



پاسخ دبی جریان به تغییرات بارندگی با استفاده از شاخص الاستیسیته اقلیمی در

برخی از ایستگاه‌های هیدرومتری استان اردبیل

علی نصیری خیاوی^۱، علی فرجی^۲، رئوف مصطفی‌زاده^{۳*}

۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده‌ی منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانش‌آموخته کارشناسی منابع طبیعی، دانشکده‌ی کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، ایران

۳- استادیار گروه منابع طبیعی و عضو پژوهشکده‌ی مدیریت آب، دانشکده‌ی کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، ایران

تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۷/۰۴/۰۲

وصول مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۱۳

چکیده

الاستیسیته بارش یکی از ابزارهایی است که در تعیین میزان حساسیت دبی رودخانه به متغیر بارش استفاده می‌شود. هدف اصلی پژوهش، محاسبه‌ی شاخص الاستیسیته بارش در برخی از ایستگاه‌های هیدرومتری استان اردبیل می‌باشد. بر این اساس مقادیر شاخص الاستیسیته محاسبه گردید و برای بررسی تغییرات شاخص الاستیسیته از نمودار سه متغیره استفاده شد. نتایج نشان داد که بازه‌ی عددی شاخص الاستیسیته بین ۲/۲۱- تا ۳/۹۶ می‌باشد که بیش‌ترین و کم‌ترین میزان این شاخص به ترتیب مربوط به ایستگاه‌های ارباب‌کندی و شمس‌آباد است. تغییرات شاخص الاستیسیته در دبی‌های پایین، بیش‌تر است. هم‌چنین در ماه‌های خشک سال مقدار شاخص الاستیسیته بالاتر از سایر ماه‌هاست که به این معنی است که بارش در ماه‌های خشک سال تأثیر بیش‌تری بر افزایش دبی داشته است. با توجه به نمودار تغییر ماهانه شاخص الاستیسیته و بارش می‌توان گفت، در ماه‌های پرباران و کم‌باران دامنه مقادیر بارش به ترتیب ۴۵- و ۱۵-۲۰ میلی‌متر بیش‌ترین مقدار شاخص الاستیسیته محاسبه شده است. کاهش مقادیر الاستیسیته در مقادیر بارش کم را می‌توان به تأثیر اندک بارش‌های کم در تولید رواناب مرتبط دانست، در حالی که در بارش‌های زیاد کاهش الاستیسیته با هم‌زمانی وقوع بارش و دبی‌های بالا در فصول پرآب توجیه می‌شود. در مجموع می‌توان گفت که شاخص الاستیسیته بارش، امکان مقایسه واکنش آبخیزها را در تولید رواناب و عکس‌العمل به متغیرهای اقلیمی فراهم می‌نماید.

کلمات کلیدی: تغییرات دبی جریان، واکنش هیدرولوژیک، شاخص الاستیسیته بارش، متغیرهای اقلیمی، نمودار سه متغیره

E-mail:raoofmostafazadeh@uma.ac.ir

* (نویسنده مسئول)

۱- مقدمه

تغییرپذیری جزء ذاتی عوامل و عناصر محیطی به شمار می‌آید. امروزه مطالعه‌ی فرآیندهای هیدرولوژیک از مهم‌ترین پیش‌نیازهای مدیریت منابع آب و خاک است. حال آن‌که مطالعه تغییرات زمانی و مکانی فرآیندهای مختلف هیدرولوژیکی کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است (نصیری خیاوی و مصطفی‌زاده، ۱۳۹۷: ۲۴). اقلیم یک محرک کلیدی در فرآیندهای هیدرولوژیکی می‌باشد. میزان حساسیت دبی رودخانه نسبت به اقلیم، جهت اعمال تصمیم‌گیری‌های صحیح در بخش مدیریت منابع آب و سیستم‌های زیست‌محیطی برای مقابله با تغییرات هیدرواقليمی و اقلیمی تخمین زده می‌شود. حساسیت دبی رودخانه در اثر تغییرات اقلیمی تقریباً همیشه با به‌کارگیری مدل‌های تصحیح شده هیدرولوژیکی و با استفاده از مقایسه جریان‌های مدل‌سازی شده رودخانه برای اقلیم حاضر و اقلیم آشفته برآورد می‌شود (چیف^۱ و همکاران، ۲۰۰۶: ۱). تغییر اقلیم یکی از عوامل مختلفی است که بخش‌های مختلف زندگی انسان روی کره زمین را تحت تأثیر قرار خواهد داد و تأثیرات زیان باری بر منابع محیط‌زیستی، اقتصادی، اجتماعی و به‌ویژه منابع آب، با تغییر در بارندگی، مقدار و زمان وقوع رواناب خواهد داشت (محمدمدو و همکاران، ۱۳۹۳: ۲۶؛ نظری پویا و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۸۱). مسئله‌ای که اکثر مناطق جهان را در آینده نه‌چندان دور وارد ابعاد تازه‌ای از چالش می‌کند کاهش منابع آب با توجه به مسئله تغییر اقلیم جهانی می‌باشد، که از جمله تأثیرات مهم تغییر اقلیم، عدم یکنواختی توزیع بارش، گسترش خشکسالی‌ها و تداوم آن‌ها و در نهایت تأثیر منفی بر منابع آب در سطح جهان است. تغییر اقلیم در قرن گذشته تا حدود زیادی فرآیند چرخه آب و منابع آب موجود مخصوصاً در مقیاس منطقه‌ای را تحت تأثیر قرار داده است. رواناب سطحی یکی از مهم‌ترین اجزاء چرخه هیدرولوژیکی و یکی از مهم‌ترین منابع آبی است که در بخش‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد (مهری و مصطفی‌زاده، ۱۳۹۸: ۳۸۱). در سال‌های اخیر شناسایی عوامل موثر و تأثیر آن‌ها بر تغییرات منطقه‌ای رواناب به‌طور گسترده مورد توجه

1- Chiew et al.,

هیدرولوژیست‌ها قرار گرفته است (قره‌چایی و همکاران، ۱۳۹۴: ۲۵۵؛ نصیری خیاوی و مصطفی‌زاده، ۱۳۹۷: ۲۵). همچنین رواناب تابع پارامترهای مختلفی چون متغیرهای اقلیمی، خصوصیات فیزیکی حوضه، خصوصیات خاک حوضه، نوع پوشش گیاهی، کاربری اراضی و بهره‌برداری انسانی و غیره می‌باشد (عباسی و پورهت، ۱۳۹۵: ۱). از طرفی در سال‌های اخیر، تغییرات در مولفه‌های اقلیمی به‌طور فزاینده‌ای معنی‌دار شده‌اند، بنابراین ارزیابی اثرات تغییر اقلیم روی چرخه هیدرولوژیکی، یک موضوع مهم برای توسعه هیدرولوژی و مدیریت منابع آب می‌باشد (یانگ^۱ و یانگ، ۲۰۱۱: ۱). در زمینه‌ی بررسی منابع آب به‌دلیل تغییرات اقلیمی، ابزارهای ساده‌ای هستند که می‌توان با به‌کارگیری آن‌ها اثرات اقلیم را بر روی تصمیم‌گیری‌های سیاسی و برنامه‌ریزی‌ها تخمین زد. الاستیسیته بارش یکی از این ابزارهاست، که میزان حساسیت دبی و تغییرات آن را با توجه به متغیر اقلیمی تشریح می‌کند. برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب نیازمند یکپارچه‌سازی تأثیرات تغییر جهانی اقلیم به‌منظور پیش‌بینی دقیق منابع آب در آینده است (فو^۲ و همکاران، ۲۰۰۷). مطالعات متعددی در مورد میزان حساسیت‌پذیری دبی رودخانه در اثر تغییرات اقلیمی در حوضه‌های سرتاسر جهان انجام شده است که بیش‌تر این مطالعات شامل برآورد الاستیسیته بارش جریان رودخانه می‌باشد که توسط شیک (۱۹۹۰) برای ارزیابی میزان حساسیت‌پذیری دبی رودخانه در اثر تغییرات اقلیمی معرفی شده‌اند که دوگ^۳ (۱۹۹۲) و دوگ و همکاران (۱۹۹۹)، آن را فاکتور حساسیت‌پذیری، و کونل^۴ و همکاران (۱۹۹۱)، آن را فاکتور بزرگنمایی نامیدند (فو و همکاران، ۲۰۰۷: ۱). چیف (۲۰۰۶) در استرالیا با استفاده از مدل‌های SIMHYD و AWBM، به برآورد الاستیسیته بارش بر روی دبی رودخانه ۲۱۹ حوزه‌ی آبخیز پرداخت و به این نتیجه رسید که الاستیسیته بارش در استرالیا در حدود ۲-۳/۵ (در حدود ۷۰ درصد حوزه‌های آبخیز مشاهده شده است) که ۱ درصد تغییر در میانگین بارش سالانه، ۲-۳/۵ درصد دبی میانگین سالانه را تغییر می‌دهد.

1-Yang

2- Fu et al.,

3- Dooge

4- Kohnel et al.,

یانگ و یانگ، (۲۰۱۱) در پژوهشی در حوضه‌ی فوتو رودخانه‌های در شمال چین الاستیسیته اقلیمی شامل متغیرهای بارش، تابش خالص، دمای هوا، سرعت باد و رطوبت نسبی را برآورد کردند و نشان دادند که بیش‌ترین همبستگی رواناب با بارش و سپس سرعت باد می‌باشد و همچنین تغییرات مقادیر شاخص الاستیسیته نشان داد که در ماه‌های پر باران مقدار شاخص الاستیسیته پایین است. چانگ و همکاران (۲۰۱۵) در حوضه‌ی جینگ در شمال غربی چین ارزیابی اثر تغییرپذیری اقلیمی و فعالیت انسانی بر روی دبی جریان را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که متوسط دبی سالانه در دوره زمانی ۱۹۹۰-۱۹۶۰ حدود ۲۶/۹۶ درصد کاهش یافته است. هم‌چنین تغییرات اقلیمی بیش‌ترین اثر را در تغییر دبی جریان حوضه به میزان ۴۰/۴ درصد داشته است. آندراسیان و همکاران (۲۰۱۵) پنج روش مختلف محاسبه الاستیسیته اقلیم شامل روش مرجع، GLS، OLS، روش تجربی و روش نظری را در ۵۱۹ حوضه‌ی آبریز فرانسه مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که رگرسیون دو بعدی GLS و OLS بهترین راه‌حل را ارائه می‌دهند زیرا همبستگی بارش و تبخیر- تعرق بالقوه را محاسبه می‌کنند. هم‌چنین روش تجربی یک ابزار قدرتمند در بررسی مدل‌های هیدرولوژیکی بوده و برای پیش‌بینی اثرات تغییرات اقلیمی مورد استفاده قرار می‌گیرد. وانگ و همکاران (۲۰۱۶)، به بررسی اثر تغییر اقلیم و تغییر خصوصیات حوزه آبریز بر روی الاستیسیته رواناب در کشور چین پرداختند که نتایج حاکی از این بود که تغییرات اقلیمی باعث تغییر در رواناب در منطقه شده است. قره‌چایی و همکاران، (۱۳۹۴) در پژوهشی در حوضه‌ی رودخانه‌ی کشکان استان لرستان با استفاده از الاستیسیته اقلیمی پاسخ رواناب به تغییرپذیری اقلیمی و فعالیت‌های انسانی را برآورد کردند. نتایج نشان داد که کاهش ۱۰ درصدی در بارش و افزایش ۱۰ درصدی در تبخیر و تعرق پتانسیل و فعالیت‌های انسانی، به ترتیب باعث کاهش ۲۵/۴، ۷۴/۹ و ۲۵/۸۹ درصدی در رواناب می‌شود و هم‌چنین مؤلفه‌های مختلفی بر حساسیت و تغییرپذیری دبی جریان مؤثر می‌باشد. برآورد غیرپارامتریک الاستیسیته به‌ویژه برای مطالعات در سطح جهانی به دلیل دشواری تعریف یک مدل هیدرولوژیکی و به‌دست آوردن داده‌های مورد نیاز برای اجرای چنین مدلی، مناسب است. تغییر در مؤلفه‌های اقلیمی از قبیل بارش اثرات

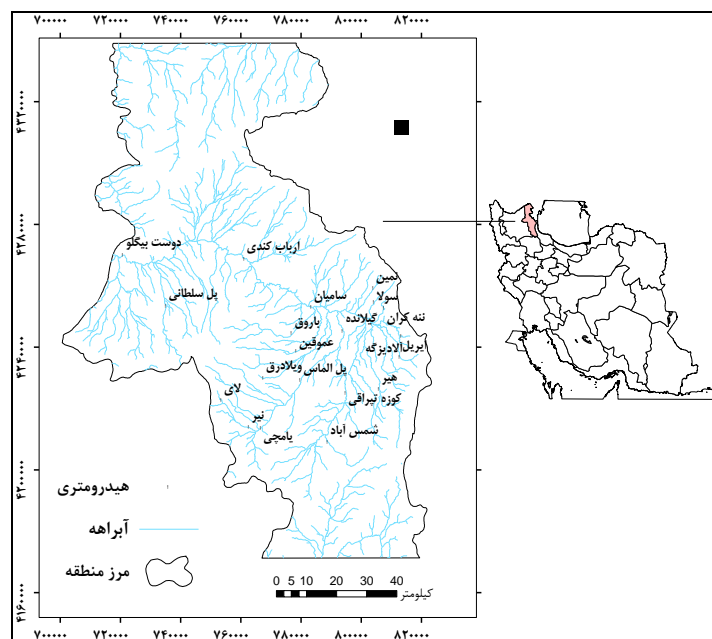
قابل توجهی بر منابع آب و دبی رودخانه‌ها به‌خصوص در استان اردبیل دارد. در اثر تغییر اقلیم رژیم هیدرولوژیکی رودخانه‌ها و در نتیجه میزان دبی جریان رودخانه‌ها تغییر می‌یابد. بر اساس شواهد، میزان آبدهی رودخانه‌های اردبیل نیز در سال‌های اخیر کاهش قابل توجهی داشته‌اند. بر اساس مطالعه مهری و همکاران (۱۳۹۶)، مقدار جریان پایه و شاخص جریان پایه در یک دوره‌ی آماری ۲۲ ساله کاهش یافته و شدت کاهش جریان پایه در سه ماه فصل پاییز بیش‌تر بوده است. هم‌چنین بیان شده است که میزان تغییرات و کاهش درجه سلامت هیدرولوژیک جریان در دوره‌های اخیر در رودخانه‌های استان اردبیل بسیار بیش‌تر از گذشته بوده است که می‌تواند با افزایش شدت بهره‌برداری از منابع آب سطحی و کاهش آبدهی بر اثر تغییرات اقلیمی مرتبط باشد (خروشی و همکاران، ۱۳۹۶). بنابراین ارزیابی اثرات تغییرات اقلیم بر دبی جریان رودخانه‌های استان اردبیل حائز اهمیت می‌باشد. از این‌رو در تحقیق حاضر، به تشریح برآورد غیرپارامتریک الاستیسیته بارش (Ep) و دبی پرداخته شده است و پاسخ دبی جریان نسبت به تغییرات بارش در مقیاس زمانی ماهانه در برخی از ایستگاه‌های هیدرومتری استان اردبیل بررسی شده است. سپس با تلفیق داده‌های بارش و دبی برای ۲۰ ایستگاه هیدرومتری استان اردبیل رابطه بین بارش و حساسیت دبی به الاستیسیته بارش پرداخته خواهد شد. لذا هدف تحقیق حاضر، محاسبه الاستیسیته بارش و تغییرات دبی در ۲۰ ایستگاه هیدرومتری با استفاده از برآورد غیرپارامتریک الاستیسیته در مقیاس زمانی ماهانه است. نویسنده مسئول باید از اعضای هیات علمی باشد و فرق نمی‌کند نویسنده مسئول، نویسنده اول، دوم و یا چندم باشد.

۲- مواد و روش

- منطقه‌ی مورد مطالعه

برای انجام این پژوهش، ۲۰ ایستگاه هیدرومتری واقع در استان اردبیل انتخاب گردید. استان اردبیل با مساحت ۱۷۹۵۳ کیلومترمربع و در محدوده‌ی مختصات جغرافیایی ۳۷ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۳۹ درجه و ۴۲ دقیقه عرض شمالی و ۴۷ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۵۵ دقیقه طول شرقی در شمال غرب کشور ایران قرار دارد. این مناطق دارای آب و

هوای کوهستانی سرد و معتدل که متوسط بارش در آن حدود ۲۵۰ میلی‌متر در سال می‌باشد. رودخانه‌های مورد مطالعه در این پژوهش، تعدادی از رودخانه‌های مهم این استان بوده که از رشته کوه‌های سبلان سرچشمه گرفته و به دریای خزر می‌ریزد. شاخص الاستیسیته در این تحقیق با استفاده از داده‌های ماهانه بارش و دبی برای ۲۰ ایستگاه هیدرومتری در استان اردبیل برآورد شده است. موقعیت کشوری و استانی ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه مطابق شکل (۱) می‌باشد.



شکل (۱) موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی مورد مطالعه، اردبیل، ایران
Fig (1) Geographical location of the study area, Ardabil, Iran

- روش تحقیق

در تحقیق حاضر، پاسخ دبی جریان به تغییرات بارندگی با استفاده از شاخص الاستیسیته اقلیمی در برخی از ایستگاه‌های هیدرومتری استان اردبیل مورد بررسی قرار گرفت. داده‌های دبی و بارندگی ماهانه مربوط به ۲۰ ایستگاه هیدرومتری و باران‌سنجی استان

اردبیل تهیه گردید که طول دوره‌ی آماری داده‌های مورد استفاده سال‌های ۱۳۸۹-۱۳۶۸ می‌باشد. هم‌چنین ملاک انتخاب حوضه‌های مورد مطالعه در تحقیق حاضر، براساس استفاده حداکثری از داده ایستگاه‌های موجود بوده و هم‌چنین سعی شده است که حوضه‌های انتخابی به گونه‌ای باشد که در دامنه متفاوتی از مقادیر دبی و با خصوصیات متفاوت قرار گرفته باشد.

- شاخص الاستیسیته اقلیم

مفهوم الاستیسیته برای ارزیابی حساسیت دبی به متغیرهای اقلیمی توسط شیک (۱۹۹۰) معرفی شد. الاستیسیته اقلیم می‌تواند توسط تقسیم دبی بر متغیرهای اقلیمی از جمله بارش، رطوبت نسبی، دما، تبخیر و تعرق پتانسیل، سرعت باد، تابش خاص و غیره محاسبه شود. در این مطالعه حساسیت دبی به بارش با استفاده از برآورد غیرپارامتریک و مجموعه‌ای از داده‌های همزمان ماهانه دبی و بارش برای استان اردبیل محاسبه شده است. در بسیاری از مطالعات قبلی، الاستیسیته اقلیم بر پایه متغیرهای اقلیمی برآورد شده است (یانگ و یانگ، ۲۰۱۱: ۱). برآورد غیرپارامتریک شاخص الاستیسیته بارش (E_p) را سانکاراسوبرامانیا و همکاران (۲۰۰۱)، پیشنهاد دادند که به‌وسیله‌ی معادله‌ی (۱) برآورد می‌شود:

$$E_p = \text{Median} \left(\frac{Q_t - \bar{Q}}{P_t - P} \frac{P}{Q} \right) \quad (1)$$

که در آن، P و Q به ترتیب میانگین بارش و دبی ماهانه هستند. برای برآورد E_p ، ابتدا ارزش $\left(\frac{Q_t - \bar{Q}}{P_t - P} \frac{P}{Q} \right)$ محاسبه شده و میانه این مقادیر برآورد غیرپارامتریک E_p می‌باشد. این نحوه‌ی برآورد غیرپارامتریک E_p ، در نهایت به‌عنوان ارزش میانگین متغیر هیدرواقلیمی تعریف می‌شود. تعدادی محدودیت در رویکرد برآورد غیرپارامتریک شاخص الاستیسیته وجود دارد. به‌طوری‌که برآورد غیرپارامتریک، از داده‌های ماهانه استفاده می‌کند که فقط برآوردی از حساسیت‌پذیری دبی بلندمدت به تغییرات بلندمدت بارش را فراهم می‌کند.

به منظور برآورد E_p با استفاده از برآورد غیر پارامتریک، مجموعه‌ای از داده‌های هم‌زمان متوسط ماهانه دبی و بارندگی حوضه مورد نیاز است. داده‌های دبی استفاده شده در این مطالعه از شرکت آب منطقه‌ای استان اردبیل اخذ گردید که این داده‌ها شامل میانگین دبی ماهانه در ۲۰ ایستگاه هیدرومتری در سطح استان اردبیل می‌باشد. همچنین داده‌های ماهانه بارندگی برای ۲۶ ایستگاه از ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک موجود در سطح استان بدست آمد. برای هر ایستگاه هیدرومتری، میزان بارش متوسط ماهانه از داده‌های ایستگاه‌های نزدیک به خروجی حوضه با استفاده از روش چندضلعی تیسن در طول دوره‌ی آماری ۸۹-۱۳۶۸ برآورد شد. در این مطالعه از داده‌های ثبت شده در طول حداقل ۲۰ سال (۱۳۸۹-۱۳۶۸) استفاده شد. منابع خطا در این مطالعه، در دسترس نبودن تعدادی از داده‌های مربوط به دبی رودخانه‌ها و همچنین عدم وجود ایستگاه‌های هواشناسی برای ثبت میزان بارش در برخی از حوضه‌ها می‌باشد.

برای محاسبه الاستسیته بارش ابتدا ارزش $(\frac{Q_t - Q}{P_t - P} \frac{P}{Q})$ برای ۲۰ حوضه در سطح استان در هر ماه محاسبه و میان این مقادیر به عنوان الاستسیته بارش برای کل استان در ۱۲ ماه سال برآورد گردید. سپس نمودار مربوط به رابطه بین شاخص الاستسیته با مقادیر بارش و دبی در مقیاس ماهانه با استفاده از نمودار سه متغیره در نرم‌افزار Surfer رسم گردید.

- مدل نمودار سه متغیره

تجسم متغیرها در سه بعد از طریق نقشه‌هایی با خطوط تراز هم‌ارزش میسر می‌گردد (آلتونکایناک و همکاران، ۲۰۰۳: ۲۳۸). در این روش با استفاده از دو متغیر مستقل، نمودار پراکنش رسم گردیده است و سومین متغیر، متغیر وابسته می‌باشد که مقادیر محاسباتی آن به هر نقطه پراکنش متصل می‌شود (مصطفی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۴؛ صادقی و مصطفی‌زاده، ۲۰۱۶ و سن، ۲۰۰۸). واریانس $Z(x)$ از طریق مربع انحراف معیار $Z(x)$ از مقادیر میانگین $m(x)$ بر اساس رابطه (۲) محاسبه می‌گردد:

$$\text{Var}[Z(x)] = E[Z(x) - m(x)]^2 \quad (2)$$

که E نمایش دهنده‌ی مقادیر عملگر مورد انتظار است. هم‌چنین واریانس $Z(x+h)$ به‌همین روش می‌تواند مشخص شود. تغییرنا تجربی برای فاصله هر کلاس با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌شود. در این روش مجموع مربع تفاضل زوج نقاطی که به فاصله معلوم (h) از یکدیگر قرار دارند، محاسبه و تغییرات در مقابل (h) رسم می‌گردد.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(|h|)} \sum_{i=1}^{N(|h|)} [z(x_i+h') - z(x_i)]^2 \quad (3)$$

که در آن $Z(x_i)$ مقادیر محاسباتی در نقطه‌ی x_i ، $Z(x_i+h')$ اندازه‌گیری مقادیر در نقطه‌ی (x_i, h') ، $|h|$ میانگین فاصله‌ی بین نقاط جفت داده‌های مربوط به فاصله‌ی گام‌ها و $N(|h|)$ تعداد نقاط جفت داده‌ها می‌باشد. مقادیر مورد انتظار برای نقطه‌ی x_0 به‌عنوان جمع وزنی داده‌های اندازه‌گیری شده، تخمین زده می‌شود، مقادیر تخمینی با استفاده از رابطه‌ی (۴) قابل محاسبه است.

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (4)$$

که در آن مقادیر Z در نقطه‌ی X_0 توسط $Z(x_0)$ تخمین زده می‌شود، $\lambda_i Z$ وزن‌های انتخابی برای ایجاد بهترین شرایط آماری است و n تعداد نقاطی است که در تخمین استفاده می‌گردد. برای انتخاب روش مناسب درون‌یابی جهت تهیه‌ی نمودارهای سه‌متغیره از روش ارزیابی متقاطع استفاده شد (شعبانی، ۱۳۸۸: ۳۳). در پژوهش حاضر زمینه تصادفی به‌وسیله‌ی نمودارهای پراکنش از دو متغیر بارش و دبی مشخص می‌شود و مقادیر به‌دست آمده مربوط به بزرگی و اهمیت مقادیر شاخص‌های تغییرپذیری دبی می‌باشد.

در ادامه نمودار مربوط به تغییرات شاخص الاستیسیته و مساحت حوزه‌های آبخیز ترسیم گردید. هم‌چنین با استفاده از نمودارهای هیستوگرام و جعبه‌ای تغییرات متوسط ماهانه شاخص الاستیسیته در منطقه‌ی مورد مطالعه مورد بررسی قرار گرفت و مقادیر شاخص الاستیسیته بارش در ماه‌های مختلف مورد مقایسه قرار گرفت. در نهایت براساس

دامنه‌ی تغییرات شاخص الاستیسیته ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه در ۳ دسته تقسیم‌بندی و در قالب نقشه ارائه گردید.

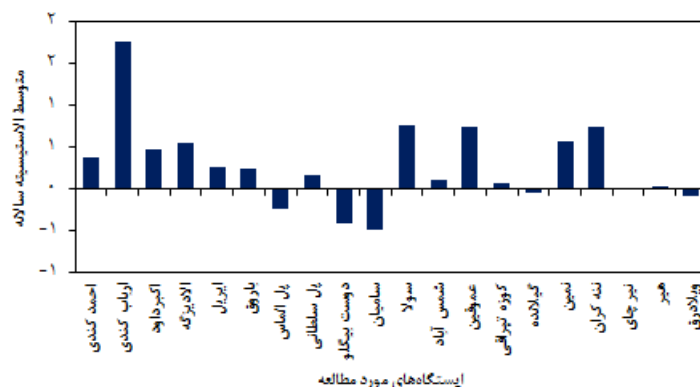
۳- بحث و نتایج

با استفاده از برآورد غیرپارامتریک شاخص الاستیسیته بارش برای ۲۰ حوضه‌ی استان اردبیل در ماه‌های مختلف برآورد شد. جدول (۱) نشان‌دهنده‌ی مقادیر شاخص الاستیسیته در ایستگاه‌های هیدرومتری منطقه مورد مطالعه می‌باشد. هم‌چنین هیستوگرام مربوط به متوسط سالانه شاخص الاستیسیته در هر یک از حوضه‌های مورد مطالعه، مطابق شکل (۲) است.

جدول (۱) مقادیر شاخص الاستیسیته در ایستگاه‌های هیدرومتری مطالعه شده در استان اردبیل

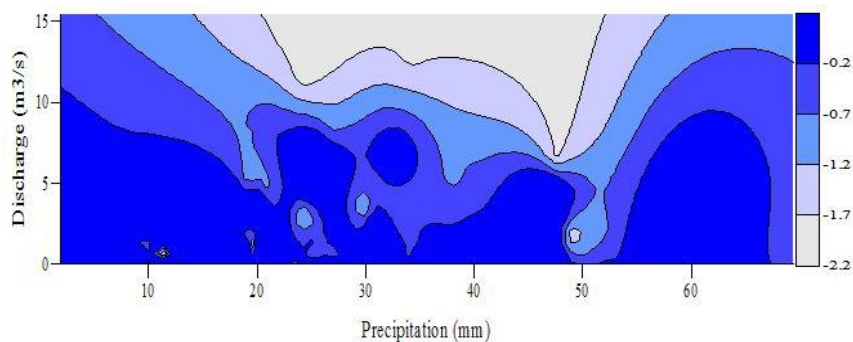
Tab (1) Elasticity index values in hydrometric stations studied in Ardabil province

ایستگاه	م	ر	ا	ب	ت	س	ش	س	ا	ا	ا	ایستگاه
احمدکندی	۰/۵	-۰/۱	۰/۲	-۰/۲۶	-۰/۰۵	-۰/۰۳	۰/۴۹	-۰/۸۵	۰/۹۲	۰/۹۲	۰/۹۶	۰/۲۶
اریاب‌کندی	۲/۹	۱/۶	۰/۳	۲/۹	۱/۷	۲/۷	۰/۷	۲/۴	۳/۹	۱/۵	۱/۴	-۱/۱
اکبرداود	۰/۷	۰/۸۱	-۰/۵	۰/۵۱	۰/۷۷	۱	۰/۱۶	-۰/۰۸	۰/۸۵	۰/۷۸	-۰/۰۶	۱/۱
آلادیزگه	-۰/۳	۰/۷۱	۰/۲۳	۱	۰/۹۳	۱	۰/۵۲	۰/۸۶	۰/۱۹	۰/۷۱	۰/۹	-۰/۰۳
ایریل	۰/۸	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۳۳	۰	۰/۳۶	۰/۱۷	۰/۸۷	۰/۸۲	-	۰/۸۱	۰/۲۸
باروق	۰/۱۷	۰/۳۱	۰/۲	-۰/۲	-۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۱۶	۰/۶۱	۰/۸	۱	-۰/۴	۰/۳۴
پل الماس	-۰/۵	-۰/۷	-۰/۴	-۰/۶	-۱	-۰/۵	-۰/۶	۱	۰/۶	۰/۱۳	۰/۳۹	-۰/۱۵
پل سلطانی	۰/۵۹	۰/۰۸	۰/۱۳	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۲	-۰/۱۵	۰	-۰/۱	۱/۰۹	۱/۰۱	-۰/۴۴
دوست‌بیگللو	-۰/۷	-۰/۴	-۰/۲	-۰/۶	-۰/۷	-۲	-۲	-۱/۷	۰/۸۹	۱/۹۶	۱/۵	-۱
سامیان	-۱/۴	-۰/۶	-۰/۶	-۰/۹	-۰/۸	-۰/۶	-۱/۷	-۰/۳	۲/۸۴	-۰/۷	۱/۰۱	-۱/۸
سولا	-۰/۱	۱/۵۶	۰/۸۵	۰/۱۲	۰/۴۲	۰/۶۴	۱/۱۴	۱/۳۵	۰/۲۷	۰/۸۵	۰/۹	۱/۳۵
شمس‌آباد	۱	۰/۲۶	-۱	-۰/۳	-۲/۲	۰/۸	۰/۳	-۰/۵	-۰/۴	۱/۲۲	۱/۱	۱/۱۵
عموقین	۱	۰/۸	۱	۰/۲۵	۰/۵۴	۰/۶۸	۱	۱	۱	۱	-۰/۵	۱/۰۴
کوزه‌تیراقلی	۰/۹	۰/۷۱	-۰/۳	-۰/۲۶	-۱/۸	۰/۵۷	-۰/۱	-۱/۶	-۰/۶	۱/۳	۱/۱	۱
گیلانده	۰	-۰/۴	-۰/۸	-۰/۶	-۱/۲	-۱/۲	-۰/۱۸	-۱/۲	۱	۰/۳	۱/۵	۰/۶
نمین	-۰/۱	۰/۹۳	۰/۷۸	۰/۱۸	۰/۱۲	۰/۵۶	۰/۷۳	۰/۹۸	۰/۵۵	۰/۶۹	۰/۱۵	۱/۳
ننه‌کران	۰/۹۳	۱/۲	۰/۲۱	۰/۳۸	۱/۲	۰/۵۴	۱/۲	۱/۳	-۰/۴	۱/۱	-۰/۱	۱/۲
نیرچای	۰/۰۴	-۰/۲	۰	۰/۱۹	۰/۰۱	۰/۰۴	-۰/۰۳	-۰/۴	۰/۴۲	۰/۰۹	۰/۰۶	-۰/۱
هیر	۰/۴۵	۰/۱۴	-۰/۲	-۰/۵	-۰/۳	۰	-۰/۱	-۰/۳	۰/۵۴	۰/۴۹	۰/۳۹	-۰/۳
ویلادرق	۰/۱۱	-۰/۲	۰/۰۶	-۰/۲	-۰/۳	-۰/۲	-۰/۲	-۰/۳	-۰/۲	۰/۱	۰/۱۴	۰/۱۳
میانگین	۰/۲۶	۰/۳۳	۰	۰/۰۷	-۰/۱	۰/۲۴	۰/۰۳	۰/۳۵	۰/۶۶	۰/۸۲	۰/۵۹	۰/۲۲
کمینه	-۱/۴	-۰/۷	-۱/۰	-۰/۹	-۲/۲	-۱/۸	-۱/۸	-۱/۷	-۰/۶	-۰/۷	-۰/۵	-۱/۸
بیشینه	۲/۹	۱/۶۳	۱/۰۱	۲/۹۳	۱/۷۶	۲/۷۸	۱/۳۷	۲/۴	۳/۹۶	۱/۹۶	۱/۵۶	۱/۳۲



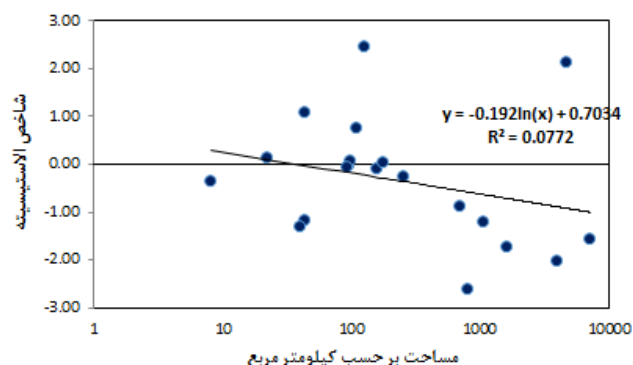
شکل (۲) مقادیر متوسط شاخص الاستیسیته در ایستگاه‌های هیدرومتری استان اردبیل
 Fig (2) Average values of elasticity index in hydrometric stations of Ardabil province

با توجه به جدول (۱) می‌توان گفت که بازه‌ی عددی مقادیر شاخص الاستیسیته بین $-۲/۲۱$ تا $۳/۹۶$ می‌باشد که بیش‌ترین مقدار این شاخص مربوط به ایستگاه ارباب کنده ماه خرداد است در حالی که کم‌ترین میزان این شاخص در ماه بهمن و ایستگاه شمس‌آباد می‌باشد. در ادامه نتایج مربوط به تغییرات شاخص الاستیسیته در بازه‌های مختلف بارش و دبی با استفاده از کل داده‌های ماهانه در دوره‌ی مورد مطالعه توسط نمودار سه متغیره در شکل (۳) ارائه شده است.



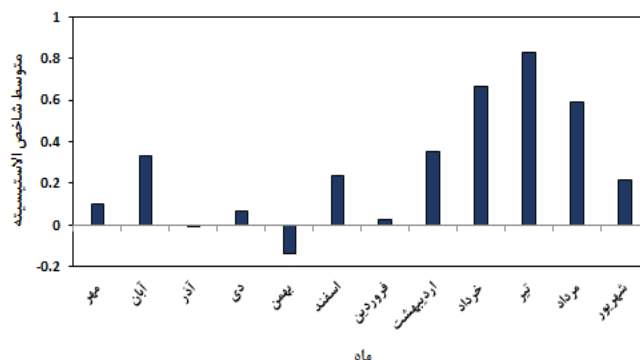
شکل (۳) تغییرات شاخص الاستیسیته بر اساس بارش و دبی در ایستگاه‌های استان اردبیل
 Fig (3) Changes in elasticity index based on precipitation and discharge in hydrometric stations

شکل (۳) نشان دهنده‌ی این است که در دبی‌های کم‌تر از ۱۰ متر مکعب بر ثانیه میزان حساسیت‌پذیری شاخص الاستیسیته بیش‌تر یعنی $0/2-$ می‌شود. این در حالی است که در دبی‌های بیش‌تر از ۱۰ متر مکعب بر ثانیه میزان حساسیت‌پذیری شاخص الاستیسیته کاهش یافته و در دبی ۱۵ متر مکعب بر ثانیه به حداقل خود یعنی $2/2-$ می‌رسد. هم‌چنین تغییرات شاخص الاستیسیته نسبت به مساحت هر یک از ایستگاه‌های هیدرومتری در شکل (۴) ارائه شده است.

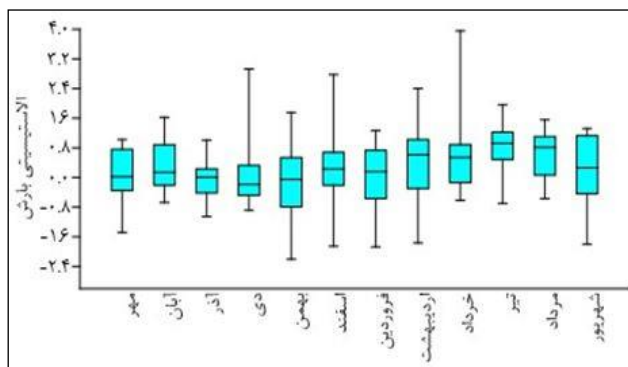


شکل (۴) تغییرات شاخص الاستیسیته نسبت به مساحت در برخی از ایستگاه‌های هیدرومتری اردبیل
Fig (4) Changes in elasticity index relative to area at some hydrometric stations in Ardabil

با توجه به شکل (۴) می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که بین شاخص الاستیسیته و مساحت رابطه‌ی معکوس وجود دارد. یعنی در مساحت‌های بالا، دبی تغییرات کمتری نسبت به تغییرات بارش نشان می‌دهد در حالی که در آبخیزهایی با مساحت کم، به دلیل واکنش سریع، با تغییرات بارش، دبی به‌میزان بیش‌تری با تغییر بارش تغییر می‌کند. شکل (۵) نشان دهنده‌ی هیستوگرام مقادیر متوسط ماهانه شاخص الاستیسیته می‌باشد. هم‌چنین نمودار جعبه‌ای مقادیر شاخص الاستیسیته در منطقه‌ی مورد مطالعه در شکل (۶) ارائه شده است.



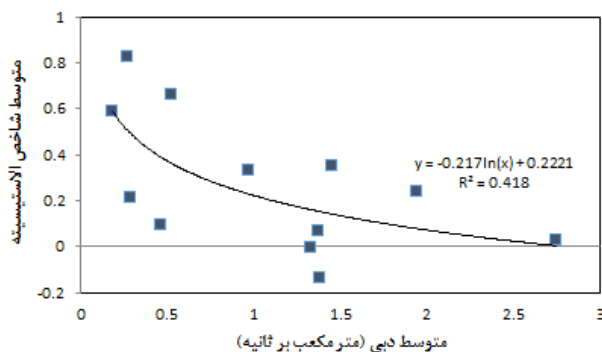
شکل (۵) مقادیر متوسط ماهانه شاخص الاستیسیته در ایستگاه‌های هیدرومتری استان اردبیل
Fig (5) Monthly average values of elasticity index in Ardabil province hydrometric stations



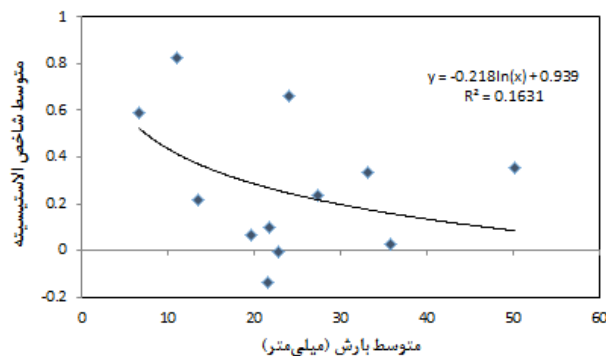
شکل (۶) نمودار جعبه‌ای شاخص الاستیسیته در ایستگاه‌های هیدرومتری استان اردبیل
Figure (6) Box plot of elasticity index in Ardabil province hydrometric stations

بر اساس نتایج شکل (۵) می‌توان گفت که در ماه‌های خشک سال مقدار شاخص الاستیسیته بالاتر از سایر ماه‌هاست. در این خصوص می‌توان به حساسیت تغییر دبی به بارش در ماه‌های خشک سال اشاره نمود و به این معنی است که بارش در ماه‌های خشک سال تأثیر بیشتری بر افزایش دبی رودخانه داشته است. هم‌چنین نتایج شکل (۶) نشان می‌دهد که مقدار میانه شاخص الاستیسیته بارش در ماه‌های آذر، دی، بهمن و اسفند کم‌تر بوده، در حالی که مقدار میانه‌ی شاخص الاستیسیته بارش در ماه‌های اردیبهشت، خرداد،

تیر و مرداد بیش تر بوده است. تغییرات مقادیر متوسط شاخص الاستیسیته نسبت به متوسط دبی و بارش به ترتیب در شکل‌های (۷) و (۸) ارائه شده است.



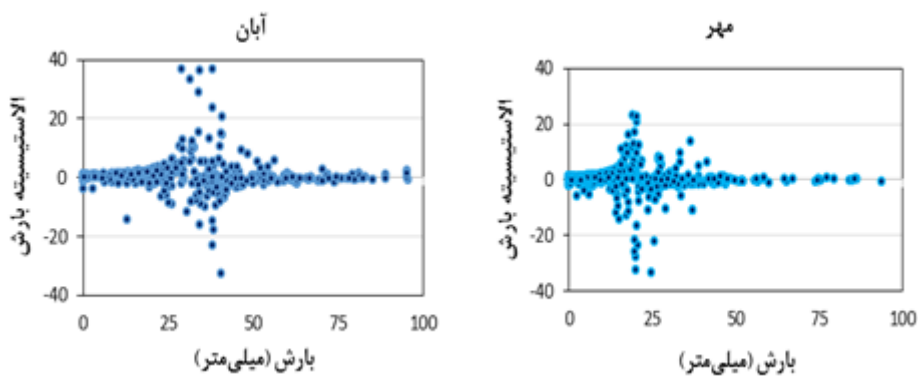
شکل (۷) تغییرات شاخص الاستیسیته نسبت به دبی در ایستگاه‌های هیدرومتری اردبیل
Fig (7) Changes in elasticity index to discharge at Ardabil hydrometric stations



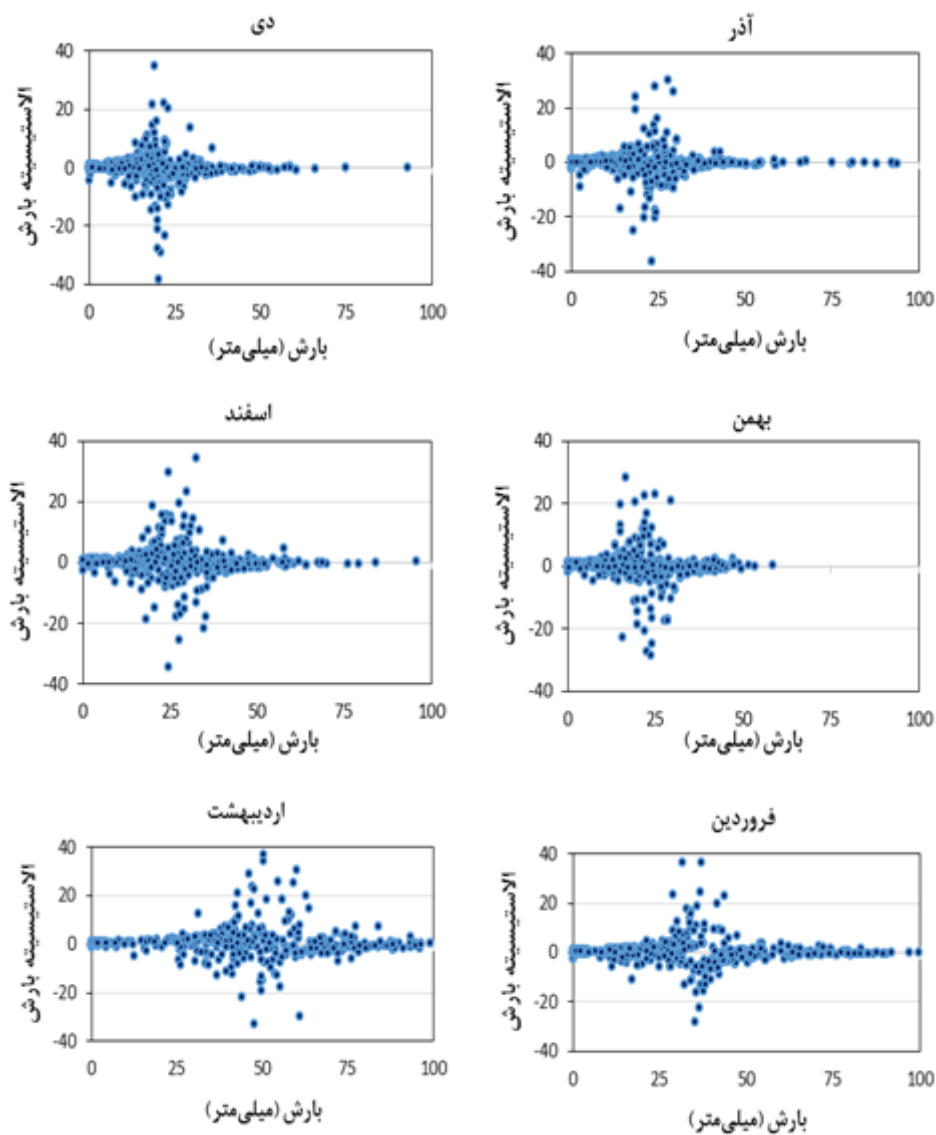
شکل (۸) تغییرات شاخص الاستیسیته نسبت به بارش در ایستگاه‌های هیدرومتری اردبیل
Fig (8) Changes in Elasticity Index to Precipitation in Ardabil Hydrometric Stations

با توجه به شکل (۷) می‌توان گفت که در مقادیر پایین دبی، حساسیت بیشتری به تغییرات بارش وجود دارد. به عبارتی در دبی‌های میانگین کم‌تر از ۱ مترمکعب بر ثانیه حساسیت‌پذیری شاخص الاستیسیته بالاتر می‌باشد. در این خصوص می‌توان گفت که در رودخانه‌های با مقدار دبی کم، تغییرات بارندگی تأثیر بیشتری بر روی نوسانات دبی

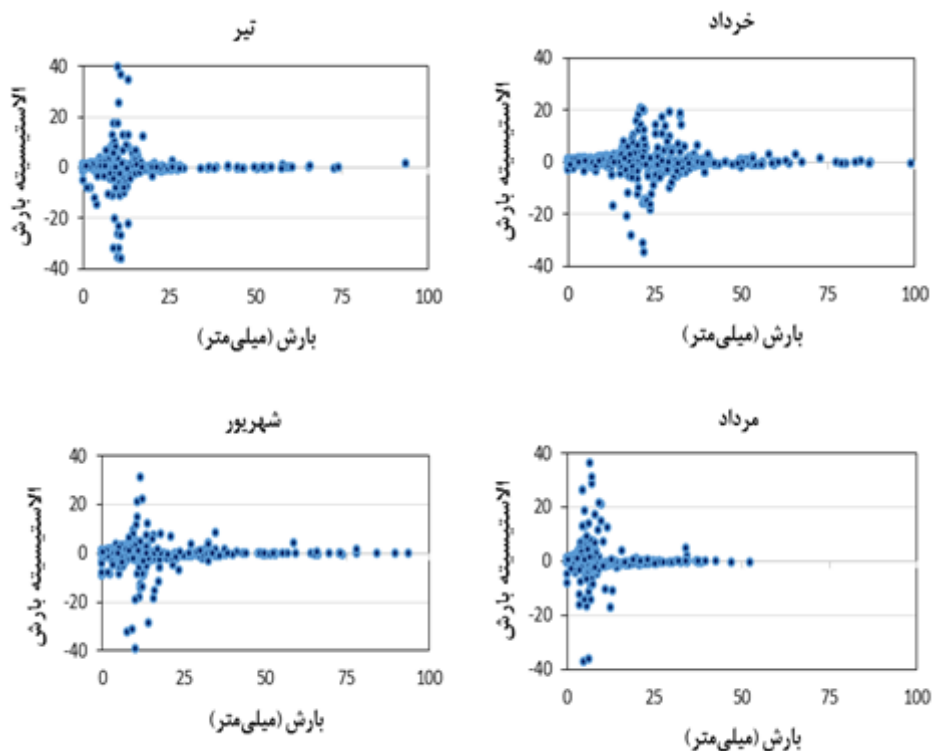
رودخانه داشته است. نتایج شکل‌های (۷) و (۸) نشان‌دهنده‌ی رابطه معکوس غیرخطی میان شاخص الاستیسیته و مقادیر دبی و بارش است. مقایسه‌ی مقادیر شاخص الاستیسیته در ماه‌های مختلف و نیز حوضه‌های مختلف مورد مطالعه امکان تأثیرپذیری مقادیر دبی از تغییرات بارش را فراهم می‌نماید. به عبارتی می‌توان گفت که در ماه تیر که مقدار شاخص الاستیسیته بالاتر است، تغییرات دبی حساسیت بیش‌تری به تغییرات در مقادیر بارش دارد. از طرفی پاسخ هیدرولوژی آبخیز می‌تواند ناشی از خصوصیات فیزیکی و ذاتی حوضه‌ی آبخیز باشد که به‌عنوان نمونه در ایستگاه ارباب‌کندی با بالاترین مقدار شاخص الاستیسیته، تغییرات بالای مقادیر دبی در واکنش به تغییرات مؤثر بر عامل بارش می‌باشد. از طرفی می‌توان گفت که اثر تغییر بارندگی در حوضه‌هایی با الاستیسیته بالا به‌سرعت می‌تواند در واکنش دبی جریان باعث بروز سیلاب گردد. تغییرات مقادیر شاخص الاستیسیته در مقادیر مختلف بارش در منطقه‌ی مورد مطالعه در شکل (۹) ارائه شده است.



شکل (۹) تغییرات ماهانه شاخص الاستیسیته در مقادیر مختلف بارش در منطقه‌ی مورد مطالعه
Fig (9) Monthly changes of elasticity index at different precipitation values in the study area



ادامه‌ی شکل (۹) تغییرات ماهانه شاخص الاستیسیته در مقادیر مختلف بارش در منطقه‌ی مورد مطالعه
 Fig (9) Monthly changes of elasticity index at different precipitation values in the study area



ادامه شکل (۹) تغییرات ماهانه شاخص الاستیسیته در مقادیر مختلف بارش در منطقه‌ی مورد مطالعه
 Fig (9) Monthly changes of elasticity index at different precipitation values in the study area

با توجه به شکل (۹) در ماه‌های پر باران دامنه مقادیر بارندگی ماهانه ۴۵-۱۵ میلی‌متر و در ماه‌های کم باران دارای مقادیر باندگی ماهانه ۲۰-۰ میلی‌متر، بیش‌ترین مقدار شاخص الاستیسیته مشاهده شده است. دلیل کاهش مقادیر الاستیسیته در مقادیر بارش کم را می‌توان با نفوذ، تبخیر و تعرق مرتبط دانست. ولی دلیل کاهش مقادیر الاستیسیته در بارش زیاد را می‌توان با هم‌زمانی وقوع بارش و دبی‌های بالا در فصول پر آب (زمستان و بهار) توجیه نمود. قابل ذکر است که مقادیر محاسبه شده شاخص مذکور براساس داده‌های مورد استفاده در منطقه‌ی مورد مطالعه است و باید توجه شود که مقادیر شاخص مذکور

براساس برآیند خصوصیات فیزیکی و اقلیمی حوضه‌های مورد مطالعه بوده است و قابل تعمیم به همه‌ی اقلیم‌ها نیست.

۴- نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر با هدف بررسی پاسخ رواناب به تغییرات بارش با استفاده از شاخص الاستیسیته اقلیمی در برخی از ایستگاه‌های هیدرومتری استان اردبیل صورت پذیرفته است. در این تحقیق داده‌های ماهانه بارندگی ۲۶ ایستگاه هواشناسی و داده‌های دبی ۲۰ ایستگاه هیدرومتری در دوره‌ی آماری ۱۳۸۹-۱۳۶۸ استفاده شد. بدین منظور مقادیر شاخص الاستیسیته به صورت ماهانه با استفاده از نرم‌افزار اکسل برآورد گردید. جهت بررسی تغییرات شاخص الاستیسیته در مقادیر مختلف بارش و دبی از نمودارهای سه متغیره استفاده شد. نتایج نشان داد که حساسیت‌پذیری شاخص الاستیسیته در مقادیر دبی پایین، بیش‌تر می‌باشد در حالی‌که در مقادیر بیش‌تر دبی حساسیت‌پذیری شاخص الاستیسیته کم‌تر می‌شود. از طرفی نتایج نمودار تغییرات شاخص الاستیسیته نسبت به مساحت در هر یک از ایستگاه‌های هیدرومتری مطالعه شده نشان داد که بین شاخص الاستیسیته و مساحت حوزه آبخیز رابطه معکوس وجود دارد؛ یعنی در آبخیزهایی با مساحت بالا، دبی تغییرات کم‌تری نسبت به تغییرات بارش نشان می‌دهد، در حالی‌که در مساحت‌های پایین، دبی به‌میزان بیش‌تری با تغییر بارش، تغییر می‌کند. هیستوگرام مقادیر متوسط ماهانه شاخص الاستیسیته در منطقه مورد مطالعه بررسی گردید که بر اساس نتایج، در ماه‌های خشک سال (خرداد، تیر و مرداد) مقدار شاخص الاستیسیته بالاتر از سایر ماه‌هاست که در این خصوص می‌توان به حساسیت تغییر دبی به بارش در ماه‌های خشک سال اشاره نمود. تغییرات متوسط شاخص الاستیسیته نسبت به متوسط دبی و بارش، نشان داد که رابطه معکوس بین شاخص الاستیسیته با مقادیر بارش و دبی وجود دارد و نیز می‌توان گفت که در دبی‌های متوسط با مقادیر کم‌تر میزان حساسیت‌پذیری شاخص الاستیسیته بالاتر می‌باشد و تغییرات بارندگی که یکی از مولفه‌های اقلیمی می‌باشد تأثیر بیش‌تری بر روی تغییرات آبی رودخانه‌ها داشته است که با مطالعات وانگ و همکاران

(۲۰۱۶) در خصوص تأثیرپذیری مستقیم دبی از مقادیر بارش مطابقت دارد. تغییرات مقادیر شاخص الاستیسیته در مقادیر مختلف بارش نشان داد که در ماه‌های پر باران مقدار شاخص الاستیسیته پایین است که این‌گونه می‌توان توصیف کرد که بارندگی در ماه‌های سرد سال به‌صورت برف اتفاق می‌افتد که واکنش آن با تأخیر زمانی در ذوب برف، کند اتفاق می‌افتد که با نتایج یانگ و یانگ (۲۰۱۱) در خصوص اختلاف زمانی در ظهور رواناب ناشی از بارندگی هم‌خوانی دارد. به‌عبارتی در اثر ذوب برف در مناطق و آبخیزهای بالادست، این تأخیر زمانی باعث کاهش الاستیسیته می‌گردد. در نظر گرفتن متغیرهایی مانند دما، تبخیر و تعرق در تکمیل نتایج تحقیق حاضر توصیه می‌شود. هم‌چنین تفکیک اثر فعالیت‌های انسانی و تغییر کاربری با استفاده از رویکرد مورد استفاده بسیار دشوار می‌باشد. از طرفی حساسیت دبی رودخانه‌های مختلف با هم متفاوت است و همواره با تغییرات مؤلفه‌های اقلیمی، بهره‌برداری انسانی، نوع کاربری اراضی، خصوصیات زمین‌شناسی و غیره متفاوت است که با نتایج قره‌چایی و همکاران (۱۳۹۴) مبنی بر تأثیر اقدامات انسانی بر تغییرات دبی جریان در یک راستاست. رژیم اقلیمی و تغییرات آن در مقیاس‌های طولانی‌مدت زمانی از نیروهای اصلی پویایی اشکال ژئومورفولوژیک رودخانه‌ها و مناطق کوهستانی هستند. سیستم‌های ژئومورفولوژیک خصوصاً در رودخانه‌ها به‌شدت متأثر از تغییرات دبی جریان است. در این راستا مطالعه تغییرات جریان مرتبط با بارندگی می‌تواند در تعیین پویایی اشکال رسوبی و نیز فرم‌های فرسایشی در رودخانه‌ها مفید واقع گردد. تعیین ارتباط میان محرک‌های اقلیمی و پاسخ ژئومورفولوژیک می‌تواند درک بهتری از حساسیت سیستم رودخانه، مورفولوژی رودخانه و میزان تولید رسوب فراهم نماید.

۵- منابع

-Reference

- Abbasi, A.A & Pour-Hemmat, J. (2016). Factors Affecting on runoff threshold in Small Watersheds. *Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems*, 4(11), 1-6.
- Altunkaynak, A., Ozger, M., & Sen, Z. (2003). Triple diagram model of level fluctuation in Lake Van, Turkey. *Hydrology and Earth System Sciences*, 7(2), 235-244.
- Andreassian, V, Coron, L, Lerat, J. and Le Moine, N. (2015). Climate elasticity of streamflow revisited an elasticity index based on long-term hydrometeorological records. *Hydrology and Earth System Sciences*. 20, 4503-4524.
- Chang, Y. Zhang, H, Wang, Y. and Zhu, Y. (2015). Assessing the impact of climate variability and human activities on streamflow variation. *Hydrology and Earth System Sciences*. 20, 1547-1560.
- Chiew, F.H.S, Peel, M.C, Mcmohon, T.A, Siriwardena, L.W. (2006). Precipitation elasticity of streamflow in catchments across the world, Climate Variability and Change-Hydrological Impacts (Proceedings of the Fifth FRIEND World Conference held at Havana, Cuba, November 2006). IAHS Public. 308: 1-7.
- Chiew, F.H.S. (2006). Estimation of rainfall elasticity of streamflow in Australia. *Hydrological Sciences – Journal.*, 51(4): 1-14.
- Fu, G, Charles, S.P, Chiew, F.H.S. (2007). A two-parameter climate elasticity of streamflow index to assess climate change effects on annual streamflow. *Water Resources Research*. 43: 1-12.
- Gharechaei, H., Moghaddamnia, A., Malekian, A & Ahmadi, A. (2015). Response of streamflow to climate variability and human activity in Kashkan river basin. *Watershed Engineering and Management*, 7(3), 255-264.

- Khorooshi, S., Mostafazadeh, R., Esmali-Ouri, A & Raoof, M. (2017). Spatiotemporal assessment of the hydrologic river health index variations in Ardabil Province Watersheds. *Ecohydrology*, 4(2), 379-393.
- Mehri, S & Mostafazadeh, R. (2019). Comparing the variations in hydrologic response of Ardabil Province watersheds using precipitation-runoff polygons. *Watershed Engineering and Management*, 11(2), 381-391.
- Mehri, S., Mostafazadeh, R., Esmali-Ouri, A & Ghorbani, A. (2016). Spatial and Temporal Variations of Base Flow Index (BFI) for the Ardabil Province river, Iran. *Journal of The Earth and Space Physics*, 43(3), 623-634.
- Mohammad, M., Haghizadeh, A., Zeinivand, H & Tahmasebipour, N. (2014). Evaluation of Climate Change Impacts on Runoff Changes Trend in Barandoezchay Watershed in West Azerbaijan Province Using General Circulation Models (GCM). *Ecohydrology*, 1(1), 25-34.
- Mostafazadeh, R., Shahabi, M & Zabihi, M. (2015). Analysis of meteorological drought using Triple Diagram Model in the Kurdistan Province, Iran. *Geographical Planning of Space Quarterly Journal*, 17, 129-140.
- Nasiri Khiavi, A & Mostafazadeh, R. (2018). Spatio-Temporal Assessment of River Flow Discharge Variability Indices in some Watersheds of Ardabil Province. *Hydrogeomorphology*, 17, 23-44.
- Nazari-Pouya, H., Kardovani, P & Farajirad, A.R. (2016). Investigation and Evaluation of Climate Change Impacts on Hydro-Climatic Parameters of Ekbatan Dam Basin (Hamadan Province). *Ecohydrology*, 3(2), 181-194.
- Sadeghi, S.H.R., Mostafazadeh, R. (2016). Triple diagram models for changeability evaluation of precipitation and flow discharge for suspended sediment load in different time. *Environmental Earth Sciences*, 2016 75(9): 843.
- Sankarasubramanian, A, Vogel, R.M, Limbrunner, J.F. (2001). Climate elasticity of streamflow in the United States. *Water Resources Research*. 37(6): 1771-1781.

- Schaake, J.C. (1990). From climate to flow, in *Climate Change and U.S. Water Resources*. 1990, edited by P.E. Waggoner, chap. 8, pp., *John Wiley*, New York: 177-206.
- Sen, Z. (2008). *Wadi Hydrology*. *CRC Press, Taylor & Francis Group*, 347p.
- Wang, W, Zou, Sh, Shao, Q, Xing, W, Chen, X, Jiao, X, Luo, Y, Yong, B, Yu, Zh. (2016). The analytical derivation of multiple elasticities of runoff to climate change and catchment characteristics alteration. *Journal of Hydrology*. 1-15.
- Yang, H and Yang, D. (2011). Derivation of climate elasticity of runoff to assess the effects of climate change on annual runoff. *Water Resources Research*. 47, W07526: 1-12.