

## شناسایی تغییرات ناگهانی و تدریجی پارامترهای کیفی آب در ایستگاه‌های پایین دست سد گتوندعلیا

حسین رحمتی<sup>۱\*</sup>، سعید پرومندنسب<sup>۲</sup>، زهرا ایزدپناه<sup>۳</sup>، محمد الباجی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۱۶

### چکیده

در این مطالعه با استفاده از آزمون من-کندال، روند تغییرات پارامترهای کیفی آب رودخانه کارون در سه ایستگاه پایین دست سد گتوندعلیا بررسی و همچنین برای تعیین مقدار شیب خط روند پارامترهای کیفی، از آزمون تخمین گر شیب سن استفاده شد. علاوه بر این با استفاده از دو آزمون تعیین نقطه شکست پتیت و لامبارد نقطه یا نقاط شکست ناگهانی و تدریجی سری زمانی پارامترهای کیفی جریان رودخانه در ایستگاه‌های منتخب شناسایی شد. نتایج آزمون من-کندال نشان داد که در بازه زمانی سال‌های آبی ۱۳۶۴ تا ۱۳۹۵ تمامی پارامترها (به جز pH) از خود روند مثبت نشان دادند. قابل ذکر است که ۸۰٪ از متغیرها دارای روند مثبت معنی دار بودند. نتایج آزمون شیب خط روند نیز نشان داد که در دوره آماری مورد مطالعه کیفیت آب رودخانه کارون در هر سه ایستگاه رو به کاهش بوده است. نتایج دو آزمون لامبارد و پتیت نشان داد که به ترتیب ۷۶٪ و ۹۶٪ از پارامترها دارای نقطه شکست بودند. همچنین آزمون لامبارد نشان داد که به ترتیب ۲۰ و ۶۳ درصد از پارامترها یک تغییر ناگهانی و تدریجی را تجربه کردند. از جمله دلایلی که می‌توان برای علت وقوع نقطه شکست نام برد، تغییر غلظت پارامترها به دلیل پدیده‌های حدی از جمله خشکسالی‌های اواخر دهه ۷۰ و اواسط دهه ۸۰ است.

**واژه‌های کلیدی:** آزمون من-کندال، آزمون‌های نقطه شکست لامبارد و پتیت، رودخانه کارون

### مقدمه

برای درک چگونگی تأثیر تغییرات اقلیمی، شرایط طبیعی و اقدامات سازه‌ای و انسانی بر کیفیت آب رودخانه‌ها، بررسی مداوم تغییرات پارامترهای کیفی و اطلاع از فرآیندهای کنترل کننده کیفیت رودخانه‌ها امری ضروری است (Hunsaker and Johnson, 2017). آلودگی آب رودخانه‌ها یک تهدید محسوب می‌شود و براساس بررسی‌های انجام شده، مشکل کیفیت آب در کشورهای در حال توسعه مهم‌تر است (Groppo et al., 2008; Pimpunchat et al., 2009). کیفیت آب سطحی توسط عوامل مختلفی همچون فعالیت‌های انسانی از قبیل سدسازی، توسعه شهرها، گسترش صنعت

و عدم توجه به تصفیه پساب تولیدی و عوامل اقلیمی از جمله افزایش درجه حرارت، پدیده‌های حدی مانند خشکسالی و سیلاب تغییر می‌کند (Bouza-Deaño et al., 2008; Chai et al., 2009; Singh et al., 2004). از آنجایی که رودخانه‌ها، منابع اصلی تأمین کننده آب برای مصارف شهری، کشاورزی و صنعتی هستند؛ ضروری است که از آلوده شدن آن‌ها جلوگیری کرده و اطلاعات قابل اطمینانی از وضعیت کیفی و تغییرات رخ داده تهیه شود (Singh et al., 2004). بررسی روند پارامترهای کیفی آب می‌تواند در مدیریت بهتر منابع آب سطحی، به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک کمک شایانی نماید (Karamouz et al., 2006).

تحلیل روند به‌عنوان فرآیند بررسی تغییرات در رویدادهای آینده براساس اطلاعات گذشته تعریف می‌شود (Sharma et al., 2016). برای بررسی وجود روند در سری‌های هیدرولوژیکی اغلب از روش‌های ناپارامتری استفاده می‌شود. آزمون‌های ناپارامتری<sup>۴</sup> برای سری داده‌هایی که توزیع آماری آنها نرمال نیست و یا دارای داده‌های

۱ - دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز  
۲ - استاد گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز  
۳ - استادیار گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز  
\* - نویسنده مسئول: (Email:Hosein.Rahmati86@gmail.com)

پرت باشند، مناسب‌تر هستند. در این بین آزمون من-کندال به دلیل ناپارامتریک بودن در مطالعات متعددی مورد استفاده قرار گرفته است (Huang et al., 2017). طبری و همکاران با استفاده از آزمون ناپارامتریک من-کندال، روند زمانی پارامترهای فیزیکی-شیمیایی رودخانه مارون را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل نشان داد که سری‌های pH، کدورت، SAR و کلسیم در دوره آماری مورد مطالعه روند افزایشی معنی‌داری را تجربه کرده‌اند. (Tabari et al., 2011). دین‌پژوه و همکاران با استفاده از آزمون‌های اصلاح شده من-کندال به بررسی روند تغییرات زمانی سری زمانی ۱۳ پارامتر کیفی آب زیرزمینی دشت شبستر-صوفیان پرداختند (Dinpasho et al., 2014).

همان‌گونه که ذکر گردید آزمون‌های روند، میزان تغییرات در گذر زمان را مشخص می‌کنند اما شناسایی زمان تغییرات ناگهانی یکی از مهم‌ترین جنبه‌های بهره‌برداری و حفاظت از منابع آب سطحی است که می‌تواند اطلاعات بسیار مفیدی در زمینه عملکرد و ارزیابی محیط‌زیست در اختیار مدیران و تصمیم‌گیران قرار دهد (Huang et al., 2017). تشخیص زمان تغییر در روند پارامترهای کیفی جریان رودخانه (تعیین نقطه شکست) تحت عنوان شناسایی تغییر در رفتار یک فرآیند به دلیل تغییرات توزیعی یا ساختاری تعریف می‌شود (Sharma et al., 2016). نقطه تغییر با تغییرات ساختاری که ممکن است در سری زمانی رخ دهد در ارتباط بوده و روش‌های مختلفی با رویکردهای متفاوت برای شناسایی و تعیین نقاط شکست توسعه داده شده‌اند (Costa et al., 2016; Sharma et al., 2016). بعضی آزمون‌ها مانند Pettit توانایی شناسایی یک نقطه شکست را دارند که به این نوع نقطه شکست، نقطه شکست ناگهانی می‌گویند؛ و روش‌های دیگر مانند Lombard توانایی شناسایی بیش از یک نقطه شکست را دارند (Quessy et al., 2011). وجود نقاط شکست و تغییر ناگهانی رفتار متغیرهای کیفی جریان رودخانه می‌تواند تحت تاثیر عواملی چون سیلاب، خشکسالی و دیگر عوامل تغییر دهنده شرایط طبیعی رخ دهد (Sharma et al., 2016).

## مواد و روش

### منطقه مورد مطالعه

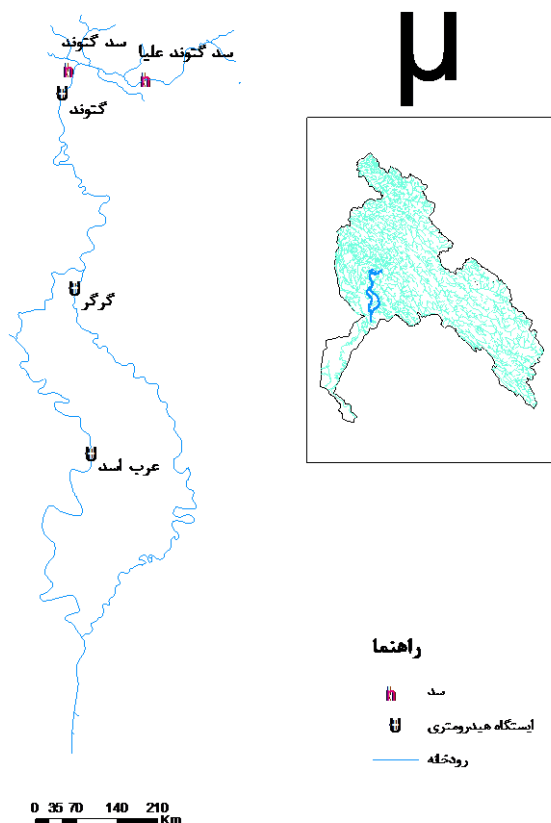
رودخانه کارون پرآب‌ترین رود ایران محسوب می‌شود. این رود از کوه‌های زاگرس سرچشمه می‌گیرد و با ملحق شدن سرشاخه‌های دز و کوهرنگ به آن، از شهر اهواز عبور می‌کند و در نهایت به خلیج فارس منتهی می‌شود. حوزه آبریز این رود که در دو استان خوزستان و چهارمحال بختیاری واقع است حدود ۶۵۲۳۰ کیلومتر مربع وسعت دارد. طول رود کارون حدوداً ۹۵۰ کیلومتر و متوسط دبی این رودخانه ۵۷۵ متر مکعب بر ثانیه است (Salmani and Jajaei, 2016). سدهای متعددی در سال‌های مختلف بر روی این رودخانه ساخته شده‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به سدهای کارون یک، کارون سه، کارون چهار، مسجد سلیمان و در نهایت سد گتوندعلیا اشاره کرد. سد گتوندعلیا آخرین سد ساخته شده (از نظر زمانی) بر روی رود کارون بوده که در مرداد ماه سال ۱۳۹۰ آبیگری شده است. شکل ۱ موقعیت سدهای گتوند (تنظیمی) و گتوندعلیا به‌همراه ایستگاه‌های مورد مطالعه واقع در پایین‌دست این سد را نشان می‌دهد.

در این بین آزمون من-کندال به دلیل ناپارامتریک بودن در مطالعات متعددی مورد استفاده قرار گرفته است (Huang et al., 2017). طبری و همکاران با استفاده از آزمون ناپارامتریک من-کندال، روند زمانی پارامترهای فیزیکی-شیمیایی رودخانه مارون را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل نشان داد که سری‌های pH، کدورت، SAR و کلسیم در دوره آماری مورد مطالعه روند افزایشی معنی‌داری را تجربه کرده‌اند. (Tabari et al., 2011). دین‌پژوه و همکاران با استفاده از آزمون‌های اصلاح شده من-کندال به بررسی روند تغییرات زمانی سری زمانی ۱۳ پارامتر کیفی آب زیرزمینی دشت شبستر-صوفیان پرداختند (Dinpasho et al., 2014).

همان‌گونه که ذکر گردید آزمون‌های روند، میزان تغییرات در گذر زمان را مشخص می‌کنند اما شناسایی زمان تغییرات ناگهانی یکی از مهم‌ترین جنبه‌های بهره‌برداری و حفاظت از منابع آب سطحی است که می‌تواند اطلاعات بسیار مفیدی در زمینه عملکرد و ارزیابی محیط‌زیست در اختیار مدیران و تصمیم‌گیران قرار دهد (Huang et al., 2017). تشخیص زمان تغییر در روند پارامترهای کیفی جریان رودخانه (تعیین نقطه شکست) تحت عنوان شناسایی تغییر در رفتار یک فرآیند به دلیل تغییرات توزیعی یا ساختاری تعریف می‌شود (Sharma et al., 2016). نقطه تغییر با تغییرات ساختاری که ممکن است در سری زمانی رخ دهد در ارتباط بوده و روش‌های مختلفی با رویکردهای متفاوت برای شناسایی و تعیین نقاط شکست توسعه داده شده‌اند (Costa et al., 2016; Sharma et al., 2016). بعضی آزمون‌ها مانند Pettit توانایی شناسایی یک نقطه شکست را دارند که به این نوع نقطه شکست، نقطه شکست ناگهانی می‌گویند؛ و روش‌های دیگر مانند Lombard توانایی شناسایی بیش از یک نقطه شکست را دارند (Quessy et al., 2011). وجود نقاط شکست و تغییر ناگهانی رفتار متغیرهای کیفی جریان رودخانه می‌تواند تحت تاثیر عواملی چون سیلاب، خشکسالی و دیگر عوامل تغییر دهنده شرایط طبیعی رخ دهد (Sharma et al., 2016).

در سال‌های اخیر در محدود مطالعاتی با استفاده از روش‌های مختلف به شناسایی نقاط شکست سری زمانی پارامترهای کیفی اقدام شده است. به‌عنوان مثال با و مک‌کنا با استفاده از چند روش از جمله CUSUM<sup>۱</sup>، OBCPD<sup>۲</sup>، SPRT<sup>۳</sup> و BED<sup>۴</sup> به شناسایی نقاط شکست سری‌های زمانی کدورت، هدایت الکتریکی، کلر و کربن آلی کل پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که روش OBCPD در تعیین رخداد‌های آلوده‌کننده، بالاترین دقت را دارا بوده است (Ba

- 1 - Cumulative sum
- 2 - Online Bayesian change-point detection
- 3 - Sequential probability ratio test
- 4 - Binomial event discriminator



شکل ۱- موقعیت رودخانه در حوضه کارون و همچنین موقعیت سد های گتوند (تنظیمی) و گتوند علیا به همراه ایستگاه هیدرومتری پایین دست

(مسیر جریان آب از سد گتوند علیا به ایستگاه عرب اسد است)

اولین گام در آزمون من-کندال محاسبه آماره S است (Dinpashoh et al., 2013; Hamed and Rao, 1998):

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (1)$$

که S: آماره آزمون من-کندال، n: تعداد داده‌ها،  $x_i$  و  $x_j$ : i امین و j امین مشاهده،  $\text{sgn}(\cdot)$  تابع سیگنال است که توسط رابطه ۲ محاسبه می‌شود (Dinpashoh et al., 2013; Hamed and Rao, 1998):

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

بر اساس فرضیه مستقل بودن و توزیع یکسان اطلاعات، مقدار میانگین و واریانس آماره S در روابط ۳ و ۴ محاسبه می‌شوند (Dinpashoh et al., 2013; Hamed and Rao, 1998):

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

#### اطلاعات

پارامترهای انتخاب شده سه ایستگاه گتوند، گرگر و عرب اسد برای بازه زمانی ۱۳۶۴ تا ۱۳۹۵ به سه دسته پارامترهای کلی (TDS، EC و pH)، آنیون‌ها ( $\text{HCO}_3^-$ ،  $\text{Cl}^-$  و  $\text{SO}_4^{2-}$ ) و کاتیون ( $\text{Ca}^{+2}$ ،  $\text{Mg}^{+2}$  و  $\text{Na}^+$ ،  $\text{K}^+$ ) تقسیم می‌شوند. جهت آنالیزهای کیفی آب در محل ایستگاه‌های نام برده؛ نمونه‌برداری به صورت ماهانه و مواقع سیلابی انجام می‌شود. در جدول ۱، مشخصات آماری پایه هر پارامتر از جمله حداکثر، حداقل، میانگین و انحراف معیار به همراه تعداد نمونه‌های آنالیز شده در بازه زمانی مورد بررسی ارائه شده است.

#### آزمون من-کندال

در مطالعه حاضر برای بررسی روند پارامترهای کیفی از آزمون ناپارامتریک من-کندال و برای تخمین شیب خط روند از تخمین گر شیب سن استفاده شد. این روش‌ها به توزیع آماری اطلاعات وابسته نیستند و برای اطلاعاتی با توزیع غیرنرمال قدرت و دقت بالایی دارند (Zamani et al., 2017).

جدول ۱- مشخصات آماری پارامترهای فیزیکی-شیمیایی مورد بررسی در ایستگاه‌های منتخب در بازه زمانی ۱۳۶۴ تا ۱۳۹۵

پارامترها	واحد	گتوند			گرگر			عرب اسد								
		تعداد نمونه	حداکثر	حداقل	میانگین	انحراف معیار	تعداد نمونه	حداکثر	حداقل	میانگین	انحراف معیار					
TDS	(mg/l)	۳۳۲	۹۸۹/۴۲	۵۱۴/۷۴	۶۷۵/۸۸	۱۴۴/۶۲	۳۱۱	۱۳۹۹/۳۳	۶۱۵/۵۰	۸۶۳/۴۸	۱۸۸/۴۷	۳۵۹	۱۳۴۹/۰۰	۶۴۸/۰۰	۸۷۳/۹۰	۱۵۸/۱۲
EC	(µmho/cm)	۳۳۲	۱۶۶۵/۱۶	۷۸۶/۷۸	۱۰۶۰/۶۲	۲۴۰/۳۵	۳۱۱	۲۱۰۹/۵۸	۹۱۹/۲۹	۱۳۴۲/۷۴	۲۹۳/۳۳	۳۵۹	۲۰۲۸/۰۸	۹۶۶/۶۷	۱۳۳۲/۰۰	۲۵۸/۹۴
pH	(-)	۳۳۲	۸/۳۴	۷/۶۵	۸/۰۱	۰/۲۰	۳۱۱	۸/۴۰	۷/۴۴	۷/۹۸	۰/۲۵	۳۵۹	۸/۳۰	۷/۵۸	۷/۹۵	۰/۱۹
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	(meq/l)	۳۳۲	۲/۹۴	۲/۲۰	۲/۵۸	۰/۲۳	۳۱۱	۲/۲۴	۱/۹۳	۲/۷۱	۰/۳۱	۳۵۹	۳/۱۰	۲/۱۳	۲/۷۰	۰/۲۵
Cl <sup>-</sup>	(meq/l)	۳۳۲	۱۰/۲۶	۳/۷۳	۵/۶۷	۱/۸۰	۳۱۱	۱۲/۹۳	۴/۳۷	۷/۳۵	۱/۸۶	۳۵۹	۱۳/۳۱	۴/۸۳	۷/۵۵	۱/۹۰
SO <sub>4</sub> <sup>-۲</sup>	(meq/l)	۳۳۲	۴/۴۸	۱/۳۶	۲/۳۱	۰/۷۶	۳۱۱	۸/۲۸	۱/۷۵	۳/۳۸	۱/۴۱	۳۵۹	۵/۷۳	۲/۰۲	۳/۴۷	۰/۸۶
Ca <sup>+۲</sup>	(meq/l)	۳۳۲	۵/۹۶	۲/۶۶	۳/۶۲	۰/۸۹	۳۱۱	۸/۷۹	۲/۹۸	۴/۵۵	۱/۴۹	۳۵۹	۶/۶۱	۲/۸۳	۴/۳۵	۱/۰۰
Mg <sup>+۲</sup>	(meq/l)	۳۳۲	۲/۵۵	۰/۹۸	۱/۵۰	۰/۳۰	۳۱۱	۲/۳۸	۱/۱۷	۱/۷۵	۰/۲۹	۳۵۹	۲/۶۶	۱/۴۷	۱/۹۵	۰/۳۰
Na <sup>+</sup>	(meq/l)	۳۳۲	۱۰/۴۱	۳/۶۶	۵/۵۱	۱/۷۷	۳۱۱	۱۲/۶۹	۴/۳۹	۷/۱۵	۱/۸۰	۳۵۹	۱۳/۱۱	۴/۷۷	۷/۴۵	۱/۸۴
K <sup>+</sup>	(meq/l)	۳۳۲	۰/۱۰	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۱	۳۱۱	۰/۱۱	۰/۰۳	۰/۰۶	۰/۰۲	۳۵۹	۰/۰۹	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۱

$$\beta = \text{Median} \left( \frac{x_j - x_1}{j-1} \right) \quad \forall 1 \leq j \leq n \quad (۶)$$

مقدار شبیبی که توسط رابطه ۶ محاسبه می‌شود، از دقت بالایی در بیان مقدار تغییرات روند یک پارامتر برخوردار است (Dinpashoh et al., 2013).

#### آزمون Pettit

آزمون Pettit، فرض H<sub>0</sub> مبنی بر عدم وجود نقطه تغییر (شکست) در یک سری زمانی اطلاعات را بررسی می‌کند. این آزمون بر اساس مقایسه رتبه‌بندی مشاهدات قبل و بعد از یک تاریخ مشخص τ عمل کرده و با استفاده از رابطه ۷ محاسبه می‌شود (Rougé et al., 2013):

$$k(\tau) = \sum_{i=1}^{\tau} \sum_{j=\tau+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (۷)$$

زمانی که مقدار قدرمطلق k(τ) بیشترین مقدار باشد؛ به آن معنا است که در آن زمان تغییری در میانگین سری زمانی رخ داده است (Rougé et al., 2013).

$$T = \arg \max_{1 \leq \tau \leq n} (|k(\tau)|) \quad (۸)$$

$$K = \max_{1 \leq \tau \leq n} (|k(\tau)|) \quad (۹)$$

آماره K در رابطه ۹ آخرین آماره آزمون Pettit است و T در رابطه ۸ بیانگر زمان تغییر (نقطه شکست) است (Rougé et al., 2013).

جهت پذیرش و یا رد فرضیه H<sub>0</sub> از مقدار p استفاده می‌شود. مقدار p براساس رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود (Rougé et al., 2013):

$$p \approx 2 \exp \left( \frac{-6K^2}{n^3 + n^2} \right) \quad (۱۰)$$

$$V(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (۴)$$

در روابط ۳ و ۴ E و V به ترتیب میانگین و واریانس آماره S هستند. t<sub>i</sub> و m به ترتیب تعداد داده‌های یکسان در دسته i ام و تعداد دسته هستند. آماره Z آزمون من-کنندال توسط رابطه ۵ محاسبه می‌شود (Dinpashoh et al., 2013):

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{V(S)}} & S \neq 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{V(S)}} & S \neq 0 \end{cases} \quad (۵)$$

اگر شرط  $-Z_{1-\frac{\alpha}{2}} \leq Z \leq Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$  برقرار شود، آنگاه فرض H<sub>0</sub>

مبنی بر عدم وجود روند در سری زمانی اطلاعات در سطح معنی‌داری α پذیرفته می‌شود. در غیر این صورت فرض H<sub>0</sub> رد می‌شود و فرض مقابل که نشان دهنده وجود روند در سطح معنی‌داری α است پذیرفته می‌شود (Dinpashoh et al., 2013). مقادیر آستانه Z من-کنندال برای سطوح معناداری ۱۰، پنج و یک درصد به ترتیب برابر با ۱/۶۴۵، ۱/۹۶ و ۲/۳۳ است.

#### تخمین گر شیب سن

شیب خط روند یک سری زمانی با استفاده از روش تخمین گر شیب سن با استفاده از رابطه ۶ محاسبه می‌شود (Dinpashoh et al., 2013):

$\phi(R_1), \dots, \phi(R_n)$  هستند.

برای بررسی فرض صفر و فرض مخالف، Lombard در سال ۱۹۸۷ آماره  $S_n$  را پیشنهاد داد که در رابطه ۱۵ محاسبه می‌شود (Azizabadi Farahani and Khalili, 2013).

$$S_n = \frac{1}{n^5} \sum_{1 \leq K_1 \leq K_2 \leq n} L_{K_1, K_2}^2 \quad (15)$$

$$L_{K_1, K_2} = \sum_{j=K_1+1}^{K_2} \sum_{l=1}^j Z_l \quad (16)$$

اگر مقدار آماره  $S_n$  بزرگتر از  $0.403/n$  شود، آنگاه فرض صفر رد و فرض مقابل که به معنای وجود تغییر در میانگین سری زمانی اطلاعات است پذیرفته می‌شود (Azizabadi Farahani and Khalili, 2013).

در صورتی که آماره  $S_n$  منجر به رد فرض صفر شود؛ باید زمان وقوع نقاط شکست در سری زمانی تعیین شود. رابطه ۱۷ توسط Lombard برای تعیین زمان وقوع نقاط شکست پیشنهاد شد.

$$(K_1, K_2) = \arg \max_{1 \leq K_1 < K_2 \leq n} \left\{ \frac{\sum_{j=K_1+1}^{K_2} \sum_{l=1}^j \left| \frac{\phi(R_l - \bar{\phi})}{\sigma_\phi} \right|}{\sigma \left( \frac{K_1}{n}, \frac{K_2}{n} \right)} \right\} \quad (17)$$

بعد از مشخص شدن زمان وقوع نقاط شکست در سری زمانی، جهت تعیین میانگین سری زمانی، قبل و بعد از نقاط شکست از روابط ۱۸ تا ۲۰ استفاده می‌شود.

$$\mu_1 = \frac{1}{R} \left\{ \sum_{i \leq K_1} X_i + \sum_{K_1 < i < K_2} \left( \frac{K_2 - i}{K_2 - K_1} \right) X_i - \lambda_1 \sum_{i=1}^n X_i \right\} \quad (18)$$

$$\mu_2 = \frac{1}{n - \lambda_2} \left( \sum_{i=1}^n X_i - \lambda_2 \mu_1 \right) \quad (19)$$

$$R = K_1 + \left\{ \frac{\left\{ \frac{K_2 - K_1 - 1}{6(K_2 - K_1)} \right\}}{\times \left\{ \frac{2K_2 - 2K_1 - 1 - \lambda_2}{n - \lambda_2} \right\}} \right\} (K_2 - K_1 + 1) \quad (20)$$

$\mu_1$  و  $\mu_2$  به ترتیب بیانگر میانگین قبل و بعد از نقطه شکست هستند.

## نتایج و بحث

### نتایج آزمون من-کندال

جدول ۲ مقدار آماره  $Z$  آزمون من-کندال را برای سه ایستگاه

اگر سطح معنی داری کمتر از  $0.10$  باشد؛ آنگاه فرض صفر مبنی بر عدم معنی دار بودن اختلاف میانگین‌های سری، قبل و بعد از نقطه شکست پذیرفته می‌شود. در غیر این صورت فرض صفر رد شده و فرض مخالف پذیرفته می‌شود (Dinpasho et al., 2014; Rougé et al., 2013).

### آزمون Lombard

آزمون Lombard توانایی تعیین زمان وقوع تغییر در میانگین و یا واریانس سری زمانی را دارد. اگر یک سری زمانی به صورت  $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  باشد؛ آنگاه  $x_i$  نشان دهنده مقدار پارامتر مشاهده شده در زمان  $i$  است. اگر میانگین نظری سری زمانی باشد، آنگاه برای تعیین زمان تغییر میانگین می‌توان از آزمون Lombard استفاده کرد (Azizabadi Farahani and Khalili, 2013):

$$\begin{cases} \mu_1 & i \in \{1, \dots, K_1\} \\ \mu_1 + \frac{(i - K_1)(\mu_2 - \mu_1)}{K_2 - K_1} & i \in \{K_1 + 1, \dots, K_2 - 1\} \\ \mu_2 & i \in \{K_2, \dots, n\} \end{cases} \quad (11)$$

طبق رابطه ۱۱، میانگین می‌تواند به صورت تدریجی از  $\mu_1$  تا  $\mu_2$  بین زمان‌های  $K_1$  و  $K_2$  تغییر کند. در یک حالت خاص اگر زمان‌های تغییر به صورت متوالی باشند ( $K_2 = K_1 + 1$ )؛ آنگاه یک تغییر ناگهانی در میانگین سری زمانی رخ داده است.

فرض می‌شود که  $F_i(x) = P(X_i \leq x)$ ,  $i \in \{1, \dots, n\}$  برقرار است. به منظور توصیف روش معرفی شده توسط Lombard، مقدار  $R_i$  به عنوان رتبه نرمال شده  $X_i$  در بین  $x$  ها تعریف و به صورت رابطه ۱۲ محاسبه می‌شود.

$$F_n(x) = \frac{1}{n+1} \sum_{i=1}^n I(X_i \leq x) \quad (12)$$

در بیشتر کاربردها، محققان به دنبال بررسی وجود تغییر در میانگین و واریانس هستند. با توجه به رابطه ۱۱ برای بررسی اینکه آیا در میانگین یا واریانس سری زمانی تغییری رخ داده است یا خیر؛ یک تابع امتیاز تعریف می‌شود. لذا بر همین اساس Lombard در سال ۱۹۸۷ پیشنهاد استفاده از تابع امتیاز Wilcoxon را داد. در صورتی که هدف بررسی تغییر در میانگین سری زمانی باشد؛ تابع امتیاز Wilcoxon به صورت رابطه ۱۳ تعریف می‌شود:

$$\phi(u) = 2u - 1 \quad (13)$$

که در رابط ۱۳ مقدار  $R_i$  به جای  $u$  جایگزین می‌شود.

امتیاز رتبه هر  $X_i$  با استفاده از رابطه ۱۴ تعریف می‌شود:

$$Z_i = \left\{ \frac{\phi(R_i) - \bar{\phi}}{\sigma_\phi} \right\} \quad (14)$$

$\bar{\phi}$  و  $\sigma_\phi$  به ترتیب میانگین و واریانس مجموعه

افزایش آلودگی هوا به دلایلی همچون افزایش گازهای گلخانه‌ای و صنعتی شدن کشور در دهه‌های گذشته و به دنبال آن افزایش تجمع اسید اتمسفر در خاک از جمله دلایلی است که توسط طبری و همکاران برای اسیدی شدن آب بیان شده است (Tabari et al., 2011). لازم به ذکر است که ۱۰٪ از پارامترها فاقد روند معنی‌دار شناسایی شدند. در مطالعه طبری و همکاران نیز به روند مثبت معنادار  $Ca^{+2}$  نیز اشاره شده است (Tabari et al., 2011). نتایج به دست آمده در مورد روند پارامترهای TDS، EC،  $HCO_3^-$ ،  $Cl^-$  و  $SO_4^{2-}$  با نتایج مطالعات کیسی و آی و آل تانی مطابقت دارد (Al-Taani, 2014; Kisi and Ay, 2014).

گتوند، گرگر و عرب اسد در بازه زمانی ۱۳۶۴ تا ۱۳۹۵ نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر آماره Z ارائه شده در جدول مذکور، مشاهده می‌شود که روند تغییرات پارامترهای کیفی جریان رودخانه کارون افزایشی است. به طوری که حدود ۷۳٪ از پارامترها در سطح اطمینان ۹۹٪ دارای روند مثبت معنی‌دار بودند. به عنوان مثال پارامترهایی همچون TDS، EC،  $Ca^{+2}$ ،  $K^+$ ،  $Na^+$ ،  $Cl^-$  در هر سه ایستگاه روند افزایشی معنی‌دار را تجربه کرده‌اند. همچنین با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که اسیدیته آب در هر سه ایستگاه مورد مطالعه با روند کاهشی معنی‌دار مواجه بوده است. طبری و همکاران نیز در مطالعه خود وجود روند کاهشی معنی‌دار در پارامتر pH رودخانه مارون را گزارش نموده‌اند که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد.

جدول ۲- مقدار آماره Z آزمون من-کندال برای پارامترهای کیفی ایستگاه‌های منتخب در بازه زمانی (۱۳۶۴/۱۳۶۵) تا (۱۳۹۴/۱۳۹۵)

ایستگاه	پارامتر									
	$K^+$	$Na^+$	$Mg^{+2}$	$Ca^{+2}$	$SO_4^{2-}$	$Cl^-$	$HCO_3^-$	pH	EC	TDS
	(meq/l)	(meq/l)	(meq/l)	(meq/l)	(meq/l)	(meq/l)	(-)	( $\mu mho/cm$ )	(mg/l)	
گتوند	*۳/۶۳	*۳/۸۵	۰/۸۵	*۴/۹۷	*۳/۵۰	*۴/۱۵	*۲/۵۵	-۴/۰۵	*۴/۲۲	*۴/۳۲
گرگر	*۳/۸۹	*۳/۶۴	۱/۰۴	*۴/۵۹	*۴/۲۹	*۳/۹۳	*۲/۰۶	-۴/۹۰	*۴/۳۲	*۴/۴۹
عرب اسد	*۲/۴۸	*۳/۱۶	۰/۴۴	*۴/۲۳	*۳/۱۸	*۳/۴۳	***۱/۷۵	-۳/۹۵	*۳/۵۴	*۳/۶۰

نکته) آماره‌های معنی‌دار در سطح ۱٪، ۵٪ و ۱۰٪ به ترتیب با (\*، \*\*، \*\*\*) مشخص شدند.

آب روخانه کارون در گذر زمان است. در بین آنیون‌ها،  $Cl^-$  و  $HCO_3^-$  به ترتیب بیشترین و کمترین نرخ تغییرات را به خود اختصاص داده‌اند. در بین کاتیون‌ها نیز پارامترهای  $Ca^{+2}$  (در ایستگاه گرگر)،  $Na^+$  (در ایستگاه‌های گرگر و عرب اسد) بیشترین مقدار افزایش شیب روند را تجربه کرده‌اند. تخمین مقادیر مثبت برای شیب روند متغیرهای کیفی نشان دهنده افت کیفیت آب رودخانه کارون در سه دهه گذشته است.

### نتایج آزمون تخمینگر شیب سن

مقدار شیب خط روند پارامترهای کیفی ایستگاه‌های منتخب در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به نتایج آزمون شیب سن می‌توان نتیجه گرفت که ۹۰٪ از پارامترهای دارای شیب روند مثبت و ۱۰٪ دارای شیب روند منفی است. در بین سه ایستگاه مورد بررسی، ایستگاه گرگر بیشترین شیب روند را در پارامترهای TDS، EC،  $Cl^-$ ،  $Ca^{+2}$  و  $K^+$  تجربه کرده است. مقدار شیب خط روند pH در هر سه ایستگاه برابر ۰/۰۲- برآورد شده است که نشان دهنده اسیدی شدن

جدول ۳- مقدار شیب خط روند پارامترهای کیفی در ایستگاه‌های انتخاب شده در بازه زمانی (۱۳۶۴/۱۳۶۵-۱۳۹۴/۱۳۹۵)

ایستگاه	پارامتر									
	$K^+$	$Na^+$	$Mg^{+2}$	$Ca^{+2}$	$SO_4^{2-}$	$Cl^-$	$HCO_3^-$	pH	EC	TDS
گتوند	۰/۰۰۰۵	۰/۱۰	۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۱۲	۰/۰۱	-۰/۰۲	۱۷/۲۶	۱۰/۲۳
گرگر	۰/۰۰۰۶	۰/۱۱	۰/۰۱	۰/۱۱	۰/۱۰	۰/۱۳	۰/۰۱	-۰/۰۲	۲۲/۳۹	۱۴/۶۵
عرب اسد	۰/۰۰۰۴	۰/۱۱	۰/۰۰	۰/۰۸	۰/۰۶	۰/۱۲	۰/۰۱	-۰/۰۲	۱۹/۲۲	۱۰/۸۳

برای سری زمانی پارامترهای کیفی ایستگاه‌های منتخب نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۴ مشاهده می‌شود که آزمون‌های

### نتایج آزمون‌های شناسایی نقطه/نقاط شکست

جدول ۴ نتایج دو آزمون نقطه شکست Pettit و Lombard را

ترتیب که بین سال‌های ۱۳۷۷-۱۳۷۶ تا ۱۳۸۰-۱۳۷۹ و ۱۳۸۶-۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵-۱۳۹۴ با خشکسالی مواجه بوده است. اما شدیدترین کاهش دبی مربوط به سال آبی ۱۳۸۸-۱۳۸۷ بوده است. همچنین لازم به ذکر است که در پژوهش حسینی‌زارع و سعادت (۱۳۸۰)، (۱۳۸۷) به خشکسالی‌های رخ داده در اواخر دهه ۷۰ و نیمه دوم دهه ۸۰ در رودخانه کارون اشاره شده است.

با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان چنین استنباط کرد که اکثر نقاط شکست دو پارامتر TDS و EC در بین سال‌های ۱۳۸۴ تا ۱۳۸۷ به وقوع پیوسته است. در این سال‌ها یک خشکسالی شدید در حوضه آبریز کارون بزرگ رخ داده و به تبع آن دبی جریان رودخانه نیز از سال ۱۳۸۴ کاهش یافته و موجبات ایجاد تغییر در روند پارامترهای کیفی را فراهم کرده است. وقوع خشکسالی اواسط دهه ۸۰ در حوضه کارون در مطالعه گلین و همکاران گزارش شده است (Golian et al., 2015). علاوه بر این کاروسو و موسلی به تأثیر کاهش دبی در شرایط خشکسالی بر مقدار EC و TDS اشاره کرده‌اند (Caruso, 2002; Mosley, 2015). از آنجایی که نقطه شکست دوم شناسایی شده پارامترهای EC و TDS ایستگاه گرگر همزمان بوده است با بهره‌برداری سد گتوند علیا (۱۳۹۱-۱۳۹۰) لذا بهره‌برداری سد را می‌توان به‌عنوان یکی از دلایل احتمالی ایجاد تغییر در پارامترهای نام برده و ایجاد نقطه شکست در این دو پارامتر نام برد.

براساس نتایج ارائه شده در جدول ۴ و با توجه به نتایج آزمون Lombard، پارامتر pH در هر سه ایستگاه دارای یک تغییر تدریجی بوده است که زمان شناسایی شده اولین نقطه شکست هر سه ایستگاه گتوند، گرگر و عرب‌اسد در اواخر دهه ۷۰ و به ترتیب سال‌های ۱۳۷۹-۱۳۷۸، ۱۳۷۷-۱۳۷۸ و ۱۳۷۷-۱۳۷۸ و زمان وقوع نقطه شکست دوم به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۸-۱۳۸۷، ۱۳۸۸-۱۳۸۹ و ۱۳۸۸-۱۳۸۷ بوده است. اما آزمون Pettit نقاط شکست را در اواخر دهه ۷۰ و اوایل دهه ۸۰ نشان می‌دهد. در دوره آماری مورد بررسی دو خشکسالی رخ داده است که یکی مربوط به اواخر دهه ۷۰ و دیگری مربوط به اواسط دهه ۸۰ است.

اولین نقطه شکست شناسایی شده توسط آزمون Lombard مربوطه به دوره خشکسالی اواخر دهه ۷۰ و دومین نقطه شکست هم‌زمان با خشکسالی نیمه دوم دهه ۸۰ بوده است. نتایج آزمون Pettit نیز با دوره خشکسالی حاکم بر حوضه آبریز رودخانه مطابقت دارد. در نتیجه وقوع خشکسالی و تغییر pH را می‌توان علت وقوع تغییر میانگین و در نتیجه وقوع نقطه شکست دانست. اسپراگ و زیلینسکی و همکاران به تغییرات pH در شرایط خشکسالی اشاره کرده‌اند (Sprague, 2005; ZIELIŃSKI et al., 2009).

Pettit و Lombard به ترتیب تقریباً ۸۷٪ و ۹۷٪ از پارامترهای کیفی را دارای نقطه شکست شناسایی کردند. نتایج آزمون Lombard نشان داد که ۲۰٪ از پارامترها یک تغییر ناگهانی و تقریباً ۶۳٪ از پارامترها یک تغییر تدریجی را تجربه کرده‌اند. همچنین در جدول ۴ مقادیر میانگین پارامترهای کیفی قبل و بعد از نقطه شکست توسط هر دو روش ارائه شده است. در ادامه به بررسی نتایج دو آزمون شناسایی نقطه شکست به تفکیک پارامترهای کلی (EC، TDS، pH)، آنیون‌ها ( $\text{HCO}_3^-$ ،  $\text{Cl}^-$  و  $\text{SO}_4^{2-}$ ) و کاتیون‌ها ( $\text{Ca}^{2+}$ ،  $\text{Mg}^{2+}$ ،  $\text{K}^+$  و  $\text{Na}^+$ ) پرداخته خواهد شد.

### پارامترهای عمومی (EC، TDS و pH)

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۴، آزمون Lombard برای پارامتر TDS ایستگاه‌های گتوند و گرگر یک تغییر تدریجی را نشان می‌دهد. زمان وقوع نقاط شکست پارامتر TDS ایستگاه‌های گتوند و گرگر به ترتیب در سال‌های آبی ۱۳۸۴-۱۳۸۳، ۱۳۸۵-۱۳۸۴، ۱۳۶۸-۱۳۶۷ و ۱۳۹۱-۱۳۹۰ و زمان وقوع نقطه شکست این پارامتر در ایستگاه عرب‌اسد دو سال پیاپی ۱۳۸۶-۱۳۸۷ و ۱۳۸۵-۱۳۸۶ بوده است. نتیجه آزمون Pettit در مورد پارامتر TDS ایستگاه گتوند مشابه با نتیجه آزمون Lombard است اما در ایستگاه عرب‌اسد زمان شناسایی شده توسط آزمون Pettit هم‌خوانی مناسبی با نتیجه آزمون Lombard ندارد.

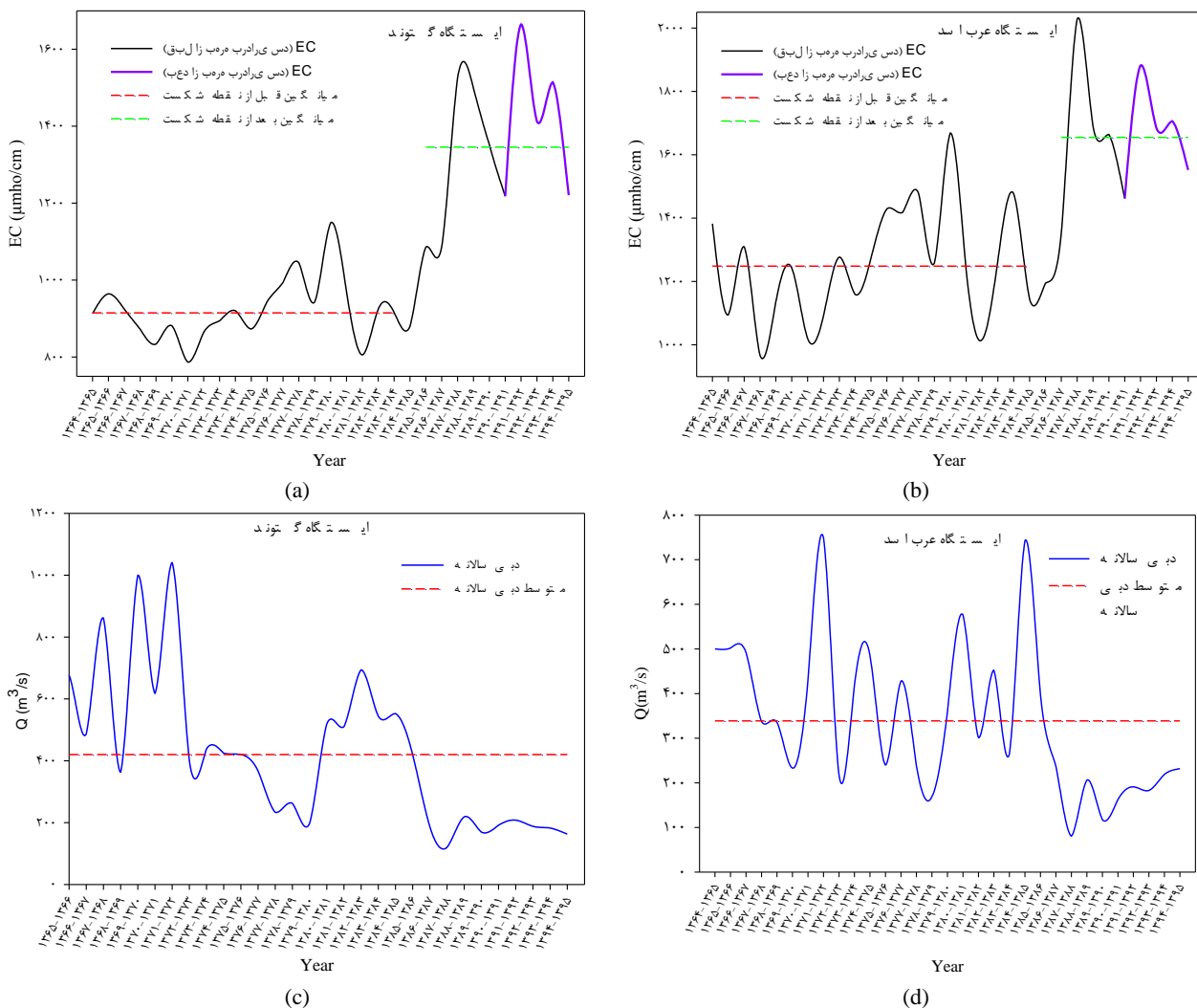
نتایج حاصل از آزمون Lombard یک تغییر تدریجی را برای پارامتر EC در محل ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. پارامتر EC در ایستگاه گتوند (شکل a.۲) در سال‌های آبی ۱۳۸۳-۱۳۸۴ و ۱۳۸۶-۱۳۸۵ دارای یک تغییر تدریجی و براساس آزمون Pettit در سال (۱۳۸۴-۱۳۸۵) یک تغییر ناگهانی را تجربه کرده است. همچنین پارامتر EC ایستگاه عرب‌اسد (شکل b.۲) براساس آزمون Lombard یک تغییر تدریجی را بین سال‌های ۱۳۸۵-۱۳۸۴ و ۱۳۸۶/۱۳۸۷ داشته است.

در شکل‌های c.۲ و d.۲ سری زمانی دبی سالانه دو ایستگاه گتوند و عرب‌اسد به همراه مقدار متوسط دبی این دو ایستگاه نشان داده شده است. همان‌طور در که شکل c.۲ مشخص است، ایستگاه گتوند در دو بازه زمانی اواخر دهه ۷۰ و نیمه دوم دهه ۸۰ با خشکسالی مواجه بوده است. خشکسالی دهه ۷۰ از سال آبی ۱۳۷۷-۱۳۷۶ شروع و تا سال ۱۳۸۰-۱۳۷۹ ادامه داشته است. کاهش دبی در دهه ۸۰ از سال آبی ۱۳۸۵-۱۳۸۴ شروع و در سال ۱۳۸۶-۱۳۸۵ به کمتر از میانگین بلند مدت رسیده و در سال ۱۳۸۸-۱۳۸۷ شدیدترین خشکسالی را در بازه زمانی مورد بررسی تجربه کرده است. ایستگاه عرب‌اسد نیز دارای وضعیتی مشابه با ایستگاه گتوند بوده است به این

جدول ۴- نتایج آزمون‌های Pettit و Lombard برای پارامترهای کیفی ایستگاه‌های منتخب

نتایج آزمون Pettit			نتایج آزمون Lombard				آماره $S_n$	واحد	پارامتر	ایستگاه
میانگین بعد از نقطه شکست	میانگین قبل از نقطه شکست	نقطه شکست	میانگین بعد از نقطه شکست	میانگین قبل از نقطه شکست	دومین نقطه شکست	اولین نقطه شکست				
۸۵۵/۹۲	۵۹۰/۱۵	۱۳۸۴/۱۳۸۵	۸۲۹/۸۵	۵۹۱/۲۰	۱۳۸۴/۱۳۸۵	۱۳۸۳/۱۳۸۴	۰/۱۸۲۷	(mg/l)	TDS	گتوند
۱۳۵۸/۰۰	۹۱۸/۹۷	۱۳۸۴/۱۳۸۵	۱۳۴۵/۶۰	۹۱۴/۶۷	۱۳۸۵/۱۳۸۶	۱۳۸۳/۱۳۸۴	۰/۱۷۷۷	( $\mu\text{mho/cm}$ )	EC	
۷/۸۶	۸/۱۵	۱۳۷۹/۱۳۸۰	۷/۷۸	۸/۱۵	۱۳۸۷/۱۳۸۸	۱۳۷۸/۱۳۷۹	۰/۱۷۲۲	(-)	pH	
۲/۷۸	۲/۴۵	۱۳۸۲/۱۳۸۳	۲/۷۹	۲/۴۳	۱۳۸۵/۱۳۸۶	۱۳۷۹/۱۳۸۰	۰/۰۹۹۵	(meq/l)	$\text{HCO}_3^-$	
۷/۷۷	۴/۶۷	۱۳۸۴/۱۳۸۵	۷/۸۷	۴/۶۲	۱۳۸۶/۱۳۸۷	۱۳۸۳/۱۳۸۴	۰/۱۸۰۶	(meq/l)	$\text{Cl}^-$	
۳/۲۰	۱/۸۹	۱۳۸۴/۱۳۸۵	۳/۰۹	۱/۸۹	۱۳۸۴/۱۳۸۵	۱۳۸۳/۱۳۸۴	۰/۱۴۳۱	(meq/l)	$\text{SO}_4^{2-}$	
۴/۴۲	۳/۰۴	۱۳۸۱/۱۳۸۲	۴/۵۹	۲/۹۱	۱۳۸۷/۱۳۸۸	۱۳۷۶/۱۳۷۷	۰/۲۲۹۴	(meq/l)	$\text{Ca}^{+2}$	
۱/۷۸	۱/۳۶	۱۳۸۴/۱۳۸۵	-	-	-	-	۰/۰۲۴۲	(meq/l)	$\text{Mg}^{+2}$	
۷/۵۲	۴/۵۵	۱۳۸۴/۱۳۸۵	۷/۴۲	۴/۵۳	۱۳۸۵/۱۳۸۶	۱۳۸۳/۱۳۸۴	۰/۱۶۰۶	(meq/l)	$\text{Na}^+$	
۰/۰۵	۰/۰۴	۱۳۷۵/۱۳۷۶	۰/۰۵	۰/۰۴	۱۳۶۸/۱۳۶۹	۱۳۶۷/۱۳۶۸	۰/۱۰۸۷	(meq/l)	$\text{K}^+$	
۱۰۱۸/۰۰	۷۵۲/۰۷	۱۳۸۱/۱۳۸۲	۱۰۵۴/۸۰	۶۵۹/۳۵	۱۳۹۰/۱۳۹۱	۱۳۶۷/۱۳۶۸	۰/۱۸۶۳	(mg/l)	TDS	گرگر
۱۶۶۵/۰۰	۱۱۸۹/۰۰	۱۳۸۴/۱۳۸۵	۱۶۴۷/۶۰	۱۰۵۶/۹۰	۱۳۹۰/۱۳۹۱	۱۳۶۹/۱۳۷۰	۰/۱۸۴۶	( $\mu\text{mho/cm}$ )	EC	
۷/۷۴	۸/۱۵	۱۳۸۱/۱۳۸۲	۷/۶۶	۸/۱۸	۱۳۸۸/۱۳۸۹	۱۳۷۷/۱۳۷۸	۰/۱۹۲۶	(-)	pH	
۲/۹۱	۲/۵۵	۱۳۸۰/۱۳۸۱	۲/۹۴	۲/۵۴	۱۳۸۵/۱۳۸۶	۱۳۷۸/۱۳۷۹	۰/۰۵۶۸	(meq/l)	$\text{HCO}_3^-$	
۹/۳۱	۶/۴۲	۱۳۸۴/۱۳۸۵	۹/۳۹	۶/۳۸	۱۳۸۶/۱۳۸۷	۱۳۸۳/۱۳۸۴	۰/۱۵۵۵	(meq/l)	$\text{Cl}^-$	
۴/۴۶	۲/۵۴	۱۳۸۱/۱۳۸۲	۴/۳۷	۲/۷	۱۳۸۱/۱۳۸۲	۱۳۸۰/۱۳۸۱	۰/۱۷۶۰	(meq/l)	$\text{SO}_4^{2-}$	
۵/۹۱	۳/۵۶	۱۳۸۱/۱۳۸۲	۶/۲۳	۳/۱۷	۱۳۹۰/۱۳۹۱	۱۳۷۱/۱۳۷۲	۰/۲۱۰۸	(meq/l)	$\text{Ca}^{+2}$	
۲/۰۰	۱/۶۴	۱۳۸۴/۱۳۸۵	-	-	-	-	۰/۰۲۲۴	(meq/l)	$\text{Mg}^{+2}$	
۸/۹۵	۶/۲۹	۱۳۸۴/۱۳۸۵	۸/۸۶	۶/۲۷	۱۳۸۵/۱۳۸۶	۱۳۸۳/۱۳۸۴	۰/۱۴۲۷	(meq/l)	$\text{Na}^+$	
۰/۰۷	۰/۰۵	۱۳۷۴/۱۳۷۵	۰/۰۸	۰/۰۳	۱۳۸۴/۱۳۸۵	۱۳۶۴/۱۳۶۵	۰/۱۵۲۱	(meq/l)	$\text{K}^+$	
۹۳۸/۷۰	۷۵۶/۰۷	۱۳۷۴/۱۳۷۵	۱۰۳۸/۷۰	۸۰۶/۴۹	۱۳۸۶/۱۳۸۷	۱۳۸۵/۱۳۸۶	۰/۱۲۸۵	(mg/l)	TDS	عرب‌اسد
۱۶۶۹/۰۰	۱۲۵۹/۰۰	۱۳۸۵/۱۳۸۶	۱۶۵۴/۷۰	۱۲۴۸/۵۰	۱۳۸۶/۱۳۸۷	۱۳۸۴/۱۳۸۵	۰/۱۳۲۳	( $\mu\text{mho/cm}$ )	EC	
۷/۸۱	۸/۰۹	۱۳۷۹/۱۳۸۰	۷/۷۴	۸/۱۰	۱۳۸۷/۱۳۸۸	۱۳۷۷/۱۳۷۸	۰/۱۶۷۷	(-)	pH	
۲/۸۶	۲/۶۰	۱۳۸۲/۱۳۸۳	-	-	-	-	۰/۰۳۷۲	(meq/l)	$\text{HCO}_3^-$	
۹/۶۰	۶/۷۱	۱۳۸۵/۱۳۸۶	۹/۴۹	۶/۶۹	۱۳۸۶/۱۳۸۷	۱۳۸۴/۱۳۸۵	۰/۱۲۸۲	(meq/l)	$\text{Cl}^-$	
۴/۰۹	۳/۰۲	۱۳۸۱/۱۳۸۲	۴/۴۹	۳/۰۲	۱۳۹۰/۱۳۹۱	۱۳۸۰/۱۳۸۱	۰/۱۱۱۱	(meq/l)	$\text{SO}_4^{2-}$	
۵/۲۳	۳/۷۲	۱۳۸۱/۱۳۸۲	۵/۳۰	۳/۴۵	۱۳۹۱/۱۳۹۲	۱۳۷۱/۱۳۷۲	۰/۱۷۰۸	(meq/l)	$\text{Ca}^{+2}$	
-	-	-	-	-	-	-	۰/۰۰۳۲	(meq/l)	$\text{Mg}^{+2}$	
۹/۳۹	۶/۶۶	۱۳۸۵/۱۳۸۶	۹/۲۹	۶/۶۴	۱۳۸۶/۱۳۸۷	۱۳۸۴/۱۳۸۵	۰/۱۱۲۳	(meq/l)	$\text{Na}^+$	
۰/۰۶	۰/۰۵	۱۳۷۵/۱۳۷۶	۰/۰۶	۰/۰۵	۱۳۶۸/۱۳۶۹	۱۳۶۷/۱۳۶۸	۰/۰۵۶۸	(meq/l)	$\text{K}^+$	





شکل ۲- سری زمانی پارامتر EC به همراه میانگین‌های قبل و بعد از نقطه شکست و سری زمانی دبی سالانه ایستگاه‌های گتوند و عرب‌اسد

آزمون Pettit مشاهده می‌شود که سری زمانی  $\text{HCO}_3^-$  در هر سه ایستگاه دارای نقطه شکست بوده و زمان شناسایی شده برای هر سه ایستگاه مربوط به اوایل دهه ۸۰ است.

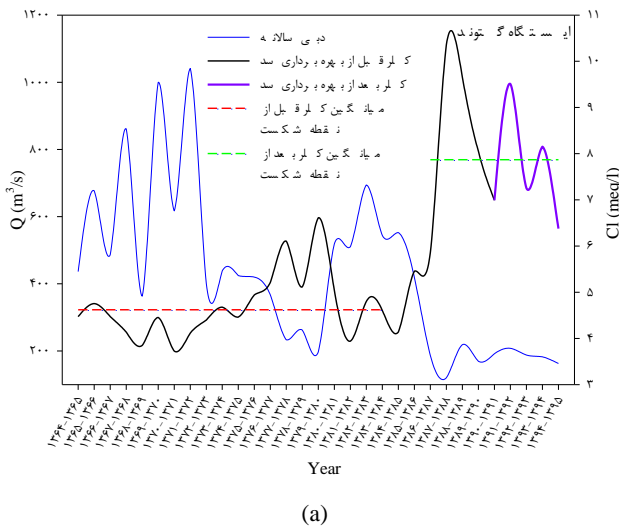
آزمون Lombard برای سری‌های زمانی کلر ایستگاه‌های مورد مطالعه، وجود یک تغییر تدریجی را تایید می‌نماید. با توجه به نتایج آزمون Lombard، پارامتر کلر دو ایستگاه گتوند و گرگر در سال‌های ۱۳۸۳-۱۳۸۴ (اولین نقطه شکست) و ۱۳۸۶-۱۳۸۷ (دومین نقطه شکست) را تجربه کرده‌اند. زمان شناسایی شده توسط آزمون Pettit با نتایج آزمون Lombard مطابقت دارد. از جمله دلایلی که می‌تواند برای علت وقوع تغییر در میانگین سری زمانی کلر سه ایستگاه برشمرد، خشکسالی هیدرولوژیکی و کاهش دبی رودخانه کارون است که باعث تغییر غلظت کلر و به دنبال آن وقوع تغییر در میانگین سری زمانی شده است. افزایش غلظت کلر رودخانه‌های کلرادو در شرایط

### آنیون‌ها ( $\text{HCO}_3^-$ و $\text{SO}_4^{2-}$ ، $\text{Cl}^-$ )

همان‌طور که در جدول ۴ نشان داده شده است، براساس نتایج آزمون Lombard، تقریباً ۶۷٪ از آنیون‌ها دارای یک تغییر تدریجی و ۲۲٪ از آنیون‌ها دارای یک تغییر ناگهانی بودند. در ایستگاه‌های گتوند و گرگر دو پارامتر  $\text{HCO}_3^-$  و  $\text{Cl}^-$  دارای یک تغییر تدریجی و پارامتر  $\text{SO}_4^{2-}$  دارای تغییر ناگهانی شناسایی شدند. پارامتر  $\text{HCO}_3^-$  ایستگاه عرب‌اسد براساس نتایج آزمون Lombard فاقد نقطه شکست و دو آنیون دیگر این ایستگاه نیز تغییر تدریجی داشته‌اند.

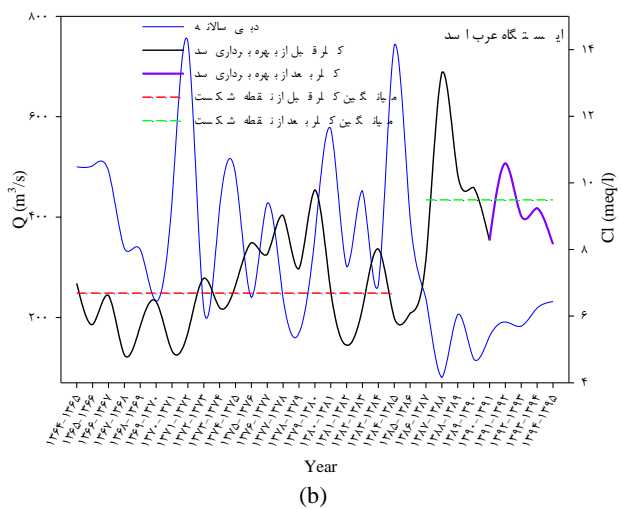
اولین نقطه شکست در سری‌های زمانی پارامتر  $\text{HCO}_3^-$  دو ایستگاه گتوند و گرگر به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۹-۱۳۷۹ و ۱۳۷۸ ۱۳۷۸ به وقوع پیوسته است. این سال‌ها با خشکسالی‌های اواخر دهه ۷۰ و اواسط دهه ۸۰ همخوانی دارند. با توجه به جدول ۴ و نتایج

ایستگاه عرب‌اسد، هم‌زمان با آبیگری سد به وقوع پیوسته است. افزایش سطح و زمان تماس آب با خاک در مخزن سد باعث حل شدن گچ موجود در خاک شده و همین عامل باعث افزایش مقدار  $SO_4^{2-}$  شده است. با توجه به توضیحات ارائه شده می‌توان چنین استنباط کرد که خشکسالی (و در نتیجه تغییر غلظت پارامترهای کیفی جریان رودخانه) یکی از دلایل عمده افت کیفی جریان رودخانه کارون و ایجاد تغییر در میانگین سری زمانی پارامترها کیفی آب است. تغییر غلظت  $SO_4^{2-}$  در شرایط خشکسالی نیز توسط مایر و همکاران گزارش شده است (Mayer et al., 2010).



خشکسالی در مطالعه هان ساکر و جانسون مورد تایید قرار گرفته و با نتایج مطالعه حاضر نیز همخوانی دارد (Hunsaker and Johnson, 2017).

براساس نتایج آزمون Lombard، سری زمانی  $SO_4^{2-}$  در دو ایستگاه گتوند و گرگر دارای نقطه شکست ناگهانی و در ایستگاه عرب‌اسد دارای نقطه شکست تدریجی بوده است. زمان‌های شناسایی شده توسط آزمون Pettit نیز هم‌خوانی مناسبی با نتایج آزمون Lombard دارد. تمامی نقاط شکست محاسبه شده برای سری زمانی  $SO_4^{2-}$  با دوره‌های خشکسالی مطابقت دارند اما دومین نقطه شکست



شکل ۳- سری زمانی پارامتر  $Cl^-$  به همراه میانگین‌های قبل و بعد از نقطه شکست و سری زمانی دبی سالانه ایستگاه‌های گتوند و عرب‌اسد

غلظت پارامتر اشاره کرد. نقاط شکستی که در نیمه دوم دهه ۷۰ و ۸۰ شناسایی شدند با شرایط خشکسالی هم‌زمان بوده‌اند. هان ساکر و جانسون به تغییرات غلظت کلسیم در دوره‌های خشکسالی اشاره کرده‌اند (Hunsaker and Johnson, 2017).

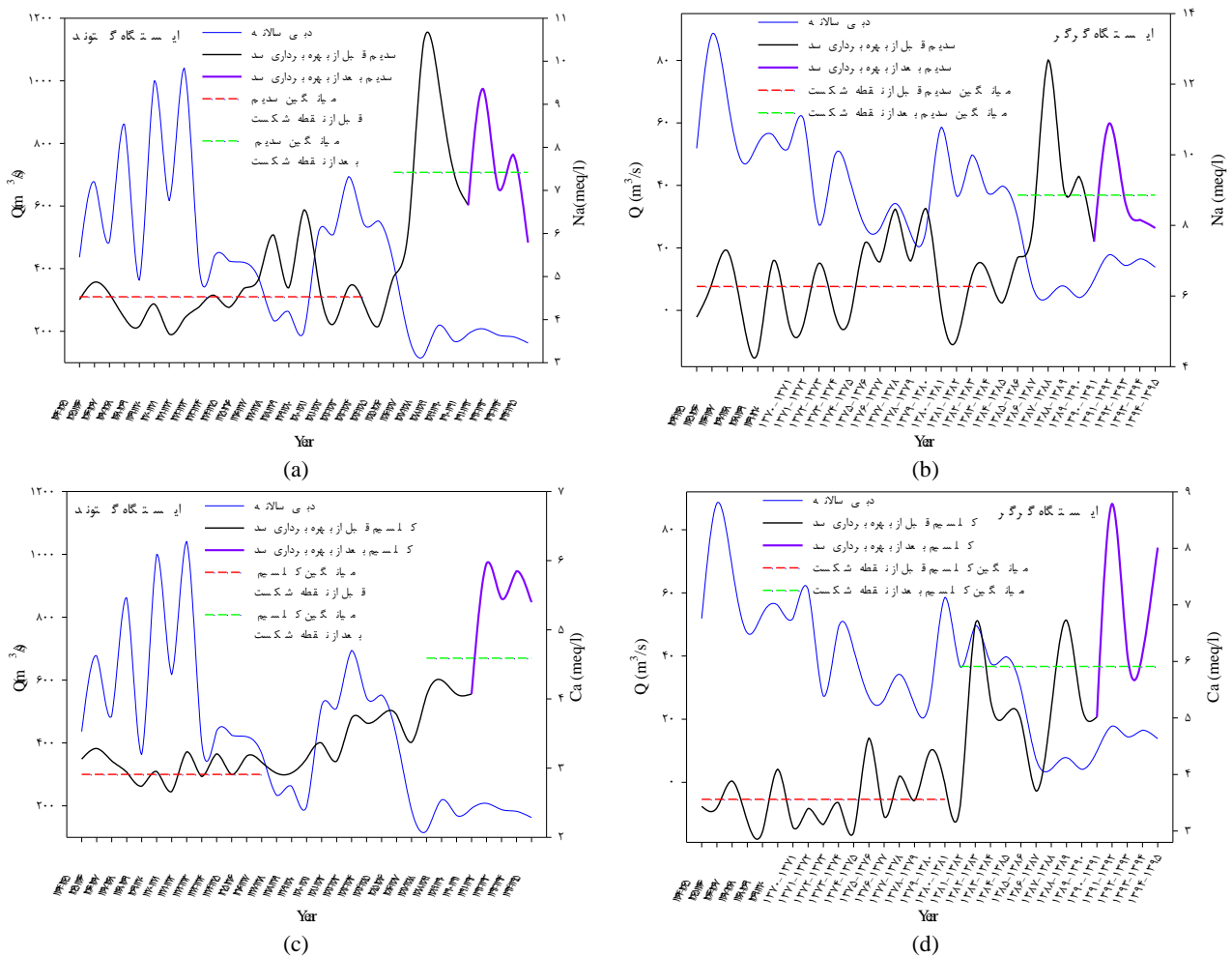
نتایج دو آزمون تعیین نقطه شکست برای پارامتر  $Na^+$  شبیه به یکدیگر بود به‌صورتی که براساس نتایج آزمون Lombard یون سدیم در دو ایستگاه گتوند (شکل a.۴) و گرگر (شکل b.۴) دارای یک تغییر تدریجی در سال‌های ۱۳۸۴-۱۳۸۳ و ۱۳۸۷-۱۳۸۶ بوده است. همچنین آزمون Pettit نیز سال ۱۳۸۵-۱۳۸۴ را به‌عنوان زمان تغییر ناگهانی میانگین این پارامتر در دو ایستگاه گتوند و گرگر شناسایی نمود. مایر و همکاران تاثیر خشکسالی را بر غلظت سدیم گزارش کرده‌اند (Mayer et al., 2010).

با توجه به نتایج حاصل از آزمون Lombard (جدول ۴) زمان وقوع نقطه شکست در سری زمانی  $K^+$  اکثراً مربوط به دهه ۶۰ بوده اما در مقابل آزمون Pettit سال‌های اواسط دهه ۷۰ را به‌عنوان زمان‌های تغییر در روند پارامتر کیفی  $K^+$  معرفی می‌نماید.

### کاتیون‌ها ( $K^+$ ، $Na^+$ ، $Mg^{2+}$ ، $Ca^{2+}$ )

نتایج حاصل از دو آزمون Lombard و Pettit نشان دهنده آن است که به‌ترتیب در ۷۵٪ و ۹۲٪ از سری زمانی کاتیون‌ها تغییرات ناگهانی روی داده است. شایان ذکر است که آزمون Lombard تقریباً در ۱۷٪ از کاتیون‌ها یک تغییر ناگهانی و در ۵۰٪ از کاتیون‌ها یک تغییر تدریجی را نشان می‌دهد.

با توجه به جدول ۴، آزمون Pettit سال ۱۳۸۲-۱۳۸۱ را به‌عنوان نقطه شکست ناگهانی سری زمانی کلسیم در هر سه ایستگاه تعیین کرده است. نتایج دو آزمون نقطه شکست در مورد این کاتیون تفاوت بسیار زیادی با هم دارند. به‌عنوان نمونه آزمون Lombard برای سری زمانی  $Ca^{2+}$  ایستگاه گتوند (شکل c.۲) دو سال ۱۳۷۷-۱۳۷۶ و ۱۳۸۸-۱۳۸۷ را به‌عنوان نقطه شکست معرفی می‌نماید. همچنین برای دو ایستگاه گرگر (شکل d.۲) و عرب‌اسد نیز اولین نقطه شکست را در اوایل دهه ۷۰ و دومین نقطه شکست را اوایل دهه ۹۰ نشان می‌دهد. در مورد دلایل وقوع نقطه شکست در سری زمانی این کاتیون هم می‌توان به خشکسالی و کاهش دبی و در نتیجه تغییر



شکل ۴- سری زمانی پارامترهای  $\text{Na}^+$  و  $\text{Ca}^{+2}$  به همراه میانگین‌های قبل و بعد از نقطه شکست و سری زمانی دبی سالانه ایستگاه‌های گونوند و گرگر

## نتیجه‌گیری

بودند. همچنین آزمون Lombard نشان داد که به ترتیب ۲۰٪ و ۶۳٪ از پارامترها یک تغییر ناگهانی و تدریجی را تجربه کرده‌اند. ۳- بیشتر نقاط شکست شناسایی شده، با دوره‌های خشکسالی مطابقت داشته و این نتایج نشان می‌دهد که در ایستگاه‌های مورد بررسی پدیده خشکسالی و کاهش دبی عامل اصلی ایجاد تغییرات در میانگین پارامترهای کیفی بوده است. ۴- زمان شناسایی شده دومین نقطه شکست پارامترهای TDS و  $\text{Ca}^{+2}$  و EC ایستگاه گرگر و  $\text{SO}_4^{2-}$  ایستگاه عرب‌اسد با بهره‌برداری سد گتوند علیا یعنی سال آبی ۱۳۹۱-۱۳۹۰ همزمان بوده است. ۵- در بررسی زمان وقوع نقطه شکست در سری زمانی پارامترها نتایج آزمون Lombard به واقعیت نزدیک‌تر است. به‌طور مثال می‌توان به سری‌های زمانی pH و  $\text{HCO}_3^-$  در ایستگاه‌های گونوند و گرگر اشاره کرد که آزمون Lombard دو زمان برای تغییر میانگین این سری‌های شناسایی کرد که هر دو مصادف بودند با شرایط

در این تحقیق تلاش شد که روند زمانی تغییرات پارامترهای کیفی سه ایستگاه پایین دست سد گتوند علیا و همچنین زمان وقوع تغییرات ناگهانی و تدریجی در میانگین سری زمانی پارامترهای کیفی تعیین شوند. به همین منظور برای تعیین روند از آزمون ناپارامتریک من-کندال و برای شناسایی نقطه یا نقاط شکست از دو آزمون تعیین نقطه شکست Lombard و Pettit استفاده شد. از مهم‌ترین نتایج به‌دست آمده از این پژوهش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: ۱- تمامی پارامترها به جز pH دارای روند افزایشی بودند. لازم به ذکر است که ۸۰٪ از پارامترهای دارای روند مثبت معنی‌دار شناسایی شدند. روند مثبت به معنای کاهش کیفیت آب رودخانه کارون در ایستگاه‌های مورد مطالعه است. ۲- نتایج آزمون‌های نقطه شکست Lombard و Pettit نشان داد که به ترتیب ۷۶٪ و ۹۶٪ از پارامترهای کیفی دارای نقطه شکست

- Dinpashoh, Y., Mirabbasi, R., Asce, S.M., Jhajharia, D., Abianeh, H.Z., Mostafaeipour, A. 2013. Effect of short-term and long-term persistence on identification of temporal trends. *Journal of Hydrologic Engineering*. 19: 617-625.
- Golian, S., Mazdiyasi, O., AghaKouchak, A. 2015. Trends in meteorological and agricultural droughts in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*. 119: 679-688.
- Grosso, J.D., De Moraes, J.M., Beduschi, C.E., Genovez, A.M., Martinelli, L.A., Grabowski, R.C.; Gurnell, A.M. 2008. Trend analysis of water quality in some rivers with different degrees of development within the São Paulo State, Brazil. *River research and applications*. 24: 1056-1067.
- Hamed, K.H., Ramachandra Rao, A. 1998. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*. 204: 182-196.
- Huang, H., Wang, Z., Xia, F., Shang, X., Liu, Y., Zhang, M., Dahlgren, R.A., Mei, K. 2017. Water quality trend and change-point analyses using integration of locally weighted polynomial regression and segmented regression. *Environmental Science and Pollution Research*. 24: 1-11.
- Hunsaker, C.T., Johnson, D.W. 2017. Concentration-discharge relationships in headwater streams of the Sierra Nevada, California. *Water Resources Research*. 53: 1-16.
- Karamouz, M., Zahraie, B., Kerachian, R., Mahjouri, N., Moridi, A. 2006. Development of a master plan for industrial solid waste management. *International Journal of Environmental Science & Technology*. 3: 229-242.
- Kisi, O., Ay, M. 2014. Comparison of Mann-Kendall and innovative trend method for water quality parameters of the Kizilirmak River, Turkey. *Journal of Hydrology*. 513: 362-375.
- Mayer, B., Shanley, J.B., Bailey, S.W., Mitchell, M.J. 2010. Identifying sources of stream water sulfate after a summer drought in the Sleepers River watershed (Vermont, USA) using hydrological, chemical, and isotopic techniques. *Applied Geochemistry*. 25: 747-754.
- Mosley, L.M. 2015. Drought impacts on the water quality of freshwater systems; review and integration. *Earth-Science Reviews*. 140: 203-214.
- Pimpunchat, B., Sweatman, W.L., Wake, G.C., Triampo, W., Parshotam, A. 2009. A mathematical model for pollution in a river and its remediation by aeration. *Applied Mathematics Letters*. 22: 304-308.
- Quessy, J.-F., Favre, A.-C., Saïd, M., Champagne, M. 2011. Statistical inference in Lombard's smooth-change model. *Environmetrics*. 22: 882-893.
- Roth, T., Kohli, L., Rihm, B., Meier, R., Achermann, B. خشکسالی ولی آزمون Pettit اوایل دهه ۸۰ را به عنوان نقطه شکست این دو سری شناسایی کرد. لذا می توان نتیجه گرفت که در بررسی نقطه شکست پارامترهای کیفی، نتایج آزمون Lombard واقعی تر و منطقی تر به نظر می رسند.
- ### منابع
- حسینی زارع، ن و سعادت، ن. ۱۳۸۷. اثر خشکسالی سال آبی ۸۷-۸۶ بر کمیت و کیفیت منابع آب در استان خوزستان. سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه تبریز، ۲۳ الی ۲۵ مهر، تبریز.
- حسینی زارع، ن و سعادت، ن. ۱۳۸۰. اثرات خشکسالی بر کیفیت منابع آب رودخانه های کارون و دز در استان خوزستان. اولین کنفرانس ملی بررسی راهکارهای مقابله با بحران آب، دانشگاه زابل.
- Al-Taani, A.A. 2014. Trend analysis in water quality of Al-Wehda Dam, north of Jordan. *Environmental Monitoring and Assessment*. 186: 6223-6239.
- Azizabadi Farahani, M., Khalili, D. 2013. Seasonality Characteristics and Spatio-temporal Trends of 7-day Low Flows in a Large, Semi-arid Watershed. *Water Resources Management*. 27: 4897-4911.
- Ba, A., McKenna, S.A. 2015. Water quality monitoring with online change-point detection methods. *Journal of Hydro informatics*. 17: 7-19.
- Bouza-Deaño, R., Ternero-Rodríguez, M., Fernández-Espinosa, A.J. 2008. Trend study and assessment of surface water quality in the Ebro River (Spain). *Journal of Hydrology*. 361: 227-239.
- Caruso, B.S. 2002. Temporal and spatial patterns of extreme low flows and effects on stream ecosystems in Otago, New Zealand. *Journal of Hydrology*. 257: 115-133.
- Chai, C., Yu, Z., Shen, Z., Song, X., Cao, X., Yao, Y. 2009. Nutrient characteristics in the Yangtze River Estuary and the adjacent East China Sea before and after impoundment of the Three Gorges Dam. *Science of the Total Environment*. 407: 4687-4695.
- Chappell, N.A., Jones, T.D., Tych, W. 2017. Sampling frequency for water quality variables in streams: Systems analysis to quantify minimum monitoring rates. *Water Research*. 123: 49-57.
- Costa, M., Gon, A.M., Gonçalves, A.M., Teixeira, L., Gon, A.M., Gonçalves, A.M., Teixeira, L. 2016. Change-point detection in environmental time series based on the informational approach. *Electron. Electronic Journal of Applied Statistical Analysis*. 9: 267-296.
- Dinpasho, Y., Fard, A.F., Hassanpoor, M.A., Vayghan, V.B. 2014. Trend Analysis of Groundwater Quality of Shabestar- Soofian Plain. *Journal of Irrigation Science and Engineering*. 38:55-69.

- Journal of the American Water Resources Association. 41: 11-24.
- Tabari,H., Marofi,S., Ahmadi,M. 2011. Long-term variations of water quality parameters in the Maroon River, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*. 177: 273-287.
- Zamani,R., Mirabbasi,R., Abdollahi,S., Jhajharia,D. 2017. Streamflow trend analysis by considering autocorrelation structure, long-term persistence, and Hurst coefficient in a semi-arid region of Iran. *Theoretical and Applied Climatology*. 129: 33-45.
- Zhao,J., Fu,G., Lei,K., Li,Y. 2011. Multivariate analysis of surface water quality in the Three Gorges area of China and implications for water management. *Journal of Environmental Sciences*. 23: 1460-1471.
- ZIELIŃSKI,P., GÓRNIAK,A., Piekarski,M.K. 2009. The effect of hydrological drought on chemical quality of water and dissolved organic carbon concentrations in lowland rivers. *Polish Journal of Ecology*. 57:217-227.
2017. Using change-point models to estimate empirical critical loads for nitrogen in mountain ecosystems. *Environmental Pollution*. 220: 1480-1487.
- Rougé,C., Ge,Y., Cai,X. 2013. Detecting gradual and abrupt changes in hydrological records. *Advances in Water Resources*. 53: 33-44. -
- Salmani,M.H., Jajaei,E.S. 2016. Forecasting models for flow and total dissolved solids in Karoun river-Iran. *Journal of Hydrology*. 535: 148-159.
- Sharma,S., Swayne,D.A., Obimbo,C. 2016. Trend analysis and change point techniques: a survey. *Energy, Ecology and Environment*. 1: 123-130.
- Singh,K.P., Malik,A., Mohan,D., Sinha,S. 2004. Multivariate statistical techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality of Gomti River (India) - A case study. *Water Research*. 38: 3980-3992.
- Sprague, L.A. 2005. Drought Effects on Water Quality in the South Platte River Basin, Colorado. JAWRA

## Detecting Abrupt and Gradual Changes in Water Quality Parameters at the Downstream Stations of Gotvand–Olia Dam

H. Rahmati<sup>\*1</sup>, S. Boroomand-Nasab<sup>2</sup>, Z. Izadpanah<sup>3</sup>, M. Albaji<sup>3</sup>

Received: Dec.26, 2017

Accepted: Feb.05, 2018

### Abstract

In this study, the trend of changes in water quality parameters of Karoon River was investigated at three downstream stations of Gotvand-Olia Dam using Mann-Kendall test. In addition, Theil-Sen test was employed to determine the slope of the trend line. Furthermore, two change point tests including Pettit and Lombard tests were used to detect the abrupt and gradual change point of quality parameters time series. The results of Mann-Kendall test showed that apart from pH, all of the parameters were of a positive trend in the studied period 1985 to 2016. Notably, that 80% of the parameters had a significant positive trend. The results of the slope test showed that water quality in Karoon River has been decreasing in all the three stations. The results of Lombard and Pettit tests respectively showed that 76% and 96% of the parameters had a change point. Moreover, the Lombard test detected that 20% and 63% of the parameters experienced abrupt and gradual changes, respectively. Hydrological conditions such as the droughts happened in the late 70's and the mid-80's can be mentioned as one of the reasons identified for the cause of the change point in the time series of parameters.

**Keywords:** Mann-Kendal test, Pettit and Lombard change point tests, Karoon River

---

1 - PhD Candidate of Irrigation and Drainage Engineering, Faculty of Water Science Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz

2 - Professor, Department of Irrigation and Drainage Engineering, Faculty of Water Science Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz

3 - Assistant professor, Department of Irrigation and Drainage Engineering, Faculty of Water Science Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz

(\* - Corresponding Author: Hosein.Rahmati86@gmail.com)