرداختند. نتایج نشان داد که در دوره ۱۹۵۰ تا ۲۰۰۵ میزان رسوب به‌صورت تدریجی کاهش یافته است. کاهش در میزان بارندگی و دبی جریان ۳۰ درصد در این کاهش رسوب تأثیرگذار بوده است. کاهش دبی جریان و دبی رسوب در سایر رودخانه‌ها مانند نیل (ایستلی و وارن، ۱۹۹۸: ۷۹۴)، ایندوس (والینگ و فانگ، ۲۰۰۳: ۱۱۱) و چانگ‌جیانگ (یانگ و همکاران، ۲۰۰۶: ۸) نیز مشاهده شده است.

گیرولامو و همکاران (۲۰۱۵: ۱۳۸) با استفاده از منحنی سنجه رسوب اقدام به آنالیز تغییرات رسوب معلق در طی دوره ۱۲ ماهه در رودخانه کلون ایتالیا پرداختند. مقدار رسوب معلق بین ۲۵۰ تا ۳۸۴ تن در کیلومتر مربع در سال به‌دست آمد. نتایج نشان داد که ۹۴ درصد رسوبات در دبی‌های اوج و کمتر از ۱ درصد رسوبات در دبی‌های پایین انتقال می‌یابد. لادیگارد و همکاران (۲۰۱۶: ۵۸۴) در تحقیقی در حوزه زاکنبرگ گرینلند از روش منحنی

1 - Hicks

2- Kao

3 - Horowitz

4- Gupta and Chakrapani

5 - Walling

سنجه رسوب برای تعیین رابطه بین غلظت رسوب و دبی جریان پرداختند. متوسط غلظت رسوب ۴۳ هزار تن در سال و ۶۱ هزار تن در سال محاسبه شد و به طور متوسط ۲۰ تا ۳۷ درصد دبی رسوب مربوط به وقایع اوج می‌باشد. نتایج روش سنجه رسوب نشان داد که این روش نسب به تغییرات روزانه غلظت رسوب کمتر حساس می‌باشد. در پژوهش حکیم‌خانی و همکاران (۱۳۷۹: ۱) به تحلیل رسوب معلق در دریاچه ارومیه پرداختند که عوامل دبی متوسط سالانه، درصد سنگ‌های حساس به فرسایش، بارش متوسط سالانه و درصد اراضی به‌عنوان عوامل اصلی بیش از ۰/۹۳ تغییرات رسوب معلق معرفی شدند. در مطالعه‌ای لکزاییان پور و همکاران (۱۳۹۵: ۱۸۳) به بررسی برآورد مقدار رسوب از داده‌های دبی با استفاده از منحنی سنجه رسوب پرداختند نتایج نشان می‌دهد با افزایش بارندگی ۹۶/۴۶ درصدی مقدار رسوب معلق به میزان ۹۹/۶۲ درصد افزایش یافته است. همچنین در تحقیقی از منحنی سنجه رسوب به منظور تعیین رسوب معلق در رودخانه زاینده رود استفاده شد (حلبیان و همکاران ۱۳۹۵: ۱۹۴)، نتایج نشان داد که بیش‌ترین رسوب معلق در سال ۱۳۸۵ و کم‌ترین آن در سال ۱۳۸۱ رخ داده است، همچنین نتایج نشان داد با افزایش بارندگی، رسوب معلق افزایش می‌یابد.

مبانی نظری

مدل هیدرولوژیکی IHACRES یکی از پرکاربردترین مدل‌های هیدرولوژیکی جهت تخمین رواناب می‌باشد که قابلیت مدل‌سازی برای دوره آینده را دارد (صیاحی و همکاران، ۱۳۹۶: ۸). در سال‌های اخیر به‌طور گسترده در مطالعات داخل کشور (گودرزی و همکاران، ۱۳۹۴: ۱۷۶؛ کاویان و همکاران، ۱۳۹۶: ۹۰؛ گلشن و همکاران، ۱۳۹۵: ۲۹) و خارج کشور (لیتل‌وود، ۲۰۰۷: ۱۲۲۹؛ سریونگسیتانن و تاسومیات، ۲۰۱۱: ۹۱۷؛ داووچاند و همکاران، ۲۰۱۷: ۲۳۵۵) از این مدل برای تخمین رواناب استفاده شده است.

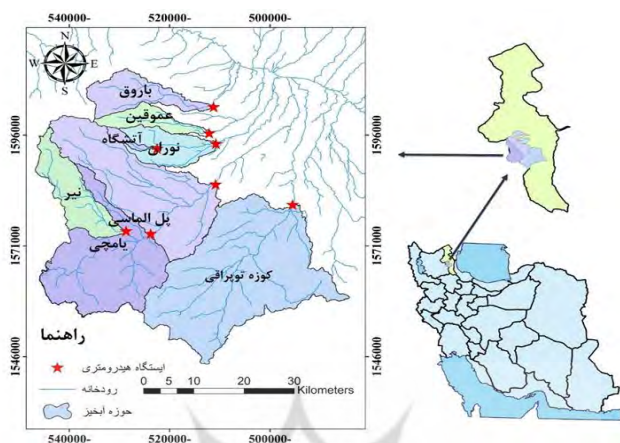
پارمترهای بارش و دما به‌عنوان ورودی تأثیر قابل‌توجهی در خروجی حوزه‌های آبخیز دارند، از طرفی بین دبی رواناب و دبی رسوب خروجی همبستگی بالایی وجود دارد. برپایه این همبستگی‌های معادلات و مدل‌های مختلفی برای فهم بهتر فرآیندهای حوزه‌های آبخیز ارائه شده است. آگاهی از توزیع مقدار رسوب در طول سیل‌های بزرگ، مهندسان را در

طراحی سازه‌ها برای تله‌اندازی بهتر رسوب یاری می‌نماید. علاوه بر این دانستن چگونگی توزیع رسوب در طول دبی‌های مختلف به مدیریت بهتر و جامع حوزه‌های آبخیز کمک می‌کند (تلوری و همکاران، ۱۳۸۶: ۶۵). بنابراین هدف از این تحقیق: (۱) واسنجی مدل IHACRES در حوزه‌های مختلف، (۲) تعیین تغییرات اقلیمی برای دوره (۲۰۳۰-۲۰۱۱) با استفاده از مدل (۳ LARS-WG) محاسبه منحنی سنجه رسوب برای حوزه‌های مختلف، (۴) تخمین دبی جریان برای دوره آتی با مدل IHACRES و (۵) محاسبه دبی رسوب برای دوره آتی در حوزه‌های مختلف با منحنی سنجه رسوب می‌باشد.

مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه مورد مطالعه

استان اردبیل در شمال غربی فلات ایران بین مختصات $37^{\circ} 45'$ تا $42^{\circ} 39'$ عرض شمالی و $3^{\circ} 47'$ تا $55^{\circ} 48'$ طول شمالی واقع شده است (شکل ۱). استان اردبیل جزء اقلیم نیمه‌خشک و سرد کوهستانی محسوب می‌شود و به‌طور متوسط دارای ۲۲۰ تا ۴۵۷ میلی‌متر بارندگی می‌باشد، تغییرات دمایی حوزه از حداقل ۳۲- درجه‌ی سانتی‌گراد در نزدیکی قله‌ی سبلان تا حداکثر ۳۴ درجه‌ی سانتی‌گراد در نواحی سد یامچی متغیر است. نتایج بررسی دوره آماری گذشته (۱۳۹۵-۱۳۶۶) برای ایستگاه‌های هواشناسی منطقه در جدول ۱ ارائه شد. بارش‌های منطقه تحت تاثیر اقلیم منطقه شمال غرب بوده و در اوایل فصل پاییز با ورود سیستم‌های باران‌زای غربی بارش‌ها شروع می‌شود (خروشی و همکاران، ۱۳۹۶: ۳۸۲).



شکل (۱) موقعیت جغرافیایی حوضه‌های مورد مطالعه در استان اردبیل

جدول (۱) مشخصات هواشناسی در منطقه مطالعاتی

درجه حرارت (سانتی‌گراد)	بارندگی (میلی‌متر)	مختصات جغرافیایی			نام ایستگاه
		ارتفاع	عرض	طول	
۸/۳	۴۳۳/۸	۱۷۷۸	۳۸°۱۲'۵۸"	۴۸°۰۳'۳۰"	آتسگاه
۷/۵۶	۴۶۱/۱	۱۳۲۸	۳۸°۰۱'۳۹"	۴۷°۵۹'۴۰"	نیل
۱۱/۲	۴۰۴/۸	۱۳۶۵	۳۸°۱۳'۵۱"	۴۸°۱۷'۰۲"	اردبیل
۷/۷	۴۵۶/۴	۱۵۹۴	۳۸°۰۲'۳۵"	۴۸°۰۲'۵۳"	یامچی

جدول ۲ - مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری در حوضه‌های منتخب در استان اردبیل

عرض	طول	ارتفاع (متر)	مساحت (هکتار)	ایستگاه	نام رودخانه
۳۸°۱۳'۰۵"	۴۸°۰۳'۲۳"	۲۴۲۹	۱۶۶۱	آتسگاه	نوران
۳۸°۱۵'۰۷"	۴۸°۱۰'۰۴"	۲۲۲۹	۷۴۷۱	عموقین	یدی بولیک
۳۸°۰۷'۲۸"	۴۸°۲۲'۰۱"	۱۷۵۵	۷۶۶۷۴	کوزه تپراق	قوریچای
۳۸°۱۳'۵۹"	۴۸°۱۱'۳۷"	۱۹۴۴	۱۲۸۴۷	نوران	نوران چای
۳۸°۰۲'۰۲"	۴۷°۵۹'۲۸"	۲۵۱۶	۱۵۷۹۷	نیل	نیل چای
۳۸°۱۸'۱۷"	۴۸°۱۰'۰۶"	۲۴۶۹	۱۲۶۴۷	باروق	شهریور
۳۸°۰۲'۰۵"	۴۸°۰۲'۱۱"	۲۱۶۱	۵۶۶۲۴	یامچی	بالخوچای

تجزیه و تحلیل داده‌ها

مدل اقلیمی LARS-WG

این مدل از سه بخش اصلی واسنجی، ارزیابی و شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی دهه‌های آینده تشکیل شده است. نیاز اساسی مدل در مرحله واسنجی، داده‌های آماری است که مشخص کننده رفتار اقلیم در دوره گذشته می‌باشد (کریمی و قاسمی، ۱۳۹۶: ۳۴۲). داده‌های روزانه بارش، دمای کمینه، دمای بیشینه و ساعت آفتابی ایستگاه سینوپتیک اردبیل در یک دوره ۳۰ ساله برای دوره گذشته وارد مدل LARS-WG شد. برای شبیه‌سازی ابتدا همبستگی آماری بین خروجی مدل در گذشته با داده‌های دوره آماری ایستگاه هواشناسی به دست آمد. در صورتی که نتایج به دست آمده از مقایسه داده‌های تولیدی توسط مدل با داده‌های دوره آماری قابل قبول باشد، می‌توان آن‌ها را در سناریوهای اقلیمی آینده مورد استفاده قرار داد. با بررسی منابع (لکزائیان پور و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۸۳؛ کاویان و همکاران، ۱۳۹۶: ۸۹؛ صیاحی و همکاران، ۱۳۹۶: ۷؛ کریمی و قاسمی، ۱۳۹۶: ۲۴۱) از مدل HadCM3 جهت تخمین دما و بارش دوره آینده استفاده شد. جهت بررسی عملکرد نتایج شبیه‌سازی در مدل LARS-WG از آزمون‌های آماری برای مقایسه داده‌های تولید شده در مدل و داده‌های دوره پایه (مشاهداتی) استفاده شد.

مدل هیدرولوژیکی IHACRES

مدل IHACRES یک مدل بارش رواناب در مقیاس حوزه آبخیز است که با هدف تشخیص رابطه بین بارش و رواناب توسعه داده شده است (سریونگسیتانون و تاسومبات، ۲۰۱۱: ۹۲۱). چارچوب مدل‌سازی IHACRES بر یک ساختار دو جزئی مبتنی است؛ بخش محاسبه رطوبت خاک SAM و بخش روندیابی و یا هیدروگراف واحد. مدل SAM بارش و درجه حرارت را به بارش موثر تبدیل می‌کند. بخش روندیابی بارش موثر را به جریان تبدیل می‌کند (بی و همکاران، ۱۹۹۷):

$$u_k = [c(\Phi_k - 1)]^p r_k \quad (1)$$

که در آن C ضریب تعادل حجم بارش، I آستانه شاخص رطوبت خاک، فاکتور واکنش غیر خطی، r_k بارش مشاهداتی است.

$$\Phi_k = r_k + \left(1 - \frac{1}{t_k}\right) \Phi_{k-1} \quad (2)$$

در رابطه مذکور Φ_k نشان دهنده شاخص رطوبت خاک می‌باشد، بقیه پارامترها مطابق با رابطه ۱ می‌باشند.

منحنی سنجهرسوب

منحنی سنجهرسوب، مربوط به غلظت رسوبات معلق رودخانه به منظور برآورد رسوبات از داده‌های دبی جریان رودخانه استفاده می‌کند. منحنی سنجهرسوب به‌طور کلی نشان‌دهنده یک رابطه تابعی نمایی می‌باشد (حلبیان و حیدری، ۱۳۹۵: ۱۹۳):

$$SSC = aQ^b \quad (3)$$

تا زمانی که دبی $Q \left(\frac{m^3}{s}\right)$ و رسوب $SSC \left(\frac{g}{m^3}\right)$ باشد و رسوبات به‌حالت معلق باشند پارامتر a و b (ضرایب ثابت) برای یک جریان خاص از داده از طریق رگرسیون خطی بین لگاریتم SSC و لگاریتم Q تعیین می‌شود. پس از آن، بار رسوبات (SL) را می‌توان با رابطه زیر محاسبه کرد (آقایی، ۱۳۹۶: ۹۷):

$$SL = Q * SSC \quad (4)$$

معادله سنجهرسوب در کاغذ لگاریتمی رسم می‌شود و معادله خط آن به‌صورت توانی است. پس از به‌دست آوردن معادله خط منحنی سنجهرسوب، اگر فقط داده‌های دبی موجود باشند، این داده‌ها در معادله قرار می‌گیرند و مقدار رسوب تخمین زده می‌شود. در اکثر ایستگاه‌های هیدرومتری کشور امکان ثبت هم‌زمان دبی آب و دبی رسوب وجود ندارد و معمولاً از منحنی سنجهرسوب استفاده می‌شود، از دلایل دیگر استفاده از این روش، دشواری نمونه‌برداری در هنگام وقوع سیلاب می‌باشد.

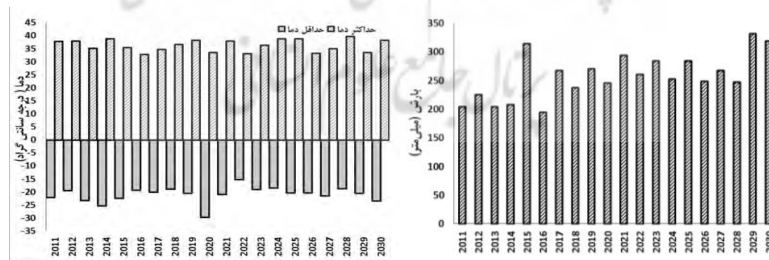
تخمین دبی رواناب و رسوب برای دوره آتی

مدل IHACRES ابتدا برای ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه واسنجی شد سپس با اعمال داده‌های اقلیمی شبیه‌سازی شده با مدل اقلیمی LARS-WG میزان رواناب برای دوره آینده پیش‌بینی شد. سپس به منظور محاسبه میزان رسوب برای دوره آتی (۲۰۳۰-۲۰۱۱) از معادله منحنی سنج‌رسوب دوره مشاهداتی استفاده شد. معادلات سنج‌رسوب مشاهداتی به‌عنوان یک تابع از دبی‌های رودخانه رسم شد و اغلب به‌نام منحنی سنج‌رسوب معرفی شده‌است. منحنی سنج‌رسوب برای تولید رسوب بر اساس اوج جریان روزانه پیش‌بینی شده برای دوره‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۳۰ استفاده شد.

یافته‌ها و بحث

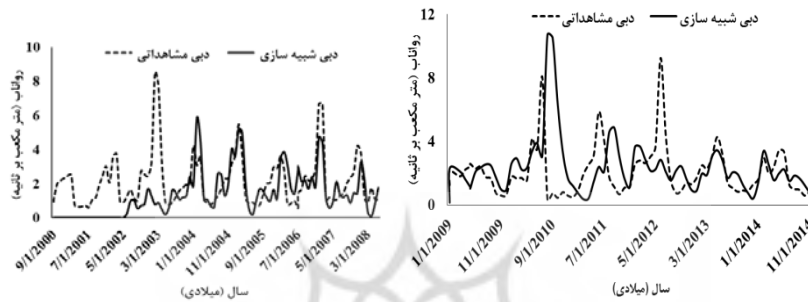
اثر تغییر اقلیم بر دبی جریان

ریز‌مقیاس‌نمایی تغییرات اقلیمی با مدل HadCM3 برای دوره ۲۰۳۰-۲۰۱۱ تحت سه سناریو اقلیمی (A1، A1B و B1) انجام شد و سناریو واقع‌بینانه A1B برای بررسی تغییرات اقلیمی انتخاب شد (شکل ۲). نتایج نشان داد که برای این دوره مقدار بارندگی به‌طور متوسط ۳/۶۸ درصد کاهش یافته‌است و بیش‌ترین کاهش مربوط به ماه نوامبر می‌باشد. هم‌چنین دمای حداقل و حداکثر به‌طور متوسط به‌ترتیب ۱۶/۴۸ درصد و ۵/۳۹ افزایش یافته‌است و بیش‌ترین افزایش دما مربوط به دمای حداقل ماه ژانویه با ۳ درجه سانتی‌گراد و بیش‌ترین کاهش دما مربوط به دمای حداقل ماه جولای با ۱/۹ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

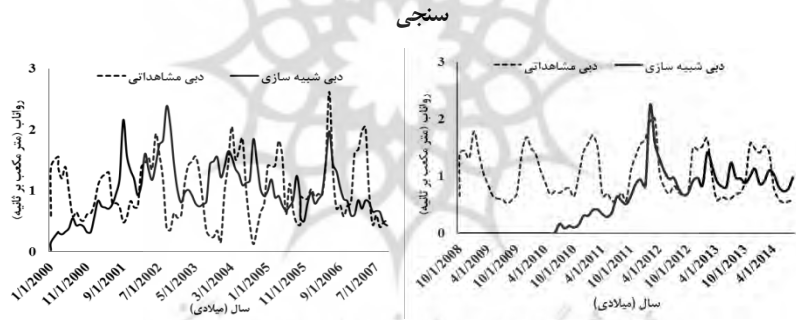


شکل (۲) نتایج پیش‌بینی مدل Lars با سناریو A1B: الف) بارندگی، ب) درجه حرارت حداقل و حداکثر

جهت استفاده از مدل هیدرولوژیکی IHACRES برای شبیه‌سازی رواناب آینده ابتدا این مدل در ۷ ایستگاه مطالعاتی واسنجی و اعتبارسنجی شد. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل در دو ایستگاه یامچی و نیر به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده‌است.



شکل (۳) شبیه‌سازی دبی حوضه یامچی با مدل IHACRES: الف) دوره واسنجی ب) دوره اعتبار



شکل (۴) شبیه‌سازی دبی حوضه نیر با مدل IHACRES: الف) دوره واسنجی ب) دوره اعتبار

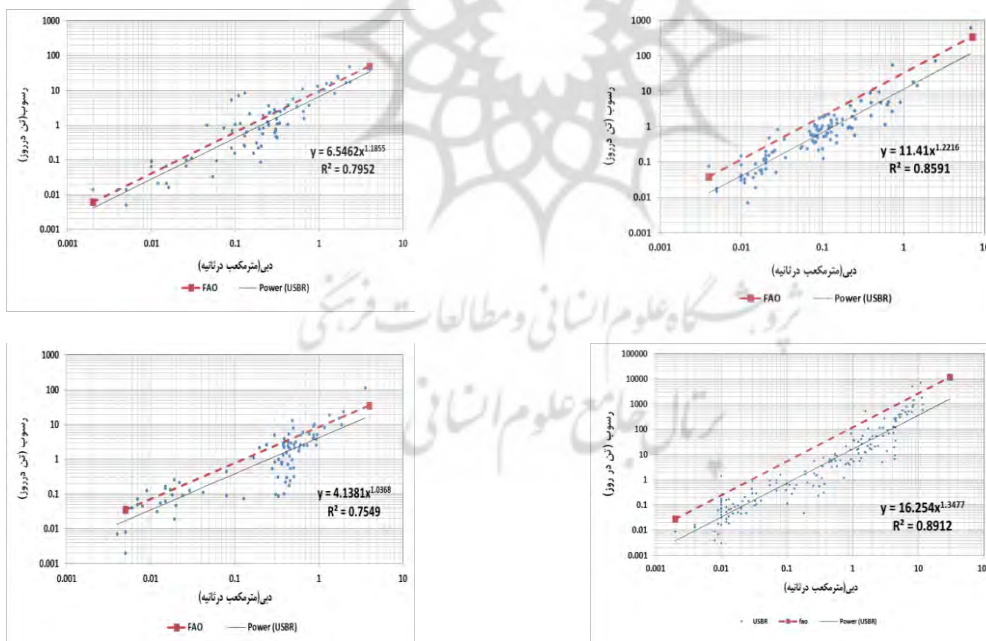
بعد از واسنجی مدل و بهینه‌سازی پارامترها، مدل برای پیش‌بینی رواناب دوره آینده مورد استفاده قرار گرفت که در جدول ۳ مقدار رواناب‌های تخمین زده شده در مقایسه با دبی مشاهداتی (۲۰۰۰-۲۰۱۴) ارائه شده‌است که در ایستگاه‌های نوران، نیر و یامچی افزایش متوسط دبی جریان و در سایر ایستگاه‌ها کاهش متوسط دبی جریان پیش‌بینی شده‌است.

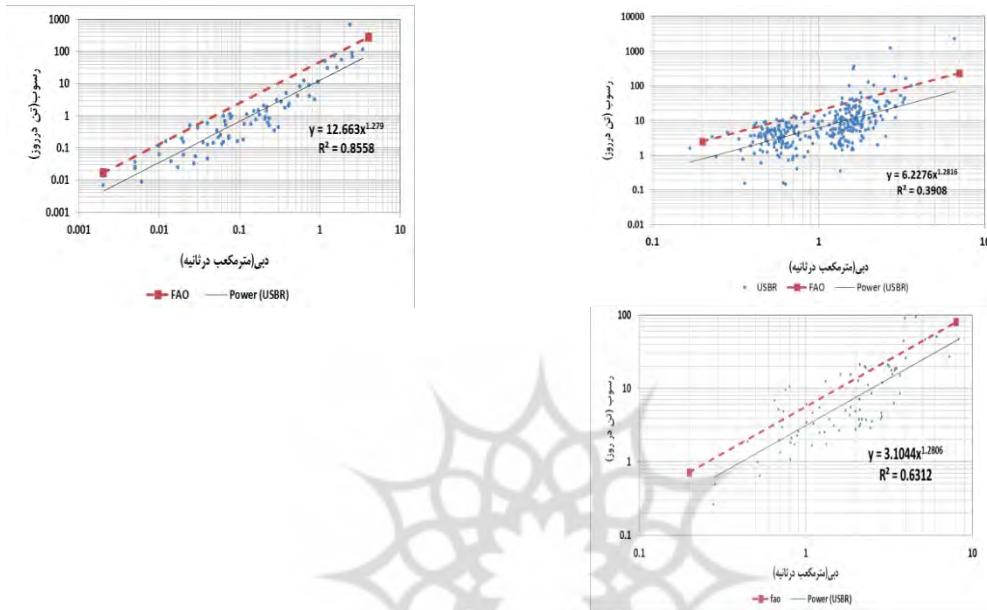
جدول (۳) مقایسه مقادیر پایه رواناب با دبی شبیه‌سازی شده (۲۰۳۰-۲۰۱۱) تحت سناریوی A1B

ایستگاه	آشگاه	عموقین	کوزه‌توپراقی	نوران	نیر	باروق	یامچی
دبی مشاهداتی	۰/۱۲	۰/۲۱	۰/۹۹	۰/۳۲	۱/۲۰	۰/۲۱	۲/۰۹
دبی آبی	۰/۰۹	۰/۱۷	۰/۸۶	۰/۲۸	۱/۳۱	۰/۱۴	۲/۶۲

اثر تغییر اقلیم بر رسوبدهی رودخانه

تغییر اقلیم بر روی پارامترهای هیدرولوژیکی مؤثر می‌باشد که می‌تواند منجر به تغییر بارمعلق جریان رودخانه شود. در پژوهش حاضر اثر تغییر اقلیم بر روی رسوبدهی حوزه‌های منتخب برای دوره مشاهداتی مورد بررسی قرار گرفته‌است. در شکل ۵ نتایج منحنی سنجه‌رسوب ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه ارائه شده‌است. معادلات منحنی سنجه‌رسوب مربوط به هر ایستگاه هیدرومتری و ضریب همبستگی بین دبی جریان و بار رسوب معلق در جدول ۴ آورده شده‌است.



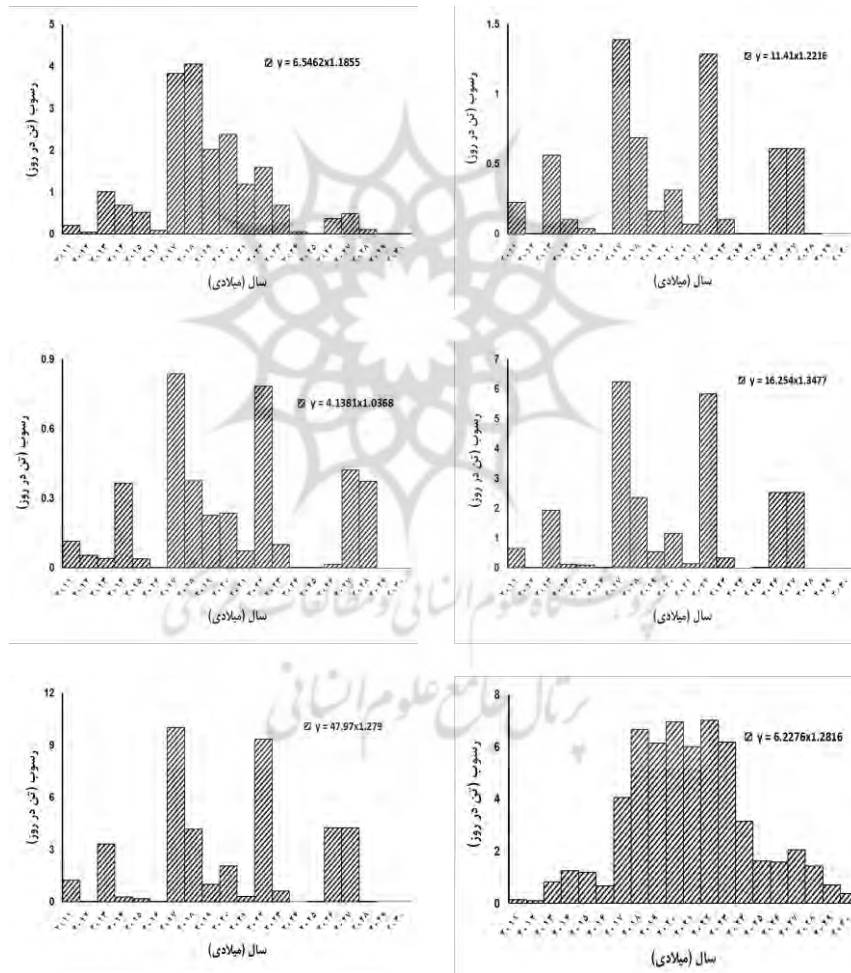


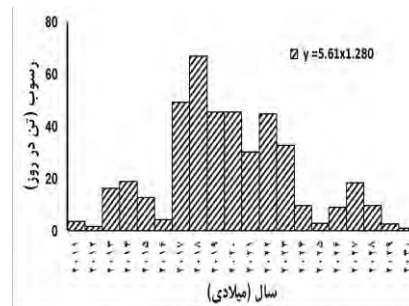
شکل (۵) نمودار همبستگی نمایی و رسوب رودخانه در حوضه‌های الف) آتشگاه، ب) عموقین، پ) کوزه توپراقی، ت) نوران، ث) نیر، ج) باروق و چ) یامچی

جدول (۴) فرمول معادلات منحنی سنجه رسوب و میزان ضریب همبستگی

ایستگاه‌های مطالعاتی	معادلات سنجه رسوب	R ²
آتشگاه	$y = 11.41x^{1.2216}$	$R^2 = 0.8591$
عموقین	$y = 6.5462x^{1.1855}$	$R^2 = 0.7952$
کوزه توپراقی	$y = 16.254x^{1.3477}$	$R^2 = 0.8912$
نوران	$y = 4.1381x^{1.0368}$	$R^2 = 0.7549$
نیر	$y = 6.2276x^{1.2816}$	$R^2 = 0.3908$
باروق	$y = 12.663x^{1.279}$	$R^2 = 0.8558$
یامچی	$y = 3.1044x^{1.2806}$	$R^2 = 0.6312$

با محاسبه معادلات منحنی سنجه رسوب ایستگاه‌های هیدرومتری میزان بار معلق رسوب در دوره آتی تخمین زده شد که در شکل ۶ نشان داده شده است. هم‌چنین تغییرات میزان دبی رسوب به صورت تفکیک شده در دوره‌های مختلف در جدول ۵ ارائه شده است. ایستگاه یامچی و نیر به ترتیب با مساحت ۵۶۶۲۴ و ۱۵۷۹۷ هکتار دارای بیش‌ترین تغییرات بار رسوب و ایستگاه آتسگاه با مساحت ۱۶۶۱ هکتار دارای کم‌ترین تغییرات بار رسوب می‌باشد.





شکل (۶) مقادیر میانگین رسوب برای دوره آتی (۲۰۳۰-۲۰۱۱) در حوضه‌های الف) آتشگاه، ب) عموقین، پ) کوزه توپراقی، ت) نوران، ث) نیر، ج) باروق و چ) یامچی

جدول (۵) مقایسه مقادیر متوسط رسوب (تن در روز) در دوره‌های انتخابی

ایستگاه	دوره اول (۲۰۲۰)	دوره دوم (۲۰۲۳)	دوره سوم (۲۰۲۶)	دوره چهارم (۲۰۲۹)
آتشگاه	۰/۲۳	۰/۱۰	۰/۰۱	۰
عموقین	۲/۳	۰/۶۸	۰/۳۶	۰/۰۰۵
کوزه توپراقی	۱/۱	۰/۳۲	۲/۵	۰
نوران	۰/۳۱	۰/۱۰	۰/۶۰	۰
نیر	۶/۹	۶/۱	۱/۵	۰/۷۰
باروق	۲/۰۵	۰/۶۲	۴/۲	۰
یامچی	۴۵/۵	۳۲/۸	۹/۰۹	۲/۶

مقدار بارندگی و درجه حرارت در ایجاد رواناب و رسوب نسبت به دیگر متغیرهای اقلیمی نقش بسیار مهمی دارند که در بیش‌تر مطالعات تغییر اقلیم این پارامترها به‌عنوان معیارهای اصلی مورد مطالعه قرار می‌گیرند (نامدار، ۱۳۹۴: ۶۸). نتایج بررسی تغییرات اقلیمی در ایستگاه سینوپتیک اردبیل نشان داد که مقدار متوسط دراز مدت درجه حرارت حداقل و حداکثر در ماه‌های گرم سال افزایش خواهد یافت که مطالعات کاویان و همکاران (۱۳۹۶: ۸۹) در حوزه هراز واقع در استان مازندران نیز چنین روندی را گزارش نموده است. در ماه‌های آگوست و جولای مقدار درجه حرارت حداکثر به‌ترتیب ۲/۳، ۲/۸ درجه سانتی‌گراد و درجه حرارت حداقل ۰/۶۸ و ۰/۳۶ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است. افزایش دما در ماه‌های گرم سال در اثر تغییر اقلیم در مطالعات صالحی و همکاران (۱۳۹۶: ۱۹۰)، تان و

همکاران (۲۰۱۵: ۱) و رضایی‌زمان و همکاران (۱۳۹۲: ۱۲۴۷) نیز عنوان شده‌است. متوسط مقدار بارندگی شبیه‌سازی شده برای ماه‌های آگوست و سپتامبر به‌طور متوسط ۸۵ درصد و ۸۰ درصد افزایش بارندگی را نشان می‌دهد ولی برای اکثر ماه‌های سال مقدار بارندگی به‌طور متوسط کاهش بارندگی را نشان می‌دهد کاهش بارندگی برای دوره آتی در مناطق نیمه‌خشک در مطالعات رضایی‌زمان و همکاران (۱۳۹۲: ۱۰) ذکر شده‌است.

تغییرات اقلیمی منطقه در دوره آتی به‌طور مستقیم بر مقدار رواناب تأثیرگذار می‌باشد، مقدار متوسط دبی برای ایستگاه‌های مطالعاتی نسبت به دوره مشاهداتی ۰/۱۶ درصد کاهش رواناب را نشان می‌دهد که مطالعات قاسمی و همکاران (۱۳۹۲: ۳۷) و گودرزی و همکاران (۱۳۹۵: ۱۷۵) نیز به نتایج مشابهی در خصوص کاهش رواناب دست یافته‌اند. حوزه‌های آبخیز مطالعاتی در منطقه کوهستانی و سردسیر واقع می‌باشند که دارای متوسط بارش برف بالایی می‌باشند. در این مناطق برای دوره آتی زمان شروع دبی‌های اوج نسبت به دوره مشاهداتی زودتر می‌باشد و می‌توان بیان کرد که این فرآیند به‌طور مستقیم تحت تأثیر افزایش دمای مناطق بالادست می‌باشد که با مطالعات قاسمی و همکاران (۱۳۹۲: ۴۸) و بیوی و همکاران (۲۰۱۳: ۴) مطابقت دارد. هم‌چنین بررسی نتایج در این ایستگاه‌ها نشان داد که احتمال افزایش دبی اوج برای این ایستگاه‌ها وجود دارد به‌طوری‌که ایستگاه هیدرومتری یامچی با ۱۶ واقعه دبی اوج بالای ۶ متر مکعب بر ثانیه و افزایش ۰/۴۰ درصدی در دبی اوج دارای بیش‌ترین احتمال خطر وقوع سیل می‌باشد.

میزان رسوب تولیدی کاملاً وابسته به دبی جریان می‌باشد و همبستگی بالایی بین این دو پارامتر وجود دارد. بیش‌ترین حجم رسوب سالانه مربوط به رخداد‌های دبی اوج می‌باشد که با نتایج گیرولامو و همکاران (۲۰۱۵: ۱۳۵) و لادیگارد و همکاران (۲۰۱۶: ۵۸۲) مطابقت دارد. با بررسی تغییرات اقلیمی و دبی جریان رودخانه در دوره آتی مقدار تغییرات رسوب بررسی شد. در اکثر ایستگاه‌های مطالعاتی با کاهش بارندگی و دبی جریان در دوره چهارم (۲۰۲۹) میزان بار رسوب جریان به‌میزان چشمگیری (۴۷ درصد) کاهش یافته است که با مطالعات ایستنیلی و همکاران (۱۹۹۸: ۷۹۴) در رودخانه‌های مختلف جهان مطابقت دارد.

نتیجه‌گیری

پیامدهای تغییر اقلیم بر چرخه هیدرولوژی می‌تواند منابع آب و خاک آبخیز را تحت تأثیر قرار دهد. اثرات تغییر اقلیم با بالا رفتن دما، تغییر در نوع و مقدار بارش، رواناب و جریان رودخانه‌ها و همچنین تغییر در عوامل فرساینده و پوشش زمین و کمیت و کیفیت آب را تغییر می‌دهد. هدف از پژوهش حاضر بدست آوردن مقادیر بارش و دما، رواناب و رسوب برای دوره‌های آتی (۲۰۳۰-۲۰۱۱) می‌باشد. رواناب سطحی در حوضه‌های مطالعاتی با استفاده از مدل IHACRES محاسبه شدند و با اعمال تغییرات اقلیمی رواناب سطحی در مقطع‌های زمانی مختلف در دوره آتی به‌دست آمد که نتایج روند کاهش رواناب برای سال‌های آتی را نشان می‌دهد. همچنین با استفاده از معادله منحنی سنجهرسوب میزان رسوب برای دوره آتی به‌دست آمد، نتایج نشان می‌دهد. نتایج پژوهش نشان داد که در بیشتر حوزه‌های آبخیز میزان بارندگی ورودی کاهش یافته است که این کاهش معادل با ۱۶ درصد می‌باشد. از طرف دیگر مقدار دمای حداقل و حداکثر به ترتیب ۱۶/۳۸ و ۵/۳۹ درصد افزایش یافته است که این افزایش دما به‌صورت متقابل منجر به افزایش تبخیر و تعرق و هدر رفت بارش ورودی در این مناطق خواهد شد. به‌طوری‌که نتایج مدل IHACRES کاهش ۱۶ درصدی رواناب و نتایج منحنی سنجهرسوب کاهش ۴۷ درصدی رسوب را برای دوره آینده نشان می‌دهند. بنابراین لازم است که در این منطقه اقدامات و برنامه‌ریزی‌های لازم جهت مدیریت حوزه‌های آبخیز انجام شود. برای تأثیر تغییر اقلیم بر چرخه هیدرولوژیکی حوزه‌های آبخیز استان اردبیل را نشان می‌دهد و با توجه به اثرات زیست محیطی تغییر اقلیم ارائه راهکارهایی را برای مقابله با اثرات تغییر اقلیم بر روی اکوسیستم را الزامی می‌داند.

منابع

- آقابگی، ۱۳۹۶، ارزیابی تغییرپذیری رواناب و رسوب ناشی از تغییرات اقلیمی در حوزه‌های آبخیز استان اردبیل، پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته آبخیزداری، دانشگاه محقق اردبیلی
- تلوری، ع؛ بیرودیان، ن؛ منوچهری، ا، ۱۳۸۶، مدل‌سازی تغییرات زمانی رسوب، پژوهش و سازندگی در منابع طبیعی، شماره ۷۵، صفحه ۷۰-۶۴.
- حکیم‌خانی، ش؛ عرب‌خدری، م؛ مهدوی، م؛ ولی‌خوجینی، ع، ۱۳۷۹، تحلیل منطقه‌ای رسوب معلق در حوزه دریاچه ارومیه، دومین همایش فرسایش و رسوب، خرم‌آباد، لرستان.
- حلبیان، ا؛ حیدری، م، ۱۳۹۵، برآورد رسوب با استفاده از منحنی سنج‌رسوب و بررسی تغییرات دبی برآن، جغرافیا، دوره ۱۴، شماره ۵۱، صفحه ۲۱۸-۱۹۳.
- خروشی، س؛ مصطفی‌زاده، ر؛ اسمعیلی‌عوری، ا؛ رئوف، م، ۱۳۹۶، ارزیابی تغییرات زمانی و مکانی شاخص سلامت هیدرولوژیک رودخانه در حوزه‌های آبخیز استان اردبیل، اکوهیدرولوژی، دوره ۴، شماره ۲، صفحه ۳۹۳-۳۷۹.
- رضایی‌زمان، م؛ مرید، س، دلاور، م، ۱۳۹۲، اثرات تغییر اقلیم بر متغیرهای هیدروکلیماتولوژی حوزه سیمینه‌رود. نشریه آب و خاک، سال ۶، شماره ۲۷، صفحه ۱۲۵۹-۱۲۴۷.
- سیدقاسمی، س؛ ابریشم‌چی، ا، تجربی، م، ۱۳۸۵، اثرات تغییرات جریان رودخانه زاینده - رود بر اثر تغییر اقلیم، دومین کنفرانس مدیریت منابع آب.
- صالحی، ب؛ عالی‌جهان، م؛ عینی، س؛ درخشی، ج، ۱۳۹۶، پیش‌بینی تاریخ‌های شروع و پایان یخبندان‌های سبک و سنگین استان کرمانشاه با بهره‌گیری از ریزگردان LARS-WG. جغرافیا و برنامه‌ریزی تبریز، سال ۲۱، شماره ۵۹، صفحه ۱۹۵-۱۷۵.
- صیاحی، ث؛ ع. شهبازی، خ. خادمی، ۱۳۹۶، پیش‌بینی اثر تغییر اقلیم بر رواناب ماهانه حوزه دز با مدل IHACRES، فصلنامه علوم و مهندسی آب، سال ۷، شماره ۱۵، صفحه ۱۸-۷.
- قاسمی، ا؛ فتاحی، ا؛ بابایی، ا، ۱۳۹۲، تاثیر تغییر اقلیم بر رواناب با رویکرد عدم قطعیت مدل گردش عمومی جو، مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، سال ۴، شماره ۱۳، صفحه ۵۳-۳۷.
- کاویان، ع؛ نامدار، م؛ گلشن، م؛ بحری، ر، ۱۳۹۶، مدل‌سازی هیدرولوژیکی اثرات تغییر اقلیمی بر نوسانات دبی رودخانه هراز، مخاطرات محیط طبیعی، سال ۶، شماره ۱۲، صفحه ۱۰۴-۸۹.
- کریمی، م؛ قاسمی، ا، ۱۳۹۶، بررسی پدیده تغییر اقلیم با رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره، جغرافیا و برنامه‌ریزی تبریز، سال ۲۱، شماره ۶۱، صفحه ۲۶۱-۲۴۱.

- گلشن، م؛ اسمعیلی، ا؛ شاهدی، ک؛ جهانشاهی، ا، ۱۳۹۵، کارایی مدل SWAT و IHACRES در شبیه‌سازی رواناب حوزه آبخیز خرم‌آباد. *دانش آب و خاک*، شماره ۲۶، صفحه ۲۹-۴۲.
- گودرزی، م؛ صلاحی، ب؛ حسینی، ا، ۱۳۹۴، بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر تغییرات رواناب سطحی، *اکوهیدرولوژی*، دوره ۲، شماره ۲، صفحه ۱۷۵-۱۸۹.
- لکزائیان پور، غ؛ محمدرضاپور، ا. مال میر، م، ۱۳۹۵، ارزیابی آثار تغییر اقلیم بر میزان رواناب رودخانه نازلو چای در حوزه دریاچه ارومیه، *جغرافیا و توسعه*، شماره ۴۲، صفحه ۱۹۸-۱۸۳.
- مختاری، ا، ۱۳۷۶، بررسی مدل امکان برازش مدل تجربی PSIAC در برآورد فرسایش رسوب در حوزه‌های آبخیز فاقد آمار با بهره‌گیری از GIS و سنجش از دور، پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران.
- نامدار، م، ۱۳۹۳، پیش‌بینی رواناب سطحی بر پایه تغییرات اقلیمی حوزه آبخیز هراز، پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.
- همتی، م؛ مهدوی، م؛ عرب‌خداری، م، ۱۳۸۰، بررسی رابطه رسوب‌دهی حوزه‌های آبخیز با لیتوژنی و عوامل بارش موثر، همایش ملی مدیریت اراضی، فرسایش خاک و توسعه پایدار، اراک، مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، صفحه ۲۳۴-۲۴۴.
- Bavay M., Grünewald T., and Lehning M. 2013. Response of snow cover and runoff to climate change in high Alpine catchments of Eastern Switzerland. *Advances in Water Resources*, 55: 4-16.
- Bobrovistkaya, N., Kokorev, A., and Lemeshko, N. 2003. Regional Patterns in Recent Trends in Sediment Yields of Eurasian and Siberian Rivers, *Global and Planetary Change*, 39: 127-146.
- Dawoochund, R., Patra, K. C., and Swain, J. B. 2017. Adequacy of IHACRES Model on Streamflow Resulting from Landuse Changes. 22nd International Conference on Hydraulics, Water Resources and Coastal Engineering, Gujarat, India, 21-23 December, 2355-2363.
- Girolamo, A. M., Pappagallo, G., and Porto, A. L. 2015. Temporal variability of suspended sediment transport and rating curves in a Mediterranean river basin: The Celone (SE Italy). *Catena*, 128, 135-143.
- Gomez, J.A., Sobrinho, T.A., Giraldez, J.V., and Fereres, E. 2009. Soil management effects on runoff, erosion and soil properties in an olive grove of Southern Spain. *Soil Tillage Reserch*. 102, 5-13.

- Gupta, H., and Chakrapani, G.J. 2007. Temporal and spatial variations in water flow and sediment load. *Current Science*. 92 (5): 679-684.
- Hicks, D. M., Gomez, B., and Trustrum, N. A. 2000. Erosion Thresholds and Suspended Sediment Yields, Waipaoa River Basin, New Zealand, *Water Resour. Resercher*. 36(4): 1129-1142.
- Horowitz A.J., 2003. An Evaluation of Sediment Rating Curves for Estimating Suspended Sediment Concentrations for Subsequent Flux Calculations, *Hydrological Processes*, 17. 3387–3409.
- Kao, Sh., Lee, T and Milliman, J.D. 2005. Calculating highly fluctuated suspended sediment fluxes from mountainous rivers, Taiwan. 16: 653-675.
- Ladegard, P., Sigsgaard, C., Kroon, A., Abermann, J., Skov, K., Elberling, B. 2017. Suspended sediment in a high-Arctic river: An appraisal of flux estimation methods. *Science of the Total Environment*, 580, 582-592.
- Ladegaard-Pedersen, P., Sigsgaard, C., Kroon, A., Abermann, J., Skov, K., and Elberling, B. 2017. Suspended sediment in a high-Arctic river: An appraisal of flux estimation methods. *Total Environment*, 580, 582-592.
- Li, L.J., Zhang, L., Wang, H., Wang, J., Yang, J.W. and Jiang, D.J. 2007. Assessing the impact of climate variability and human activities on streamflow from the Wuding River. *Hydrol Process*. 21(25): 3485-3491.
- Littlewood, L.G., Clarke, R.T., Collischonn, W., Croke, B.F.W. 2007. Predicting daily Streamflow using rainfall forecasts, a simple loss module and unit hydrographs: Two Brazilian catchments. *Environmental Modelling and Software*, 22: 1229-1239.
- Nikolaidis, N.P., Demetropoulou, L., Froebrich, J., Jacobs, C., Gallart, F. 2013. Towards a sustainable management of Mediterranean river basins. Policy recommendations on management aspects of temporary river basins. *Water Policy* 15, 830–849.
- Sriwongsitanon, N., and Taesombat, W. 2011. Estimation of the IHACRES model parameters for Flood Estimation of Ungauged catchments in the upper ping river basin. *Journal Kastsart (Natural Science)* 45: 917-931.

- Stanley, D.J., Warne, A.G. 1998. Nile delta in its destruction phase. *Journal of Coastal Research* 14, 794–825.
- Tan M., Ibrahim A., Yusop Z., Duan Z., Ling L. 2015. Impacts of landuse and climate variability on hydrological components in the Johor River basin, Malaysia. *Hydrological Sciences*, 60:1-17.
- Walling, D. E., 1977, assessing the accuracy of suspended sediment Rating curves for a small Basin, *water Resources Research*. 13 (3).
- Walling, D.E., Fang, D., 2003. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. *Global and Planetary Change* 39: 111–126.
- Wang, H., Yang, Z., Saito, Y., Liu, J. P., Sun, X. and Wang, Y. 2007. Stepwise decreases of the Huanghe sediment load: Impacts of climate change and human activities. *Global and Planetary Change*, 57: 331-354.
- Yang, Z., Wang, H., Saito, Y., Milliman, J.D., Xu, K., Qiao, S., Shi, G. 2006. Dam impacts on the Changjiang River sediment discharge to the sea: the past 55 years and after the Three Gorges Dam. *Water Resources Research* 42, W04407: 1:10.