



Evaluation of Spatio-temporal Changes of Flow Duration Curve Seasonal Indexes (FDCSI) in Four Decades in Namak Lake Basin

Z. Sheikh¹, M.R. Yazdani^{2*}, and A. Moghaddam Nia³

Abstract

Low flow is an important component in investigating the available water, especially in arid regions, which is applied to manage hydrologic drought and to reduce its impacts. The spatiotemporal changes of hydrological drought phenomenon were investigated in Namak Lake Basin in the present study based on Flow Duration Curve Seasonal Indexes (FDCSI) including Q70, Q80, Q90, Q95 and Q99. For this purpose, 18 stations with the maximum long-term data (43 years) were selected and FDCSI values were extracted for summer (June to November) and winter (December to May). Nonparametric tests including Mann-Kendal, Modified Mann-Kendal, and Sen Slope Estimator were performed to determine the time trend. Furthermore, Hurst exponent was applied to investigate the long-term memory. Based on Hurst results, most of the time series had memory but uniform patterns were not recognized for them. The significant decreasing trend was identified based on summer and winter seasonal indexes at 55-66% and 38-50% of the total stations, respectively. In addition, a slightly increasing trend was observed at 5-11% of study stations at a significant level of 95 and 99%. The evaluation of the results of seasonal indexes showed that summer flow experienced more severe drought due to lack of base flow during 1970-2012. Severe decline trend during the summer season might occur due to the temporal patterns of rainfall, increasing evapotranspiration, and finally, over-harvesting of surface and groundwater resources for agricultural purposes. Despite the drastic changes in topography, and climate and consequently hydrologic regime at the basin, the spatial distribution of observational trends showed that the declining trend was distributed homogeneously all over Namak Lake, except its northeastern part. Rainfall regime, inter-basin water transfer (IBT) projects, agricultural lands drainage, industrial and household wastewater have played an important role in the observed positive trend in the northeastern region of the basin during four decades. The results indicated the importance of considering seasonality in low flow indexes; which makes a better reflection of the role of the effective driving forces and as a result, optimum management of streamflow is achieved during the persistent dry periods.

Keywords: Flow Duration Curve, Hydrological Drought, Spatiotemporal Trend, Hurst Exponent, Namak Lake Basin.

Received: September 26, 2018

Accepted: November 16, 2018

ارزیابی تغییرات زمانی- مکانی شاخص‌های فصلی منحنی تداوم جریان (FDCSI) طی چهار دهه در حوزه دریاچه نمک

زهرا شیخ^۱، محمدرضا یزدانی^{۲*} و علیرضا مقدم‌نیا^۳

چکیده

جریان کمین، مؤلفه‌ای مهم بمنظور بررسی میزان آب در دسترس بویژه در مناطق خشک است که جهت مدیریت خشکسالی و کاهش آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. مطالعه حاضر به بررسی تغییرات زمانی- مکانی پدیده خشکسالی هیدرولوژیکی در سطح حوزه دریاچه نمک بر پایه‌ی شاخص‌های فصلی منحنی تداوم جریان (FDCSI) شامل Q70، Q80، Q90، Q95 و Q99 می‌پردازد. برای این منظور، ۱۸ ایستگاه با حداکثر آمار بلندمدت (۴۳ سال) انتخاب و مقادیر FDCSI براساس دو فصل تابستان (خرداد تا آبان) و زمستان (آذر تا اردیبهشت) استخراج گردید. از آزمون‌های ناپارامتری من- کندال، من- کندال اصلاح شده و برآوردگر شیب سن جهت شناسایی روند زمانی و توان هرست جهت بررسی حافظه بلندمدت استفاده شد. برپایه نتایج هرست، اغلب سری‌های زمانی دارای حافظه بوده ولی الگوهای یکپارچه‌ای تبیین نگردید. روند کاهشی شدید معنی‌دار براساس شاخص‌های فصلی تابستانه و زمستانه به ترتیب در ۵۰-۳۸٪ و ۶۶-۵۰٪ درصد از کل ایستگاه‌ها شناسایی شد. علاوه بر این روند ضعیف افزایشی در ۱۱-۵٪ درصد ایستگاه‌های مطالعاتی در سطح معنی‌داری ۹۵٪ و ۹۹٪ درصد مشاهده گردید. ارزیابی نتایج شاخص‌های فصلی نشان داد، جریان تابستانه به علت عدم تأمین دبی پایه، خشکسالی شدیدتری طی دوره ۱۳۰۲-۱۹۷۰ متحمل شده است. الگوهای زمانی بارشی، افزایش تبخیر- تعرق و در نهایت برداشت بیش از حد از منابع آب سطحی و زیرزمینی جهت اهداف کشاورزی از عوامل احتمالی روند کاهشی شدید طی فصل تابستان است. با وجود تغییرات شدید توپوگرافی، اقلیمی و به تبع آن رژیم هیدرولوژیکی در سطح حوزه، پراکنش مکانی روندهای مشاهداتی نشان داد، روند کاهشی بطور همگن در تمام بخش‌های حوزه دریاچه نمک به استثنای بخش شمال شرقی آن توزیع یافته است. رژیم بارشی، پروژه‌های انتقال آب بین حوزه‌های و زه‌آب بازگشتی از زمین‌های کشاورزی، پساب صنعتی و خانگی نقش به‌سزایی در روند مثبت مشاهده‌ای طی چهار دهه اخیر در بخش شمال شرقی حوزه داشته است. این نتایج بیانگر اهمیت در نظر گرفتن شاخص‌ها جریان کمین به صورت فصلی است؛ که سبب انعکاس بهتر نقش نیروهای محرک مؤثر بر آنها و در نتیجه مدیریت بهینه جریان طی دوره‌های تداوم خشکی می‌گردد.

کلمات کلیدی: منحنی تداوم جریان، خشکسالی هیدرولوژیکی، روند زمانی- مکانی، توان هرست، حوزه دریاچه نمک.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۷/۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۸/۲۵

1- Ph.D. Student of Combat Desertification, Department of Combat Desertification, Faculty of Desert Studies, University of Semnan, Semnan, Iran.

2- Associate Professor, Department of Combat Desertification, Faculty of Desert Studies, University of Semnan, Semnan, Iran. Email: m_yazdani@semnan.ac.ir

3- Associate Professor, Department of Rehabilitation of Arid and Mountainous Regions, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

*- Corresponding author

۱- دانشجوی دکتری بیابان‌زدایی، گروه بیابان‌زدایی، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

۲- دانشیار، گروه بیابان‌زدایی، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

۳- دانشیار، گروه احیای مناطق بیابانی و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان پائیز ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

۱- مقدمه

زمانی و مکانی مقادیر جریان کمینه رودخانه زرد را طی دوره آماری ۲۰۰۵-۱۹۵۵ با استفاده از آزمون من-کندال مورد بررسی قرار دادند. براساس نتایج آنها روند معنی‌داری در بالادست رودخانه شناسایی نگردید، اما روند کاهشی معنی‌دار در بخش‌های میانی و پایین‌دست رودخانه مشاهده شد. (Fiala et al., 2010) رژیم سالانه و فصلی مقادیر جریان کمینه ۱۴۴ حوضه در جمهوری چک طی دوره آماری ۲۰۰۵-۱۹۶۱ را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آزمون‌های آماری من-کندال نشان داد، بیش‌تر ایستگاه‌های مورد مطالعه روند معنی‌داری نداشته و روندهای معنی‌دار مشاهداتی شامل روند کاهشی در مقادیر جریان کمینه تابستانه و روند افزایشی در مقادیر جریان کمینه زمستانه می‌باشد. (Assani et al., 2011) مقادیر جریان کمینه تابستانه و زمستانه در حوزه آبخیز لورنس کبک را طی دوره آماری ۲۰۰۰-۱۹۳۴ مورد بررسی قرار دادند. بخش جنوب‌شرقی حوضه، روند افزایشی معنی‌دار در مقادیر جریان کمینه تابستانه و زمستانه بدلیل افزایش بارش‌های پاییزه و تابستانه نشان داد؛ در حالی‌که بخش جنوب‌غربی حوضه، روند کاهشی معنی‌دار در جریان کمینه تابستانه به‌علت افزایش تأخیر-تغرق نمایش داد. (Giuntoli et al., 2013) تغییرات زمانی مقادیر جریان کمینه و ارتباطات آن با شاخص‌های اقلیمی بزرگ مقیاس را طی دوره آماری ۲۰۰۸-۱۹۶۸ در ۲۲۰ ایستگاه در فرانسه مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاکی از افزایش شدت خشک‌سالی در بخش جنوبی فرانسه بود. همچنین همبستگی بالایی میان مقادیر جریان کمینه و شاخص‌های اقلیمی فصلی گزارش کردند. (Konapala et al., 2018) به بررسی تغییرات ماهیت مقادیر جریان کمینه و ارتباط آن با شاخص‌های بزرگ مقیاس اقلیمی طی دو دوره آماری ۱۹۵۹-۱۹۱۶ و ۲۰۰۳-۱۹۶۰ در چندین حوضه در ایالت تگزاس پرداختند. نتایج نشان داد که مقادیر جریان کمینه ارتباط غیرخطی با شاخص‌های اقلیمی دارد. (Foulon et al., 2018) روشی را به منظور ارزیابی روندهای آتی مقادیر جریان کمینه در مقیاس حوضه با استفاده از داده‌های اقلیمی توسعه دادند و ۴۲ سناریوی اقلیمی طی سال‌های ۲۱۰۰-۱۹۶۱ برای دو حوضه واقع در کبک کانادا در نظر گرفتند. نتایج حاصله از آزمون من-کندال روند مشخصی در مقادیر جریان کمینه را شناسایی کرد.

پژوهش‌های معدودی در ارتباط با تغییرات زمانی-مکانی مقادیر جریان کمینه در ایران وجود دارد. (Dodangeh et al., 2012) با استفاده از آزمون ناپارامتری من-کندال روند مقادیر جریان کمینه در حوضه سد سفیدرود را مورد بررسی قرار دادند. روند کاهشی محسوسی در مقادیر جریان کمینه شناسایی شد که بطور یکنواخت در سطح حوضه توزیع یافته بود. ایشان احداث سازه‌های آبی، افزایش سطح زیرکشت و تغییر کاربری اراضی در بخش‌های بالادست حوضه را از دلایل اصلی وقوع این روند ذکر کردند. (Masih et al., 2011) به بررسی تغییرات زمانی

خشک‌سالی که به عنوان کمبود آب در دسترس مورد انتظار در سیستم هیدرولوژیکی شناخته می‌شود؛ یکی از پرمخاطره‌ترین بلایای طبیعی است که اثرات گسترده اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی به دنبال دارد. به آرامی توسعه یافته و شناسایی دقیق نقطه آغاز و پایان آن بسیار دشوار است (Barker et al., 2016; Huang et al., 2016). تداوم کمبود بارش منجر به کمبود رطوبت خاک شده و حتی می‌تواند آب‌های سطحی و زیرزمینی را تحت تأثیر قرار دهد که در نهایت منجر به خشک‌سالی هیدرولوژیکی و جریان‌های کمینه می‌گردد. در حال حاضر در اثر تغییرات اقلیمی، فراوانی وقوع خشک‌سالی‌های هیدرولوژیکی کوتاه‌مدت رو به افزایش است که انتظار می‌رود در مقیاس‌های مکانی مختلف محلی، منطقه‌ای و جهانی اثرات شدیدی برجای گذارد (Foulon et al., 2018). آگاهی و شناخت از پویایی و تغییرات زمانی مقادیر جریان کمینه، موضوعی حیاتی از جنبه‌های متنوع کنترل کیفیت آب، مدیریت اکوسیستم‌های رودخانه‌ای، ارزیابی ریسک هیدرولوژیکی، تولید نیروگاه‌های برقابی، کشاورزی و سایر فعالیت‌های اقتصادی محسوب می‌گردد (Giuntoli et al., 2013; Konapala et al., 2018). از سوی دیگر مناطق خشک و نیمه خشک حساسیت بیشتری به رویدادهای خشک‌سالی نشان می‌دهند و تغییرات مشابه در شدت خشک‌سالی، اثرات و پیامدهای بیشتری در مناطق خشک نسبت به مناطق مرطوب به دنبال خواهد داشت. بنابراین بررسی تغییرات خشک‌سالی در مناطق خشک و نیمه خشک از اهمیت قابل توجهی برخوردار می‌باشد (Modarres et al., 2016).

شاخص‌های جریان کمینه بر پایه روش‌های متنوعی از جمله روش گرافیکی منحنی تداوم جریان^۱ (FDC) تعریف و تبیین می‌گردند. FDC مجموعه کاملی از مقادیر دبی رودخانه‌ها از جریان کمینه تا رویدادهای سیلابی را در برداشته و درصد زمانی که دبی مدنظر طی یک دوره خاص، برابر یا بیش‌تر است را ارائه می‌کند. این منحنی‌ها در طیف وسیعی از مطالعات هیدرولوژیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند، زیرا اطلاعات با ارزش و ضروری در ارتباط با ویژگی‌های جریان و تغییرات آن در اختیار داشته بطوری‌که بعنوان علامت مشخصه^۲ حوضه شناخته شده که معرف رفتار و پاسخ حوضه می‌باشند (Atieh et al., 2017).

تاکنون مطالعات زیادی در سراسر جهان به بررسی تغییرات زمانی و مکانی مقادیر جریان کمینه پرداخته‌اند (Bawden et al., 2014; Burn et al., 2010; Coch and Mediero, 2016; de Wit et al., 2005; Svensson et al., 2009; Khaliq et al., 2007) که در ادامه به برخی از آنها اشاره می‌شود. (Yang et al., 2010) تغییرات

بکارگیری آزمون‌های ناپارامتری، (۴) بررسی وجود حافظه بلندمدت در شاخص‌های فصلی جریان کمینه.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز دریاچه نمک با مساحتی در حدود ۹۲۵۶۰ کیلومترمربع در بخش غربی کویر مرکزی ایران و در مختصات جغرافیایی $31^{\circ} 52'$ تا $1^{\circ} 48'$ طول شرقی و $51^{\circ} 32'$ تا $31^{\circ} 36'$ عرض شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). این حوضه ۵/۶ درصد از مساحت کل کشور را در برداشته و با ۱۸ میلیون نفر جمعیت (۲۵ درصد از جمعیت کل کشور) یکی از پرتراکم‌ترین حوضه‌های کشور محسوب می‌گردد. سیمای کلی این حوضه از ۵۱ درصد مناطق دشتی و کم ارتفاع، ۴۷ درصد مناطق کوهستانی و ۲ درصد مناطق بیابانی و شوره‌زار تشکیل شده است. وجود اراضی پست و کم ارتفاع همراه با رشته کوه‌های مرتفع البرز و دامنه شمالی زاگرس (اختلاف ارتفاع بیش از ۳۰۰۰ متر بین حداقل و حداکثر ارتفاع حوضه) نشان دهنده شرایط ویژه ژئومورفولوژیکی این حوضه است. نوسانات شدید ارتفاعی سبب تنوع شرایط اقلیمی در این ناحیه گردیده است؛ بطوری که براساس شاخص‌های دوارتن و آمبرژه، اقلیم حوضه از خشک تا نیمه خشک متمایل به مرطوب متغیر می‌باشد. از سوی دیگر وجود دیواره مرتفع رشته کوه البرز سبب گردیده توده‌های هوای مرطوب که از سمت دریای خزر به سوی فلات مرکزی ایران حرکت می‌کنند، کم‌ترین نفوذ را بر حوضه دریاچه نمک داشته و اقلیم این منطقه را به شدت تحت تأثیر قرار دهند. دمای متوسط سالانه ۱۳ درجه سانتی‌گراد می‌باشد که بالاترین و کم‌ترین دمای متوسط ماهانه در تیر و دی ماه به ترتیب ثبت گردیده است. مجموع بارش متوسط سالانه حوضه نیز ۲۷۴/۹ میلی‌متر برآورد گردیده که ماه‌های اسفند و شهریور به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین سهم بارش را به خود اختصاص داده‌اند (Yekom Consulting Engineers, 2012b).

۲-۲- داده‌های مورد استفاده

شش رودخانه بزرگ و اصلی شامل کرج، جاجرود، شور، قره‌چای، قمرود و بن‌رود در سطح حوضه دریاچه نمک جریان دارند که برخی از آنها رودهایی پرآب با دبی بالا محسوب می‌گردند. شبکه نسبتاً متراکمی از ایستگاه‌های اندازه‌گیری جریان با ۱۹۷ ایستگاه آب‌سنجی در سطح حوضه دریاچه نمک بطور ناهمگن توزیع یافته است که در حال حاضر تعدادی از این ایستگاه‌ها با توجه به تأمین اهداف، دایر نبوده و آماربرداری در آنها صورت نمی‌گیرد. در نتیجه وجود رودخانه‌های پرآب و در جهت تأمین تقاضای آبی رو به رشد بخش‌های مختلف شرب، صنعت و کشاورزی در این منطقه، تاکنون پروژه‌های سدسازی بزرگی

مقادیر جریان کمینه و ارتباط آن با پارامترهای اقلیمی طی دوره آماری ۲۰۰۱-۱۹۶۱ در حوضه کرخه پرداختند. نتایج این پژوهش حاکی از وجود روند کاهشی در مقادیر جریان کمینه در بالادست حوضه بود. آنها کاهش در مقادیر بارش طی ماه‌های April و May را از دلایل اصلی این امر معرفی کردند. Azizabadi Farahani and Khalili (2013) روندهای زمانی-مکانی و خصوصیات فصلی جریان کمینه هفت روزه در حوضه کرخه را مورد ارزیابی قرار دادند. برای این منظور داده‌های دبی متوسط روزانه ۱۲ ایستگاه آب‌سنجی با ۵۱ سال آمار (۲۰۰۸-۱۹۵۸) براساس آزمون من-کندال و آزمون Lepage مورد بررسی قرار گرفت. آنها بیان داشتند در محیط‌های نیمه خشک خصوصیات فصلی جریان کمینه در بین ایستگاه‌ها متفاوت بوده است و بنابراین باید روند مقادیر جریان کمینه در هر ایستگاه بطور جداگانه مورد بررسی قرار گیرد.

حوضه دریاچه نمک با دربرداشتن کلان‌شهر تهران و تمرکزگرایی برنامه‌های توسعه، بیش‌ترین تمرکز جمعیتی و فعالیت‌های صنعتی را در بین حوضه‌های کشور دارا می‌باشد. رشد سریع جمعیت، صنعت و کشاورزی طی دهه‌های اخیر در این ناحیه سبب افزایش تقاضا برای آب گردیده بطوری که پروژه‌های عظیمی جهت کنترل، ذخیره‌سازی و بهره‌برداری از آب‌های سطحی و همچنین برداشت از آب‌های زیرزمینی در دستور کار قرار گرفته است. محدود بودن منابع در مقابل تقاضای رو به رشد آب، سبب فشار و برداشت بی‌رویه از آبخوان‌های حوضه گردیده است و تخریب کمی و کیفی آنها را به دنبال داشته است (Yekom Consulting Engineers, 2012a). با توجه به اهمیت استراتژیکی این حوضه به دلیل قرارگیری کلان‌شهر تهران و تمرکز قطب‌های صنعتی و کشاورزی، بررسی تغییرات مقادیر جریان کمینه رودخانه‌های این حوضه طی چهار دهه اخیر می‌تواند منعکس‌کننده اثرات تغییرات اقلیمی و همچنین پیامدهای ناشی از دخالت‌های انسانی بر سیستم هیدرولوژیکی این حوضه باشد. علی‌رغم وجود مطالعات گسترده در زمینه تغییرات زمانی-مکانی مقادیر جریان کمینه، در ایران مطالعات انجام شده در این زمینه بسیار محدود بوده بطوری که دانش و شناخت کافی از ماهیت این پدیده در تمام نقاط کشور بویژه مناطق خشک و نیمه خشک در دسترس نمی‌باشد. از سوی دیگر مرور پژوهش‌های صورت گرفته در کشور نشان می‌دهد که بررسی روند زمانی-مکانی مقادیر فصلی جریان کمینه کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. تمرکز اصلی مقاله حاضر، دستیابی به اهداف زیر می‌باشد: (۱) بررسی تغییرات درون-سالی جریان در مناطق خشک و نیمه خشک، (۲) بررسی وجود خودهمبستگی در سری‌های زمانی براساس توابع خودهمبستگی و آماره لیونگ باکس، (۳) ارزیابی تغییرات بلندمدت زمانی-مکانی شاخص‌های فصلی منحنی تداوم جریان با

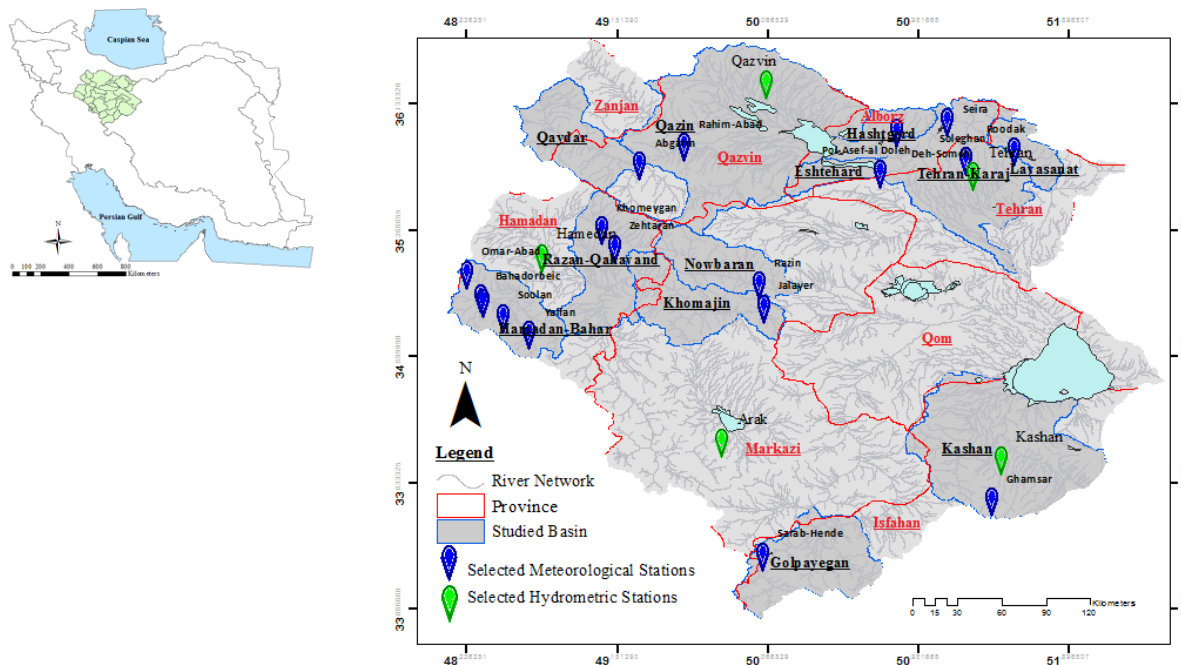


Fig. 1- Location of study region and distribution of selected hydrometric and meteorological stations

شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و پراکنش ایستگاه‌های آب‌سنجی و هواشناسی منتخب

۲-۳- روش انجام کار

۲-۳-۱- حافظه بلندمدت در سری زمانی

وجود حافظه بلندمدت در سری زمانی، برای نخستین بار در علم هیدرولوژی و توسط Hurst بیان گردید (Hurst, 1951). هرست زمانی که بر روی پروژه تعیین ابعاد بهینه سد بر روی رود نیل کار می‌کرد، پی برد سری زمانی طولانی مدت جریان ورودی، از فرآیند تصادفی تبعیت نکرده و شامل چرخه‌های نامتناوبی می‌باشد. کاربرد توان هرست یا ضریب هرست در سایر سری‌های زمانی که در ظاهر تصادفی بوده ولی از الگوهای منظم دوره‌ای برخوردار هستند، به سرعت بسط داده شد. روش‌های متعددی جهت محاسبه توان هرست وجود دارد، آماره دامنه تجدید مقیاس شده^۳ یا R/S با برآورد متغیر خودتشابهی H که معرف شدت وابستگی طولانی مدت در سری زمانی می‌باشد، امکان ارزیابی وجود حافظه بلندمدت در سری زمانی را فراهم می‌سازد.

چنانچه $X = X_1, X_2, \dots, X_n$ یک سری زمانی باشد؛ نخست مقیاس داده‌ها به شکل زیر تغییر یافته و داده‌ها نرمال می‌گردند:

$$Z_r = (X_r - X_m) \quad r = 1, \dots, n \quad (1)$$

که X_m میانگین سری زمانی است. در ادامه سری زمانی جدیدی به شکل زیر ساخته می‌شود:

$$Y_r = (Z_1 - Z_r) \quad r = 2, \dots, n \quad (2)$$

اجرا و تعداد پنج سد مخزنی شامل امیرکبیر، لتیان، گلپایگان، اکباتان، ساوه و ۱۵ خرداد با مجموع ظرفیت حجم مفید بالغ بر ۸۰۰ میلیون مترمکعب مورد بهره‌برداری قرار گرفته است (Yekom Consulting Engineers, 2012a).

به منظور بررسی مقادیر شاخص‌های فصلی منحنی تداوم جریان، مقادیر دبی متوسط روزانه جریان ایستگاه‌های آب‌سنجی واقع در سطح حوضه دریاچه نمک، از شرکت مدیریت منابع آب ایران (تماب) اخذ گردید و از ایستگاه‌هایی با طول آماری محدود، نواقص آماری بالا و یا واقع در پایین‌دست سدها که فاقد جریان طبیعی و دارای جریان تنظیمی بودند، صرف نظر گردید. در نهایت تعداد ۱۸ ایستگاه آب‌سنجی با حداکثر طول دوره آماری ۴۳ سال (۱۹۷۰-۲۰۱۲) در امتداد رودخانه‌های اصلی انتخاب گردیدند. علاوه بر این مجموعه اطلاعات اقلیمی متعلق به ایستگاه‌های سینوپتیک موجود در سطح حوضه از سازمان هواشناسی کشور طی دوره آماری مطالعاتی گردآوری گردید. اطلاعات بیش‌تر در مورد ایستگاه‌های آب‌سنجی منتخب در جدول ۱ ارائه شده است.

Table 1- Selected hydrometric gauging in Namak Lake basin with their characteristics

جدول ۱- ایستگاه‌های آب‌سنجی منتخب در حوضه آبریز دریاچه نمک به همراه مشخصات آنها

Station	Code	River	Studied Basin	Elevation (m)	Drainage Area (Km ²)	Latitude (N)	Longitude (E)
Ghamsar	41005	Bon-Rood	Kashan	1980	68	33°-44′	51°-25′
Sarab-Hende	41009	Golpayegan	Golpayegan	1980	816	33°-23′	50°-02′
Yalfan	41035	Abshineh	Hamadan	1980	165	34°-44′	48°-37′
Soolan	41041	Mariyanj	Hamadan	2080	37	34°-50′	48°-27′
Saleh-Abad	41043	Saleh-Abad	Hamadan	1770	180	34°-55′	48°-20′
Bahadorbeic	41045	Bahadorbeic	Hamadan	1780	200	34°-57′	48°-19′
Khomeygan	41049	Khomeygan	Razan	1780	225	35°-23′	49°-03′
Zehtaran	41051	Zehtaran	Razan	1760	372	35°-15′	49°-08′
Omar-Abad	41053	Qara-Chai	Hamedan	1570	14277	35°-06′	49°-15′
Jalayer	41055	Qara-Chai	Khomajin	1175	17236	34°-53′	50°-01′
Razin	41059	Mazlaghan	Nowbaran	1290	2174	35°-02′	50°-01′
Abgarm	41067	Khar-Rood	Qaydar	1623	2472	35°-45′	49°-18′
Rahim_Abad	41071	Khar-Rood	Qazvin	1400	4051	35°-52′	49°-33′
Deh-Someh	41095	Kordan	Hashtgerd	1438	360	35°-57′	50°-50′
Pol-Asef-al Doleh	41099	Shoor	Eshtehard	1131	17100	35°-41′	50°-45′
Siera	41101	Karaj	Karaj-Tehran	1831	730	36°-02′	51°-09′
Soleghan	41109	Kan	Karaj-Tehran	1430	200	35°-47′	51°-16′
Roodak	41117	Jajrood	Lavasanat	1714	762	35°-51′	51°-33′

۲-۳-۲- تحلیل روند

به منظور بررسی و شناسایی هر گونه روند افزایشی یا کاهش‌ی در سری‌های زمانی طولانی مدت هیدرو-اقلیمی، روش‌های متعددی توسعه یافته‌اند. این روش‌ها به دو دسته کلی آزمون‌های پارامتری و آزمون‌های ناپارامتری طبقه‌بندی می‌گردند. مهم‌ترین ویژگی آزمون‌های پارامتری سادگی آنهاست. ایستایی، استقلال و نرمال بودن داده‌ها از جمله فرضیات حاکم بر این روش‌ها می‌باشد. در مقابل آزمون‌های ناپارامتری، توزیع خاصی را برای داده‌ها فرض نکرده و برای داده‌هایی با توزیع غیرنرمال و داده مفقود مناسب ارزیابی شده‌اند. آزمون‌های ناپارامتری در قیاس با آزمون‌های پارامتری به مقادیر حدی حساسیت کمتری نشان می‌دهند و امکان بکارگیری آنها در سری‌های زمانی با روند خطی یا غیرخطی وجود دارد (Khalili et al., 2016; Tabari and Hosseinzadeh Talaei, 2011). مقادیر حدی جریان فاقد توزیع نرمال بوده و اغلب دارای چولگی هستند، از این رو بکارگیری روش‌های ناپارامتری توصیه می‌گردد. در این پژوهش از آزمون‌های ناپارامتری من-کندال (MK)، من-کندال اصلاح شده (MMK) و برآوردگر شیب سن (SSE) جهت شناسایی روند زمانی در مقادیر شاخص‌های فصلی جریان کمیته استفاده شد.

۱) روش من-کندال (MK): یکی از شناخته شده‌ترین آزمون‌های ناپارامتری، آزمون من-کندال ارائه شده توسط Mann (1945) و Kendall (1975) است که به منظور بررسی روند خطی در سری‌های

از آنجا که میانگین Z صفر است، آخرین مقدار Y، یعنی Y_n ، همیشه صفر خواهد بود. در نهایت دامنه تعدیل شده برابر با رابطه (۳) خواهد بود:

$$R_n = \max(Y_1, \dots, Y_n) - \min(Y_1, \dots, Y_n) \quad (3)$$

همواره میانگین Y صفر است، بنابراین حداکثر مقادیر آن بزرگ‌تر یا مساوی صفر و حداقل مقادیر آن کوچک‌تر یا مساوی صفر خواهد بود. در نتیجه دامنه تعدیل شده (R_n) همیشه مقدار مثبتی خواهد بود. هرست در نهایت رابطه زیر را ارائه نمود:

$$\left(\frac{R}{S}\right)_n = a \cdot n^H \quad (4)$$

که در آن، R دامنه تجدید مقیاس شده، S انحراف معیار سری زمانی، a عدد ثابت، n تعداد مشاهدات و H نمای هرست می‌باشد. همچنین می‌توان نوشت:

$$\log\left(\frac{R}{S}\right)_n = \log a + H \log(n) \quad (5)$$

H را توان هرست نیز می‌نامند. توان هرست، همانندی دو پیشامد پیاپی را نشان می‌دهد. توان هرست به کمک محاسبه شیب منحنی $\log(R/S) / \log(n)$ و با استفاده از روش رگرسیون در حوضه تغییرات N به دست می‌آید. بیش‌ترین مقدار به دست آمده، نمایانگر میانگین دوره گردش متناوب الگو است. چنانچه توان هرست بین ۰/۵ و ۱ قرار گیرد، دلالت بر یک سری زمانی دوام‌دار^۴ با حافظه بلندمدت دارد و در نهایت اگر توان هرست برابر با مقداری مثبت ولی کمتر از ۰/۵ باشد، دلالت بر یک فرآیند مستقل^۵ دارد.

۳-۳- وجود حافظه بلندمدت در مقایسه FDCSI

به منظور تبیین توان هرست شاخص‌های فصلی جریان کمینه از تحلیل R/S استفاده شد. R/S شاخص غیرخطی مؤثر به منظور بررسی و شناسایی سری‌های زمانی تصادفی است که بر پایه نتایج آن می‌توان به وجود اثر حافظه بلندمدت در سری‌های زمانی نیز پی برد. عدم وابستگی به توزیع سری زمانی از ویژگی‌های برجسته این روش محسوب می‌گردد. شکل ۴، از قرارگیری مقادیر لگاریتم گام زمانی در برابر لگاریتم انحراف معیار سری‌های زمانی بدست آمده است. در این نمودار، شیب خط برازش برابر با توان یا ضریب هرست (H) بوده و خطی بودن مقادیر لگاریتم این دو متغیر نشان‌دهنده سری تصادفی با حافظه بلند مدت است. طبق تعریف $0.5 < H < 1$ دلالت بر فرآیند مستقل یا سری زمانی غیرمتداوم^۱ دارد و $0.5 < H < 1$ نشان‌دهنده سری زمانی متداوم^۲ با حافظه بلندمدت است. نتایج توان هرست براساس شاخص‌های فصلی Q_{90} و Q_{99} در شکل ۵، ارائه شده است. نتایج کسب شده از شاخص هرست براساس هر یک از شاخص‌های فصلی متفاوت و از سوی دیگر در هر یک از ایستگاه‌های منتخب تغییرات زیادی داشت. بطوری‌که دامنه تغییرات توان هرست، نوسانات شدیدی بین ۰/۹۹-۰/۰۳ در بین مقادیر FDCSI نشان داد. از سوی دیگر در برخی از ایستگاه‌ها، عدد قابل قبولی برآورد نگردید.

۳-۴- بررسی تغییرات زمانی-مکانی FDCSI

۳-۴-۱- بررسی وجود خودهمبستگی

پیش از انجام آزمون‌های شناسایی روند، وجود خودهمبستگی پیاپی در داده‌ها با استفاده از توابع ACF و PACF و همچنین آزمون لیونگ باکس مورد بررسی قرار گرفت. ACF از نسبت کواریانس بر انحراف معیار بدست می‌آید که مقادیر آن بین -۱ و +۱ می‌باشد و بیانگر ضرائب همبستگی بین مقادیر جاری و گذشته در یک سری زمانی است. PACF بیانگر همبستگی بین مشاهدات k دوره پیشین و مشاهدات دوره جاری است که در آن اثر مشاهدات بین دوره t و t-k حذف شده باشد. نمایش بصری توابع خودهمبستگی در گام‌های مختلف یکی از روش‌های محبوب در میان هیدرولوژیست‌ها جهت بررسی همبستگی پیاپی است. چنانچه خودهمبستگی‌ها در تمام گام‌های زمانی نزدیک به صفر باشند بیان می‌گردد سری زمانی فاقد همبستگی پیاپی است. اما تشخیص خودهمبستگی براساس نمودارها همواره قابل اعتماد نیست. در این مطالعه، علاوه بر توابع خودهمبستگی از نتایج Ljung-Box test استفاده شد. شکل ۶ بیان‌کننده توابع ACF و PACF و آماره لیونگ باکس مربوط به شاخص Q_{99} در ایستگاه عمرآباد با استفاده از نرم‌افزار EViews نسخه ۷، می‌باشد. در شکل ۶ خطوط نقطه‌چین بیان‌کننده مرز

هیدروگراف مشابه نمودار (ب) شکل ۲، نشان‌دهنده رژیم برفی-بارانی رودخانه می‌باشد. در این صورت، سهم مهمی از حجم جریان ناشی از ریزش‌های برف بوده که طی فصل ذوب (اواسط بهمن تا اواخر اردیبهشت) باعث افزایش آبدهی رودخانه‌ها یا با تأخیر از طریق چشمه‌ها باعث افزایش دبی پایه و تداوم آن می‌گردند.

بر اساس هیدروگراف‌های مشاهداتی و رژیم بارشی، فصل بهار پرآب‌ترین و فصل تابستان و پاییز کم‌آب‌ترین فصول از نظر آبدهی تبیین گردید و دوره‌های پرآبی و کم آبی ایستگاه‌های مورد بررسی به ترتیب به دو دوره شش ماهه آذر تا اردیبهشت و خرداد تا آبان تفکیک شد. لازم به ذکر است بیش‌ترین احتمال وقوع سیلاب‌های بزرگ در حوضه، مربوط به ماه‌های آذر تا فروردین بوده که منطبق بر دوره پرآبی تعیین شده می‌باشد. بررسی رژیم رودخانه‌ها نشان داد، تغییرات درون-سالی رژیم هیدرولوژیکی رودخانه‌ها با رژیم بارشی حوضه هماهنگ است. شکل ۳، نمودار جعبه‌ای بارش ماهانه ایستگاه‌های سینوپتیک طی دوره آماری منتخب در محدوده مورد مطالعه را ارائه می‌کند. بارش‌ها از آبان ماه شروع و تا اردیبهشت ماه خاتمه می‌یابد و اسفند و شهریور ماه به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین مقادیر بارش را به خود اختصاص داده‌اند. در همین راستا، فصل تابستان با سهمی کم‌تر از دو درصد در تمام ایستگاه‌ها، خشک‌ترین فصل سال، زمستان و بهار مرطوب‌ترین فصول سال محسوب می‌گردند. جدول ۲، تغییرات سالانه و فصلی متغیرهای اقلیمی ایستگاه‌های هواشناسی منتخب در سطح حوضه دریاچه نمک را ارائه می‌کند.

۳-۲- شاخص‌های فصلی منحنی تداوم جریان

Smakhtin (2001) محدوده‌ای از منحنی FDC بین ۷۰-۹۹ درصد یا Q_{70} - Q_{99} را بعنوان معرف جریان کمینه اعلام نمود که در اکثر مطالعات مربوط به جریان‌های کمینه در سراسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مطالعه جهت تعیین شاخص‌های جریان کمینه بر اساس FDC، اقدام به استخراج مقادیر شاخص فصلی منحنی تداوم جریان (FDCSI)^۸ بر پایه فصول پرآبی (جریان زمستانه) و کم آبی (جریان تابستانه) گردید. برای این منظور مقادیر Q_{70} ، Q_{80} ، Q_{90} و Q_{99} برای هر یک از دوره‌های فصلی برآورد و مقادیر شاخص‌های فصلی مستخرج مرتبط با دوره‌های پرآبی و کم آبی به ترتیب به دبی فصلی زمستانه یا Q_w و دبی فصلی تابستانه یا Q_s نامگذاری گردید. ویژگی‌های آماری شاخص‌های مستخرج در جدول ۳، آورده شده است.

باشد، ضرایب خودهمبستگی معنی‌دار هستند. براساس این شکل، وجود خودهمبستگی مثبت معنی‌دار در برخی از تأخیرها قابل مشاهده بوده و نشان می‌دهد مقادیر شاخص Q_{S80} در هر سال با مقادیر سال‌های قبل وابستگی پیاپی دارد.

معنی‌دار بودن ضرایب خودهمبستگی است. ستون اول، تعداد تأخیر، ستون دوم وضعیت معنی‌دار بودن هر یک از ضرایب ACF و ستون سوم معنی‌دار بودن ضرایب PACF را نشان می‌دهد. ستون Q-stat معیار لیونک باکس و ستون آخر مقادیر احتمال این معیار را ارائه می‌کند. هرگاه مقدار احتمال در این ستون برابر یا کوچکتر از 0.05 می‌کند.

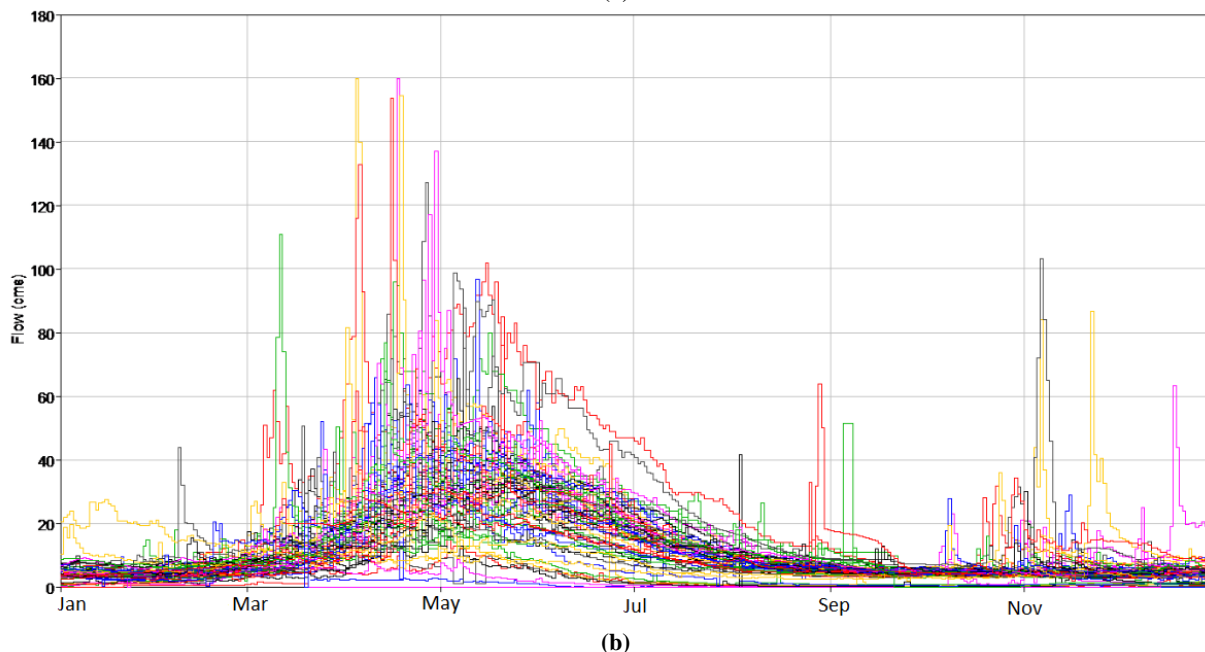
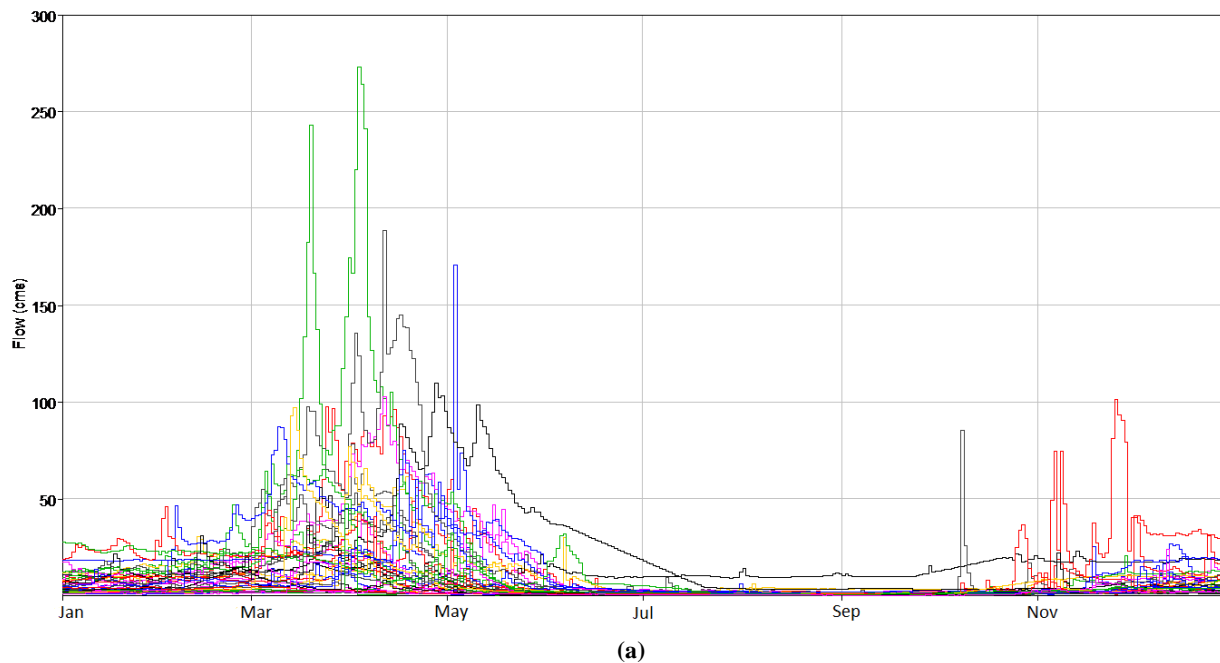


Fig. 2- Monthly hydrographs of selected stations a) Jalayer, b) Seira
 شکل ۲- نمودار هیدروگراف‌های ماهانه در ایستگاه‌های الف) جلایر و ب) سیرا

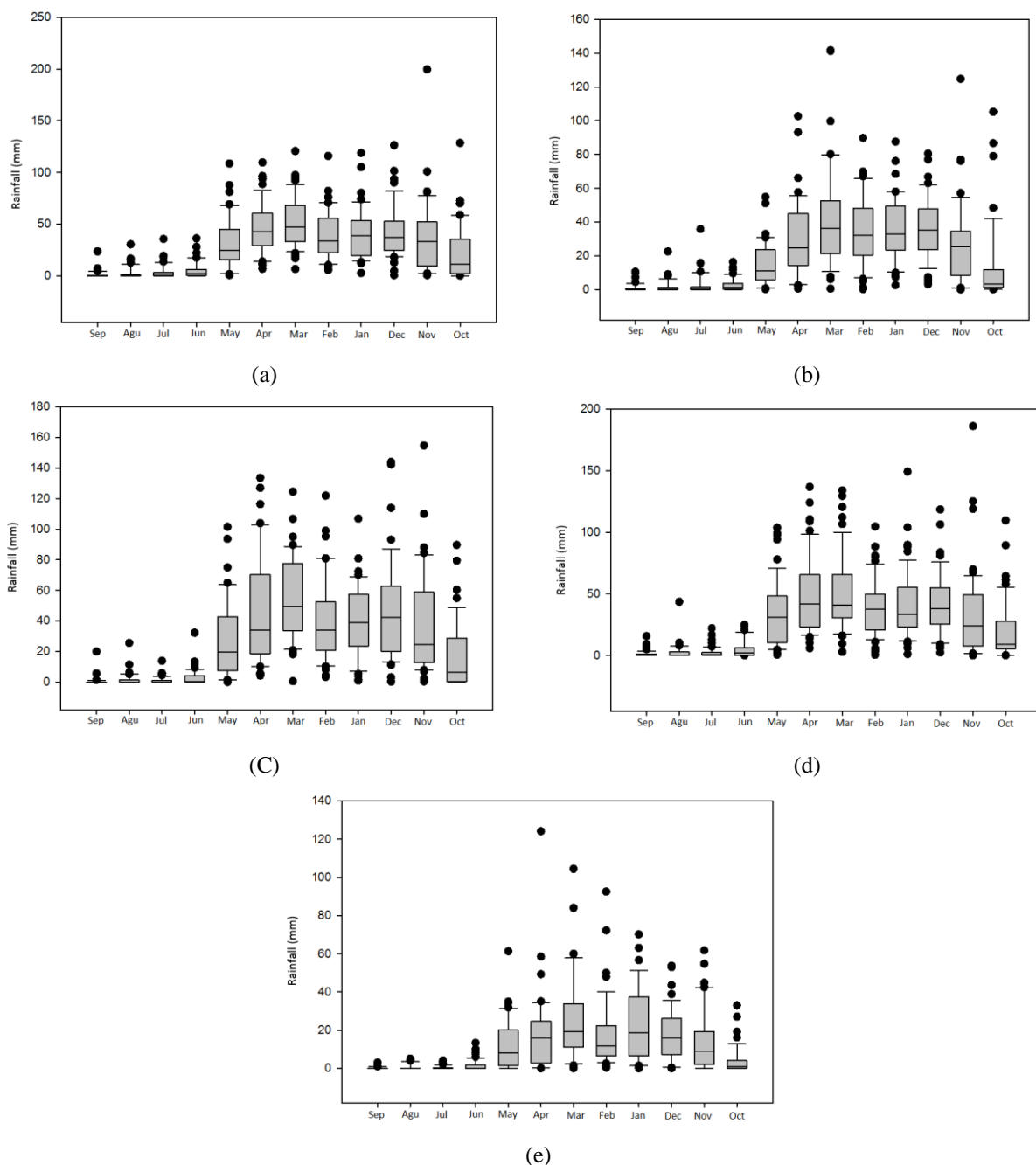


Fig. 3- Box-plots of monthly rainfall amounts in selected meteorological stations during 1970-2012 in Namak Lake Basin (a) Hamadan, (b) Mehr-Abad, (c) Arak, (d) Qazvin, (e) Kashan station

شکل ۳- نمودارهای جعبه‌ای مقادیر بارش ماهانه ایستگاه‌های هواشناسی منتخب طی دوره آماری ۱۹۷۰-۲۰۱۲ در سطح حوضه دریاچه نمک الف) ایستگاه همدان، ب) ایستگاه مهرآباد، ج) ایستگاه اراک، د) ایستگاه قزوین، ذ) ایستگاه کاشان

۳-۴-۲- تحلیل روند زمانی-مکانی

به منظور حذف اثر خودهمبستگی بر روی نتایج روند، علاوه بر روش MK از روش MMK نیز استفاده شد. نتایج مربوط به آزمون‌های شناسایی روند در جدول ۴، ارائه شده است.

بایستی به این نکته توجه داشت که خودهمبستگی منفی در واقعیت هیچ مفهوم فیزیکی نداشته و ممکن است در برآوردها دیده شود. خودهمبستگی منفی مشاهده شده می‌تواند مرتبط با فاکتورهای شناخته شده یا شناخته نشده نظیر خطاهای اندازه‌گیری باشد (Ehsanzadeh and Adamowski, 2010).

Table 2- Annual and seasonal climatic parameters in selected meteorological stations in Namak Lake Basin
 جدول ۲- متغیرهای اقلیمی سالانه و فصلی ایستگاه‌های هواشناسی منتخب در سطح حوضه دریاچه نمک (Yekom Consulting Engineers, 2012b)

Climatic Parameter		Mehr_Abad	Kashan	Hamadan	Qazvin	Arak
*ETP (mm)	Summer	683.60	451.10	656.90	608.60	534.50
	Spring	649.40	454.20	515.90	513.00	486.80
	Winter	200.00	144.10	145.90	151.80	146.70
	Fall	221.40	124.80	189.60	172.80	163.20
	Annual	1754.40	1174.20	1508.30	1446.20	1331.20
P (mm)	Summer	4.82	1.09	7.00	4.51	3.13
	Spring	49.30	29.23	87.13	84.11	81.41
	Winter	116.51	70.83	140.45	136.24	152.25
	Fall	74.23	33.89	97.40	101.44	98.82
	Annual	244.86	135.04	331.98	326.30	335.61
T _{mean} (°C)	Summer	28.29	30.33	22.20	24.74	25.14
	Spring	21.98	24.55	15.42	18.31	18.47
	Winter	6.47	8.18	-0.72	3.55	2.75
	Fall	11.91	13.05	5.92	9.28	8.83
	Annual	17.17	19.03	10.71	13.97	13.80

Based on Penman-Monteith method *

Table 3- Statistical characterizes of FDCSI values during summer and winter seasons
 جدول ۳- خصوصیات آماری مقادیر FDCSI طی فصل‌های تابستان و زمستان

Flow Index	Min (m ³ /s)	Max (m ³ /s)	Mean (m ³ /s)	Kurtosis	Skewness	CV	SD
Winter	Q _{w70}	0	19.20	2.05	9.09	2.59	2.80
	Q _{w80}	0	17.55	1.54	9.77	2.55	2.09
	Q _{w90}	0	10.48	1.08	7.57	2.38	1.57
	Q _{w95}	0	10.07	0.88	8.87	2.57	1.38
	Q _{w99}	0	9.37	0.71	9.25	2.65	1.21
Summer	Q _{s70}	0	9.79	0.67	10.04	3.04	1.44
	Q _{s80}	0	9.65	0.61	10.87	3.11	1.34
	Q _{s90}	0	9.58	0.55	12.61	3.26	1.25
	Q _{s95}	0	9.57	0.52	14.00	3.38	1.20
	Q _{s99}	0	9.57	0.49	15.37	3.49	1.16

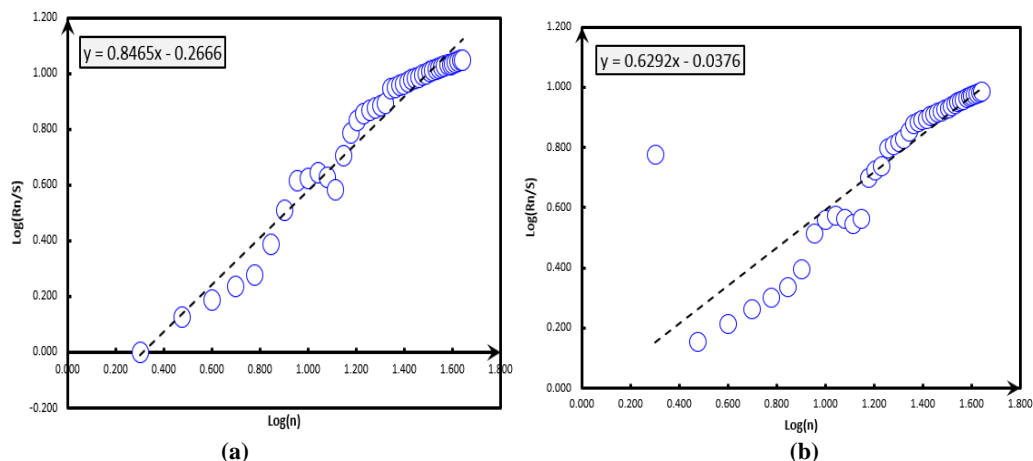


Fig. 4- Logarithm of standard deviation of aggregated time series (Log (R_n/S)) versus logarithm of time step (Log (n)) in Yalfan station based on (a) Q_{s70}, (b) Q_{s95} indexes

شکل ۴- لگاریتم انحراف معیار سری زمانی تجمیع شده (Log (R_n/S)) در برابر لگاریتم گام زمانی (Log (n)) در ایستگاه یالفان براساس الف) شاخص Q_{s70} و ب) شاخص Q_{s95}

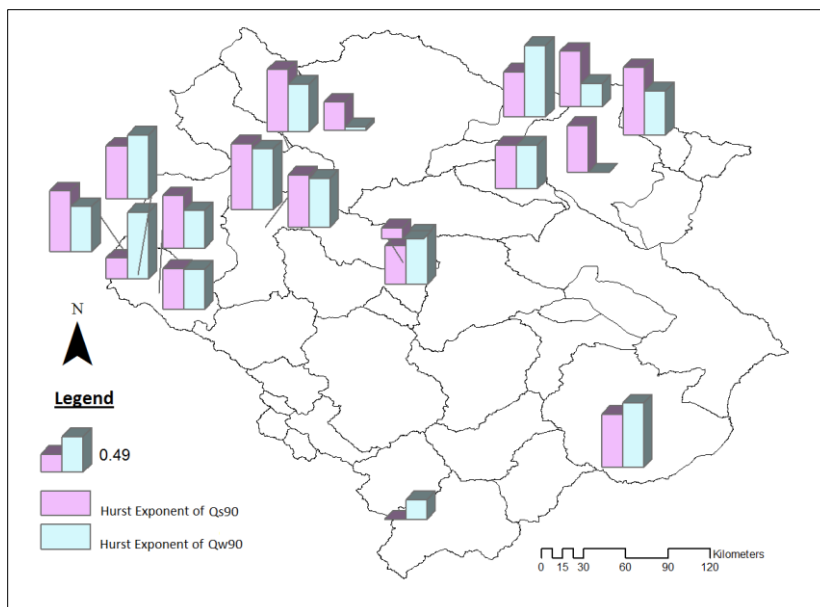


Fig. 5- Results of Hurst exponent based on seasonal indexes Q_{w90} and Q_{s90} in Namak Lake basin

شکل ۵- نتایج توان هرست براساس شاخص‌های فصلی Q_{s90} و Q_{w90} در سطح حوضه دریاچه نمک

ACF		PACF		ACF	PACF	Q-Stat	Prob	
	█		█	1	0.599	0.599	16.537	0.000
	█		█	2	0.568	0.326	31.773	0.000
	█		█	3	0.570	0.254	47.512	0.000
	█		█	4	0.274	-0.351	51.239	0.000
	█		█	5	0.204	-0.168	53.355	0.000
	█		█	6	0.108	-0.088	53.966	0.000
	█		█	7	0.026	0.153	54.002	0.000
	█		█	8	0.026	0.137	54.039	0.000
	█		█	9	0.020	0.089	54.063	0.000
	█		█	10	-0.027	-0.170	54.106	0.000
	█		█	11	0.000	-0.097	54.106	0.000
	█		█	12	-0.030	-0.093	54.164	0.000
	█		█	13	-0.052	0.074	54.335	0.000
	█		█	14	-0.040	0.081	54.440	0.000
	█		█	15	-0.068	0.036	54.757	0.000
	█		█	16	-0.074	-0.086	55.145	0.000
	█		█	17	-0.079	-0.112	55.612	0.000
	█		█	18	-0.089	-0.056	56.222	0.000
	█		█	19	-0.102	0.015	57.063	0.000
	█		█	20	-0.119	0.014	58.254	0.000

Fig. 6- Values of ACF, PACF and Ljung-Box statistic (output of EViews software)

شکل ۶- مقادیر ACF، PACF و آماره لیونگ باکس (خروجی نرم‌افزار EViews)

علاوه‌براین یافته‌ها نشان داد، روند کاهشی شناسایی شده طی جریان کمینه تابستانه از شدت بالاتری برخوردار است؛ بطوری‌که براساس روش MMK طی جریان تابستانه، ۹۰-۷۲ درصد از کل روندهای معنی‌دار شده را روندهای کاهشی در سطح احتمال یک درصد تشکیل می‌دهند.

براساس جدول ۴، روش SSE نسبت به دو روش من-کندال، بیش‌ترین تعداد روندهای معنی‌دار شناسایی شده در سطح احتمال پنج درصد را دارا می‌باشد. هر سه روش MMK، MK و SSE، روند غالب کاهشی در مقادیر جریان‌های کمینه فصلی در سطح حوضه دریاچه نمک را نشان دادند که در این میان، سهم جریان تابستانه از روند کاهشی مشاهده شده نسبت به جریان زمستانه بیش‌تر تبیین گردید.

Table 4- Percent of stations with identified significant (increasing or decreasing) trend based on MK, MMK and SSE methods

جدول ۴- درصد ایستگاه‌ها با روند معنی‌دار شناسایی شده (افزایشی یا کاهش) براساس روش‌های MK، MMK و SSE

Flow Index	SSE		MMK		MK		
	Increasing (%)	Decreasing (%)	Increasing (%)	Decreasing (%)	Increasing (%)	Decreasing (%)	
Winter Flow	Q _{w70}	16.66	72.22	5.55	50	5.55	55.55
	Q _{w80}	11.11	66.66	5.55	44.44	0	44.44
	Q _{w90}	11.11	72.22	0	50	0	44.44
	Q _{w95}	16.66	61.11	5.55	44.44	0	44.44
	Q _{w99}	16.66	61.11	11.11	38.88	0	44.44
Summer Flow	Q _{s70}	16.66	77.77	5.55	66.66	5.55	61.11
	Q _{s80}	11.11	72.22	11.11	55.55	5.55	66.66
	Q _{s90}	16.66	72.22	5.55	55.55	5.55	61.11
	Q _{s95}	11.11	72.22	5.55	55.55	5.55	66.66
	Q _{s99}	11.11	66.66	5.55	50	5.55	66.66

شرقی حوضه، ایستگاه بن‌رود واقع در زیرحوضه کاشان، روند کاهش معنی‌دار شدیدی بویژه براساس شاخص‌های فصلی تابستانه نشان داد. در این ایستگاه بجز دو شاخص Q_{w95} و Q_{w99} در سایر شاخص‌های فصلی، روند کاهش در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شده بود.

۳-۵- تحلیل نتایج

فقدان و یا کمبود اطلاعات هیدرولوژیکی جمع‌آوری شده در مناطق خشک و نیمه خشک، یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های پیش‌روی محققین به منظور دستیابی به شناخت و درک کامل ماهیت و رفتار هیدرولوژیکی این مناطق می‌باشد. در این پژوهش سعی گردید علی‌رغم کمبود اطلاعات بلندمدت، مطالعه جامعی بر روی رفتار جریان کمینه طی چهار دهه در حوضه دریاچه نمک صورت پذیرد. طبق مطالعات موجود، در اقلیم‌های شدیداً فصلی، مقادیر جریان کمینه طی فصول مختلف (تابستان و زمستان) تحت تأثیر فرآیندهای فیزیکی متفاوتی تولید می‌گردد، از این رو در پژوهش حاضر به بررسی رفتار فصلی بلند مدت مقادیر جریان کمینه پرداخته شد. بررسی تغییرات زمانی-مکانی مقادیر شاخص‌های فصلی جریان کمینه طی چهار دهه نشان داد، جریان در اغلب بخش‌های این حوضه رفتار فصلی داشته و طی فصول مختلف رفتارهای متمایزی نشان می‌دهد که نمایانگر حاکمیت شرایط متفاوت طی زمان است. از سوی دیگر تفاوت در نتایج کسب شده طی هر فصل می‌تواند نشان‌دهنده تفاوت در منشأ دبی پایه این رودخانه‌ها باشد. در واقع، اگرچه امکان وقوع جریان کمینه در تمام طول سال در نتیجه تداوم خشکی طولانی مدت و عدم تأمین آب ورودی وجود دارد؛ اما مقادیر آن طی فصل تابستان (تداوم دوره خشک اقلیمی) منعکس‌کننده‌ی جریان پایه‌ای است که در نتیجه تخلیه از آب‌های زیرزمینی و یا سایر مخازن رطوبتی در حوضه و همچنین در

به منظور بررسی توزیع مکانی روند مقادیر جریان فصلی، مقادیر روندهای کاهش یا افزایشی هر ایستگاه بر روی نقشه ترسیم گردید. شکل‌های ۷ و ۸، به ترتیب پراکنش مکانی نتایج روند زمانی شاخص‌های فصلی جریان کمینه تابستانه و زمستانه را براساس روش MMK طی چهار دهه در سطح حوضه دریاچه نمک ارائه می‌کنند. براساس شکل‌های مذکور، روند کاهش محسوس شاخص‌های فصلی جریان کمینه در تمام بخش‌های مورد بررسی بجز محدوده شمال شرقی حوضه مشهود می‌باشد.

بخش شمال شرقی حوضه، براساس هر دو گروه شاخص‌های فصلی زمستانه و تابستانه جریان کمینه، وضعیت مطلوبی را نشان دادند. بطوری‌که این مناطق فاقد روند کاهش معنی‌داری بوده و حتی تعدادی روند افزایشی معنی‌دار در این محدوده شناسایی گردید. در مقابل، تجمع ایستگاه‌ها با روند کاهش شدید بویژه براساس جریان فصلی تابستانه طی چهار دهه در بخش غربی حوضه، محدوده زیرحوضه‌های همدان-بهار، رزن-قهاوند مشاهده شد. ایستگاه جلایر واقع در زیرحوضه خماجین در بخش مرکزی حوضه و همچنین در محدوده شمالی حوضه، ایستگاه رحیم‌آباد واقع در زیرحوضه قزوین، روند کاهش معنی‌دار شدید (در سطح احتمال یک درصد) در هر دو گروه از شاخص‌های فصلی جریان کمینه نشان دادند.

ایستگاه سراب‌هنده واقع در محدوده گلپایگان بعنوان تنها ایستگاه معرف بخش جنوبی حوضه دریاچه نمک در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مقادیر شاخص‌های جریان تابستانه عدم معنی‌داری روند در این محدوده و در مقابل روند کاهش شدید در مقادیر شاخص‌های جریان زمستانه (معنی‌داری چهار شاخص از مجموع پنج شاخص در سطح احتمال یک درصد) را نشان داد. در بخش جنوب

با تأخیرهای یک یا چند ماهه دیده می‌شود، متفاوت است (Smakhtin, 2001).

اثر ذوب برف و یخچال‌ها با تأخیر تأمین می‌گردد و با مقادیر جریان کمینه که طی فصل زمستان بعلت تداوم درجه حرارت زیر صفر (یخبندان) و وقوع بارش به شکل برف و اغلب در اثر ریزش‌های جوئی

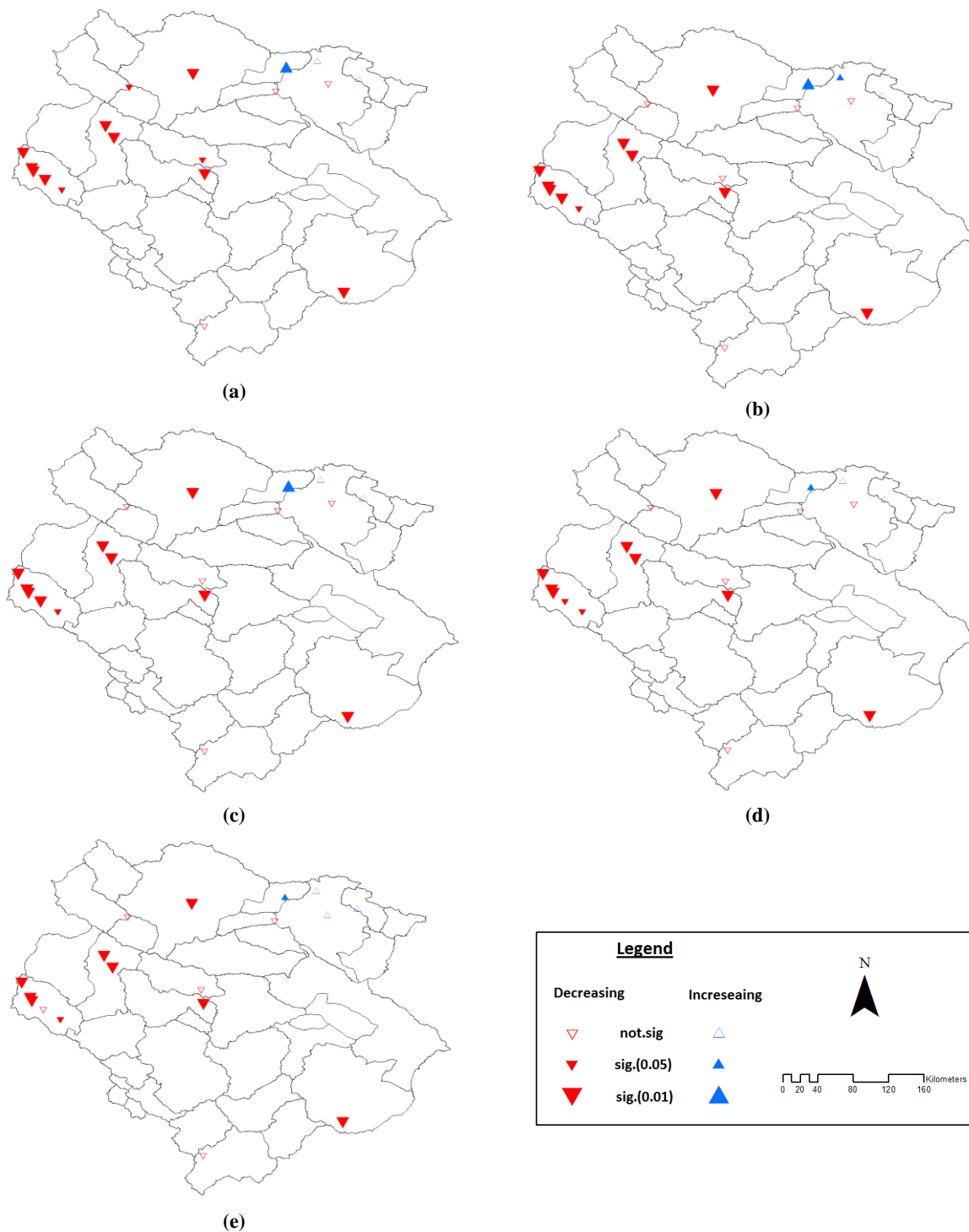


Fig. 7- Spatial changes of summer low flow indexes based on MMK method (a) Q₇₀, (b) Q₈₀, (c) Q₉₀, (d) Q₉₅, (e) Q₉₉
 شکل ۷- تغییرات مکانی مقادیر شاخص جریان کمینه تابستانه براساس روش MMK (الف Q₇₀، ب Q₈₀، ج Q₉₀، د Q₉₅ و ذ Q₉₉)

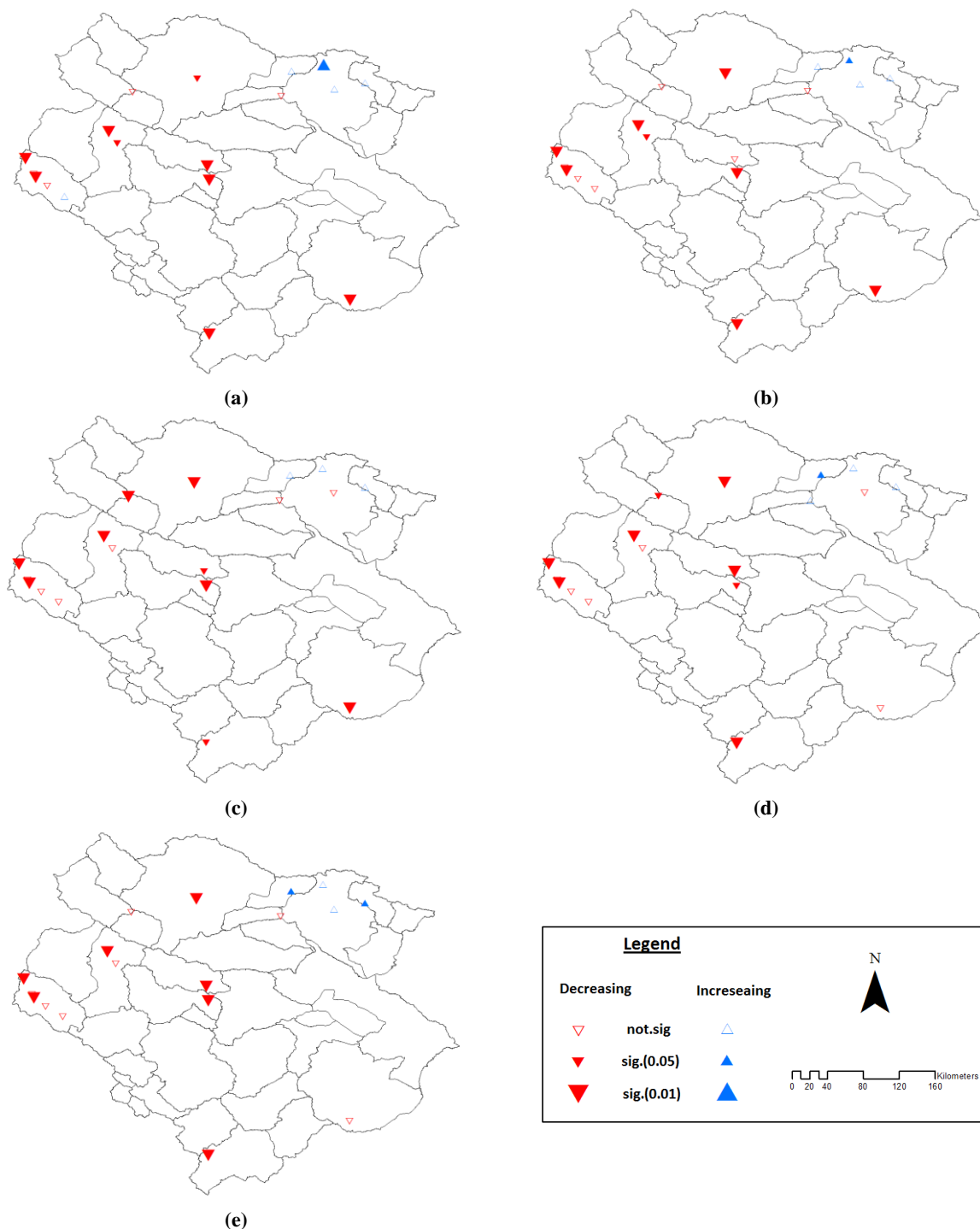


Fig. 8- Spatial changes of winter low flow indexes based on MMK method (a) Q₇₀, (b) Q₈₀, (c) Q₉₀, (d) Q₉₅, (e) Q₉₉
 شکل ۸- تغییرات مکانی مقادیر شاخص‌های جریان کمینه زمستانه براساس روش MMK (الف) Q₇₀، (ب) Q₈₀، (ج) Q₉₀، (د) Q₉₅ و Q₉₉ (ذ)

رودخانه‌ای در حوضه دریاچه نمک منعکس‌کننده الگوهای زمانی بارندگی است هر چند زمان پاسخ حوضه‌ها براساس شرایط حاکم بر آنها می‌تواند با تأخیرهای متفاوتی همراه باشد. طی این دو فصل بویژه

مشاهدات نشان داد در حوضه مورد مطالعه، بیش‌ترین فراوانی وقوع مقادیر جریان کمینه مربوط به فصل‌های تابستان و پاییز است که منطبق با رژیم بارشی حوضه می‌باشد. بطور کلی، الگوهای جریان

عمرآباد واقع در محدوده همدان-بهار معرف مناسبی از برداشت بیش از حد از جریان رودخانه جهت مصارف کشاورزی می‌باشد. حدود ۹۵ درصد از وسعت استان همدان واقع در محدوده حوضه دریاچه نمک را اراضی کشاورزی تشکیل می‌دهد و یکی از قطب‌های مهم کشاورزی در ایران محسوب می‌گردد. تغییر کاربری اراضی، افزایش سطح زیرکشت آبی، برداشت بیش از حد از منابع آب سطحی و زیرزمینی در این ناحیه جهت تأمین اهداف کشاورزی می‌تواند از دلایل اصلی افت سطح جریان کمینه فصلی باشد. حوضه دریاچه نمک در بخش کشاورزی از حوضه‌های فعال کشور محسوب می‌گردد، بدلیل کمبود آب طی سال‌های اخیر، رویکرد کشاورزان برداشت بیش از حد آبخوان‌ها بوده که با توجه به ظرفیت محدود این منابع تخریب کمی و کیفی آنها را در پی داشته است. (Abghari et al. (2013 در مطالعه‌ای به بررسی تغییرات جریان رودخانه‌های همدان طی چهار دهه اخیر پرداختند. نتایج آنها نشان داد، مقادیر دبی متوسط سالانه ایستگاه‌های عمرآباد، صالح‌آباد، زهتران و بهادریگ روند کاهشی معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد را طی این دوره تجربه کرده‌اند؛ درحالی‌که بارش سالانه روند غالبی طی این بازه نداشته و حتی گرایش کلی آن را رو به افزایش بیان گردید.

مقادیر جریان کمینه زمستانه نیز روند کاهشی معنی‌دار در اکثر بخش‌های حوضه نشان داد؛ به استثنای بخش شمال شرقی حوضه که فاقد روند کاهشی معنی‌دار بوده و روندهای افزایشی معنی‌دار در ایستگاه‌های ده‌صومعه، سیرا و رودک مشاهده گردید. روند کاهشی معنی‌دار طی فصل زمستان نسبت به تابستان از شدت کم‌تری برخوردار بوده؛ بطوری‌که روند کاهشی معنی‌دار شناسایی شده در ۳۸-۳۳ درصد از کل ایستگاه‌ها در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شده است. تفاوت در نتایج تحلیل روند در بین ایستگاه‌های مختلف و حتی در هر ایستگاه طی فصول مختلف نشان‌دهنده شرایط منحصر به فرد تولید جریان کمینه در بین ایستگاه‌ها و حتی فصول مختلف در هر ایستگاه است. (Azizabadi Farahani and Khalili (2013 تغییرات زمانی-مکانی مقادیر جریان کمینه هفت روزه در حوضه کرخه را مورد ارزیابی قرار دادند. برای این منظور ۱۲ ایستگاه آب‌سنجی با طول دوره آماری ۵۱ سال انتخاب و با استفاده از روش من-کندال به تحلیل روند پرداختند. روند کاهشی معنی‌دار در چهار ایستگاه شناسایی و دو ایستگاه واقع در نزدیکی خروجی حوضه با وجود تغییرات ناگهانی، روند معنی‌داری نشان ندادند. آنها بیان داشتند، تغییرات زمانی مقادیر جریان کمینه در میان ایستگاه‌ها ارتباطی نداشته و باید نتایج در هر ایستگاه مورد بررسی قرار گیرد.

تابستان، در نتیجه اثرات توأم بارش ناچیز همراه با تشعشعات ورودی و تبخیر-تعرق بالا، حداقل مقادیر جریان در شبکه رودخانه‌ای بویژه رودخانه‌های موقتی مشاهده می‌گردد (جدول ۲)؛ که در نتیجه منجر به تداوم دوره‌هایی با جریان صفر طی چندین روز و حتی طی چندین ماه می‌گردد.

نتایج توان هرست براساس مقادیر FDCSI، نشان از وجود حافظه بلندمدت در اکثر سری‌های زمانی داشت، هر چند اختلافات زیادی میان نتایج حاصل در هر ایستگاه و میان هر یک از شاخص‌ها مشاهده شد. وجود حافظه در سری زمانی، نمایانگر قابلیت پیش‌بینی رفتار پدیده مورد بررسی است و از این حیث دارای اهمیت است. هر چه مقادیر توان هرست به ۱ نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده وجود حافظه بلند مدت در سری‌زمانی بوده و امکان پیش‌بینی رفتار آن و انطباق با مدل‌های سری‌زمانی بیش‌تر وجود دارد. نتایج بررسی مقادیر توان هرست نشان داد، در میان ۳۸/۸ تا ۸۳/۳ درصد از ایستگاه‌ها مقادیر این آماره بیش از ۰/۵ است که Q_{w70} و Q_{w99} کم‌ترین و Q_{s99} بیش‌ترین درصد را به خود اختصاص داده‌اند. بنابراین به علت وجود تفاوت‌های مشاهده شده در نتایج و رفتارهای پیچیده متغیرها می‌توان بیان داشت با وجود مشاهده مقادیر بالایی از توان هرست، الگوی مشخص و یکنواختی از وجود حافظه بلندمدت در مقادیر FDCSI شناسایی نگردید. در مطالعه‌ای که (Ehsanzadeh and Adamowski (2010 بر روی مقادیر فصلی جریان کمینه هفت روزه در کانادا انجام دادند، به شواهدی مبنی بر وجود حافظه بلند مدت در سری‌های فصلی مورد بررسی دست یافتند. آنها بیان داشتند جریان کمینه زمستانه نسبت به جریان کمینه تابستانه مقادیر بیش‌تری از توان هرست (بیش‌تر از ۰/۹) را دارا می‌باشد.

مقایسه روندهای معنی‌دار طی فصل‌های تابستان و زمستان بر پایه روش MMK نشان داد، جریان تابستانه روند کاهشی شدیدتری نسبت به جریان زمستانه دارد. بطوری‌که روند کاهشی معنی‌دار جریان تابستانه براساس هر یک از شاخص‌های پنج‌گانه در ۵۵-۴۴ درصد از کل ایستگاه‌ها در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شده‌اند که نشان‌دهنده خشک‌سالی‌های شدید طی این دوره می‌باشد. از جمله دلایل اصلی این رخداد را می‌توان در دو عامل اقلیم و دخالت‌های انسانی خلاصه کرد. طی دوره جریان تابستانه (خرداد تا آبان) مقدار بارش کم‌ترین میزان را داشته و بدلیل افزایش درجه حرارت هوا و ساعات آفتابی، تبخیر-تعرق تسریع می‌یابد. از سوی دیگر برداشت آب به‌علت افزایش تقاضا برای کشاورزی طی این دوره، یکی از مهم‌ترین عوامل کاهنده جریان تابستانه به شمار می‌رود. وجود روند شدید طی جریان تابستانه در ایستگاه‌های یالفان، سولان، صالح‌آباد، بهادریگ و

وجود روندهای کاهشی معنی‌دار مشاهده شده در مقادیر جریان کمینه فصلی در اغلب بخش‌های حوضه می‌تواند نشان‌دهنده تغییر در الگوهای ریزش‌های جوی در سطح حوضه طی دهه‌های اخیر، همچنین اثر تغییر کاربری اراضی و برداشت بیش از حد از منابع آب سطحی و زیرزمینی جهت مصارف شرب، صنعت و کشاورزی بوده باشد؛ زیرا تغییرات جریان کمینه به خصوصیات حوضه (از قبیل وسعت، زمین‌شناسی، ارتفاع) و همچنین نیروهای محرک بیرونی (از قبیل نیروهای اقلیمی و اختلالات مستقیم انسانی) به شدت وابسته می‌باشد (Giuntoli et al., 2013). اظهار نظر دقیق در زمینه علل روند کاهشی مقادیر جریان کمینه، نیازمند مطالعه جامع بر روی پارامترهای مؤثر بر جریان کمینه و تغییرات تراز آبخوان‌های حوضه دریاچه نمک طی درازمدت می‌باشد.

۴- جمع‌بندی

مناطق خشک و نیمه خشک به محیط‌هایی با محدودیت منابع آبی شناخته می‌شوند که در حدود نیمی از وسعت جهان را به خود اختصاص داده‌اند. تغییر در میزان آب در دسترس در این محیط‌های حساس و شکننده می‌تواند پیامدهای جدی در پایداری آنها داشته باشد. در مطالعه حاضر، به منظور بررسی تغییرات درازمدت و وجود حافظه در سری‌های مقادیر جریان کمینه فصلی تابستانه و زمستانه، شاخص‌های حداقل فصلی براساس منحنی تداوم جریان طی دوره آماری ۱۹۷۰-۲۰۱۲ استخراج گردید و با استفاده از آزمون‌های ناپارامتری MMK، MK و SSE به بررسی روند تغییرات زمانی پرداخته شد. وجود حافظه بلندمدت در سری‌های مورد بررسی بر پایه‌ی توان هرست شناسایی گردید که می‌تواند در پیش‌بینی رفتار آتی FDCSI کمک کند. نتایج بدست آمده از آزمون‌های شناسایی روند، حاکی از وجود روند کاهشی محسوس در شاخص‌های فصلی بود. بطوری‌که شاخص‌های تابستانه روند کاهشی شدیدتری نسبت به جریان زمستانه نشان دادند. توزیع مکانی روند شناسایی شده نیز نشان داد؛ بجز بخش‌های شمال شرقی حوضه، در سایر بخش‌ها روند کاهشی، الگوی غالب بوده و از توزیع یکنواختی در این مناطق برخوردار است. بر پایه‌ی یافته‌های این پژوهش وجود روند کاهشی در مقادیر جریان کمینه در اکثر بخش‌های حوضه، نشان‌دهنده عدم تأمین دبی پایه رودخانه‌ها می‌باشد. تشدید مصرف و برداشت از آب‌های سطحی و زیرزمینی، تغذیه واداری در نتیجه افت سطح آبخوان‌ها و همچنین تغییر در رژیم‌های بارشی حوضه از جمله دلایل احتمالی روند کاهشی جریان کمینه فصلی به شمار می‌آیند.

بطور کلی، جریان‌های کمینه از پیچیده‌ترین شاخص‌های جریان محسوب می‌گردند که تحت تأثیر عوامل متنوع اقلیمی، هیدرولوژیکی

باید این نکته را نیز در نظر داشت، رودخانه‌های واقع در مناطق خشک اغلب فصلی و موقتی هستند و به علت کاهش ریزش‌های جوی یا برداشت بیش از حد در بالادست، با کمبود آب در بخش‌های میانی و پایین دست مواجه می‌گردند. رودخانه‌های موجود در حوضه دریاچه نمک نیز از این قاعده مستثنی نمی‌باشند. بعنوان مثال ایستگاه رحیم‌آباد (در بخش میانی رود شور) همچنین ایستگاه جالایر (زیرحوضه خماجین) و رازین (زیرحوضه نوبران) واقع در بخش‌های میانی رود قره‌چای، بعلاوه برداشت‌های بیش از حد در بالادست و یا کنترل توسط سدهای کوچک کشاورزی روند کاهشی شدیدی را نشان می‌دهند. بطوری‌که طبق گزارش هیدرولوژی، مطالعات بهنگام‌سازی بیلان منابع آب محدوده‌های مطالعاتی حوضه دریاچه نمک، دبی ۱۵ ساله اخیر نسبت به دبی ۴۵ ساله خروجی از زیرحوضه خماجین، کاهش ۷۴ درصدی بعلاوه تشدید مصرف و تغذیه واداری بر اثر افت آب زیرزمینی نشان داده است (Abkhan Consulting Engineers, 2013). در بخش شمال شرقی حوضه با وجود رشد سریع جمعیت و تقاضا و همچنین تشدید مصرف طی سال‌های اخیر، روند کاهشی معنی‌دار در مقادیر جریان کمینه فصلی مشاهده نشد و حتی روند افزایشی معنی‌دار در ایستگاه‌های ده‌صومعه، سیرا و رودک شناسایی گردید. ایستگاه رودک واقع در محدوده لواسانات جزء معدود ایستگاه‌های حوضه با جریان طبیعی است که دستخوش تغییرات ناشی از تشدید مصرف و برداشت، طی دهه‌های اخیر واقع نگردیده است. ایستگاه‌های سیرا و سولقان واقع در زیرحوضه کرج می‌باشند؛ در این ناحیه بدلیل اعمال پروژه‌های انتقال بین حوضه‌ای به منظور تأمین آب کلان‌شهر تهران، آب مورد نیاز از سه سد لار، لتیان و طالقان انتقال یافته که سبب وضعیت ثبات در این ایستگاه‌ها و عدم شناسایی روند معنی‌دار گردیده است. علاوه‌براین، رژیم رودخانه‌های این محدوده برفی-بارانی بوده بدین معنی که بخش قابل توجهی از دبی پایه از ذوب برف تأمین می‌گردد. عدم وجود روند کاهشی معنی‌دار بویژه طی جریان فصلی تابستانه می‌تواند نشان‌دهنده تأثیر ذوب برف در دبی این رودخانه‌ها طی این بازه زمانی نیز باشد. در مطالعه‌ای (Masih et al., 2011) به بررسی تغییرات زمانی مقادیر جریان کمینه و ارتباط آن با متغیرهای اقلیمی در حوضه کرخه پرداختند. آنها بیان داشتند روندهای کاهشی و افزایشی مشاهده شده در مقادیر جریان کمینه می‌تواند با رژیم بارشی حوضه مرتبط باشد اگرچه پارامترهای دیگری نیز می‌توانند در این امر دخیل باشند. این نکته را نیز باید اضافه کرد، در بخش شمال شرقی حوضه، وجود اراضی وسیع کشاورزی و کلان‌شهر تهران در این محدوده سبب گردیده زه‌آب برگشتی از زمین‌های کشاورزی همراه با نفوذ پساب‌های صنعتی و خانگی در دبی این رودخانه‌ها اثرات قابل توجهی بر جای بگذارند.

- Atieh M, Taylor G M A, Sattar A and Gharabaghi B (2017) Prediction of flow duration curves for ungauged basins. *Journal of Hydrology* 545:383-394
- Azizabadi Farahani M and Khalili D (2013) Seasonality characteristics and spatio-temporal trends of 7-day low flows in a large, semi-arid watershed. *Water Resources Management* 27(14):4897-4911
- Barker LJ, Hannaford J, Chiveron A and Svensson C (2016) From meteorological to hydrological drought using standardised indicators. *Hydrology and Earth System Sciences* 20(6):2483-2505
- Bawden AJ, Linton HC, Burn DH and Prowse TD (2014) A spatiotemporal analysis of hydrological trends and variability in the Athabasca River region, Canada. *Journal of Hydrology* 509:333-342
- Burn DH, Sharif M and Zhang K (2010) Detection of trends in hydrological extremes for Canadian watersheds. *Hydrological Processes* 24(13):1781-1790
- Coch A and Mediero L (2016) Trends in low flows in Spain in the period 1949–2009. *Hydrological Sciences Journal* 61(3):568-584
- de Wit MJM, van den Hurk B, Warmerdam PMM, Torfs PJJF, Roulin E and van Deursen WPA (2007) Impact of climate change on low-flows in the river Meuse. *Climatic Change*, Kluwer Academic Publishers 82(3-4):351-372
- Dodangeh S, Soltani S and Sarhadi A (2012) Trend assessment of extremum flows (low flow and flood) in Sefid-Roud Basin. *Journal of Water and Soil Science* 15(58):215-230 (In Persian)
- Ehsanzadeh E and Adamowski K (2010) Trends in timing of low stream flows in Canada: impact of autocorrelation and long-term persistence. *Hydrological Processes* 24(8):970-980
- Fiala T, Ouarda TBMJ and Hladný J (2010) Evolution of low flows in the Czech Republic. *Journal of Hydrology* 393(3-4):206-218
- Foulon É, Rousseau AN and Gagnon P (2018) Development of a methodology to assess future trends in low flows at the watershed scale using solely climate data. *Journal of Hydrology* 557:774-790
- Giuntoli I, Renard B, Vidal J-P, and Bard A (2013) Low flows in France and their relationship to large-scale climate indices. *Journal of Hydrology* 482:105-118
- Hamed KH and Ramachandra Rao A (1998) A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology* 204(1-4):182-196

و زمین‌شناسی می‌باشند. پیچیدگی این شاخص‌ها در مناطق خشک و نیمه خشک به علت شرایط حاکم و شکننده بودن دوچندان می‌گردد. در مناطق خشک و نیمه خشک، بخش اعظم تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی از بستر رودخانه‌های موقتی صورت می‌گیرد. بنابراین تداوم دوره‌های جریان کمینه و جریان صفر می‌تواند تأثیر بسزایی در تغذیه آبخوان‌های این مناطق داشته باشد. با توجه به افت تراز سطح آبخوان‌های حوضه دریاچه نمک، اهمیت مؤلفه‌های کمینه جریان رودخانه‌ها در برنامه‌های سیاست‌گذاری تغذیه آبخوان‌ها بایستی مورد توجه ویژه قرار گیرد. از سوی دیگر، نتایج مطالعه حاضر، بیانگر تفاوت در رفتار جریان‌های کمینه طی دو فصل تابستان و زمستان در حوضه مطالعاتی بوده است؛ این امر تفاوت در مکانیسم‌های مؤلد جریان کمینه و پارامترهای مؤثر بر آن طی این دو فصل را نشان می‌دهد. بنابراین، ارزیابی شاخص‌های فصلی جریان کمینه، می‌تواند انعکاس بهتری از رژیم جریان رودخانه‌ها طی دوره‌های تداوم خشکی ارائه نماید. علاوه بر این تداوم دوره‌های جریان کمینه، پوشش گیاهی، تنوع و پراکنش آنها و همچنین حیات موجودات آبی را نیز تحت تأثیر قرار داده و در درازمدت سبب تغییرات مخرب در اکوسیستم‌های این مناطق می‌گردد. از این رو بایستی تأمین حداقل مقادیر دبی رودخانه‌ها (حقاب زیستی) در رأس برنامه‌ریزی‌های مدیریتی حوضه دریاچه نمک قرار گیرد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Flow Duration Curve
- 2- Signature
- 3- Rescale Range
- 4- Persistent
- 5- Non-Persistent
- 6- Serial
- 7- Portmanteau Test
- 8- Flow Duration Curve Seasonal Index
- 9- Non-Persistent
- 10- Persistent

۵- مراجع

- Abghari H, Tabari H and Hosseinzadeh Talaei P (2013) River flow trends in the west of Iran during the past 40 years: Impact of precipitation variability. *Global and Planetary Change* 101:52-60
- Abkhan Consulting Engineers (2013) Updated studies for balancing of water resources in the studied regions of Namak Lake Basin. (In Persian)
- Assani AA, Chalifour A, Légaré G, Manouane C-S and Leroux D (2011) Temporal regionalization of 7-day low flows in the St. Lawrence watershed in Quebec (Canada). *Water Resources Management* 25(14):3559-3574

- Sen PK (1968) Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association* 63(324):1379-1389
- Smakhtin V (2001) Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology* 240(3-4):147-186
- Svensson C, Kundzewicz WZ and Maurer T (2005) Trend detection in river flow series: 2. Flood and low-flow index series / Détection de tendance dans des séries de débit fluvial: 2. Séries d'indices de crue et d'étiage. *Hydrological Sciences Journal, IAHS Press* 50(5)
- Tabari H and Hosseinzadeh Talaei P (2011) Analysis of trends in temperature data in arid and semi-arid regions of Iran. *Global and Planetary Change* 79(1-2):1-10
- Theil H (1950) A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis, 3; confidence regions for the parameters of polynomial regression equations. *Stichting Mathematisch Centrum. Statistische Afdeling*
- Yang T, Xu C-Y, Shao Q, Chen X, Lu G-H and Hao Z-C (2010) Temporal and spatial patterns of low-flow changes in the Yellow River in the last half century. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 24(2):297-309
- Yekom Consulting Engineers (2012a) Studies on updating master plan of water in Namak Lake, Gavkhouni, Siahkooh, Rig-Zarin and Central Desert basins: report of studies on surface water resources (quantitative and qualitative). (In Persian)
- Yekom Consulting Engineers (2012b) Studies on updating master plan of water in Namak Lake, Gavkhouni, Siahkooh, Rig-Zarin and Central Desert basins: report of meteorology and climatology. (In Persian)
- Huang S, Huang Q, Chang J and Leng G (2016) Linkages between hydrological drought, climate indices and human activities: a case study in the Columbia River basin. *International Journal of Climatology* 36(1):280-290
- Hurst HE (1951) Long-term storage capacity of reservoirs. *Transactions of the American Society of Civil Engineers* 116:770-799
- Kendall M (1975) Rank correlation measures. London: Charles Griffin
- Khalili K, Tahoudi MN, Mirabbasi R and Ahmadi F (2016) Investigation of spatial and temporal variability of precipitation in Iran over the last half century. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 30(4):1205-1221
- Khaliq MN, Ouarda TBMJ and Gachon P (2009) Identification of temporal trends in annual and seasonal low flows occurring in Canadian rivers: The effect of short- and long-term persistence. *Journal of Hydrology* 369(1):183-197
- Konapala G, Valiya Veettil A and Mishra AK (2018) Teleconnection between low flows and large-scale climate indices in Texas River basins. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 32(8):2337-2350
- Ljung GM and Box GEP (1978) On a measure of lack of fit in time series models. *Biometrika* 65(2):297
- Mann HB (1945) Nonparametric tests against trend. *Econometrica, The Econometric Society* 13(3):245
- Masih I, Uhlenbrook S, Maskey S and Smakhtin V (2011) Streamflow trends and climate linkages in the Zagros Mountains, Iran. *Climatic Change* 104(2):317-338
- Modarres R, Sarhadi A and Burn DH (2016) Changes of extreme drought and flood events in Iran. *Global and Planetary Change* 144:67-81