

## *Impact of Climate Change on Organic Carbon Removal Efficiency in Jajrood Catchment: From Dam to Water Treatment Plant*

Anoushirvan Mohseni-Bandpei<sup>1,2</sup>,  
Mohsen Nasser<sup>3</sup>,  
Mohammad Rafiee<sup>1,4</sup>,  
Mohsen Eslamizadeh<sup>5</sup>,  
Yalda Hashempour<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Environmental and Occupational Hazards Control Research Center, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Professor, Department of Environmental Health Engineering, School of Health and Safety, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Environmental Engineering, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>4</sup> Assistant Professor, Department of Environmental Health Engineering, School of Health and Safety, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

<sup>5</sup> PhD in Environmental Engineering, Department of Water Quality Control, Tehran Regional Water Organization, Tehran, Iran

<sup>6</sup> Assistant Professor, Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran

(Received June 10, 2019 ; Accepted October 13, 2020)

### **Abstract**

**Background and purpose:** Jajrood River is one of the major drinking water supply rivers in Tehran, so, the effects of climate change on its quantitative and qualitative resources are highly important. This study aimed at investigating the effect of climate change on organic carbon removal in Jajrood basin.

**Materials and methods:** In this descriptive cross-sectional study, CanESM2 general circulation model and SDSM (version 5.3) downscaling model were used for simulating climatic data and HYMOD model was used to simulate runoff in Jajrood catchment. Climate change scenarios RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5 were simulated for 2006-2050. Stepwise regression and linear regression were used in MATLAB R2017a to model the qualitative data.

**Results:** According to findings, the temperature of this basin will be about 2.25°C warmer than the base period. Rainfall and runoff in the whole catchment will increase by about 10% and 93% and the concentrations of total organic carbon of the inlet to the treatment plant will be about three times higher than the base period which will increase the load on carbon in different units of the treatment plant.

**Conclusion:** Increased rainfall caused by washing the upstream agricultural lands and temperature increase due to elevated rate of bioactivity lead to deterioration of the quality of water entering the dam and increase the organic carbon entering the treatment plant. On the other hand, Tehranpars water treatment plant with its current capacity and efficiency will not meet the standards of drinking water in terms of organic carbon.

**Keywords:** climate change, organic carbon, Jajrood, Latyan Dam, treatment plant

J Mazandaran Univ Med Sci 2020; 30 (191): (Persian).

\* Corresponding Author: Yalda Hashempour - Faculty of Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran  
(E-mail: Y.Hashempour@mazums.ac.ir)

## بررسی اثر تغییر اقلیم بر راندمان حذف مواد آلی کربنی در حوضه آبریز جاجرود: از سد تا تصفیه خانه آب

انوشیروان محسنی بندپی<sup>2و1</sup>

محسن ناصری<sup>3</sup>

محمد رفیعی<sup>4و1</sup>

محسن اسلامی زاده<sup>5</sup>

یلدا هاشم پور<sup>6</sup>

### چکیده

**سابقه و هدف:** با توجه به این که رودخانه جاجرود یکی از رودخانه‌های مهم تأمین کننده آب شرب شهر تهران است، ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر خصوصیات کمی و کیفی آن از اهمیت فراوانی برخوردار است. این مطالعه با هدف بررسی اثر تغییر اقلیم بر راندمان حذف مواد آلی کربنی در حوضه آبریز جاجرود انجام پذیرفت.

**مواد و روش‌ها:** در این مطالعه توصیفی-مقطعی، مدل گردش عمومی CanESM2 و مدل ریزمقیاس‌سازی SDSM و مدل HYMOD به ترتیب برای شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی و میزان رواناب در حوضه جاجرود مورد استفاده قرار گرفتند. اثر سناریوهای تغییر اقلیمی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 برای دوره 2006 تا 2050 شبیه‌سازی شدند. به منظور مدل‌سازی داده‌های کیفی از مدل رگرسیون گام‌به‌گام (STWR) و رگرسیون خطی (LM) در محیط نرم افزار MATLAB استفاده شد. **یافته‌ها:** نتایج نشان داد که دمای این حوضه در افق آینده حدود 2/25 درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه گرم‌تر می‌شود. میزان بارش و رواناب نیز در کل حوضه آبریز جاجرود به ترتیب به میزان 10 میلی‌متر و 93 درصد و غلظت کربن آلی کل ورودی به تصفیه‌خانه حدود 3 برابر افزایش خواهد یافت که سبب افزایش بارگذاری کربن در واحدهای مختلف تصفیه‌خانه خواهد شد.

**استنتاج:** افزایش بارندگی از طریق شستشوی زمین‌های کشاورزی بالا دست و افزایش دما از طریق افزایش فعل‌وانفعالات زیستی از عوامل بدتر شدن کیفیت آب ورودی به سد و افزایش کربن آلی ورودی به تصفیه‌خانه هستند. از طرف دیگر تصفیه‌خانه آب تهران پارس با راندمان فعلی استانداردهای آب آشامیدنی را از نظر کربن آلی تأمین نخواهد کرد.

**واژه‌های کلیدی:** تغییر اقلیم، کربن آلی، جاجرود، سد لتیان، تصفیه خانه

### مقدمه

تغییر اقلیم نشان‌دهنده تغییرات غیرعادی در اقلیم درون اتمسفر زمین و پیامدهای ناشی از آن در قسمت‌های مختلف کره زمین در بلندمدت است (2،1). بدون تردید تغییر اقلیم مهم‌ترین چالش دوران فعلی آب و هوایی

E-mail: Y.Hashempour@mazums.ac.ir:

**مؤلف مسئول:** یلدا هاشم پور - ساری: 17 کیلومتر جاده فرح آباد، مجتمع دانشگاهی پیامبر اعظم، دانشکده بهداشت

1. استاد، مرکز تحقیقات کنترل عوامل زیان آور محیط و کار، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران

2. استاد، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده ایمنی و بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران

3. استادیار، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

4. استادیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده ایمنی و بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران

5. دکتری مهندسی محیط زیست، شرکت سهامی آب منطقه ای تهران، تهران، ایران

6. استادیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران

تاریخ دریافت: 1399/3/21 تاریخ ارجاع جهت اصلاحات: 1399/3/25 تاریخ تصویب: 1399/7/22

بوده و اثرات بالقوه مهمی بر روی جوامع انسانی، گیاهی و حیوانی به ویژه در بخش منابع آبی در پی دارد (4,3). این تغییر متأثر از اثرات متقابلی چون فعالیت‌های خورشیدی، آتشفشان‌ها، اقیانوس‌ها، و افزایش گازهای گلخانه‌ای در جو است (5,3). تغییر الگوی بارش از برف به باران، جاری شدن سیل، فرسایش رودخانه‌ها و سواحل دریاچه‌ها، تغییر الگوی مکانی-زمانی بارش، افزایش میزان تبخیر از منابع آب سطحی، خشکسالی و کاهش کمیت و کیفیت منابع آبی و افزایش هزینه‌های تصفیه آب بیانگر آسیب‌پذیری منابع آبی در مواجهه با تغییر اقلیم است (7,6). تغییر اقلیم سبب می‌شود که داده‌ها و اطلاعات جمع‌آوری شده در گذشته نیز که مبنای طراحی سازه‌های آبی و سایر سازه‌ها است، دیگر شاخص مطمئنی برای شناسایی رفتار منابع آب و ابنیه وابسته در آینده نباشند (8). تغییر اقلیم و افزایش بارش‌های سنگین و سیل می‌تواند نشت آلاینده‌ها از زمین‌های کشاورزی، مکان‌های دارای آلودگی سمی یا رواناب‌ها به داخل منابع آبی و تجهیزات ذخیره سازی را به دنبال داشته باشد که در نتیجه، ورود این رواناب‌ها به منابع آبی سطحی منجر به رشد بیش از حد گیاهان آبی و جلبک‌ها (تغذیه گرای) شده و جوامع مصرف‌کننده این آب‌ها را در معرض پیامدهای سوء و جدی آن قرار می‌دهد (8-11). تغییر اقلیم علاوه بر تأثیر بر روی ساختار فیزیکی و شیمیایی آب، بر روی ساختار زیستی آن نیز اثرگذار است (9). جلبک‌ها، باکتری‌ها و اکتینومیسیت‌ها عواملی هستند که در آب‌های سطحی حضور داشته و در شرایط شکوفایی جمعیتی این ارگانیسم‌ها، جرم سلولی و مواد مترشح ناشی از آن‌ها می‌تواند به صورت چشمگیری در مقدار کربن آلی آب نقش ایفا نماید (12,13). بنابراین این ارگانیسم‌ها به تغییرات زیست محیطی زود پاسخ داده و دینامیک جمعیت آن‌ها تحت تأثیر تغییرات اقلیم خواهد بود (14). تغییر در غلظت کربن آلی کل بر روی پارامترهای شیمیایی و خصوصیات فیزیکی از جمله خواص نوری و گرمایی آب تأثیرگذار است. لذا تخمین غلظت کربن

آلی کل و یا تعیین موازنه جرمی آن در منابع آبی برای بررسی سیستم‌های آبی بسیار حائز اهمیت است (15). کاهش کیفیت منابع آبی در اثر تغییر اقلیم و وقوع پدیده تغذیه گرای در منابع آبی منجر به افزایش بار کربن آلی کل ورودی به تصفیه خانه‌های آب و در نتیجه بروز اختلال در فرآیند تصفیه می‌شود. این ترکیبات در حین گندزدایی آب (کلر زنی و ازن زنی) می‌توانند محصولات جانبی حاصل از گندزدایی (DBPs)<sup>1</sup> از جمله تری هالومتان‌ها (THMs)<sup>2</sup> و هالو استیک اسیدها (HAAs)<sup>3</sup> را ایجاد کنند که هر دو به عنوان ترکیبات سرطان‌زا شناخته شده‌اند (15). آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا حداکثر غلظت مجاز این آلاینده‌ها را به ترتیب 80 و 60 میکرو گرم بر لیتر در مرحله اول استاندارد، 40 و 30 میکروگرم بر لیتر در مرحله دوم استاندارد در نظر گرفته است (16). در برخی موارد، به دلیل عملکرد ضعیف فرآیندهای تصفیه آب از جمله فیلتراسیون با کربن فعال گرانوله و صاف‌سازی غشایی، مواد آلی طبیعی (NOM)<sup>4</sup> وارد سیستم توزیع آب آشامیدنی شده و منجر به رشد زیستی می‌شوند که تولید رنگ، بو و مزه می‌کند و از این طریق کیفیت آب آشامیدنی را کاهش می‌دهد (17). مواد آلی به دلیل ایجاد کیفیت نامطلوب زیبا شناختی از جمله بو، مزه و رنگ، از دغدغه‌های اصلی در تصفیه آب آشامیدنی به شمار می‌روند به طوری که اثر منفی بر روی عملکرد فرآیندهای تصفیه آب (از جمله کربن فعال گرانولی، فیلتراسیون و فیلتراسیون غشایی) داشته و همچنین سبب رشد عوامل زیستی در سیستم توزیع آب می‌شوند (17).

در مطالعه‌ای که O'Driscoll و همکاران در سال 2018 اثر تغییرات اقلیم را بر کربن آلی محلول (DOC) در حوضه آبریز بویین که به عنوان منبع آب آشامیدنی در ایرلند می‌باشد، را بررسی کردند، نتایج نشان داد که به استثنای افزایش بالقوه در بارندگی شدید، بارش‌های

1 Disinfection By-Products (DBPs)

2 Trihalomethanes (THMs)

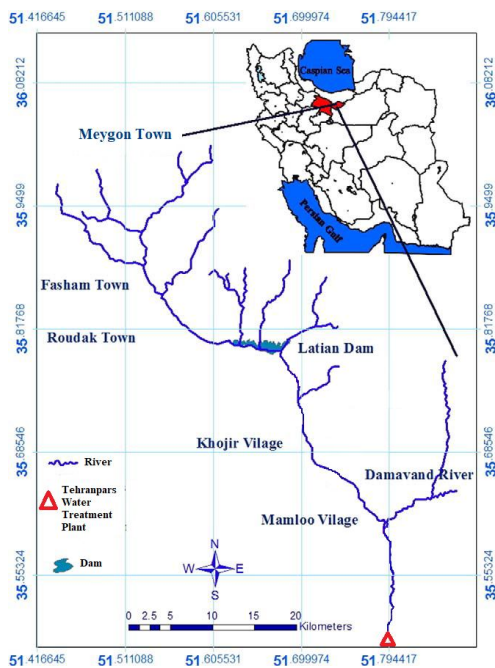
3 Haloacetic Acids (HAAs)

4 Natural Organic Matter (NOM)

22 دقیقه الی 51 درجه و 52 دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی 35 درجه و 45 دقیقه الی 36 درجه و 50 دقیقه شمالی واقع شده است، مورد بررسی قرار گرفت. مساحت این حوضه حدود 1890 کیلومتر مربع بوده که حدود 710 کیلومتر مربع در بالا دست سد لتیان و 1180 کیلومتر مربع در پایین دست سد لتیان است. رودخانه جاجرود یکی از اصلی ترین رودخانه های تغذیه کننده سد لتیان و از رودهای مهم و حیاتی استان تهران است. تصویر شماره 1 نقشه حوضه آبریز جاجرود را نشان می دهد. سد لتیان بر روی رودخانه جاجرود در 10 کیلومتری شمال شرقی تهران و در لواسانات قرار دارد. مساحت این سد، 69800 کیلومتر مربع و با متوسط جریان آب سالانه به میزان 350 میلیون متر مکعب در فاصله 5 کیلومتری شهر جاجرود قرار دارد. این سد بتنی 30 درصد از آب شرب شهر تهران را تأمین می نماید. علاوه بر این، آبیاری حدود 30 هزار هکتار اراضی کشاورزی را در برنامه خود جای داده است (12).

پیش بینی شده در آینده با آنچه در شرایط فعلی مشاهده شده بی شباهت نیستند. که علت آن افزایش پیش بینی شده در غلظت DOC است که با کاهش مربوطه در بارش و جریان رودخانه جبران می شود (10).

در مطالعه Cervi و همکاران اثر تغییر اقلیم، بر روی چشمه های آب شیرین در ایتالیا بررسی گردید که نتایج نشان داد، تغییرات در تخلیه های داخل سالانه آب های زیرزمینی، همراه با تغییر در الگوی بارندگی در حوضه های آبریز، می تواند شبکه رودخانه را از نظر رفتار هیدرولوژیکی و اکولوژیکی تحت تأثیر قرار دهد و به طور بالقوه روند شارژ مجدد سفره های آب متخلخل در دشت های آبرفتی را تغییر دهد (11). از آنجایی که در مورد تأثیر تغییر اقلیم بر کیفیت منابع آبی از لحاظ کربن آلی در ایران مطالعه ای انجام نشده است و با توجه به این که رودخانه جاجرود یکی از رودخانه های مهم تأمین کننده آب شهر تهران است، مطالعات تأثیر تغییر اقلیم بر روی آن، یکی از مهم ترین چالش های مدیریت منابع آب در قرن حاضر است و نتایج این مطالعه می تواند منجر به ایجاد برنامه های سازگاری با شرایط تغییر اقلیم در برابر اثرات احتمالی گردد. لذا بررسی روند تغییرات غلظت و بارگذاری کربن آلی آب ورودی حوضه آبریز و در نهایت ورودی به تصفیه خانه آب تهران پارس و تعیین عملکرد هر کدام از واحدهای مختلف تصفیه تحت شرایط تغییرات اقلیم بسیار حائز اهمیت است. این مطالعه با هدف بررسی اثر تغییر اقلیم بر راندمان حذف مواد آلی کربنی در حوضه آبریز جاجرود، از سد تا تصفیه خانه آب، انجام پذیرفت.



تصویر شماره 1: نقشه حوضه آبریز جاجرود (13) نمونه برداری از اطلاعات کیفی آب

## مواد و روش ها

محدوده مورد مطالعه

در این مطالعه توصیفی - مقطعی، حوضه آبریز جاجرود در حاشیه جنوبی رشته کوه های البرز در شمال شرقی شهرستان تهران بین طول جغرافیایی 51 درجه و

تصفیه خانه تهران پارس (تصفیه خانه‌های شماره 3 و 4) در شمال شرقی تهران در بلوار شهید عباسپور، در ابتدای شهرک حکیمیه واقع شده است که هر کدام با ظرفیت طراحی 4 مترمکعب بر ثانیه به بهره‌برداری رسیده است. آب خام ورودی از سد لتیان و از طریق تونل تلو به طول حدود 10 کیلومتر و قطر 2/7 متر از سد لتیان انتقال یافته که پس از انجام فرآیندهای مختلف تصفیه (پیش کلرزنی، پولساتور، فیلتراسیون و کلرزنی نهایی)، آب مناطق شرق و بخش‌هایی از شمال و مرکز و جنوب شهر تهران را تأمین می‌کند.

نمونه‌برداری به صورت هفتگی و به صورت لحظه‌ای از واحدهای مختلف تصفیه خانه از فروردین 1396 تا شهریور 1398 انجام شد. نمونه‌ها در ظروف شیشه‌ای استریل تیره جمع‌آوری و در دمای 4 درجه سانتی‌گراد به آزمایشگاه منتقل و در کم‌تر از یک هفته مورد آنالیز قرار گرفتند. دما و pH بلافاصله پس از نمونه‌برداری و در محل نمونه‌برداری با دستگاه (pH meter, WTW, inolab 720) و کدورت با دستگاه (Turbidimeter, HACH, 2100 AN) اندازه‌گیری و ثبت شد. کلروفیل a با دستگاه HPLC مدل Cecil CE4200 ساخت کشور انگلیس مستقر در محل دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی ایران اندازه‌گیری شد (14). میزان جریان این دستگاه 2 میلی‌لیتر بر دقیقه بوده که دارای تزریق‌کننده با فشار بالا و مجهز به اتوسمپلر و لوپ تزریق نمونه به میزان 100 میکرولیتر است. ستون HPLC از نوع C18 با سایز 4×5/0 سانتی‌متر و اندازه ذرات 3 میکرون برای تولید داده‌ها مورد استفاده قرار گرفت. نمونه‌ها توسط آشکار ساز از نوع UV-Vis در طول موج 440 نانومتر شناسایی و اندازه‌گیری شدند. برای اندازه‌گیری کربن آلی کل، نمونه‌ها از فیلتر سلولزی 0/45 میکرون عبور داده شدند و سپس به روش احتراق توسط دستگاه سنجش کربن آلی کل (مدل Multi N/C, 3100 ساخت کشور آلمان) مستقر در محل دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی ایران اندازه‌گیری شدند (14).

اطلاعات اقلیمی و هواشناسی مورد استفاده

داده‌های بارش (بارندگی روزانه)، دما (دمای متوسط، دمای بیشینه و دمای کمینه روزانه) و تبخیر (روزانه) شبکه ایستگاهی وزارت نیرو و سازمان هواشناسی کشور در محدوده حوضه آبریز جاجرود و اطراف آن جمع‌آوری و استفاده شد. در نهایت آمار و اطلاعات آماری پارامترهای بارندگی ده ایستگاه و دمای سه ایستگاه و تبخیر یک ایستگاه مورد قبول واقع شده و از آمار بقیه ایستگاه‌ها به‌علت عدم همگنی و تجانس آماری، پراکندگی زیاد و کوتاه مدت بودن طول دوره آماری صرف‌نظر گردید. داده‌های سری-زمانی روزانه به‌طور جداگانه برای هر متغیر اقلیمی (بارش، دما و تبخیر) برای دوره آماری 1961 تا 2005 (44 سال) به‌عنوان دوره مشاهداتی استفاده شده است. مدل داده‌های آب و هوایی جهانی CanESM2 تحت سه سناریو RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 برای دوره 2006-2050 (45 سال) مورد استفاده قرار گرفت. در مطالعه حاضر از چهار نقطه از داده‌های این شبکه به گونه‌ای که کل حوضه مدنظر را پوشش دهد استفاده شده است. در جدول شماره 1 نقاط مورد استفاده از این شبکه آورده شده است.

جدول شماره 1: اسامی نقاط GCM استفاده شده در حوضه بالا

دست سد لتیان		
ردیف	X	Y
1	(50/625 East) 19	(North 34/882°) 45
2	(50/625 East) 19	(North 37/673°) 46
3	(53/4375 East) 20	(North 34/882°) 45
4	(53/4375 East) 20	(North 37/673°) 46

ریز مقیاس سازی: با استفاده از ریز مقیاس سازی، می‌توان خروجی مدل‌ها را به متغیرهای سطحی در مقیاس حوضه مورد مطالعه تبدیل نمود (15). در این مطالعه، ریز مقیاس‌سازی اطلاعات با استفاده از مدل آماری SDSM و با استفاده از داده‌های مدل گردش عمومی CanESM2 نسل دوم انجام شده است. جزئیات این مدل در مطالعه هاشم‌پور و همکاران (2019) موجود است (16). پس از آماده‌سازی داده‌های مشاهداتی

به سد و عکس دبی خروجی از سد به عنوان متغیر مستقل و کربن آلی کل به عنوان متغیر وابسته انتخاب شدند. 60 درصد از اطلاعات به منظور کالیبراسیون و 40 درصد مابقی با هدف اعتبارسنجی مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. به منظور مقایسه و ارزیابی عملکرد مدل‌های مورد بررسی در مطالعه حاضر از معیارهای میانگین مربع خطاها (MSE)<sup>7</sup>، ضریب همبستگی (CC)<sup>8</sup> و معیار اطلاعات Akaike (AIC)<sup>9</sup> استفاده شده است. معادله شماره 1 و معادله شماره 2، نحوه محاسبه این معیارها را نشان می‌دهد.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \quad \text{معادله شماره 1:}$$

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - O)(P_i - P)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - P)^2}} \quad \text{معادله شماره 2:}$$

در معادله شماره 1 و معادله شماره 2،  $O_i$  مقدار مشاهداتی،  $P_i$  مقدار پیش‌بینی شده با مدل،  $O$  میانگین مقادیر مشاهداتی،  $P$  میانگین مقادیر پیش‌بینی شده با مدل و  $n$  تعداد مقادیر مشاهداتی یا پیش‌بینی شده است. هر اندازه مقدار MSE به صفر و مقدار CC به یک نزدیک تر باشد، کارایی و دقت مدل بیش تر است (18). شاخص AIC میزان اطلاعات نسبی از بین رفته توسط مدل (کارایی در مقابل متغیرها و نمونه‌های مورد بررسی) را نشان می‌دهد. بنابراین، هر چقدر این شاخص کوچک تر باشد، مدل کیفیت بالاتری دارد (معادله شماره 3) (17).

$$AIC = n \times \ln\left(\frac{MSE}{n}\right) + 2p \quad \text{معادله شماره 3:}$$

در معادله شماره 3،  $n$  تعداد نمونه‌ها و  $P$  تعداد پارامترهای ورودی به مدل است. شبیه‌سازی پارامترهای کیفی سد لتیان برای افق آینده: به منظور شبیه‌سازی دبی ورودی و خروجی از سد لتیان از مدل کالیبره شده HYMOD با استفاده از الگوریتم ژنتیک استفاده شد. از طرفی دیگر، سد لتیان دارای 6 دریچه خروج آب است

ایستگاهی، باید تعدادی از متغیرها به عنوان پیشگو برای ورود به مدل شناسایی شوند. در این مطالعه به منظور انتخاب مناسب‌ترین پیشگوها از روش شاخص میانگین متقابل اطلاعات (AMI) استفاده شد.

مدل HYMOD: در این مطالعه، مدل‌سازی بارش - رواناب با استفاده از مدل مفهومی HYMOD انجام شده که توسط الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شده است. بدین ترتیب که، ابتدا متغیرهای تصمیم یا پارامترهای مدل شامل میزان بیشترین ذخیره رطوبتی در حوضه بر حسب میلی‌متر ( $C_{max}$ )، تغییرات مکانی ذخیره رطوبت خاک (bexp)، فاکتور توزیع بین دو مخزن رطوبتی (Alpha)، زمان ماندگاری در مخزن جریان آرام بر حسب روز ( $R_s$ ) و زمان ماندگاری در مخزن جریان سریع بر حسب روز ( $R_q$ ) در محدوده مشخص شده به صورت تصادفی نمونه‌گیری شده، سپس الگوریتم بهینه‌سازی اجرا و پارامترهای بهینه محاسبه شد. جزئیات این مدل در مطالعه هاشم‌پور و همکاران در سال 2019 قابل دسترسی است (16). با هدف مقایسه و ارزیابی عملکرد مدل HYMOD در مطالعه حاضر از معیارهای میانگین مربع خطاها (MSE) و ضریب همبستگی (CC) استفاده شد. هر اندازه مقدار MSE به صفر و مقدار CC به یک نزدیک تر باشد، مدل کارتر و دقت بهتری دارد (17).

#### مدل‌سازی و شبیه‌سازی کیفی سد لتیان

مدل‌سازی کربن آلی کل در سد لتیان: داده‌های مربوط به کربن آلی کل سد لتیان از تاریخ 27 مهر 1391 تا 20 تیر 1397 از شرکت آب منطقه‌ای تهران اخذ شد. با هدف مدل‌سازی این داده‌ها در سد لتیان از مدل رگرسیون گام‌به‌گام (STWR)<sup>5</sup> و مدل خطی (LM)<sup>6</sup> در محیط نرم افزار MATLAB مدل R2017a استفاده شد. متغیرهای دبی ورودی به سد (متر مکعب بر ثانیه)، دبی خروجی از سد (متر مکعب بر ثانیه)، عکس دبی ورودی

3. Mean Square Error (MSE)  
4. Correlation Coefficient (CC)  
5. Akaike information criterion (AIC)

1. Stepwise Regression (STWR)  
2. Linear Model (LM)

## یافته ها

## انتخاب پیشگوهای اقلیمی

در این مطالعه متغیرهای اقلیمی بارش و دما (دمای بیشینه و کمینه) و تبخیر با توجه به نیاز به آن‌ها در مدل سازی، مورد توجه بوده است. از آنجایی که داده‌های تبخیر برای ورود به مدل اقلیم مناسب نبودند، لذا پارامتر تبخیر حذف شده و مدل اقلیم با دو متغیر بارش و دما برای آینده و متأثر از سناریوهای تغییر اقلیم تصویرسازی شده است. جدول شماره 2، پیشگوهای منتخب به منظور کاهش مقیاس بارش و دما در ایستگاه‌های منتخب را ارائه نموده است. در این جدول پیشگوهایی که بالاترین ضریب همبستگی خطی را با داده‌های بارش و دما در ایستگاه‌های مشاهداتی داشته‌اند، انتخاب شده‌اند.

شبیه سازی و پیش‌بینی شرایط اقلیمی برای سال 2050 با توجه به نمودار شماره 1، متوسط بارندگی سالیانه برای کل حوضه در دوره مشاهداتی برابر 650/75 میلی‌متر است. در صورتی که متوسط بارش سالانه شبیه‌سازی شده برای افق آینده 660/39 میلی‌متر (با سناریو 1، 2 و 3 به ترتیب برابر 670/2، 658/04 و 652/94 میلی‌متر) است. نمودار شماره 2، خروجی مدل ریز مقیاس‌کننده آماری (SDSM) را برای دمای بیشینه و کمینه برای حوضه تحت سناریوهای مختلف نشان می‌دهد. براساس

که به ترتیب در ارتفاع 1582/2، 1591/2، 1600/2، 1573/2، 1564/2 و 1555/2 متر قرار گرفته‌اند. با در نظر گرفتن این مشخصات و ضرایب به دست آمده از مدل HYMOD، دبی خروجی از سد لتیان براساس سه سناریو شبیه‌سازی شد. از طرف دیگر براساس روابط به دست آمده برای پارامترهای کیفی و داده‌های دبی ورودی و خروجی از سد لتیان این پارامترهای کیفی نیز برای افق آینده متأثر از سناریوهای تغییر اقلیم تصویرسازی شدند.

## مدل‌سازی کیفی تصفیه خانه آب تهران پارس

به منظور مدل‌سازی فرآیند حاکم بر تصفیه خانه از مدل رگرسیون گام‌به‌گام (STWR) و مدل خطی (LM) استفاده شد. متغیرهای دبی (مترمکعب بر ثانیه)، دما (درجه سانتی‌گراد)، کدورت (NTU)، کلروفیل a (میکروگرم بر لیتر) به عنوان متغیر مستقل و کربن آلی کل (میلی‌گرم بر لیتر) به عنوان متغیر وابسته وارد مدل شده است. در مدل LM نیز متغیرهای دبی (مترمکعب بر ثانیه)، دما (درجه سانتی‌گراد)، کدورت (NTU)، کلروفیل a (میکروگرم بر لیتر) به عنوان متغیر مستقل و کربن آلی کل (میلی‌گرم بر لیتر) به عنوان متغیر وابسته وارد مدل شده است. در هر دو مدل 60 درصد از اطلاعات به منظور کالیبراسیون و 40 درصد مابقی برای اعتبارسنجی مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفتند.

جدول شماره 2: متغیرهای استفاده شده بارش و دما در هر یک از نقاط داده‌های جهانی اقلیمی و GCM ها

ایستگاه بارش	پیشگوهای منتخب*
کربخانی (115-41)	ncepp8_vgl19X-46Y ncepp8_vgl20X-46Y ncepp8thgl19X-46Y ncepp8thgl20X-46Y ncepp500gl19X-45Y ncepp500gl20X-45Y
رودک (117-41)	ncepp1thgl19X-46Y ncepp8_vgl19X-46Y ncepp8thgl19X-46Y ncepp500gl19X-45Y ncepp500gl19X-46Y ncepp500gl20X-45Y ncepp500gl20X-46Y ، ncepprcpgl19X-45Y nceppmpgl19X-45Y nceppmpgl19X-46Y
لتیان (119-41)	ncepp1thgl19X-46Y ncepp8_vgl19X-45Y ncepp8_vgl19X-46Y ncepp8thgl19X-46Y ncepp500gl19X-45Y
تارون (161-41)	ncepp1_fgl20X-46Y ncepp1_uvl19X-46Y ncepp1_uvl20X-46Y ncepp1_zgl20X-45Y ncepp1thgl19X-46Y ncepp8_vgl19X-46Y ncepp8thgl19X-46Y
کندسفی (211-41)	ncepp1_uvl20X-46Y ncepp8_vgl19X-46Y ncepp8thgl20X-46Y
شمشک (242-41)	ncepp8_vgl19X-45Y ncepp8_vgl19X-46Y ncepp8_vgl20X-45Y ncepp8_vgl20X-46Y ncepp8thgl19X-46Y ncepp8thgl20X-45Y ncepp8thgl20X-46Y
گرمبلر (262-41)	ncepp5_fgl20X-45Y ncepp5_vgl20X-45Y ncepp8_vgl19X-46Y ncepp8thgl19X-46Y ncepp500gl19X-45Y ncepp500gl19X-46Y ncepp500gl20X-45Y ، ncepp500gl20X-46Y
آخار (270-41)	ncepp1_uvl20X-46Y ncepp8_vgl19X-46Y ncepp8thgl19X-46Y ncepp500gl19X-45Y ncepp500gl19X-46Y ncepp500gl20X-45Y ncepp500gl20X-46Y ، ncepprcpgl19X-45Y
فشم (291-41)	ncepp1_uvl20X-46Y ncepp1_zgl20X-45Y ncepp1thgl19X-46Y ncepp1thgl20X-46Y ncepp8_vgl19X-46Y ncepp8thgl19X-46Y ncepp8thgl20X-46Y ، ncepp850gl19X-45Y ncepp850gl19X-46Y
یکام (322-41)	ncepp1_zgl20X-45Y ncepp8_vgl19X-46Y ncepp8thgl19X-46Y ncepp500gl19X-45Y
لتیان (119-41)	nceppmpgl19X-45Y nceppmpgl20X-45Y nceppmpgl20X-46Y
امده (772-41)	nceppmpgl19X-45Y nceppmpgl20X-45Y nceppmpgl20X-46Y

این شکل، سناریوهای تغییر اقلیم متوسط دمای بیشینه برای سال‌های 2006 تا 2050، برای ایستگاه‌های لتیان و امامه کم تر از دوره مشاهداتی شبیه‌سازی کرده‌اند. در مورد دمای کمینه، سناریوهای تغییر اقلیم برای ایستگاه لتیان کم‌تر و برای ایستگاه امامه بیش‌تر از دوره مشاهداتی شبیه‌سازی کرده‌اند. به‌طور کلی، متوسط دمای بیشینه برای ایستگاه لتیان و امامه برای دوره مشاهداتی به ترتیب برابر 28/7 و 24/79 درجه و متوسط دمای بیشینه شبیه‌سازی شده برای آینده به ترتیب برابر 28/2 و 24/29 درجه است.

#### نتایج مدل بارش رواناب

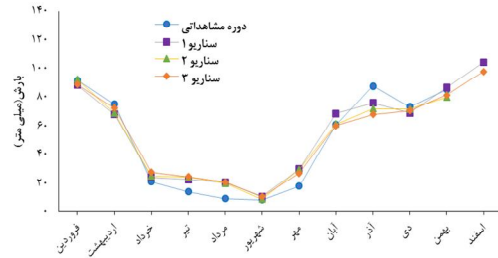
نتایج جدول شماره 3 نشان می‌دهد که تنها برای ماه ژانویه (دی ماه) رواناب شبیه‌سازی شده کم‌تر از دوره مبنا است (25 درصد کم‌تر). برای سایر ماه‌ها رواناب شبیه‌سازی شده بیش از دوره مشاهداتی است. افزایش میانگین رواناب دوره‌های آتی نسبت به دوره مشاهداتی برای ماه‌های بهمن تا آذر به ترتیب برابر 5، 85، 177، 200، 162، 114، 69، 98، 117، 110 و 1 درصد و به‌طور متوسط حدود 93 درصد است. افزایش رواناب در ماه‌های فروردین، اردیبهشت، خرداد و تیر (فصل بهار) قابل توجه است.

#### نتایج مدل سازی در سد لتیان

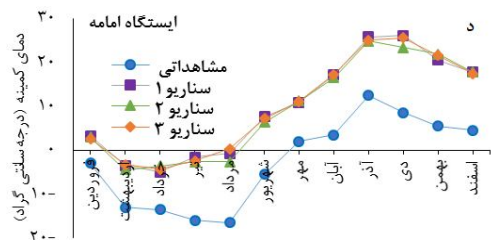
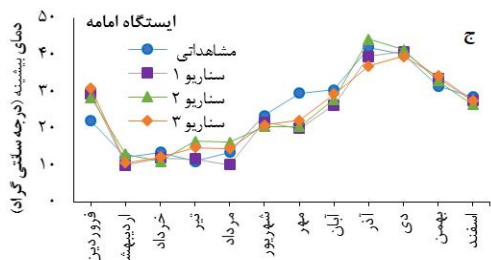
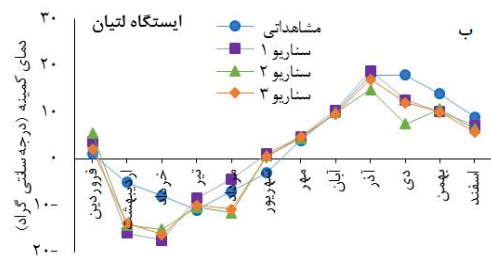
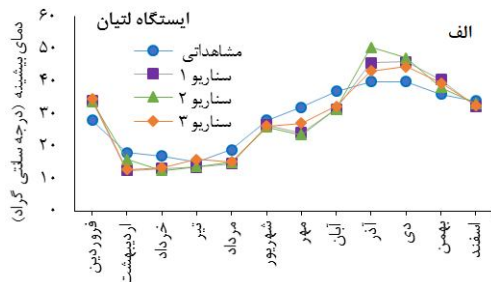
در این مطالعه به منظور تعیین ارتباط بین پارامترهای کیفی در سد لتیان از مدل‌های STWR و LM استفاده شد. باتوجه به شاخص‌های آماری حاصل از این مدل‌ها مشخص شد که برای پارامترهای کربن آلی کل مدل برهمکنشی (Interaction) STWR عملکرد قابل قبول‌تری داشته و برای شبیه‌سازی کربن آلی کل در سد لتیان مناسب‌تر است (جدول شماره 4).

#### نتایج مدل سازی در تصفیه خانه آب تهران پارس

جدول شماره 5 خلاصه ای از میانگین و انحراف معیار



نمودار شماره 1: خروجی مدل ریزمقیاس‌کننده آماری (SDSM) بارش برای حوضه آبریز جاجرد تحت سناریوهای مختلف



نمودار شماره 2: خروجی مدل ریزمقیاس‌کننده آماری (SDSM) تحت

سناریوهای مختلف: الف: دمای بیشینه ایستگاه لتیان، ب: دمای کمینه ایستگاه لتیان، ج: دمای بیشینه ایستگاه امامه، د: دمای کمینه ایستگاه امامه

مدل خطی LM و برای واحدهای پولساتور و کلر زنی نهایی مدل خطی STWR برتری داشته و به خوبی می تواند کربن آلی کل خروجی از این واحدها را پیش بینی کنند.

این پارامترها را در واحدهای مختلف تصفیه خانه آب تهران پارس نشان می دهد. با توجه به نتایج مدل و ضرایب مورد بررسی در جدول شماره 6، مشخص شد که برای واحدهای پیش کلر زنی و واحد فیلتراسیون،

جدول شماره 3: میانگین ماهانه رواناب محاسباتی و مشاهداتی تحت سناریوهای مختلف در دوره 2020 تا 2050

ماه	سناریو 1			سناریو 2			سناریو 3		
	بارش	تبخیر	دما	رواناب محاسباتی	بارش	تبخیر	دما	رواناب محاسباتی	رواناب مشاهداتی
فروردین	2/569	4/096	6/564	2/800	2/477	2/752	2/800	2/132	2/671
اردیبهشت	1/882	5/881	3/004	1/920	3/309	-0/085	1/920	2/174	1/962
خرداد	0/490	8/761	1/113	0/434	3/662	-2/130	0/434	1/912	1/001
تیر	0/836	9/206	2/840	0/917	3/933	-1/481	0/917	1/500	0/368
مرداد	0/605	8/412	9/092	0/522	3/576	5/265	0/522	1/099	0/368
شهریور	0/300	6/720	11/941	0/234	2/681	8/670	0/234	0/775	0/296
مهر	1/359	4/523	17/469	1/297	2/070	13/071	1/297	0/628	0/290
آبان	2/506	2/084	24/580	0/705	1/977	19/663	2/270	0/705	0/402
آذر	2/545	0/632	28/418	2/416	2/326	23/659	2/416	0/931	0/446
دی	2/295	0/009	28/11	2/318	1/924	22/691	2/318	1/078	0/491
بهمن	3/103	0/045	23/710	3/023	2/067	19/226	3/023	1/303	0/618
اسفند	3/580	2/066	18/610	3/517	2/920	14/723	3/517	1/796	1/683

جدول شماره 5: میانگین و انحراف معیار پارامترهای بررسی شده در نمونه های تصفیه خانه آب تهران پارس در دوره مشاهداتی

واحد تصفیه خانه	pH	کربن آلی کل (میلی گرم بر لیتر)	مکدورت (NTU)	کلروکلر 8 (میکرو گرم بر لیتر)
آب خام	7/95±0/07	8/78±2/11	8/29±2/13	3/22±1/48
پیش کلر زنی	7/77±0/09	6/50±1/36	7/49±1/78	1/64±0/72
پولساتور	7/5±0/07	5/33±1/22	4/23±0/81	0/78±0/34
فیلتراسیون	8/06±0/06	4/22±0/91	0/6±0/23	0/75±0/31
کلر زنی نهایی	7/4±0/07	2/29±0/38	0/29±0/15	0/41±0/17

جدول شماره 4: نتایج مدل های مورد بررسی برای کربن آلی کل در سد لتیان

پارامتر	مدل	MSE	CC	AIC
کربن آلی کل	Linear STWR	-	-	-
	Interaction	7/481	0/30	-76/37
کربن آلی کل	Quadratic	7/482	0/30	-76/37
	Linear model LM	8/831	0/14	7/58
کربن آلی کل	Linear model LM	9/064	0/10	-79/39
	صحت سنجی	4/188	0/25	-0/82

جدول شماره 6: نتایج مدل های مورد بررسی در تعیین کربن آلی کل در واحدهای مختلف تصفیه خانه آب تهران پارس

واحد	مدل	MSE	CC	AIC	پارامتر	مدل	MSE	CC	AIC
پیش کلر زنی	Linear STWR	0/052	0/96	-29/24	فیلتراسیون	Linear STWR	0/098	0/92	-27/43
	Interaction	0/034	0/97	-22/97	صحت سنجی	Interaction	0/013	0/71	-12/57
	Quadratic	0/026	0/98	-30/25	صحت سنجی	Quadratic	0/007	0/99	-33/66
	Linear model LM	0/044	0/97	-29/24	صحت سنجی	Linear model LM	0/0417	0/50	-80/28
پولساتور	Linear STWR	0/079	0/92	-27/43	کلر زنی نهایی	Linear STWR	0/013	0/87	-34/81
	Interaction	0/033	0/97	-29/51	صحت سنجی	Interaction	0/001	0/99	-40/21
	Quadratic	0/033	0/97	-29/51	صحت سنجی	Quadratic	0/001	0/99	-40/21
	Linear model LM	0/075	0/92	-26/66	صحت سنجی	Linear model LM	0/012	0/89	-34/36

نکته: دو سوم داده ها برای کالیبراسیون و یک سوم داده ها برای صحت سنجی استفاده شدند  
MSE: میانگین حداقل مربعات، CC: ضریب همبستگی، AIC: معیار اطلاعات Akaike

## بحث

داد که نتایج حاصل از ارزیابی این مدل مبتنی بر آماره‌های مربوطه (MSE برابر 0/686 و CC برابر 0/60) بیانگر کارایی قابل قبول مدل در شبیه‌سازی رواناب برای افق آینده (سال 2006 تا 2050) است. با توجه به جدول شماره 3 و نتایج شبیه‌سازی شده برای پارامتر بارش (افزایش متوسط بارش ماهانه شبیه‌سازی شده برای ماه‌های گرم سال و کاهش آن در ماه‌های سرد سال) انتظار می‌رود که شبیه‌سازی رواناب نیز از این الگو تبعیت کند. بنابراین، تغییرات در روند رواناب در حوضه آبریز جاجرود منجر به تغییرات در زمان دوره‌های پر آبی و کم آبی و همچنین سیل و طغیان رودخانه خواهد شد که لزوم بازنگری مدیریت سد لتیان را نشان می‌دهد.

*مدل سازی تغییرات میزان کربن آلی کل در سد لتیان*  
غلظت کربن آلی کل مشاهده شده در سد لتیان در فصل‌های مختلف بین 5 تا 12 میلی‌گرم بر لیتر متغیر بود. بخش عمده‌ای از کربن آلی کل خروجی از سد به دلیل پدیده تغذیه گرایی در داخل سد است. هر چند که در این مطالعه این پدیده مورد بررسی قرار نگرفت، اما مطالعات مختلف ارتباط بین تغذیه گرایی و افزایش غلظت کربن آلی را نشان داده‌اند (10، 16، 21). برهمکنش بین پدیده تغذیه گرایی و گرمایش جهانی هنوز به درستی قابل درک نیست، اما مشخص شده است که افزایش دما روی جنبه‌های مختلف پردازش نیتروژن در اکوسیستم آبی و سینتیک رشد بیومس تأثیر می‌گذارد (10). افزایش بارندگی از طریق شستشوی زمین‌های کشاورزی بالا دست سد و افزایش دما از طریق افزایش فعل و انفعالات زیستی هر دو از عوامل بدتر شدن کیفیت آب ورودی به سد و افزایش کربن آلی کل ورودی به تصفیه‌خانه هستند (22، 23). از طرفی دیگر، گرم شدن این حوضه آبریز تا سال 2050 حدود 2/25 درجه سانتی‌گراد می‌تواند یک عامل محرک برای فعالیت سیانوباکترها در سد لتیان و افزایش تغذیه گرایی باشد. El-Shehawey و همکاران در سال 2012 و همچنین Feuchtmayr و در

سناریوهای تغییر اقلیم متوسط بارش ماهانه را برای کل حوضه در ماه‌های گرم سال بیش‌تر و در ماه‌های سرد کم‌تر از مقادیر مشاهداتی شبیه‌سازی کرده‌اند که نشان‌دهنده تغییرات قابل ملاحظه در الگوی بارش از لحاظ زمانی است که بی‌توجهی به این مسئله چه به لحاظ دلایل شکل‌گیری و چه به لحاظ پیامدها می‌تواند منجر به خسارت‌های فراوانی شود. برای کل حوضه آبریز جاجرود، متوسط دمای بیشینه و کمینه در دوره مشاهداتی به ترتیب برابر 26/7 و 0/4 درجه است. در صورتی که مقادیر شبیه‌سازی شده توسط سناریوها برای کل حوضه برای دمای بیشینه و کمینه به ترتیب برابر 26/2 و 5/4 درجه است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که به‌طور متوسط دمای کل حوضه آبریز جاجرود 2/25 درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت که می‌تواند منجر به افزایش میزان تبخیر و تعرق و در نتیجه کاهش میزان آب حوضه شود. به‌طور کلی، تغییرات آب و هوایی در حوضه آبریز جاجرود از طریق جابجایی زمان بارندگی از فصول سرد به فصول گرم و افزایش دما، کلیه ارکان مدیریت منابع آب نیازمند بازبینی خواهد نمود.

*تحلیل مدل بارش - رواناب*

پارامترهای پنج‌گانه کالیبره شدن برای این مدل،  $R_q$  برابر 0/03 روز،  $R_s$  برابر 0/047 روز، Alpha برابر 0/01،  $B_{exp}$  برابر 0/741 و  $C_{max}$  برابر 1/832 میلی‌متر به دست آمد که با مطالعه Quan و همکاران در سال 2015 مطابقت داشته است (19).

همچنین Devos و همکاران به این نتیجه رسیدند که مقدار بارش متوسط حوضه آبریز که با روش‌های متداول محاسبه می‌شود، دارای عدم قطعیت است که باید با ضریب تعدیل‌کننده‌ای (بین 0/5 تا 1/5) واقعی‌سازی شود، لذا در این مدل، ضریب فوق به صورت اتوماتیک کالیبره شده و معادل 0/897 محاسبه شده است (20). شبیه‌سازی مقادیر رواناب روزانه با مدل HYMOD نشان

سال 2009 در مطالعات خود ارتباط بین تغییر اقلیم و تولید هپاتو توکسین های تولید شده ناشی از شکوفایی سیانوباکتری در منابع آبی را نشان دادند (24،21). براساس نتایج مدل STWR (Interaction) در مطالعه حاضر، معادله شماره 4، رابطه شبیه سازی کربن آلی کل نشان می دهد.

معادله شماره 4:

$$TOC = 1.175 + 1.445Q_{out} + 1.870 \frac{1}{Q_{in}} - 0.232 \frac{1}{Q_{out}} - 2.105 \frac{Q_{in}}{Q_{out}}$$

در معادله شماره 4، TOC، کربن آلی کل در داخل مخزن سد (Qin، متر مکعب بر ثانیه)، دبی ورودی به مخزن سد (متر مکعب بر ثانیه) که با مدل HYMOD محاسبه شده و تابعی از بارش و دما است. Q<sub>out</sub>، دبی خروجی از مخزن سد (متر مکعب بر ثانیه) و تابعی از Q<sub>in</sub> و مشخصات مخزن سد (مساحت، حجم و ارتفاع) است. براساس این معادله و براساس مطالعات انجام شده از جمله مطالعه Samson و همکاران در سال 2016، این مدل تابع غیر خطی از بارش و دما است (25).

مدل سازی تعادل کربن آلی کل در واحدهای مختلف تصفیه خانه

پارامترهای بررسی شده در تصفیه خانه آب تهران پارس شامل دما، pH، کدورت، کلروفیل a و کربن آلی کل بود. پارامترهای دما و pH به عنوان پارامترهای زمینه ای در نظر گرفته شدند. براساس نتایج محاسباتی، بین پارامترهای مورد بررسی در تصفیه خانه آب تهران پارس روابط خطی برقرار است که با مطالعه Ouyang و همکاران در سال 2006 نیز هم راستا بوده است (26). آن گونه که در جدول شماره 5 نشان داده شده است، متوسط کربن آلی کل ورودی به تصفیه خانه در دوره مشاهداتی حدود 9 میلی گرم بر لیتر بود. در صورتی که متوسط غلظت کربن آلی کل در دوره شبیه سازی شده با سناریوهای حدود سه برابر بیش تر است. همان طور که Fang و همکاران گزارش کردند، این ترکیبات در حین گندزدایی

آب (کلر زنی و ازن زنی) می توانند محصولات جانبی حاصل از گند زدایی (DBPs) از جمله تری هالومتان ها (THMs) و هالو استیک اسیدها (HAAAs) را ایجاد کنند که هر دو صورت به عنوان ترکیبات سرطان زا شناخته شده اند (27). از آن جایی که در تصفیه خانه آب تهران پارس واحد پیش کلر زنی طراحی شده است، لذا توجه به تشکیل این ترکیبات جانبی از اهمیت فراوانی برخوردار است. با توجه به نتایج کربن آلی کل شبیه سازی شده می توان پیش بینی کرد که این تصفیه خانه پتانسیل بالایی در تولید این ترکیبات جانبی بالاتر از حد استاندارد را دارا است. همان طور که در نمودار شماره 3 مشاهده می شود، هر چند که واحدهای مختلف تصفیه خانه آب تهران پارس تا حدودی خواهند توانست این میزان کربن آلی کل را کاهش دهند، اما کربن آلی کل خروجی از تصفیه خانه استانداردهای آب آشامیدنی از جنبه کربن آلی کل را تأمین نخواهد کرد، زیرا متوسط کربن آلی کل خروجی شبیه سازی شده حدود 10 میلی گرم بر لیتر خواهد بود. در صورتی که حد مجاز توصیه شده در برخی از منابع از جمله EPA و WHO برای کربن آلی کل برابر 2 میلی گرم بر لیتر توصیه شده است. در صورتی که کربن آلی کل خروجی از این تصفیه خانه پنج برابر حد استاندارد است. در نتیجه، ورود این ترکیبات آلی به سیستم توزیع آب آشامیدنی منجر به رشد عوامل زیستی می شوند که تولید رنگ، بو و مزه می کند و از این طریق کیفیت آب آشامیدنی را کاهش می دهد (28،29). بنابراین، به منظور حداقل سازی این اثرات نامطلوب، محدود کردن غلظت ترکیبات آلی در آب تصفیه شده ضروری است.

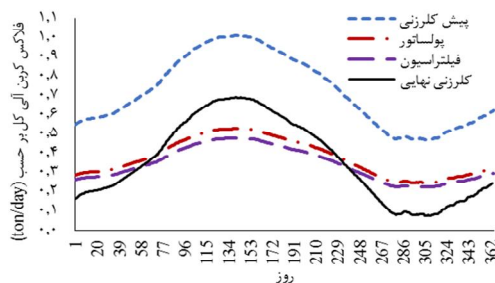
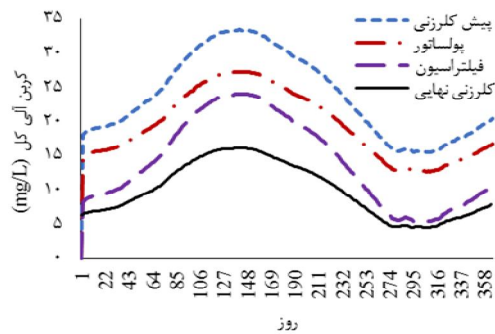
در مطالعه ODriscoll و همکاران در سال 2018 در ارزیابی از برآورد THM در منابع آب آشامیدنی مشخص شد که خاک هایی حاوی کود بالا و زمین های کشاورزی بیش ترین عامل تعیین کننده میزان THM در آب های تصفیه شده هستند (30). تغییر اقلیم و افزایش بارش در حوضه آبریز جاجرود به میزان 10 میلی متر می تواند

اقلیم، متوسط بارگذاری کربن آلی کل در واحد پیش کلر زنی بین 0/5 تا 1 تن بر روز و برای واحد کلر زنی نهایی برابر 0/07 تا 0/69 تن بر روز متغیر خواهد بود. علت اصلی افزایش بارگذاری کربن آلی کل را می توان به پارامترهای اقلیمی بارش و دما نسبت داد. به طوری که نتایج مدل GCM استفاده شده در این مطالعه افزایش 10 میلی متری در بارش و 2/25 درجه سانتی گراد در دما را نشان داد. افزایش بارندگی از طریق شستشوی زمین های کشاورزی بالا دست سد و افزایش دما از طریق افزایش فعل و انفعالات زیستی هر دو از عوامل بدتر شدن کیفیت آب ورودی به سد و افزایش کربن آلی کل ورودی به تصفیه خانه و افزایش بارگذاری آن هستند.

O'Driscoll و همکاران در سال 2018 افزایش دمای

سالیانه را در ایرلند 1 تا 1/1 درجه سانتی گراد پیش بینی کردند. براساس مدل های این محققان، متوسط بارندگی سالیانه در این کشور کاهش یافته اما فرکانس بارش های سنگین افزایش می یابد که منجر به افزایش کربن آلی در منابع آبی و افزایش کربن آلی ورودی به تصفیه خانه ها خواهد شد (10). علاوه بر آن، تغییرات فصلی در فلاکس کربن آلی کل نیز نشان دهنده تأثیر دما در میزان بارگذاری کربن آلی کل در تصفیه خانه آب تهران پارس است. بنابراین، تصفیه خانه در ماه های گرم سال آسیب پذیری بالاتری خواهد داشت. منابع نقطه ای (از جمله تخلیه فاضلاب های شهری و صنعتی) و منابع غیر نقطه ای (از جمله شستشوی زمین های کشاورزی از طریق بارندگی و سیلاب) نیز می تواند بر روی فلاکس کربن آلی کل تأثیر گذارد. Mirbagheri و همکاران در مطالعه خود مشخص کردند که تعداد 4 شهر و 36 روستا در بالا دست حوضه سد لتیان قرار گرفته اند که فاضلاب خام آن ها مستقیم وارد حوضه آبریز جاجرود می شود (430 لیتر بر ثانیه) (31). بنابراین این امر خود می تواند تأثیر زیادی در بارگذاری کربن آلی کل در پایین دست سد لتیان داشته باشد. نتایج ارائه شده در مطالعه با این فرض

نست آلاینده ها از زمین های کشاورزی، مکان های دارای آلودگی سمی یا رواناب ها به داخل این حوضه را نیز به دنبال داشته باشد. در نتیجه، ورود این رواناب ها به داخل سد منجر به رشد بیش از حد گیاهان آبی و جلبک ها شده و می تواند جوامع مصرف کننده این آب ها را در معرض پیامدهای ناشی از آن قرار دهد (4). در این مطالعه تغییرات بارگذاری کربن آلی کل به طور غیر مستقیم به پارامترهای اقلیمی (بارش و دما) لینک شد. براساس روابط به دست آمده از مدل سازی سد لتیان و روابط حاصل از واحدهای مختلف تصفیه خانه، کربن آلی کل ورودی به واحدهای مختلف تصفیه خانه آب تهران پارس برای افق آینده (2019 تا 2050) شبیه سازی گردید (نمودار شماره 3).



نمودار شماره 3: شبیه سازی تغییرات غلظت و فلاکس کربن آلی کل در واحد های مختلف تصفیه خانه آب تهران پارس

نتایج نشان می دهد که بالاترین بارگذاری در واحد پیش کلر زنی و کلر زنی نهایی دیده خواهد شد. از طرفی دیگر میزان بارگذاری در فصول گرم سال بالاتر از فصول سرد خواهد بود. براساس سناریوهای تغییر

برابر  $26/2$  و  $5/4$  درجه است. بنابراین، متوسط دمای کل حوضه آبریز جاجرود  $2/25$  درجه و رواناب حدود  $93$  درصد افزایش خواهد یافت. غلظت کربن آلی کل مشاهده شده در سد لثیان در فصل‌های مختلف بین  $5$  تا  $12$  میلی‌گرم بر لیتر متغیر بود. تغییر اقلیم سبب افزایش بارندگی و ورود ترکیبات آلی از حوضه‌های آبریز و زمین‌های کشاورزی به داخل سدها می‌شوند. این امر می‌تواند منجر به انجام تغذیه گرایی و آزاد شدن سموم ناشی از فعالیت سیانوباکترها به داخل منابع آبی شود. همچنین فعالیت سیانوباکترها با افزایش دمای ناشی از تغییر اقلیم نیز افزایش می‌یابد.  $TOC$  ورودی به واحدهای مختلف تصفیه‌خانه آب تهران پارس برای افق آینده ( $2019$  تا  $2050$ ) حدود سه برابر بیش‌تر از متوسط  $TOC$  ورودی به تصفیه‌خانه در دوره مشاهداتی است. لذا تصفیه‌خانه آب شرب تهران پارس توانایی لازم در کاهش این غلظت از  $TOC$  که ناشی از تغییر اقلیم است را نخواهد داشت.

### سپاسگزاری

نویسندگان این مطالعه مراتب قدردانی خود را از شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان تهران و شرکت آب و فاضلاب تهران به دلیل همکاری در امر نمونه‌برداری و انجام آزمایشات ابراز می‌دارند.

است که کاربری اراضی تغییری نکنند. هر چند که تغییرات اجتماعی - اقتصادی می‌تواند پتانسیل بالقوه‌ای بر روی فلاکس کربن آلی کل داشته باشد، اما این تغییرات در مدل حاضر گنجانده نشده است. شناخت کیفیت آب در حوضه آبریز می‌تواند به کاهش هزینه‌های آب آشامیدنی کمک کند و بخشی از راه حل مهندسی برای سازگاری زیر ساخت‌ها با تغییرات آب و هوایی آینده را تشکیل می‌دهد.

در این مطالعه تأثیر تغییر اقلیم بر تعادل کربنی در حوضه آبریز جاجرود مورد بررسی قرار گرفت. از نرم‌افزار SDSM به منظور ریز مقیاس‌سازی متغیرهای هواشناسی استفاده شد و داده‌های تصویرسازی شده بارش و دما تحت اثر نتایج مدل گردش عمومی ( $CanESM2$ ) و  $GCM$  و سه سناریو تغییر اقلیم  $RCP2.6$ ،  $RCP4.5$  و  $RCP8.5$  برای دوره  $2006-2050$  (45 سال) تولید شد. به‌طور کلی متوسط بارندگی سالیانه برای کل حوضه آبریز جاجرود در دوره مشاهداتی برابر  $650$  میلی‌متر است و متوسط بارش سالانه شبیه‌سازی شده توسط سناریوها برای کل حوضه برابر  $660$  میلی‌متر است. برای کل حوضه آبریز جاجرود، متوسط دمای بیشینه و کمینه در دوره مشاهداتی به ترتیب برابر  $26/7$  و  $0/4$  درجه است. در صورتی که مقادیر شبیه‌سازی شده توسط سناریوها برای کل حوضه برای دمای بیشینه و کمینه به ترتیب

### References

- Pachauri RK, Allen MR, Barros VR, Broome J, Cramer W, Christ R, et al. Climate change 2014 synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change 2014.
- Semenza JC, Menne B. Climate change and infectious diseases in Europe. *The Lancet Infectious Diseases* 2009; 9(6): 365-375.
- Bezirtzoglou C, Dekas K, Charvalos E. Climate changes, environment and infection: facts, scenarios and growing awareness from the public health community within Europe. *Anaerobe* 2011; 17(6): 337-340.
- Elliott JA. Is the future blue-green? A review of the current model predictions of how climate change could affect pelagic freshwater cyanobacteria. *Water Research* 2011; 46(5): 1364-1371.
- Soverow JE, Wellenius GA, Fisman DN, Mittleman MA. Infectious disease in a warming world: how weather influenced West Nile virus

- in the United States (2001–2005). *Environmental Health Perspectives* 2009; 117(7): 1049-1052.
6. Bengraïne K, Marhaba TF. Using principal component analysis to monitor spatial and temporal changes in water quality. *Journal of Hazardous Materials* 2003; 100(1-3): 179-195.
  7. Kolstad EW, Johansson KA. Uncertainties associated with quantifying climate change impacts on human health: a case study for diarrhea. *Environ Health Perspect* 2011; 119(3): 299-305.
  8. Portier CJ, Thigpen TK, Carter SR, Dilworth CH, Grambsch AE, Gohlke J, et al. A human health perspective on climate change: A report outlining the research needs on the human health effects of climate change. *Environmental Health Perspectives and the National Institute of Environmental Health Sciences*; 2010.
  9. Morris RD. Drinking Water and Cancer. *Environ Health Perspect* 1995; 103(supple 8): 225-231.
  10. ODriscoll C, Ledesma JL, Coll J, Murnane JG, Nolan P, Mockler EM, et al. Minimal climate change impacts on natural organic matter forecasted for a potable water supply in Ireland. *Sci Total Environ* 2018; 630: 869-877.
  11. Cervi F, Petronici F, Castellarin A, Marcaccio M, Bertolini A, Borgatti L. Climate-change potential effects on the hydrological regime of freshwater springs in the Italian Northern Apennines. *Science of the Total Environment* 2017; 622-623: 337-348.
  12. Mirzaei M, Hasanian H, editors. Quality Evaluation of Jajrood River (IRAN) by Quality Indices Methods. *Advanced Materials Research* 2013; 650: 652-657 (Persian).
  13. Mirzaei R, Danehkar A, Abdoli A. The diet of Eurasian otters in the Jajrood River system, Iran. *Mammal Study* 2014; 39(1): 33-41 (Persian).
  14. APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater: American public health association; 2015.
  15. Nasser M, Zahraie B, Forouhar L. A comparison between direct and indirect frameworks to evaluate impacts of climate change on streamflows: case study of Karkheh River basin in Iran. *Journal of Water and Climate Change* 2017; 8(4): 652-674 (Persian).
  16. Hashempour Y, Nasser M, Mohseni Bandpei A, Motesaddi S, Eslamizadeh M. Assessing vulnerability to climate change for Total Organic Carbon in a System of Drinking Water Supply. *Sustainable Cities and Society* 2019; 53: 101904 (Persian).
  17. Korner Nievergelt F, Roth T, Von Felten S, Guélat J, Almasi B, Korner Nievergelt P. Bayesian data analysis in ecology using linear models with R, BUGS, and Stan. Academic Press; 2015.
  18. Yasar A, Bilgili M, Simsek E. Water demand forecasting based on stepwise multiple nonlinear regression analysis. *Arabian Journal for Science and Engineering* 2012; 37(8): 2333-2341.
  19. Quan Z, Teng J, Sun W, Cheng T, Zhang J. Evaluation of the HYMOD model for rainfall–runoff simulation using the GLUE method. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences* 2015; 368: 180-185.
  20. DeVos N, Rientjes T, Gupta HV. Diagnostic evaluation of conceptual rainfall–runoff models using temporal clustering. *Hydrological Processes* 2010; 24(20): 2840-2850.
  21. El Shehawy R, Gorokhova E, Fernandez-Pinas F. Global warming and hepatotoxin production by cyanobacteria: What can we learn from experiments? *Water Research* 2012; 46(5): 1420-1429.

22. Delpla I, Jung AV, Baures E, Clement M, Thomas O. Impacts of climate change on surface water quality in relation to drinking water production. *Environment International* 2009; 35(8): 1225-1233.
23. Paerl HW, Paul VJ. Climate change: Links to global expansion of harmful cyanobacteria. *Water Research* 2012; 46: 1349-1363.
24. Feuchtmayr H, Moran R, Hatton K, Connor L, Heyes T, Moss B, et al. Global warming and eutrophication: effects on water chemistry and autotrophic communities in experimental hypertrophic shallow lake mesocosms. *Journal of Applied Ecology* 2009; 46(3): 713-723.
25. Samson CC, Rajagopalan B, Summers RS. Modeling Source Water TOC Using Hydroclimate Variables and Local Polynomial Regression. *Environ Sci Technol* 2016; 50(8): 4413-4421.
26. Ouyang Y, Nkedi Kizza P, Wu Q, Shinde D, Huang C. Assessment of seasonal variations in surface water quality. *Water Research* 2006; 40(20): 3800-3810.
27. Fang J, Yang X, Ma J, Shang C, Zhao Q. Characterization of algal organic matter and formation of DBPs from chlor (am) ination. *Water Research* 2010; 44(20): 5897-5906.
28. Baghoth SA, Sharma SK, Amya GL. Tracking natural organic matter (NOM) in a drinking water treatment plant using fluorescence excitation-emission matrices and PARAFAC. *Water Res* 2011; 45(2): 797-809.
29. Zazouli MA, Nasser S, Mahvi AH, Mesdaghinia AR, Younecian M, Gholami M. Determination of hydrophobic and hydrophilic fractions of natural organic matter in raw water of Jalalieh and Tehranspars water treatment plants (Tehran). *Journal of Applied Sciences* 2007; 7(18): 2651-2655 (Persian).
30. ODriscoll C, Sheahan J, Renou-Wilson F, Croot P, Pilla F, Misstear B, et al. National scale assessment of total trihalomethanes in Irish drinking water. *J Environ Manage* 2018; 212: 131-141.
31. Mirbagheri S, Abaspour M, Zamani K. Mathematical modeling of water quality in river systems. *European Water* 2009; 27(28): 31-41 (Persian).