نشریه پژوهش‌های اقلیم شناسی
سال دوازدهم | شماره چهل و ششم | تابستان ۱۴۰۰
وصول: ۹۹/۰۷/۱۴ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۰۴
صص ۷۲-۵۷

بررسی روند تغییرات تبخیر و تعیین نقش عوامل مؤثر بر آن با استفاده از روش‌های رگرسیون چندک و رگرسیون چندک بیزی (مطالعه موردی: ایستگاه هاشم‌آباد گرگان)

صدیقه برارخان‌پور*[۱]، خلیل قربانی[۲]، میثم سالاری جزی[۳]، لاله رضایی قلعه[۴]
۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
۴- دانشجوی دکترای علوم و مهندسی آب، منابع آب، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

چکیده

تبخیر-تعرق از مؤلفه‌های مهم چرخه هیدرولوژیک است که تحت تأثیر عوامل مختلف اقلیمی است که این عوامل خود نیز تحت تأثیر تغییر اقلیم می‌باشند. در این پژوهش به منظور بررسی روند تغییرات تبخیر-تعرق ناشی از عوامل مؤثر بر آن از آزمون من-کندال و دو روش رگرسیون چندک و رگرسیون چندک بیزی استفاده شد تا ضمن مقایسه این دو روش در تشخیص روند در چندک‌های مختلف سری زمانی تبخیر-تعرق، دلیل احتمالی آن نیز مشخص شود. برای این‌منظور از سری‌های فصلی داده‌های هواشناسی ایستگاه سینوپتیک هاشم آباد-گرگان در دوره زمانی ۱۳۶۳-۱۳۹۷ استفاده شد. آزمون من-کندال فقط برای فصل زمستان روند کاهشی تبخیر را نشان می‌دهد درحالی‌که بررسی روند تبخیر در چندک‌های مختلف نشان داده است که مقادیر پایین از تبخیر در فصل‌های بهار و پاییز با شیب قابل‌توجهی کاهش اما مقادیر بالای آن در فصل بهار افزایش یافته است. در فصل تابستان، تمامی مقادیر تبخیر به‌ویژه مقادیر بالایی به طور قابل‌ملاحظه افزایش یافته درحالی‌که در فصل زمستان، بیش‌ترین تغییرات روند مربوط به مقادیر میانی تبخیر بوده که روند کاهشی داشته‌اند. نتایج بررسی عوامل مؤثر برتبخیر نیز نشان می‌دهد که در تمام مقیاس‌های زمانی، ترتیب بیش‌ترین مؤلفه‌های مؤثر بر تبخیر به ترتیب مربوط به دما، رطوبت‌نسبی، سرعت‌باد و ساعت‌آفتابی بوده است که رطوبت‌نسبی دارای تأثیر منفی اما مؤلفه‌های دیگر، تأثیر مثبت داشته‌اند و در چندک‌های بالاتر، شدت این تأثیرات افزایش یافته است و نیز بیش‌ترین تأثیرات، مربوط به بهار و تابستان و کم‌ترین آن در پاییز و زمستان بوده است. نتایج مقایسه‌ی مدل‌های چندک نیز نشان داده است که روش رگرسیون چندک بیزی نتایج دقیق‌تر و معتبری نسبت به روش رگرسیون چندک فراوانی‌گرا ارائه می‌دهد و به صورت کلی روش‌های رگرسیون چندک برای محاسبه‌ی تغییرات در متغیرهای اقلیمی و نیز بررسی عوامل مؤثر بر روی یک متغیر اقلیمی خاص به‌منظور مدیریت بهتر در جهت کاهش خسارت‌های احتمالی مفید می‌باشند.

کلید واژه‌ها: تبخیر، پارامترهای اقلیمی، رگرسیون چندک، رگرسیون چندک بیزی، من‌کندال.

* نویسنده مسئول: ۰۹۱۱۶۷۹۲۷۶۸
Email: rbararkhan@gmail.com

مقدمه

تبخیر از سطح آب یک فرآیند محوری سطحی است که چرخهٔ آب و انرژی زمین را به هم وصل می‌کند (Allies, et al., 2020) و بسته به شرایط آب و هوایی و در دسترس بودن آب‌های سطحی در هر منطقه متفاوت است و سهم آن برای تخلیهٔ آب‌های سطحی و تغذیه‌های جوی بر همین اساس متفاوت است (Moazenzadeh et al., 2018). از مؤلفه‌های اصلی تأثیرگذار بر تبخیر می‌توان به پارامترهای هواشناسی شامل دمای هوا، ساعت آفتابی، بارندگی، رطوبت نسبی هوا و سرعت باد اشاره کرد. شواهد قابل توجهی در مورد افزایش میانگین دمای جهانی وجود دارد که بیان می‌کند شدت و وسعت مکانی از وقایع گرمایشی معنی‌دار در حال افزایش می‌باشد (Adnan et al., 2020)، که باعث افزایش میزان تبخیر و نیز افزایش تقاضای آبیاری و در نهایت منجر به بروز خشکسالی در تمام مناطق زراعی اقلیمی می‌شود؛ لذا بررسی روند تغییرات تبخیر و عوامل مؤثر بر افزایش یا کاهش آن یک چالش اساسی در مدیریت منابع آب حوزه‌های آبخیز است و مدل‌سازی آن از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. در بررسی روند تغییرات پارامترهای هواشناسی عموماً از روش‌های ناپارامتری مانند آزمون من-کندالاستفاده می‌شود و در این زمینه می‌توان به مطالعات افزایش روند تبخیر و تعرق در ایستگاه‌های زرینه، بیجار و سنندج برای فصل‌های تابستان و زمستان (اسدزاده و همکاران، ۱۳۹۶)، افزایش روند دما و ساعت آفتابی در قوچان (حلبیان و راوریان، ۱۳۹۶)، افزایش روند دما و تبخیر و تعرق در اقلیم‌های مختلف ایران (چکاو و همکاران، ۱۳۹۷)، افزایش روند پارامترهای دما و کاهش روند رطوبت نسبی در بیش‌تر ایستگاه‌های استان خوزستان و نیز افزایش روند تبخیر و تعرق در دو ایستگاه بستان و صفی‌آباد (ترکمان و همکاران، ۱۳۹۸)، افزایش روند دما در فصل‌های بهار، تابستان، زمستان و نیز در مقیاس سالانه (سعیدی و همکاران، ۱۳۹۸)، افزایش روند دما در ایستگاه‌های لزوره و رامیان در شرق حوضهٔ آبریز گرگانرود (سلمانی و همکاران، ۱۳۹۸) اشاره نمود. عملکرد این روش‌ها به گونه‌ای است که فقط به میانه یا مرکز سری داده‌های اقلیمی توجه می‌کنند و در مورد وجود روند در بخش‌های مختلف سری داده، اطلاعاتی نخواهند داد؛ برای حل این مشکل روش رگرسیون چندک فراوانی‌گرا (Koenker and Bassett, 1978) پیشنهاد شد که محدودیت‌های روش‌های قبل را ندارد و یک روش آماری با توانایی محاسبه و رسم منحنی‌های رگرسیونی متفاوت و منطبق با نقاط صدکی مختلف می‌باشد. بدین ترتیب دهک‌ها و صدک‌های داده‌های مورد بررسی، به طور جداگانه آزمون شده و هرگونه روندی در هر صدک مورد بررسی قرار می‌گیرد. اگرچه مطالعات انجام شده در زمینه بررسی روند پارامترهای اقلیمی با استفاده از روش رگرسیون چندک در ایران محدود می‌باشد اما در مقیاس جهانی مطالعات متعددی انجام شده و نتایج کاربردی و مهم را به همراه داشته است. گائو و فرانزک (Gao and Franzke, 2017) در بررسی روندهای زمانی و الگوهای مکانی از تغییر دمای شدید در ۳۵۲ ایستگاه هواشناسی در چین، در دورهٔ آماری ۲۰۱۳-۱۹۵۶ با استفاده از کاربرد رگرسیون چندک نتیجه گرفتند که برای چندک‌های پایینی از میانگین دمای روزانه و مقدار حداقل ماهانه در ژانویه، یک روند افزایشی در بیشتر ایستگاه‌ها وجود دارد. و همچنین برای چندک های بالاتر از میانگین دمای روزانه و حداکثر ماهانه ، یک روند کاهشی در یک محدوده از دامنهٔ شمال شرقی به سمت مرکز چین در جولای قابل رؤیت می‌باشد. عباس و همکاران (Abbas et al., 2019) در بررسی روند طولانی‌مدت سوابق بارندگی در دو منطقه‌ی مختلف از نظر آب و هوایی دریافتند که روش رگرسیون چندک می‌تواند الگوهایی برای شرایط خیلی خشک و خیلی مرطوب ارائه دهد و تفاوت واضح بین روندها در چندک‌های حدی انتخاب شده، کاربرد پذیری روش رگرسیون چندک را در این زمینه نشان می‌دهد. دون و همکاران (Dunn et al., 2019) به بررسی تغییرات در توزیع‌های آماری دماهای سطحی روزانه و سرعت باد در جهان با استفاده از روش رگرسیون چندک پرداختند و نتایج بیانگر افزایش در مقادیر بالای دما در شرق اروپا در طول تابستان و همچنین در شمال اروپا برای مقادیر کم دما در زمستان می‌باشد. در آمریکای شمالی بیشترین تغییرات در مقادیر کم‌تر دما در عرض‌های جغرافیایی شمالی برای پاییز و زمستان بوده است و نیز چندک‌های دمای نقطه‌ی شبنم در پاییز و زمستان به طور مشخص در مناطق شمالی اروپا بیش‌تر تغییر می‌کند.

علی‌رغم تمام فوایدی که این نوع روش رگرسیون چندک دارد، اما منحنی‌های چندک در این روش معمولاً به طور مستقل برآورد می‌شوند؛ لذا تخمین‌ها در چندک‌های حدی، اطلاعات را از تخمین‌های در چندک‌های نزدیک به انبوه توزیع قرض نمی‌گیرند. به دلیل برآورد مستقل آن‌ها، منحنی‌های چندک می‌توانند یکدیگر را قطع کنند که باعث نامعتبر بودن تفسیر توزیع متغیرهای مستقل می‌شود.

برای حل مشکلات ناشی از روش رگرسیون چندک فراوانی‌گرا و دستیابی به برآوردهایی معتبر، از روش‌های بیزی در رگرسیون چندک بهره گرفته شده است. روش رگرسیون چندک مکانی بیزی که یک رویکرد نیمه پارامتری است، برای اولین بار توسط ریچ و همکاران (Reich et al., 2011) پیشنهاد شد که از رگرسیون چندک برای مطالعه‌ی روندها در سطح اوزون تابستان استفاده کردند. رویکرد بیزی در رگرسیون چندک با قرض گرفتن اطلاعات در سراسر مکان و سطوح چندک برآوردهای بهتر و واقعی‌تر را نشان می‌دهد که نواقص روش رگرسیون چندک فراوانی‌گرا را می‌پوشاند؛ به ویژه در بررسی رابطه‌ی رگرسیونی پارامترهای مختلف بر روی یک متغیر وابسته خاص، روش رگرسیون چندک بیزی اطلاعات جامع و درست‌تری را در تمامی سطوح چندک ارائه می‌کند. مطالعات مختلفی در استفاده از روش رگرسیون چندک بیزی در بررسی عوامل مؤثر بر پارامترهای مختلف و نیز روند تغییرات پارامترها در طول زمان در سطح جهان انجام شده است. ریچ (Reich, 2012) یک مدل رگرسیون چندک مکانی-زمانی به عنوان روشی انعطاف‌پذیر و قابل تفسیر برای برآورد تغییرات در چندین مؤلفه از توزیع متغیرهای اقلیمی ارائه کرد و سپس از دادهٔ دما برای جنوب شرقی ایالات متحده از سال‌های ۲۰۰۹-۱۹۳۱ برای بررسی روندها استفاده نمود. نتایج استفاده از این مدل روندهای زمانی معنی‌دارتری نسبت به رگرسیون چندک غیرکلاسیک را نشان داده است و همچنین یک روند زمانی کاهشی در بیشتر دامنه‌های مکانی برای دمای حداکثر و میانگین ماهانه نشان داده شده است. تان و همکاران (Tan et al., 2018) به مدل‌سازی تغییرات توزیع بارش زمستانه در کانادا پرداختند. برای این منظور یک چارچوب انعطاف‌پذیر را بر اساس مدل چندک زمانی-مکانی بیزی (BSTQR) برای شناسایی تغییرات اقلیمی در سطوح مختلف چندک اجرا کردند. با استفاده از این مدل و به واسطه‌ی زمان به عنوان یک متغیر، تغییرات در بارش‌های زمستانی کانادا و عدم قطعیت آن‌ها در سطوح چندک مختلف برآورد شده است. نتایج در برخی از ایستگاه‌ها در شرق کانادا، تغییرات توزیعی در بارش زمستانی مانند یک افزایش در چندک‌های بالایی و پایینی را نشان دادند. همچنین از آن‌جا که توابع چندک در مدل BSTQR با مکان و زمان متفاوت است و داده بارش زمانی و مکانی را به دست می‌آورند، این مدل تغییرات چندک زیادی را در مقایسه با رگرسیون کلاسیک بدون در نظرگرفتن همبستگی‌های زمانی و مکانی به دست می‌دهد. اورانچیمگ و همکاران (Uranchimeg et al., 2018) یک رویکرد سیستماتیک برای بررسی ناپایداری در حداکثر سالانه سطح دریا (annual maximum sea levels, AMSLs) را مورد هدف قرار دادند و تخمین‌هایی از سطوح آب طراحی‌شده برای سازه‌های ساحلی با استفاده از رگرسیون چندک در یک چارچوب بیزی را پیشنهاد دادند. بدین منظور، AMSLs برای ۲۰ ایستگاه هر کدام با بیش از ۲۸ سال داده ساعتی ثبت شده، جمع‌آوری شد و سپس ناپایداری AMSLs با تمرکز بر تغییر در پارامتر مقیاس و مکان از توزیع‌های احتمال، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که اکثر ایستگاه‌ها (۳/۴ ایستگاه‌ها) دارای یک الگوی صعودی در توزیع هستند و سطح دریا در همه‌ی چندک‌ها افزایش پیدا کرده است. همچنین در ایستگاه‌های مختلف، تغییرات سطح آب در چندک‌های مختلف، تغییرات متفاوتی را نسبت به چندک میانه نشان داده است.

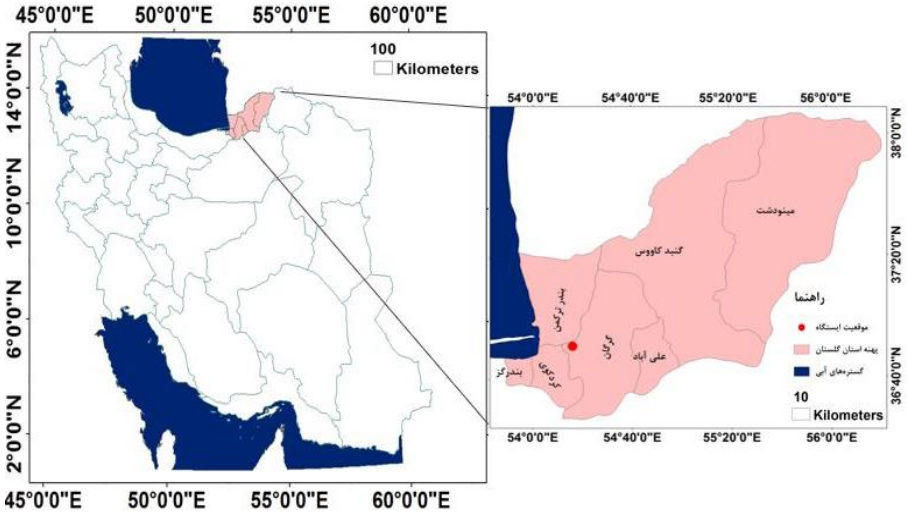
از بین مطالعاتی که در زمینهٔ بررسی روند متغیرهای اقلیمی با استفاده از آزمون‌های مرسوم ناپارامتری و روش رگرسیون چندک انجام شده است، چنین بر می‌آید که روش رگرسیون چندک بررسی جامع‌تر و نتایج بهتری را ارائه می‌دهد. از جمع‌بندی مطالعات انجام شده چنین استنباط می‌شود که در داخل کشور مطالعات محدودی براساس روش رگرسیون چندک فراوانی‌گرا بر روی متغیرهای اقلیمی صورت گرفته است. همچنین تاکنون مطالعه‌ای براساس روش رگرسیون چندک بیزی در بررسی رابطه و چگونگی تأثیر متغیرهای اقلیمی بر روی تبخیر صورت نگرفته است یا بسیار محدود می‌باشد. لذا در این پژوهش، به منظور بررسی روند تغییرات

در سری زمانی تبخیر روزانه و پارامترهای اقلیمی وابسته به آن، و نیز بررسی نقش این پارامترهای اقلیمی بر روی تبخیر از روش‌های رگرسیون چندک فراوانی‌گرا و رگرسیون چندک بیزی مکانی(Reich and Smith, 2013) بهره گرفته شد که میزان تأثیر چندک‌های مختلف از سری دادهٔ پارامترهای اقلیمی را بر روی تبخیر بررسی می‌کند و نیز رابطهٔ رگرسیونی چند متغیره‌ی تبخیر با پارامترهای اقلیمی را به دست می‌دهد که برای مدل‌سازی پارامترها از اهمیت به سزایی برخوردار می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقهٔ مطالعاتی

منطقهٔ مطالعاتی در این پژوهش ایستگاه سینوپتیک هاشم‌آباد واقع در شهرستان گرگان می‌باشد. ارتفاع ایستگاه از سطح دریا ۱۳ متر ،متوسط دمای هوا۱۷/۵ درجه سانتی‌گراد و متوسط بارش سالانه ۵۴۰ میلی‌متر می‌باشد. از لحاظ آب و هوایی بترتیب در سیستم طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن و آمبرژه دارای اقلیم مدیترانه‌ای و اقلیم نیمه مرطوب می‌باشد.



شکل ۱- منطقه مطالعاتی

داده‌های پژوهش

در این پژوهش، سری‌های زمانی داده‌های تبخیر، دما، سرعت باد، رطوبت نسبی و ساعت آفتابی روزانه در ایستگاه سینوپتیک هاشم‌آباد، در دورهٔ آماری ۳۵ ساله موجود بین سال‌های ۱۳۹۷-۱۳۶۳ مورد استفاده قرار گرفت. داده های مورد استفاده در این تحقیق از سازمان هواشناسی استان گلستان اخذ شدند. پس از بررسی داده‌ها، سری زمانی داده‌های روزانهٔ تبخیر، میانگین دما، سرعت باد، رطوبت نسبی و ساعت آفتابی در مقیاس فصلی تشکیل و آزمون ناپارامتری من‌کندال و رگرسیون چندک به منظور بررسی روند در سری زمانی داده‌ها اعمال گردید سپس به منظور بررسی نقش هر یک از پارامترهای اقلیمی بر روی تبخیر از روش رگرسیون چندک بیزی استفاده گردید و نتایج هر یک از روش‌ها مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت.

روش‌های مورد بررسی

در این پژوهش از آزمون ناپارامتری من-کندال، روش رگرسیون چندک فراوانی‌گرا و روش رگرسیون چندک بیزی برای بررسی روند تغییرات در سری داده‌های اقلیمی تبخیر، میانگین دما، رطوبت نسبی، ساعت آفتابی و سرعت باد استفاده گردید تا دریابیم که متغیرها چه تغییراتی در میانه و نیز در چندک‌های مختلف سری زمانی موردنظر داشته‌اند و سپس به رابطه‌ی بین تبخیر با چندک‌های مختلف متغیرهای اقلیمی با استفاده از روش‌های رگرسیون پیشنهاد شده در دورهٔ زمانی موردنظر پرداخته شد.

آزمون تشخیص روند من-کندال

آزمون ناپارامتری من (Mann, 1945) و کندال ؛ (Kendall, 1975) بر پایهٔ مرتبه داده‌ها در یک سری زمانی استوار است. این آزمون برای بررسی تصادفی بودن داده‌ها

(عدم وجود روند) در مقابل وجود روند در سری‌های زمانی هیدرولوژیکی و هواشناسی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در واقع در این آزمون هر داده با همهٔ داده‌های پس از خود مقایسه می‌شود. در این مرحله می‌توان به جای استفاده از مقادیر اصلی داده‌ها، از مرتبه داده‌ها در مجموعه مورد نظر (سری زمانی) استفاده کرد (قربانی، ۱۳۹۳) و به منظور حذف اثرات ضرایب خود همبستگی معنی‌دار از سری زمانی، آزمون من-کندال اصلاح شده توسط حامد و رائو (Hamed and Rao, 1998) ارائه شده است. توضیحات مربوط به آزمون من‌کندال و همچنین من‌کندال اصلاح شده و چگونگی محاسبات این آزمون در (قربانی و همکاران، ۱۳۹۷) بیان شده و محاسبات با استفاده از نرم‌افزار XLSTAT 2016 انجام شده است.

رگرسیون چندک

رگرسیون چندک یک روش آماری با قابلیت محاسبه و رسم منحنی‌های رگرسیونی متفاوت و منطبق با نقاط صدکی مختلف می‌باشد که از مهم‌ترین کاربردهای رگرسیون چندک، شناسایی شکل متغیر وابسته در سطوح مختلف متغیر مستقل می‌باشد. برآورد توابع چندک شرطی یا رگرسیون چندک در سال ۱۹۷۸ توسط کوئنکر و باست (Koenker and Bassett, 1978) بررسی شد.

مدل رگرسیون چندک فراوانی‌گرا به شکل رابطه (۱) می‌باشد:

$$Y(\rho|x) = \beta_0(\rho) + \beta_1(\rho)x + \varepsilon \qquad (۱)$$

که در آن، $\beta_0(\rho)$ عرض از مبدأ و $\beta_1(\rho)$ ضریب شیب می‌باشد و هر دو بسته به مقدار ρامین چندک مورد بررسی تغییر می‌کنند. ε خطا با انتظار صفر و محدوده‌ی مقادیر ρ از ۰ تا ۱ می‌باشد (Lee et al., 2013).

برای برآورد رگرسیون چندک برخلاف مدل رگرسیون خطی که بر حداقل کردن مربع باقیمانده‌های مدل مبتنی است، در این روش رگرسیونی از حداقل نمودن مجموع قدرمطلق باقیمانده‌ها استفاده می‌شود که روش حداقل قدرمطلق باقیمانده‌ها نامیده می‌شود. بر این اساس، برآورد رگرسیون چندک ρ ام، توسط حداقل کردن رابطه (۲) انجام می‌شود:

$$\text{minimize}\left\{\sum_{\{i|y_i<y_p(x_i)\}}(1-\rho)|y_i - y_p(x_i)| + \sum_{\{i|y_i>y_p(x_i)\}}\rho|y_i - y_p(x_i)|\right\} \qquad (۲)$$

که $i = 1,2,\dots,n$ و $y_\rho(x_i) = \beta_0(\rho) + \beta_1(\rho)x_i$ می‌باشد. به عبارتی دیگر، مقدار مطلق تفاوت بین یک مشاهده y_i از چندک ρام متناظر $y_p(x_i)$، وزن $(1-\rho)$ می‌گیرد، اگر مشاهدات زیر خط چندک باشد، و وزن ρ می‌گیرد، اگر مشاهدات بالای خط چندک باشد (Lee et al., 2013). خط برازش داده شده در این روش به گونه‌ای است که $100 \times \theta$ درصد از نقاط زیر آن و مابقی بالای خط قرار می‌گیرند.

تابع چندک شرطی خطی مورد استفاده در این پژوهش، به فرم رابطه (۳) است:

$$Q_\rho(y|x) = x^T\beta_\rho \qquad (۳)$$

که x برداری از متغیرهای مستقل و β_ρ برداری از پارامترهای مرتبط با رگرسیون چندک ρ ام می‌باشد. برای یک مجموعه از مشاهدات $(x_i, y_i), i = 1,2,\dots,n$، برآورد پارامترهای β_ρ به شکل رابطه (۴) می‌باشد (Koenker, 2005):

$$\hat{\beta}_\rho = argmin\sum_{i=1}^{n}\rho_\rho(y_i - x_i^T\beta) \qquad (۴)$$

که تابع $\rho_\rho(.)$ به شکل رابطه (۵) تعریف می‌شود (Koenker, 2005):

$$\rho_\rho(u) = \begin{cases} u(\rho-1) & if\ u<0 \\ u\rho & if\ u\geq 0 \end{cases} \qquad (۵)$$

جزئیات این روش و همچنین برآورد خطاهای استاندارد، فواصل اطمینان، آماره t و معنی‌داری برای این ضرایب، در کوئنکر (Koenker, 2005; Koenker, 2006) بیان شده است.

رگرسیون چندک بیزی

روش‌های بیزی برای رگرسیون چندک به منظور برآورد همزمان منحنی‌های چندک مورد استفاده قرار می‌گیرند و مدل‌های بیزی قادر به دریافت هر دو اطلاعات مکانی و زمانی در برآورد چندک‌ها در حین ارائه مزیت‌هایی از نظر استنباط و ساختار چگالی شرطی می‌باشند. بنابراین هدف از این روش، مدل‌سازی تابع چندک از متغیر وابسته Y به عنوان یک تابعی از متغیرهای مستقل $X = (X_1, X_2, \dots, X_P)$

می‌باشد که X1=1 به عنوان عرض از مبدأ مدل رگرسیون بوده و فرض می‌شود که تمامی متغیرهای مستقل بین (۱، ۱) مقیاس‌بندی شده‌اند به‌طوری‌که $X_j \in [-1,1]$.

تابع چندک تعریف شده به عنوان $q(\tau|X)$ که τ چندک موردنظر و X متغیرهای مستقل می‌باشند، به صورت احتمال زیر بیان می‌شود(Smith and Reich, 2013):

$$Prob[Y < q(\tau|X) = \tau \in [0,1] \quad (۶)$$

مدل رگرسیون چندک در این روش فرض می‌کند که τامین چندک یک ترکیب خطی از متغیرهای مستقل بوده و به صورت رابطه (۷) می‌باشد:

$$q(\tau|X) = \sum_{j=1}^{P} X_j \beta_j(\tau) \quad (۷)$$

$\beta_j(\tau)$ به عنوان یک تابع پیوسته در طول سطح چندک τ می‌باشد که تأثیر jامین متغیر مستقل در سطح چندک τ را برآورد می‌کند(Reich and Smith, 2013; Smith and Reich, 2013). هر تابع چندک به عنوان یک ترکیب خطی از L تابع پایه مدل می‌شود:

$$\beta_j(\tau) = \alpha_{0j} + \sum_{l=1}^{L} B_l(\tau)\, \alpha_{lj} \quad (۸)$$

که $B_l(\tau)$ تابع پایه ثابت و α_{lj} ضرایب رگرسیون ناشناخته‌ای هستند که شکل تابع چندک را تخمین می‌زنند. توابع پایه به عنوان توابعی از یک تابع چندک پارامتری $q0$ در نظر گرفته می‌شوند.

ریچ و اسمیت (Reich and Smith, 2013) یک توزیع پیشین برای $\alpha = \{\alpha_{lj}\}$ پیشنهاد کرده‌اند؛ که وابستگی تابع چندک را به یک تابع چگالی معتبر، که به صورت $f(y|(X,\alpha)$ تعریف می‌شود، تضمین می‌کند. با داشتن چگالی، این احتمال به سادگی برآورد چگالی‌ها در طول مشاهدات می‌باشد و برای تولید نمونه‌های پسین، الگوریتم‌های زنجیرهٔ مارکف مونت کارلو (MCMC) استفاده می‌شود. جزئیات این روش در (Reich et al., 2011; Reich and Smith, 2013; Reich, 2012) بیان شده است.

نتایج و بحث

نتایج آزمون من-کندال بر روی سری زمانی داده‌های اقلیمی و تبخیر روزانه

نتایج آزمون من‌کندال و شیب خط سن بر روی سری زمانی پارامترهای اقلیمی با توجه به جدول ۱ نشان داده است که در مقیاس فصلی، سرعت باد دارای روند معنی‌دار افزایشی در فصل‌های تابستان، پاییز و زمستان می‌باشد و نیز رطوبت نسبی در فصل تابستان دارای روند کاهشی معنی‌دار می‌باشد؛ در حالی‌که در فصل زمستان تبخیر و میانگین دما به ترتیب دارای روند کاهشی و افزایشی معنی‌دار می‌باشند.

جدول ۱- نتایج تحلیل روند فصلی با استفاده از آزمون ناپارامتری من‌کندال بر روی سری‌های زمانی تبخیر، میانگین دما، رطوبت نسبی، ساعت آفتابی و سرعت باد.

فصل	تبخیر	میانگین دما	رطوبت نسبی	ساعت آفتابی	سرعت باد
بهار	۰	۰/۰۰۰۷۴	-۰/۰۰۰۵۲	۰	۰/۰۰۰۷۹
تابستان	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۷۷	-۰/۰۰۳۲*	۰/۰۰۰۴۷	۰/۰۰۱*
پاییز	-۰/۰۰۰۲۶	۰/۰۰۰۱۸	-۰/۰۰۰۶۲	۰/۰۰۰۰۸	۰/۰۰۰۹۲*
زمستان	-۰/۰۰۰۳*	۰/۰۰۰۵۵*	۰/۰۰۰۱۷	۰	۰/۰۰۰۸۷*

برازش روش‌های رگرسیون چندک بر روی سری زمانی تبخیر روزانه و داده‌های اقلیمی

نتایج اجرای رگرسیون چندک فراوانی‌گرا و رگرسیون چندک بیزی برای سری زمانی داده‌های اقلیمی شامل خطوط رگرسیون چندک برای چندک‌های ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷، ۰/۸، ۰/۹ و ۰/۹۵، شیب و عرض از مبدأ برآورد شده در چندک‌های ۰/۰۵ تا ۰/۹۵ با گام زمانی ۰/۰۵ که شامل چندک‌های ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۱۵، ... ۰/۹۵، است (شکل‌های ۲ و ۳). برازش حاصل از روش رگرسیون چندک فراوانی‌گرا بیانژر آن است که شیب‌ها در چندک‌های مختلف، مقادیری متفاوت با شیب رگرسیون میانگین و میانه داشته و مقادیر بالایی تبخیر با شدت زیادی نسبت به مقادیر پایین در فصل‌های بهار، تابستان و پاییز افزایش یافته است (شکل ۲). در فصل‌های بهار و پاییز چندک‌های پایینی دارای روند کاهشی و چندک‌های بالایی حدی دارای روند افزایشی در پارامتر تبخیر بوده‌اند و نیز در

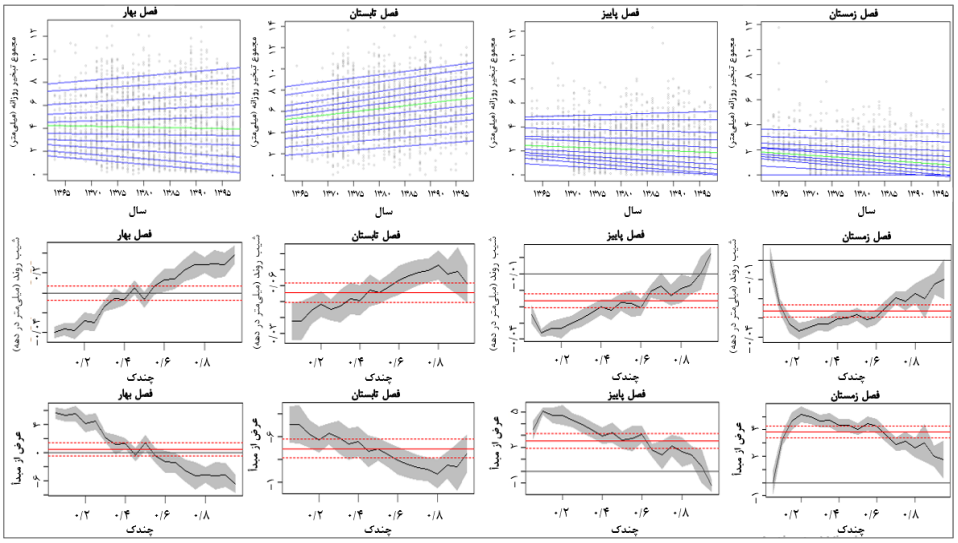
فصل تابستان تمامی مقادیر تبخیر دارای روند افزایشی با شیب مثبت بوده که شدت شیب در چندک‌های بالایی بیش‌تر بوده است. اما در فصل زمستان، شیب برآورد شده در تمامی چندک‌ها منفی و کاهشی می‌باشند که شدت آن‌ها در چندک‌های میانی بیش‌تر بوده است. در مقابل، برازش‌های حاصل از روش رگرسیون چندک بیزی (شکل ۳) نیز از نظر تغییرات همانند روش رگرسیون چندک فراوانی‌گرا می‌باشند؛ اما مقادیر تغییرات یا به عبارتی مقادیر شیب‌های برآورد شده در چندک‌های مختلف همگن‌تر بوده و از یکنواختی بیش‌تر برخوردارند که این برآوردها باعث کم‌تر شدن مقادیر چولگی، کشیدگی و واریانس در فصل‌های مختلف شده است. با توجه به فواصل خطوط چندک در فصل‌های مختلف می‌توان بیان کرد که پراکندگی مقادیر تبخیر در فصل بهار بیشتر و در فصل زمستان کم‌تر می‌باشد. و توزیع پارامتر تبخیر در فصل بهار دارای چولگی منفی یا چوله به چپ می‌باشد در حالی‌که مقدار چولگی در فصل‌های دیگر کم‌تر می‌باشد.

بررسی روند تغییرات پارامترهای اقلیمی در تمام مقیاس‌های زمانی (جدول ۲) نشان داده است که برای پارامتر میانگین دما در مقیاس فصلی در تمام فصل‌ها مقادیر روند مثبت و افزایشی بوده که بیش‌ترین شیب‌های روند معنی‌دار در فصل تابستان برای تمام چندک‌ها و در فصل‌های دیگر برای چندک‌های بالایی دیده شده است. پارامتر رطوبت نسبی در مقیاس فصلی نیز در فصل تابستان تمام چندک‌ها روند معنی‌دار منفی و کاهشی داشته اما برای فصل بهار، چندک پایینی دارای روند منفی معنی‌دار و چندک بالایی دارای روند مثبت معنی‌دار بوده است. در فصل پاییز چندک‌های پایینی و میانی روند کاهشی با شیب منفی داشته‌اند در حالی‌که چندک بالایی حدی در فصل زمستان دارای روند مثبت معنی‌دار می‌باشد و بیشترین شیب برآورد شده مربوط به چندک میانه در فصل پاییز (۰/۰۹-) می‌باشد. برای پارامتر ساعت آفتابی در مقیاس فصلی نیز تمام چندک‌ها در فصل تابستان، چندک بالایی در فصل پاییز و چندک میانی در فصل زمستان دارای روند افزایشی معنی‌دار با شیب مثبت بوده‌اند اما در فصل بهار هیچ روند معنی‌داری دیده نشده است. برای پارامتر سرعت باد در مقیاس فصلی، در فصل تابستان در تمام چندک‌ها، در فصل بهار در چندک‌های پایینی و میانی، و در فصل پاییز و زمستان در چندک‌های میانی و بالایی روند افزایشی با شیب مثبت و معنی‌دار دیده شده است که بیشترین مقدار شیب قابل توجه در فصل پاییز بوده است. شیب‌های برآورد شده در روش رگرسیون چندک بیزی (جدول ۳) که میزان تأثیر زمان را بر روی تبخیر بیان می‌کند، در اغلب موارد از نظر مثبت یا منفی بودن مشابه با شیب‌های برآوردی در روش چندک فراوانی‌گرا می‌باشد اما از نظر مقدار شیب متفاوت می‌باشد که به دلیل نوع برآوردی است که این روش دارد و بدلیل اینکه برای برآورد روند تغییرات از تمامی مقادیر در توزیع پارامتر کمک می‌گیرد، معمولاً تخمین‌هایی هموارتر و یکنواخت‌تر را در چندک‌های مختلف برآورد می‌کند و نیز تفاوت در شیب‌های برآوردی در دو روش می‌تواند از تفاوت در مقادیر عرض از مبدأهای برآورد شده در دو روش نیز اثر گیرد.

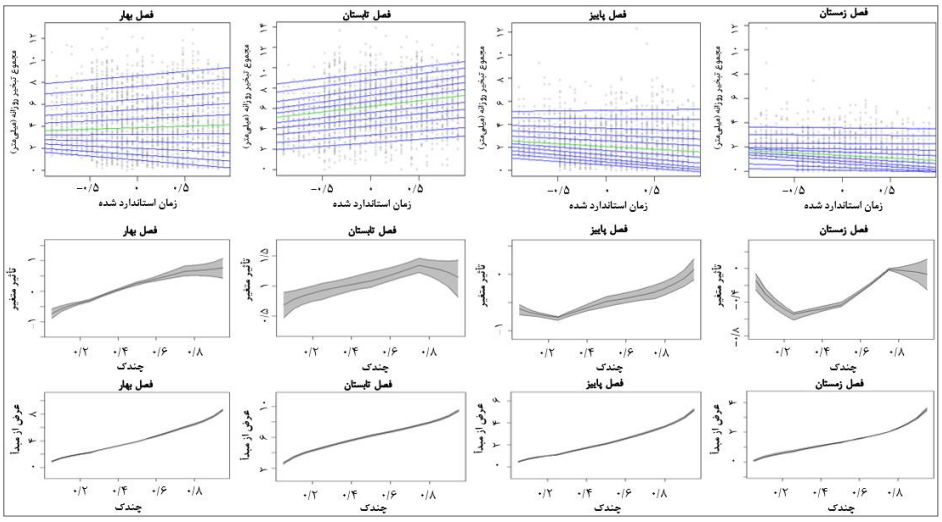
جدول ۲- شیب های چندک و معنی‌داری آماری آن برای سری زمانی پارامترهای اقلیمی در مقیاس فصلی در دوره‌ی زمانی ۱۳۹۷-۱۳۶۳.

دوره	زمان	تبخیر			میانگین دما			رطوبت نسبی			ساعت آفتابی			سرعت باد		
		۰/۰۵	۰/۵	۰/۹۵	۰/۰۵	۰/۵	۰/۹۵	۰/۰۵	۰/۵	۰/۹۵	۰/۰۵	۰/۵	۰/۹۵	۰/۰۵	۰/۵	۰/۹۵
فصلی	بهار	-۰/۰۴*	-۰/۰۰۷	۰/۰۳۸*	۰/۰۴۵*	۰/۰۶*	۰/۰۵۳*	-۰/۲۵*	-۰/۰۳۲	۰/۰۶۸*	۰	۰	۰/۰۰۴	۰/۰۹*	۰/۰۸*	۰
	تابستان	۰/۰۳۷*	۰/۰۵۶*	۰/۰۶*	۰/۰۸۵*	۰/۰۷*	۰/۰۷۷*	-۰/۴۳*	-۰/۲۸*	-۰/۱۶*	۰/۰۰۹*	۰/۰۸*	۰/۰۱۲*	۰/۰۹۴*	۰/۰۱۲*	۰/۰۴۷*
	پاییز	-۰/۰۲۵*	-۰/۰۱۷*	۰/۰۱۲*	۰/۰۲۶*	۰/۰۱۵	۰/۰۸۶*	-۰/۲۸*	-۰/۰۹*	۰/۰۶۲	۰	۰/۰۲	۰/۰۱*	۰	۰/۱*	۰/۱*
	زمستان	۰	-۰/۰۲۸*	-۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۵۲*	۰/۰۵۴*	-۰/۰۸۳	۰	۰/۱۱*	۰	۰/۰۴*	۰/۰۰۹	۰	۰/۰۹۵*	۰/۰۹۶*

*معنی‌داری در سطح ۰/۰۵



شکل ۲- نتایج کاربرد روش رگرسیون چندک فراوانی‌گرا (خطوط شیب چندک، شیب و عرض از مبدأ) بر روی سری زمانی فصلی داده‌های تبخیر روزانه



شکل ۳- نتایج کاربرد روش رگرسیون چندک بیزی (خطوط شیب چندک، شیب و عرض از مبدأ) بر روی سری زمانی فصلی داده‌های تبخیر روزانه

جدول ۳- شیب های چندک بیزی برآورد شده برای توزیع سری زمانی پارامترهای اقلیمی در مقیاس فصلی در دوره‌ی زمانی ۱۳۹۷-۱۳۶۳.

دوره	زمان	تبخیر			میانگین دما			رطوبت نسبی			ساعت آفتابی			سرعت باد		
		۰/۰۵	۰/۵	۰/۹۵	۰/۰۵	۰/۵	۰/۹۵	۰/۰۵	۰/۵	۰/۹۵	۰/۰۵	۰/۵	۰/۹۵	۰/۰۵	۰/۵	۰/۹۵
فصلی	بهار	-۰/۷۲	۰/۲۵	۰/۷۵	۰/۸۶	۱/۲۴	۰/۹۶	-۴/۰۷	-۰/۱۱	۱/۵۸	۰/۳۴۷	-۰/۷۷	۰/۰۰۶	۱/۲۶	۱/۲۲	۰/۲۸
	تابستان	۰/۶۶	۱/۱	۱/۱۴	۱/۵۶	۱/۳۷	۱/۴۸	-۷/۶۹	-۵/۵۵	-۳/۴۸	۱/۲۴	۰/۵۵	۰/۰۰۲	۲/۲۹	۲/۶۹	۱/۲۷
	پاییز	-۰/۶۶	-۰/۳۵	۰/۱۷	۰/۰۹۸	۰/۵	۱/۵۵	-۴/۳۹	-۱/۵۸	۰/۹۴	-۰/۰۰۴	-۰/۰۰۰۳	۰/۰۷۶	۰/۵۲	۱/۹۶	۱/۹۸
	زمستان	-۰/۱۴	-۰/۴۳	-۰/۰۸	۰/۲	۰/۹۴	۰/۹۵	-۳/۰۳	-۰/۰۸۳	۱/۳۷	-۰/۳۱	۱/۲۷	۰/۰۳۳	۰/۷۶	۱/۱	-۰/۵۷

نتایج بررسی پارامترهای اقلیمی مؤثر بر تبخیر با روش‌های چندک فراوانی‌گرا و چندک بیزی

رابطه‌ی تبخیر با پارامترهای اقلیمی دما، رطوبت نسبی، ساعت آفتابی و سرعت باد در مقیاس فصلی انجام گردید و نتایج به ترتیب در شکل‌های ۴، ۵، ۶ و ۷ نشان داده شده است. در این شکل‌ها، میزان تأثیر هر پارامتر اقلیمی بر روی تبخیردر چندک‌های مختلف و خطوط چندک‌های منتخب

۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷، ۰/۸، ۰/۹ و ۰/۹۵ نیز برای هر پارامتر نشان داده شده است.

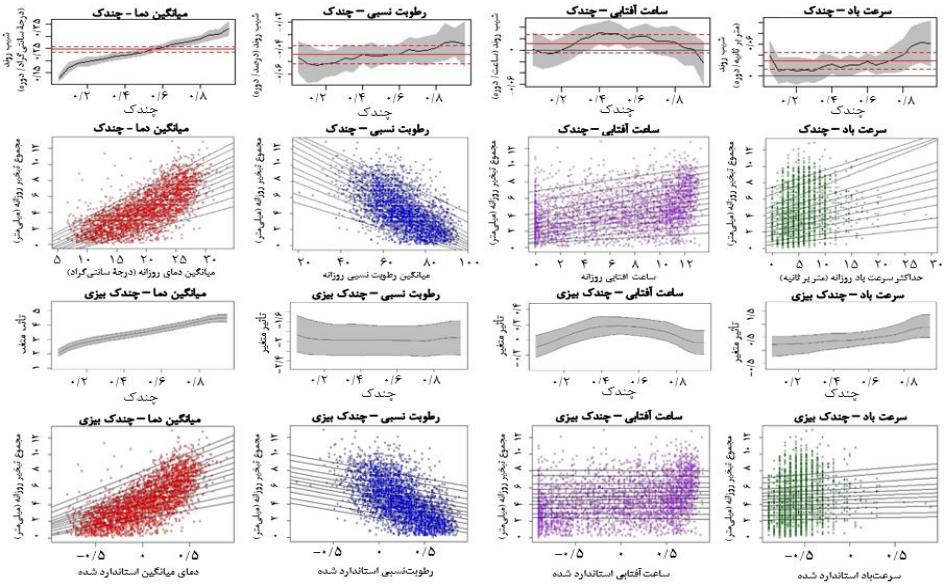
نتایج در فصل بهار

مدل رگرسیون چندک و مدل رگرسیون چندک بیزی از رابطه‌ی بین تغییرات متغیرهای آب و هوایی بر روی تبخیر برای همه‌ی مقیاس‌های زمانی فصلی برآورد گردید و نتایج در شکل‌های ۴، ۵، ۶ و ۷ ارائه شده است.خطوط رگرسیون چندک برای چندک‌های ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷، ۰/۸، ۰/۹، ۰/۹۵ و نیز مقادیر شیب‌های رگرسیون چندک برای تمامی چندک‌ها و برای هر ۴ پارامتر اقلیمی مرتبط با تبخیر در فصل بهار (شکل ۴ ردیف ۱و۲) نشان داده است که مقادیر شیب‌های برآوردی برای همه‌ی متغیرهای مستقل و در چندک‌های مختلف، متفاوت می‌باشد. شیب‌های منحنی‌های چندک در چندک‌های بالاتر، بزرگ‌تر از شیب‌ها در چندک‌های پایین‌تر می‌باشد. پارامترهای دما، سرعت باد و ساعت آفتابی دارای شیب‌های مثبت یا دارای تأثیر مثبت بر روی تبخیر به خصوص در چندک‌های بالایی حدی بوده در حالی‌که پارامتر رطوبت نسبی دارای تأثیر منفی می‌باشد. محدوده‌های بین منحنی‌های چندک برای مقادیر بالایی متغیرهای دما، سرعت باد و ساعت آفتابی افزایش یافته است که بیانگر چولگی منفی توزیع تبخیر نسبت به این ۳ پارامتر اقلیمی می‌باشد، اما برای پارامتر رطوبت نسبی، فاصله‌ی خطوط چندک در مقادیر بالای این پارامتر کاهش یافته است که نشان می‌دهد توزیع تبخیر نسبت به رطوبت نسبی به چوله بودن به سمت راست یا چولگی مثبت گرایش دارند. منحنی‌های چندک میانگین پسین از محاسبات زنجیره مارکف مونت کارلو در روش رگرسیون چندک بیزی در فصل بهار (شکل ۴ ردیف ۳و۴) نشان داده است که اثرات تغییرات آب و هوایی بر روی تبخیر محدود به میانگین توزیع تبخیر نمی‌باشد و متغیرهای آب و هوایی، اثرات متفاوتی در سرتاسر چندک‌های توزیع دارند. پارامترهای دما، سرعت باد و ساعت آفتابی دارای تأثیر مثبت بر روی تبخیر بوده است؛ میزان این تأثیرات در چندک‌های حدی بالایی به طور واضح، بیشتر از چندک‌های پایینی می‌باشد و بیش‌ترین میزان تأثیر مربوط به چندک‌های حدی بالایی برای پارامتر دما بوده است. پارامتر رطوبت نسبی دارای تأثیر منفی در تمامی چندک‌ها با مقادیر تأثیر مشابه در سراسر چندک‌ها بوده است و با توجه به نمودار میزان تأثیرات در چندک‌های مختلف، از میان ۴ پارامتر اقلیمی مورد نظر، ضرایب یا اثرات برآورد شده از پارامتر دما در چندک‌های مختلف با درجه‌ی پایین‌تری از عدم اطمینان نسبت به ۳ پارامتر دیگر اندازه‌گیری می‌شود. منحنی‌های چندک برای پارامترهای دما و سرعت باد دارای چولگی منفی می‌باشند. بنابراین اگر به نتایج حاصل از روش رگرسیون چندک فراوانی‌گرا و روش رگرسیون چندک بیزی نگاه کنیم (شکل ۴) با توجه به نمودارهای شیب یا تأثیر در چندک‌ها در می‌یابیم که روش بیزی میزان تأثیرات یا روابط پارامترهای اقلیمی بر روی تبخیر در چندک‌های مختلف را به صورت یکنواخت‌تر برازش می‌دهد و نیز در این روش، منحنی‌های چندک چولگی و کشیدگی ملایم‌تری را نسبت به روش چندک فراوانی‌گرا نشان می‌دهد.

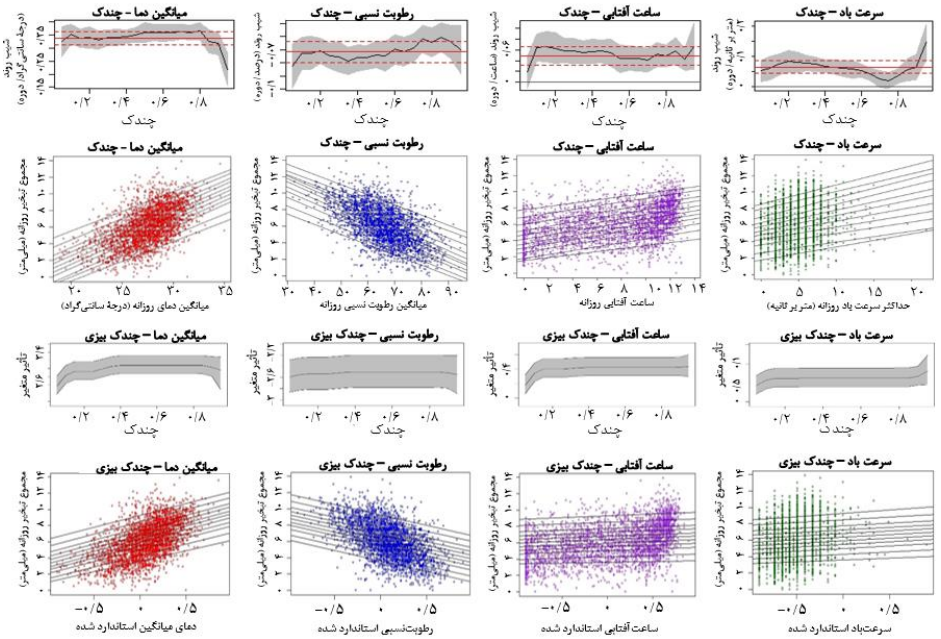
نتایج در فصل تابستان

نتایج بررسی روش رگرسیون چندک فراوانی‌گرا در بررسی میزان تأثیر مقادیر پارامترهای اقلیمی بر روی تبخیر در فصل تابستان (شکل ۵ ردیف ۱و۲)نشان داده است که در رابطه‌ی پارامترهای دما، ساعت آفتابی و سرعت باد بر روی تبخیر، شیب مثبت در تمامی چندک‌ها وجود دارد که شدت این شیب‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای بیش‌تر از شیب‌های برآوردی در فصل بهار می‌باشد؛ در حالی‌که پارامتر رطوبت نسبی دارای شیب منفی و با شدت‌های مشابه با شیب‌های دما می‌باشد. مقادیر شیب در چندک‌های مختلف برای هر پارامتر اقلیمی تقریباً نزدیک به یکدیگر بوده که نشان می‌دهد میزان تبخیر در تأثیر پذیری از تمامی مقادیر این ۳ پارامتر اقلیمی تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند و توزیع تبخیر نسبت به هر ۴ پارامتر اقلیمی، چولگی و کشیدگی کم را نشان می‌دهد. منحنی‌های میانگین پسین در چندک‌های موردنظر و نیز نمودارهای میزان تأثیر پارامترهای اقلیمی بر روی تبخیر با استفاده از روش چندک بیزی (شکل ۵ ردیف ۳و ۴) نشان داده است که میزان تأثیر هر پارامتر اقلیمی بر روی تبخیر در چندک‌های مختلف، تقریباً برابر

بوده است و تنها در بعضی موارد، چندک‌های حدی بالا و پایین، اثرات متفاوتی را برازش کرده است و از بین شیب‌های برآورد شده برای هر ۴ پارامتر اقلیمی، رطوبت نسبی با بیشترین درجه از عدم اطمینان محاسبه شده است. همچنین با توجه به نمودارهای شیب و منحنی‌های چندک در دو روش چندک فراوانی‌گرا و چندک بیزی، به طور واضح می‌توان به شیوه‌ی برازش هموارتر همراه با چولگی و واریانس کمتر در روش رگرسیون چندک بیزی پی برد.



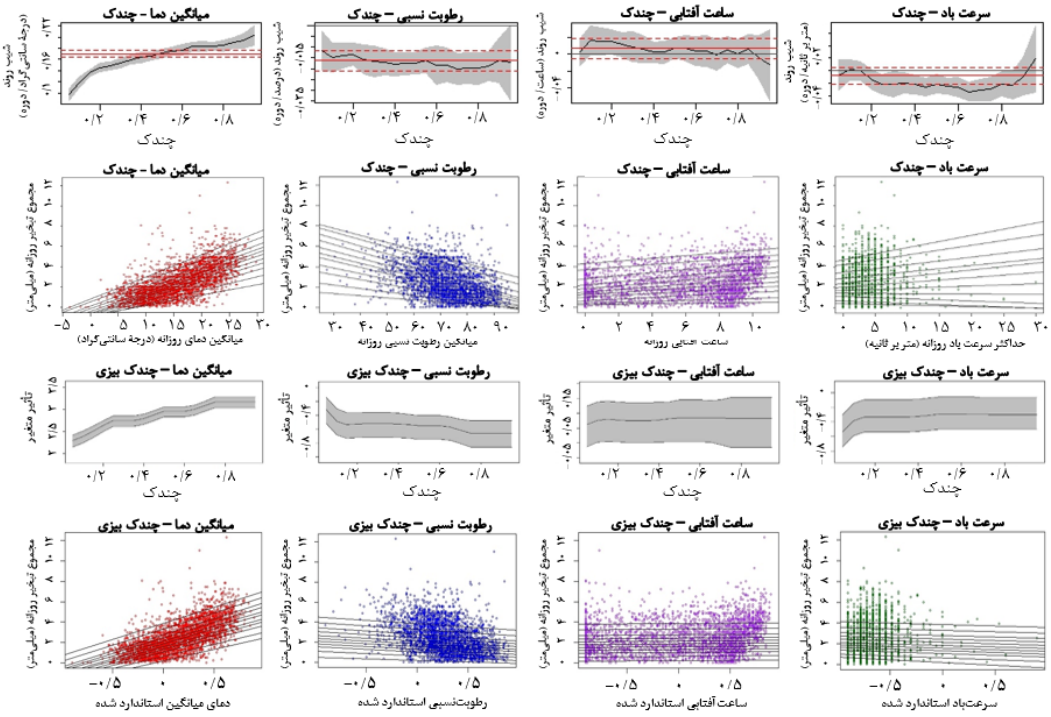
شکل ۴- نتایج بررسی تأثیر پارامترهای اقلیمی بر روی پارامتر تبخیر به همراه چندک‌ها (از ۰/۰۱–۰/۹۹ با گام ۰/۰۱) با استفاده از رگرسیون چندک و رگرسیون چندک بیزی در فصل بهار.



شکل ۵. نتایج بررسی تأثیر پارامترهای اقلیمی بر روی پارامتر تبخیر به همراه چندک‌ها (از ۰/۰۱–۰/۹۹ با گام ۰/۰۱) با استفاده از رگرسیون چندک و رگرسیون چندک بیزی در فصل تابستان.

نتایج در فصل پاییز

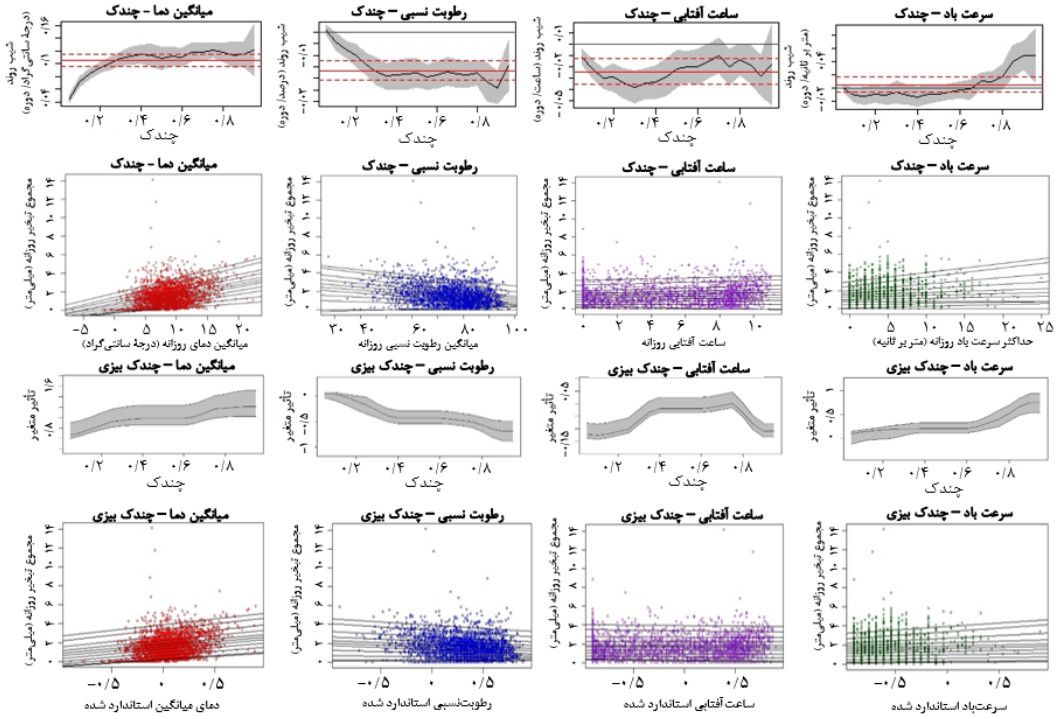
در فصل پاییز، شیب‌های برآوردی از روش رگرسیون چندک فراوانی‌گرا (شکل ۶ ردیف ۱و ۲) نشان داده است که پارامترهای دما و ساعت آفتابی دارای شیب مثبت و پارامتر رطوبت نسبی دارای شیب منفی در تمام چندک‌ها می‌باشند در حالی‌که پارامتر سرعت باد در چندک‌های بالایی دارای شیب مثبت و در چندک‌های پایینی دارای شیب منفی می‌باشد. مقادیر شیب‌ها در چندک‌های حدی بالایی بسیار بیش‌تر از چندک‌های دیگر می‌باشند که نشان می‌دهد مقادیر بالای پارامترهای اقلیمی تأثیر بسیار بیشتری بر روی تبخیر نسبت به مقادیر پایینی و میانی دارند و نیز مقادیر شیب‌های برآوردی برای پارامتر دما در چندک‌های مختلف، عدم اطمینان پایین‌تری را نسبت به پارامترهای دیگر محاسبه کرده است. محدوده‌های بین چندک‌ها در مقادیر بالای دما و سرعت باد به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش و برای پارامتر رطوبت نسبی کاهش یافته است و بیانگر این است که توزیع تبخیر نسبت به پارامترهای دما و سرعت باد دارای چولگی منفی، و نسبت به رطوبت نسبی دارای چولگی مثبت می‌باشد. با این حال خطوط چندک برآوردی در این روش، دربعضی موارد یکدیگر را قطع کرده‌اند که از معایب استفاده از روش رگرسیون چندک فراوانی‌گرا می‌باشد. اما منحنی‌های میانگین پسین در روش چندک بیزی و نیز نمودارهای میزان تأثیر پارامترهای اقلیمی بر روی تبخیر (شکل ۶ ردیف ۳ و ۴) نشان داده است که پارامتر دما بیش‌ترین میزان تأثیر را بر روی تبخیر به ویژه در چندک‌های بالایی حدی داشته است؛ در حالی‌که پارامترهای دیگر میزان تأثیر کم‌تری را برآورد کرده‌اند، به گونه‌ای که پارامترهای رطوبت نسبی و سرعت باد دارای تأثیر منفی در تمامی چندک‌ها، و پارامتر ساعت آفتابی دارای تأثیر مثبت بوده است. محدوده‌های بین چندک‌ها بر خلاف نتایج روش چندک فراوانی‌گرا در مقادیر مختلف پارامترهای اقلیمی تغییرات بسیار کم‌تری را نشان داده است و بیانگر این امر است که روش چندک بیزی واریانس، چولگی و کشیدگی‌های بسیار ملایم‌تری را برازش می‌دهد؛ همچنین امکان قطع شدگی در خطوط چندک متوالی در این روش از بین رفته است.



شکل ۶. نتایج بررسی تأثیر پارامترهای اقلیمی بر روی پارامتر تبخیر به همراه چندک‌ها (از ۰/۰۱–۰/۹۹ با گام ۰/۰۱) با استفاده از رگرسیون چندک و رگرسیون چندک بیزی در فصل پاییز.

نتایج در فصل زمستان

نتایج بررسی روند در فصل زمستان با استفاده از روش رگرسیون چندک فراوانی‌گرا (شکل ۷ ردیف ۱ و ۲) نشان داده است که پارامتر دما دارای شیب مثبت و پارامتر رطوبت نسبی دارای شیب منفی در بررسی رابطه آن با تبخیر بوده است؛ شدت این شیب‌ها در چندک‌های بالایی حدی بسیار بیش‌تر از چندک‌های پایینی می‌باشند، در حالی‌که پارامتر سرعت باد در چندک‌های پایینی و میانی دارای شیب منفی بوده و تنها در چندک‌های بالایی حدی دارای شیب مثبت قابل توجه می‌باشد. پارامتر ساعت آفتابی نیز دارای شیب منفی ملایم در تمامی چندک‌ها بوده است. فاصله خطوط چندک در مقادیر بالایی پارامترهای دما و سرعت باد افزایش یافته است که نشان دهنده‌ی چولگی منفی توزیع تبخیر نسبت به این دو پارامتر می‌باشد و برعکس، فاصله‌ی خطوط چندک در مقادیر پایین رطوبت نسبی افزایش یافته است و نشان می‌دهد که توزیع تبخیر نسبت به رطوبت نسبی دارای چولگی مثبت می‌باشد. در مقابل، منحنی‌های چندک بر اساس محاسبات روش رگرسیون چندک بیزی نشان داده است که تأثیر پارامتر دما در تمام چندک‌ها مثبت و با شیب ملایم‌تر می‌باشد و نیز پارامتر سرعت باد در چندک‌های حدی بالایی دارای تأثیر مثبت قابل توجه می‌باشد. در حالی‌که پارامتر رطوبت نسبی دارای تأثیر منفی بر روی تبخیر بوده است که شدت منفی این تأثیر بر روی چندک‌های حدی بالایی بیش‌تر بوده است. میزان تأثیرهای برآوردی از روش چندک بیزی و نیز واریانس، چولگی و کشیدگی در چندک‌های مختلف از متغیرهای آب و هوایی بر روی پارامتر تبخیر بسیار هموارتر از برآوردهای روش چندک فراوانی‌گرا می‌باشد.



شکل ۷. نتایج بررسی تأثیر پارامترهای اقلیمی بر روی پارامتر تبخیر به همراه چندک‌ها (از ۰/۰۱-۰/۹۹ با گام ۰/۰۱) با استفاده از رگرسیون چندک و رگرسیون چندک بیزی در فصل زمستان.

با توجه به نتایج حاصل از کاربرد آزمون من‌کندال و نیز روش‌های رگرسیون چندک در بررسی متغیرهای اقلیمی می‌توان بیان کرد که روش رگرسیون چندک، روندهای افزایشی و کاهشی با شیب‌های متفاوتی را برای پارامترهای اقلیمی تبخیر، میانگین دما، رطوبت نسبی، ساعت آفتابی و سرعت باد در چندک‌های مختلف برای سری‌های زمانی فصلی و همچنین درک و فهم درست این الگوهای خاص نسبت به آزمون من‌کندال نشان داده است. بیش‌تر پارامترهای

اقلیمی دارای روندهای مثبت و افزایشی در چندک‌های مختلف بوده‌اند؛ بیش‌ترین مقادیر شیب مثبت برای پارامترهای تبخیر، میانگین دما، ساعت آفتابی در چندک‌های بالایی و برای پارامتر سرعت باد در چندک‌های پایینی دیده شده است؛ در حالی‌که پارامتر رطوبت نسبی در بیش‌تر مقیاس‌های زمانی دارای شیب منفی بوده و تنها در چندک‌های بالایی حدی یعنی مقادیر بالای رطوبت نسبی، شیب مثبت دیده شده است. در بررسی رابطه‌ی پارامترهای اقلیمی با تبخیر با استفاده از روش‌های رگرسیون چندک، بیش‌ترین میزان تأثیر مثبت مربوط به میانگین دما، و بیش‌ترین میزان تأثیر منفی مربوط به رطوبت نسبی بوده است که در چندک‌های مختلف میزان تأثیر متفاوتی داشته‌اند. الف) وجود روند افزایشی در فصل‌های بهار، تابستان و پاییز برای مقادیر مختلف از میانگین دما و تأثیر مثبت قابل توجهی که در این زمان‌ها بر روی تبخیر با توجه به شکل ۷ دارد، حاکی از افزایش میزان تبخیر در فصل‌ها می‌باشد. ب) وجود روند کاهشی فصل تابستان برای پارامتر رطوبت نسبی و نیز تأثیر زیادی که بر روی میزان تبخیر در این زمان‌ها دارند، می‌توانند علت افزایش تبخیر در این دوره‌ها باشند. ج) برای پارامتر ساعت آفتابی میزان تأثیر بسیار کم بوده است؛ با این حال وجود روند افزایشی در چندک‌های بالایی از ساعت آفتابی در فصل تابستان، و تأثیر مثبتی که در این فصل بر روی تبخیر دارند، می‌توانند موجب افزایش میزان تبخیر گردد. د) برای پارامتر سرعت باد نیز میزان تأثیر بر روی تبخیر در چندک‌های مختلف، از ساعت آفتابی بیش‌تر و از میانگین دما کم‌تر می‌باشد؛ لذا وجود روند افزایشی در چندک‌های میانی و بالایی در فصل‌های بهار، تابستان و زمستان، و با توجه به تأثیر مثبت بالایی که بر روی تبخیر در این زمان‌ها دارند، می‌توانند عاملی برای افزایش تبخیر در این منطقه باشد. و در مقابل وجود روندهای مثبت افزایشی برای مقادیر بالای سرعت باد در پاییز، تأثیر منفی‌ای که در این زمان‌ها بر روی تبخیر دارد، می‌تواند عاملی برای کاهش تبخیر در این فصل باشد. همچنین کارآیی روش‌های رگرسیون مکانی بیزی به گونه‌ای است که روش‌های دقیق‌تری در مقایسه با رگرسیون چندک فراوانی‌گرا ارئه داده است؛ به این علت که مدل اطلاعات را در طول فضا و سطح چندک قرض می‌گیرد. اگر مدلی برازش چندک‌های عبوری (که خطوط چندک یکدیگر را قطع می‌کنند) را ممنوع کند، در این صورت منحنی‌های چندک عبوری باید از اطلاعات روی همه‌ی چندک‌های ممکن برای برازش منحنی‌های چندک استفاده کند؛ بنابراین رگرسیون چندک مکانی بیزی این برازش را با اقتباس اطلاعات در تمامی چندک‌ها می‌سازد (فراهم می‌کند) در حالی‌که رگرسیون چندک فراوانی‌گرا چنین قابلیتی ندارد. با توجه به نتایج بالا می‌توان بیان کرد که رگرسیون چندک مکانی بیزی بر خلاف رگرسیون چندک فراوانی‌گرا به خوبی اجرا می‌شوند و می‌توانند مدلی قدرتمند برای ساخت توزیع‌های شرطی باشد؛ این مزیت مربوط به جنبه‌های مکانی مدل و توانایی مدل در به دست آوردن رفتار متغیرها در چندک‌های حدی به صورت واقعی‌تر می‌باشد (Ramsey, 2020).

نتیجه‌گیری

۱) نتایج آزمون من-کندال نشان داد، ممکن است تغییراتی در چندک‌های مختلف یک سری زمانی از داه‌ها اتفاق افتاده باشد که این آزمون قادر به تشخیص آنها نیست.

۲) از بین فصل‌های سال، فصل تابستان بیشترین روند افزایش تبخیر را طی سال‌های گذشته داشته است بطوری که تمامی چندک‌های سری زمانی آن دارای روند افزایشی هستند البته چندک‌های بالایی از شیب بزرگتری برخوردار هستند. با توجه به کشت تابستانه در این منطقه، روند افزیش مصرف آب در بخش کشاورزی، خطر خشکی و کاهش منابع آب زیرزمینی را در صورت عدم مدیریت صحیح به همراه خواهد داشت.

۳) در فصل بهار چندک‌های پایینی سری داده‌های تبخیر از روند کاهشی و چندک‌های بالایی از روند افزایشی برخوردار هستند. جهت این تغییرات طوری است که چندک‌های میانی تقریبا فاقد شیب و بدون روند می‌باشند.

۴) در فصل پاییز و زمستان به دلیل کاهش دما و افزایش رطوبت نسبی، تبخیر کمتر از دو فصل دیگر سال است

و روند جزئی کاهش تبخیر در چندک‌های پایینی نمی‌تواند روند افزایش تبخیر در فصل تابستان را جبران کند.

۵) از بین عوامل درنظر گرفته مؤثر بر تبخیر، دما بیشترین نقش را در روند تغییرات تبخیر داشته است و با توجه به اینکه تغییر اقلیم مقادیر حدی و چندک‌های بالایی دما را با شیب بیشتری تحت تأثیر قرار داده است و وزن (شیب) بیشتر چندک‌های بالایی دما در تغییرات تبخیر می‌تواند زنگ خطری برای کاهش بیشتر منابع آبی در این منطقه باشد.

۶) رگرسیون چندک بیزی دامنه تغییرات شیب بین چندک‌های مختلف را بزرگتر از رگرسیون چندک محاسبه می‌کند و تغییرات ناگهانی شیب از یک چندک به چندک مجاور را ملایم‌تر می‌سازد و احتمال تقاطع دو خط شیب روند را برطرف می‌سازد.

در نهایت می‌توان نتیجه گرفت با توجه به افزایش معنی‌دار دمای هوا و کاهش رطوبت نسبی طی یک دوره ۳۵ ساله آماری (۱۳۹۷-۱۳۶۳)، و نقش مؤثر این دو عامل در افزایش تبخیر، هدر رفت منابع آبی در این منطقه رو به افزایش است که برای جبران آن و حفظ منابع ارزشمند آبی می‌بایست تدابیری برای اجرای کشاورزی حفاظتی و کاهش تبخیر از سطح اندیشیده شود.

منابع

1. Abbas, S.A., Xuan, Y. and X. Song, 2019, Quantile Regression Based Methods for Investigating Rainfall Trends Associated with Flooding and Drought Conditions. Journal of Water Resources Management, Vol. 33, pp. 4249–4264.
2. Adnan, S., Ullah, K. and R. Ahmed, 2020, Variability in meteorological parameters and their impact on evapotranspiration in a humid zone of Pakistan. Journal of Meteorological Applications, Vol. 27, No 2, PP. 1-10.
3. Allies, A., Demarty, J., Olioso, A., Moussa, I.B., Issoufou, H.B.A., Velluet, C. and B. Cappelaere, 2020, Evapotranspiration estimation in the Sahel using a new ensemble-contextual method. Remote Sensing, Vol. 12, No. 380, pp. 1-34.
4. Amran, B. and B. Anisa, 2017, Trend Analysis of Precipitation Extreme Related to Climate Change in Province Sulawesi Selatan, Indonesia. International Journal of Applied Engineering Research ISSN, Vol. 12, No, 21, PP. 11035-11038.
5. Asadzadeh, F., Kaki, M. and S. Shakiba, 2017, Trends Analysis of Reference Evapotranspiration in the Synoptic Sitesof Kurdistan Province Using Spearman's Test. Journal of Iran-Water Resources Research, Vol. 13, No. 1, PP. 216-222 (In Persian).
6. Chakav, Safia., Davari, K. and B. Ghahremani, 1397, Analysis and study of the time trend of evapotranspiration of the reference plant and its effective parameters in several climatic zones in Iran. Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Planning of the Islamic World, Tabriz, (In Persian).
7. Dunn, R.H., Willett, K.M. and E.P. Parker, 2019, Changes in statistical distributions of sub-daily surface temperatures and wind speed. Journal of Eearth System Dynamics, Vol. 10, No 4, PP. 765-788.
8. Gao, M. and C. Franzke, 2017, Quantile Regression-based Spatio-temporal Analysis of Extreme Temperature Change in China. Journal of Climate, Vol. 30, PP. 9897-9914.
9. Ghorbani, Kh., Valizadeh, E. and S. Bararkhanpour, 2018, Investigation of spatiotemporal trend of the bivariate meteorological drought index, SPEI, in

Iran. Journal of Desert Management, Vol. 6, No. 11, pp. 25-38 (In Persian).

Gorbani, Kh. 2015, Spatial and seasonal pattern in climate change, temperatures across Iran. Journal of Water and Soil Conservation, Vol. 21, No. 5, pp. 257-270 (In Persian).

10. Halabian, A.H. and M. Ravarian, 2017, Study of potential evapotranspiration and climatic parameters affecting it in Quchan city. 4th Iranian Scientific Research Congress on Development and Promotion of Agricultural Sciences, Natural Resources and Environment. (In Persian).
11. Hamed, K.H. and A.R. Rao, 1998, A modified Mann–Kendall trend test for autocorrelated data. Journal of Hydrology, Vol. 204, pp. 182-196.
12. Kendall, M.G. 1975, Rank Auto-correlation Methods, Charles Griffin, London.
13. Koenker, R. 2005, Quantile Regression, first ed, New York, Cambridge University Press, 2005, pp. 1-25.
14. Koenker, R. 2006, Quantile regression in R: A vignette. [Available online at http://www.econ.uiuc.edu/~roger/research/rq/vig.pdf.]
15. Koenker, R. and G. Bassett, 1978, Regression Quantiles. Econometrica, Vol. 46, pp. 33-50.
16. Kotz, S., Kozubowski, T.J. and K. Podgorski, 2001, The Laplace distribution and generalizations: engineering, and finance. Birkhauser. Boston.
17. Li, Q., Lin, J. and J.S. Racine, 2013, Optimal Bandwidth Selection for Nonparametric Conditional Distribution and Quantile Functions. Journal of Business and Economic Statistics, Vol. 31, PP. 57-65.
18. Mann, H.B. 1945, Nonparametric Tests Against Trend, Econometrica. Journal of the Econometric Society, PP. 245-259.
19. Moazenzadeh, R., Mohammadi, B., Shamshirband, S. and K.W. Chau, 2018, Coupling a firefly algorithm with support vector regression to predict evaporation in Northern Iran. Journal of Engineering applications of computational fluid mechanics, Vol. 12, No. 1, pp. 584–597.
20. Ramsey, A.F. 2020. Probability distributions of crop yields: A bayesian spatial quantile regression approach. American Journal of Agricultural Economics, 102(1): 220-239.
21. Reich , B. J. and L.B. Smith, 2013, Bayesian quantile regression for censored data. Biometrics, Vol. 69, No. 3, pp. 651-660.
22. Reich, B.J. 2012, Spatiotemporal quantile regression for detecting distributional changes in environmental processes. Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics), Vol. 61, No. 4, pp. 535-553.
23. Reich, B.J., Fuentes, M. and D.B. Dunson, 2011, Bayesian Spatial Quantile Regression. Journal of the American Statistical Association, Vol. 106, No. 493, PP. 6–20.
24. Smith, L. B. and B.J. Reich, 2013, BSquare: An R package for Bayesian simultaneous quantile regression.
25. Saeedi, Z., Ataei, H. and M. Javari, 2019, Study of temperature and precipitation changes trend in Koohrang synoptic station (statistical period 1986 to 2015). the second

national conference on natural resources and sustainable development in Zagros, Shahrekord. (In Persian).

26. Salmani, H., Sheikh, V.B., Salman Mahiny, A., Ownegh, M. and A. Fathabadi, 2019, Long-Term Trend Analysis of Climate and Hydrological Series using Removal of the Autocorrelation Statistical Methods in the Eastern Gorganrood Basin, Golestan Province. Journal of Watershed Management Research, Vol. 10, No. 19, PP. 58-72 (In Persian).
27. Tan, X., Gan, T.Y., Chen, S. and B. Liu, 2018, Modeling distributional changes in winter precipitation of Canada using Bayesian spatiotemporal quantile regression subjected to different teleconnections. Journal of Climate Dynamics, Vol. 52, No. (3-4), pp. 2105-2124.
28. Torkaman, M., Noroozi, A.A. and M. Homaee, 2019, Analysis of the Trends of Climate Parameters Using Mann Kendal Test (TFPW-MK) In Khuzestan Province. Journal of environmental Sciences Studies, Vol. 4, No. 1, PP. 884-895 (In Persian).
29. Uranchimeg, S., Kim, J.G., Kim, J.G., Kown, H.H. and S.O. Lee, 2018, A Bayesian Quantile Regression Approach for Nonstationary Frequency Analysis of Annual Maximum Sea Level in a changing Climmate. Journal of Coastal Research, Vol. 58, PP. 536-540.