

آب و توسعه پایدار

سال هشتم - شماره سوم (پیاپی ۲۱) - پاییز ۱۴۰۰

طرح کلی بازتخصیص آب از روستا به شهر



محدوده شهری ← مناطق کشاورزی حومه شهرها

بازتخصیص از طریق تغییر کاربری زمین: توسعه مناطق شهری موجب تغییر کاربری اراضی از کشاورزی به شهری شده است؛ و به همین تناسب برداشت‌ها و کاربرد آب‌ها نیز، از کشاورزی به شهری تغییر یافته است.



محدوده شهری ← مناطق کشاورزی

بازتخصیص بین حوضه‌ای: انتقال آب از حوضه دیگر و از کاربری کشاورزی به کاربری شهری و ...



محدوده شهری ← مناطق کشاورزی بالادست

بازتخصیص بالادست- پایین دست (آب): کاهش کاربری‌های کشاورزی در بالادست و بازتخصیص آب به کاربری‌های شهری و ...



محدوده شهری ← مناطق کشاورزی پایین دست

بازتخصیص بالادست - پایین دست (جایگزینی پساب): در بازتخصیص، آب مورد استفاده کشاورزی به شهر تخصیص داده می‌شود؛ و به جبران آن پساب شهری به مناطق کشاورزی در پایین دست، تحویل می‌گردد.

فهرست مقالات

- استفاده از مدل‌سازی در توسعه سناریوهای منابع و مصارف آب؛ مطالعه موردی: محدوده مطالعاتی دشت ورامین
علیرضا احمدی، بهرام ملک محمدی، لعبت زبردست
- بررسی و رتبه‌بندی امنیت آبی محدوده‌های مطالعاتی استان خراسان جنوبی به کمک تحلیل خاکستری
مهدی بهارشاهی، حسین خزیمه‌نژاد، ناصر نیک‌نیا، عباس خاشعی سیوکی
- بررسی اجزای ردپای آب محصول خیار در استان ایلام (مطالعه موردی: شهرستان دره‌شهر)
فرشته رحیمی
- معرفی روش MICE در ترمیم داده‌های گمشده هواشناسی و مقایسه با رگرسیون؛ مطالعه موردی: ۱۳۰ سال دمای ماهانه مشهد، جاسک و بوشهر
محبوبه فرزندی، حجت رضایی‌پژند
- تحلیل اثر عوامل اقلیمی و خشکسالی بر روی رواناب ورودی و خروجی به دشت خوزستان در حوضه کارون
زهره سعیدی‌فر، محمد خسروشاهی، عادل جلیلی، سمانه رضوی‌زاده، فاطمه درگاهیان، سمیرا زندی‌فر، سکینه لطفی‌نصب‌اصل، آزاده گوهردوست، سارا تیموری، محمد فیاض
- مقایسه و تحلیل عوامل اصلی ارتقاء دهنده شاخص بهره‌وری آب گندم در دو روش غرقابی و موضعی (مطالعه موردی: استان یزد)
محمدحسن رحیمیان، غلامحسن رنجبر، حسن غلامی، مجید نیکخواه، مهدی شیران تفتی، نادیا بشارت
- بررسی و مقایسه امکان‌سنجی استفاده از هاضم‌های بی‌هوازی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب با فرآیندهای SBR و MLE
محمود مهرگان، میلاد تمجیدی فرح‌بخش، اشکان کاظمی، مسعود روحبخش، امیر اکبرزاده
- علل و خطرات افزایش حضور باکتری‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک در آب‌های آشامیدنی
معصومه اطهری‌نیا
- مروری بر فیلتراسیون غشایی و بررسی کارایی آن در بهبود کیفیت آب در سیستم‌های آبی‌پروری مدار بسته (RAS)
علیرضا رادخواه، سهیل ایگدری، اسماعیل صادقی‌نژاد، ماسوله
- بررسی پارامترهای موثر در جذب رنگ راکتیو زرد ۱۴۵ از محلول آبی به وسیله کربن فعال تهیه شده از کاه برنج
امید صداقت، نادر بهرامی‌فر، حبیب‌الله یونسی

صاحب امتیاز

مدیر مسئول

سر دبیر

دانشگاه فردوسی مشهد

ناصر شاهنوشی فروشانی / استاد گروه اقتصاد کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد

بیژن قهرمان / استاد بازنشسته گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

اعضای هیئت تحریریه

کاظم اسماعیلی / دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

حسین انصاری / استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

علی باقری / دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه تربیت مدرس

محمد جلیلی / دانشیار مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی

کامران داوری / استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

حسین علی دادی / استاد گروه مهندسی بهداشت محیط و حرفه ای، دانشگاه علوم پزشکی مشهد

حمیدرضا ناصری / استاد گروه زمین شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

شورای سیاست گذاری

احمد سیاحی (ریاست شورا) / مدیر کل دفتر تحقیقات، توسعه فن آوری و ارتباط با صنعت شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور

حسین اسماعیلیان / مدیر عامل شرکت آب و فاضلاب مشهد

محمد علایی / مدیر عامل شرکت آب منطقه ای خراسان رضوی

سید یحیی موسوی / دبیر اندیشگاه آب شرکت مدیریت منابع آب ایران

ناصر شاهنوشی فروشانی / مدیر مسئول نشریه

بیژن قهرمان / سر دبیر نشریه

مشاوران هیئت تحریریه

انوش نوری اسفندیاری / اندیشکده تدبیر آب ایران

سید حسین سجادی فر / شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور

عباسعلی قزل سوفلو / استادیار گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی مشهد

مهدی کلاهی / دانشگاه فردوسی مشهد

غلامرضا کلائی / شرکت آب و فاضلاب مشهد

ثمانه توکلی امینیان / شرکت آب و فاضلاب مشهد

کارشناس اجرایی

ویراستاری

طراحی جلد

ترتیب انتشار / ناشر

شماره شاپا

تارنما / رایانامه

آدرس

حامی مالی

پایگاه های نمایه شده

مهری شاهی، فاطمه طالبی حسین آباد

مرجان قوچانیان، مهری شاهی، فاطمه طالبی حسین آباد (فنی و ادبی) / مائده اسکوهی (لاتین)

محمدرضا شیخی

فصلنامه / انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد

۲۴۲۳-۵۴۷۴

<https://jwsd.um.ac.ir/> Email: jwsd@um.ac.ir

دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی آب، دفتر نشریه، صندوق پستی ۹۱۷۷۵-۱۱۶۳

شرکت آب و فاضلاب مشهد

پایگاه استنادی علوم ایران (ISC)، پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی (SID)، بانک اطلاعات

نشریات کشور (MAGIRAN)



- الف سرمقاله: بازتخصیص آب در ایران معاصر / انوش نوری اسفندیاری (عضو مشورتی هیئت تحریریه نشریه)
- ت یادداشت‌های کوتاه: بازتخصیص آب در شرایط آبی امروز ایران / عبدالله فاضلی فارسانی ؛ بازتخصیص آب از پنهان تا آشکار / وحید اردکانیان
- ۱ استفاده از مدل‌سازی در توسعه سناریوهای منابع و مصارف آب؛ مطالعه موردی: محدوده مطالعاتی دشت ورامین
علیرضا احمدی، بهرام ملک محمدی، لعبت زبردست
- ۱۱ بررسی و رتبه‌بندی امنیت آبی محدوده‌های مطالعاتی استان خراسان جنوبی به کمک تحلیل خاکستری
مهدی بهارشاهی، حسین خزیمه‌نژاد، ناصر نیک‌نیا، عباس خاشعی سیوکی
- ۲۳ بررسی اجزای ردپای آب محصول خیار در استان ایلام (مطالعه موردی: شهرستان دره‌شهر)
فرشته رحیمی
- ۳۱ معرفی روش MICE در ترمیم داده‌های گمشده هواشناسی و مقایسه بارگرسبون؛ مطالعه موردی: ۱۳۰ سال دمای ماهانه مشهد، جاسک و بوشهر
محبوبه فرزندی، حجت رضایی‌پژند
- ۴۳ تحلیل اثر عوامل اقلیمی و خشکسالی بر روی رواناب ورودی و خروجی به دشت خوزستان در حوضه کارون
زهراسعیدی‌فر، محمد خسرو شاهی، عادل جلیلی، سمانه رضوی‌زاده، فاطمه درگاهیان، سمیرا زندی‌فر، سکینه لطفی‌نصب‌اصل، آزاده گوهر دوست، سارا تیموری، محمد فیاض
- ۵۵ مقایسه و تحلیل عوامل اصلی ارتقاءدهنده شاخص بهره‌وری آب گندم در دو روش غرقابی و موضعی (مطالعه موردی: استان یزد)
محمد حسن رحیمیان، غلامحسن رنجبر، حسن غلامی، مجید نیکخواه، مهدی شیران تفتی، نادیا بشارت
- ۶۳ بررسی و مقایسه امکان‌سنجی استفاده از هاضم‌های بی‌هوازی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب با فرآیندهای SBR و MLE
محمود مهرگان، میلاد تمجیدی فرح بخش، اشکان کاظمی، مسعود روحبخش، امیر اکبرزاده
- ۷۳ علل و خطرات افزایش حضور باکتری‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک در آب‌های آشامیدنی
معصومه اطهری‌نیا
- ۸۱ مروری بر فیلتراسیون غشایی و بررسی کارایی آن در بهبود کیفیت آب در سیستم‌های آبی‌پروری مدار بسته (RAS)
علیرضا رادخواه، سهیل ایگدری، اسماعیل صادقی‌نژاد ماسوله
- ۸۹ بررسی پارامترهای موثر در جذب رنگ راکتیو زرد ۱۴۵ از محلول آبی به وسیله کربن فعال تهیه شده از کاه برنج
امید صداقت، نادر بهرامی‌فر، حبیب‌الله یونسی
- ۹۸ یادداشت تحلیلی: بازتخصیص آب در گذشته و آینده / سروش طالبی اسکندری



بازتخصیص آب در ایران معاصر

با وجود آنکه کمیابی آب و خشکسالی در ایران مسأله تازه‌ای نیست، اما پیامدهای کمبود و عدم دسترسی به آب در تابستان ۱۴۰۰ خوزستان- پرآب‌ترین استان ایران- افکار عمومی را سخت غافل‌گیر و به تأمل واداشته است. در استان کرمان و استان‌های دیگر دهه‌ها است که با برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، باغات پسته و سایر باغات رو به خشکی تدریجی و نابودی است. دریاچه‌ها و تالاب‌ها -بویژه ارومیه و هامون- در اثر عدم تأمین حقابه‌های محیط‌زیستی، یا خشک شده یا رو به خشکی است. تمام آبخوان‌های اصلی کشور در وضعیت ممنوعه قرار دارند و همزمان با استمرار افت سطح آب، با زوال کیفیت و کاهش آبدی، به نابودی تهدید می‌شوند. یزد در رویای بازتخصیص و انتقال آب از زاگرس و تخصیص آب از دریای عمان به سر می‌برد. خاطره زاینده‌رود در حال حذف شدن از ذهن نصف‌جهان و سیستان و بلوچستان از تشنگی، رمق از دست داده است. در چنین شرایطی، سوال اصلی این است که تا چه میزان ممکن است «بازتخصیص» بی‌رویه و نسنجیده آب سهمی در ایجاد چنین شرایطی داشته باشد و چگونه می‌توان با بازسازی نظام تخصیص آب کشور، پیامدهای ناگوار و گسترده کمبود آب و احساس پایمال شدن حقوق آب‌بران را مدیریت کرد یا تسکین داد؟

با تشدید کمیابی آب و رشد شتابان تقاضا در ایران، پیشران‌ها، زمینه‌ها و سازوکارهای بازتخصیص ارادی و غیرارادی آب از دهه ۱۳۴۰، گسترده و فعال شدند. در کنار رشد جمعیت، شهرنشینی و بالا رفتن سطح زندگی، ضعف و ناکارآمدی مدیریت تخصیص و تعیین حقوق آب، عدم مشارکت جامعه محلی در تقسیم و نظارت آب و دسترسی آسان به تکنولوژی پمپاژ (بصورت ایستگاه، متحرک و چاه) با استفاده از یارانه ارزی و انرژی، زمینه‌ها و پیشران‌ها را فراهم کردند. دست‌اندازی به حقوق حقابه‌داران، سهم حق‌آبه‌داران و مشترکین آب، اولویت تأمین آب شهری و صنعت، انجام ندادن تعهدات شرکت‌های کارگزار و مبادله و خرید و فروش آب در بازار غیررسمی، سازوکارهای مختلف بازتخصیص گسترده آب در ایران محسوب می‌شوند.

اما برای شروع فهم و تحلیل موضوع باید ابتدا به خود نظام تخصیص آب رجوع کرد.

تخصیص آب قواعد و فرایند تسهیم منابع آب در دسترس میان متقاضیان قانونی در زمان، مکان، نوع مصرف و مصرف‌کننده / بهره‌بردار مشخص است. از این طریق، میزان آب قابل دسترس برای مصارف مختلف و چگونگی تسهیم آن میان مناطق و مصرف‌کنندگان رقیب تعیین می‌شود. با توجه به تغییر در شرایط عرضه و تقاضای آب، تغییر یا تعدیل در میزان آب تخصیص یافته (بازتخصیص آب) به ناگزیر از دیرباز مطرح بوده است. اما شواهد نشان می‌دهد که ابعاد بازتخصیص آب ایران در دهه‌های گذشته بسیار گسترده و عمدتاً غیرارادی بوده و همین امر باعث برهم زدن و آشفتگی وضعیت تسهیم آب، پایمال شدن حقوق آب و به خطر افتادن امنیت آبی شده است. از این رو، در حال حاضر نظام‌مند کردن نظام تخصیص (بازتخصیص) آب، اقدامی کلیدی و اساسی در حوزه حکمرانی و مدیریت آب به شمار می‌آید. هدف این نظام حداقل کردن فایده‌های اجتماعی ناشی از بهره‌برداری از منابع آب است و این امر یک بعدی نمی‌تواند باشد. در نظام مدرن، معیارها و سنجه‌های آن معمولاً به سه صورت اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی، تعیین و وضع می‌شوند.

تجربیات کشورهای مختلف نشان می‌دهد که بطور کلی فرایند بازتخصیص آب، با کاهش سهم آب آبیاری همراه است و این جابجایی آثار عمیقی بر سایر مصارف روستایی (نظیر تأمین مصارف خانگی در روستاها، باغچه‌های خانگی، دام، ماهیگیری، تفریحی و گردشگری) نیز دارد. جابجایی بخشی از برداشت‌های کشاورزی -که در نظر اول ممکن است ناچیز باشد- می‌تواند پیامدهایی را برای طیف گسترده‌ای از گروداران (stakeholders) داشته باشد، بویژه اگر نهادهای موثری که بتوانند این جابجایی را مدیریت و به نوعی تقلیل دهند یا جبران کنند، وجود نداشته باشند. برای آنکه لطمه‌ی جدی به حفظ و رشد تولید برای نیازهای رو به فزونی مواد غذایی وارد نشود، به بازسازی‌های اساسی در سطوح مختلف فرایند تخصیص آب نیاز است تا جابجایی آب را با این قید مقدور کند. ناگفته نماند که گرچه بازتخصیص آب در نظام مدیریتی تطبیق‌پذیر یک نوع انعطاف مدیریتی برای کاهش فشارها در شرایط رشد اقتصادی- اجتماعی، تغییرات آب و هوایی و شرایط محیط زیستی است، اما علیرغم فایده‌های بی‌شمار آن، نمونه‌های جابجایی‌های موفق آب نسبتاً کم و فایده‌های مورد انتظار به‌ندرت تحقق می‌یابد، بدلیل مشکلات و موانع پیچیده پیش رو*.

قواعد و کارکرد اجزای نظام تقسیم و بازتقسیم آب، برگرفته از تجربیات قوام یافته تاریخی طولانی است. قواعد و کارکردهایی که سابقه مکتوب آن‌ها حداقل به قرن ۱۸ قبل از میلاد (قانون حمورابی در بابل) باز می‌گردد. با افزایش کمیابی آب در سطح جهانی از قرن نوزدهم تا کنون، بتدریج تخصیص و بازتخصیص در سطح حوضه آبریز متداول شده و نظام تخصیص آب در حل و فصل تعارضات و بهبود یا ارتقای فایده‌های اجتماعی در مقیاس‌های مکانی مختلف- حتی فراملی- اهمیت رو به افزایش پیدا کرده است.

نظام تخصیص آب و آبیاری در ایران باستان (دیوان آب) به عنوان جزیی از نظام گسترده و توانمند اداری امپراتوری‌های آن زمان، دارای جایگاه ویژه‌ای بوده است. این نظام، که ضامن توسعه و شکوفایی شهرها و روستاها و اراضی آبی بود با برخورداری از سلسله مراتب حقوقی خاصی می‌توانست به آبرسانی و آبیاری امنیت و نظم ببخشد. خوارزمی در مفاتیح العلوم در تعریف دیوان آب چنین می‌نگارد: «آن دیوانی است که در آن مبلغ خراج هر یک از صاحبان آب و کاست و فزود آن (بازتخصیص) و همچنین تغییر اسامی مالکان و از اسمی به اسم دیگر ستون در آن ثبت می‌شود». از آنجا که قواعد و عرف متداول در ایران باستان منافاتی با آموزه‌های دین اسلام نداشت، مقررات آبیاری و توزیع آب در سرزمین‌های اسلامی و از جمله ایران، عمده‌تأیید ابقای همان مقررات سنتی و عرفی آبیاری دوره باستان بوده است. از نگاه تاریخی، با رشد جمعیت، توسعه شهری و اجرای برنامه نوسازی و طرح‌های توسعه منابع آب در ایران معاصر، نظام سنتی تخصیص و تقسیم آب دگرگون یا مضمحل و بدون جایگزینی نظام کارآمد، دچار آشفتگی شد، در حدی که تدابیر اداری و حقوقی بعد از مشروطه نتوانست چاره‌ساز باشد.

اصلاحات ارضی دهه ۱۳۴۰ بطور غیرمستقیم بر نظام آبیاری سنتی تأثیر گذاشته و انبوه مالکین خرد با جایگزین کردن چاه بجای قنات به استخراج آب زیرزمینی پرداختند و بطور کلی، شیوه غالب مدیریتی در سطح خرد و کلان، استحصال و «مدیریت عرضه» بیشتر آب ارزان قیمت همراه با «رانت» منابع طبیعی بود. توسعه چاه‌ها در حریم قنات‌ها، رها شدن، متروک و خشک شدن قنات‌ها، اولین موج وسیع «بازتخصیص» کنترل نشده آب زیرزمینی را در ایران ایجاد کرد. بعد از انقلاب اسلامی، سیاست‌های واگذاری زمین (اراضی مرتعی، شیب‌دار و ملی) و صدور مجوز بهره‌برداری چاه با هدف برقراری عدالت از طریق توزیع آب و منابع طبیعی، ایجاد اشتغال

و جلوگیری از مهاجرت بی‌رویه روستاها به شهرها، موجبات ترویج و گسترش رفتارهای رانت‌جویانه و هجوم بی‌رویه به منابع آب و خاک کشور را فراهم کرد، که بدلیل عبور از سقف مجاز برداشت آب تجدیدپذیر، بخش مهمی از بازتخصیص‌های منابع محدود آب در موج‌های وسیع پی در پی بوجود آورد. بعلاوه، موج‌های جدیدی از بازتخصیص آب سطحی نیز عمدتاً با مداخله دولت برای تأمین آب شهری و صنعتی با انتقال بین حوضه‌ای مانند زاینده‌رود و همچنین بدون نظارت و مدیریت دولت- افزایش برداشت‌ها در بالادست حوضه‌های آبریز- عمدتاً برای توسعه کشت محصولات آب‌بر- را در دهه‌های گذشته شاهد بوده‌ایم.

برنامه عملیاتی تأسیس و تکمیل نظام تخصیص آب منسجم و بهم پیوسته از اواخر برنامه میان مدت دوم و اوایل برنامه سوم توسعه آغاز شد که هدف آن عمدتاً نظام‌مند نمودن فرایند تخصیص (بازتخصیص) به متقاضیان طرح‌های توسعه آب سطحی بود. این نظام کماکان در مراحل اولیه رشد و تکامل خود بسر می‌برد و ملاحظه‌های اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی آن اندک و عمدتاً از دیدگاه بازدارندگی از بیش تخصیص آب (Water Overallocation) و کاهش خسارت‌های تصمیمات، می‌تواند قابل اتکا باشد. بنابراین وقتی که این نظام در سال ۱۳۹۴ ابلاغیه‌ای را برای امضای وزیر نیرو با هدف تعیین مقدار «آب قابل برنامه‌ریزی» به تفکیک محدوده‌های مطالعاتی حوضه‌های آبریز درجه ۲، آماده کرد، پیش‌بینی می‌شد که ممکن است به انتظارات یا شاید نگرانی‌های جدیدی از نظر بازتخصیص آب، دامن بزند. اما طبیعی بود که صرف ابلاغ آن به امضای وزیر نیرو برای مراکز مختلف نمی‌توانست نظام اقتصادی و اجتماعی کشور را با شرایط و موازین پایداری در بهره‌برداری از منابع آب سازگار کند. از این رو سوال‌های موجهی شکل گرفت مانند: انتخاب معیارها و انجام مطالعات و تهیه مستندات چنین اقدامی از چه روش‌شناسی تبعیت کرده است؟ اصلاح نظام تخصیص و بازتخصیص سنجیده آب برای جبران خطاهای پیشین چه الزامات و امکانات نهادی باید داشته باشد؟ و بالاخره سیاست‌ها و برنامه‌های عملیاتی آن چگونه باید طرح‌ریزی و اجرایی شود؟

*Meinzen-Dick, Ruth and Claudia Ringler (2006), Water Re-allocation: Challenges, Threats, and Solutions for the Poor, Human Development Report 2006, Human Development Report Office, OCCASIONAL PAPER, pp2&3.



بازتخصیص آب در شرایط آبی امروز ایران

در مقطع زمانی حاضر، شرایط و وضعیت منابع آبی کشور به گونه‌ای است که به جرات می‌توان گفت حوضه‌های آبریز کشور بسته شده‌اند، بدین مفهوم که جریان آب یا میزان استفاده از منابع آب حوضه در نقطه سر به سر بین تغذیه و برداشت نه تنها به صفر رسیده بلکه در بسیاری از موارد منفی شده است. این موضوع به‌خصوص در آبخوان‌های کشور نمود روشنی دارد. در حال حاضر بار تعهدات ایجاد شده در آبخوان‌های کشور در قالب مجوزهای بهره‌برداری صادره توسط دولت، بیش از توان تأمین آب آبخوان‌هاست؛ زیرا تراز آب زیرزمینی در حال پایین رفتن است. بنابراین هرگونه برداشت جدید مازاد بر تعهدات ایجاد شده، چه به‌صورت مجاز در قالب مجوزهای جدید و چه به‌صورت غیرمجاز، به نوعی بازتخصیص آب از محل حقوق ایجاد شده برای بهره‌برداران کنونی است و قاعدتاً فشار بر منابع آب اعم از سطحی و زیرزمینی با تخصیص‌های جدید توجیه منطقی و فنی ندارد. خشک شدن جریان رودخانه‌ها و پایاب آنها (مانند زاینده رود)، از بین رفتن قنوات و کاهش آبدهی چاه‌ها و یا خشک و متروکه شدن آنها، خالی شدن تالاب‌ها و کاهش تراز آب دریاچه‌های بزرگی مانند ارومیه بازتاب سیاست‌های اشتباه و تصمیماتی است که منجر به بازتخصیص آب بر اساس تعریف فوق شده است.

ظرفیت تحمل حوضه‌های آبریز یا محدوده‌های مطالعاتی به‌عنوان واحدهای تشکیل دهنده آنها از یک طرف و رشد جمعیت، نیازهای جدید آب برای توسعه و فشار تقاضا از طرف دیگر، باعث اتخاذ سیاست‌های مختلفی توسط دولت‌ها در دهه‌های اخیر شده است. تا قبل از پیاده‌سازی نظام تخصیص آب بر اساس ماده ۲۱ قانون توزیع عادلانه آب در سال ۱۳۷۹ هیچ‌گونه معیار مشخصی برای تخصیص‌های جدید آب در سطح شرکت‌های آب منطقه‌ای وجود نداشت و تنها معیار عدم تخصیص آب کشاورزی در دشت‌های ممنوعه رعایت می‌شد که آن هم تحت تأثیر ایرادات موجود در قانون مانند تبصره ذیل ماده ۳ بسیار شکننده بود. به هر حال در دو دهه اول بعد از انقلاب اسلامی می‌توان گفت به هر میزان برداشت آب جدید، حداقل در دشت‌های ممنوعه به‌عنوان مجوزهای جدید، چه از طریق شرکت‌های آب منطقه‌ای و چه از طریق آراء قضایی اتفاق افتاد، بازتخصیص حقوق بهره‌برداران موجود بوده و نتیجه آن تبدیل دشت‌های ممنوعه به ممنوعه بحرانی و ممنوعه شدن تعداد

زیادی از آبخوان‌های آزاد در کشور می‌باشد. با توجه به تدریجی بودن بازتخصیص، موضوع برای بهره‌برداران قانونی نامحسوس بوده و اثرات خود را بصورت بطئی بر آنها هویدا نمود.

با ایجاد نظام تخصیص آب در وزارت نیرو و ابطال تبصره ذیل ماده ۳ قانون توزیع عادلانه آب تا حدودی بازتخصیص آب ساماندهی شد. اولاً تخصیص‌های جدید در دشت‌های ممنوعه صرفاً به مصارف غیرکشاورزی محدود شد و در دشت‌های آزاد هم تخصیص‌ها منوط به پتانسیل آبخوان‌ها و حوضه‌های آبریز شدند. به موازات آن، در خصوص تخصیص جدید که می‌توان گفت واگذاری مجدد منابع تخصیص یافته کنونی است، سیاست مدیریت تقاضا از سال ۱۳۸۵ در وزارت نیرو شکل گرفت و بنا بر این گذاشته شد که تقاضاهای جدید غیرکشاورزی بتوانند از محل بازتخصیص از مجوزهای کنونی و نه از طریق تخصیص از منبع آبی، نیاز خود را تأمین کنند. این سیاست‌گذاری به اعتقاد اینجانب درک درستی از مفهوم بازتخصیص در شرایط کنونی آب کشور است.

در وضعیت کنونی که منابع و مصارف آب در حالت ناترازی و شکنندگی قرار گرفته است، عرضه جدید آب می‌تواند ناپایداری و پیامدهای اقتصادی، اجتماعی و امنیتی برای مناطق مختلف ایجاد کند؛ هر چند در کوتاه مدت ممکن است به حل یک موضوع محلی منجر شود. بنابراین مصارف آب بایستی به سمت کارآیی و اشتغال بیشتر سوق داده شود و نیازهای بخش صنعت و خدمات به‌طور ویژه از بازتخصیص آب از محل ظرفیت موجود برداشت‌های آب، تأمین شود. ساز و کار عملیاتی شدن این موضوع با ارتقاء سیاست اشاره شده فوق در سال ۱۳۹۸ در قالب دستورالعمل اصلاحی مواد ۲۷ و ۲۸ قانون توزیع عادلانه آب در وزارت نیرو تبیین گردید. دستورالعمل مذکور به عنوان نمادی از مفهوم صحیح بازتخصیص آب تا حدود زیادی به عنوان یک ابزار کلیدی، فشار تقاضاهای جدید را کنترل کرده است. هر چند سیاست بازتخصیص تدوین شده هنوز نیاز به تکامل و ارتقاء بیشتری برای نهادینه شدن دارد که یکی از اهرم‌های کلیدی آن اجتناب وزارت نیرو از بازتخصیص از منابع (آبخوان‌ها و رودخانه‌ها) بدون توجه به حقوق قانونی ایجاد شده می‌باشد. شکل‌گیری بازار آب در برخی محدوده‌های مطالعاتی کشور نظیر خواف نمونه مهمی از سیاست‌گذاری بازتخصیص اشاره شده می‌باشد که با به حداقل رساندن فشار بر آبخوان توسط تقاضاهایی مانند صنایع فولاد، نیاز آبی آنها از طریق بازتخصیص یا جابه‌جایی تخصیص آب پروانه‌های کشاورزی موجود تأمین شده است. به هر صورت با توجه به فقدان و یا محدودیت منابع آبی جدید و گران بودن استحصال آنها از لحاظ اقتصادی در وضعیت امروزی ایران، بازتخصیص آب به عنوان راه حلی اساسی برای حل چالش‌های کنونی بخش آب کشور در قالب بازنگری تخصیص‌های قبلی متناسب با ظرفیت کنونی منابع آب، رفع نیازهای جدید و جایگزینی برداشت‌های آب غیرقانونی از محل جابجایی تخصیص‌های قانونی داده شده مورد تأکید و توصیه می‌باشد.



باز تخصیص آب از پنهان تا آشکار

در مناطق خشک و نیمه خشک که محدودیت منابع آب وجود دارد غالباً به اندازه کل ظرفیت موجود آب، منابع آبی تخصیص داده شده است.

متناسب با رشد شهرنشینی و صنعتی شدن جوامع، نیازمندی‌های جدیدی برای مصرف ایجاد می‌شود که لزوم بازتخصیص بین گروه‌های مختلف بهره‌برداران را به خوبی آشکار می‌کند. بنابراین بازتخصیص را می‌توان جابه‌جایی حقوق بهره‌برداران از منابع آبی نامید.

زمانی که آب‌های زیرزمینی افت می‌کند و حوضه آبریز از سطح تعادل خارج می‌شود به معنی آن است که هر نوع برداشت جدیدی که از دشت صورت بگیرد و یا جلوی نفوذ رواناب‌ها و تغذیه دشت گرفته شود (مثل ساخت سد) معادل با تخصیص از حقوق حقایقه‌داران سابق است و مصرف‌کنندگان جدید آب، حقایقه بهره‌برداران قبلی را به مصرف خود می‌رسانند.

متأسفانه آنچه در کشور ما رخ داده است بازتخصیص پنهان آب بوده است؛ یعنی دست‌اندازی به حقوق ذی‌نفعان به نفع مصالح و دیدگاه‌های سیاستمداران وقت، حتی با پوشش به ظاهر ملی تحت عنوان راندمان بالاتر اقتصادی آب در صنعت و اولویت آب شرب و صنعت.

با فرض پذیرش صحت این ادعا که راندمان اقتصادی آب در صنعت، بالاتر از کشاورزی است یا اولویت آب شرب بر بقیه مصارف، آیا می‌توان حقوق کشاورزان را نادیده گرفت و حقایقه آن را به صنعت یا شرب داد؟ عقل سلیم حکم می‌کند که مابه‌ازای این حقایقه گرفته شده از کشاورزان، حقوقی را برای آنان متصور بود. مدیریت منابع آب با انتقال آب برای صنعت و شهرها از مناطق دور و نزدیک و از ذخایر سطحی و زیرزمینی، عملاً سهم حقایقه کشاورزان را کاهش دادند و فشار بازتخصیص را به بخش کشاورزی و کشاورزان تحمیل کردند.

مطابق قانون توزیع عادلانه دولت مکلف شده بود که برای بهره‌برداران آب سطحی، پروانه مصرف معقول صادر کند؛ اما این پروانه‌ها صادر نشد و این عامل موجب شده تا بهره‌برداران امکان استناد به مجوز خود در دریافت آب را نداشته باشند و دولت به راحتی بتواند حقوق بهره‌برداران را جابه‌جا کند و از این طریق از پرداخت خسارت طبق شرایط ماده ۴۴ قانون توزیع عادلانه شانه خالی کند.

متأسفانه روش‌های ناکارآمد دولت در مدیریت منابع آب منتهی به بی‌تفاوتی بهره‌برداران نسبت به حفاظت از آبی که در آن سهیم هستند، گردید.

هرج و مرج‌های ایجاد شده در اثر نبود پروانه مصرف معقول از یک طرف و بی‌توجهی به حقوق بهره‌برداران در بازتخصیص‌های گذشته از طرف دیگر و همچنین عدم توان وزارت نیرو در جلوگیری از چاه‌های غیرمجاز، بهره‌برداران را هر چه بیشتر به سمت مسابقه برداشت بیشتر سوق داده است.

سوال مهم این است که چرا نظام بهره‌برداری آب، حساسیت کافی به حفاظت از حقوق ذی‌نفعان نداشته است؟

به نظر نگارنده حداقل دو عامل اصلی در این موضوع موثرند: ۱- وجود ابهام در قانون توزیع عادلانه آب که برخلاف قانون اساسی که منابع آبی را انفال می‌داند در قانون توزیع عادلانه، جزء مشترکات می‌داند و اگرچه به آب‌های عمومی اشاره کرده است که خود بیانگر وجود آب خصوصی است ولی اشاره صریحی به آب‌های خصوصی ندارد و باعث درک اشتباهی از قانون توزیع عادلانه آب شده که مالکیت آب را همانند قانون آب و نحوه ملی‌شدن آن می‌داند.

۲- شیوه تفکر و فرهنگ سیاسی حاکم بر کشور به‌خصوص در دهه اول بعد از انقلاب در مصلحت‌اندیشی‌های کلان برای کشور بدون در نظر گرفتن حقوق حقایقه‌داران و متناسب با درکی سوسیالیستی از توزیع منابع و ثروت عمومی.

جای تعجب است که علاوه بر سیاستون، حقوق‌دانان مستقر در دفاتر حقوقی وزارت نیرو نیز منافع گروهی و وزارتخانه را (مطابق دستور وزیر) به حقوق حقایقه‌داران مقدم کردند که این امر یا ناشی از وابستگی سیاسی آنان بوده و یا ضعف در صلاحیت علمی در تشخیص حقوق مردم که این هر دو ناشی از گزینش‌های غیرکارشناسی افراد در پست‌های حساس دولتی می‌باشد.

اولویت‌بندی‌هایی جهت مصرف آب همچون مقدم‌شمردن شرب و صنعت، مشخص‌نبودن متولی و میزان حقایقه‌های زیست‌محیطی، توسعه خشک‌سالی‌ها و تغییرات اقلیمی و همچنین برداشت از ذخایر نسل‌های آینده همه کمک کرد تا وزارت نیرو در فضای مبهم و به صورت تدریجی با سلب حقوق حقایقه‌داران قدیم سهمی از حقوق آنان را به بهره‌برداران جدید واگذار کند و به این روش با تخصیص پنهان آب رقم خورد.

توسعه تشکلهای کشاورزی که باعث آگاهی کشاورزان به حقوق خود و منتهی به اعتراضات به عملکرد وزارت نیرو شد و همچنین ورشکستگی منابع آبی نشان داد که بازتخصیص دیگر نمی‌تواند به صورت پنهان ادامه پیدا کند؛ لذا وزارت نیرو با ارائه پیش‌نویس قانون جامع آب به دنبال تعدیل پروانه‌های کشاورزی بر مبنای آب قابل برنامه‌ریزی می‌باشد و می‌خواهد آنچه تاکنون به صورت غیرقانونی و پنهان در بازتخصیص عمل کرده است، بتواند با دریافت مجوز از مجلس به صورت آشکار انجام دهد.

راه حل پیشنهادی:

راه حل مسئله اجرای بازتخصیص پایدار و شفاف به جای نوع پنهان آن است و برای اجرای آن دو پیش‌نیاز باید فراهم گردد: یکم: تشکیل کمیسیون دشت و حوضه آبریز، این کمیسیون با مشارکت دولتمردان و حضور حداکثری نمایندگان مردم دشت، تصمیم بگیرد برای بقای دشت چه مقدار آب برداشت کند و این آب به چه فعالیت‌های اقتصادی‌ای اختصاص دهد و نهایتاً بتواند مجوزی برای بازتخصیص آب آن حوضه یا دشت صادر کند. حضور حداکثری ذی‌نفعان در این کمیسیون عامل پایداری باز

تخصیص خواهد بود.

دوم: ایجاد یک بازار آب کاملاً شفاف بدون دخالت دولت که منتهی به کشف قیمت واقعی آب در هر دشتی شود و سپس بین دو طرف خریدار و فروشنده حقایق، بدون دخالت هیچ نهاد دولتی و حکومتی، بازتخصیص شفاف در میزان و مبلغ آب بین طرفین انجام گیرد.

منابع:

بازتخصیص آب کشاورزی، اندیشکده تدبیر آب، ۱۳۹۸.

Article Type: Applied

نوع مقاله: کاربردی

Use of Modeling in the Development of Water Resources and Consumption Scenarios; Case Study: Varamin Plain

A.R. Ahmadi¹, B. Malemohammadi^{2*}, L. Zebardast³

1,2,3- MSc, Associate Professor and Assistant Professor, School of Environment, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

*(Corresponding Author Email: malekb@ut.ac.ir)

Received: 15-03-2021

Revised: 03-06-2021

Accepted: 20-06-2021

Available Online: 06-12-2021

استفاده از مدل سازی در توسعه سناریوهای منابع و مصارف آب؛ مطالعه موردی: محدوده مطالعاتی دشت ورامین

علیرضا احمدی^۱، بهرام ملک محمدی^{۲*}، لعبت زبردست^۳

۱، ۲ و ۳- به ترتیب کارشناسی ارشد، دانشیار و استادیار، دانشکده محیط زیست، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

*(نویسنده مسئول، E.mail: malekb@ut.ac.ir)

تاریخ بازنگری: ۱۳/۰۳/۱۴۰۰

تاریخ دریافت: ۲۵/۱۲/۱۳۹۹

تاریخ انتشار: ۱۵/۰۹/۱۴۰۰

تاریخ پذیرش: ۳۰/۰۳/۱۴۰۰

Abstract

The utilization of water resources models enables correct and sustainable planning in water resources management. The purpose of this study is to optimize the use of water resources in the catchment area of Varamin plain for 10 years under different management scenarios. To achieve optimal conditions in the volume of water resources, the minimization of non-supply needs and the needs of different land use in Varamin plain were studied. Accordingly, the situation of water resources in Varamin plain in three sectors of agriculture, industry, and drinking using WEAP model under two scenarios: a- reference with prioritization of the ministry of energy and b- scenario of reducing inlet volume by changing prioritization in the period 2016-2026 Solar was evaluated. The climate of the region was studied based on the model of the blue year (flow, precipitation, evapotranspiration, temperature) and entered the model. The results showed that according to Scenario A, we will have a 30% shortage of drinking water supply in the region, and this is 37% for the scenario of the reduced input volume. Based on the results, the reference scenario, which in terms of meeting different needs and reliability index of water needs and maximum volume of water not provided during the statistical period, compared to the scenario of the reduced input volume, has a better performance for the Varamin plain, It was considered as the preferred scenario.

Keywords: Water Resources Models, Varamin Plain, Water Resources, Climate, WEAP.

چکیده

بهره‌مندی از مدل‌های منابع آب، امکان برنامه‌ریزی صحیح و پایدار در مدیریت منابع آب را فراهم می‌کند. هدف از انجام پژوهش حاضر، بهینه‌سازی بهره‌برداری از منابع آبی حوضه آبریز دشت ورامین طی ۱۰ سال تحت سناریوهای مختلف مدیریتی است. برای رسیدن به شرایط بهینه در مقدار حجم منابع آب، حداقل سازی عدم تأمین نیازها و میزان نیاز کاربری‌های مختلف در دشت ورامین بررسی شد. براین اساس وضعیت منابع آب دشت ورامین در سه بخش کشاورزی، صنعت و شرب با استفاده از مدل WEAP تحت دو سناریوی الف- مرجع با اولویت‌بندی وزارت نیرو و ب- سناریو کاهش حجم ورودی با تغییر اولویت‌بندی در دوره ۱۳۹۵-۱۴۰۵ شمسی ارزیابی شد. اقلیم منطقه براساس مدل سال آبی (دبی)، بارش، تبخیر و تعرق، دما) بررسی و وارد مدل شد. نتایج نشان داد براساس سناریوی الف در تأمین آب شرب ۳۰٪ کمبود آب در منطقه خواهیم داشت و این مورد برای سناریوی کاهش حجم ورودی ۳۷٪ می‌باشد. براساس نتایج، سناریوی مرجع که از نظر تأمین نیازهای مختلف و شاخص اطمینان‌پذیری تأمین نیازهای آبی و حداکثر حجم آب تأمین نشده در طول دوره آماری نسبت به سناریوی کاهش حجم ورودی، عملکرد بهتری را برای محدوده دشت ورامین به همراه داشته است، به‌عنوان سناریوی برگزیده در نظر گرفته شد.

واژه‌های کلیدی: مدل‌های منابع آب، دشت ورامین، منابع آب، اقلیم، WEAP.

مفهوم توسعه پایدار منابع آب و تأمین نیازهای جمعیت فعلی بدون اثر منفی بر توانایی تأمین نیازهای نسل‌های آینده بوده و برنامه‌ریزی برای آن، مستلزم مدل‌سازی، طراحی و مدیریت سامانه‌های منابع آب است. بسیاری از مناطق جهان با چالش‌های درخور توجهی در مدیریت آب‌های شیرین روبه‌رو هستند. تخصیص منابع محدود آب کیفیت محیط‌زیست و سیاست‌های استفاده پایدار آب، مسائلی هستند که نگرانی در مورد آن‌ها رو به افزایش است. در مدیریت یکپارچه منابع آب برای اینکه فرایندها و اقدامات به شکل عرضه و تقاضا در نظر گرفته شوند باید هم‌زمان به دو سیستم مجزا که چشم‌انداز مدیریت را شکل می‌دهند، توجه شود. یکی از آن‌ها سیستمی است که به قالب بیوفیزیکی منطقه، تقاضای آب، وجود آب و انتقال آن درون یک حوضه مربوط می‌شود (Loucks و همکاران، ۲۰۰۵).

رویکرد مدیریت جامع منابع آب در شرایط مختلف آب و هوایی و اجتماعی-اقتصادی ضروری است. سیستم مدیریت همواره به دنبال برقراری تعادل میان مصارف انسان و نیازهای آبی محیط‌زیست می‌باشد. بنابراین می‌توان بیان کرد تحلیل یکپارچه طبیعت و سیستم‌های مدیریت شده مفیدترین روش برای دستیابی به این هدف می‌باشد. در تمام نقاط ایران برای دهه‌های آینده تغییرات بارش روند کاهشی دارد (علیزاده و همکاران، ۱۳۸۹). مدیریت صحیح و کارآمد منابع آب نیازمند شناخت و بررسی اثرات هیدرولوژیکی توسعه سامانه‌های آبیاری بر کیفیت و کمیت منابع آب حوضه آبریز است. همچنین، فرایندهای هیدرولوژیک مناطق خشک و نیمه‌خشک، حساسیت بسیار زیادی در برابر تغییرات دارند (Mombanch و همکاران، ۲۰۱۹). برنامه‌ریزی و مدیریت جامع منابع آب، یک سیستم مشارکتی با حضور تمام ذی‌نفعان و تصمیم‌گیران است که با در نظر گرفتن کلیه منابع آب اعم از سطحی و زیرزمینی و آب برگشتی از لحاظ کمی، کیفی و تمام مصارف اعم از شرب، صنعت، کشاورزی و محیط‌زیست با هدف توسعه پایدار منابع آب تعریف می‌شود. محدوده دشت ورامین به دلیل موقعیت خاص و شرایط کم آبی موجود یکی از مناطق مهم جهت برنامه‌ریزی و مدیریت جامع منابع آب می‌باشد. تمام خسارت‌هایی که از خشکسالی‌های کشور رخ می‌دهد هنوز براساس معیارهای موجود ایران جزء کشورهای کم آب دنیا قلمداد نمی‌شود.

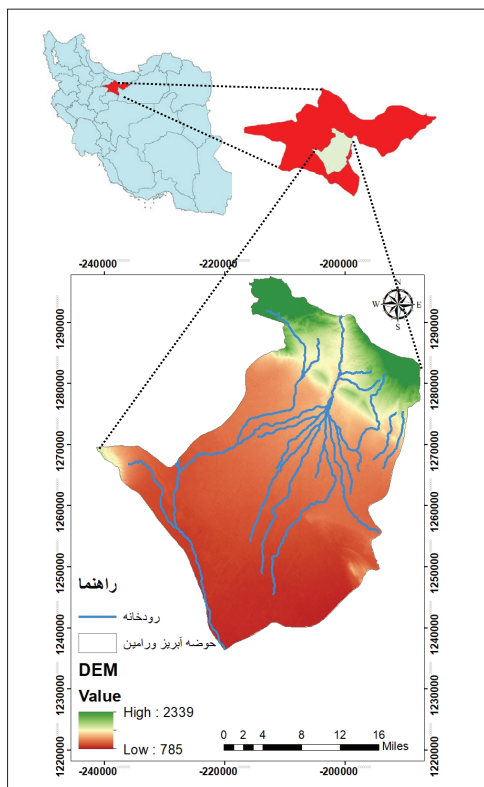
در زمینه استفاده از مدل WEAP برای مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب در سرتاسر جهان تحقیقاتی صورت گرفته است که در ادامه به آن اشاره شده است.

زینال‌زاده و همکاران (۱۳۹۸) عملکرد مدل WEAP در شبیه‌سازی هیدرولوژیک حوضه آبریز الوند را در یک دوره آماری ۱۶ ساله

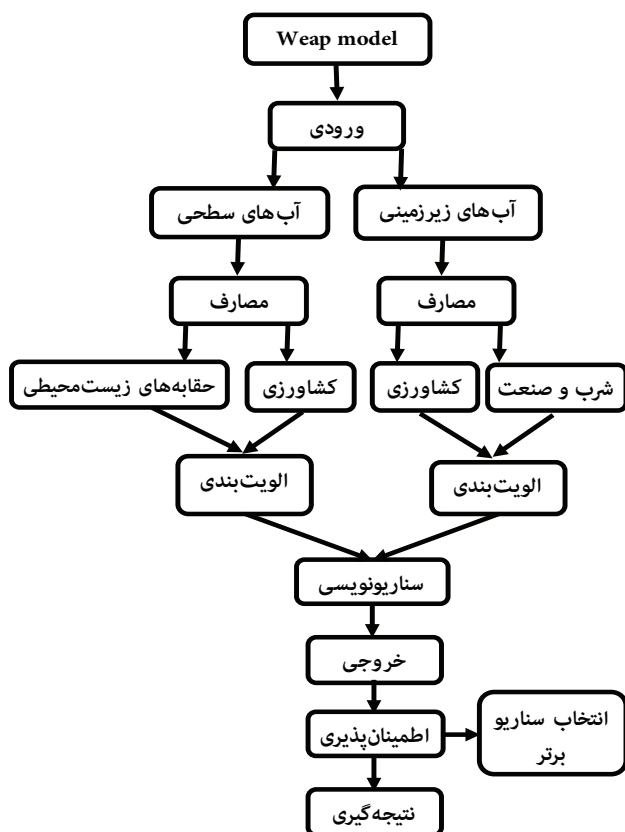
بررسی کردند. نتایج عملکرد خوب مدل WEAP در شبیه‌سازی رفتار هیدرولوژیک اعم از بارش-رواناب، جریان پایه، آب زیرزمینی و سایر اجزای بیلان آبی حوضه آبریز الوند را نشان داد. در این پژوهش، نتایج شبیه‌سازی سناریوی تأمین آب شرب منطقه از سد آق‌چای کاهش در افت سطح آب زیرزمینی و افزایش حجم آبخوان به میزان سالیانه ۵/۴ میلیون متر مکعب را نشان داد (زینال‌زاده و همکاران، ۱۳۹۸). Ospina و همکاران (۲۰۰۹) عرضه و تقاضای آب را تحت سناریوهای مختلف تغییرات اقلیم در حوضه سینو کارائیب در کلمبیا مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. تغییرات اقلیم براساس مدل کلی چرخش تغییرات اقلیم تحت سناریوهای A۲ بررسی شد و از مدل هیدرولوژیکی WEAP برای شبیه‌سازی سیستم‌های مختلف آب و سیاست‌های مدیریت به‌منظور فراهم کردن ابزار، ضوابط و عناصر تصمیم‌گیری برای ایجاد استراتژی‌های تطبیقی تحت شرایط نامطلوب، استفاده شد و کارایی این مدل را برای مدیریت یکپارچه منابع آب قابل قبول نشان داد (Ospina و همکاران، ۲۰۰۹). Hum و Abdul-Talib (۲۰۱۶) از مدل WEAP برای بررسی منابع و مصارف آب موجود در شهر Selangor در مالزی تا سال ۲۰۵۰ میلادی استفاده کردند. نتایج نشان داد استفاده از آب زیرزمینی به‌عنوان یک منبع جایگزین و اقدامات صرفه‌جویی در مصارف، کمبود آب در منطقه مطالعاتی را تا حد قابل‌قبولی کاهش می‌دهد (Hum و Abdul-Talib، ۲۰۱۶).

Faiz و همکاران (۲۰۱۷) از مدل WEAP به بررسی تغییرات جریان و شدت خشکسالی در حوضه رودخانه Songhua در شمال چین پرداختند. نتایج نشان داد مدل WEAP می‌تواند به‌طور مؤثری در این حوضه استفاده شود. نتایج نشان داد با استفاده از نرم‌افزار WEAP می‌توان در حوزه تخصیص منابع باتوجه‌به سناریوهای مختلف برنامه‌ریزی قابل‌قبول و مفیدی داشت (Faiz و همکاران، ۲۰۱۷). Khalil و همکاران (۲۰۱۸) قابلیت مدل WEAP در تخمین میزان آب زیرزمینی از رواناب ناشی از بارندگی در حوضه Mae Klong تایلند را بررسی کردند. آن‌ها حوضه فوق را به ۶ زیر حوضه تقسیم نموده و با استفاده از گزینه بارش-رواناب در مدل WEAP رواناب ناشی از بارندگی را در یک دوره ۱۵ ساله شبیه‌سازی کردند و میزان تغذیه آب زیرزمینی را برآورد نموده و قابلیت مدل WEAP در تخمین میزان تغذیه طبیعی آب‌های زیرزمینی را تأیید کردند (Khalil و همکاران، ۲۰۱۸).

مطالعات گذشته نشان می‌دهد بررسی تأثیرات هیدرولوژیک مدیریت منابع آب در حوضه‌های آبریز با استفاده از مدل‌سازی مورد توجه محققان بوده است. باتوجه‌به شرایط پیچیده هیدرولوژیک ناشی از دخالت‌های انسانی و وضعیت بحرانی منابع آب در حوضه آبریز ورامین پژوهش حاضر با هدف توسعه مدل منابع آبی این حوضه آبریز با استفاده از مدل WEAP در این منطقه برنامه‌ریزی شد. با توسعه این مدل در منطقه مورد



شکل ۱- نقشه منطقه مورد مطالعه حوزه آبریز ورامین



شکل ۲- فلوچارت مراحل انجام پژوهش

مطالعه، می‌توان سناریوهای مختلفی براساس راهکارهای ارتقای مدیریت آب و شرایط موجود برای منابع آب منطقه برنامه‌ریزی کرد. در این پژوهش به مقایسه ادامه روند کنونی باتوجه به میزان بارش، رطوبت، دما، میزان مصارف کاربری‌های مختلف در منطقه و دیگر پارامترهای اثرگذار باتوجه به کاهش حجم ورودی آب در منطقه پرداخته شد. همچنین با در نظر گرفتن منابع آب سطحی و زیرزمینی و مصارف مختلفی از قبیل شرب، صنعت و کشاورزی، شبیه‌سازی حوزه آبریز دشت ورامین توسط مدل WEAP انجام شد و با اعمال سناریوهای مختلف مقایسه تطبیقی شد. در این پژوهش مدل‌سازی و بررسی اثرات مختلف آب و هوایی باتوجه به حجم آب در دسترس به کمک سناریوهای مختلف در راستای اصلاح الگوی مصرف و برنامه‌ریزی برای تأمین آب دشت ورامین در سال‌های پیش‌رو می‌باشد.

مواد و روش‌ها

• محدوده مورد مطالعه

دشت ورامین در ۴۵ کیلومتری جنوبی تهران و بین طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۵۱ درجه ۴۵ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۳۰ دقیقه و در ارتفاع تقریبی ۱۰۰۰ متر از سطح دریا واقع شده است. مساحت دشت آبرفتی آن حدود ۱۳۸۰۰۰ هکتار است که بیش از ۵۰۰۰۰ هکتار از آن جزء اراضی کشاورزی محسوب می‌شود.

دشت ورامین دارای اقلیم خشک بوده و از ویژگی‌های آن بارندگی کم، گرمای زیاد و دوره خشک طولانی است. نواحی شمالی این منطقه با میانگین دمای سالانه ۱۱ درجه سانتی‌گراد کمترین دمای منطقه و نواحی جنوبی منطقه با میانگین سالانه ۱۸ درجه سانتی‌گراد بیشترین دما را دارند. توزیع فضایی بارش در این منطقه بیانگر آن است که از شمال به جنوب و از غرب به شرق از میزان بارش منطقه کاسته می‌شود. تغییرات بارش ایستگاه ورامین نشان می‌دهد مقدار بارش میانگین سالانه در این منطقه ۱۷۳ میلی‌متر است (وزارت نیرو، ۱۳۹۵). نقشه منطقه مورد مطالعه در شکل (۱) ارائه شده است.

در منطقه مورد مطالعه باتوجه به خشکسالی چند سال اخیر و افزایش روند کویری شدن، نیاز ویژه‌ای به برنامه‌ریزی در تخصیص منابع آب در حوزه کیفیت و کمیت آب با توجه به کاربری اراضی و نحوه صحیح استفاده از آن وجود دارد. نمودار مراحل انجام پژوهش در شکل (۲) ارائه شده است. طبق فلوچارت ارائه شده ابتدا با بارگذاری داده‌های ورودی و خروجی منابع آب سناریوهای مورد نظر تعیین شده و نتایج شبیه‌سازی سناریوها ارائه شده است. سپس با بررسی نمودارهای کمی و نتایج حاصل از سناریوها، شرایط منطقه برای آینده پیش‌بینی صورت گرفته است.

• منابع آب

بیشترین میزان مصرف آب سطحی در دشت ورامین حدود ۳۳۱/۳۸ میلیون مترمکعب بر سال است. رودخانه‌های جاجرود و رود شور، رودخانه‌هایی هستند که به این دشت وارد می‌شوند. رودخانه جاجرود که اصلی‌ترین منبع آب سطحی این دشت است، از شمال شرق و رود شور از شمال غرب وارد محدوده می‌شوند (شمشکی و انتظام سلطانی، ۱۳۸۴). مجموع ورودی آبخوان آبرفتی تغذیه سالانه دشت ورامین ۳۸۷/۶ میلیون مترمکعب و مجموع خروجی از آبخوان ۴۶۶/۶ میلیون مترمکعب برآورده شده است. بنابراین تغییر سالانه حجم مخزن آبرفتی دشت ۷۹- میلیون مترمکعب است. براساس مصرف آبخوان دشت ورامین افت متوسط سطح آب زیرزمینی طی دوره ۱۸ ساله ۱۳۷۷ تا ۱۳۹۵، ۱/۳۳ متر بر سال است. با توجه به ۹۸۰ کیلومترمربع وسعت و ۶٪ ضریب ذخیره آبخوان آبرفتی، کسری سالانه حجم مخزن دشت ورامین ۷۸/۲ میلیون مترمکعب می‌باشد که با بیلان آب زیرزمینی همخوانی دارد. مجموع مصرف آب در دشت ورامین ۸۴۴ میلیون متر مکعب است که ۴۵۹ میلیون متر مکعب از منابع زیرزمینی و ۳۸۵ میلیون متر مکعب از جریان‌های سطحی و چشمه‌ها تأمین می‌شود. از مجموع آب‌های زیرزمینی، ۶۸ میلیون متر مکعب در بخش شرب، ۱۶ میلیون متر مکعب در بخش صنعت و ۷۵۹ میلیون متر مکعب در بخش کشاورزی مصرف می‌شود (وزارت نیرو، ۱۳۹۵).

به‌منظور بررسی کمی منابع آب محدوده دشت ورامین از داده‌های دبی، بارش، تبخیر، ورودی به مخزن، مصرف نیازهای مختلف (شرب، کشاورزی، صنعتی، حقابه محیط‌زیست)، جمعیت و سطح زیر کشت استفاده شده است (وزارت نیرو، ۱۳۹۵).

آبخوان دشت ورامین در شمال غرب با آبخوان دشت تهران و در جنوب غرب با حوضه آبریز کرج مرتبط می‌باشد. رودخانه شور که مرز غربی دشت ورامین محسوب می‌شود، تغذیه‌کننده است. منبع اصلی تأمین‌کننده آب این رودخانه رواناب‌های سطحی و فاضلاب‌های خام تهران و شمیرانات می‌باشد (وزارت نیرو، ۱۳۹۵).

تغییرات بارش ایستگاه ورامین نشان می‌دهد ورامین در طول سال بارندگی کمی دارد. به‌طوری‌که در فصل تابستان تقریباً بارشی ندارد و حداکثر بارش آن ۳۵/۲ میلی‌متر در ماه بهمن است. مقدار بارش سالانه در این منطقه معادل ۱۷۳ میلی‌متر است. نتایج حاصل از پارامترهای دمایی نشان می‌دهد منطقه ورامین در دی ماه کمترین دما و در تیرماه بیشترین دما را دارد (شمشکی و انتظام سلطانی، ۱۳۸۴).

مجموع سالانه بارش در حوضه‌های مطالعاتی، در دشت ۱۵۷/۵ میلی‌متر و در ارتفاعات ۱۹۷/۸ میلی‌متر است. توزیع بارش ماهانه در این دشت در بازه ۱۰ ساله بین ۰/۸ میلی‌متر در شهریور ماه و ۲۷/۶ میلی‌متر در اسفند ماه متغیر است.

همچنین کمینه بارش در ارتفاعات با ۱ میلی‌متر متعلق به شهریورماه و بیشینه آن با ۳۹/۲ میلی‌متر متعلق به بهمن ماه می‌باشد (وزارت نیرو، ۱۳۹۵).

باتوجه به استانداردها و دستورالعمل‌های موجود در کشور (موسسه تحقیقات آب و خاک)، کلیه اراضی از نظر شکل ظاهری و فیزیوگرافی به ۹ تیپ اصلی و ۳ تیپ فرعی تقسیم می‌شوند که عبارت‌اند از: کوه‌ها، تپه‌ها، فلات‌ها و تراس‌های فوقانی، دشت‌های دامنه‌ای، دشت‌های رسوبی رودخانه‌ای، اراضی پست، اراضی دشت سیلابی، واریزه‌های بادبزی شکل سنگریزه‌دار، آبرفت‌های بادبزی و سه تیپ فرعی دشت‌های آبرفتی، اراضی مخلوط و اراضی متفرقه (شمشکی و انتظام سلطانی، ۱۳۸۴).

پوشش گیاهی در سطح این دشت شامل مراتع، زراعت آب و باغی و زراعت دیم می‌باشد. مراتع با گسترش حدود ۲۴٪ بعد از زراعت آبی و باغی قرار می‌گیرد. درصد گسترش زراعت دیم در این پهنه بسیار محدود و حدود ۰/۰۷٪ از مساحت دشت را به خود اختصاص داده است. در جدول (۲) نوع پوشش گیاهی، درصد تاج و گسترش آن در سطح دشت ورامین ارائه شده است.

• رویکرد مدل WEAP

مدل برنامه‌ریزی و ارزیابی منابع آب (WEAP) نوعی بسته مدل‌سازی بوده که قادر به ارزیابی یکپارچه‌ای از اقلیم، هیدرولوژی، کاربری اراضی، تأسیسات آبیاری و اولویت‌های مدیریت آب حوضه آبریز است. در مدل WEAP، تأمین تمامی محدودیت‌ها به‌طور متناوب برای هر گام زمانی و با توجه به اولویت عرضه و تقاضا تعریف می‌شود. مدل WEAP در هر گام زمانی معادله تعادل جرمی آب را برای هر گره و شاخه محاسبه می‌کند (احمدآلی و همکاران، ۱۳۹۷؛ Yates و همکاران، ۲۰۰۵b؛ Yates و همکاران، ۲۰۰۵a). با استفاده از سری‌های زمانی اقلیم، مدل WEAP مؤلفه‌های چرخه هیدرولوژیک را با شبیه‌سازی فرایند بارش-رواناب در سطح حوضه آبریز محاسبه می‌کند (Esteve و همکاران، ۲۰۱۵). در فرایند شبیه‌سازی، رفتار هیدرولوژیک حوضه آبریز توسط مدل WEAP، ابتدا در مرحله نخست، مؤلفه‌های زمانی و مکانی سامانه آبی تعریف شده و در مرحله دوم وضعیت فعلی آبی براساس منابع و مصارف شبیه‌سازی می‌شود. برای واسنجی مدل یا تعیین پارامترهای بهینه آن، از ابزار PEST استفاده می‌شود. PEST ابزار کارآمدی است که از طریق فراهم‌سازی مقایسه مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی مدل، واسنجی یک یا چند متغیر را به‌صورت هم‌زمان میسر می‌کند. واسنجی مدل با مقایسه دبی شبیه‌سازی‌شده سالیانه با دبی مشاهداتی در ایستگاه هیدرومتری منتخب در منطقه انجام شد. پس از واسنجی، بدون تغییر در متغیرهای ثابت و پارامترهای واسنجی

شده، نتایج مدل با داده‌های مشاهده شده ایستگاه منتخب در حوضه برای دوره شبیه‌سازی مقایسه و اعتبارسنجی شد. در گام سوم سناریوها تبیین و تدوین شد، این گام مجموعه‌ای از فرضیه‌های مربوط به تأثیرات تغییر سیاست‌ها، هزینه‌ها و شرایط اقلیمی در آینده را در برگرفت. در گام چهارم ارزیابی

کاربرد مدل انجام شد که در آن گزینه‌ها باتوجه به کفایت آب، هزینه‌ها و سودها، سازگاری با اهداف محیط‌زیستی و حساسیت نسبت به عدم قطعیت‌ها در متغیرهای کلیدی مدنظر ارزیابی شد (Esteve و همکاران، ۲۰۱۵). مراحل اجرای مدل WEAP در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱- مراحل اجرای مدل WEAP

شماره مرحله	عنوان	مشخصات	ورودی
مرحله اول	تنظیم پارامترهای عمومی	تعیین سال پایه	۱۳۹۵
		طول دوره شبیه‌سازی	۱۰
		تعیین تعداد روزهای ماه	
مرحله دوم	ورود اطلاعات	سایت تأمین	آب سطحی آب‌بندان سد آب زیرزمینی
		سایت تقاضا	کشاورزی شرب صنعت
		ایجاد طرح‌های مدیریتی	
مرحله سوم	نوشتن سناریو	مقایسه نتایج سناریوها	نتیجه‌گیری و تحلیل
مرحله چهارم	اجرای برنامه		

• توسعه سناریوها

در این مرحله مجموعه‌ای از فرضیات مربوط به تأثیر هرگونه تغییرات در سیستم (به دلیل تغییر سیاست‌ها در آینده و یا شرایط اقلیمی) تعریف شد. WEAP شامل سناریوهای تحلیلی می‌باشد. این سناریوها مشخصات اقتصادی-اجتماعی سیستم در آینده، در طول زمان و در شرایط مشخص از سیاست‌گذاری را تعریف می‌کنند.

سناریوها می‌توانند نیازهای آبی، قیمت و حتی عوامل محیطی را ارزیابی کنند. همه سناریوها از یک سال پایه شروع می‌شوند و می‌توانند طیف وسیعی از موضوعات را شامل شوند، به‌طوری‌که به‌وسیله آن‌ها پاسخ بسیاری از سوال‌ها با مفهوم "What-if" را می‌توان دریافت کرد. در نوشتن سناریوها فرضیات ثابتی وجود دارند که برای تمام سناریوها صادق می‌باشند. از این فرضیات می‌توان برای تمام سناریوها استفاده کرد. در این صورت اطلاعات منطقه در سال پایه و یا در قسمت فرضیات کلیدی مدل وارد می‌شوند که این روش تنها جهت سهولت کار است، زیرا در این حالت دیگر لازم نیست تمام اطلاعات را تک‌تک برای همه سناریوها وارد کرد (Levite و همکاران، ۲۰۰۳). در مدل‌های شبیه‌سازی مانند WEAP که قابلیت سناریوپذیری

• سناریو مرجع

سناریو مرجع بیانگر ادامه شرایط کنونی بدون تغییر اساسی در سیاست‌های مدیریتی در آینده می‌باشد. در این سناریو سال ۱۳۹۵ به‌عنوان سال پایه تعریف شده و شبیه‌سازی برای افق ۱۰ ساله تا سال ۱۴۰۵ انجام شد. در سناریوی مرجع فرض شد تمامی نیازها ثابت است. ترتیب اولویت تخصیص منابع آب مورد تایید وزارت نیرو به‌ترتیب شرب و صنعت، کشاورزی و محیط‌زیست بیان شده است. در این سناریو فرض‌های ذیل برقرار است:

- ۱- تقاضای کشاورزی و راندمان آن مانند شرایط کنونی و بدون تغییر در نظر گرفته شده است.
- ۲- تقاضای آب شرب برای شهر و جمعیت منطقه ثابت در نظر گرفته شده است.
- ۳- تقاضای صنعتی و محیط‌زیستی مانند شرایط کنونی برای سال ۱۴۰۵ در نظر گرفته شده است.

• سناریو کاهش حجم ورودی

باتوجه به اینکه ایران جز کشورهای خشک جهان با نزولات جوی کم می باشد، بیشتر مناطق کشور با چالش تأمین آب شیرین مواجه هستند. همچنین در سال های اخیر کشور با خشکسالی ها و افزایش جمعیت مواجه شده است. در سناریو کاهش حجم ورودی آب با توجه به روند افزایش دما و کاهش میزان بارندگی فرض شد، طی سال های آینده منطقه با اقلیم خشک روبه رو شود. در طول دوره پیش بینی آب و هوای منطقه براساس مدل سال آبی (دبی، بارش، تبخیر و تعرق، دما) بررسی و وارد مدل شد. در این روش سال های آبی به انواع خشک، نیمه خشک، معمولی، مرطوب و خیلی مرطوب تقسیم بندی می شوند و برای هر کدام در مدل ضریبی تعریف می شود که نشان دهنده میزان خشکی آن سال می باشد. باتوجه به تعریف سال ها از نظر خشکی میزان دبی ورودی برای سال های آینده با نسبتی از دبی ورودی سال پایه محاسبه شده است. این سناریو بر مبنای سناریوی مرجع تعریف شد. به طوری که فرض بر این است که در آینده روند منطقه رو به کم آبی می باشد و میزان حبابه محیط زیستی افزایش پیدا می کند. لذا در این پژوهش نیازهای شرب، کشاورزی و محیط زیست در اولویت اول و نیاز صنعتی در اولویت بعدی در نظر گرفته شد.

در سناریو مرجع، به شبیه سازی شرایط واقعی باهدف برنامه ریزی برای وضعیت موجود و پیش بینی برای آینده اقدام شد. این سناریو براساس شرایط منطقه از قبیل بارندگی، تبخیر و تعرق، رطوبت و دما منطقه در سال ۱۳۹۵ وارد مدل شد و براساس شرایط موجود در منطقه شبیه سازی صورت گرفت. همچنین، سناریو کاهش حجم ورودی آب در منطقه و افزایش نیاز آب شبیه سازی شد.

یافته ها و بحث

• بررسی سناریوها

سناریو اول: سناریو مرجع

براساس این سناریو همانطور که در شکل (۳) مشاهده می شود میزان آب موجود در محدوده دشت ورامین تا سال ۱۴۰۲ تمام نیازهای منطقه را برطرف می کند اما در سه سال آخر سناریو با عدم تأمین آب به میزان حداکثر ۲۵ میلیون مترمکعب مواجه می شود. در منطقه مورد مطالعه حوضه آبریز ورامین بیشترین مصرف آب مربوط به کاربری کشاورزی و شرب می باشد به همین دلیل بیشترین اثر منفی عدم تأمین آب در منطقه بر این دو کاربری خواهد بود.

به بیان دیگر، در این سناریو برای تأمین آب کشاورزی، شرب و صنعت منطقه، با افزایش نیاز و کاهش حجم ورودی، منابع آب زیرزمینی و سطحی ارزیابی شدند.

• شاخص اطمینان پذیری

سیستم های مخازن ذخیره در تأمین آب در طی دوره های خشکسالی، به مدت چندین ماه یا سال دچار شکست می شوند. بهره برداری بدون شکست سیستم ذخیره معمولاً به وسیله شاخص قابلیت اعتماد ارزیابی می شود. Hashimoto و همکاران (۱۹۸۲) شاخص قابلیت اعتماد را به صورت ذیل بیان کردند:

نتیجه حالت یک سیستم به صورت متغیرهای تصادفی در زمان t در دو مجموعه می باشد. یکی از مجموعه ها شامل همه نتایج رضایت بخش و مجموعه دوم شامل همه نتایج غیرقابل قبول می باشد. عملکرد سیستم در هر زمان t یکی از دو مجموعه به حساب می آید (Hashimoto و همکاران، ۱۹۸۲). قابلیت اعتماد یا اطمینان پذیری یک سیستم به صورت فرکانس یا احتمال برای سیستم که در حالت نرمال باشد تعریف شد. قابلیت اعتماد عبارت است از بخشی از زمان که مخزن قادر به تأمین تقاضا باشد (رابطه ۱) بر این اساس در رابطه (۱) R_f بیانگر قابلیت اعتماد بر پایه زمان، f تعداد کل دوره های بازگشت، T تعداد کل دوره زمانی ثبت شده می باشد. برای محاسبه شاخص اطمینان پذیری، آستانه تعیین شکست سیستم در زمینه تأمین آب برای گره های نیاز کشاورزی ۶۰ درصد و برای گره های نیاز شرب و صنعت ۹۰ درصد در نظر گرفته شده است (محمدی و همکاران، ۱۳۸۹).

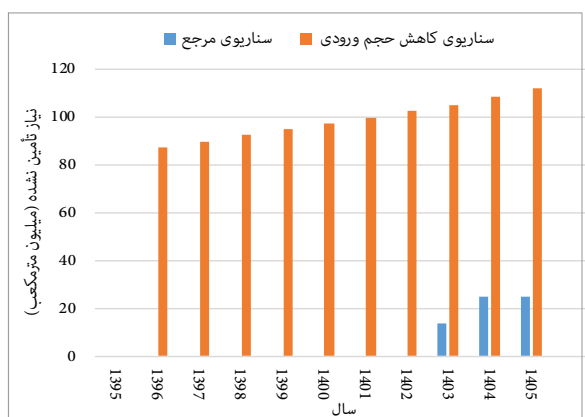
$$R_f = (1 - f/T) \quad (1)$$

کاربری صنعت در منطقه ورامین در مقایسه با کشاورزی و شرب، آب کمتری را به خود اختصاص می دهد به همین علت اثر منفی کمبود آب کمتر متوجه کاربری صنعت در منطقه خواهد شد.

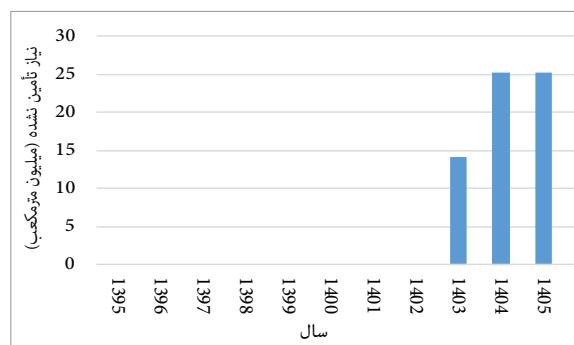
در شکل (۴) مشاهده می شود، در سال های پایانی سناریو میزان تأمین آب بخش کشاورزی ۶۷٪، شرب ۷۰٪ و صنعتی ۸۵٪ حاصل شد که نشان دهنده روند ناپایدار وضعیت آب در منطقه می باشد. در منطقه ورامین به علت کشاورزی با سیستم سنتی و راندمان پایین شبکه توزیع آب بیشترین خسارت را کاربری های کشاورزی و شهر خواهند داشت با افزایش جمعیت و سطح زیر کشت با کمبود آب بیشتری روبه رو می شوند و برای جبران این کمبود نیاز به تغذیه مصنوعی و یا انتقال آب احساس می شود.

به کاهش آب ورودی به منطقه شده است، در سناریو کاهش حجم ورودی برای بازه زمانی ۱۰ ساله از ۱۳۹۵ به عنوان سال پایه تا سال ۱۴۰۵ به عنوان آخرین سال سناریو، لحاظ شده است. در طول دوره پیش‌بینی آب و هوای منطقه براساس مدل سال آبی (دبی، بارش، تبخیر و تعرق، دما) بررسی و وارد مدل شد و مقدار حقابه محیط‌زیستی برای رودخانه ۵ مترمکعب بر ثانیه تعیین شد. با توجه به شکل (۵) میزان حجم آب تأمین‌نشده در سناریو کاهش حجم ورودی به بیش از ۲۷۰ میلیون مترمکعب می‌شود که اختلاف آن با سناریو مرجع مشاهده می‌شود. در ادامه این روند در محدوده مطالعاتی خساراتی از جمله نشست زمین و بحران آب باتوجه‌به کمبود بارش و عدم تأمین نیاز آب و تأثیر آن بر شرایط اقتصادی، اجتماعی را به همراه خواهد داشت. در این سناریو باتوجه‌به تغییر اولویت وزارت نیرو و اولویت بندی اول به کاربری‌های کشاورزی و شرب و اولویت دوم به کاربری صنعتی ناپایداری بیشتر در عدم تأمین آب منطقه به وجود خواهد آمد. لازم به ذکر است، بیشترین عدم تأمین آب در منطقه مربوط به کاربری کشاورزی می‌باشد.

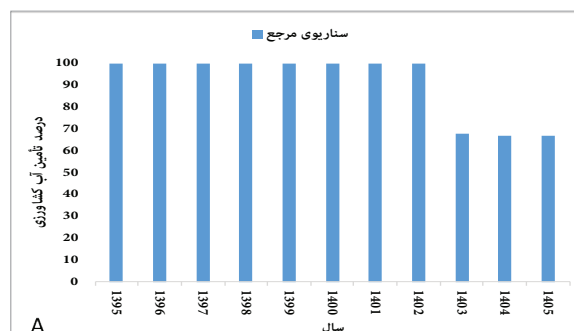
درصد تأمین آب برای سناریو کاهش حجم ورودی در شکل (۶) ارائه شده است، در شکل مشاهده می‌شود، در صورتی‌که کمبود بارش در منطقه و نبود برنامه‌ریزی و مدیریت مناسب در بهره‌برداری و استفاده بهینه از آب‌های سطحی، زیرزمینی و کاهش هدر رفت آب ادامه یابد، محدوده دشت ورامین با بحران شدیدی روبه‌رو خواهد شد. باتوجه‌به افزایش جمعیت و سطح زیر کشت نیاز است شبکه توزیع آب در منطقه مورد مطالعه، بیشتر به‌روزرسانی شود. باتوجه‌به قرار گرفتن کاربری کشاورزی در اولویت اول، درصد تأمین آب کشاورزی در مقایسه با سناریوی مرجع به شدت کاهش پیدا کرده و باعث ناپایداری خواهد شد. مصارف کشاورزی و شرب در منطقه مورد مطالعه کمترین میزان درصد تأمین را دارند.



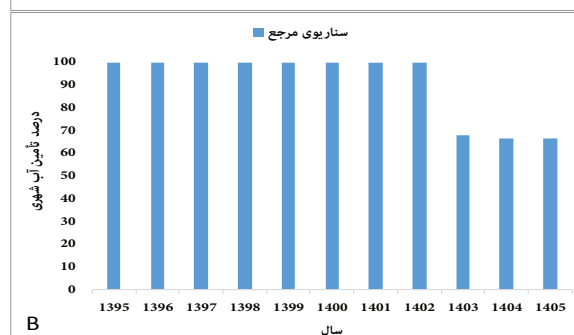
شکل ۵- مقدار آب تأمین‌نشده در سناریو کاهش حجم ورودی و سناریوی مرجع



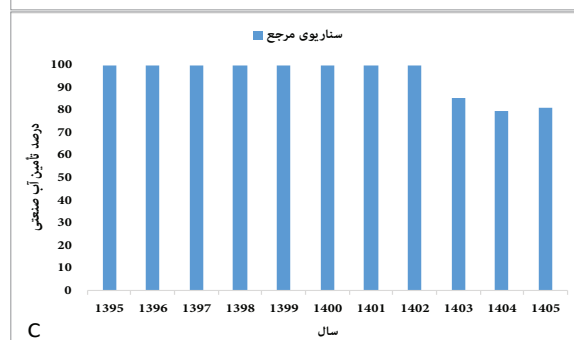
شکل ۳- مقدار آب تأمین‌نشده در سناریوی مرجع



A



B



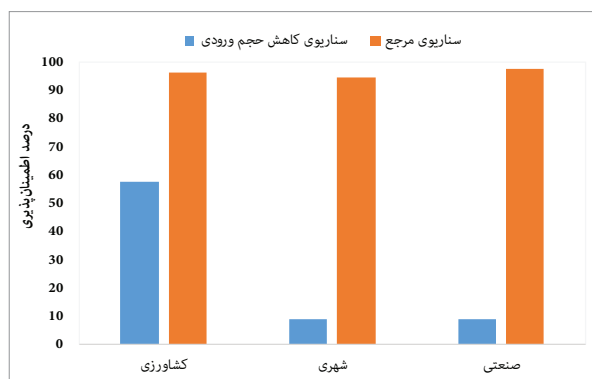
C

شکل ۴ - مقدار درصد تأمین آب منطقه در سناریوی مرجع (A) کشاورزی (B) شهری (C) صنعتی

سناریو دوم: کاهش حجم ورودی

در این سناریو تمام تقاضا و کاربری‌ها ثابت در نظر گرفته شده است. با توجه به روند کاهش حجم ورودی آب در نظر گرفته شده در منطقه با توجه به دبی و بارش سال‌های گذشته که منجر

در کاربری کشاورزی که ۶۰٪ در نظر گرفته شد، برای سناریوی مرجع بیش از ۹۰٪ و برای سناریوی کاهش حجم ورودی به کمتر از ۶۰٪ می‌رسد که نشان‌دهنده عدم اطمینان و ناپایداری سناریوی کاهش حجم ورودی برای کاربری کشاورزی می‌باشد. در سناریوی مرجع میزان اطمینان‌پذیری کاربری‌های شرب و صنعت از آستانه تعیین شکست سیستم تعیین شده بیشتر می‌باشد که نشان‌دهنده اطمینان‌پذیری سیستم و سناریوی تعیین شده می‌باشد.



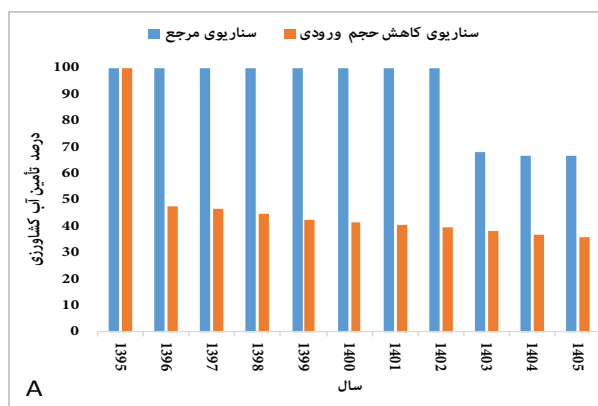
شکل ۷- مقدار شاخص اطمینان‌پذیری برای سناریوها

طبق نتایج ارائه‌شده در جدول (۲) باتوجه‌به اطمینان‌پذیری سناریوی مرجع در مقابل سناریوی کاهش حجم ورودی، می‌توان سناریوی مرجع را به‌عنوان سناریوی برگزیده در نظر گرفت و مدیریت منابع آب را در جهت کاهش خسارات کم‌آبی و مقدار حجم آب در دسترس منطقه دشت ورامین را با توجه به شرایط منطقه و با کمک مدل WEAP انجام داد.

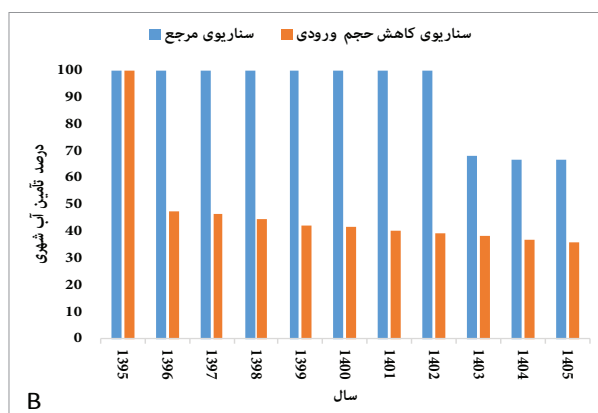
جدول ۲- مقایسه مقدار اطمینان‌پذیری سناریو مرجع و کاهش حجم ورودی منابع آب

صنعتی	کشاورزی	شهر	
۹۸	۹۶	۹۵	مرجع
۹	۵۸	۹	کاهش حجم ورودی

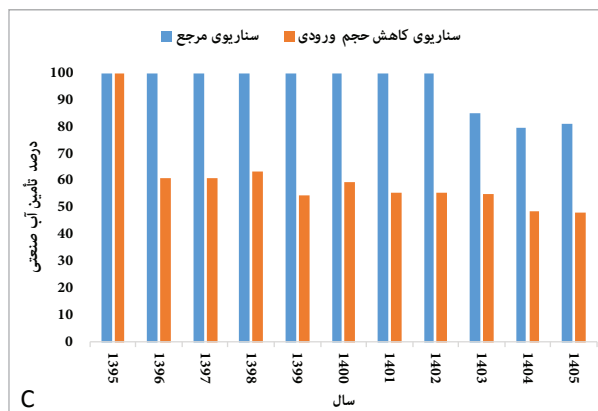
نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق با نتایج مطالعه گری (۱۳۹۵) مطابقت دارد که در آن مطالعه بیشترین تقاضا برای کاربری کشاورزی بوده افزایش خشکسالی باعث کمبود آب در دسترس در منطقه شده بود. در این مطالعه اطمینان‌پذیری سناریوی کاهش حجم ورودی منابع آب کمتر از سناریوی مرجع می‌باشد.



A



B



C

شکل ۶- مقدار درصد تأمین آب صنعت در سناریو کاهش حجم ورودی و سناریوی مرجع (A کشاورزی B شهری C صنعتی)

• شاخص اطمینان‌پذیری

میزان اطمینان‌پذیری برای تمام سناریوها انجام شد و میزان شاخص اطمینان‌پذیری برای سناریو مرجع با بالاترین درصد شاخص و سناریو کاهش حجم ورودی با کمترین میزان درصد شاخص ارائه شده است (شکل ۷). با توجه به آستانه شکست

مدل WEAP تحت دو سناریو مرجع با اولویت‌بندی وزارت نیرو و سناریو کاهش حجم ورودی با تغییر اولویت‌بندی در دوره ۱۳۹۵-۱۴۰۵ شمسی ارزیابی شد. اقلیم منطقه براساس مدل سال آبی (دبی، بارش، تبخیر و تعرق، دما) بررسی و وارد مدل شد. نتایج نشان می‌دهد منطقه دشت ورامین طبق سناریو مرجع با کمبود ۳۸ میلیون متر مکعب براساس سناریو کاهش حجم ورودی منابع آب با کمبود ۲۷۰ میلیون متر مکعب روبه‌رو خواهد شد. بیشترین نیاز تأمین آب در افق ۱۰ ساله مربوط به کاربری کشاورزی محدوده دشت ورامین می‌باشد و همچنین سناریو مرجع به‌عنوان سناریو برگزیده از نظر میزان تأمین آب، شاخص اطمینان‌پذیری و حداکثر حجم آب تأمین نشده در نظر گرفته شده است.

the assessment of climate change impacts and adaptation in irrigated agriculture. Ecological Economics, 120: 49-58.

Faiz MA, Liu D, Fu Q, Uzair M, Khan MI, Baig F, Li T, and Cui S. 2018. Stream flow variability and drought severity in the Songhua River Basin, Northeast China. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 32: 1225-1242

Hashimoto T., Stedinger J.R. and Loucks D.P. 1982. "Reliability, Resiliency, And vulnerability criteria for water resource system performance evaluation." Water Resources Research, 18(1): 14-20.

Hum NNMF and Abdul-Talib S. 2016. Modeling optimal water allocation by managing the demands in Selangor. In: Proc. of International Symposium on Flood Research and Management (ISFRAM 2015). 5-6 Oct.

Khalil A., Rittman A., Phankamolsil Y. and Talaluxmana Y. 2018. Groundwater recharge estimation using WEAP model and empirical relations in the Mae Kalong basin. Thailand, Conference 7th International Conference on Environmental Engineering, Science and Management at Centre Hotel and Convention Centre. Thailand.

Levite H., Sally H. and Cour J. 2003. Testing water demand management scenarios in a water-stressed basin in South Africa: application of the WEAP model. Physics and Chemistry of the Earth, 28: 779-786

کاهش نزولات جوی در بسیاری از مناطق کشور بحران‌های مختلفی از جمله کمبود محصولات زراعی، از بین رفتن مراتع، شور شدن آب‌ها و خاک‌ها و کاهش شدید حجم مخازن سطحی و زیرزمینی را به دنبال داشته است. هدف از انجام پژوهش حاضر، بهینه‌سازی بهره‌برداری از منابع آبی حوضه آبریز دشت ورامین طی ۱۰ سال تحت سناریوهای مختلف مدیریتی است. برای رسیدن به شرایط بهینه در مقدار حجم منابع آب، حداقل سازی عدم تأمین نیازها و میزان نیاز کاربری‌های مختلف در دشت ورامین بررسی شد. بر این اساس وضعیت منابع آب دشت ورامین در سه بخش کشاورزی، صنعت و شرب با استفاده از

منابع

احمدآلی، ج.، بارانی، غ.، قادری، ک. و حصاری، ب. ۱۳۹۷. ارزیابی سناریوهای مدیریت آب و تأثیر تغییر اقلیم بر پایداری زیست‌محیطی و کشاورزی (مطالعه‌ی موردی: حوضه‌های آبریز زرنه رود و سیمینه رود). مجله اکوهیدرولوژی، ۵(۴): ۱۲۰۳-۱۲۱۷.

زینال‌زاده، ک.، اشرفی، م.، بشارت، س. و یاسی، م. ۱۳۹۸. عملکرد مدل WEAP در شبیه‌سازی هیدرولوژیک حوضه آبخیز آند. مجله اکوهیدرولوژی، ۶(۲): ۳۴۱-۳۵۲.

شمشکی، ا. و انتظام سلطانی، ا. ۱۳۸۴. مکانیسم و علل ایجاد شکاف‌های زمین در معین آباد-منطقه ورامین. چهارمین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط‌زیست ایران. تهران. عزیزاده، ا.، سیاری، ن. و حسامی‌کرمانی، م. ۱۳۸۹. بررسی پتانسیل اثرات تغییرات اقلیمی بر منابع آب و مصارف آب کشاورزی (مطالعه موردی: حوضه آبریز رودخانه کشف‌رود). نشریه آب و خاک، ۲۴(۴): ۸۱۵-۸۳۵.

گری، ع. ۱۳۹۵. ارزیابی سناریوهای تخصیص آب حوضه آبریز رودخانه تالار با استفاده از مدل WEAP. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی.

محمدی بهزاد، ج.، رحمانی، ر.، کلانتری، ن. و چیت‌سازان، م. ۱۳۸۹. بررسی فرآیندهای اثرگذار بر کیفیت آب زیرزمینی دشت گتوند عقیلی، نخستین کنفرانس پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران، کرمانشاه.

وزارت نیرو. ۱۳۹۵. شرکت مادر تخصصی منابع آب ایران. گزارش بیلان آبی محدوده مطالعاتی دشت ورامین.

Esteve P., Varela-Ortega C., Blanco- Gutiérrez I. and Downing T.E. 2015. A hydroeconomic model for

- sis of the water supply demand relationship in the Sinú-Caribe basin. Colombia. Under different climate change scenarios. *Atmósfera*, 22(4): 399-412
- Yates D., Sieber J., Purkey D. and Huber-Lee A. 2005a. WEAP21: A Demand-, Priority-, and preference-driven water planning model. Part 1: Model characteristics. *Water International*, 30(4): 487-500.
- Yates D., Purkey D., Sieber J., Huber-Lee A. and Galbraith H. 2005b. WEAP21: A Demand-, Priority-, and preference-driven water planning model. Part 2: Aiding freshwater ecosystem service evaluation. *Water International*, 30(4): 501-512.
- Loucks D.P., Beek E.V., Stedinger J.R., Dijkman J.P.M. and Villars M.T. 2005. *Water Resources System Planning and Management: An Introduction to Methods. Models and Applications*. 1st Ed. UNESCO. Springer.
- Momblanch A., Papadimitriou L., Jain S.K., Kulkarni A., Ojha C.S., Adeloye A.J. and Holman I.P. 2019. Untangling the water-foodenergy-environment nexus for global change adaptation in a complex Himalayan water resource system. *Science of the Total Environment*, 655: 35-47.
- Ospina J.E., Gay C. and Conde A.C. 2009. *Analy-*

Article Type: Applied

نوع مقاله: کاربردی

Investigation and Ranking of Water Security in Study Areas of South Khorasan Province Using Gray Analysis

M. Baharshahi¹, H. Khozaymehnezhad^{2*}, N. Niknia³, A. Khashei Siouki²

1,2- MSc. Student in Irrigation and Drainage and Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran. 3- PhD. in Water Resources Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran.

*(Corresponding Author Email: hkhozaymeh@birjand.ac.ir)

Received: 29-05-2021

Revised: 16-08-2021

Accepted: 12-09-2021

Available Online: 06-12-2021

بررسی و رتبه‌بندی امنیت آبی محدوده‌های مطالعاتی استان خراسان جنوبی به کمک تحلیل خاکستری

مهدی بهارشاهی^۱، حسین خزیمه‌نژاد^{۲*}، ناصر نیک‌نیا^۳، عباس خاشعی سیوکی^۲

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی و دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران. ۳- دکتری مهندسی منابع آب، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران.

*(نویسنده مسئول، E-Mail: hkhozaymeh@birjand.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۰۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۵/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۲۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۰/۰۹/۱۵

Abstract

In South Khorasan province, water shortage is one of the main limiting factors for the development of economic activities in the coming decades. In this province, similar to other parts of the country, the optimal use of water in the form of culture has not yet found its special place, so achieving a relative equilibrium in the supply and demand of water is a basic and essential principle. This is not possible except by creating a comprehensive system in water management and consequently water security. To prevent crises caused by water insecurity, it is necessary to identify rapid developments and defective trends in current water management based on the climate, social, economic, and other realities in each region. In this regard, the current state of water resources in this province was monitored and evaluated by creating a set of indicators. Then, with the help of gray analysis, which is a kind of hierarchical ranking method, the plains of the province were ranked in terms of water security. The results of the gray analysis also showed that the highest score of water security level is in the Deh-e-Salm plain (0.524), Dehno_mighan plain (0.519), and chahak-Mousavieh plain (0.504). Their degree of Security is mainly interpreted by their ability to reduce the risks of water shortage and water scarcity, although it will never be secure to study unless there is a risk of water shortage and water scarcity. There are important study areas such as Birjand Plain (0.462) that are currently in water insecurity. The highest levels of Water insecurity are observed in the South Khorasan Province, Sarayan (0.268) and Boshrouyeh (0.363).

Keywords: South Khorasan Province, Gray Theory, Ranking, Water Security.

چکیده

در استان خراسان جنوبی کمبود آب از عوامل محدود کننده اصلی توسعه فعالیت‌های اقتصادی در دهه‌های آینده به‌شمار می‌رود. در این استان مانند سایر نقاط کشور هنوز استفاده مطلوب از آب به شکل یک فرهنگ جایگاه خاص خود را پیدا نکرده است؛ به همین جهت دستیابی به تعادل نسبی در زمینه عرضه و تقاضای آب یک اصل اساسی و ضروری است. این مهم جز با ایجاد یک نظام جامع در مدیریت آب و در نتیجه امنیت آبی میسر نمی‌باشد. به‌منظور پیشگیری از وقوع بحران‌های ناشی از عدم امنیت آبی، شناسایی تحولات سریع و روندهای معیوب در مدیریت کنونی آب و آن هم مبتنی بر واقعیت‌های اقلیمی، اجتماعی، اقتصادی و غیره در هر منطقه الزامی به نظر می‌رسد. در این راستا با ایجاد مجموعه‌ای از نشانگرها، وضعیت فعلی منابع آب در این استان پایش و ارزیابی شد. سپس با کمک تحلیل خاکستری که یک نوع روش رتبه‌بندی سلسله مراتبی است، دشت‌های استان از نظر امنیت آب رتبه‌بندی شد. نتایج تحلیل خاکستری نشان داد، بالاترین امتیاز سطح امنیت آبی در محدوده‌های ده‌سلم (۰/۵۲۴)، ده‌نو میغان (۰/۵۱۹) و چاهک موسویه (۰/۵۰۴) است. درجه امنیت آنها عمدتاً توسط توانایی آنها در کاهش مخاطرات کم‌آبی و کمیابی آب تفسیر می‌شود، هرچند که تا زمانی که خطر کم‌آبی و کمیابی وجود نداشته باشد، محدوده مطالعاتی امن نخواهد بود. محدوده مطالعاتی مهمی همچون دشت بیرجند (با امتیاز ۰/۴۶۲) وجود دارند که در حال حاضر دچار ناامنی آبی هستند. بیشترین سطح ناامنی آبی نیز در استان خراسان جنوبی، محدوده‌های در حال توسعه سرایان (۰/۲۶۸) و بشرویه (۰/۳۶۳) دیده می‌شود. **واژه‌های کلیدی:** استان خراسان جنوبی، تئوری خاکستری، رتبه‌بندی، امنیت آبی.

جوامع انسانی برای بخش‌های شرب و خدمات، آبیاری زمین‌های کشاورزی و صنایع نیازمند آب هستند. با این حال، در بسیاری از نقاط جهان، تقاضا برای آب از عرضه آن فراتر رفته و دسترسی به آب با کیفیت به شدت محدود شده است. این امر منجر به افزایش تعارضات آبی شده است؛ زیرا کاربران زیادی برای منابع محدود رقابت می‌کنند (Wang و همکاران، ۲۰۱۵).

ایران با واقع شدن در منطقه خشک و نیمه‌خشک، یکی از کشورهای است که با بیشترین آسیب‌پذیری در برابر کم‌آبی روبه‌رو است (WorldBank، ۲۰۱۷). در حال حاضر براساس شاخص فالکن مارک استان‌های شرق کشور به‌ویژه استان خراسان جنوبی در وضعیت تنش آبی قرار دارد. اصطلاح «تنش آبی» معمولاً برای تشریح نسبت آب مورد استفاده (میزان آب برداشتی از سامانه طبیعی) به کل آب تجدیدپذیر استفاده می‌شود. بنابراین، بهره‌برداری بیش از حد منابع آب تجدیدپذیر، تنش بیشتری را به سامانه عرضه آب وارد می‌کند. برخی پژوهشگران و سازمان‌ها، تنش آبی یک حوضه آبریز را با ترکیب مصارف خانگی، صنعتی و کشاورزی، در مقابل منابع تجدیدپذیر نظیر بارندگی، رودخانه‌ها و غیره محاسبه کرده‌اند (WorldBank، ۲۰۱۷). در استان خراسان جنوبی کمبود آب از عوامل محدود کننده اصلی توسعه فعالیت‌های اقتصادی در دهه‌های آینده به‌شمار می‌رود، اما هنوز استفاده مطلوب از آب به شکل یک فرهنگ جایگاه خاص خود را پیدا نکرده است؛ به همین جهت دستیابی به تعادل نسبی در زمینه عرضه و تقاضای آب (ابتدا دست یافتن به $1 = \text{تقاضا} / \text{عرضه}$ سپس > 1 تقاضا / عرضه) یک اصل اساسی و ضروری است. این مهم جز با ایجاد یک نظام جامع در مدیریت آب و در نتیجه امنیت آبی میسر نمی‌باشد. مطالعات نشان داده است، ادامه روند و عدم توجه به امنیت آبی در سال‌های آینده در ایران و از جمله استان خراسان جنوبی تا سال ۲۰۲۵ میلادی، به کمپایی فیزیکی آب منجر خواهد شد. براساس آنچه ذکر شد بررسی امنیت آبی و راه‌های افزایش امنیت آبی در ایران و به‌ویژه استان‌های شرق کشور که تنها به منابع آب زیرزمینی وابسته هستند، بسیار ضروری است. بنابراین موضوع امنیت آبی، در استان خراسان جنوبی که سالانه دشت‌های آن با افت ۱۷۰/۴ میلیون متر مکعب مواجه است، بسیار حیاتی و نیازمند پیگیری می‌باشد (شرکت آب منطقه‌ای خراسان جنوبی، ۱۳۹۴).

• ارزیابی امنیت آبی

مفهوم سنتی برآورد میزان «امنیت آبی» یک منطقه بر پایه دسترسی به منابع آب در آن منطقه تعریف شده است؛ حال آنکه وجود عدم قطعیت‌های مختلف در محیط‌های طبیعی و انسانی، موجب کاهش اعتماد به مفهوم فوق می‌شود. در حقیقت آنچه امنیت یک منطقه را تهدید می‌کند، آسیب‌پذیر بودن منطقه به کاهش منابع آب است

(میر و همکاران، ۱۳۹۹). به این معنی که هر چه منطقه نسبت به کاهش منابع آب آسیب‌پذیرتر باشد تهدید بیشتری متوجه آن خواهد شد و روند توسعه منطقه ناپایدارتر خواهد بود. از این رو درک درست از آسیب‌پذیری منطقه نسبت به کاهش منابع آب جهت اتخاذ تصمیم مناسب در جهت افزایش امنیت آبی منطقه و پایداری منطقه بسیار ضروری به نظر می‌رسد (Abdel-Javad و Al-Otaibi، ۲۰۰۷).

چگونگی تحلیل آسیب‌پذیری و داشتن یک تعریف جامع از آن در ارزیابی امنیت آبی منطقه بسیار مهم می‌باشد. مفهوم آسیب‌پذیری بسیار پیچیده^۱ و پویا بوده و جهت درک آن نیاز به ابزاری مفید است که بتواند این پیچیدگی را به خوبی بیان نماید (فلکی ایلخچی و همکاران، ۱۳۹۹). در حقیقت امنیت آبی به خوبی مفهوم وسیع بودن دامنه آن (وسعت دامنه آسیب‌پذیری) و تاثیر آن بر جنبه‌های مختلف اقتصادی، اجتماعی، و سیاسی را در بر دارد (Ingram و همکاران، ۲۰۰۶؛ Steckley، ۲۰۰۶).

تاکنون بیشتر تحقیقات متمرکز بر روی آسیب‌پذیری بوده است (Deliang و همکاران، ۲۰۱۸). پژوهشگران در برخورد با مفهوم آسیب‌پذیری نسبت به مخاطرات مختلف و نحوه برآورد آن، تعاریف متفاوتی ارائه داده‌اند. عده‌ای برآورد آسیب‌پذیری را به صورت کمی در نظر گرفته و آن را در قالب روابط ریاضی که منجر به مقادیر عددی می‌شوند، بیان کرده‌اند (صفوی و گل محمدی، ۱۳۹۵). عده‌ای دیگر از پژوهشگران مفهوم آسیب‌پذیری را پیچیده‌تر از یک رابطه دانسته و بیان آن را به صورت کیفی در نظر گرفته‌اند (Adger، ۲۰۰۷؛ Kaynia، ۲۰۰۸). محوریت فکری مشترک در این دسته از پژوهش‌ها، بر پایه این اصل بنا شده است که آسیب‌پذیری بسیار پیچیده و پویا بوده و برای برآورد آن باید اثر پویایی آن در ارتباط با مخاطرات را نیز در نظر گرفت (Ingram و همکاران، ۲۰۰۶؛ Doeffinger و Hall، ۲۰۲۱).

تاکنون روش‌های متعددی همچون روش ارزیابی فازی (Chu، ۲۰۱۷)، تحلیل سلسله مراتبی (Nazif) (AHP و همکاران، ۲۰۱۳)، روش آنتروپی وزنی (Sahoo و همکاران، ۲۰۱۷) و روش ردپای آب^۲ (عربی یزدی و همکاران، ۱۳۹۳؛ Veettil، Mishra، ۲۰۱۶)، و تحلیل مجموعه زوجی (Wang و همکاران، ۲۰۱۵) برای ارزیابی امنیت آبی استفاده شده است. بدون شک این روش‌ها به درک ما از امنیت آبی کمک می‌کند، اما کارایی آنها به دلایل زیادی همچون جزء نگری، عدم یکپارچگی در موضوعات مورد مطالعه محدود است (Xia و همکاران، ۲۰۱۶؛ Zhang و همکاران، ۲۰۱۶).

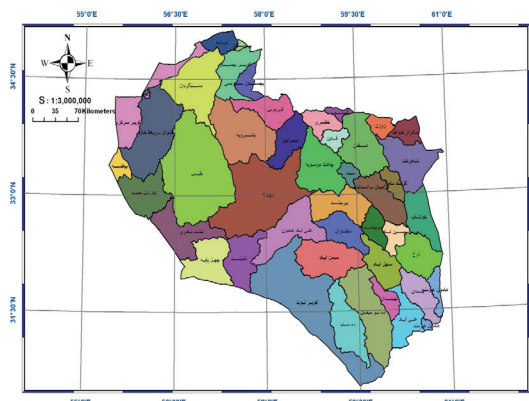
بسیاری از روش‌های ارزیابی یاد شده در زمینه آسیب‌پذیری، تغییرات آسیب‌پذیری را تنها در یک بخش و غیر پویا مورد بررسی قرار داده‌اند (Ginkel و همکاران، ۲۰۱۸). لذا در این پژوهش به منظور درک تعاملات بین بخش‌های مختلف اقتصادی، اجتماعی و سیاسی و درک بازخورد آنها از چارچوب DPSIR استفاده شده است. با کمک چارچوب DPSIR و باتوجه به اینکه مفهوم آسیب‌پذیری با امنیت آبی همسو است، می‌توان امنیت آبی را بررسی نمود (OECD،

Nezami؛ ۱۹۹۳ و همکاران، ۲۰۱۳). همچنین جهت اولویت‌بندی سطح امنیت آبی در محدوده‌های مطالعاتی استان خراسان جنوبی از نظریه سیستم خاکستری استفاده شده است.

• استان خراسان جنوبی

استان خراسان جنوبی با مساحت ۱۵۰۸۰۰ کیلومتر مربع و با اقلیم خشک و نیمه‌خشک در شرق ایران واقع شده است. این استان با مرکزیت بیرجند، از شمال به خراسان رضوی و از شرق به طول ۳۳۱ کیلومتر دارای مرز مشترک با کشور افغانستان بوده و از غرب به استان یزد، اصفهان و سمنان و از جنوب به استان‌های کرمان و سیستان و بلوچستان محدود می‌باشد. استان خراسان جنوبی براساس تقسیمات کشوری، در سال ۸۳ با مصوبه‌ی هیأت دولت و مجلس شورای اسلامی با حضور ۴ شهرستان از خراسان بزرگ جدا شد. در حال حاضر این استان ۱۱ شهرستان، ۲۸ شهر، ۲۵ بخش، ۶۱ دهستان و ۳۵۵۵ آبادی دارد. شهرستان‌های این استان شامل بیرجند، قاینات، طبس، فردوس، نهبندان، سرایان، سریش، درمیان، بشرویه، خوسف و زیرکوه می‌باشد. از نظر تقسیمات آب کشور، استان خراسان جنوبی قسمتهایی از چهار حوضه بزرگ کویر لوت، هامون هیرمند و نمکزار

خواف و کویر مرکزی را در بر می‌گیرد. تعداد محدوده‌های مطالعاتی واقع در مرز استان ۴۴ محدوده می‌باشد که از این تعداد ۲۹ محدوده ممنوعه و بحرانی است. تعداد محدوده‌های مطالعاتی که این استان متولی آن است ۳۵ محدوده بوده که از این تعداد ۲۴ محدوده مطالعاتی ممنوعه و بحرانی می‌باشد (شکل ۱).



شکل ۱- نقشه محدوده‌های مطالعاتی در استان خراسان جنوبی

چارچوب انجام پژوهش

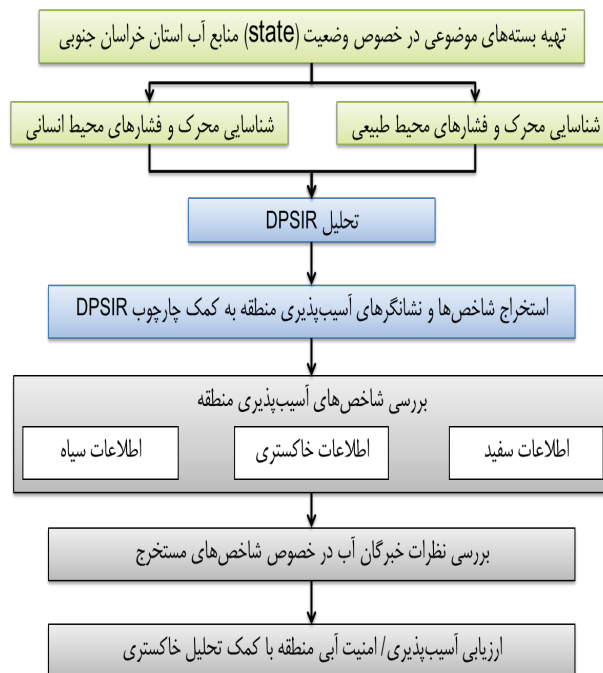
در این پژوهش چارچوب DPSIR به‌عنوان یک مدل علی-معلولی اولیه برای ایجاد ارتباط یک به یک میان مولفه‌های تنش‌های آبی خراسان جنوبی طراحی شده است. این چارچوب روابط «علت-معلول» بین بخش‌های مختلف اجتماعی، اقتصادی و محیطی را ترسیم می‌نماید. با کمک چارچوب DPSIR معیارهای آسیب‌پذیری محدوده‌های مطالعاتی استان خراسان جنوبی استخراج شده است. در نهایت معیارهای مذکور به‌وسیله نظریه سیستم خاکستری، براساس نظرات خبرگان کمی شد. در انتها نیز میزان آسیب‌پذیری منطقه با کمک نظریه سیستم خاکستری ارزیابی شد. روش مورد استفاده در روش تحلیل خاکستری روش Deliang و همکاران (۲۰۱۸) است که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد.

تئوری خاکستری یکی از مفاهیم ریاضی است که کاربرد گسترده‌ای در تصمیم‌گیری چند معیاره پیدا کرده است. این تئوری روشی بسیار موثر در مواجهه با بررسی میزان عدم قطعیت اطلاعات ناشناخته و ناکامل دارد. اطلاعات مربوط به ترجیحات تصمیم‌گیرندگان در مورد معیارها و به دلایل مختلف براساس قضاوت کیفی آنها بیان می‌شود و همچنین در عمل نیز قضاوت تصمیم‌گیرندگان اغلب نامطمئن بوده و به‌وسیله مقادیر عددی دقیق قابل بیان نیستند. تئوری خاکستری یکی از روش‌هایی است که برای بررسی میزان عدم قطعیت و ناکامل بودن اطلاعات به‌کار می‌رود و استفاده از آن در

تحلیل ریاضی سیستم‌های با اطلاعات ناقص، روند رو به رشدی دارد. در واقع اگر اطلاعات واضح و شفاف چارچوب DPSIR را با رنگ سفید و اطلاعات کاملاً ناشناخته با رنگ سیاه تجسم شود، در این صورت قسمتی از اطلاعات مربوط به محیط انسانی و طبیعی که مخلوطی از اطلاعات سفید (کاملاً شناخته شده) و یا سیاه (کاملاً ناشناخته) هستند به رنگ خاکستری تعریف می‌شوند. اینگونه اطلاعاتی که خبرگان آب نسبت به دیگران بر آنها اشراف بیشتری دارند به‌عنوان سیستم‌های خاکستری تعریف می‌شوند. اصلی‌ترین مشخصه آن‌ها، کامل نبودن اطلاعات مربوط به آن سیستم است. مراحل مختلف پژوهش به‌صورت چارت نشان داده شده در شکل (۲) ذکر شده است که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد.

همانطور که ذکر شد، درک آسیب‌پذیری و در نتیجه ارزیابی وضعیت امنیت آبی در هر منطقه‌ای با کمک در نظر گرفتن تعاملات و پس‌خورهای محیط طبیعی و انسانی قابل بررسی می‌باشد. از این‌رو، یک چارچوب علی و معلولی از محرک‌های آسیب‌پذیری نسبت به کم‌آبی تهیه خواهد شد که در آن تعاملات بین بخش‌های مختلف اقتصادی، اجتماعی و نیز پاسخ افراد یا جامعه به نمایش در خواهد آمد. در حقیقت برای داشتن یک تفکر سیستمیک باید موارد ذیل را در نظر گرفت:

- مشاهده و درک روابط درونی پدیده‌ها به‌جای روابط خطی آنها؛
- شناخت ریشه‌های تغییرات در سیستم به‌جای اقدامات فوری و عاجل



شکل ۲- مراحل انجام پژوهش

شناسایی نشانگرها و شاخص‌های امنیت آبی استان

نشانگرها^۲ و شاخص‌های کمی و کیفی به صورت منحصر بفرد و یا در مقایسه با مقادیر آستانه، می‌توانند به عنوان یکی از ابزارهای اصلی شناسایی روند مخاطرات به کار گرفته شوند. در این پژوهش به منظور شناسایی و تشریح وضعیت امنیت آبی استان خراسان جنوبی، از نشانگرها و شاخص‌ها مرتبط با مولفه‌های منابع آب استفاده شده است. این نشانگرها به صورت موضوعی براساس مطالعات کتابخانه‌ای (گزارشات فنی) استخراج شده است. پس از شناسایی نشانگرها و ایجاد چارچوب DPSIR، داشبوردی از نشانگرها به دست آمده است، که مولفه‌های موثر بر امنیت آبی استان را نموده است. در انتها ارتباط مولفه‌های موثر بر وضعیت امنیت آبی استان به کمک تحلیل خاکستری ارزیابی خواهد شد.

• تحلیل خاکستری

تحلیل رابطه‌ای خاکستری^۴ را نخستین بار، Deng مطرح کرد (Mahmoudi و همکاران، ۲۰۲۰). این تئوری برای حل مسائل مبهم و مسائلی که داده‌های گسسته و اطلاعات ناقص دارند به کار می‌رود. این تئوری با استفاده از اطلاعات نسبتاً کم و با تغییرپذیری بسیار در معیارها، خروجی‌های رضایت‌بخش و مطلوبی را ایجاد می‌کند. تئوری خاکستری، همچون تئوری فازی، یک مدل ریاضی اثربخش برای حل مسائل نامشخص و مبهم است (Mahmoudi و همکاران، ۲۰۲۰). این تئوری در زمینه‌های بسیار، نظیر حل مسائل تصمیم‌گیری چند معیاره، با

نام تحلیل رابطه‌ای خاکستری به کار گرفته شده است. تحلیل رابطه‌ای خاکستری جزئی از تئوری خاکستری، است که برای حل مسائلی به کار می‌رود که روابط پیچیده‌ای بین عوامل و متغیرهایشان دارند. تئوری سیستم‌های خاکستری، الگوریتمی است که روابط غیرقطعی اعضای یک سیستم با یک عضو مرجع را تحلیل می‌کنند و قابلیت استفاده در حل مسائل تصمیم‌گیری چندمعیاره را دارد.

رتبه رابطه‌ای خاکستری (X_{0j}, X_{ij}) را با استفاده از رابطه (۱) می‌توان محاسبه نمود:

$$\Gamma(X_0, X_i) = \sum_{j=1}^n w_{ij} \Gamma(X_{0j}, X_{ij}) \quad i=1, 2, \dots, m \quad (1)$$

رابطه (۱)، رتبه رابطه‌ای خاکستری رابطه بین X_0 و X_i (میزان همبستگی سری مرجع هدف و سری مقایسه‌ای) را نشان می‌دهد. w_j وزن شاخص j است که معمولاً به قضاوت تصمیم‌گیرنده یا به ساختار مساله پیشنهادی بستگی دارد ($\sum_{j=1}^n w_j = 1$). بر روی هر شاخص، سری مرجع هدف، نشان‌دهنده بهترین عملکردی است که در میان سری‌های مقایسه‌ای قابل حصول است. بنابراین، اگر یک سری مقایسه‌ای برای یک گزینه، بالاترین رتبه رابطه‌ای خاکستری را با سری مرجع هدف داشته باشد، به این معناست که این سری مقایسه‌ای، بیشترین شباهت با سری مرجع هدف را دارد و از این رو این گزینه، بهترین انتخاب است.

در این پژوهش به منظور بهره‌مندی از روش تحلیل خاکستری از نظرات ۷ نفر از خبرگان حوزه مدیریت آب، بیان منابع آب و حفاظت از منابع آب استفاده شده است.

نتایج

• **تحلیل وضعیت موجود منابع آب با کمک چارچوب DPSIR**
عوامل موثر بر وضعیت^۵ نابه‌هنجار کمی و کیفی منابع آب استان در قالب مجموعه‌ای از شاخص و نشانگرهای محتمل بررسی شده است (جدول ۱ تا ۴). در صورتی که مقادیر نشانگرهای مشاهده شده در جداول ذیل متفاوت از مقادیر آستانه یا مقادیر هدف باشد، آنگاه در قالب چارچوب DPSIR بررسی می‌شود. در ادامه با کمک چارچوب DPSIR در خصوص وضعیت منابع آب به چهار پرسش پاسخ داده شده است:

۱) برای منابع آب استان چه اتفاقی می‌افتد؟ (۲) چرا اتفاق می‌افتد؟ (۳) آیا تغییرات قابل توجه هستند؟ (۴) پاسخ به این تغییرات چیست یا چه می‌تواند باشد؟

بر این اساس با کمک نشانگرهای موجود در جداول (۱ تا ۴) روندهای موجود در وضعیت منابع آب استان بررسی شده است. لازم به ذکر است، فرضیات مرتبط با مشکلات منابع با به کارگیری چارچوب DPSIR به صورت جدول (۵) تجزیه و تحلیل شد.

جدول ۱- نشانگرهای بخش هواشناسی، هیدروژئولوژی و هیدرولوژی

نشانگر	مقدار مشاهده شده	مقدار هدف	مقدار آستانه	ملاحظات
بارندگی متوسط در سطح استان	۱۰۰ میلیمتر	ندارد	۲۵۰ میلیمتر	بارندگی متوسط ۲۰ ساله در سطح حوضه‌های استان بین ۵۳ تا بیش از ۱۵۰ میلیمتر متغیر است.
اثر تغییر اقلیم بر بارندگی حوضه‌ها	۴/۸٪-	ندارد	ندارد	طی سال‌های ۷۸-۱۳۷۷ تا ۹۸-۱۳۹۷ (دوره ۲۰ ساله) مقدار بارندگی در حوضه به ۹۴ میلی متر کاهش یافته است.
پراکنش بارندگی در سطح استان	بهار ۳۸/۲٪ تابستان ۳/۶٪ پاییز ۲۶/۵٪ زمستان ۳۱/۸٪	ندارد	ندارد	در بخش جنوبی استان نزولات جوی بیشتر به صورت پراکنده رخ می‌دهند.
نسبت آب‌های سطحی تجدیدشونده به آب‌های زیرزمینی تجدیدشونده	۴۴٪	ندارد	ندارد	
وسعت رسوبات تبخیری از کل سازندهای سخت	ندارد	ندارد	ندارد	
تغییرات حجم ذخیره مخازن (براساس بیلان ۱۰ ساله)	۱۵۰/۷- (McM)	ندارد	۰	تعداد محدوده‌های مطالعاتی که این استان متولی آن می‌باشد ۳۵ محدوده بوده که از این تعداد ۲۴ محدوده مطالعاتی ممنوعه و بحرانی می‌باشد
بهره‌برداری از منابع آب‌زیرزمینی	۸۷۸/۸۲ (۷۳٪) چاه چشمه ۶۵/۹ (۵٪)	ندارد	۴۸۸۳۷ (۶۶٪) ۶۶۵۷ (۹٪)	سرانه آب در دسترس در این حوضه ۱۱۳۷ مترمکعب در سال بوده و پیش‌بینی شده که این میزان در سال ۱۴۰۰ تنزل خواهد یافت.

جدول ۲- نشانگرهای بخش کشاورزی

نشانگر	مقدار مشاهده شده	مقدار هدف	مقدار آستانه	ملاحظات
راندمان آبیاری	۴۴ درصد		۳۰*٪	عدم توسعه تشکلهای بخش کشاورزی، عدم وجود مکانیزم‌های ایجاد تحول و ارتقاء سطح دانش، تغییرنگرش و بهبود مهارت روستائیان و عدم توسعه نیروی انسانی ترویج و فعالیت‌های محدود اداره ترویج از عوامل مؤثر بر رویه مصرف آب کشاورزی بوده‌است. (* متوسط کشوری)
افزایش سطح زیرکشت	۰ درصد	ندارد	ندارد	سطح زیرکشت محصولات کشاورزی طی سال‌های ۸۱ تا ۹۵ از روندی صعودی برخوردار نبوده‌است.
بهره‌وری مصرف آب	۳۶۴/۰ برای غلات (کیلوگرم/متر مکعب)	ندارد	۰/۶۴۵* برای غلات (کیلوگرم/متر مکعب)	متوسط کارایی مصرف آب محصولات اصلی کشاورزی در حوضه ۰/۳۷ تا ۱/۶۶ کیلوگرم در مترمکعب متغیر بوده که کمترین آن مربوط به یونجه و بیشترین آن مربوط به چغندر قند می‌باشد. (* متوسط کشوری)
بهره‌وری اقتصادی آب	۱۶۷۹ (مترمکعب/ریال)	ندارد	ندارد	بیشترین آن ۱۶۷۹ ریال مربوط به گندم و کمترین آن ۷۷۹ ریال مربوط به محصول یونجه به‌ازاء هر مترمکعب آب مصرفی می‌باشد.
اراضی تحت پوشش شبکه‌های آبیاری و زهکشی	۴٪		۱۵*٪	طرح‌های توسعه شبکه‌های آبیاری و زهکشی واقع در استان خراسان جنوبی بالغ بر ۷۱۰ هکتار می‌باشد. (* متوسط کشوری)
تأمین نیازآبی در سطح حوضه‌های استان	۹۰٪	ندارد	ندارد	

جدول ۳- نشانگرهای بخش اجتماعی

نشانگر	مقدار مشاهده شده	مقدار هدف	مقدار آستانه	ملاحظات
توسعه سیستم‌های نوین آبیاری	۶٪		*۰/۵٪	متوسط بهره‌برداران حقیقی برخوردار از سیستم‌های نوین آبیاری (قطره‌ای و بارانی) در سطح کشور حدود ۵/۰٪ می‌باشد.
تعداد شرکت‌های تعاونی روستایی	۳۴ شرکت تعاونی تولید ۷ شرکت سهامی زراعی	ندارد	ندارد	تأسیس شرکت‌های تعاونی روستایی در استان خراسان جنوبی طی دهه ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۰ افزایش قابل ملاحظه‌ای داشته است.
نرخ رشد شهرنشینی	۴,۸٪	ندارد	*۰/۷۴٪	متوسط نرخ رشد شهرنشینی در کشور (۲/۷۴٪) می‌باشد.
روستان‌نشینی	-۰/۲۱٪	ندارد	*۰/۴۴٪	متوسط نرخ رشد روستان‌نشینی در کشور (۰/۴۴٪-) می‌باشد.
تراکم نسبی جمعیت	۷ نفر در هر کیلومتر مربع	ندارد	۴۳ نفر در هر کیلومتر مربع	بیشترین میزان تراکم جمعیت مربوط به شهرستان بیرجند و کمترین آن در شهرستان نهبندان می‌باشد.
مرگ و میر مرتبط با بیماری‌های آبی	-	ندارد	*۸/۹۴٪	متوسط سهم بیماری‌های مرتبط با آب در مرگ و میر جمعیت کشور ۸/۹۴٪ بوده است.
تشکیل آب‌بران و تعاونی تولید کشاورزی	۱/۴ واحد بر هر ۱۰۰۰۰ هکتار	ندارد	ندارد	-
مالکیت آبی	۱۲۰۰۰۰ هکتار	ندارد	-	میانگین مالکیت اراضی آبی کشور ۲/۴ هکتار می‌باشد.
اراضی کشاورزی دیم	۳/۶ هکتار	ندارد	*۳/۶ هکتار	میانگین مالکیت اراضی دیم کشور ۳/۶ هکتار می‌باشد.
نرخ بیکاری شهری	۱۰/۸٪	ندارد	*۱۰٪	متوسط نرخ بیکاری جمعیت شهری در کشور (۱۰٪) می‌باشد.
روستایی	۸,۹٪	ندارد	*۱۴/۷۳٪	متوسط نرخ بیکاری جمعیت روستایی کشور (۱۴/۷۳٪) می‌باشد.

جدول ۴- نشانگرهای بخش اقتصاد آب

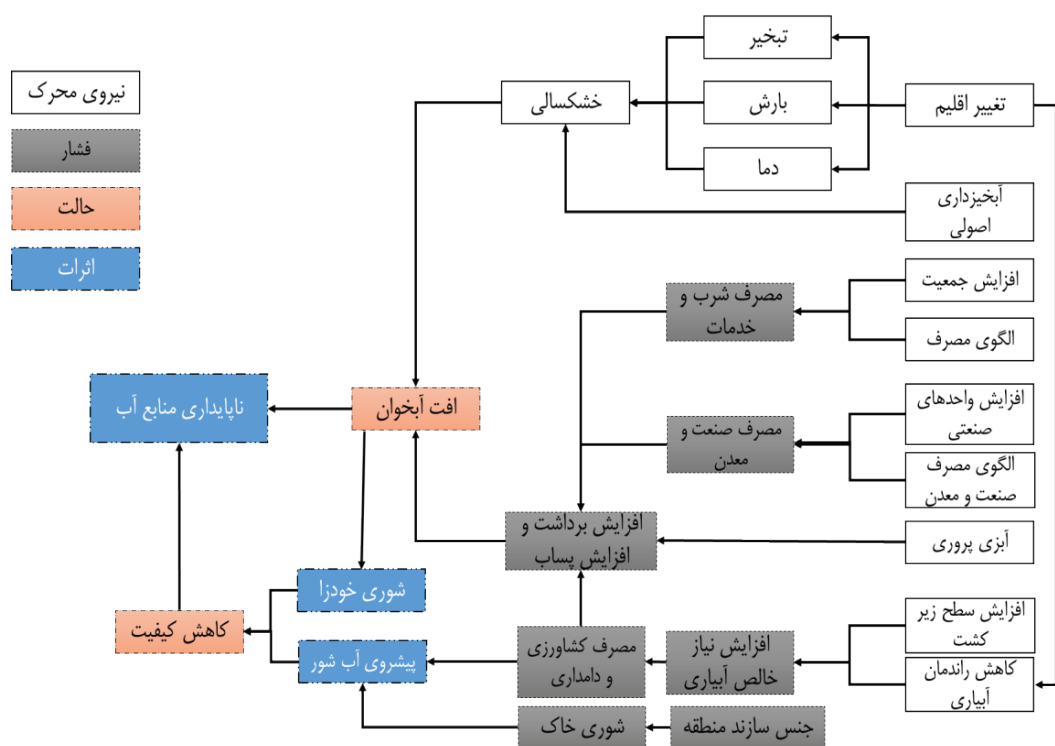
نشانگر	مقدار مشاهده شده	مقدار هدف	مقدار آستانه	ملاحظات
نرخ رشد تولید ناخالص	۰/۹٪		ندارد	متوسط نرخ رشد مشابه در کل کشور ۹/۹٪ بوده است.
سرانه تولید ناخالص داخلی	۸۸/۸ میلیون ریال	ندارد	ندارد	استان خراسان جنوبی کمترین سهم سرانه تولید ناخالص داخلی را در کشور دارا است.
سرمایه‌گذاری بخش آب	۱۳٪	ندارد	ندارد	
هزینه آب از تولید ناخالص	۲/۹٪	ندارد	ندارد	
نسبت هزینه به درآمد شهری	۱۲۳/۸٪	ندارد	*۱۰۲/۷٪	* متوسط کشوری ۱۰۲/۷٪ می‌باشد.
خانوار روستایی	۱۲۹/۵٪	ندارد	*۱۰۶/۷٪	* متوسط کشوری ۱۰۶/۷٪ می‌باشد.
سهم هزینه آب از هزینه‌های خانوار	۴/۷٪	ندارد	*۵٪	(*) متوسط کشوری
ارزش هر مترمکعب آب کشاورزی استان	۱۰٪	ندارد	ندارد	
پوشش هزینه‌ها در شرکت آبفا برای دفع يك مترمکعب فاضلاب	۴۳٪	ندارد	*۳۵٪	(*) متوسط کشوری
دسترسی جمعیت شهری به خدمات فاضلاب	۹۹٪	ندارد	*۹۹٪	(*) متوسط کشوری
دسترسی جمعیت به خدمات آب	۵۶٪	ندارد	*۷۲٪	(*) متوسط کشوری
دسترسی جمعیت به خدمات آب	۱۲۷/۵ لیتر در روز	ندارد	*۱۸۴ لیتر/روز	(*) متوسط کشوری
خدمات آب روستایی	۹۷ لیتر در روز	ندارد	*۱۵۰ لیتر/روز	(*) متوسط کشوری
سرانه مصرف آب شهری	۲۴/۵٪	ندارد	*۲۷٪	آب بدون درآمد شهری ۷۲/۵ میلیون مترمکعب است.
روستایی	۳۹/۸٪	ندارد	ندارد	آب بدون درآمد روستایی ۲۴/۶ میلیون مترمکعب است.
درصد آب بدون درآمد شهری	۶۲٪	ندارد	ندارد	
روستایی	۲۵٪	ندارد	ندارد	
پوشش هزینه‌های تأمین آب شهری	۱۶۷۳ ریال	ندارد	*۱۶۸۰ ریال	(*) متوسط کشوری
روستایی	۵۳٪	ندارد	ندارد	

جدول ۵- تشریح چارچوب DPSIR مساله

محرك	فشار	حالت	اثر	پاسخ
افزایش مصارف بخش کشاورزی (افزایش سطح زیرکشت، تغییر الگوی کشت)	کاهش تغذیه آب زیرزمینی	افت سطح ایستابی آب زیر زمینی و افزایش شوری منابع آب	شوری خاک و پیشروی آب شور	ارائه راهکارهای رفع شوری آب و خاک
افزایش مصارف بخش خانگی (افزایش جمعیت و تغییر الگوی مصرف خانگی)				افزایش راه‌حل‌های تغذیه مصنوعی
افزایش مصارف بخش صنعت (تعداد واحدهای صنعتی و الگوی مصرف)	افزایش برداشت آب در بخش کشاورزی، خانگی و صنعتی		کاهش کمیت و کیفیت محصولات کشاورزی	افزایش واردات محصولات کشاورزی از سایر استان‌های کشور
توسعه افسار گسیخته				
افزایش تواتر و شدت خشکسالی			فقر، بیکاری	مهاجرت به شهرها

باتوجه به مطالعات کتابخانه‌ای، افت سطح ایستابی و کاهش کیفیت آب از مسائل اصلی آب استان به‌شمار می‌آید. بر اساس جدول (۵) جهت بررسی فرضیه‌های موثر بر وضعیت کنونی منابع آب استان خراسان جنوبی از دو عامل طبیعی (کاهش آب تجدیدپذیر) و دخالت انسان (افزایش برداشت) استفاده شده است.

بر اساس فرضیات ارائه شده در شکل (۱) عوامل موثر بر وضعیت پایایی کمی و کیفی منابع آب استان تبیین شده است؛ سپس با استفاده از بررسی روند داده‌ها، درستی و نادرستی فرضیه‌ها در زمینه پیش‌ران‌های موثر (محرك‌ها و پاسخ‌ها) یا تأثیرات آنها (اثر پاسخ) بررسی شد.



شکل ۱- چارچوب علت و معلولی DPSIR مربوط به کم‌آبی و کاهش منابع آب استان خراسان جنوبی

نرخ رشد فشار بخش‌های مصرف‌کننده بر منابع آب نیز از همین دو منظر ارائه شده است. علاوه بر این، وضعیت (اندازه و نرخ رشد) پیش‌ران اقتصادی نیز در این جدول گزارش شده است.

تحلیل کلی چارچوب DPSIR به صورت توصیفی در جدول (۶) خلاصه شده است. در این جدول فشار بر منابع آب از دو منظر کمیت آب مصرفی و پتانسیل آلوده‌کنندگی بررسی شد. همچنین

جدول ۶- توصیفی پیش‌رانه‌های ایجاد فشار در بخش‌های مختلف

بخش	کمیت آب مصرفی		پتانسیل آلوده‌کنندگی		پیش‌رانه اقتصادی	
	اندازه	نرخ رشد	اندازه	نرخ	اندازه	نرخ
کشاورزی	فوق العاده زیاد	ثابت	کم	ثابت	کم	ثابت
شهری و خدمات	کم	++	فوق العاده زیاد	++	فوق العاده زیاد	++
صنعت	خیلی کم	+	کم	+	کم	+

شهری و خدمات) در سال‌های اخیر توسعه جدی را تجربه می‌نمایند و به همین دلیل از عوامل اصلی تشدید فشار بر منابع آب به حساب می‌آیند. بسیار روشن است بخش‌های «شهری و خدمات» و «صنعت و معدن» در استان خراسان جنوبی باید توسعه یابند. اما به‌طور کلی و به دلیل محدود بودن ظرفیت تجدیدپذیری منابع آب، مجموع مصارف آب هر سه بخش باید در سقف معینی محدود شود. بنابراین چاره‌ای جز کاهش مصارف کشاورزی به ازای توسعه بخش‌های دیگر نیست.

• رتبه‌بندی محدوده‌های مطالعاتی

به‌منظور بررسی وضعیت امنیت آبی در استان خراسان جنوبی، ۴۴ محدوده مطالعاتی بر اساس فرضیه‌های موثر بر وضعیت منابع استان بررسی و در نهایت رتبه‌بندی شدند. به این منظور شاخص‌های «خشکسالی» و «بارش» به‌عنوان محرک، شاخص‌های «افزایش برداشت» و «افزایش مصرف» به‌عنوان عوامل فشار بر منابع آب، شاخص «شوری» و «کاهش آب تجدیدپذیر» به‌عنوان عوامل وضعیت منابع، شاخص «C/RW» به‌عنوان اثر و عامل اعلام «ممنوعیت آبخوان» به‌عنوان عامل پاسخ در نظر گرفته شد.

لازم به ذکر است شاخص C/RW به‌عنوان عامل اثر در نظر گرفته شده است. منظور از شاخص C/RW بررسی وضعیت «نابودی کمی و کیفی منابع آب» است. زمانی که شاخص C/RW بزرگتر از ۱ باشد به معنی نابودی منابع آب از لحاظ کمی خواهد بود. زیرا مجموع آب مصرفی در تمامی بخش‌ها، برداشت از منابع آب مشترک بوده و تجاوز آن از ظرفیت تجدیدپذیری موجب اضمحلال منابع آب خواهد بود. به عبارت دیگر شاخص C/RW باید کوچکتر از $0/7 \approx$ باشد تا موجبات نابودی کمی منابع فراهم نشود. زمانی که شاخص C/RW بزرگتر از $0/4 \approx$ باشد، «نابودی کیفی منابع آب» اتفاق خواهد افتاد. به عبارت دیگر، عدم رهاسازی بخشی از آب تجدیدپذیر به‌عنوان زهاب به پایین‌دست (برای تضمین تعادل کیفی/کمک منابع آب) موجب نابودی کیفی منابع آب خواهد شد. بنابراین، جهت جلوگیری از مخاطره «ناپایداری توسعه» در وقایع خشکسالی، باید سقف مجموع مصارف آب به حدی تنظیم شود که برای برگشت‌پذیری/تاب‌آوری فرصت وجود داشته باشد.

باتوجه به جدول (۶)، اگرچه کمیت آب مصرفی کشاورزی زیاد است، اما نرخ رشد آن صفر بوده و مخاطره آلودن منابع آب نیز از سوی این بخش کم می‌باشد. همانگونه که در فرضیه افزایش سطح زیر کشت زراعی بخش کشاورزی گفته شد، این بخش (از سال ۱۳۶۰) رشد فیزیکی نداشته است. در آینده باتوجه به وضعیت پیش‌رانه اقتصادی این بخش، توسعه‌ای در این بخش نخواهیم داشت. با این وجود، شایان ذکر است این بخش به دلیل کمیت بالای آب مصرفی همچنان یکی از مؤلفه‌های اصلی فشار بر منابع آب خواهد بود. سهم بخش خدمات و شهری از حیث کمیت مصرف آب کوچک می‌باشد، اما نرخ رشد مصرف در آن بسیار قابل ملاحظه می‌باشد. در نتیجه، نرخ سریع رشد مصرف در این بخش باعث تولید آلودگی با همان نرخ خواهد شد. باید توجه داشت پیش‌رانه اقتصادی (دستیابی به منافع مالی بیشتر) این بخش با نرخ بسیار زیاد باعث تشدید فشار بر منابع آب (از لحاظ کمیت و بسیار بیش از آن از لحاظ آلودن) خواهد شد. آنچه در این میان به راحتی توجیه می‌شود، میزان آب مصرفی این بخش نسبت به ارزش افزوده تولیدی آن است. در نتیجه وجود این پیش‌رانه قوی، در سال‌های آینده با رشد سریع آب مصرفی این بخش مواجه خواهیم شد و پس از این فشار بر منابع آبی (کمی و کیفی) افزایش شدید خواهد یافت.

بخش صنعت و معدن در سال‌های اخیر در استان خراسان جنوبی رشد جدی نداشته است. بنابراین کمیت مصرف آب و پتانسیل آلوده‌کنندگی این بخش کوچک برآورد شده است. دلیل این امر عدم توجیه اقتصادی تولید صنعتی (ضعف پیش‌رانه اقتصادی) در حال حاضر می‌باشد. طبق نظر کارشناسان احتمال تغییر وضعیت صنعت از رکود فعلی به شرایط رونق و فعالیت بسیار بالا است. بنابراین یافته‌های این مطالعات (مبنی بر داده‌های اخیر) ممکن است قابل اتکاء نباشد. در هر حال این بخش از تشدید‌کنندگان فشار بر منابع آب محسوب می‌شود.

باتوجه به نتایج تحلیل DPSIR، بخش کشاورزی از سال‌ها پیش توسعه‌ای نداشته است. گرچه مصارف این بخش مولفه اصلی مصارف استان را تشکیل می‌دهد اما این نتیجه توسعه‌های گذشته بوده و مهمترین عامل فشار بر منابع آب محسوب می‌شود. با این وجود این عامل در حال حاضر تشدید‌کننده فشار بر منابع آب نیست؛ یعنی در سال‌های اخیر بر شدت برداشت‌ها و مصارف افزوده نشده است. در مقابل، بخش‌های دیگر (به‌ویژه بخش

جدول ۷- ایجاد ماتریس تصمیم‌گیری امنیت آبی استان

ردیف	محدوده مطالعاتی	معادل خشکسالی	بارش	برداشت آب	کل مصارف	کیفیت آب (EC)	کل آب تجدیدشونده	C/RW	معادل ممنوعیت	R	I	S	P	D
۱	دستگردان	۱	۹۷/۴	۴۱/۲۶	۴۱/۲۵	۱۹۸۰	۴۲/۲	۰/۹۸	۱					
۲	طیس	۳	۸۵/۶	۵۲/۵	۵۲/۵	۵۰۷۰	۵۳/۲	۰/۹۹	۱					
۳	گزیک آواز	۲	۱۳۸/۶	۱۷	۱۴	۴۴۱۵	۱۳	۱/۰۸	۲					
۴	بشروی	۳	۱۰۳/۰۴	۱۳۲	۱۰۵	۲۹۴۳	۸۶	۱/۲۲	۱					
۵	سرایان	۳	۲۱۰/۳	۹۲	۶۹	۴۶۵۳	۴۱	۱/۶۸	۱					
۶	سده	۲	۱۴۲/۳	۳۲	۲۶	۶۷۹۲	۱۹	۱/۳۷	۱					
۷	قاین	۲	۱۸۶/۲	۴۰	۳۰	۳۹۶۳	۲۶	۱/۱۵	۲					
۸	سمن‌آباد-سرچاه‌عماری	۳	۹۸/۹	۱۴	۱۲	۵۳۲۶	۱۴	۰/۸۶	۳					
۹	نابیند	۲	۵۹/۲۸	۱/۷۹	۱/۴	۲۲۶۱	۱/۹	۰/۷۴	۲					
۱۰	درمیان اسدآباد	۲	۱۳۸/۱۲	۶۴	۵۴	۴۳۷۵	۴۷	۱/۱۵	۱					
۱۱	اسفدن	۲	۱۶۴/۹	۱۰۲	۸۹	۴۶۴۱	۸۶	۱/۰۳	۲					
۱۲	فردوس	۳	۱۷۶/۶	۸۳	۶۲	۶۵۱۴	۵۶	۱/۱۱	۱					
۱۳	مختاران	۲	۱۳۷/۲	۱۰۴	۷۷	۵۱۵۴	۶۸	۱/۱۳	۲					
۱۴	شاهرخت- دق پترگان	۲	۱۴۹/۴	۶۱	۵۳	۴۵۵۷	۴۸	۱/۱	۲					
۱۵	ده سلم	۱	۸۸/۰۴	۷/۰۵	۳/۳	۱۳۰۶۸	۵۰۳	۰/۶۶	۳					
۱۶	علی آباد هامون	۱	۹۳/۳	۲/۰۸	۰/۷۹	۲۶۱۳	۱,۶	۰/۴۹	۳					
۱۷	علی آباد سفیدابه	۲	۱۰۹/۳	۷	۶	۵۲۳۱	۸	۰/۷۵	۳					
۱۸	قاسم‌آباد کویر بجستان (کویر فک)	۱	۹۷/۸۲	۶	۵	۶۶۲۱	۹	۰/۵۶	۳					
۱۹	بجستان یونسی	۱	۱۱۶/۴	۱۰۱/۶	۱۰۱/۶	۴۱۱۲	۱۰۵	۰/۹۷	۲					
۲۰	دیپوک	۳	۱۰۳/۶	۰/۰۸۸	۰/۰۶۵	۳۲۸۳	۰,۱	۰/۶۵	۲					
۲۱	چاهک موسویه	۲	۱۵۰/۱	۸۳	۶۹	۷۴۴۰	۶۷	۱/۰۳	۲					
۲۲	زوزن	۲	۱۶۰/۷	۴۳/۲۲	۳۸	۶۲۳۵	۴۵,۳۹	۰/۸۴	۳					
۲۳	بیرجند	۲	۱۴۴/۳	۱۲۸	۹۶	۴۷۹۸	۸۹	۱/۰۸	۲					
۳۰	حسین آباد	۲	۱۶۸/۹	۱۸	۱۷	۶۳۹۸	۱۶	۱/۰۶	۲					
۳۱	بندان	۱	۱۰۹/۳	۱۹	۱۵	۵۶۲۱	۱۶	۰/۹۴	۲					
۲۴	ده نو میغان	۱	۱۰۱,۱۶	۴۵	۳۷	۷۱۲۳	۳۳	۱/۱۲	۲					
۲۵	سربیشه	۲	۱۶۸/۵	۳۶	۳۰	۴۶۳۸	۲۸	۱/۰۷	۲					
۲۶	سهل آباد	۳	۱۴۱/۴	۳۶	۲۸	۵۷۹۰	۲۶	۱/۰۸	۲					
۲۷	درج	۳	۱۴۲/۷	۳۱	۲۸	۵۳۳۷	۲۵	۱/۱	۲					
۲۸	قائنات خضری	۲	۲۳۷/۱	۶۵	۵۶	۳۷۲۸	۴۲	۱/۳	۱					
۲۹	نهبندان	۱	۱۰۹/۳	۳۴	۲۶	۵۰۵۳	۲۳	۱/۱	۲					
۳۲	جهت معیار	بزرگتر بهتر	بزرگتر بهتر	کوچکتر بهتر	کوچکتر بهتر	کوچکتر بهتر	بزرگتر بهتر	۰/۷	بزرگتر بهتر					
۳۳	وزن معیار	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵					
۳۴	مجموع	۵۶	۳۸۰۸	۱۳۸۷/۸	۱۱۳۵/۲	۱۴۸۲۶۸	۱۰۳۲/۰۲	۲۸,۴	۵۶					

همانگونه که ذکر شد، جهت بررسی وضعیت امنیت آبی از روش تئوری خاکستری استفاده شده است. در ابتدا اقدام به ایجاد ماتریس تصمیم نموده اکه اعداد آن به شرح جدول (۷) نمایش داده شده است. محدوده‌های مطالعاتی استان نیز به عنوان گزینه در سطرهای ماتریس در نظر گرفته شده‌اند.

لازم به ذکر است از میان شش شاخص در نظر گرفته شده، به ترتیب شاخص خشکسالی و ممنوعیت دشت کیفی هستند که معادل آنها در جدول (۸) نمایش داده شده است. سایر شاخص‌ها به صورت اعداد کمی نمایش داده شده است.

جدول ۸- معادل‌گذاری شاخص‌های کیفی در ماتریس تصمیم‌گیری (بر اساس نظر خبرگان)

ردیف	معدل‌گذاری ممنوعیت دشت	معدل‌گذاری خشکسالی
۱	آزاد	نسبتاً شدید ۳
۲	بحرانی	شدید ۲
۳	ممنوعه بحرانی	بسیار شدید ۱

باتوجه به اینکه واحدهای شاخص‌های امنیت آبی با یکدیگر متفاوت هستند، ممکن است تأثیر برخی از شاخص‌ها نادیده

گرفته شوند. همچنین، جهت این شاخص‌ها با هم متفاوت هستند که این امر منجر به ایجاد نتایج نادرست در تحلیل‌ها می‌شود. بنابراین، تبدیل کلیه ارزش‌های امنیت آبی برای هر محدوده مطالعاتی به یک «ارزش بی بُعد»، در فرآیند مشابه نرمالیزه کردن امری ضروری به نظر می‌رسد. از این رو به منظور نرمال‌سازی مقادیر ماتریس تصمیم‌گیری در خصوص شاخص‌هایی همچون شاخص «معدل خشکسالی»، «ممنوعیت دشت»، «بارش» و «آب تجدیدپذیر» که کمی و مثبت هستند، از رابطه (۲) استفاده شده است. برای شاخص‌های «افزایش مصرف»، «افزایش برداشت» و «شوری» که کمی و منفی هستند، از رابطه (۳) استفاده شده است. برای شاخص‌های شاخص «C/RW» که نزدیک بودن به مقدار مطلوب (۰/۷) اهمیت دارد از رابطه (۴) استفاده شده است.

بر اساس نظر خبرگان آب اهمیت شاخص‌ها در تأثیر بر روی امنیت آبی در جدول (۹) نمایش داده شده است. بر اساس این جدول شاخص کیفیت آب و آب تجدیدپذیر بالاترین امتیازها را دارد و معیارهای بارش و ممنوعیت دشت کمترین تأثیرات را دارند. در نهایت با استفاده از مجموع وزن‌ها در هر محدوده مطالعاتی، رتبه مربوط به آن محدوده به لحاظ امنیت آبی به صورت جدول (۱۰) محاسبه شده است.

$$x_{ij} = \frac{y_{ij} - \min\{y_{ij}, i = 1, 2, \dots, m\}}{\max\{y_{ij}, i = 1, 2, \dots, m\} - \min\{y_{ij}, i = 1, 2, \dots, m\}} \quad i=1,2,\dots,m \quad j=1,2,\dots,n \quad (2)$$

$$x_{ij} = \frac{\max\{y_{ij}, i=1,2,\dots,m\} - y_{ij}}{\max\{y_{ij}, i=1,2,\dots,m\} - \min\{y_{ij}, i=1,2,\dots,m\}} \quad i=1,2,\dots,m \quad j=1,2,\dots,n \quad (3)$$

$$x_{ij} = \frac{|y_{ij} - y_j^*|}{\max\{\max\{y_{ij}, i=1,2,\dots,m\} - y_{ij}^*, y_{ij}^* - \min\{y_{ij}, i=1,2,\dots,m\}\}} \quad i=1,2,\dots,m \quad j=1,2,\dots,n \quad (4)$$

جدول ۹- نمره معیارهای کارشناسی

خشکسالی	بارش	کل برداشت	کل مصارف	کیفیت آب	کل آب تجدیدشونده	C/RW	ممنوعیت دشت
۰/۱۴۰	۰/۰۵۰	۰/۰۶۰	۰/۱۰۰	۰/۱۵۰	۰/۱۵۰	۰/۳۰۰	۰/۰۵۰

جدول ۱۰- رتبه امنیت آبی محدوده مطالعاتی در استان

رتبه	محدوده مطالعاتی	امتیاز
۱	ده سلم	۰/۵۲۴
۲	ده نو میغان	۰/۵۱۹
۳	چاهک موسویه	۰/۵۰۴
۴	بندان	۰/۵۰۴
۵	قاسم آباد کویر بجستان (کویر نمک)	۰/۴۹۹
۶	نهبندان	۰/۴۹۱
۷	زوزن	۰/۴۸۰
۸	مختاران	۰/۴۷۹
۹	درمیان اسدآباد	۰/۴۷۶
۱۰	شاهرخت- دق پترگان	۰/۴۷۳
۱۱	دستگردان	۰/۴۶۹
۱۲	حسین آباد	۰/۴۶۸
۱۳	سربیشه	۰/۴۶۴
۱۴	اسفدن	۰/۴۶۲
۱۵	بیرجند	۰/۴۶۲
۱۶	بجستان یونسی	۰/۴۵۵
۱۷	علی آباد سفیدابه	۰/۴۵۱
۱۸	سده	۰/۴۴۸
۱۹	گزیك آواز	۰/۴۴۷
۲۰	قاین	۰/۴۴۳
۲۱	علی آباد هامون	۰/۴۴۲
۲۲	طبس	۰/۴۳۱
۲۳	فردوس	۰/۴۲۹
۲۴	نابند	۰/۴۲۳
۲۵	قائنات خضری	۰/۴۱۴
۲۶	سهل آباد	۰/۴۰۹
۲۷	درج	۰/۳۹۸
۲۸	سمن آباد - سرچاه عماری	۰/۳۸۵
۲۹	دیپوک	۰/۳۷۴
۳۰	بشرویه	۰/۳۶۳
۳۱	سرایان	۰/۲۶۸

در نتیجه نا امنی آبی ریشه در مخاطرات طبیعی و انسانی دارد. آسیب پذیری به روش های بسیار مختلفی در گستره علوم مختلف تفسیر شده است. نتایج پژوهش نشان داد، بالاترین سطح امنیت آبی در محدوده های ده سلم (۰/۵۲۴)، ده نو میغان (۰/۵۱۹) و چاهک موسویه (۰/۵۰۴) است. درجه امنیت آنها عمدتاً توسط توانایی آنها در کاهش مخاطرات کم آبی و کمیابی آب تفسیر می شود، هرچند که تا زمانی که خطر کم آبی و کمیابی وجود نداشته باشد، هرگز محدوده مطالعاتی امن نخواهد بود. نتایج نشان داد یک محدوده با آب تجدیدپذیر کمتر از میزان مصرف هم ممکن است به سطح معقولی از امنیت آبی برسد. محدوده های مطالعاتی مهمی همچون دشت بیرجند (۰/۴۶۲) هستند که در حال حاضر دچار ناامنی آبی هستند. بیشترین سطح ناامنی آبی نیز در محدوده های در حال توسعه سرایان (۰/۲۶۸) و بشرویه (۰/۳۶۳) دیده می شود.

باتوجه به نتایج امنیت آبی در استان خراسان جنوبی به سختی از ۵۰٪ فراتر می رود و این به منزله آسیب پذیری بالا و در نتیجه ناامنی آبی در محدوده های استان خراسان جنوبی است. با این وجود، ماهیت امنیت آب در حقیقت پاسخ به محرک ها و فشار سیستم منابع آب (تا حدی اجتناب ناپذیر) است. در اثر یک عملکرد مناسب در مقابل محرک ها و فشارها، تا حد زیادی می توان آسیب پذیری ناشی از کاهش امنیت آبی را پاسخ داد. به عنوان مثال در مقابل محرک خشکسالی های متواتر استان، تنها راه حل سازگاری با کم آبی خواهد بود. با این حال، محدوده های مطالعاتی که در معرض فشار بیشتری قرار دارند، هرگز به سطح امنیتی یکسانی با محدوده های که این فشارها در آنها وجود دارد، نخواهند رسید؛ زیرا ایجاد فشار در زنجیره علت و معلول همیشه وجود دارد.

تهیه داشبوردهای امنیت آبی راهی آسان برای تشخیص پروسه های پیچیده اقتصادی، اجتماعی و ... است که منجر به درک سطوح امنیت آب استان می شود. در این پژوهش تلاش شد ابعاد پنهان امنیت آب نشان داده شود و مفهوم امنیت آب به صورت عملی استفاده شود.

پی نوشت

- 1- Complicated
- 2- Water Footprint
- 3- Indicator
- 4- Grey Relational Analysis (GRA)
- 5- State
- 6- Resilience

جمع بندی و نتیجه گیری

در این پژوهش تلاش شد، در رابطه با امنیت آبی محدوده های مطالعاتی استان خراسان جنوبی بینش سیستماتیک ایجاد شود که این بینش منجر به درک پویایی امنیت سیستم منابع آب استان شود. همان گونه که ذکر شد، آسیب پذیری وضعیت منابع آب و

- 101 (2008): 33–48.
- Mahmoudi A. Javed S. A. ., Liu S. and Deng X. 2020. Distinguishing coefficient driven sensitivity analysis of GRA model for intelligent decisions: application in project management. *Technological and Economic Development of Economy*, 26(3): 621-641.
- Nazif S. Karamouz M. Yousefi M. and Zahmatkesh Z. 2013. Increasing Water Security: An Algorithm to Improve Water Distribution Performance, *Water Resources Management: An International Journal*, Published for the European Water Resources Association (EWRA), Springer; European Water Resources Association (EWRA), 27(8): 2903-2921.
- Nezami R.S. Nazariha M. Moridi A. and Baghvand A. 2013. Environmentally Sound Water Resources Management in Catchment Level using DPSIR Model and Scenario Analysis. *International Journal of Environmental Research*, 7(3): 569-580.
- OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development). 1993. Environmental indicators: basic concepts and terminology, background paper no.1 OECD Core Set, OECD, Paris. A synthesis report by the Group on the State of the Environment OCDE/GD(93)179.
- Sahoo M.M. Patra K.C. Swain J.B. and Khatua K.K. 2017. Evaluation of water quality with application of Bayes rule and entropy weight method. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 21: 730–752.
- Steckley M. 2006. The Impact of Governance on Disaster Vulnerability. UWSpace. Ontario, Canada, Thesis.
- Veetil A.V. and Mishra A.K. 2016. Water security assessment using blue and green water footprint concepts. *J. Hydrology*, 542: 589–602.
- Wang W. Tang D. Pilgrim M. and Liu J. 2015. Water Resources Compound Systems: A Macro Approach to Analysing Water Resource Issues under Changing Situations, *Water*: 8: 2–12.
- World Bank. 2017. Iran Economic Monitor.
- Xia X.F. Sun Y. Wu K. and Jiang Q.H. 2016. Optimization of a straw ring-die briquetting process combined analytic hierarchy process and gray correlation analysis method. *Fuel Process. Technol*, 152: 303–309.
- Zhang F. Wang L. and SuW. 2016. Evaluation of land ecological security in Chongqing based on the matter–element analysis-DPSIR model. *China Environmental Science*, 36: 3126–3134.
- شرکت آب منطقه‌ای خراسان جنوبی. ۱۳۹۴. گزارش سیمای منابع آب، شرکت آب منطقه‌ای استان خراسان جنوبی، <http://www.skhrw.ir>.
- صفوی ح. و گل محمدی م. ۱۳۹۵. ارزیابی عملکرد سیستم‌های منابع آب با استفاده از معیارهای اطمینان پذیری، برگشت پذیری و آسیب پذیری فازی. *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۲(۱): ۶۸–۸۳.
- عربی یزدی، ا. نیک نیا، ن. مجیدی ن و امامی، ح. ۱۳۹۳. بررسی امنیت آبی در اقلیم‌های خشک از دیدگاه شاخص ردپای آب (مطالعه موردی: استان خراسان جنوبی) *مجله آبیاری و زهکشی ایران*، ۸(۴): ۷۳۵–۷۴۶.
- فلکی ایلخچی، ق. و احمدی، ح. و حصاری، ب. ۱۳۹۹. ارزیابی اثر تغییر اقلیم و سیاست‌های اجرایی بر آسیب پذیری سیستم منابع آب. *مجله آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۴(۳): ۸۸۱–۸۹۳.
- میر، ر. و عزیزیان، غ. و مساح بوانی، ع. و گوهری، ع. ۱۳۹۹. ارزیابی سیستمی راهکارهای سیاستی کاهش آسیب پذیری دشت سیستان به نوسان و کاهش منابع آب. *علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)*، ۲۴(۳): ۱۳۱–۱۴۹.
- Adger W.N. 2007. Vulnerability, *Global Environmental Change*, 16: 268–281.
- Al-Otaibi A. and Abdel-Jawadm M. 2007. Water security for Kuwait. *Desalination*, 214: 299-305.
- Chu H.D., Xu G.L., Yasufuku N., Yu Z., Liu P.L. and Wang J.F. 2017. Risk assessment of water inrush in karst tunnels based on two-class fuzzy comprehensive evaluation method. *Arab J Geosci*, 10: 179.
- Deliang S., Jianping W., Fengtai Z., Weici .S. and Hong H. 2018. Evaluating Water Resource Security in Karst Areas Using DPSIRM Modeling, Gray Correlation, and Matter–Element Analysis. *Sustainability*, 10: 3934.
- Doeffinger T. and Hall J. H. 2021. Assessing water security across scales: A case study of the United States. *Applied Geography*, 134: 102500.
- Ginkel K. C.H., Hoekstra Y., Buurman. J. and Hogeboom R. J. 2018. Urban Water Security Dashboard: Systems Approach to Characterizing the Water Security of Cities. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 144: 10.1061.
- Ingram J.C., Franco G., Rumbaitis-del Rio C. and Khazai B. 2006. Post-disaster recovery dilemmas: challenges in balancing short-term and long-term needs for vulnerability reduction, *International Journal of Environmental Science and Policy*, 9: 607-613.
- Kaynia A.M. 2008. Probabilistic Assessment of Vulnerability to Landslide: Application to the village of Lichtenstein, Baden-Wurttemberg, Germany. *Engineering Geology*,

Article Type: Applied

نوع مقاله: کاربردی

Investigation of Water Footprint Components of Cucumber Crop in Ilam Province (Case Study: Darhshahr City)

F. Rahimi

MSc of Economical Science, Faculty of Humanities, Ilam University, Ilam, Iran.

Email: freshtehrahimi8@gmail.com

Received: 30-05-2021

Revised: 20-09-2021

Accepted: 22-09-2021

Available Online: 06-12-2021

بررسی اجزای ردپای آب محصول خیار در استان ایلام (مطالعه موردی: شهرستان دره شهر)

فرشته رحیمی

کارشناسی ارشد علوم اقتصادی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه ایلام، ایران.

E-Mail: freshtehrahimi8@gmail.com

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۶/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۰۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۰/۰۹/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۳۱

Abstract

Today, the issue of water shortage has become a major challenge in Iran. Since the agricultural sector has a high share in water consumption to increase population and food supply, so the study of water footprint indicates the volume of water that is directly or indirectly used to produce goods or provide any services has significant potential to help water management in the agricultural sector. In this study, water footprint in cucumber production from 2015 to 2019 using AGWAT software was investigated in 4 areas of Darhshahr city, Ilam province, which has the highest area under cultivation and export of cucumber. The results showed that in faryab lands of the four studied parts, Ermo rural district, Abbas Abad rural district, Chamjab village, and Darhshahr center, the share of green, blue, gray, and white water footprints were 16%, 20%, 20%, 25% of the total water footprint in cucumber production in Darhshahr city, respectively. In the study, the average total water footprint in faryab lands is about 9,684 m³/ton. Therefore, according to the water footprint in the study areas, the replacement of new irrigation methods, including; drip irrigation with low wastage and higher efficiency is recommended instead of flood irrigation in cucumber cultivation in these areas.

Keywords: Cucumber Water Footprint, AGWAT Software, Water Crisis.

چکیده

امروزه مسئله کمبود آب به یک چالش اساسی در کشور ایران تبدیل شده است. از آنجایی که بخش کشاورزی در راستای افزایش جمعیت و تأمین مواد غذایی سهم بالایی در مصرف آب به خود اختصاص داده است، لذا بررسی ردپای آب که نشان دهنده حجمی از آب است که به طور مستقیم یا غیر مستقیم برای تولید کالا یا ارائه هر گونه خدمات به مصرف می رسد پتانسیل قابل توجهی برای کمک به مدیریت آب در بخش کشاورزی دارد. در این پژوهش ردپای آب در تولید محصول خیار از سال ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۸ با استفاده از نرم افزار AGWAT در ۴ منطقه از شهرستان دره شهر، تابع استان ایلام، که بیشترین سطح زیر کشت و صادرات محصول خیار را به خود اختصاص داده است بررسی شد. نتیجه بررسی نشان داد، در اراضی فاریاب چهار بخش مورد مطالعه، دهستان ارمو، دهستان عباس آباد، روستای چمژاب و مرکز دره شهر سهم ردپای آب سبز، آبی، خاکستری و سفید به ترتیب ۱۶٪، ۲۰٪، ۲۰٪، ۲۵٪ درصد از مجموع ردپای آب در تولید محصول خیار در شهرستان دره شهر است. در مطالعه صورت گرفته متوسط مجموع ردپای آب در اراضی فاریاب حدود ۹/۶۸۴ مترمکعب بر تن می باشد. ازاین رو با توجه به روند ردپای آب مناطق مورد مطالعه، جایگزین کردن روش های نوین آبیاری از جمله؛ آبیاری قطره ای با هدر رفت کم و کارایی بالاتر، به جای آبیاری غرقابی در کشت محصول خیار این مناطق توصیه می شود.

واژه های کلیدی: ردپای آب خیار، نرم افزار AGWAT، بحران آب.

بین محصولات باغی، پسته و در بین محصولات زراعی گندم بیشترین ردپای آب سفید داشتند. خلیلی و همکاران (۱۳۹۸) مدیریت منابع آب محصولات زراعی استان قم را با استفاده از مفهوم ردپای آب در سال‌های ۱۳۸۵-۱۳۹۵ بررسی کردند. نتایج مطالعه نشان داد بیشترین ردپای آب سفید از آن محصول پنبه و هندوانه است. گلابی و همکاران (۱۳۹۸) ردپای آب محصولات کشاورزی را برای تعیین بهترین منطقه تولید گندم با استفاده از آزمون روندیابی من‌کندال در استان اصفهان بررسی کردند. نتایج مطالعه نشان داد فریدونشهر بهترین منطقه جهت کشت محصول گندم در این استان می‌باشد. اویسی و همکاران (۱۳۹۸) آب مجازی و ردپای اکولوژیک آب در محصول گندم آبی استان اصفهان طی سال‌های ۱۳۸۶-۱۳۹۴ با استفاده از نیاز خالص آبیاری که از نرم‌افزار NETWAT استخراج شد، بررسی کردند. نتیجه پژوهش نشان داد استان اصفهان فقط در سال ۱۳۸۶ صادر کننده آب مجازی محصول گندم بوده است. صادقی و همکاران (۱۳۹۴) در مطالعه‌ای ردپای آب در بخش‌های اقتصادی از جمله کشاورزی و صنعت با استفاده از روش ماتریس حسابداری اجتماعی (SAM) را سنجیدند. نتیجه تحقیق نشان داد، محصولات کشاورزی از جمله گندم، و بخش نباتات صنعتی بیشترین سهم از ردپای آب به را دارند. رضانی اعتدالی و آبایی (۱۳۹۵) ردپای آب در تولید جو در ۱۵ استان کشور، که بیشترین تولید و سطح زیر کشت را دارند، را با استفاده از نرم‌افزار AGWAT ارزیابی کردند. نتیجه تحقیق نشان داد استان‌های خراسان، اصفهان و فارس بیشترین ردپای آب در تولید جو اراضی فاریاب کشور را دارند. Karandish و همکاران (۲۰۲۱) برای اولین بار مطالعه موردی در ایران، به‌صورت تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای دو اقدام، انتقال آب بین حوضه‌ای فیزیکی و مجازی (IBWT) ردپای سبز و آبی (WF) مربوط به تولید ۳۹ محصول تولید شده که محصول خیار یکی از این اقلام بود، در استان‌های مرطوب مازندران و سمنان بررسی کردند. نتایج نشان داد، الگوهای زراعی اصلاح شده، به‌گونه‌ای که مازاد تولید محصولات پرمصرف آب در مازندران تولید استان سمنان را کاهش می‌دهد. Nikolaou و همکاران (۲۰۲۱) به ردپای آب محصول کشاورزی خیار و گوجه فرنگی در منطقه مدیترانه به‌منظور شناسایی اقدامات انرژی مناسب برای اقلیم محلی و عملکرد محصول در راستای هدف پایدار گلخانه‌ای پرداختند، نتیجه تحقیق نشان داد کاشت گلخانه‌ای این محصولات می‌تواند به‌عنوان یک اقدام کاهشی برای مبارزه با تغییرات آب و هوایی و کمبود آب در این منطقه باشد. Kahramanoğlu و همکاران (۲۰۲۰) ردپای آب و بهره‌وری استفاده از آبیاری محصولات مهم در قبرس شمالی را بررسی کردند، نتیجه بررسی نشان داد در بین محصولات کشاورزی،

امروزه تقاضای منابع آب ناشی از رشد جمعیت و کمبود آب برای تولیدات کشاورزی که رابطه مستقیمی با امنیت غذایی دارد، به مسئله‌ای جهانی تبدیل شده است. کشاورزی به‌عنوان اصلی‌ترین منبع تأمین مواد غذایی و آب به‌عنوان مهمترین عامل محدود کننده در توسعه بخش کشاورزی، اهمیت منابع آبی را مشخص می‌نماید. در راستای استفاده بهینه از منابع موجود آب، بررسی راهکارهای استفاده بهینه آب از طریق بازنگری در تخصیص منابع آب و مدیریت آن، امری ضروری است. از آنجایی‌که میزان آب مصرفی پایه و ردپای آب هر محصول در هر منطقه تحت تأثیر اقلیم، میزان تولیدات، الگوی مصرفی مردم، عملیات کشاورزی و راندمان کاربرد آب متغیر است توسعه روش‌های مدیریتی کارآمد و جدید که بتوان با آن مقدار آب واقعی مصرفی را محاسبه کرد، امری لازم و ضروری است. (علیقلی‌نیا و همکاران، ۱۳۹۵). در این راستا یکی از راهکارهای نوین اقتصادی که کارشناسان و برنامه‌ریزان اقتصادی در جهت مدیریت پایدار منابع آب بر آن تأکید دارند، ردپای آب است (رمضانی اعتدالی و همکاران، ۱۳۹۵).

مفهوم ردپای آب به‌عنوان شاخصی از کمیت، زمان و مکان مصرف آب شیرین، نخستین بار توسط Hoekstra (۲۰۰۳) ارائه شد. این مفهوم پس از انجام اصلاحاتی در روش‌های برآورد و محاسبه، در مجموعه‌ای از انتشارات مؤسسه IHE یونسکو به‌عنوان یک شاخص قابل اتکا معرفی شد (علیقلی‌نیا و همکاران، ۱۳۹۶). ردپای آب سبز، به سهم آب حاصل از بارندگی مرتبط است. ردپای آب خاکستری، به حجمی از آب شیرین اطلاق می‌شود که برای رقیق سازی کودها و سمومی که در فرآیند تولید محصول استفاده شده، اشاره دارد. ردپای آب سفید، تلفات آب حاصل از آبیاری آب سفید می‌باشد (رحیمی پور انارکی و همکاران، ۱۳۹۹).

پژوهش‌های متعددی در ارتباط با ردپای آب در محصولات کشاورزی انجام شده است. Kalvani و همکاران (۲۰۱۹) ردپای آب در محصولات کشاورزی استان تهران از جمله محصول خیار، در بازه زمانی ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۵ مورد بررسی قرار دادند. Arabi و همکاران (۲۰۱۸) ردپای آب در محصولات کشاورزی مختلف از جمله خیار محاسبه و منابع آبی را بررسی نمودند. کمالی علی آباد و همکاران (۱۳۹۷) در تحقیقی آب مجازی مصرفی در خیار سبز گلخانه‌ای استان یزد را بررسی کردند. نتیجه پژوهش نشان داد میانگین مصرف آب یک عدد خیار سبز در زمستان ۸/۹۳ لیتر می‌باشد. پیری و سارانی (۱۳۹۸) ردپای آب محصولات باغی و زراعی در استان سیستان و بلوچستان را برآورد کردند و نتیجه بررسی آن‌ها نشان داد، در

محصول کاهو در این منطقه کمترین ردپای آب دارد. Trotter و Perrier (۲۰۱۷) شیوه کاشت کشاورزی چند محصول از جمله خیار در کشور فلسطین و مفهوم جعبه سیاه آب مجازی با رویکرد sts را بررسی کردند، تا فرضیه‌های اساسی را شناسایی کنند. نتایج تحقیق نشان داد، محصولات کشت شده این کشور نشان می‌دهند متغیرهای اجتماعی و سیاسی در حاکمیت آب حجم جریان‌ات مجازی آب را بسیار بیشتر از متغیرهای اقلیمی یا زراعی تعیین می‌کند. این نتایج این امکان را می‌دهد که کشاورزی خرده مالکان در شرایط موجود در سرزمین‌های فلسطین چه نوع سیاست‌هایی می‌توانند به کار برند که از آنها حمایت کند. Dasilva و همکاران (۲۰۱۶) ردپای آب مصرفی مواد غذایی محصولات کشاورزی از جمله خیار در کشور برزیل را با استفاده از رویکرد هوکسترا بررسی کردند. نتیجه بررسی

مواد و روش‌ها

شهرستان دره‌شهر در جنوب استان ایلام، واقع شده، این شهرستان به دلیل قرار گرفتن در کنار رودخانه سیمره یکی از مناطق پر ظرفیت در بخش کشاورزی است. بخش زیادی از مردمان این شهرستان از طریق کشاورزی گذران زندگی می‌کنند. در این شهرستان محصولات زیادی توسط کشاورزان از جمله؛ گندم، برنج، کلزا، ذرت، طالبی و خیار و ... کشت می‌شود، اما طبق آمار جهاد کشاورزی شهرستان، بعد از محصول گندم، بیشترین سطح زیر کشت پاییزه و بهار در این شهرستان مربوط به خیار است. از ۱۴۰۰۰ هکتار کشاورزی این شهرستان سالانه حدود ۵۰۰۰ هکتار به کشت خیار پاییزه و بهار با برداشت سالانه، نزدیک به ۱۰۰ هزار تن اختصاص می‌یابد. کیفیت بالای این محصول و کاشت وسیع آن در این شهرستان، باعث ایجاد کارخانه خیار شور شده، که پیرو آن باعث اشتغال‌زایی و رونق تولید، صادرات، خیار و خیارشور، به کشورهای خارجی مثل عراق، استرالیا، افغانستان و... شده است. از این‌رو در این مطالعه حجم ردپای آب سبز، آبی، خاکستری و سفید در تولید محصول خیار در سطح مناطقی از شهرستان دره‌شهر که بیشترین سطح زیرکشت محصول خیار دارند، از جمله؛ دهستان عباس‌آباد، ارمو، چمزاب و سطح شهرستان، با به‌کارگیری چارچوب ارائه شده توسط Hoekstra و Chapagain (۲۰۱۱) و با اعمال تغییرات برآورد شد. برآورد تبخیر و تعرق واقعی محصول و نیاز آبیاری تحت شرایط غیراستاندارد در سال ۱۳۹۸ براساس فرضیات Allen و همکاران (۱۹۹۸) صورت پذیرفت.

نیاز آبیاری و بارندگی مؤثر با استفاده از نرم‌افزار AGWAT

نشان داد متوسط ردپای آب غذایی برزیلی، ۱۶۱۹ متر مکعب برای هر نفر است، که گوشت گاو به مقدار ۲۱٪ بیشترین سهم را دارد. Zhang و Anadon (۲۰۱۴) نابرابری آب در چین را با استفاده از روش بین منطقه‌ای ورودی و خروجی مطالعه کردند. نتیجه تحقیق نشان داد مناطق در حال توسعه مانند شاندونگ، و ژجیانگ، بزرگترین ردپای آب را دارند.

با توجه به اهمیت و نتایج تحقیق‌های صورت گرفته در زمینه ردپای آب محصولات کشاورزی برای مدیریت کارآمد منابع آب، در این مقاله به بررسی اجزای ردپای آب محصول کشاورزی خیار شهرستان دره‌شهر به‌منظور مدیریت بهینه آب و برنامه‌ریزی پایدار در راستای رشد هوشمند (رشد و توسعه قابل پیاده برای جلوگیری از هدر رفت آب کشاورزی و غنی کردن اراضی کشاورزی) بخش کشاورزی این شهرستان، پرداخته شده است.

برآورد شده است. به‌منظور محاسبه ردپای آب محصول خیار در مناطق ذکر شده شهرستان دره‌شهر، داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های هواشناسی شهرستان دره‌شهر؛ نظیر دمای هوا، رطوبت و ساعت تابش خورشید در فصل پاییز و بهار، جمع‌آوری و به‌عنوان داده‌های اولیه وارد نرم‌افزار AGWAT شد و با تعیین تاریخ کشت محصول خیار در هر منطقه از شهرستان دره‌شهر و تعیین روش آبیاری محصول خیار نیاز ناخالص آبیاری و تبخیر و تعرق محصول در منطقه به‌دست آمد، سپس با استفاده از داده‌های به‌دست آمده از نرم‌افزار گفته شده نیاز خالص آبیاری محصول و بارندگی مؤثر محاسبه شد. این مدل تحت شرایط فاریاب استفاده شد. هرگاه رطوبت منطقه ریشه به کمتر از ۵۰ درصد رطوبت سهل‌الوصول رسید، با استفاده از آبیاری مقدار رطوبت به سطح رطوبت مزرعه باز گردانده شد. از آنجایی‌که AGWAT نیاز خالص آبیاری را برای دوره‌های ۱۰ روزه محاسبه می‌کند، در ابتدا نیاز خالص آبیاری (IR_{irr}) با استفاده از حاصل‌ضرب نیاز ناخالص آبیاری (GI_{irr}) و راندمان آبیاری (IE_{irr}) در سطح هر یک از دشت‌ها محاسبه شد (رابطه ۱). سپس، مجموع بارندگی مؤثر (P_{eff}) در طول دوره رشد خیار به‌صورت اختلاف بین مجموع تبخیر و تعرق واقعی گیاه (ET_c) و مجموع نیاز خالص آبیاری برآورد شد. در نهایت، حجم مصرف آب (CWU) آبی و سبز از روابط زیر محاسبه شد:

$$CWU_{BLUE, Irr} = IR_{irr} = 10 IE_{irr} GI_{irr} \quad (1)$$

$$CWU_{Green, Irr} = 10 P_{eff} = 10 (ET_c - IR_{irr}) \quad (2)$$

$$CWU_{Blue, RF} = 0 \quad (3)$$

$$CWU_{Green, RF} = 10 P_{eff} \quad (4)$$

در این رابطه IR_{irr} و RF به‌ترتیب نشان‌دهنده شرایط فاریاب و دیم و ۱۰ فاکتور تبدیل واحد از mm به m^3/ha می‌باشند. ردپای

آب سبز (WF_{Green}) و آب آبی (WF_{Blue}) بر حسب m^3/ton از تقسیم آب مصرفی سبز و آبی بر مقدار خیار تولیدی (ton/ha) محاسبه می‌شود. از آنجایی که مقدار تولید محصول در شرایط فاریاب و دیم متفاوت می‌باشند، محاسبه اجزای ردپای آب با استفاده از عملکرد محصول در شرایط فاریاب و دیم به صورت جداگانه صورت گرفت.

یکی دیگر از اجزای ردپای آب در تولید خیار، حجم آب مورد نیاز برای رقیق‌سازی کودهای کشاورزی هدر رفته می‌باشد. این مفهوم توسط Hoekstra و همکاران (۲۰۱۱) تحت عنوان آب خاکستری نامیده شده است. در این مطالعه ردپای آب خاکستری (WF_{Gray}) تنها برای کودهای نیتروژن به کار گرفته شد. ردپای آب خاکستری در تولید محصول خیار از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$WF_{Gray, Irr} = (1/Yield_{irr}) \times (\alpha_{irr} \times NAR_{irr}) / (CMax - CNat) \quad (5)$$

$$WF_{Gray, RF} = (1/Yield_{RF}) \times (\alpha_{RF} \times NAR_{RF}) / (CMax - CNat) \quad (6)$$

که در آنها α درصد تلفات کودهای نیتروژن، NAR (kg/l) نرخ مصرف کود، $CMax$ (kg/m^3) غلظت بحرانی نیتروژن، ha $CNat$ (kg/m^3) غلظت واقعی نیتروژن در منابع آب دریافت کننده و $Yield$ (ton/ha) عملکرد خیار می‌باشند. مقادیر α در شرایط فاریاب و دیم به ترتیب ۵ و ۱۰ درصد در نظر گرفته شد. غلظت بحرانی نیتروژن در منابع آب دریافت کننده نیز براساس استاندارد US-EPA برابر با $10mg/lit$ منظور شد. علاوه بر اجزای سه‌گانه فوق، تلفات آب آبیاری (m^3/ha) نیز به عنوان بخش دیگری از ردپای آب (ردپای آب سفید) در تولید خیار برآورد شد.

$$WF_{white, irr} = 10 (GI_{irr} - IR_{irr}) / Yield_{irr} \quad (7)$$

$$WF_{white, RF} = 0 \quad (8)$$

با استفاده از روابط ارائه شده اجزاء مختلف ردپای آب در

تولید خیار در سطح شهرستان دره شهر محاسبه شد. سپس مجموع هر یک از این اجزاء در سطح شهرستان مورد مطالعه به صورت متوسط وزنی این مقادیر در شرایط فاریاب و دیم با استفاده از روابط (۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲) محاسبه شد:

$$WVF_{i,x,y} = Prod_{i,x,y} \times WF_{i,x,y} \quad (9)$$

$$i = 1, \dots, 7$$

$$AWF_{x,y} = (a WVF_{i,x,y}) / (a Prod_{i,x,y}) \quad (10)$$

$$WAW_x = . AWF_{x, irr} + (1 - \beta) AWF_{x, rf} \quad (11)$$

$$NWF_x = Tot Prod. WAWF_x \quad (12)$$

که در آنها i شاخص مناطق مورد مطالعه (عباس آباد، ارمو، چمژاب و مرکز دره شهر)، x جزء ردپای آب (آبی، سبز، خاکستری یا سفید)، y شاخص نوع سامانه کشت (فاریاب یا دیم)، $prod$ حجم تولید خیار ($Mton$)، WVF کل حجم هر یک از اجزاء ردپای آب (MCM)، AWF متوسط هر یک از اجزای ردپای آب (m^3/ton)، β سهم تولید خیار فاریاب در سطح منطقه مورد مطالعه و $WAWF$ متوسط وزنی هر یک از اجزاء ردپای آب (m^3/ton)، $TotProd$ کل تولید خیار در سطح شهر ($Mton$) و NWF کل حجم هر یک از اجزای ردپای آب در سطح منطقه مورد مطالعه (MCM) می‌باشند.

نتایج و بحث

باتوجه به اطلاعات به دست آمده، سطح زیر کشت و میزان تولید محصولات ثبت شدند و باتوجه به روابط مطرح شده عملکرد، میزان آب مجازی، سهم آب مجازی آبی و سبز، ردپای آب و بهره‌وری محصول خیار کشت شده در شهرستان دره شهر در بازه زمانی ۵ ساله ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۸ محاسبه و در جدول (۱) آورده شد.

جدول ۱- عملکرد و بهره‌وری محصول خیار شهرستان دره شهر (زینی‌وند و غدیری، ۱۳۹۷)

محصول خیار مناطق مورد بررسی	سطح زیر کشت سالانه (ha)	تولید سالانه (ton)	عملکرد محصول (ton/h)	آب مجازی (m^3/kg)	آب مجازی آبی (m^3/kg)	آب مجازی سبز (m^3/kg)	ردپای آب (m^3)	شاخص بهره‌وری (kg/m^3)
ارمو	۵۱۰	۱۲۰۵۰	۲۳/۶۲	۰/۲۱۷	۰/۲۱۷	۰/۰۱۲	۱,۲۳۴,۴۶۷	۰/۹۵
عباس آباد	۷۱۰	۲۴۹۹۵	۳۵/۲۰	۰/۳۱۲	۰/۳۱۲	۰/۰۱۳	۲,۴۲۳,۰۰۹	۱/۰۳
چمژاب	۵۱۰	۱۲۰۰۲	۲۳/۵۳	۰/۲۱۹	۰/۲۱۹	۰/۰۱۳	۱,۰۱۲,۵۴۳	۰/۹۱
دره شهر	۳۰۸	۶۰۲۵	۱۹/۵۶	۰/۲۱۴	۰/۲۱۴	۰/۰۱۳	۱,۰۰۶,۷۰۹	۰/۸۷

بر اساس اطلاعات ارائه شده در جدول (۲)، ردپای آب سبز و خاکستری مناطق دیم و فاریاب، روستای عباس آباد و چمژاب در کشت بهاره و پاییزه محصول خیار، بیشتر از روستای ارمو می‌باشد. بنابراین در روستای عباس آباد و روستای چمژاب که ردپای آب بیشتری دارند، به‌منظور صرفه‌جویی در مصرف آب و افزایش بازدهی محصول، در کنترل تلفات آبیاری این محصول به‌صورت غرقابی می‌باشد، باید مدیریت مؤثرتری در آبیاری این محصول به‌صورت آبیاری نوار تیپ قطره‌ای به‌کار گرفته شود. جدول (۳) مقادیر متوسط وزنی (WAWF) هر یک از اجزای

رد پای آب در تولید محصول خیار را نشان می‌دهد. کشت وسیع خیار آبی در اراضی فاریاب دهستان عباس آباد با مجموع ۳/۳۸۴ متر مکعب بر تن، و روستای چمژاب با ۳/۳۸۵ متر مکعب بر تن، حجم بالایی از ردپای آب در تولید خیار را به همراه داشته است. در این دو منطقه بالا بودن ردپای آب خاکستری و آب سبز از دیگر دلایل بالا بودن مجموع ردپای آب در تولید خیار می‌باشد. بر این اساس، مجموع ردپای آب در تولید خیار در سطح کشور (NWF) برابر ۴/۱۶۸ MCM/year برآورد می‌شود.

جدول ۲- اجزاء ردپای آب در تولید محصول خیار ۴ منطقه، مورد مطالعه شهرستان دره‌شهر

آب مصرفی (mm) Water			WF _{Irr} (m ³ /ton)				WF _{RF} (m ³ /ton)			مناطق سطح زیرکشت خیار
ETC	IR	P _{eff}	سبز Green	آبی blue	خاکستری Gray	سفید White	مجموع Total	سبز Green	خاکستری Gray	
۳۶	۳۲	۱۸	۰/۰۰۲	۰/۰۱۷	۰/۰۰۱۳	۰/۱۳	۰/۰۲۷	۰/۰۰۴	۰/۰۲۳	ارمو
۴۴	۴۸	۲۰	۰/۰۰۳	۰/۰۲۴	۰/۰۰۱۵	۰/۱۵	۰/۰۳۰	۰/۰۰۵	۰/۰۲۵	عباس آباد
۴۰	۳۸	۲۰	۰/۰۰۳	۰/۰۲۹	۰/۰۰۱۵	۰/۱۴	۰/۰۳۰	۰/۰۰۵	۰/۰۲۵	چمژاب
۴۳	۴۳	۲۰	۰/۰۰۳	۰/۰۲۴	۰/۰۰۱۴	۰/۱۶	۰/۰۳۱	۰/۰۰۵	۰/۰۲۶	دره‌شهر
۳۲	۲۹	۱۵	۰/۰۰۲۷	۰/۰۱۵	۰/۰۰۰۶	۰/۰۶	۰/۰۲۷	۰/۰۰۳	۰/۰۲۴	Average
۲۳	۲۲	۱۰	۰/۰۰۸	۰/۰۱۳۲	۰/۰۰۷	۰/۰۳	۰/۰۰۶۰	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱۲	(%)Cv
۳۶	۳۲	۱۸	۰/۰۰۲	۰/۱۷	۰/۰۰۱۳	۰/۱۳	۰/۰۲۷	۰/۰۰۴	۰/۰۲۳	Min
۴۴	۴۸	۲۰	۰/۰۰۳	۰/۲۹	۰/۰۰۱۵	۰/۱۶	۰/۰۳۱	۰/۰۰۵	۰/۰۲۶	Max

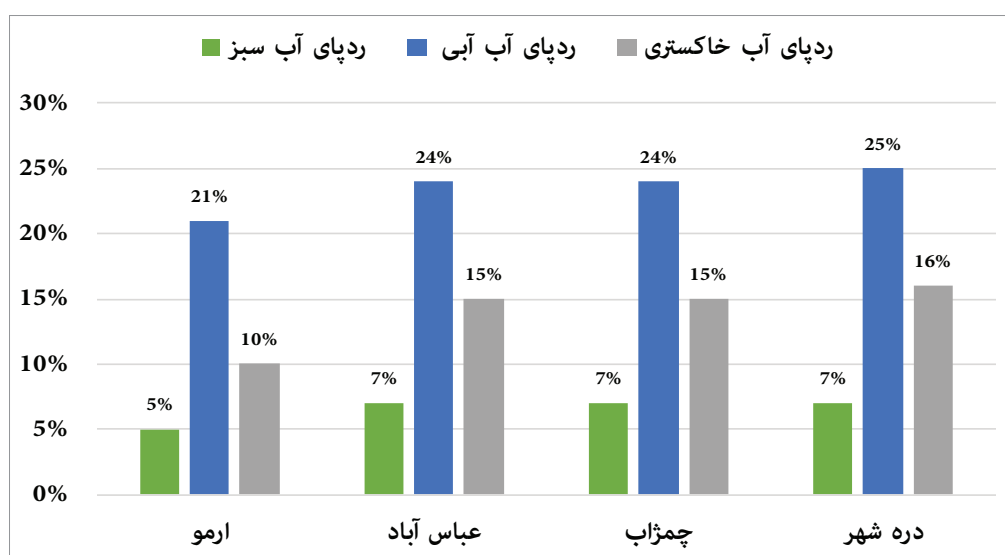
جدول ۳- مجموع حجم هر یک از اجزاء ردپای آب در تولید محصول خیار ۴ منطقه مورد مطالعه، از شهرستان دره‌شهر

WTF _{RF} (MCM)			WTF _{Irr} (MCM)					مناطق سطح زیرکشت خیار
مجموع Total	خاکستری Gray	سبز Green	مجموع Total	سفید White	خاکستری Gray	آبی blue	سبز Green	
۱/۳۲۱	۱/۳۲	۰/۰۰۱	۲/۹۶۲	۱/۲۸	۰/۲۳	۱/۲۵	۰/۲۰۲	ارمو
۱/۴۵۱	۱/۴۵	۰/۰۰۱	۳/۳۸۴	۱/۵۴	۰/۳۴	۱/۳۰	۰/۲۰۴	عباس آباد
۱/۴۶۱	۱/۴۶	۰/۰۰۱	۳/۳۸۵	۱/۵۴	۰/۳۴	۱/۳۰	۰/۲۰۵	چمژاب
۱/۴۷۱	۱/۴۷	۰/۰۰۱	۳/۴۳۳	۱/۵۶	۰/۳۵	۱/۳۲	۰/۲۰۳	دره‌شهر
۵/۷۰۴	۵/۷	۰/۰۰۴	۱۳/۱۶۴	۵/۹۲	۱/۳۵	۵/۱۷	۰/۸۱۳	Total
۲/۰۸۱۶	۲/۰۷۶	۰/۰۰۵۶	۰/۲۵۴	۰/۰۶۶	۰/۰۶۵	۰/۰۷۸	۰/۰۴۵	AWF (m ³ /ton)
			۹/۶۸۴	۱/۹۴	۰/۳۳	۱/۱۳	۰/۰۱۴	WAWF(m ³ /ton)
			۰/۰۱۴۸	۰/۰۰۵۲	۰/۰۰۴۹	۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۲۳	NWF (MCM):4province
			۴/۱۶۸	۱/۰۳۷	۱/۰۴۳	۱/۰۶۵	۱/۰۲۳	NWF (MCM)

در این مطالعه علاوه بر ردپای آب سبز و آبی، ردپای آب خاکستری، میزان آب لازم برای رقیق سازی کودهای شیمیایی برای تخلیه به منابع آب پذیرنده بررسی شد.

براساس شکل (۱) سهم ردپای آب خاکستری و آبی در روستای ارمو به علت استفاده از آب چاه و آبیاری قطره‌ای نسبت به روستای عباس‌آباد، چمزاب و مرکز دره شهر کمتر می‌باشد. علاوه بر روش آبیاری، شرایط آب و هوایی منطقه منجر به افزایش مجموع ردپای آب آبی (آب آبیاری) و تلفات آبیاری (آب سفید) شده است. بالا بودن ردپای آب در تولید آبی محصول خیار در سطح شهر، دهستان عباس‌آباد و چمزاب به دلیل

کاشت زود هنگام، روش نامناسب آبیاری (غرقابی) و استفاده از آب جاری رودخانه سیمره نسبت به دهستان ارمو که از آب محدود چاه برای آبیاری محصول خیار استفاده می‌کنند، قابل توجه می‌باشد. ردپای آب می‌تواند از راه افزایش عملکرد در هکتار با به‌کارگیری سیستم‌های آبیاری کاراتر، کاهش تبخیر و تعرق غیر سودمند، بهینه‌سازی تاریخ کشت کاهش یابد. واضح است که بهبود مدیریت زراعی و آبیاری تکمیلی در مناطق مورد مطالعه باعث کاهش ردپای آب و افزایش کارایی آب آبی و کاهش تلفات آبیاری در اراضی آبی منطقه خواهد شد.



شکل ۱ - سهم هر یک از اجزاء ردپای آب ۴ منطقه مورد مطالعه شهرستان دره شهر به مجموع آب در اراضی فاریاب

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

با بررسی روند ردپای آب محصول خیار شهرستان دره شهر، قطب تولید خیار استان ایلام، به نظر می‌رسد، در مقابل تولید و سطح زیر کشت کلی این محصول، برای اصلاح شرایط موجود با ارائه خدمات تخصصی به منظور تشویق کشاورزان در استفاده از روش‌های آبیاری نوین و جایگزین کردن محصولات آبربر می‌توان ردپای کلی آب شهرستان را کاهش داد که با نتیجه تحقیق رحیمی پور انارکی و همکاران (۱۳۹۹) مطابقت دارد. پایین بودن راندمان سیستم‌های آبیاری و مصرف بیش از اندازه کودهای ازته در مزارع مهمترین عوامل بالا بودن سهم ردپای آب خاکستری و سفید در این شهرستان می‌باشد و با نتیجه تحقیق رضائی اعتدالی و همکاران (۱۳۹۵) مطابقت دارد. به منظور افزایش کارایی مصرف آب بهتر است، محصولاتی

با بهره‌وری آب بیشتر به‌جای محصولات با بهره‌وری آب کمتر در مناطق کاشت شود. به این ترتیب آب برای تولیدات با ارزش اقتصادی بالاتر و سایر مصارف ضروری داخلی ذخیره شود. افزایش تولید و صادرات محصولاتی که در تولید آنها نیاز به آب زیادی بوده و از طرف دیگر ارزش اقتصادی ناچیزی در بازارهای جهانی دارند و وارد کردن محصولات و کالاهایی که نیاز آبی کمی داشته و تولید آنها در داخل می‌تواند با بهره‌وری بالا و مصرف آب اندک صورت پذیرد، سیاستی زیان‌آور برای آینده منابع آب و امنیت بلندمدت مواد غذایی در کشور کم‌آبی مانند ایران خواهد بود که با نتیجه تحقیق کمالی علی‌آبادی و همکاران (۱۳۹۷) مطابقت دارد.

باتوجه به نتایج تحقیق پیشنهاد می‌شود، کشت محصول خیار در شهرستان دره شهر با مدیریت و روش آبیاری نوین به‌جای آبیاری غرقابی صورت گیرد، تا از معایب این روش سنتی آبیاری

از جمله؛ از بین رفتن و تخریب دیواره‌ها و پشت‌ها در خاک‌های سبک، و خروج یک سری علف‌های هرز و مواد غذایی از خاک جلوگیری شود. در این راستا با جایگزینی روش آبیاری نوین به جای روش غرقابی، استفاده از سموم شیمیایی مضر برای از بین بردن رشد همیشگی علف‌های هرز که باعث از بین رفتن مواد معدنی و سایر املاح مفید خاک شده، کاهش می‌یابد.

منابع

- اویسی، ف.، فتاحی اردکانی، ا. و فهرستی ثانی، م. ۱۳۹۸. بررسی آب مجازی و رد پای اکولوژیک آب در محصول گندم آبی استان اصفهان. مجله علوم آب و خاک، ۲۳(۱): ۸۷-۹۹.
- پیری، ح. و سارانی، ر. ۱۳۹۸. بررسی بهره‌وری اقتصادی محصولات کشاورزی استان سیستان و بلوچستان با رویکرد رد پای آب. تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۱(۵): ۱۰۹۳-۱۱۰۴.
- خلیلی، ط.، سرائی تبریزی، م.، بابازاده، ح. و رضانی اعتدالی، ه. ۱۳۹۸. مدیریت منابع آب محصولات زراعی استان قم با استفاده از مفهوم رد پای آب. اکوهیدرولوژی، ۶(۴): ۱۱۰۹-۱۱۱۹.
- رضانی اعتدالی، ه.، شکوهی، ع. و مجتبی، س. ۱۳۹۵. بهره‌گیری از مفهوم رد پای آب مجازی در تولید محصولات اصلی برای عبور از بحران آب منطقه قزوین. آب و خاک، ۳۱(۲): ۴۲۲-۴۳۳.
- رضانی اعتدالی، ه. و آبابایی، ب. ۱۳۹۵. برآورد اجزاء رد پای آب مجازی در تولید جو در مقیاس ملی و استانی. پژوهش آب در کشاورزی، ۳۰(۳): ۴۳۱-۴۴۳.
- رحیمی پور انارکی، م. ر.، محمدی، ع.، رفیعیان، م.، ارجمندی، ر. و کریمی، س. ۱۳۹۹. ارزیابی آب مجازی و رد پای آب محصولات کشاورزی (شهرستان، قلعه گنج). فصلنامه مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۱۱(۴۱): ۱۵۲-۱۶۸.
- زینی‌وند، ن. و غدیری، ا. ۱۳۹۷. بررسی چگونگی مصرف و بهره‌وری آب در محصولات زراعی شهرستان دره‌شهر. نشریه علمی و مهندسی آب، ۸(۲۲): ۵۷-۶۵.
- صادقی، س. ک.، کریمی تکانلو، ز.، متفکر آزاد، م.، ع.، اصغرپور قورچی، ح. و اندایش، ی. ۱۳۹۴. سنجش رد پای آب بخش‌های اقتصادی در ایران با رهیافت ماتریس حسابداری اجتماعی (SAM). مجله علمی پژوهشی اقتصاد مقداری، ۱۱(۳): ۸۱-۱۱۱.
- علیقلی‌نیا، ت.، رضایی، ح.، بهمنش، ج. و منتصری، م. ۱۳۹۵. تخمین و ارزیابی رد پای آب آبی و سبز محصولات عمده مورد کشت در حوضه آبریز دریاچه ارومیه. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۳(۳): ۳۳۷-۳۴۴.
- علیقلی‌نیا، ت.، رضایی، ح.، بهمنش، ج. و منتصری، م. ۱۳۹۶. مطالعه شاخص رد پای آب برای محصولات غالب مورد کشت در حوضه آبریز دریاچه ارومیه و ارتباط آن با مدیریت آبیاری. نشریه دانش آب و خاک، ۲۷(۴): ۳۷-۴۸.
- کمالی علی آباد، ک.، زارع احمد آبادی، ع. ر. و عربی علی‌آبادی، ف. ۱۳۹۷. ارزیابی آب مجازی مصرفی در خیار سبز گلخانه‌ای
- (استان یزد). کنفرانس ملی مدیریت منابع آب ایران. دانشگاه یزد، انجمن علوم و مهندسی منابع آب ایران، شهر یزد.
- گلایی، م. ر.، رادمنش، ف.، آخوندعلی، ع. م. و نیک سخن، م. ح. ۱۳۹۸. انتخاب منطقه مناسب در تولید گندم با استفاده از مفهوم رد پای آب و روش‌های تصمیم‌گیری اجتماعی (مطالعه موردی: استان اصفهان). اکوهیدرولوژی، ۶(۴): ۱۰۴۵-۱۰۵۴.
- Arabi A., Alizadeh A., VahabRajaei Y., Jam K. and Niknia N. 2012. Agricultural Water Foot Print and Virtual Water Budget in Iran Related to the Consumption of Crop Products by Conserving Irrigation Efficiency. Journal of Water Resource and Protection, 4(5): 318-324.
- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D. and Smith M. 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, Rome, 300(9): D05109.
- Dasilva V. D. P. R., De Oliveira S. D., Hoekstra A. Y., Dantas Neto J., Campos J. H. B., Braga C. C. and De Holanda R. M. 2016. Water footprint and virtual water trade of Brazil. Water, 8(11): 517.
- Hoekstra A. Y. 2003. Virtual Water Trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual water trade, Delft, The Netherlands, 12-13 December 2002, Value of water Research Report Series No.12, UNESCO-IHE, Delft, The Netherlands.
- Hoekstra A. Y. and Chapagain A. K. 2011. Globalization of water: Sharing the planet's freshwater resources. John Wiley and Sons.
- Hoekstra A. Y., Chapagain A. K., Aldaya M. M. and Mekonnen M. M. 2011. The water footprint assessment manual: setting the global standard, water Footprint Network, Enschede, the Netherlands.
- Kalvani S. R., Sharaai A. H., Abd Manaf L. and Hamidian A. H. 2019. Water footprint of crop production in Tehran province. Planning Malaysia, 17(10):122-132.
- Karandish F., Hogeboom, R. J. and Hoekstra A. Y. 2021. Physical versus virtual water transfers to overcome local water shortages: A comparative analysis of impacts. Advances in Water Resources, 147: 103811.
- Kahramanoğlu İ., Usanmaz S. and Alas T. 2020. Water footprint and irrigation use efficiency of important crops in Northern Cyprus from an environmental, economic and dietary perspective. Saudi journal of biological sciences, 27(1): 134-141.
- Nikolaou G., Neocleous D., Christou A., Polycarpou P.,

- tion of virtual water and Palestinian agriculture. *Geoforum*, 87: 85-94.
- Zhang C. and Anadon L. D. 2014. A multi-regional input-output analysis of domestic virtual water trade and provincial water footprint in China. *Ecological Economics*, 100: 159-172.
- Kitta E. and Katsoulas N. 2021. Energy and Water Related Parameters in Tomato and Cucumber Greenhouse Crops in Semiarid Mediterranean Regions. A Review, Part I: Increasing Energy Efficiency. *Horticulturae*, 7(12): 521.
- Trottier J. and Perrier J. 2017. Challenging the coproduc-

Introduction of MICE Method for Imputation Missing Meteorological Data and Comparison by Regression; Case Study: 130 Years of Monthly Temperature in Mashhad, Jask and Bushehr

M. Farzandi^{1*}, H. Rezaei-Pazhand²

1- Ph.D. in Agricultural Meteorology, Ferdowsi University of Mashhad, Faculty of Agriculture, Department of Water Engineering, Iran. 2- MSc in Hydrology, Islamic Azad University, Mashhad Branch, Iran.

*(Corresponding Author Email: mhb_farzandi@yahoo.com)

Received: 16-04-2021

Revised: 03-06-2021

Accepted: 28-06-2021

Available Online: 06-12-2021

معرفی روش MICE در ترمیم داده‌های گمشده هواشناسی و مقایسه با رگرسیون؛ مطالعه موردی: ۱۳۰ سال دمای ماهانه مشهد، جاسک و بوشهر

محبوبه فرزندی^{۱*}، حجت رضایی پزند^۲

۱- دکترای هواشناسی کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده کشاورزی، ایران.

۲- کارشناسی ارشد هیدرولوژی، دانشگاه آزاد اسلامی مشهد، ایران.

*(نویسنده‌ی مسئول، E-Mail: mhb_farzandi@yahoo.com)

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۳/۱۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۲۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۰/۰۹/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۰۷

Abstract

Requiring accurate, complete and reliable data is the first step in climate studies. Incomplete data challenges climate analysis. Missing (incomplete) data is often found in meteorology. Therefore, completing the data (imputation) is the primary need for analysis. There are several ways to imputation missing data that vary depending on the data type and climatic characteristics of each region. Precipitation and temperature are the most important variables of meteorology and climatology. The length of the statistical period plays a pivotal role in the accurate analysis of these variables. The monthly temperature of three cities in Iran, including Mashhad, Bushehr and Jask, has been available in a book called World Weather Records since about 1890. This information contains missing data, especially during World War II (1941-1949). This missing data is more visible. The purpose of this study is to increase the accuracy of estimating these missing data by introducing the applied MICE method and providing a complete series of monthly temperatures over 130 years. Stations from neighboring countries were selected as independent (predictor) stations in the patterns. First, the missing monthly temperature data of these three stations were estimated by fitting regression patterns (RMSE of 0.71 to 0.94 OC). The classical regression method requires the study of basic hypotheses and pattern pathology. These patterns were also estimated by the MICE method (RMSE of 0.39 to 0.82 OC). The results of the study and implementation of this package in Rstudio show the superiority of this method. This method is designed for missing data, does not have regression problems, and has many capabilities. Therefore, it is recommended to estimate missing meteorological data.

Keywords: Missing Data, Regression, MICE Algorithm, Temperature, Basic Regression Hypotheses.

چکیده

نیاز به داده‌های کامل و قابل اطمینان اولین گام در مطالعات اقلیمی است. داده‌های ناکامل، تحلیل‌های اقلیمی را دچار چالش می‌کند. اغلب در آب و هواشناسی داده‌های گمشده (ناکامل) وجود دارد. بنابراین کامل کردن داده‌ها (ترمیم) نیاز اولیه تحلیل‌هاست. روش‌های متعددی برای بازسازی داده‌ها وجود دارند که بسته به نوع داده و خصوصیات آب و هوایی هر منطقه متفاوت می‌باشند. بارش و دما از مهم‌ترین متغیرهای هوا و اقلیم‌شناسی هستند. طول دوره آماری اهمیت بسزایی در دقت تحلیل این دو متغیر دارد. دمای ماهانه سه شهر ایران شامل مشهد، بوشهر و جاسک از سال حدود ۱۸۹۰ در کتبی به نام World Weather Records موجود است. این اطلاعات دارای داده‌های گمشده می‌باشد، مخصوصاً همزمان با جنگ جهانی دوم (۱۹۴۱-۱۹۴۹) این داده‌های گمشده مشهودتر هستند. هدف این پژوهش، افزایش دقت برآورد این داده‌های مفقود با معرفی روش کاربردی MICE و ارائه سری کامل دمای ماهانه در طول ۱۳۰ سال است. بدین منظور، ایستگاه‌هایی از کشورهای مجاور به عنوان ایستگاه‌های مبنا انتخاب شدند. ابتدا داده‌های مفقود دمای ماهانه این سه ایستگاه با برازش الگوهای رگرسیونی ترمیم شدند (ریشه میانگین مربعات خطا ۰/۷۱ تا ۰/۹۴ درجه سانتیگراد). روش کلاسیک رگرسیون نیازمند بررسی فرض‌های زیربنایی و آسیب‌شناسی است. این الگوها با روش MICE نیز برآورد شدند (ریشه میانگین مربعات خطا ۰/۳۹ تا ۰/۸۲ درجه سانتیگراد). نتایج مطالعه و اجرای این بسته در محیط Rstudio نشان از برتری این روش دارد. این روش برای داده‌های مفقود طراحی شده، مشکلات رگرسیون را نداشته و قابلیت‌های زیادی دارد. لذا برای ترمیم داده‌های گمشده آب و هواشناسی پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: داده گمشده، رگرسیون، الگوریتم MICE، دما، فرض‌های زیربنایی رگرسیون.

این پنج ایستگاه دارای بارش و دمای ماهانه دراز مدت (۱۲۵ تا ۱۴۰ سال) است. آمار طولانی مدت بارش این ایستگاه‌ها پس از ترمیم به بیش از ۱۰۰ سال خواهد رسید. بنابراین می‌تواند مبنای تحلیل‌های دقیق‌تر و مطمئن‌تری برای دما و بارش ماهانه و سالانه این پنج شهر باشد. چون این پنج شهر در اقصا نقاط ایران قرار دارند، هریک می‌توانند نماینده ناحیه‌ای از کشور باشد. تاکنون ترمیم این داده‌ها در مقیاس ماهانه (به جز دمای مشهد توسط فرزندی و همکاران، ۱۳۹۳) انجام نشده است. ترمیم این آمار در قلمروی برآورد داده‌های گمشده است. داده‌های گمشده سبب کاهش دقت برآورد می‌شود. یعنی برآوردها اریب هستند و صحت تحلیل‌های ما در مورد جامعه دچار تردید است (Little و Rubing، ۲۰۰۲؛ ارقامی و همکاران، ۱۳۸۰).

حجم نمونه (طول دوره آماری) به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک برای تحلیل فراوانی، تحلیل سری‌های زمانی، تحلیل خشکسالی‌ها و ... باید حداقل ۱۰۰ سال باشد، زیرا داده‌هایی با طول کمتر نوسانات دراز مدت را منعکس نمی‌کنند. دوره بازگشت نیز به طول دوره آماری وابسته است. برآورد بزرگترین دوره بازگشت با دقت قابل قبول معادل یک پنجم طول داده‌ها است (Jacob و همکاران، ۱۹۹۹). بنابراین در اختیار داشتن آمار طولانی مدت و کامل اولین نیاز تحلیل‌های قابل اعتماد در آب و هواشناسی است. این خود نیاز به روش‌های دقیق‌تری برای برآورد داده‌های مفقود دارد. زیرا مفقودی در داده‌های آب و هواشناسی معمول است.

تاکنون روش‌های مختلفی برای ترمیم داده‌های مفقود پیشنهاد شده است که هر یک بر اصول ریاضی خاصی بنا شده‌اند. رگرسیون به عنوان یک روش کلاسیک آماری با روش برآورد کمترین مربعات، کاربرد زیادی در آب و هواشناسی دارد (رضایی پزند و بزرگ نیا، ۱۳۸۱). Iqbal و همکاران (۲۰۱۸) تغییرات بارش در دریای زرد چین را در دوره آماری ۲۰۱۴-۱۹۶۰ بررسی کرده‌اند. آن‌ها روش رگرسیون خطی را برای برآورد داده‌های مفقود بارش به کار برده‌اند. طولانی‌ترین آمار دما و بارش ماهانه ایران در شهر مشهد و از سال ۱۸۹۳ (بیش از ۱۲۵ سال) قابل دسترسی است (فرزندی و همکاران، ۱۳۹۳). این سری‌های زمانی دارای داده‌های گمشده هستند. ترمیم ماهانه داده‌های مشهد با الگوهای رگرسیونی و بهینه‌سازی انجام شده است (فرزندی و همکاران، ۱۳۹۳). همچنین دو پژوهش در مقیاس سالانه نیز بر روی بارش داده‌های فوق صورت گرفته است. ابتدا مفقودی‌ها ترمیم و سپس داده‌های کامل سالانه تحلیل شده‌اند. خلیلی و بذرافشان (۱۳۸۷) تداوم خشکسالی‌ها را با تحلیل فراوانی بارش سالانه طولانی مدت مشهد بررسی کردند. آن‌ها روش خودهمبستگی را برای ترمیم بارش سالانه انتخاب کردند. Ghahraman و Ahmadi (۲۰۰۷) پانزده سال مفقودی بارش سالانه مشهد را

ترمیم داده‌های گمشده^۱ (مفقود) در علوم مختلف اهمیت ویژه‌ای دارد. تحلیل‌های کلاسیک آماری با نمونه‌های کامل (بدون مفقودی) ممکن است و در نمونه‌های شامل مفقودی نتایج تحلیل‌ها اریب هستند، یعنی در صحت آنها تردید وجود دارد (ارقامی و همکاران، ۱۳۸۰). نیاز به داده‌های صحیح، کامل و قابل اطمینان اولین گام در مطالعات اقلیمی است. داده‌های ناکامل، تحلیل‌های اقلیمی را دچار چالش می‌کند. اغلب در آب و هواشناسی داده‌های گمشده (ناکامل) موجود است. بنابراین کامل کردن داده‌ها (ترمیم) نیاز اولیه تحلیل‌هاست. روش‌های متعددی برای بازسازی داده‌ها وجود دارند که بسته به نوع داده و خصوصیات آب و هوایی هر منطقه متفاوت می‌باشند. دما و بارش از مهم‌ترین متغیرهای آب و هوایی هستند. داده‌های طولانی مدت و کامل متغیرهای دما و بارش اولین نیاز تحلیل‌های قابل اعتماد در آب و هواشناسی و علوم مرتبط است. طول دوره آماری اهمیت بسزایی در دقت تحلیل این دو متغیر دارد. حجم نمونه کمتر از ۱۰۰ سال (بویژه در مناطق خشک و نیمه خشک) نمی‌تواند نوسانات دراز مدت را به خوبی منعکس کند (Edmond و همکاران، ۱۹۷۳).

آمار مشاهده‌ای متغیرهای هواشناسی در چند ایستگاه همدید ایران از سال ۱۳۳۰ (۱۹۵۱ میلادی) در سایت سازمان هواشناسی ایران قابل دسترسی است (www.weather.ir). بنابراین حداکثر طول دوره آماری رسمی کشور ۷۰ سال است. آمار قدیمی و طولانی مدت دمای ماهانه سه شهر و بارش ماهانه پنج شهر ایران توسط سفارت آمریکا و انگلیس در دوره قاجار و قبل از سال ۱۳۳۰ اندازه‌گیری و در کتبی به نام World Weather Records ثبت شده است (Smithsonian Institution، ۱۹۲۷). این اطلاعات نشان می‌دهد که طول دوره آماری دما و بارش ماهانه این ایستگاه‌ها حدود ۱۳۰ سال است. ایستگاه‌های فوق، تنها ایستگاه‌های با آمار طولانی مدت در ایران هستند. متأسفانه این آمار که می‌تواند مبنای ارزشمندی در تحقیقات و نشان‌دهنده تغییرات بلندمدت دوره‌ای و روند و ... باشند، دارای داده گمشده بوده و تا به حال در دسترس پژوهشگران قرار نگرفته است. بررسی گمشده‌های ماهانه این ایستگاه‌ها نشان می‌دهد که اکثر آنها به دنبال جنگ جهانی اول (۱۹۱۸ و ۱۹۱۹) و جنگ جهانی دوم (۱۹۴۱-۱۹۴۹) رخ داده‌اند. برخی داده‌های گمشده ماهانه نیز به طور پراکنده در طول دوره آماری وجود دارند (Smithsonian Institution، ۱۹۴۷). نام این پنج شهر و سال شروع آماربرداری آنها عبارت‌اند از: مشهد (دما ۱۸۸۵ و بارش ۱۸۹۳)، تهران (بارش ۱۸۸۴)، اصفهان (بارش ۱۸۹۳)، جاسک (دما ۱۸۹۳ و بارش ۱۸۹۳) و بوشهر (دما ۱۸۷۸ و بارش ۱۸۷۸). بنابراین

با روش کریجینگ و برازش رگرسیون چندگانه بر میانگین‌های متحرک باران سالانه ترمیم کردند. روش خودهمبستگی فقط از اطلاعات درون خود داده‌ها استفاده می‌کند. MICE داده‌های گمشده در سری داده‌ها باید شرایطی داشته باشند که معمولاً روش‌های برآورد داده مفقود بتوانند آنها را با دقت مناسبی ارزیابی کنند. مثلاً باید تصادفی یا کاملاً تصادفی باشند. از روش‌هایی که برای برآورد داده مفقود طراحی شده‌اند می‌توان به الگوریتم‌های EM^۳، MI^۴، MICE^۵ و ... اشاره کرد. Porto و همکاران (۲۰۱۷) بارش روزانه دو منطقه همگن اقلیمی را در تاریخ‌های مشخص شده با سه روش MICE، کریجینگ و کوکریجینگ برآورد نمودند. آنها نتیجه گرفتند روش MICE در مقایسه با روش‌های زمین آماری در منطقه اول ۰/۱۶ و در منطقه دوم ۰/۲۶ بهتر بود. Yozgatligil و همکاران (۲۰۱۳) شش روش ترمیم داده‌های مفقود را برای بارش و دمای ماهانه ترکیه ارزیابی و مقایسه نمودند. روش‌ها در این تحقیق به دو دسته ساده و پیچیده تقسیم شدند. روش‌های ساده عبارتند از میانگین حسابی، نسبت نرمال (NR)^۶ و نسبت نرمال وزنی با روش همبستگی. روش‌های پیچیده شامل پرسپترون چندلایه شبکه عصبی مصنوعی (ANN)^۷، استراتژی جاگذاری چندگانه با زنجیره مارکوف-مونت کارلو بر اساس حداکثرکردن امید ریاضی (EM-MCMC)^۸ و روش اصلاح شده EM-MCMC است. آنها مجموع مربعات خطا را برای ارزیابی و انتخاب روش برتر به کار بردند. افزون بر این روش تحلیل سری‌های زمانی پویای غیرخطی را با روش همبستگی بی‌بعد نیز برای وابستگی فضایی مکانی داده‌های جاگذاری شده به کار گرفتند. تحلیل آنها نشان داد که دو روش ANN و EM-MCMC از بقیه بهتر عمل می‌کنند. هدف این پژوهش افزایش دقت برآورد داده‌های مفقود در

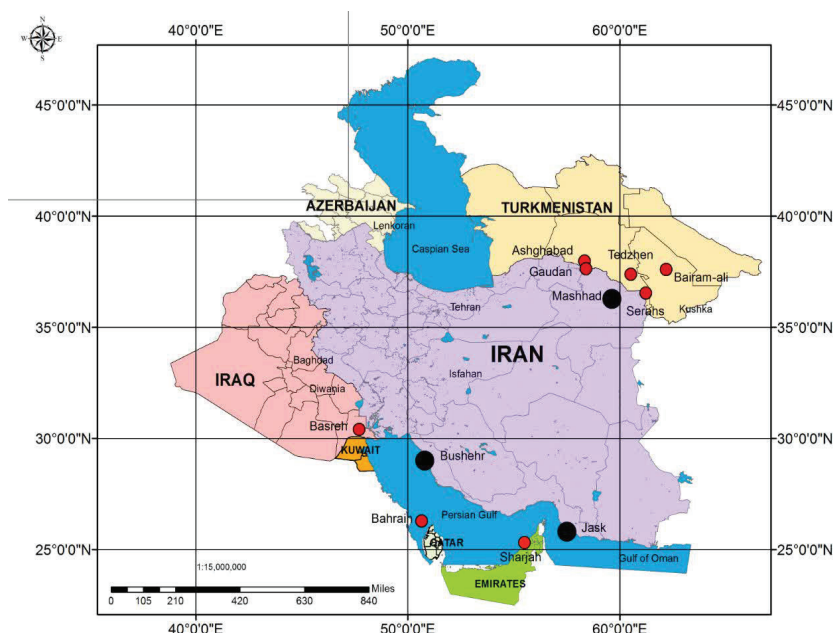
آمار دمای طولانی مدت ماهانه سه شهر ایران و ارائه سری‌های بلندمدت است. در این راستا روش MICE برای برآورد داده‌های مفقود هواشناسی برای اولین بار در ایران معرفی شده و با روش کلاسیک رگرسیون مقایسه می‌شود. این تحقیق از دو جنبه حائز اهمیت است. ۱- معرفی یک روش کارا و ساده برای برآورد داده‌های مفقود هواشناسی، ۲- تولید آمار بلندمدت دمای ماهانه سه شهر ایران که می‌تواند مبنای ارزشمندی برای مطالعات منابع آب، خشکسالی‌ها، تغییر اقلیم، گرمایش جهانی و ... باشد.

مواد و روش

دمای ماهانه سه ایستگاه در انتشارات WWR^۹ متناسب به ایران با قدمتی ۱۲۵ تا ۱۴۰ سال موجود است (Smithsonian Institution، ۱۹۲۷؛ ۱۹۳۴؛ ۱۹۴۷). این ایستگاه‌ها شامل مشهد، جاسک و بوشهر است. متأسفانه این آمار که می‌تواند مبنای ارزشمندی در تحقیقات و نشان‌دهنده تغییرات دوره‌ای، روند و ... باشد، دارای داده‌های گمشده است. داده‌های گمشده عمدتاً مربوط به جنگ‌های جهانی اول و دوم می‌باشد. این تحقیق قصد دارد ضمن جمع‌آوری این اطلاعات، آنها را با روش‌های دقیق و نوین ترمیم نموده و آمار کامل و طولانی مدت را برای اولین بار در اختیار پژوهشگران قرار دهد. این آمار از کتب WWR و سازمان هواشناسی کشور جمع‌آوری و سپس ترمیم شده است. دو روش رگرسیون و MICE در این تحقیق بررسی و مقایسه شده است. ایستگاه‌های مورد استفاده در این پژوهش در جدول (۱) و شکل (۱) آمده است. سه ایستگاه پاسخ با دایره‌های قرمز و ایستگاه‌های پیشگو با دایره‌های سیاه در شکل (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های منتخب مورد بررسی در الگوهای دما و بارش

نام ایستگاه	نام کشور	کد WMO	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (متر)	سال شروع آماربرداری	درصد گمشدگی بارش	درصد گمشدگی دما
مشهد	ایران	۴۰۷۴۵	۵۹/۶۳	۳۶/۲۷	۹۸۰	۱۸۹۳	۹/۱	۱۰/۴
جاسک	ایران	۴۰۸۹۳/۲	۵۷/۵۰	۲۵/۸۰	۴	۱۸۹۳	۱۹/۶	۷/۷
بوشهر	ایران	۴۰۸۵۸	۵۰/۸۰	۲۹/۰۰	۱۴	۱۸۷۸	۱۹/۵	۶/۴
سرخس	ترکمنستان	۳۸۹۷۴	۶۱/۲۲	۳۶/۵۳	۲۷۹	۱۹۰۲	-	-
کوشکا	ترکمنستان	۳۸۹۸۷	۶۲/۳۵	۳۵/۲۸	۵۷	۱۸۹۷	-	-
گودان	ترکمنستان	۳۸۸۸۱	۵۸/۴۰	۳۷/۶۳	۱۴۸۸	۱۸۹۹	-	-
بصره	عراق	۴۰۶۸۹	۴۷/۷۰	۳۰/۴۰	۲	۱۹۲۱	-	-
بحرین	بحرین	۴۱۱۵۰	۵۰/۶۵	۲۶/۲۷	۲	۱۹۰۲	-	-
شارجه	امارات	۴۱۱۹۶	۵۵/۵۰	۲۵/۳۰	۳۴	۱۹۳۳	-	-



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های پاسخو پیشگو: مشهد، جاسک و بوشه (با دایره‌های سیاه) و ایستگاه‌های منتخب به عنوان متغیر مستقل برای ترمیم دمای ماهانه (با دایره‌های قرمز)

(۱) رگرسیون چندگانه خطی را براساس k متغیر پیشگو نشان می‌دهد. β_0 تا β_k پارامترهای الگو هستند که باید با داده‌های در دسترس برآورد شوند. u مولفه خطاست که از توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس ثابت σ^2 پیروی می‌کند. σ^2 نیز باید توسط داده‌ها برآورد شود (رضایی پژند و بزرگ نیا، ۱۳۸۱؛ Ranhao و همکاران، ۲۰۰۸).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + u \quad (1)$$

پذیره‌های پایه: پذیرش الگوی رگرسیونی خطی به دو مرحله تفکیک می‌شود. مرحله اول برآورد پارامترها، آزمون‌های لازم، تحلیل واریانس، ضریب تعیین و غیره است. در رابطه خطی (۱)، β ها ضرایب یا پارامترهای الگو هستند که باید برآورد شوند. برآورد این پارامترها با روش‌هایی چون حداقل مربعات خطا، حداکثر درست‌نمایی و ... انجام می‌شود. روش حداقل مربعات معمول‌تر است. ضرایب الگو باید به گونه‌ای برآورد شوند که مجموع مربعات خطا کمینه شود. پارامتر در الگو وقتی پذیرفته می‌شود که آماره به دست آمده از t جدول بزرگ‌تر یا میزان

احتمال (p -value) به اندازه کافی کوچک باشد.

اگر الگو در مرحله اول رد نشد، باید مرحله دوم را که برقراری پذیره‌های زیر است بررسی کرد. این پذیره‌ها در مورد مولفه تصادفی است. قبول نهایی الگو مشروط به برقراری این فرض‌ها است.

(۱) میانگین خطاها صفر است ($E(Z_i=0)$).

(۲) واریانس خطاها ثابت است ($\text{Var}(Z_i) = \sigma^2$). مقدار آماره کای-دو در آزمون بروس-پاگان^{۱۳} از کای-دو جدول بزرگ‌تر باشد.

(۳) خطاها توزیع نرمال دارند ($Z \sim N(0, \sigma^2)$). آزمون شاپیرو-ویلک و نمودار چندکی این فرض را بررسی می‌کند.

داده‌های گمشده یکی از مشکلات جدی در علوم مختلف به ویژه در آب و هواشناسی است. امروزه روش‌های کارآمدی برای رفع مشکل داده‌های گمشده ارائه شده است که به سازوکار^۹ داده‌های گمشده بستگی دارد. کل داده‌ها (y) را می‌توان به دو قسمت گمشده (y_{mis}) و مشاهده‌ای (y_{obs}) تفکیک کرد. قوانین احتمالی بر y ، y_{mis} و y_{obs} حاکم است.

داده‌های گمشده از لحاظ سازوکار به سه دسته تقسیم می‌شوند:

- ۱- گمشدگی کاملاً تصادفی MCAR^{۱۰} یعنی توزیع داده‌های گمشده نه وابسته به قسمت مشاهده شده باشد و نه وابسته به قسمت گمشده.

- ۲- گمشدگی تصادفی MAR^{۱۱} یعنی توزیع گمشدگی به قسمت مشاهده شده داده‌ها وابسته است.

- ۳- گمشدگی غیرتصادفی MNAR^{۱۲} در صورتی که توزیع گمشدگی به داده گمشده نیز وابسته باشد (Scheffer, ۲۰۰۲).

• رگرسیون

رگرسیون تابعی است که وابستگی یک متغیر (پاسخ) به یک یا چند متغیر (پیشگو) را ارائه می‌دهد. این تابع می‌تواند خطی، غیرخطی، ساده و چندگانه باشد. رگرسیون چندگانه ابزاری سودمند در ترمیم و گسترش داده‌های مفقود است (ارقامی و همکاران، ۱۳۸۰). بررسی باقی‌مانده‌های الگوی رگرسیونی (آسیب‌شناسی)^{۱۳} با اینکه یکی از نقاط قوت رگرسیون است، اما عدم بررسی و تایید آنها نتایج را با چالش مواجه می‌کند. رگرسیون امید ریاضی شرطی Y به شرط متغیرهای X_1 تا X_k مطابق رابطه $Y = E(Y|X_1=x_1, \dots, X_k=x_k)$ است. رابطه

(۴) توزیع خطاها مستقل است. یعنی ناخودهمبسته مرتبه یک باشد $(Cov(Z_i, Z_j) = 0, i \neq j)$. آزمون دوربین-واتسون (D-W) این فرض را بررسی می‌کند. آماره به دست آمده باید در محدوده خاصی قرار بگیرد.

(۵) متغیرهای پیشگو همخطی نداشته باشند (عامل تورم واریانس یا آماره VIF^{15} کمتر از ۱۰ باشد).

(۶) داده پرت از الگوی رگرسیونی تا حد ممکن بررسی و حذف شود. آزمون بون فرنی داده‌های پرت فرین را نشان می‌دهد. بررسی برقراری این فرض‌ها در خصوص باقی‌مانده‌ها با آزمون و روش‌های توصیفی مناسب صورت می‌گیرد. الگو پس از تایید این موارد رد نمی‌شود (قبول است). (رضایی پژند و بزرگ نیا، ۱۳۸۱).

• الگوریتم MICE

به‌منظور مدیریت مشکل افزایش خطای^{۱۶} حاصل از جانهی، رویین (۱۹۸۷) روشی را برای متوسط کردن نتایج در امتداد چندین مجموعه داده جانهی‌شده توسعه داد. الگوریتم چند جانهی MICE 1.0 حالت پیشرفته‌تر EM و MI بوده که در سال ۲۰۰۰ و در Splus نوشته شد. این بسته در سال ۲۰۰۱ به زبان R طراحی شد. سپس نسخه MICE 2.9 در سال ۲۰۱۱ توسط Van Buuren ارائه شد. این بسته نرم‌فزاری از زنجیره مونت کارلو مارکف (MCMC) استفاده می‌کند و نام‌های مختلفی در منابع مختلف دارد. این الگوریتم امروزه در زمینه‌های متنوعی از قبیل اقتصاد، کشاورزی، زیست‌شناسی و نظایر آن به کار می‌رود.

همه‌ی روش‌های جانهی چندگانه از سه گام زیر پیروی می‌کنند:

۱. جانهی: مشابه با جانهی تکی، مقدارهای گم‌شده جانهی می‌شوند. به‌هرحال، مقدارهای جانهی‌شده به‌جای یک بار، m بار از یک توزیع آماری به دست می‌آیند. در پایان این گام، باید m مجموعه داده کامل وجود داشته باشد.

۲. تحلیل: هرکدام از m مجموعه داده تحلیل می‌شود، در پایان این گام بایستی m تحلیل وجود داشته باشد.

۳. تجمیع: m نتیجه با محاسبه میانگین، واریانس و بازه اطمینان متغیر مورد نظر در این گام، در یک نتیجه تلفیق می‌شوند.

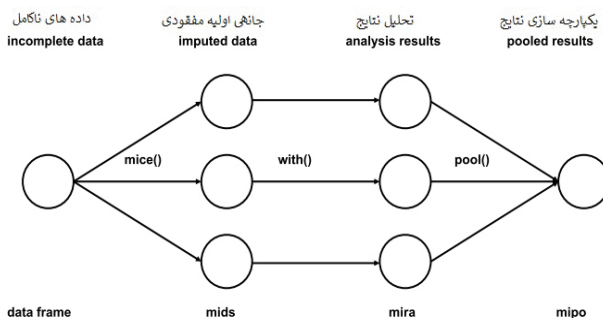
یکی از مزیت‌های جانهی چندگانه به نسبت جانهی تکی و روش‌های ساده این است که جانهی چندگانه انعطاف‌پذیر است و می‌تواند در سناریوهای متفاوتی استفاده شود. جانهی چندگانه می‌تواند در مواردی که داده‌ها به کلی یا به تصادف گم‌شده‌اند یا حتی مواردی که به تصادف گم‌نشده‌اند، استفاده شود. در هر صورت، روش اصلی جانهی چندگانه، جانهی چندگانه بوسیله معادلات زنجیری (MICE) است. نکته مهم لازم به‌ذکر این است که MICE تنها زمانی می‌تواند پیاده‌سازی شود که داده‌های گم‌شده از سازوکاری تصادفی پیروی کند.

غفلت از عدم قطعیت در جانهی، ممکن است منجر به خطا

در نتیجه‌گیری شود. با چند مرتبه جانهی، جانهی چندگانه مطمئناً منجر به کاهش عدم قطعیت و به‌وجودآمدن بازه‌ای از مقدارهایی که مقدار واقعی شامل آن است می‌شوند.

جانهی چندگانه نیز پیاده‌سازی چندان دشواری ندارد. تعداد زیادی از بسته‌های آماری در نرم‌افزارهای آماری وجود دارند که به راحتی امکان اجرای جانهی چندگانه را ممکن می‌کند. برای مثال بسته MICE به کاربران امکان جانهی به‌روش MICE را در نرم‌افزار R می‌دهد.

بسته نرم‌افزاری MICE 2.9 از نسخه‌های قبلی کامل‌تر است. توابع جدید، تولید خودکار ماتریس پیشگو و موارد دیگر افزوده شده است. سه تابع مهم در این بسته عبارتند از `mice()` برای جانهی داده‌های چند سطحی، `with()` برای ورود الگو و تحلیل داده‌های کلی در داده‌های جانهی شده، `pool()` برای ترکیب سطوح مختلف و ایجاد برترین سری پیشگو. این سه مرحله اصلی با عنوان جاگذاری چندگانه (جانهی اولیه مفقودی)، تجزیه و تحلیل نتایج و یکپارچه‌سازی در شکل (۲) آمده است.



شکل ۲- گام‌های اصلی اجرای الگوریتم MICE

سمت چپ شکل (۲) نشان می‌دهد که تجزیه و تحلیل با مجموعه داده‌های ناقص/ناکامل مشاهده شده Y_{obs} آغاز می‌شود. به طور کل، مسئله این است که ما نمی‌توانیم پارامتر تابع چگالی داده‌ها را از Y_{obs} بدون فرضیه‌های غیرواقعی درباره داده‌های غیرمشاهده‌ای تخمین بزنیم. جانهی چندگانه یک چارچوب کلی است که چندین نسخه منتخب داده را با جایگزین کردن مقادیر گم‌شده با مقادیر داده‌های احتمالی انجام می‌دهد. این مقادیر احتمالی از توزیع خاص اختصاص یافته برای هر درایه گم‌شده استخراج می‌شوند. تعداد مجموعه داده‌های منتسب اولیه با آرگومان m در تابع `mice` وارد می‌شود. این آرگومان به طور پیش‌فرض ۵ است. یعنی ۵ مجموعه داده $Y_1, Y_2, \dots, Y_5$ که برای داده‌های موجود یکسان و برای داده‌های جانهی شده متفاوت است. هر مدل جانهی سه شرط را باید داشته باشد: ۱- قانون‌مندی فرآیندی که داده گم‌شده را خلق می‌کند. ۲- حفظ وابستگی (ارتباط) بین داده‌ها. ۳- حفظ عدم قطعیت این روابط (Van Buuren و Groothuis، ۲۰۱۱).

برای این منظور دمای ایستگاه‌های عشق‌آباد، بایرام علی، گودان، سرخس و تجن به عنوان متغیر مستقل در ساخت داده‌های گمشده دمای ماهانه مشهد بررسی شدند. سه عامل فاصله تا ایستگاه مشهد، همبستگی و وجود داده در ماه‌های گمشده در انتخاب این ایستگاه‌ها موثر بودند. دو ایستگاه سرخس و گودان در ترمیم دمای این ایستگاه انتخاب شدند. با توجه به همبستگی بالای دمای ایستگاه‌ها و در نتیجه هم خطی متغیرهای ورودی (همبستگی ایستگاه‌های پیشگو)، الگوهای خطی چند متغیره رد شدند و متغیرهای پیشگو به صورت تبدیل شده (لگاریتمی، توانی و ...) به الگوها وارد می‌شوند. به همین ترتیب برای ساخت داده‌های گمشده در دو ایستگاه بوشهر و جاسک نیز الگوهای مختلف بررسی شد. الگوهای مختلف بررسی و نتایج نهایی الگوهای دمای مشهد، بوشهر و جاسک به ترتیب در روابط با شماره (۲) تا (۴) به عنوان بهترین الگو انتخاب شدند.

متغیرهای دمای ماهانه ایستگاه‌های به کار رفته در این سه الگو به ترتیب با علائم اختصاری T_{Mas} (دمای مشهد)، T_{Ser} (دمای سرخس)، T_{Gud} (دمای گودان)، T_{Bus} (دمای بوشهر)، T_{Bah} (دمای بحرین)، T_{Bas} (دمای بصره)، T_{Jas} (دمای جاسک) و T_{Shar} (دمای شارجه)، تعریف می‌کنیم.

$$T_{Mas} = \beta_0 + \beta_1 T_{Ser} + \beta_3 \log(T_{Gud} + 6) + \varepsilon \quad (2)$$

$$T_{Bus} = \beta_0 + \beta_1 T_{Bah} + \beta_3 (T_{Bas}^{-2}) \quad (3)$$

$$T_{Jas} = \beta_0 + \beta_1 T_{Bah} + \beta_3 \exp(T_{Shar}) \quad (4)$$

نتایج حاصل از برازش الگوهای نهایی دمای سه ایستگاه مورد بررسی، شامل برآورد ضرایب و خطای معیار و آماره t هر ضریب، عامل تورم واریانس (VIF) و برخی آزمون‌های آسیب‌شناسی در جدول (۲) آمده است. ضریب تعیین و آماره F قدرت الگو را نشان می‌دهند.

داده‌های طولانی مدت و کامل متغیر دما یکی از نیازهای مهم در تحلیل‌های قابل اعتماد در اکثر مطالعات آب و هواشناسی و علوم مرتبط است. آمار بیش از ۱۲۰ سال این متغیر برای سه ایستگاه ایران (مشهد، بوشهر و جاسک) اندازه‌گیری و در کتبی به نام World Weather Recrds ثبت شده است. این اطلاعات ماهانه بوده و در بازه‌هایی (متأثر از جنگ‌های جهانی اول و دوم) دارای داده گمشده است. هدف این پژوهش جمع‌آوری و ترمیم این آمار طولانی مدت است. زیرا نتایج تحلیل آمار کوتاه (کمتر از ۱۰۰ سال) یا ناقص از دیدگاه علم آمار اریب است. یعنی صحت نتایج زیر سوال است. این تحقیق در چند مرحله مطابق زیر انجام شده است.

ابتدا الگوهای چندگانه رگرسیونی به داده‌ها برازش داده شد. این کار مستلزم داشتن ایستگاه‌هایی با اطلاعات کامل به عنوان متغیر مستقل (توضیحی، پیشگو یا مبنا) در الگو است. با توجه به اینکه چنین ایستگاه‌هایی در ایران موجود نیست، لذا کلیه ایستگاه‌های کشورهای همسایه که دارای داده‌های قدیمی و همزمان با ایستگاه‌های پاسخ (وابسته) هستند انتخاب و بررسی شدند. ایستگاه‌ها بر اساس سه معیار انتخاب شدند. ۱- همبستگی بالا ۲- فاصله کم ۳- داشتن اطلاعات در خلأهای ایستگاه پاسخ. مشخصات ایستگاه‌های پاسخ و پیشگو و درصد مفقودی‌های سه ایستگاه ایران در جدول (۱) آمده است.

- الگوهای رگرسیونی

الگوهای رگرسیونی مختلف به بارش سه ایستگاه مشهد، جاسک

جدول ۲- نتایج حاصل از برازش الگوهای نهایی دمای سه ایستگاه ایران شامل برآورد ضرایب و عامل تورم واریانس و آسیب‌شناسی

ایستگاه	ضرایب	متغیر پیشگو	برآورد ضریب	آماره t	همخطی (VIF)	ضریب تعیین (R^2_{adj})	پایایی واریانس	جذر مربع خطا (RMSE)	آماره F	دوربین-واتسون (D-W)	آزمون Shapiro	آماره کوک
مشهد	β_0	ثابت	-۴/۸۷	-۱۵/۶۲	-	۰/۹۹	۱/۸۲	۰/۷۱	۳۷۰۰۰	۱/۶۶	۰/۹۹۷	۰/۰۰۱۶
	β_1	سرخس	۰/۶۹	۷۰/۵۰	۷/۵							
	β_2	گودان	۲/۷۴	۱۶/۱۵	۷/۵							
بوشهر	β_0	ثابت	-۱/۸۲	-۴/۵۹	-	۰/۹۵۱	۰/۰۴۸	۰/۸۱	۵۱۵۰	۰/۷۷	۰/۹۹	۰/۰۵۴
	β_1	بحرین	۱/۰۱	۸۴/۵۴	۴/۵							
	β_2	بصره	-۱۸۳/۴۵	-۵/۳۵	۴/۵							
جاسک	β_0	ثابت	۹/۴۱	۱/۲۵	-	۰/۹۸۵	۷/۶۳	۰/۹۴	۱۸۲۱۰	۰/۹۷	۰/۹۹۷	۰/۰۳۹
	β_1	بحرین	۰/۶۸	۷/۷۱	۱/۸							
	β_2	شارجه	۷/۶×۱۶-۱۰	۴۲/۹۸	۱/۸							

آزمون‌های مناسب آسیب‌شناسی الگوها برای بررسی فرض‌های زیربنایی رگرسیون الگوهای دما انجام شد.

پایایی واریانس: مقدار آماره کای-دو در آزمون بروش-پاگن (دستور NCV^{18} test از بسته نرم‌افزاری car در نرم‌افزار R) نشان می‌دهد که واریانس باقیمانده‌ها در الگوی ایستگاه مشهد پایا هستند (ستون هشتم جدول ۲). (مقدار آماره به دست آمده بیش از کای ۲ جدول و مقدار احتمال نزدیک به صفر است). نمودارها نیز تثبیت واریانس را به تقریب تأیید کرد (مقادیر پیش‌بینی شده در برابر باقیمانده‌های استاندارد شده به صورت تقریباً مستطیلی توزیع شده‌اند). در مورد الگوهای بوشهر و جاسک پایایی واریانس رد می‌شود.

استقلال باقیمانده‌ها: آماره آزمون دورین واتسون باید در محدوده ناهمبسته بودن مقادیر جدول دورین واتسون (۲۶/۲-۱/۷۴) باشد. بنابراین استقلال باقیمانده‌ها در مشهد مورد تأیید است و در بوشهر و جاسک استقلال باقیمانده‌ها رد می‌شود.

داده پرت: مقدار کم آماره میانگین فاصله کوک عدم وجود داده پرت را نشان می‌دهد. این آماره کمتر از ۱ باشد مورد تأیید است. **نرمال بودن باقیمانده‌ها:** بررسی نرمال بودن باقیمانده‌ها با آزمون شاپیرو و نمودار چندکی انجام می‌شود. نتایج نشان‌دهنده نرمال بودن تقریبی باقیمانده‌هاست. به دلیل حجم بالا از آوردن نمودارها صرف نظر و فقط به نتایج حاصل اکتفا شد.

هر کدام از فرض‌های زیربنایی فوق که رد شود نتایج الگوهای رگرسیونی را با تردید مواجه خواهد کرد و نمی‌توان به نتایج حاصل از روش کلاسیک رگرسیون اعتماد نمود.

- برازش الگوریتم MICE برای ترمیم دمای ماهانه سه ایستگاه
الگوریتم MICE به عنوان الگوریتم برگزیده از خانواده MI و EM در برآورد داده گمشده ماهانه دمای سه ایستگاه ایران استفاده شد. این الگوریتم به عنوان یک روش چند جاگذاری برای حل مشکل داده‌های گمشده طراحی شده است. ابتدا پنج ورودی (به عنوان پیش فرض) از داده‌های کامل به الگوریتم وارد شده و سپس این پنج ورودی تا همگرایی و رسیدن به نتیجه مطلوب (بیشترین شباهت به قانون احتمالی داده‌ها) تکرار می‌شود. معدل برآوردهای این پنج روش به عنوان خروجی ارائه می‌شود. دوباره این کار تکرار شده تا کمترین خطا در برآورد به دست آید که همان نتیجه نهایی برآورد داده‌های گمشده است (Van Buuren, ۲۰۱۸). یکی از دلایل انتخاب این الگوریتم استفاده از روش‌های مختلف برای ورودی‌های اولیه است. این تحقیق ورودی‌های مختلفی را به نرم‌افزار اعمال و بهترین را انتخاب کرده است. یکی از فرضیات در این پژوهش اینست که آیا ورود اطلاعات اولیه دقیق توسط کاربر منجر به نتایج بهتر می‌شود؟ معیار خطای RMSE به منظور مقایسه روش‌های مختلف به کار رفت. بسته MICE 2.9 در نرم‌افزار R جاگذاری‌های چندگانه داده‌های گمشده را تحلیل و ارائه می‌کند (Van Buuren و

Groothuis, ۲۰۱۱). ایستگاه‌های مجاور در این روش نیز می‌توانند به عنوان متغیرهای مستقل به پیش‌بینی دقیق‌تر کمک کنند. این الگوریتم شامل سه مرحله اصلی جاگذاری چندگانه، تجزیه و تحلیل نتایج و یکپارچه‌سازی است (شکل ۲). این الگوریتم نسبت به ورودی‌های اولیه (جاگذاری داده‌های کامل اولیه) حساس است، بنابراین این نتایج نیز مقایسه و بهترین پیش‌بینی در این مرحله ارائه می‌شود. مزیت دیگر این روش اینست که علاوه بر کامل کردن متغیر پاسخ، داده‌های گمشده متغیرهای کمکی (مستقل) را ترمیم و ارائه می‌کند.

برازش الگوریتم MICE نیازمند ورود پیش‌فرض‌هایی است. تعداد سری‌های کامل اولیه معمولاً ۵ (مقدار آرگومان m) انتخاب می‌شوند. البته تعداد بیشتر نیز (۱۰ و ۲۰) آزمون شد که در بیشتر موارد نتایج بهتر نبود. تعداد بیشترین تکرار در الگوریتم که در تابع با آرگومان "maxit" مشخص می‌شود را به روش سعی و خطا ۵۰ انتخاب می‌کنیم. پیش فرض این آرگومان ۵ است. داده‌های کامل اولیه باید با یک روش ورودی ساخته شود. این روش در آرگومان "meth" مشخص می‌شود. پیش‌فرض روش "pmm" یا میانگین‌گیری تطبیق شده است. روش‌های مختلفی وجود دارد که همه آزمون و بهترین روش ساخت اولیه داده‌ها روش "norm.predict" یعنی رگرسیون خطی انتخاب می‌شود. همچنین می‌توانیم داده‌های اولیه را خودمان با استفاده از آرگومان "data.init" وارد کنیم. بقیه موارد مطابق پیش‌فرض انتخاب می‌شود. این روش شبیه رگرسیون از متغیرهای پیشگو استفاده می‌کند.

نتایج برازش این الگوریتم برای دمای ماهانه مشهد به تفصیل بیان می‌شود. پس از آزمون و خطا دمای ماهانه عشق‌آباد، بایرامعلی و گودان به عنوان متغیرهای کمکی در برازش الگوریتم MICE به منظور ترمیم دمای ماهانه مشهد به کار گرفته شدند. طی انجام آزمون‌های متعدد مشخص شد تعداد ورودی‌ها با $m=5$ و روش تکمیل داده‌های ورودی "norm.predict" بهترین نتیجه را داد. نمودارهای حاشیه‌ای این سه ایستگاه نسبت به مشهد در شکل (۳) آمده است. این نمودار نشان می‌دهد توزیع حاشیه‌ای مقادیر مشاهده‌ای و گمشده شباهت زیادی دارد؛ بنابراین گمشدگی‌ها را می‌توان کاملاً تصادفی (MCAR) فرض کرد. نمودار پراکنش همچنین نشان‌دهنده همبستگی قوی متغیر وابسته با متغیرهای پیشگو است. نتیجه نهایی برازش الگو در جدول (۲) آمده است. این روش یک بازه‌ای (با اطمینان ۹۵٪) برای ضریب تعیین و جذر میانگین خطا در نظر می‌گیرد. که در قسمت پایین جدول آمده است.

شکل (۳) نمودار حاشیه‌ای دمای ماهانه مشهد در مقابل متغیرهای پیشگو (دمای عشق‌آباد، بایرامعلی و گودان) است. موقعیت داده‌های مشاهده شده با رنگ آبی و گمشده‌ها با قرمز نشان داده شده است.

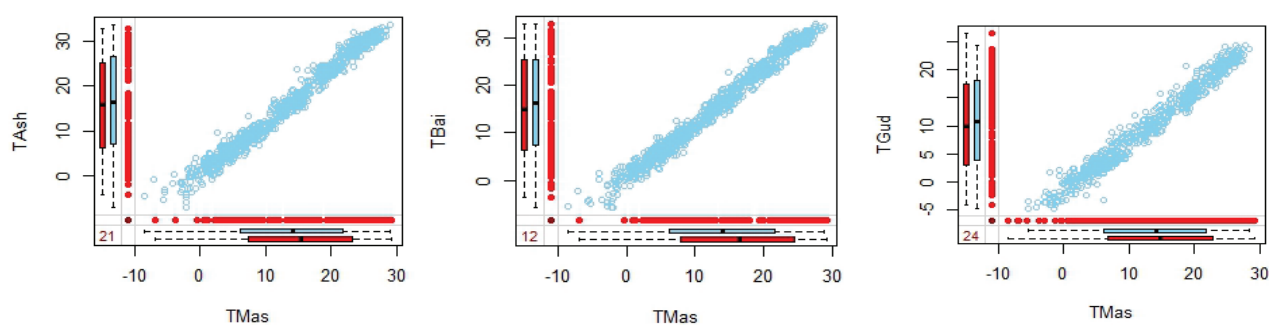
نمودار آسیب‌شناسی (شکل ۴)، توزیع باقیمانده‌های مقادیر

لذا نشان از مناسب بودن مدل است. تطابق در بقیه ایستگاه‌ها کمتر است مخصوصاً ایستگاه بایرامعلی که البته خروجی آنها مدنظر نیست و خللی به نتایج وارد نمی‌کند.

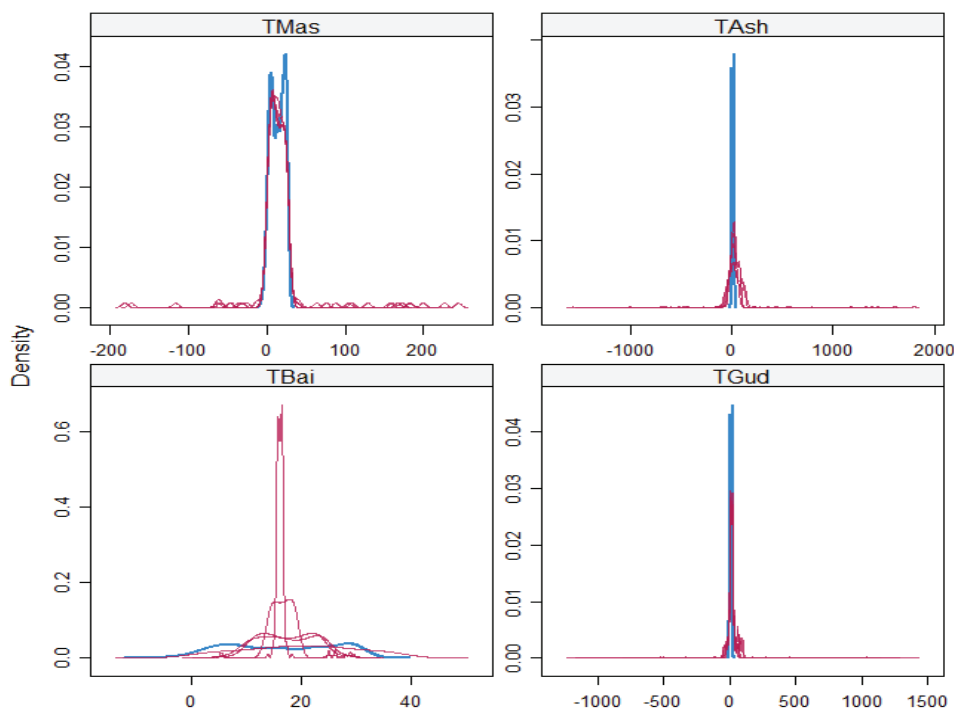
مشاهده‌ای (منحنی آبی) و پنج سری تولید شده توسط مدل با مقادیر جانهای شده (منحنی قرمز) را نشان می‌دهد. اولین نمودار (بالا چپ) مربوط به ایستگاه مشهد است که تطابق خوبی دارد؛

جدول ۲- نتایج اجرای تابع mice برای ترمیم دمای ماهانه مشهد

متغیر	برآورد	خطای استاندارد	آماره	درجه آزادی	p-مقدار
ضریب ثابت	۰/۴۲	۰/۰۵	۷/۸۰	۱۱۱۴/۸۵	۰/۰
TAsh	-۰/۱۶	۰/۰۶	-۲/۶۴	۴/۱۶	۰/۰۱
TBai	۰/۷۰	۰/۰۶	۱۱/۳۵	۱/۷۶	۰/۰
TGud	۰/۴۳	۰/۰۲	۲۲/۸۹	۱۰۴/۶۴	۰/۰
	کران پایین	مقدار متوسط	کران بالا		
R ^۲	۰/۹۸۸	۰/۹۹۱	۰/۹۹۴		
RMSE	۰/۳۹۱	۰/۵۱۵	۰/۶۸۰		



شکل ۳- نمودار حاشیه‌ای دمای ماهانه مشهد در مقابل متغیرهای پیشگو (دمای عشق آباد، بایرامعلی و گودان)



شکل ۴- توزیع باقیمانده‌های مدل MICE برای دمای ماهانه مشهد (بالا-چپ) و ایستگاه‌های پیشگو مقادیر مشاهده‌ای (منحنی آبی) و پنج سری تولید شده توسط مدل یا مقادیر جانهای شده (منحنی قرمز)

گمشده‌های ایستگاه جاسک بعد از ۱۹۵۰ است. بنابراین ایستگاه‌های داخلی از قبیل بندرعباس، زاهدان و کرمان نیز در ساخت الگوها بررسی شد. ترمیم دمای ایستگاه جاسک با دمای دو ایستگاه بحرین و شارجه با روش ورودی "norm.predict" با تعداد ورودی‌های اولیه ($m=5$) به منظور الگوسازی با الگوریتم MICE به کار رفت. پیش‌فرض‌های الگوریتم و نتایج ضریب تعیین و خطای RMSE ترمیم سه ایستگاه در جدول (۳) آمده است. نتایج RMSE الگوهای رگرسیونی نیز در ستون آخر جدول آمده است. با توجه به دوره گمشده موجود برای ساخت دمای جاسک در دوره ۱۹۵۷ تا ۱۹۶۷ از الگوی دیگری نیز استفاده شد. الگوی MICE با توجه به نتایج به دست آمده انتخاب شد. بهترین الگو از روی ایستگاه‌های مبنای بحرین،

جیوانی پاکستان، کرمان و زاهدان به دست آمد. خطای RMSE در بهترین حالت ۰/۴۷ سانتیگراد بود که نشان‌دهنده دقت بالای این روش است.

دمای ماهانه بوشهر با دمای دو ایستگاه بحرین و بصره و به کمک الگوریتم MICE ترمیم شد. نتایج نشان داد روش ورودی "norm.predict" به دلیل ایجاد همخطی بالا برای این ایستگاه مناسب نیست. بنابراین روش‌های مختلف بررسی و روش "midastouch" یعنی میانگین وزنی به عنوان بهترین روش ورودی برای ایجاد داده‌های کامل اولیه انتخاب شد. همچنین تعداد جاگذاری‌های متفاوت یعنی آرگومان m به ازای ۵ و ۲۰ بررسی و مشخص شد تعداد $m=20$ خطا را کمی کاهش داده بنابراین بهتر است.

جدول ۳- نتایج حاصل از برازش الگوریتم MICE به دمای ماهانه سه ایستگاه ایران

معیار m	روش ورود اطلاعات	R ²		RMSEmice			RMSEreg متوسط
		کران پایین	متوسط	کران بالا	متوسط	کران بالا	
۵	norm.predict	۰/۹۹۴	۰/۹۹۷	۰/۹۹۸	۰/۳۹۱	۰/۵۱۵	۰/۷۱
۵	norm.predict	۰/۹۵۸	۰/۹۶۲	۰/۹۶۶	۰/۸۲۲	۰/۸۶۴	۰/۹۴
۲۰	midastouch	۰/۹۸۴	۰/۹۸۶	۰/۹۸۸	۰/۷۲۷	۰/۷۸۱	۰/۸۱

نتیجه اینکه روش MICE دقت بالاتری دارد. دلایل دیگری نیز برای برتری و انتخاب روش MICE برای برآورد داده مفقود وجود دارد که در اینجا بیان می‌شود:

۱- روش رگرسیون به‌عنوان یک روش کلاسیک نیازمند بررسی پذیره‌های پایه است. اگر یک یا چند فرض پایه برقرار نباشد رگرسیون از نظر علمی رد می‌شود. همانطور که مشاهده شد برخی از فرض‌ها در اینجا برقرار نبود. در حالیکه روش MICE به این بررسی‌ها نیاز ندارد.

۲- روش MICE توانایی برآورد داده‌های مفقود ایستگاه‌های پیشگو را نیز دارند.

۳- اگر یک یا چند متغیر ورودی فاقد داده باشد در روش رگرسیون قادر به برآورد داده‌ها با یک الگو نخواهیم بود؛ اما در روش MICE از روابط درون داده‌ها استفاده کرده و همه مفقودی‌ها را برآورد می‌کند.

۴- بسته نرم‌افزاری MICE سری تکمیل شده متغیرهای پاسخ و پیشگو را تولید و فقط برآورد داده‌های مفقود را جاگذاری می‌کند. در حالیکه در روش رگرسیون کل داده‌ها با الگو تولید و سپس باید داده‌های برآوردی را در سری داده‌های موجود

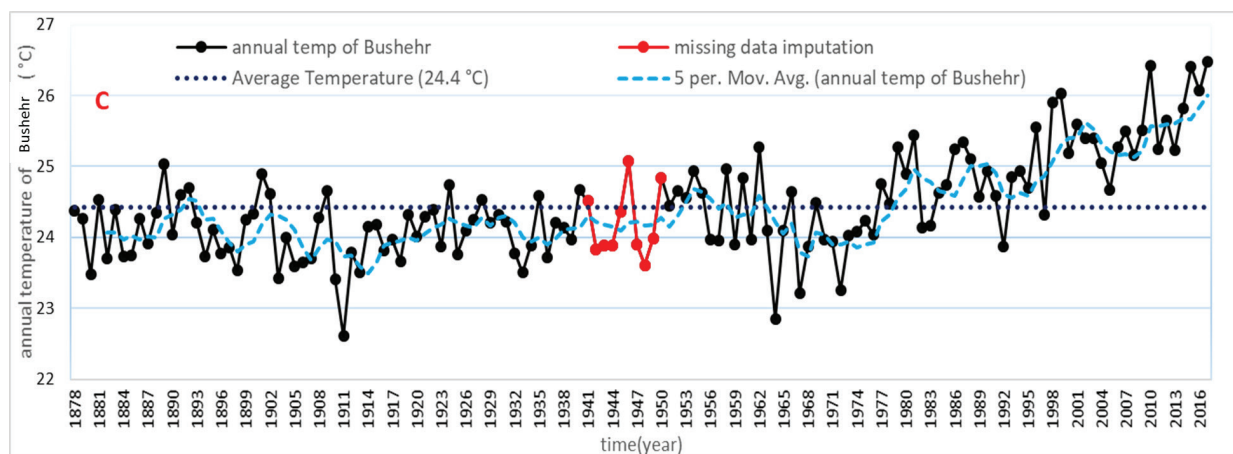
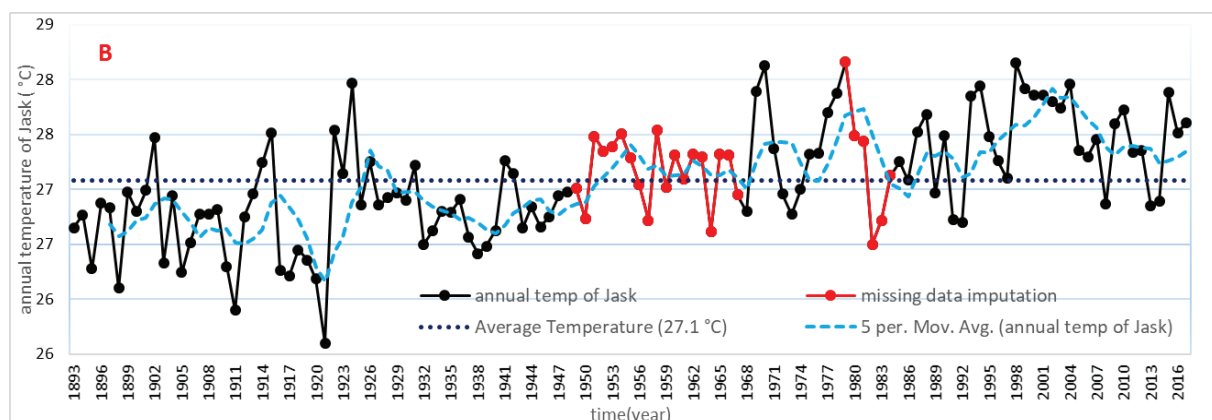
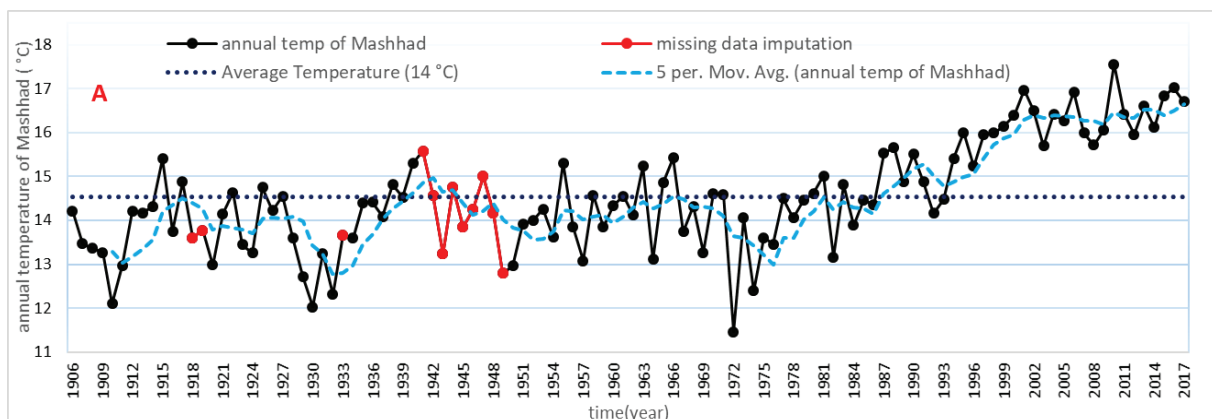
جاگذاری نمود.

۵- روش MICE بسیار سریع اجرا می‌شود. همچنین بندهای فوق خصوصاً ۳ و ۴ باعث صرفه‌جویی در زمان و هزینه می‌شود.

۶- روش MICE سازوکار داده‌های گمشده را در نظر می‌گیرد. این روش برای داده مفقود طراحی شده است و توزیع داده‌های موجود و مفقود را ارائه می‌دهد. منابع مختلف این روش را برای جاگذاری داده مفقود پیشنهاد داده‌اند. Deng و همکاران (۲۰۱۶) برتری روش MICE بر رگرسیون را با چند مثال تأیید کردند.

MICE یک روش اصولی و در عین حال انعطاف‌پذیر برای پرداختن به داده‌های از دست رفته ارائه می‌دهد که برای طیف گسترده‌ای از کاربران قابل دسترسی است (Melissa و همکاران، ۲۰۰۱).

با توجه به عملکرد خوب این روش در افزایش دقت برآورد دمای ماهانه ایستگاه مشهد جاگذاری^{۱۹} مفقودی‌های دما به روش MICE انجام و سری زمانی دراز مدت آن در شکل (۵) آمده است. مفقودی‌های برآورد شده با رنگ قرمز نمایش داده شده است.



شکل ۵- سری‌های زمانی کامل شده دمای سالانه سه ایستگاه ایران.

نقاط سیاه مربوط به بارش سالانه دراز مدت، نقاط قرمز مربوط به جاگذاری داده‌های گمشده با روش MICE، میانگین متحرک ۵ ساله با خط چین آبی و میانگین داده‌ها با خط چین سرمه‌ای نشان داده شده است. به ترتیب از بالا به پایین ایستگاه مشهد (A)، جاسک (B) و بوشهر (C)

- 1-Missing Data
- 2-Expectation-Maximization
- 3-Multiple Imputation
- 4-Multivariate Imputation by Chained Equations
- 5-Normal Ratio
- 6-Artificial Neural Network
- 7-Mont Carlo Markov Chain
- 8-World Weather Records
- 9-Mechanism
- 10-Missing Completely At Random
- 11-Missing At Random
- 12-Missing Not At Random
- 13-Diagnostic
- 14-Breusch-Pagan test
- 15-Variance Inflation factor
- 16-noise
- 17-History data
- 18-imputation

ترمیم و برآورد مفقودی‌های دمای ماهانه طولانی مدت مشهد، جاسک و بوشهر و معرفی یک روش کارآمد برآورد داده مفقود، هدف این مقاله است. انتساب مقادیر مفقود متغیرهای هواشناسی با کمترین خطای ممکن همواره اهمیت بالایی داشته است. ایستگاه‌هایی از کشورهای مجاور به‌عنوان ایستگاه‌های مینا انتخاب شدند. ترمیم داده‌های دما ابتدا با بهترین الگوهای رگرسیونی انجام شد (ریشه میانگین مربعات خطا $0/71$ تا $0/94$). علیرغم استفاده از الگوهای غیرخطی، بررسی فرض‌های زیربنایی رگرسیون نشان از عدم تایید برخی از آنها مانند استقلال باقی‌مانده داشت. برآورد داده‌های مفقود با روش MICE نیز انجام شد (ریشه میانگین مربعات خطا $0/39$ تا $0/82$). نتایج نشان داد به دلیل مزایای زیاد و دقتی که روش MICE دارد، نسبت به رگرسیون بهتر است. شایان ذکر است این روش برای برآورد و جانشینی داده‌های مفقود طراحی شده، مشکلات رگرسیون را نداشته و قابلیت‌های زیادی دارد. لذا روش MICE برای ترمیم داده‌های گمشده آب و هواشناسی توصیه می‌شود. جمع‌آوری و اصلاح این آمار طولانی مدت و ارائه دمای ماهانه کامل آنها برای اولین بار در ایران می‌تواند مبنای ارزشمندی برای تحقیقات آب و هواشناسی باشد.

منابع

- and droughts, Water Resources Publications. Proceedings of the Second International Symposium in Hydrology, 679 pages.
- Ghahraman B. and Ahmadi F. 2007. Application of geo statistics in time series: Mashhad Annual Rainfall. Iran-Watershed Management Science & Engineering, 1(1):7-15.
- Iqbal M., Wen J., Wang Sh., Tian Hu. and Adnan M. 2018. Variations of precipitation characteristics during the period 1960-2014 in the Source Region of the Yellow River, China. Journal of Arid Land, 10(3): 388-401.
- Jacob D., Reed D.W. and Robson A.J. 1999. Choosing a pooling group. Flood Estimation Handbook. Vol. 3. Institute of Hydrology, Wallingford, UK.
- Little R.J.A. and Rubin D.B. 2002. Statistical analysis with missing data. John Wiley & Sons.
- Melissa J. A, Elizabeth A. S., Constantine F., and Philip J. L., 2011, Multiple imputation by chained
- ارقامی، ن.ر.، سنجرى، ن. و بزرگ‌نیا، الف. ۱۳۸۰. مقدمه‌ای بر بررسی‌های نمونه‌ای. چاپ چهارم، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد.
- خلیلی، ع. و بذرافشان، ج. ۱۳۸۷. ارزیابی مخاطره تداوم خشک‌سالی با استفاده از داده‌های بارندگی سالانه قرن گذشته در ایستگاه‌های قدیمی ایران. مجله ژئوفیزیک ایران، ۲(۲): ۱۳-۲۳.
- رضایی پژند، ح. و بزرگ‌نیا، الف. ۱۳۸۱. تحلیل رگرسیون غیرخطی و کاربردهای آن. انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد.
- فرزندی، م.، رضایی پژند، ح. و ثنائی نژاد، ح. ۱۳۹۳. ترمیم و گسترش ۱۲۷ سال دمای ماهانه مشهد. مجله پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۵(۱۷): ۱۱۱-۱۲۳.
- Deng Y, Chang C, Ido MS, Long Q. 2016, Multiple Imputation for General Missing Data Patterns in the Presence of High-dimensional Data. Sci Rep. 6:21689 .
- Edmond F.S., Victor A.K. and Khalid M. 1973. Floods

- 1921-1930, Smithson. Miss C. Collect. pp 639.
- Smithsonian Institution. 1947. World weather records, 1931-1940, Smithson. Miss C. Collect. pp 666
- Smithsonian Institution. 1927. World weather records, 1750-1920, Smithson. Miss C. Collect. pp 1199.
- Van Buuren S. 2018. Flexible Imputation of Missing Data. 2nd. Chapman & Hall/CRC Interdisciplinary Statistics.
- Van Buuren S. and Groothuis-Oudshoorn K. 2011. mice: Multivariate Imputation by Chained Equations in R. Journal of Statistical Software, 45(3): 1-67.
- Yozgatligil C., Aslan S., Iyigun C. and Batmaz I. 2013. Comparison of missing value imputation methods in time series: the case of Turkish meteorological data. Theory Apply Climatology, 112: 143-167.
- equations: what is it and how does it work?, Int J Methods Psychiatr Res. 20(1): 40-49.
- Porto de Carvalho J.R, Boffinho Almeida Montei, J.E., Nakai, A.M., Assad E.D., 2017, Model for Multiple Imputation to Estimate Daily Rainfall Data and Filling of Faults. Revista Brasileira de Meteorologia, 32(4): 575-583.
- Ranhao, S., Baiping, Z., and Jing, T., 2008, A Multivariate Regression Model for Predicting Precipitation in the Daqing Mountains, Mountain Research and Development, 28(3):318-325.
- Scheffer J. 2002. Dealing with missing data. Research Letters in the Information and Mathematical Sciences, 3:153-160.
- Smithsonian Institution. 1934. World weather records,

Analysis of the Effect of Climatic Factors and Drought on Inflow and Outflow from the Khuzestan Plain in the Karun Basin

Z. Saeedifar¹, M. Khosroshahi^{2*}, A. Jalili³, S. Razavizadeh⁴, F. Dargahian⁴, S. Zandifar⁴, S. Lotfinasabasl⁴, A. Gohardust⁵, S. Teimuri⁶, M. Fayaz⁷

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7- PhD in Department of Desert Research, Associate Professor in Department of Desert Research, Professor in Department of Botanical Research, Assistant Professor in Department of Desert Research, Researcher in Department of Desert Research, Assistant Professor in Department of poplar Research and Assistant Professor in Department of Rangeland Research, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.

*(Corresponding Author Email: khosro@rifr.ac.ir)

Received: 23-02-2021 Revised: 10-07-2021

Accepted: 11-07-2021 Available Online: 06-12-2021

تحلیل اثر عوامل اقلیمی و خشکسالی بر روی رواناب ورودی و خروجی به دشت خوزستان در حوضه کارون

زهرا سعیدیفر^۱، محمد خسروشاهی^{۲*}، عادل جلیلی^۳، سمانه رضویزاده^۴، فاطمه درگاهیان^۴، سمیرا زندیفر^۴، سکینه لطفی نصب اصل^۵، آزاده گوهردوست^۵، سارا تیموری^۶، محمد فیاض^۷

۱ تا ۷- به ترتیب دکترای بیابان زدایی بخش تحقیقات بیابان، دانشیار بخش تحقیقات بیابان، استاد بخش تحقیقات گیاهشناسی، استادیار بخش تحقیقات بیابان، محقق بخش تحقیقات بیابان، استادیار بخش تحقیقات صنوبر و استادیار بخش تحقیقات مرتع، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

*(نویسنده مسئول، E-Mail: khosro@rifr.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۰۵ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۴/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۲۰ تاریخ انتشار: ۱۴۰۰/۰۹/۱۵

Abstract

In recent years, the outflows from the Karun Basin, especially in the interior of Khuzestan province, have decreased significantly. This study aimed to investigate the effect of climatic factors and drought on the inflow and outflow of the Karun basin in two parts (basin area inside Khuzestan plain and basin area outside Khuzestan plain). The results indicate the onset of adverse climate change during the last two decades. During this period, especially in the last ten years, the study has witnessed a large decrease in rainfall compared to the previous decade in the Karun Basin. Changes in average, minimum, and maximum temperatures, evaporation and drought have also increased during the last two decades. Also, the results related to the effect of climatic parameters on the output discharge of the Karun basin showed that in Khuzestan province 83% of the output discharge changes were affected by climatic parameters (including rainfall, drought, and maximum temperature, respectively) and outside Khuzestan, 82% of discharge changes are due to climatic parameters (including rainfall, maximum temperature, and drought, respectively). Meanwhile, the surface currents of the basin during the last decade have been more critical than other decades and the output discharge outside Khuzestan (input to the province) has decreased by about 27%, and inside the province and the output of the basin has decreased by 44%, which due to the almost identical effect of climate on both areas, these changes can be attributed to the existence of other factors, including land management and human factors.

Keywords: Discharge, Khuzestan, Temperature, Palmer Drought Index, Basin Output.

چکیده

طی سالهای اخیر جریانات خروجی از حوضه کارون بزرگ بهخصوص در محدوده درون استان خوزستان با افت شدیدی روبهرو شده است. هدف از این مطالعه بررسی اثر عوامل اقلیمی و خشکسالی بر روی رواناب ورودی و خروجی حوضه کارون در دو بخش درون استان خوزستان و محدوده حوضه در خارج استان بود. نتایج نشان دهنده شروع تغییرات نامطلوب عوامل اقلیمی طی دو دهه آخر این مطالعه می باشد بهطوری که طی این دوره بهخصوص ده سال اخیر مطالعه شاهد کاهش زیادی در میزان بارش نسبت به دهه قبل آن در حوضه کارون رخ داده است. تغییرات دماهای میانگین، حداقل و حداکثر، تبخیر و خشکسالی نیز طی دو دهه اخیر افزایشی بوده است. همچنین نتایج مربوط به میزان اثر پارامترهای اقلیمی بر دبی حوضه کارون بزرگ نشان داد در محدوده داخل استان خوزستان ۸۳ درصد تغییرات دبی خروجی توسط پارامترهای اقلیمی (بهترتیب شامل بارش، خشکسالی و دمای حداکثر) تحت تأثیر قرار گرفته است و در محدوده حوضه در خارج استان خوزستان ۸۲ درصد تغییرات دبی ناشی از پارامترهای اقلیمی (بهترتیب شامل بارش، دمای حداکثر و خشکسالی) می باشد. این درحالی است که جریانات سطحی حوضه طی دهه اخیر نسبت به سایر دههها شرایط بحرانی تر داشته است و در خارج استان خوزستان (ورودی به استان) کاهش حدود ۲۷ درصدی و در داخل استان و خروجی حوضه کاهش ۴۴ درصدی داشته است. باتوجه به اثر کم و بیش یکسان اقلیم بر هر دو محدوده می توان این تغییرات و کاهش شدید را به وجود عامل دیگری از جمله مدیریت سرزمین و عوامل انسانی نسبت داد. **واژه های کلیدی:** دبی، خوزستان، دما، شاخص خشکسالی پالم، خروجی حوضه.

یکی از مهمترین عوامل مؤثر بر حیات یک منطقه، نوع اقلیم آن است (خسروی و همکاران، ۱۳۹۳). اقلیم، وضعیتی کلی از شرایط هوای غالب یک مکان مشخص براساس آمار بلندمدت است. (منتظری و بای، ۱۳۹۱). از آنجایی که دما و بارش از عناصر اساسی شکل‌گیری اقلیم می‌باشند، تغییرات آن‌ها می‌تواند ساختار آب‌وهوایی هر محل را دگرگون سازد. این امر سبب شده است بخش گسترده‌ای از پژوهش‌های اقلیم‌شناسی به مطالعات تغییرات زمانی این پارامترها در مقیاس‌های متفاوت زمانی و مکانی بپردازد. این تغییرات هم در بعد مکان و هم در بعد زمان در قالب اقلیم منطقه رخ می‌دهد (عساکره و دوستکامیان، ۱۳۹۶). این عناصر از مهمترین داده‌های ورودی به سیستم‌های هیدرولوژیکی به لحاظ ایجاد جریان‌ات سطحی، تأثیر بر سفره‌های آب زیرزمینی و به‌عنوان منبع مهم در تغذیه رودها و چشمه‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد (خورشید دوست و شیرزاد، ۱۳۹۳). همچنین این پارامترها از مهمترین عناصر اقلیمی می‌باشند که در تعیین نقش و پراکندگی دیگر عناصر اقلیمی می‌توانند مؤثر باشند. بنابراین بررسی و تحلیل اثرات تغییر اقلیم بر فرایندهای هیدرولوژیک از جمله تغییرات رواناب سطحی و ورودی و خروجی به محدوده‌های مطالعاتی متأثر از اقلیم‌های مختلف به‌منظور شناسایی تغییرات پتانسیل منابع آبی در آینده و ارائه راهکارهای مناسب برای مدیریت منابع آب اهمیت ویژه‌ای دارد. اثرات مستقیم تغییر اقلیم بر رواناب با استفاده از سری‌های زمانی اقلیم و رواناب برآورد می‌شود (Sankarasubramanian و همکاران، ۲۰۰۱).

خلیلی و همکاران (۱۳۹۱) ارتباط میان روند تغییرات داده‌های ماهانه اقلیمی و جریان رودخانه شهرچای در غرب دریاچه ارومیه را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد روند نزولی جریان در این رودخانه تحت تأثیر افزایش متغیر دما و وابستگی رژیم این رودخانه به ذوب برف می‌باشد.

انصاری و همکاران (۱۳۹۵) روند تغییرات پارامترهای اقلیمی دما و بارش و همچنین پارامتر هیدرولوژیکی دبی را با استفاده از آزمون من - کندال در حوضه آبخیز رودخانه کاجو در استان سیستان و بلوچستان بررسی کردند. نتایج حاصل نشان دهنده روند نزولی بارش، روند صعودی دما و در نتیجه روند کاهش دبی در حوضه این رودخانه بود.

عزتی و همکاران (۱۳۹۷) اثر تغییرات حرارت و بارش بر دبی سالانه و ماهانه حوضه آبخیز طالقان در محل ورود به سد مخزنی طالقان را بررسی کردند. در این تحقیق اثر تغییرات اقلیمی بر منابع آب حوضه طالقان، با در نظر گرفتن همه عوامل مانند وجود روند مثبت معنی‌دار در درجه حرارت، کاهش سطح پوشش برف، کاهش جریان‌های بهاری و افزایش جریان زمستانه ورودی به سد، باوجود ثابت ماندن حجم بارش و عمق رواناب سالانه مورد تأیید قرار

گرفت. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد تغییرات اقلیمی در این حوضه به‌صورت تغییر الگوی بارش یعنی تغییر نوع بارش از برف به باران و همچنین جابجایی فصلی می‌باشد.

Dibik and Coulibaly (۲۰۰۵) تأثیر تغییرات آب و هوایی در رودخانه سگینای در کانادای شمالی را بررسی کردند و نشان دادند میانگین سالانه جریان رودخانه افزایش یافته است.

Fowler و همکاران (۲۰۰۷) اثرات تغییر اقلیم بر روی منابع آب در شمال غرب انگلستان را بررسی کردند. نتایج نشان داد ۱۸ درصد از حجم منابع آب در منطقه کاهش یافته است.

Sellinger و همکاران (۲۰۰۸) افت سطح آب دریاچه میشیگان و هیورون را بررسی کردند. آنان بیان کردند کاهش ناگهانی آب این دریاچه‌ها با بعضی از عناصر اقلیمی مرتبط است.

Chen و همکاران (۲۰۰۹) و Ling و همکاران (۲۰۱۳) روند تغییرات رواناب چندین انشعاب رودخانه Tarim را مورد مطالعه قرار دادند و ارتباط بین آن‌ها و تغییرات دما و بارش را بررسی کردند. نتایج آن‌ها هیچ تأثیری از نوسانات جنوبی ال-نینو (ENSO) بر دما، بارش و رواناب در حوضه رودخانه Tarim نشان نداد (Chen و همکاران ۲۰۰۹).

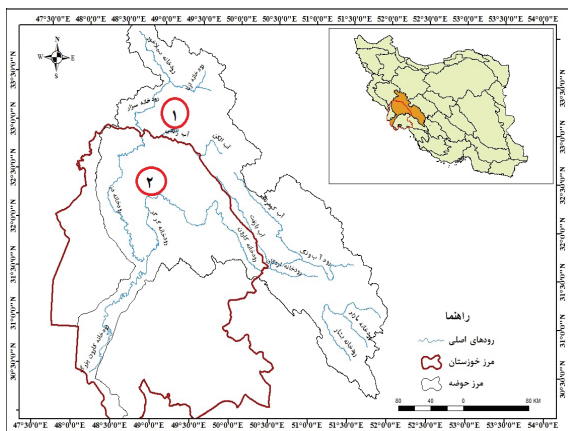
Kundzewicz و همکاران (۲۰۱۴) تغییرات در پارامترهای اقلیمی بارش و دما و دبی رودخانه در حوضه رودخانه آکسو را تجزیه و تحلیل کردند. نتایج آن‌ها نشان داد برخی زیر حوضه‌ها به شدت متأثر از تغییرات دما و برخی دیگر متأثر از بارش بوده‌اند؛ و به طور کلی دما رابطه معنی‌داری با تغییرات دبی در زیر حوضه‌های مورد بررسی داشت.

بر اساس نتایج حاصل از سایر مطالعات، تغییر اقلیم با تأثیر بر فرایندهای هیدرولوژیک حوضه از جمله رواناب سایر عوامل حیاتی در حوضه از جمله میزان تولید محصولات، کیفیت آب و دسترسی به آب سالم را تحت تأثیر قرار می‌دهد (صمدی و مساح بوانی، ۱۳۸۷)، لذا تجزیه و تحلیل اثرات تغییر اقلیم بر رواناب گامی حیاتی در جهت بهبود مدیریت منابع آب و ارائه راهکارهای مدیریتی مناسب می‌باشد. حوضه آبخیز کارون بزرگ در ۶ استان کشور واقع شده است و به دلیل وضعیت خاص توپوگرافیکی و موقعیت جغرافیایی این حوضه و قرارگیری خروجی آن در استان خوزستان، در این مطالعه آب ورودی و خروجی از این حوضه به دشت خوزستان بررسی شد و اثر عوامل اقلیمی بر تغییرات نسبت بین رواناب ورودی و خروجی به این حوضه تعیین شد.

مواد و روش

• منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز کارون بزرگ وسعتی بالغ بر ۶۶۶۶۱ کیلومتر مربع دارد که حدود ۷۵ درصد آن را نواحی کوهستانی و ارتفاعات و ۲۵ درصد آن



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

• داده‌های هیدرواقليمی

به‌منظور بررسی وضعیت هیدرولوژیکی حوضه کارون پس از شناسایی و تعیین ایستگاه‌های هیدرومتری موجود در خروجی محدوده مطالعاتی بیرون استان خوزستان که به‌عنوان ورودی به استان در نظر گرفته می‌شود (محدوده شماره ۱ در شکل ۱) و خروجی حوضه در محدوده استان خوزستان (محدوده شماره ۲ در شکل ۱)، آمار منتشره ایستگاه‌ها تا زمان حاضر (سال آبی ۹۵-۱۳۹۴) جمع‌آوری شد. ایستگاه‌های منتخب شامل آمار مناسب ۵۰ ساله و دوره پایه از سال‌های ۱۳۴۵ تا ۱۳۹۴-۹۵ می‌باشد. در مطالعه حاضر، برای بررسی داده‌های سالانه دبی علاوه بر کنترل بصری داده‌ها، از آزمون داده‌های پرت^۱ نیز استفاده شد. همچنین برای بررسی یکنواختی و همگنی آمار سالانه دبی، آزمون‌های جرم مضاعف^۲ و تست ران^۳ به‌کار گرفته شده است. با در نظر گرفتن طول دوره مجاز تطویل آمار با استفاده از روش رگرسیون نسبت به تکمیل و بازسازی آمار ایستگاه ناقص اقدام شد. با کامل شدن آمار برای هر يك از ایستگاه‌ها در دوره مشترک، دبی متوسط سالانه و ماهانه و پارامترهای آماری شامل میانگین، ماکزیمم، انحراف از معیار و ضریب تغییرات برای کلیه ماه‌های سال در دوره ۱۳۴۵ تا ۱۳۹۴ محاسبه شد.

در این مطالعه به‌منظور پوشش کامل داده حوضه آبخیز از داده‌های بارش شبکه‌ای با قدرت تفکیک مکانی ۴۴ در ۴۴ کیلومتر استفاده شده است. این داده‌ها براساس میانبایی داده‌های بارش روزانه ایستگاه‌های سنجش بارش هواشناسی دفتر مطالعات پایه آب ایران استخراج شدند. به دلیل اینکه این عناصر مهم‌ترین عناصر اقلیمی به‌حساب می‌آیند و تغییرات سایر عناصر در این سه عنصر بیشتر نمایان می‌شود، برای بررسی تغییرات نواحی اقلیمی حوزه آبخیز کارون از این عناصر استفاده شده است. پس از پهنه‌بندی پارامترهای اقلیمی بارش، دما و تبخیر در حوضه، میانگین وزنی این پارامترها به‌صورت سالانه، به تفکیک در دو بخش داخل و خارج استان محاسبه شد.

را دشت‌ها و مناطق پست و کم ارتفاع تشکیل می‌دهد. مرتفع‌ترین نقطه حوضه، قله دنا واقع در شمال شرقی حوضه با ارتفاع ۴۴۰۹ متر از سطح دریا و کمترین ارتفاع حوضه کمتر از ۲ متر از سطح دریا مربوط به نقطه خروجی حوضه در انتهای بهمنشیر (محل اتصال به خلیج فارس) است.

این حوضه در استان‌های خوزستان، چهارمحال بختیاری، اصفهان، لرستان، کهگیلویه و بویراحمد، مرکزی، همدان و فارس واقع شده است. در این حوضه سه مرکز استان شامل اهواز، یاسوج و شهرکرد قرار گرفته است. این حوضه از غرب با حوضه کرخه، از شمال و شرق با حوضه‌های دریاچه مک، گاوخونی و بختگان-مه‌ارلو و در جنوب و شرق با حوضه زهره-جراحی مرز مشترک دارد و در قسمت خروجی به رودخانه اروند و سپس به خلیج فارس می‌پیوندد.

قسمت اعظم این حوضه از لحاظ تقسیم بندی سیاسی در استان خوزستان (شکل ۱) و براساس تقسیم‌بندی مناطق اکولوژیک در محدوده منطقه اکولوژیک استپ‌های جنگلی زاگرس قرار گرفته است و مناطق اکولوژیک بیابان‌ها و نیمه‌بیابان‌های نوبو-سندی جنوب تیران، باتلاق‌های آب‌رقتی و شور دجله و فرات و بوته‌زارهای خشک شرقی صحارا-عربی و بیابانی عربی سایر بخش‌های این حوضه را دربرگرفته است. بخش‌های کوچکی در شمال و شرق حوضه در محدوده اکوسیستم بیابان‌های مرکزی ایران قرار گرفته است. اغلب پوشش گیاهی این منطقه را پوشش ویژه زاگرس تشکیل می‌دهند. در حوضه کارون سه عامل عرض جغرافیایی، موقعیت خلیج فارس و ارتفاع، مهم‌ترین عوامل سازنده اقلیم منطقه می‌باشند. قرار گرفتن این حوضه در مسیر جریان‌های باران‌زای مدیترانه‌ای، مجاورت با خلیج فارس، قرارگیری بخش‌های جنوبی منطقه در حوضه عمل‌پرفشار حرارتی جنب حاره و همچنین مجاورت منطقه با چین‌خوردگی‌های عظیم زاگرس همگی موجب گشته است، مکانیزم‌های عمل‌کننده در این بخش از ایران حاکم بر سرنوشت اقلیمی محل باشد.

باتوجه به گستره وسیع این حوضه آبریز، بیشترین تنوع اقلیمی در این حوضه آبریز وجود دارد. به‌طوری‌که از ۳۲ اقلیم موجود در روش طبقه‌بندی دومارتن اصلاح شده، ۲۵ پهنه اقلیمی آن در این حوضه موجود می‌باشد. به‌طورکلی در این حوضه آبریز اقلیم‌های خشک ضعیف تا نیمه‌خشک فرا سرد تا گرم مجموع ۳۴ درصد مساحت این حوضه را پوشش می‌دهند که بیشتر شامل دشت‌های جنوبی و غربی منطقه و همچنین منطقه بادپناهی شهرکرد و بروجرد می‌شوند. کمتر از ۵۰ درصد این حوضه مربوط به اقلیم‌های نیمه‌مربوط تا بسیار مرطوب بوده که بخش اعظم ارتفاعات و کوهستان‌های منطقه را شامل می‌شوند. نزدیک به ۲۳ درصد باقیمانده مساحت این حوضه آبریز از وضعیت اقلیمی مدیترانه‌ای برخوردار است. در این مطالعه این حوضه به دو محدوده مطالعاتی خارج استان خوزستان (شماره ۱) و درون خوزستان (شماره ۲) تقسیم شد؛ و تغییرات رواناب خروجی در این دو بخش مقایسه شد.

پس از بررسی کلیه داده‌های هیدرواقليمی ذکر شده، به منظور بررسی تغییرات دهه‌ای و سالانه این پارامترها طی پنج دوره (۱۳۴۶-۱۳۵۵، ۱۳۵۶-۱۳۶۵، ۱۳۶۶-۱۳۷۵، ۱۳۷۶-۱۳۸۵، ۱۳۸۶-۱۳۹۵) بررسی، تجزیه و تحلیل شد.

• شاخص خشکسالی پالم (PDSI)

خشکسالی به عنوان یک پدیده فیزیکی، تابع قوانین عمومی تکامل سامانه‌های جوی و هیدرولوژیکی می‌باشد، اما به دلیل پیچیدگی زیاد فرآیندهای موثر در آن، هنوز یک رهیافت دقیق فیزیکی برای آن ارائه نشده است. از پیشگامان مطالعه پدیده خشکسالی Palmer (۱۹۶۵) می‌باشد. پالم با استفاده از متغیرهای بارش، دما و رطوبت قابل دسترس خاک و براساس یک مدل ترازمندی آب ساده، برای برآورد عرضه و تقاضای رطوبت یک مدل خاک دو لایه، یک شاخص فیزیکی-آماري به نام شاخص شدت خشکسالی پالم (PDSI) را فرمول‌بندی کرد. به منظور محاسبه این شاخص از پایگاه TerraClimate دانشگاه Idaho که مجموعه‌ای از بیلان اقلیم و آب برای سطوح زمینی جهانی است تحت سامانه earthengine.google.com استفاده شد. داده‌های حاصل از این پایگاه (<https://code.earthengine.google.com>) و وضوح زمانی ماهانه و وضوح مکانی ۴ کیلومتر (درجه ۱/۲۴) دارد (Abatzoglou و همکاران، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۸). جدول (۱) طبقه‌بندی شاخص خشکسالی پالم PDSI را نشان می‌دهد.

جدول ۱- طبقه‌بندی شاخص خشکسالی پالم

طبقه خشکسالی	مقادیر شاخص
ترسالی بسیار شدید	$PDSI < -4$
ترسالی شدید	$-4 \leq PDSI < -3$
ترسالی میانه	$-3 \leq PDSI < -2$
ترسالی ملایم	$-2 \leq PDSI < -1$
ترسالی خفیف	$-1 \leq PDSI < -0.5$
نزدیک نرمال	$-0.5 \leq PDSI < 0$
خشکسالی خفیف	$0 \leq PDSI < 0.5$
خشکسالی ملایم	$0.5 \leq PDSI < 1$
خشکسالی متوسط	$1 \leq PDSI < 2$
خشکسالی شدید	$2 \leq PDSI < 3$
خشکسالی بسیار شدید	$PDSI \geq 3$

• مدل رگرسیون خطی چند متغیره

روش رگرسیون خطی به خانواده بزرگتری از مدل‌ها به نام GLM (مدل‌های خطی تعمیم‌یافته) تعلق دارد. مفهوم رگرسیون خطی مدل‌سازی متغیر وابسته کمی از طریق ترکیب خطی متغیرهای مستقل کمی است. مدل قطعی (بدون در نظر گرفتن

تصادفی بودن) به صورت رابطه ذیل (رابطه ۱) نوشته می‌شود (Ostertagova, ۲۰۱۲):

$$y_i = B_0 + \sum_{j=1}^p B_j x_{ij} + e_i \quad (1)$$

که در آن y_i مقدار مشاهده شده برای متغیر وابسته برای مشاهده i است، x_{ij} مقداری است که متغیر j برای مشاهده i گرفته است و e_i خطای مدل است.

برآورد ضرایب β و ماتریس کوواریانس آن‌ها توسط روابط ذیل (رابطه ۲ و ۳) صورت می‌پذیرد (Amemiya, ۱۹۸۰):

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (2)$$

$$VAR(\hat{\beta}) = \sigma^2 (X^T X)^{-1} \quad (3)$$

به منظور تأیید صحت مدل و انتخاب مدل بهینه پارامترهای ذیل بررسی شد:

Df: درجه آزادی مدل (وابسته به خطای مدل)

R^2 : ضریب تعیین مدل بین ۰ تا ۱ می‌باشد و به صورت رابطه ذیل (رابطه ۴) تعریف می‌شود (Ostertagova, ۲۰۱۲):

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n w_i (\bar{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n w_i (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{with } \bar{y} = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^n w_i y_i \quad (4)$$

R^2 به عنوان سهم تغییرپذیری متغیر وابسته که به وسیله مدل توضیح داده می‌شود تعریف می‌شود. هرچه R^2 به یک نزدیکتر باشد کارایی مدل بیشتر است.

Adjusted R^2 : ضریب تعیین تعدیل شده برای مدل می‌باشد. اگر R^2 نزدیک به صفر باشد R^2 تنظیم شده می‌تواند منفی باشد. R^2 تنظیم شده تصحیح R^2 است که تعداد متغیرهای استفاده شده در مدل را در نظر می‌گیرد و مقدار آن توسط رابطه (۵) تعریف شده است (Ostertagova, ۲۰۱۲):

$$\hat{R}^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{w - 1}{w - p - 1} \quad (5)$$

MSE: میانگین مربع خطا (MSE) توسط رابطه (۶) تعریف می‌شود (Makridakis و همکاران، ۱۹۹۸):

$$MSE = \frac{1}{W - P} \sum_{i=1}^n y_i - \hat{y}_i \quad (6)$$

RMSE: مجذور میانگین مربع خطا (RMSE) ریشه مربع MSE است.

MAPE: درصد میانگین خطای مطلق به صورت زیر محاسبه می‌شود (Makridakis و همکاران، ۱۹۹۸) (رابطه ۷):

$$MAPE = \frac{100}{W} \sum_{i=1}^n w_i \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (7)$$

DW: آماره دوربین-واتسن (Durbin-Watson) به منظور بررسی مستقل بودن مشاهدات توسط رابطه ذیل تعریف می‌شود (رابطه ۸):

$$DW = \frac{\sum_{i=2}^n (y_i - \hat{y}_i) - (y_{i-1} - \hat{y}_{i-1})}{\sum_{i=1}^n w_i (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (8)$$

نتایج و بحث

- روند تغییرات پارامترهای اقلیمی حوضه آبخیز کارون بزرگ در محدوده حوضه کارون بزرگ، در دو بخش داخل و خارج استان خوزستان روند کاهش بارندگی از دو دهه قبل (۱۳۷۶ تا ۱۳۹۵) آغاز شده است، اما این کاهش در بخش درون استان به خصوص طی دهه اخیر شدت بیشتری داشته است و دهه ما قبل از دهه اخیر (۱۳۷۶-۱۳۸۵) این تغییرات محسوس نبوده و آثار کاهش بارندگی به خوبی نمایان نشده است. محدوده کارون بزرگ در خوزستان و خارج آن در دهه اخیر با کاهش بارش به ترتیب حدود ۱۶ و ۱۰ درصد بوده که وضعیت بحرانی تر کمبود بارش را در درون استان خوزستان نسبت به سایر مناطق نمایان می سازد. باتوجه به اهمیت نقش جریانات رودخانه ای در این حوضه این کاهش می تواند خسارات زیادی به بار آورد (شکل ۲). میانگین بلندمدت بارش حوضه نزدیک به ۴۹۲ میلی متر است که میانگین درون استانی آن نزدیک به ۵۵۱ میلی متر می باشد. باتوجه به شدت بیشتر کاهش بارش ها در درون استان می توان انتظار داشت جریانات سطحی در این منطقه بیشتر با کمبود روبه رو شود.



شکل ۲- نمودار تغییرات بارش دهه ای و درصد کاهش بارش دهه ها نسبت به یکدیگر در طول پنج دهه (سال های ۱۳۴۵-۱۳۹۵)

در شکل (۳) بررسی نحوه تغییرات زمانی و مکانی میانگین دما به تفکیک درون و خارج استان به صورت دهه ای نشان داد به جز دهه سوم که کاهش دما نسبت به دهه قبل آن در هر دو بخش

این آزمون برای تشخیص خودهمبستگی مرتبه اول باقیمانده ها یا جملات خطا در یک مدل رگرسیون به کار می رود. در این آزمون فرض صفر عدم وجود خود همبستگی بین جملات خطا و فرض ۱ وجود خود همبستگی بین جملات خطا بین زمان های t و $t-1$ می باشد. عدم خود همبستگی، یعنی خطاهای زمان t و $t-1$ از یکدیگر مستقل باشند. مقدار این آماره در بازه بین ۰ تا ۴ در نوسان است و مقدار بهینه آن برابر ۲ می باشد. مقادیر کمتر از عدد ۱/۵ یا بیشتر از ۲/۵ نشان دهنده وجود مسئله در مدل است.

این آماره برای ارزیابی تناسب یک مدل رگرسیون استفاده شده است که با استفاده از حداقل مربعات معمولی تخمین زده می شود و در زمینه انتخاب مدل درجایی که تعدادی از متغیرهای پیش بینی کننده برای پیش بینی نتیجه وجود دارد و هدف یافتن بهترین مدل شامل زیرمجموعه ای از این پیش بینی ها است اعمال می شود. مقدار کم CP به معنای دقیق بودن مدل است. ضریب Mallows Cp توسط رابطه ذیل تعریف می شود (Darnius and Tarigan, ۲۰۱۸) (رابطه ۹):

$$c_p = \frac{SSE}{SSE_r / (N - P_r)} - (N - 2P) \quad (9)$$

در این رابطه p تعداد پارامترهای مدل مرجع، SSE مجموع مربعات خطای مدل مرجع، N تعداد نقاط اندازه گیری شده است.

AIC: معیار ارزیابی بیانگر برآوردگر کیفیت نسبی مدل آماری باتوجه به داده های جمع آوری شده در نمونه تصادفی می باشد (Sembiring and Manurung, ۲۰۱۹) (رابطه ۱۰).

$$AIC = W \ln \left(\frac{SSE}{W} \right) + 2P^* \quad (10)$$

SBC: معیار اطلاع بیزی- شوارتز (Schwarz's Bayesian) توسط رابطه (۱۱) محاسبه می شود.

$$SBC = W \ln \left(\frac{SSE}{W} \right) + \ln(W)P^* \quad (11)$$

همانند معیار اطلاعاتی آکائیکه معیار اطلاع بیزی- شوارتز هم از طریق یک رابطه بر طبق تابع درست نمایی و حجم نمونه قابل محاسبه است.

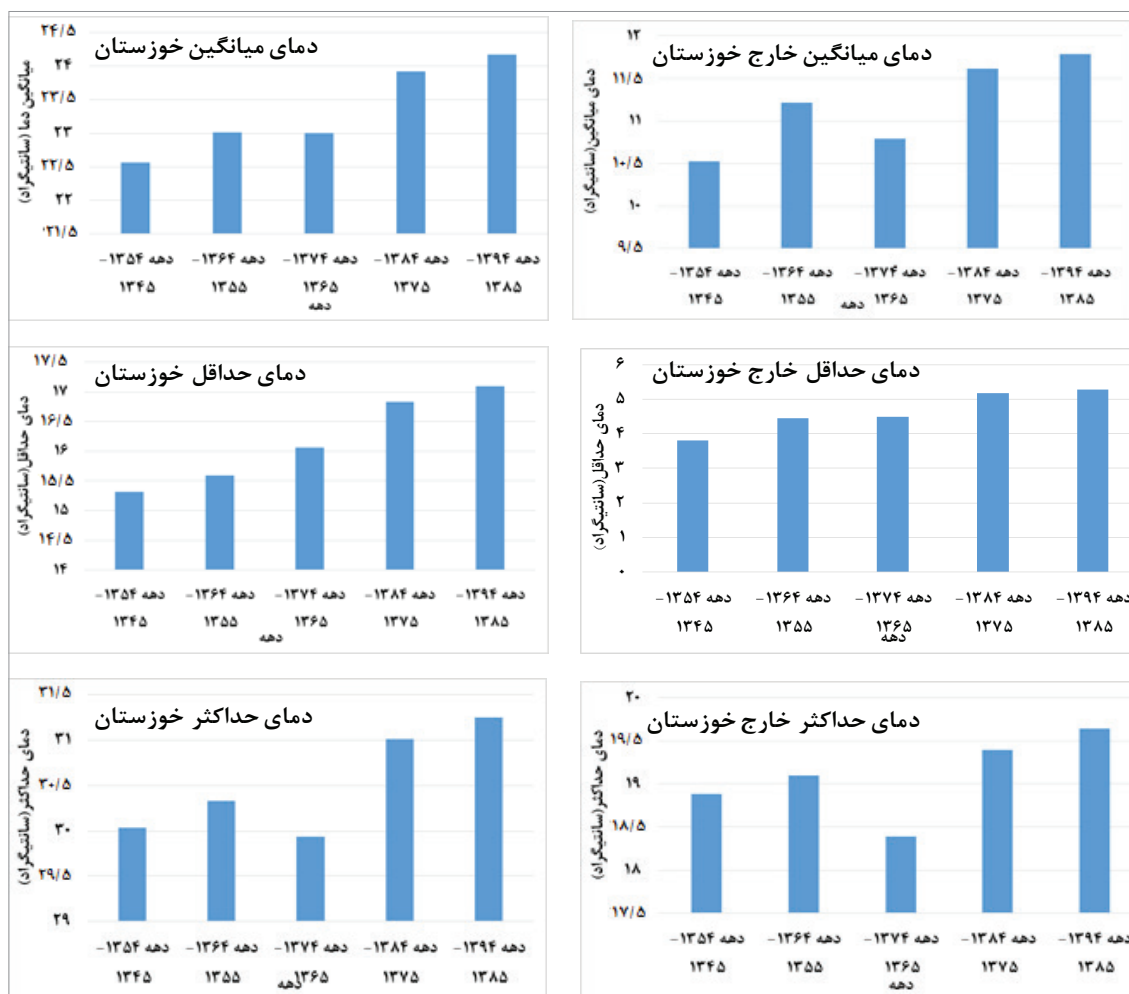
در این پژوهش از مدل رگرسیون خطی چندمتغیره برای دو بخش حوضه کارون بزرگ در خارج استان خوزستان و داخل آن استفاده شد تا نقش عوامل اقلیمی در خروجی های جریان سطحی در این دو بخش مشخص شود و مهمترین پارامترهای اقلیمی تأثیرگذار بر جریانات خروجی از حوضه رتبه بندی شوند. به این منظور ابتدا جدول توصیفی ویژگی های حوضه ارائه شد و سپس مدل بهینه انتخاب و عوامل تأثیرگذار رتبه بندی شدند و درصد اهمیت این عوامل بررسی شد.

درون و خارج استان رخ داده است در سایر دهه‌ها دما افزایش داشته است؛ این افزایش در مناطق بالادست حوضه و بیرون استان از مناطق پایین دست و درون استان بیشتر بوده است. همچنین بیشترین افزایش دما در دهه سوم در مناطق بالادست حوضه رخ داده است.

شکل (۳) بررسی نحوه تغییرات زمانی و مکانی میانگین حداقل دما به تفکیک درون و خارج استان خوزستان به صورت دهه‌ای نشان داد، در دهه اول کمترین متوسط دمای حداقل در بالادست حوضه در خارج استان با توجه به وضعیت کوهستانی این مناطق با میانگین ۳/۸ درجه سانتی‌گراد و بیشترین دمای متوسط حداقل در پایین‌دست حوضه کارون در درون استان در دهه اخیر (۱۳۸۵-۱۳۹۴) با میانگین ۱۷/۱ درجه سانتی‌گراد رخ داده است. در دهه دوم دمای متوسط حداقل در بالادست حوضه با افزایش حدود ۰/۶۵ درجه سانتی‌گراد به میانگین ۴/۴۵ درجه سانتی‌گراد رسید. این افزایش در پایین‌دست حوضه در متوسط دمای حداقل چندان محسوس نبود. به‌طوری‌که دمای درون استان خوزستان

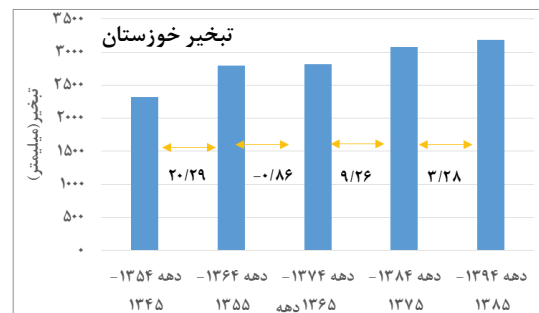
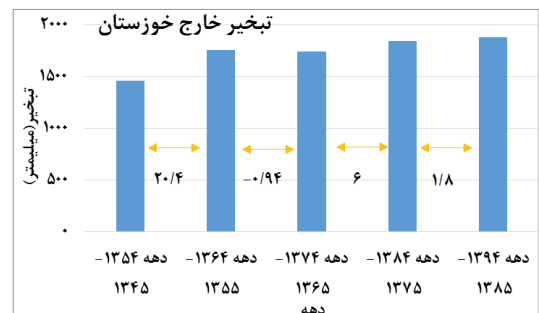
(پایین دست حوضه) با افزایش نزدیک به ۰/۲۸ درجه سانتی‌گراد نسبت به دهه قبل به ۱۵/۵۹ درجه سانتی‌گراد رسیده است. در دهه سوم در مناطق بالادست حوضه، دمای حداقل کم‌وبیش ثابت و به مقدار ناچیزی افزایش یافته است اما در پایین‌دست حوضه کارون در استان خوزستان دمای متوسط حداقل افزایش داشته است. در دهه چهارم کل حوضه‌ها هم در بالادست و هم در پایین‌دست با افزایش دمای متوسط حداقل مواجه بوده‌اند که این افزایش در مناطق بالادست حوضه بسیار شدیدتر بوده است. در دهه پنجم همچنان روند افزایش متوسط دمای حداقل در هر دو بخش ادامه دارد؛ که بازهم این افزایش در بالادست بسیار بیشتر بوده است.

بررسی دمای حداکثر (شکل ۳) نیز در هر دو قسمت مورد مطالعه نشان داد به جز دهه سوم که کاهش دما در هر دو بخش درون و بیرون استان مشاهده شد در سایر دهه‌های مورد بررسی دما روند افزایشی داشته است و شدت این افزایش در بالادست و خارج استان نسبت به مناطق پایین دست داخل استان بیشتر بوده است.



شکل ۳- نمودار تغییرات دمای میانگین، حداقل و حداکثر دهه‌ای و درصد کاهش دمای دهه‌ها نسبت به یکدیگر در طول پنج دهه (سال‌های ۱۳۴۵-۱۳۹۴)

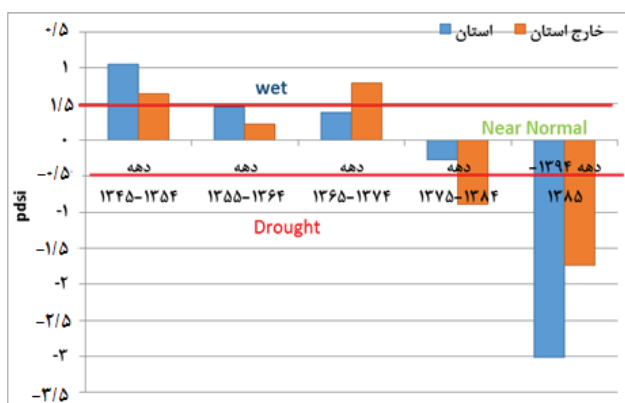
در شکل (۴) بررسی نحوه تغییرات مکانی تبخیر سالانه به تفکیک درون و بیرون استان به صورت دهه‌ای افزایش تبخیر را در هر دو بخش درون و بیرون استان در همه دهه‌ها به جز دهه سوم نشان داد. میانگین تبخیر سالانه در درون استان در کل دوره مورد مطالعه ۳۱۸۳ میلی‌متر و در بیرون استان ۱۷۳۴ میلی‌متر بوده است. همچنین تغییرات دهه‌ای نیز نشان‌دهنده شدت بیشتر افزایش تبخیر در درون استان نسبت به نواحی خارج استانی حوضه می‌باشد.



شکل ۴- نمودار تغییرات تبخیر دهه‌ای و درصد کاهش تبخیر دهه‌ها نسبت به یکدیگر در طول پنج دهه (سال‌های ۱۳۴۵-۱۳۹۴)

- شاخص خشکسالی پالم

بررسی این شاخص در دو بخش درون و بیرون استانی حوضه انجام گرفت (شکل ۵). نتایج بررسی‌ها نشان داد در سه دهه اول سال‌های ۱۳۴۵ تا ۱۳۷۴ وضعیت حوضه به سمت ترسالی متمایل بوده است و دهه اول سال‌های ۱۳۵۴-۱۳۴۵ بهترین شرایط را در کل دوره دارد. در این شرایط ترسالی در بخش درون استانی با شدت بیشتری روبه‌رو بوده است. در دو دهه اخیر (۱۳۸۴-۱۳۷۵ و ۱۳۹۴-۱۳۸۵) شرایط حوضه به سمت خشکسالی پیش رفته و شدت این خشکسالی‌ها در دهه اخیر بسیار افزایش داشته و حوضه به‌خصوص در بخش درون استانی به سمت خشکسالی شدید پیشرفت کرده است.



شکل ۵- نمودار تغییرات شاخص خشکسالی پالم دهه‌ای و درصد کاهش خشکسالی دهه‌ها نسبت به یکدیگر در طول پنج دهه (سال‌های ۱۳۴۵-۱۳۹۴)

- دبی ورودی و خروجی استان خوزستان و استان‌های مجاور در حوضه کارون

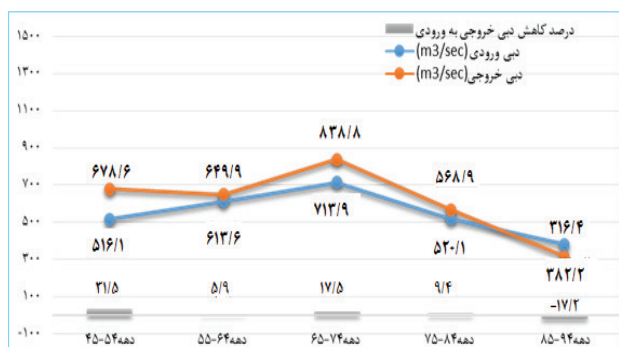
به‌منظور بررسی دبی ورودی و خروجی به استان خوزستان در حوضه کارون دو ایستگاه پل شالو (رودخانه کارون) و تله زنگ (رودخانه دز) به‌عنوان دو ایستگاه اصلی ورودی به استان خوزستان و خروجی بالادست حوضه در نظر گرفته شدند. همچنین ایستگاه اهواز در خروجی حوضه (رودخانه کارون بزرگ) به‌عنوان خروجی حوضه در استان خوزستان در نظر گرفته شد (شکل ۶). در این مطالعه تغییرات دهه‌ای این ایستگاه‌ها بررسی شد (شکل ۷). نتایج نشان داد دبی در تمام ایستگاه‌ها در سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۴-۹۵ کاهش شدیدی را نسبت به دوره‌های قبل داشته است اما این شدت کاهش در ایستگاه اهواز در خروجی حوضه در استان خوزستان شدت کاهش بسیار بیشتری نسبت به دهه قبل (در حدود ۶۶ درصد) نسبت به ایستگاه‌های ثبت‌کننده دبی ورودی به استان و خروجی بالادست از جمله تله زنگ (۳۱ درصد کاهش) و پل شالو (۲۲/۹ درصد کاهش) دارد.



شکل ۶- نقشه موقعیت ایستگاه‌های سنجش دبی ورودی و خروجی به استان خوزستان از محدوده حوضه کارون

جدول ۲- نتایج بررسی مقایسه ای دبی‌های ورودی (خروجی محدوده‌های بالادست) و خروجی استان خوزستان در حوضه کارون

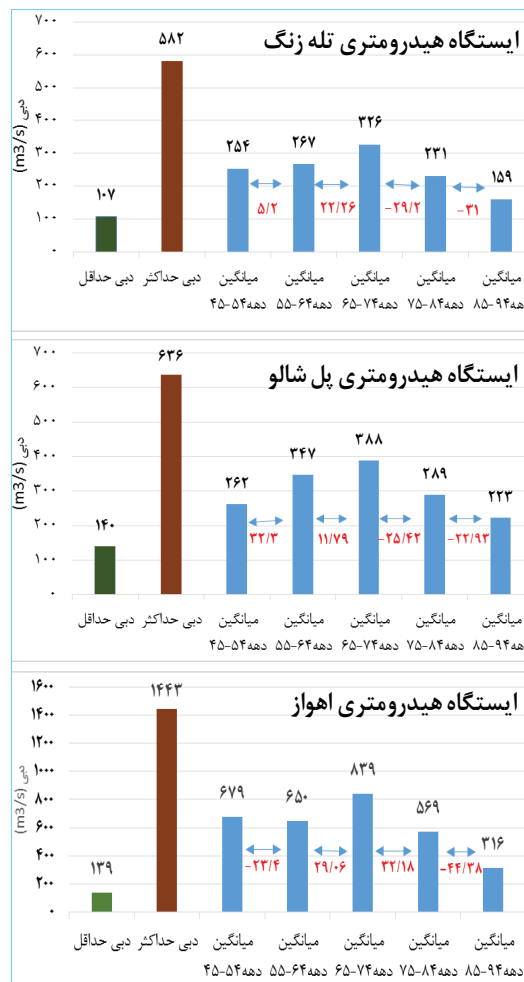
دهه‌ها	دبی ورودی		دبی خروجی		افزایش/کاهش (%)
	(MCM/year)	(m ³ /sec)	(MCM/year)	(m ³ /sec)	
۴۵-۵۴	۱/۵۱۶	۱۶۲۷۶/۳۲	۶/۶۷۸	۲۱۴۰۰/۴۰	۳۱/۵
۵۵-۶۴	۶/۶۱۳	۱۹۳۵۰/۰۲	۹/۶۴۹	۲۰۴۹۴/۸۱	۶
۶۵-۷۴	۹/۷۱۳	۲۲۵۱۲/۲۲	۸/۸۳۸	۲۶۴۵۱/۴۸	۱۷/۵
۷۵-۸۴	۱/۵۲۰	۱۶۴۰۰/۸۳	۹/۵۶۸	۱۷۹۴۰/۶۵	۹/۴
۸۵-۹۴	۲/۳۸۲	۱۲۰۵۲/۰۴	۴/۳۱۶	۹۹۷۷/۸۱	-۱۷/۲



شکل ۸- نمودار دبی‌های ورودی و خروجی به حوضه کارون و درصد کاهش آن‌ها نسبت به یکدیگر در طول پنج دهه (سال‌های ۱۳۴۵-۱۳۹۴)

نتایج بررسی مدل رگرسیون خطی چندمتغیره

به‌منظور مدل‌سازی اثرات پارامترهای اقلیمی و خشکسالی بر دبی خروجی، ویژگی‌های آماری پارامترهای مورد بررسی در حوضه شامل تعداد سال‌های آماری، حداقل، حداکثر، میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات هرکدام از پارامترها در دو بخش داخل و خارج استان خوزستان محاسبه شد (جدول ۳). همانگونه که مشاهده می‌شود ضریب تغییرات دبی خروجی از حوضه در استان بسیار بیشتر از مناطق خارج استان می‌باشد به‌طوری‌که این مقدار در خروجی حوضه در استان خوزستان حدود ۴۶ درصد و در ورودی به استان (خروجی مناطق خارجی استان) ۳۸ درصد می‌باشد. دلیل این امر غالباً ناشی از مسائل مدیریتی و کنترلی بر آب در بالادست و پایین دست حوضه می‌باشد. دمای حداقل و حداکثر و میانگین دمای داخل و خارج استان نیز تفاوت بالایی داشت. علت این تفاوت غالباً ناشی از وضعیت توپوگرافی منطقه می‌باشد. در خارج از استان خوزستان منطقه بیشتر کوهستانی و معتدل هستند اما استان خوزستان به‌صورت دشت گرمسیری می‌باشد. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد مناطق بالادست که گاه‌گاه سرچشمه تأمین آب استان هستند بیشتر تحت تأثیر تغییرات دمایی بوده‌اند به‌طوری‌که ضریب تغییرات دما در آن‌ها با وجود دمای کمتر بیشتر بوده است.



شکل ۷- نمودار ایستگاه‌های سنجش دبی ورودی و خروجی به استان خوزستان در محدوده حوضه کارون

نتایج بررسی مقایسه‌ای دبی‌های ورودی (خروجی محدوده‌های بالادست) و خروجی استان در جدول (۲) و شکل (۸) ارائه شده است نشان داد در دهه اول (دهه ۴۵-۵۴) میزان دبی خروجی نسبت به دبی ورودی به استان ۳۱/۴۸ درصد افزایش داشته و در بالاترین اندازه قرار دارد و نشان‌دهنده تعادل مصارف در درون استان می‌باشد. در دهه دوم (دهه ۵۵-۶۴) این نسبت به ۵/۹۲ درصد کاهش یافته ولی همچنان میزان دبی خروجی نسبت به ورودی بیشتر است. در دهه سوم (۶۵-۷۴) میزان خروجی‌ها نسبت به دهه قبلی شرایط بهتری پیدا کرده و ۱۷/۵۰ درصد نسبت به ورودی‌ها افزایش داشته است. در دهه چهارم (۷۵-۸۴) اندازه دبی ورودی به دبی خروجی نزدیک شده اما همچنان خروجی‌ها نسبت به ورودی‌ها وضعیت مناسب‌تری داشته و میزان خروجی‌ها ۹/۳۹ درصد از ورودی‌ها بالاتر بوده است. این تعادل در دهه آخر مورد مطالعه از بین رفته و شرایط معکوس در سطح استان وجود دارد، به‌طوری‌که میزان خروجی ۱۷/۲۱ درصد نسبت به ورودی کاهش داشته است.

جدول ۳- ویژگی‌های کلی پارامترهای مورد بررسی حوضه در داخل و خارج استان خوزستان

محل	متغیر	تعداد سال	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات
خوزستان	دبی خروجی	۵۰	۱۳۹/۱۶۵	۱۴۴۳/۲۴۴	۶۱۰/۵۱	۲۸۲/۸۸	۴۶/۳۳
	بارش	۵۰	۲۴۹/۰۵۲	۷۶۴/۸۱۷	۴۳۳/۳۷	۱۱۹/۹۳	۲۷/۶۷
	دمای میانگین	۵۰	۲۱/۵۸۴	۲۵/۰۳۳	۲۳/۳۳۴	۰/۷۸	۳/۳۵۵
	دمای حداقل	۵۰	۱۴/۴۶۵	۱۸/۱۴۷	۱۶/۱۷۸	۰/۸۳۲	۱۴/۵
	دمای حداکثر	۵۰	۲۸/۲۸۹	۳۲/۰۵۶	۳۰/۵۱۳	۰/۸۲۱	۲/۶۸
	تبخیر	۵۰	۲۱۶/۴۶۵	۳۳۲۷/۲۱۳	۲۸۴۱/۸۱۶	۴۸۶/۵۶۲	۱۷/۱
	خشکسالی pdsi	۵۰	-۵/۰۹۴	۴/۶۵۱	-۰/۲۸۱	۲/۳۶۸	۸۴۲/۵
خارج خوزستان	دبی خروجی	۵۰	۲۲۹/۶۱۸	۱۲۱۸/۳۷۶	۵۴۵/۰۸۳	۲۰۹/۰۹۹	۳۸/۳۶
	بارش	۵۰	۳۳۰/۴۲۶	۸۸۱/۹۴	۵۵۱/۹۶۴	۱۲۹/۹۲۵	۲۳/۵
	دمای میانگین	۵۰	۹/۱۱۲	۱۲/۴۸۱	۱۱/۱۸۷	۰/۷۱۸	۶/۴۲
	دمای حداقل	۵۰	۲/۸۱۱	۶/۱۵۲	۴/۶۴۲	۰/۷۸۵	۱۶/۹
	دمای حداکثر	۵۰	۱۶/۲۴	۲۰/۴۷۱	۱۹/۰۸۳	۰/۸۳۶	۴/۳۷۸
	تبخیر	۵۰	۱۳۵/۸۲۹	۱۹۶۲/۰۴۶	۱۷۳۴/۷۴۵	۲۸۲/۴۲۴	۱۶/۲۸
	خشکسالی pdsi	۵۰	-۴/۲۳	۳/۷۵۴	-۰/۱۹۷	۲/۰۵۳	-۱۰۴۲/۴۴

در جدول (۴) ضرایب تناسب مدل نشان داده شده است. R^2 (ضریب تعیین) درصد تغییر متغیر وابسته را نشان می‌دهد و با متغیرهای مستقل توضیح داده می‌شود. هرچه R^2 به ۱ نزدیکتر باشد، مدل گویاتر و مناسب‌تر است. در این مطالعه بررسی R^2 در نواحی خارج خوزستان ۸۲ درصد از تغییر دبی خروجی تحت تأثیر پارامترهای اقلیمی بوده است و در داخل استان خوزستان ۸۳ درصد تغییرات دبی خروجی متأثر از پارامترهای اقلیمی می‌باشد. سایر پارامترهای تأثیرگذار بر جریان خروجی (به غیر از اقلیم و خشکسالی) که در این تجزیه و تحلیل گنجانده نشده است مابقی درصد تأثیر بر جریان خروجی (۱۸ درصد در خارج خوزستان و ۱۷ درصد درون استان خوزستان) را به خود اختصاص داده‌اند.

جدول ۴- ضرایب تناسب مدل حوضه در داخل و خارج استان خوزستان

مقادیر به‌دست‌آمده برای سایر پارامترهای ذکر شده در جدول (۴) نشان دهنده بهینه بودن و کارایی مدل به‌کار گرفته شده در این بررسی می‌باشد. به‌عنوان مثال عدد به‌دست‌آمده برای آماره دوربین واتسون (DW) در جدول برای مدل حاصل در خارج خوزستان ۱/۵۸ و در داخل استان ۲/۳ می‌باشد (اگر این آماره بین ۱/۵ تا ۲/۵ باشد مدل حاصل مناسب است (Azami و همکاران، ۲۰۲۰)) بنابراین این آماره نیز کارایی مدل رگرسیون به‌دست‌آمده را نشان می‌دهد. نتایج آنالیز واریانس مدل رگرسیونی برازش داده شده در این پژوهش در جدول (۵) ارائه شده است. بررسی نتایج جدول (۵) در مورد تجزیه و تحلیل واریانس مشخص می‌سازد در صورت قبول فرضیه صفر (H_0) متغیرهای مستقل اطلاعات معنی‌داری را به مدل وارد می‌کنند. در واقع این جدول نشان دهنده معنی‌داری یا عدم معنی‌داری مدل رگرسیونی برازش داده شده می‌باشد. یکی از آماره‌های مورد استفاده در آنالیز واریانس مدل، آزمون فیشر می‌باشد. با استفاده از این آزمون در مطالعات تحلیل واریانس، مقدار پراکندگی بین میانگین‌های گروه‌ها بررسی می‌شود. در این آزمون پراکندگی درون گروهی برای تعیین وجود تفاوت معنی‌دار بین میانگین‌های گروه‌ها به‌کار می‌رود. باتوجه‌به این واقعیت که احتمال مربوط به مقدار F کمتر از ۰/۰۰۰۱ است، بنابراین، با اطمینان می‌توان نتیجه گرفت متغیرهای مستقل مقدار قابل توجهی از اطلاعات را به همراه دارند. در این مطالعه باتوجه‌به بزرگ بودن F و مقدار $\text{Sig}=0.000<0.05$ نتیجه گرفته می‌شود مدل رگرسیونی مناسب خواهد بود. بنابراین مدل رگرسیون حاصل می‌تواند به‌طور معناداری (و مناسبی) تغییرات متغیر وابسته را پیش‌بینی کند.

متغیر	خارج خوزستان	داخل خوزستان
Observations	۵۰	۵۰
DF	۴۳	۴۳
R ²	۰/۸۲۲	۰/۸۳۴
Adjusted R ²	۰/۷۹۷	۰/۸۱
MSE	۸۸۶۷/۱	۱۵۱۸۲/۸۶۳
RMSE	۹۴/۱۶۵	۱۲۳/۲۱۹
MAPE	۱۴/۵۵۲	۱۷/۸۴
DW	۱/۵۸۶	۲/۳۷۸
Cp	۷	۷
AIC	۴۶۰/۹۶۴	۴۸۷/۸۵۵
SBC	۴۷۴/۳۴۸	۵۰۱/۲۳۹

جدول ۵- نتایج تجزیه و تحلیل واریانس مدل رگرسیون

منطقه	Source	DF	Sum of squares	Mean squares	F	Pr > F
خارج خوزستان	Model	۶	۱۷۶۱۱۱۳	۲۹۳۵۱۸/۸	۳۳/۱۰۲	0/0001>
	Error	۴۳	۳۸۱۲۸۵/۳	۸۸۶۷/۱		
	Corrected Total	۴۹	۲۱۴۲۳۹۸			
داخل خوزستان	Model	۶	۳۲۶۸۴۳۱	۵۴۴۷۳۸/۵	۳۵/۸۷۹	0/0001>
	Error	۴۳	۶۵۲۸۶۳/۱	۱۵۱۸۲/۸۶		
	Corrected Total	۴۹	۳۹۲۱۲۹۴			

تصمیم‌گیری در مورد پذیرش یا رد فرضیه صفر که دلالت بر وجود ارتباط بین متغیر مستقل و وابسته دارد، آماره T به‌دست آمده با t جدول که با درجه آزادی N-K در سطح اطمینان ۹۵٪ محاسبه شده مقایسه می‌شود، چنانچه قدرمطلق T محاسبه شده از t جدول بزرگتر باشد فرض صفر رد می‌شود. در این حالت با ضریب اطمینان ۹۵٪ ضریب مورد نظر معنی دار خواهد بود. این معنی‌داری تنها در مورد شاخص‌های بارش و خشکسالی در مناطق داخلی استان در حوضه و در مورد پارامترهای بارش، دمای حداکثر و خشکسالی در مورد محدوده‌های خارج استان در حوضه درست است.

در شکل (۹) ضریب اثرگذاری متغیرهای مستقل و دامنه تغییرات حداکثر و حداقل این ضرایب در سطح ۹۵ درصد نشان داده شده است. بیشترین دامنه تغییرات مربوط به پارامتر دمای میانگین در درون استان خوزستان و پس از آن بارش درون استان بوده است.

جدول (۶) ضرایب رگرسیون استاندارد شده مدل (ضرایب بتا) را نشان می‌دهد. این ضرایب به‌طور مستقیم می‌توانند تأثیر نسبی متغیرهای مستقل را بر روی متغیر وابسته و اهمیت آن‌ها مقایسه کنند و سهم نسبی هر متغیر را در پیش‌بینی متغیر وابسته بیان می‌کنند. به عبارتی جدول (۶) متغیرهایی که بیش‌ترین تأثیر را بر متغیر وابسته دارند، نشان داده شده است. همان‌طور که در جدول (۶) نشان داده شده است هم در مناطق داخل و هم خارج استان پارامتر بارش بیشترین رابطه مستقیم را با دبی خروجی داشته است که سهم این اثر در داخل استان بیشتر بوده است. دومین عامل اثرگذار بر جریان‌ات خروجی در خارج استان و سرشاخه‌های تامین کننده آب دشت خوزستان دمای حداکثر و در داخل استان و پایین دست حوضه خشکسالی بوده است. شاخص خشکسالی پالمر و دمای حداکثر سومین عامل اثرگذار بر جریان‌ات خروجی به‌ترتیب در بالادست و پایین دست حوضه می‌باشد. برای

جدول ۶- ضرایب رگرسیون استاندارد شده مدل

منطقه	Source	Value	Standard error	T	Pr > T	Lower (%۹۵) bound	Upper (%۹۵) bound
خارج خوزستان	بارش	۰/۴۷۴	۰/۰۷۹	۵/۹۶۲	۰/۰۰۰۱ >	۰/۳۱۴	۰/۶۳۴
	دمای میانگین	۰/۰۲۳	۰/۲۴۹	۰/۰۹۴	۰/۹۲۵	-۰/۴۷۸	۰/۵۲۵
	دمای حداقل	۰/۱۲۶	۰/۱۲۹	۰/۹۸۱	۰/۳۳۲	-۰/۱۳۳	۰/۳۸۶
	دمای حداکثر	-۰/۴۲۵	۰/۱۸۱	-۲/۳۴۳	۰/۰۲۴	-۰/۷۹	-۰/۰۵۹
	تبخیر	-۰/۰۱۹	۰/۰۸۳	-۰/۲۳۱	۰/۸۱۹	-۰/۱۸۶	۰/۱۴۸
	خشکسالی pdsi	۰/۳۷۲	۰/۰۸۲	۴/۵۱۲	۰/۰۰۰۱ >	۰/۲۰۶	۰/۵۳۸
داخل خوزستان	بارش	۰/۵۳۱	۰/۰۸۸	۶/۰۰۲	۰/۰۰۰۱ >	۰/۳۵۳	۰/۷۰۹
	دمای میانگین	-۰/۰۶۲	۰/۳۹۴	-۰/۱۵۸	۰/۸۷۵	-۰/۸۵۷	۰/۷۳۳
	دمای حداقل	۰/۰۶۱	۰/۱۸۶	۰/۳۳۱	۰/۷۴۲	-۰/۳۱۳	۰/۴۳۶
	دمای حداکثر	-۰/۲۹۳	۰/۲۷۶	-۱/۰۶	۰/۲۹۵	-۰/۸۵	۰/۲۶۴
	تبخیر	۰/۰۰۱	۰/۰۸۷	۰/۰۰۶	۰/۹۹۵	-۰/۱۷۴	۰/۱۷۵
	خشکسالی pdsi	۰/۳۲۳	۰/۰۸۴	۳/۸۵۹	۰	۰/۱۵۴	۰/۴۹۲

اخیر مورد بررسی نسبت به سایر دهه‌ها شرایط بحرانی‌تر داشته، کاهش نزدیک به ۲۷ درصدی و در داخل استان و خروجی حوضه کاهش ۴۴ درصدی دبی‌های خروجی رخ داده است که باتوجه به اثر کم‌وبیش یکسان اقلیم بر هردو بخش می‌توان این تغییرات و شیب کاهشی را به وجود عامل دیگری از جمله مدیریت سرزمین و عوامل انسانی مانند افزایش سدهای احداثی و سطح زیر کشت نسبت داد. نتایج این مطالعه با یافته‌های واعظی هیر و همکاران (۲۰۱۶) در مورد تأثیر عوامل انسانی و مدیریتی بر روی تشدید اثرات تغییر اقلیم در نواحی پایین‌دست حوضه و در نتیجه کاهش جریان‌ات رودخانه‌ای در پایین دست تطابق داشت. نتایج این تحقیق همچنین با نتایج Sane و همکاران (۲۰۱۷) تطابق داشت. نتایج آن‌ها نشان داد که باوجود تأثیر خشکسالی بر کاهش آورد آبی، نقش عوامل انسانی بسیار تأثیرگذار بوده است.

سپاس‌گزاری

نتایج این تحقیق برگرفته از طرح جامع مطالعات ریزگرد استان خوزستان در موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشوری باشد. از کلیه افرادی که در انجام این طرح همکاری داشته‌اند به‌خصوص بخش تحقیقات بیابان موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور کمال تشکر را دارم.

پی‌نوشت‌ها

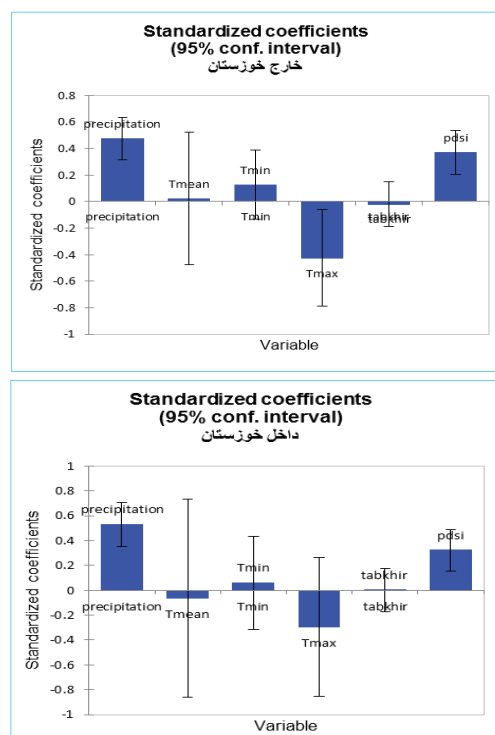
- 1-Outlier
- 2-Double Mass Curve
- 3-Run-Test

منابع

انصاری، م.، نوری، ج.، و فتوحی، س. ۱۳۹۵. بررسی روند تغییرات دما، بارش و دبی با استفاده از آزمون ناپارامتری من کندال (مطالعه موردی: حوزه آبخیز رودخانه کاجو استان سیستان و بلوچستان). مجله تحقیقات آبخیزداری، ۱۴(۳): ۱۵۸-۱۵۲.

خسروی، م.، دوستکامیان، م.، میرموسوی، ج.، بیات، ع.، و بیگزایی، ا. ۱۳۹۳. طبقه‌بندی دما و بارش در ایران زمین با استفاده از روش‌های زمین‌آمار و تحلیل خوشه‌ای: فصلنامه برنامه‌ریزی منطقه‌ای، ۴(۱۳): ۱۲۱-۱۳۲.

خلیلی، ک.، احمدی، ف.، بهمنش، ج. و وردی‌نژاد، و. ۱۳۹۱. بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر روی دمای هوا و جریان رودخانه شهرچای واقع در غرب دریاچه ارومیه با استفاده از تحلیل روند و ایستایی. مجله علمی کشاورزی علوم مهندسی آبیاری،



شکل ۹- نمودار عوامل اقلیمی تأثیرگذار بردبی‌های ورودی و خروجی به حوضه کارون و دامنه تأثیر این عوامل

بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش بررسی رواناب خروجی و عوامل اقلیمی تأثیرگذار بر آن در دو بخش حوضه کارون بزرگ در درون استان خوزستان و بخش بیرونی استان و بالادست حوضه انجام شد. نتایج نشان داد در طول کل دوره مورد بررسی (سال‌های ۱۳۹۴-۱۳۴۵) پارامتر بارش طی دهه ۱۳۸۵-۱۳۹۴ بیشترین شیب کاهش را در حوضه به‌خصوص در نواحی درون استان خوزستان و پایین‌دست حوضه داشته است و پارامتر دما طی دهه ۱۳۸۴-۱۳۷۵ بیشترین شیب افزایش را در حوضه و به‌خصوص مناطق بالادست حوضه و خارج استان داشته است. همچنین افزایش تبخیر در دو دهه آخر مورد بررسی در این مطالعه در کل حوضه اتفاق افتاده است که این افزایش در نواحی درون استان و پایین دست حوضه نسبت به نواحی خارجی طی دهه ۱۳۸۴-۱۳۷۵ بیشترین شیب را داشته است. بررسی خشکسالی‌ها نشان داد در دوهه آخر مورد بررسی منطقه به سمت خشکسالی پیش رفته و بیشترین شدت خشکسالی حوضه در درون استان خوزستان طی دهه آخر مورد بررسی رخ داده است. نتایج مربوط به میزان اثر پارامترهای اقلیمی بر دبی خروجی در حوضه کارون بزرگ نشان داد، که در داخل استان خوزستان ۸۳ درصد دبی خروجی توسط پارامترهای اقلیمی و در خارج استان ۸۲ درصد تغییرات ناشی از پارامترهای اقلیمی می‌باشد. درحالی‌که دبی خروجی در خارج استان خوزستان (ورودی به استان) که طی دهه

- Darnius O. and Tarigan G. 2018. Simulation method of model selection based on Mallows' Cp Criteria in linier regression. *Journal of Physics: Conference Series*, 1116(2): 022008.
- Dibike Y.B. and Coulibaly P. 2005. Hydrologic impact of climate change in the Saguenay watershed: comparison of downscaling methods and hydrologic models. *Journal of Hydrology*, 307: 145-163.
- Fowler H.J., Kilsb C.G. and Stunell J. 2007. Modeling the impacts of projected future climate change on water resources in north-west England. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(3): 1115-1126.
- Kundzewicz Z., Merz B., Vorogushyn S., Hartmann, Heike & Duethmann, Doris & Wortmann, M. & Huang, Shaochun & Buda, Su & Jiang, Tianqi & Krysanova, Valentina. 2014. Analysis of changes in climate and river discharge with focus on seasonal runoff predictability in the Aksu River.
- Ling H., Xu H. and Fu J. 2013. High- and low-flow variation in annual runoff and their response to climate change in the headstreams of the Tarim River, Xinjiang, China. *Hydrological Process*, 27: 975-988.
- Makridakis S., Wheelwright S.C. and Hyndman R.J. 1998. Forecasting methods and applications, New York, Wiley. *Journal of the American Statistical Association*, 94(445): 345-346.
- Ostertagova E. 2012. Modelling using Polynomial Regression. *Procedia Engineering*, 48(2012): 500-506.
- Palmer W.C. 1957. Drought a normal part of climatic. In. *Weekly Weather and Crop Bulletin*, 44: 6-8.
- Sankarasubramanian A., Vogel R.M. and Limburner J.F. 2001. Climate elasticity of stream flow in the United States. *Water Resour. Res.*, 37(6): 1771-1781.
- Sellinger E.C., Stow C.A., Lamon E.C. and Qian S. S. 2008. Recent Water Level declines in the Lake Michigan-Huron System. *Environmental Science & Technology*, 42: 367-373.
- Sembiring O. and Manurung A. 2019. Model selection in regression linear: a simulation based on akaike's information criterion. *Journal of Physics Conference Series*, 1321:022085. 10.1088/1742-6596/1321/2/022085.
- خورشیددوست، ع.م. و شیرزاد، ع.ا. ۱۳۹۳. بررسی و تحلیل بارش‌های ناحیه شمال ایران با استفاده از تحلیل خوشه‌ای و تجزیه تابع تشخیص. *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۱۸(۴۹): ۱۱۸-۱۰۱.
- صمدی، ز. و مساح بوانی، ع. ۱۳۸۷. معرفی روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و SDSM به منظور کوچک مقیاس کردن آماری داده‌های دما و بارندگی. *سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران*. دانشگاه تبریز، تبریز.
- عزتی، م.، شکوهی، ع.، لنگرودی، و.، سینگ، ج. پ.، و نوری، م. ۱۳۹۷. بررسی روند تغییرات دما و بارش و اثر آن بر پتانسیل منابع آب ورودی به سد طالقان. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۴۹(۴): ۷۱۶-۷۰۵.
- عساکره، ح. و دوستکامیان، م. ۱۳۹۶. ناحیه‌بندی اقلیمی آب قابل بارش جو ایران زمین. *نشریه علمی جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۰(۵۸): ۱۸۱-۲۰۲.
- منتظری، م. و بای، ن. ۱۳۹۱. پهنه بندی اقلیم ناحیه خزری با استفاده از روش های آماری چند متغیره. *مجله تحقیقات جغرافیایی*، ۲۷(۲): ۷۷-۹۰.
- واعظی هیر، ا.، ساری صراف، ب. و والائی، ا. ۱۳۹۵. بررسی علل کاهش جریان در رودخانه‌های شاخص جنوب شرق دریاچه ارومیه. *فضای جغرافیایی*، ۱۶(۵۳): ۱۲۳-۱۵۰.
- Abatzoglou J.T., Barbero R., Wolf J.W. and Holden Z. 2014. Tracking interannual streamflow variability with drought indices in the Pacific Northwest, US. *Journal of Hydrometeorology*, 15:1900-1912.
- Abatzoglou J.T., Dobrowski S.Z., Parks S.A. and Hege- wisch K.C. 2018. Terraclimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958-2015. *Journal of Scientific Data*, 5: 170191.
- Amemiya T. 1980. Selection of regressors. *International Economic Review*, 21: 331-354.
- Azami M., Sharifi H. and Alvandpur S. 2020. Evaluating the relationship between information literacy and evidence-based nursing and their impact on knowledge and attitude of nurses working in hospitals affiliated to Kerman University of Medical Sciences on medication errors. *Journal of family medicine and primary care*, 9(8): 4097-4106.
- Chen Y., Xu C., Hao X., Li W., Chen Y., Zhu C. and Ye Z. 2009. Fifty-year climate change and its effect on annual runoff in the Tarim River Basin. *China. Quaternary International*, 208(2): 53-61.

Comparison and Analysis of the Main Factors Improving Wheat Water Productivity of Surface and Drip Irrigation Methods (Case study: Yazd Province)

M.H. Rahimian^{1*}, G.H. Ranjbar¹, H. Gholami², M. Nikkhah³, M. Shiran Tafti³, N. Besharat³

1-Assistant Professor, National Salinity Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Yazd, Iran. 2-MSc Student, Department of Water Science and Engineering, Ardakan University, Ardakan, Iran. 3- Researcher, National Salinity Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Yazd, Iran.

*(Corresponding Author Email: mhrhimian@gmail.com)

Received: 24-04-2021

Revised: 17-05-2021

Accepted: 17-05-2021

Available Online: 06-12-2021

مقایسه و تحلیل عوامل اصلی ارتقاءدهنده شاخص بهره‌وری آب گندم در دو روش غرقابی و موضعی (مطالعه موردی: استان یزد)

محمدحسن رحیمیان^{۱*}، غلامحسن رنجبار^۱، حسن غلامی^۲، مجید نیکخواه^۳، مهدی شیران تفتی^۳، نادیا بشارت^۳

۱- استادیار، مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران. ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه اردکان، ایران. ۳- کارشناس مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران.

*(نویسنده مسئول، E-Mail: mhrhimian@gmail.com)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۰۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۲/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۲۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۰/۰۹/۱۵

Abstract

Considering that wheat fields are mainly irrigated by surface (basin) and localized (drip) methods, this study aimed to investigate, compare and analyze the effects of total applied water and yield factors on wheat Water Use Efficiency (WUE) of each irrigation system in Yazd province. In this way, the priority of addressing each of these factors in the two irrigation systems can be determined. The results showed that in the surface irrigation method, reducing the volume of applied water has played a more important role in improving the WUE than increasing the yield. In other words, to increase the wheat WUE of surface methods, implementation of water use optimization solutions are more prioritized compared to crop yield enhancement practices. In contrast, in the case of the drip irrigation method, the crop yield enhancement solutions have played a more decisive role in improving wheat WUE. In these fields, wheat agronomic practices such as proper planting date and density, selecting suitable and high yielding varieties, proper irrigation cycle, proper fertilizer application, and pest and disease control have had a significant role in WUE of wheat, which requires high attention by the farmers to these issues. It was also observed that despite the possible reduction of applied water in drip irrigation compared to the surface method and consequent quantitative enhancement of WUE, but there may be the possibility of low and unacceptable wheat performance. This can cause economic inefficiency of the drip irrigation system for wheat. So, it is highly recommended to consider and implement the above-mentioned agronomic practices in wheat drip irrigated fields.

Keywords: Water Use Efficiency, Yield, Applied Water, Salinity, Yield Function.

چکیده

با توجه به اینکه مزارع گندم عمدتاً به دو روش سطحی (غرقابی) و موضعی (تیپ) آبیاری می‌شوند، این پژوهش بر آن شد تا اثر فاکتورهای عملکرد و آب مصرفی بر شاخص بهره‌وری آب (WUE) این دو سامانه را در استان یزد بررسی، مقایسه و تحلیل نماید تا از این طریق، اولویت پرداختن به این فاکتورها به تفکیک نوع سامانه مشخص شود. نتایج نشان داد که در روش غرقابی، کاهش حجم آب مصرفی بیشتر از افزایش عملکرد محصول در ارتقای WUE نقش داشته است. به عبارتی دیگر برای افزایش WUE گندم در روش‌های غرقابی باید بیشتر سراغ راهکارهای بهینه‌سازی و کاهش مصرف آب در مزرعه رفت و پرداختن به روش‌های افزایش عملکرد محصول در جایگاه بعدی قرار دارند. اما در مورد آبیاری موضعی، شرایط بر عکس بوده و فاکتور عملکرد نقش تعیین‌کننده‌تری در ارتقای WUE ایفا کرده است. در این سامانه مسایل به‌نژادی و به‌زراعی گندم نظیر انتخاب ارقام مناسب، تاریخ و تراکم مناسب کاشت، رعایت دور آبیاری‌ها، عملیات مناسب تغذیه، کنترل آفات و بیماری‌ها نقش قابل توجهی در WUE داشته و مستلزم توجه زیادی از جانب کشاورزان است. همچنین مشاهده شد که علی‌رغم کاهش محتمل حجم آب مصرفی گندم در آبیاری تیپ نسبت به غرقابی و ارتقای عددی WUE، امکان عدم دستیابی بهره‌برداران به عملکرد قابل قبول محصول در واحد سطح وجود دارد که همین مسأله می‌تواند موجب عدم صرفه اقتصادی این سامانه در مزارع گندم و در نتیجه، نارضایتی بهره‌برداران شود. حل این مسأله در گرو توجه ویژه به نکات مدیریتی و به‌زراعی در آبیاری موضعی گندم خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: کارایی مصرف آب، عملکرد محصول، آب مصرفی، شوری، تابع تولید.

رشد جمعیت، بهبود سطح رفاه و بهداشت عمومی جوامع و تغییر الگوهای زندگی از عوامل اصلی افزایش نیاز جهانی به تأمین غذای بیشتر می‌باشد. در مسیر رسیدن به امنیت غذایی از طریق افزایش تولید در بخش کشاورزی، مسأله محدودیت کیفی و کمی منابع آب به عنوان یکی از مهمترین عوامل محدودکننده این بخش شناخته می‌شود. اهمیت این مسأله در حدی است که علاوه بر بروز مشکلات برای نسل فعلی، می‌تواند امنیت غذایی نسل‌های آینده را نیز به خطر بیندازد. کشور ایران به دلیل قرارگیری در یکی از خشک‌ترین مناطق دنیا و با حدود یک سوم میانگین بارندگی سالانه جهانی (دهقانی‌سانچ و نخجوانی‌مقدم، ۱۳۸۵)، از این موضوع مستثنی نبوده و به‌ویژه در دهه‌های اخیر، با خشکسالی‌های متعددی مواجه شده و مشکلات کم‌آبی، بحران آبی و افت کیفی و کمی منابع آبی را به خوبی تجربه کرده است. یکی از مهمترین راه‌حلهایی که برای غلبه بر مشکلات کم‌آبی و بحران آب در بخش کشاورزی تأکید می‌شود، توجه به افزایش شاخص بهره‌وری آب (WP)^۱ است. به‌طور عمومی، ارتقای بهره‌وری آب به استفاده بهینه‌تر از منابع آبی موجود اطلاق می‌شود و می‌توان نقش هر واحد آب در تولید ناخالص ملی و یا داخلی را در همین شاخص جستجو کرد (حیدری، ۱۳۹۴). تعریف این شاخص وابسته به مقیاس و محدوده‌ای است که به آن پرداخته می‌شود و اجزای آن در مقیاس‌هایی نظیر ناحیه ریشه گیاه، مزرعه، محدوده تحت آبیاری (شبکه آبیاری) و یا حوضه آبریز می‌تواند متفاوت باشد. به‌عنوان مثال، در مقیاس مزرعه، این شاخص را می‌توان از تقسیم میزان محصول تولیدی (کیلوگرم بر هکتار) به حجم آب مصرفی (مترمکعب بر هکتار) بدست آورد. در چنین شرایطی، این شاخص تحت عنوان شاخص بهره‌وری آب، بهره‌وری فیزیکی آب (WPP)^۲ و یا شاخص کارایی مصرف آب (WUE)^۳ نیز نام‌گذاری شده است. این شاخص نشان‌دهنده عملکرد محصول در ازای واحد حجم آبیاری مصرفی در مزرعه در واحد هکتار است. البته اجزای تشکیل‌دهنده این شاخص (عملکرد و آب مصرفی) از دیدگاه متخصصان مختلف نظیر آبیاری، زراعت، فیزیولوژی، اقتصاد و ...، گاهاً متفاوت از هم عنوان شده است (انتصاری و همکاران، ۱۳۸۶). به‌عنوان مثال، عملکرد محصول می‌تواند بیوماس، عملکرد خشک یا تر، پروتئین تولیدی، کالری ایجاد شده، درآمد محصول و غیره باشد. آب مصرفی نیز می‌تواند حجم آب تبخیر و تعرق شده از خاک و گیاه، حجم آب تعرق یافته از گیاه، حجم آب خالص ورودی به مزرعه با احتساب تلفات انتقال و توزیع آب در مزرعه و یا حجم آب ناخالص مصرفی در یک مزرعه باشد (حیدری، ۱۳۸۸). طبق تحقیقات انجام شده توسط عباسی و همکاران (۱۳۹۴)، اصطلاح کارایی مصرف آب برای اولین بار

توسط ویتس در سال ۱۹۶۶ مطرح و از تقسیم عملکرد محصول بر تبخیر و تعرق بدست آمده است (Kijne و همکاران، ۲۰۰۳) و پس از آن نیز به شکل‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. در حال حاضر، یکی از متداول‌ترین روش‌های محاسبه شاخص بهره‌وری آب در یک مزرعه، اندازه‌گیری حجم ناخالص آب مصرفی مزرعه در طول فصل رشد گیاه، اندازه‌گیری عملکرد برداشت شده از گیاه بر اساس شاخص غالب گیاه مورد نظر (مانند عملکرد دانه، عملکرد میوه، عملکرد تر محصول، عملکرد علوفه خشک و ...) و تقسیم این دو معیار بر همدیگر می‌باشد. به‌عنوان مثال، میانگین این شاخص برای محصولات گندم، یونجه، پسته و انار در سطح استان یزد به ترتیب برابر با ۰/۶۵، ۱/۴۸، ۰/۱۴ و ۱/۹۹ کیلوگرم بر مترمکعب گزارش شده است (رحیمیان و همکاران، ۱۳۹۶). برآوردهای صورت گرفته از میانگین این شاخص طی سال‌های ۹۲-۱۳۸۲ در کشور بیانگر مقادیر ۰/۹۴ تا ۱/۲۹ و به‌طور متوسط ۱/۰۷ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد (عباسی و همکاران، ۱۳۹۴). اگرچه این شاخص دارای نقایصی نظیر عدم امکان جمع‌پذیری یا میانگین‌گیری از محصولات الگوی کشت منطقه به منظور ارزیابی و مقایسه دو ناحیه مختلف اقلیمی با همدیگر می‌باشد، اما برای مقایسه یک محصول خاص (مثلاً گندم) در دو مزرعه واقع در یک منطقه اقلیمی و بررسی تأثیر مدیریت‌های مختلف آبیاری و عملیات زراعی انجام شده بر روی هر مزرعه، مناسب و کاربردی می‌باشد.

با توجه به تعریف شاخص بهره‌وری فیزیکی آب (کارایی مصرف آب) که در بخش فوق بیان شد، راهکارهای کلی ارتقای این شاخص، شامل کاهش میزان آب مصرفی به ازای تولید محصول در سطح کنونی و افزایش عملکرد به ازای واحد آب مصرفی است. بدین معنی که میزان محصول تولیدی، با حفظ منابع آبی موجود افزایش داده شود. البته در دهه‌های اخیر مسائلی نظیر کاهش نزولات جوی همراه با افت کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی و سایر مسائل مرتبط با بحران آب در سراسر کشور مشاهده شده است. لذا بخش اعظم جهت‌گیری‌ها و تصمیمات مدیریت منابع آب کشور به سمت صرفه‌جویی و کاهش برداشت از منابع با هدف جبران کسری مخازن آب به‌ویژه آب‌های زیرزمینی کشور گرایش پیدا کرده است. در چنین شرایطی، انتظار است که راهکارهای ارتقای شاخص بهره‌وری آب در مزرعه علاوه بر عدم تأثیر جدی بر افت تولید، به کاهش واقعی مصرف آب و کاهش برداشت از منبع هم منجر شوند و تنها در افزایش تولید محصول به ازای حجم آب مصرفی خلاصه نگردند. تحقیقات متعددی در زمینه ارائه راهکارهای افزایش شاخص کارایی مصرف آب در مزرعه انجام شده است. به‌عنوان مثال Keshavarz و همکاران (۲۰۰۵) راهکارهای افزایش کارایی مصرف آب را در سه گروه فنی، مدیریتی و زراعی خلاصه کرده و اذعان داشته‌اند

که به دلیل تنوع عوامل مدیریتی و محیطی موثر بر عملکرد محصول، این شاخص به سادگی قابل کنترل نبوده و ارتقای آن امری پیچیده و هزینه‌بر می‌باشد. مأمّن‌پوش و همکاران (۱۳۸۰)، حیدری (۱۳۹۴)، رنجبر و همکاران (۱۳۹۹) و نیکخواه و همکاران (۱۳۹۴)، افزایش این شاخص در مزرعه را هم از طریق بهبود عملیات زراعی (نظیر اصلاح نباتات و انتخاب ارقام متحمل به خشکی و شوری، تراکم و تاریخ مناسب کاشت، انتخاب الگوی مناسب کشت، کاربرد کودها و...) و هم از طریق بهبود مدیریت آبیاری و زهکشی (افزایش راندمان آبیاری، کاربرد روش‌های کم‌آبیاری مدیریت شده، ایجاد تناسب بین توزیع آب و نیاز آبی گیاه، انجام آبیاری تکمیلی، احداث زهکش‌های مزرعه‌ای و غیره) امکان‌پذیر دانسته‌اند. همچنین، بر اثرات مثبت تسطیح مناسب زمین و استفاده از تسطیح لیزری بر افزایش شاخص کارایی مصرف آب مزارع گندم در منطقه خوزستان تأکید شده است (انصاری‌دوست و همکاران، ۱۳۹۲). در تحقیق دیگری، حیدری و همکاران (۱۳۹۶) فاکتور مدیریت زراعی را به‌عنوان مهمترین فاکتور در بالابردن کارایی مصرف آب شناسایی کرده‌اند. آنها همچنین بر نقش مهارت و دانش فنی کشاورزی تأکید ویژه‌ای داشته و گفته‌اند که در شرایط عدم وجود مهارت و دانش کافی کشاورزی، استفاده از سیستم‌های مدرن آبیاری نیز نمی‌تواند مقدار این شاخص را نسبت به سیستم‌های آبیاری سطحی به‌طور موثر بهبود ببخشد. در مورد سامانه‌های سنتی آبیاری سطحی و تأثیر اصلاح و بهینه‌سازی آنها بر ارتقای شاخص کارایی مصرف آب محصولات زراعی، مطالعات دیگری در دست است که نتایج آن‌ها بیانگر امکان ارتقای شاخص کارایی مصرف آب از طریق اصلاح و بهینه‌سازی ابعاد کرت‌های آبیاری سطحی و همچنین توجه به مسائل به‌زراعی آن‌ها است (نیکخواه و همکاران ۱۳۹۴، رنجبر و همکاران، ۱۳۹۹). این پژوهش در نظر دارد تا اثر فاکتورهای عملکرد و حجم آب مصرفی بر شاخص بهره‌وری فیزیکی آب در دو سامانه غرقابی و موضعی اجرا شده در تعدادی از مزارع گندم استان یزد را بررسی نموده و آنها را با همدیگر مقایسه و تحلیل نماید تا از این طریق، نقش هر فاکتور در ارتقای شاخص بهره‌وری آب و ارجح بودن یک فاکتور بر دیگری را به تفکیک نوع سامانه آبیاری مشخص نماید.

مواد و روش‌ها

این پژوهش بر اساس تجزیه و تحلیل داده‌های مزارع گندم تحت آبیاری به دو روش غرقابی (کرتی و یا نواری) و موضعی (آبیاری قطره‌ای به روش نوارهای تیپ) در استان یزد انجام شده است. داده‌های مورد استفاده در دو مقیاس مختلف شامل مزارع تحقیقاتی و مزارع کشاورزان تهیه گردید. این داده‌ها شامل حجم

آب مصرفی (بر حسب مترمکعب در هکتار) و عملکرد محصول (بر حسب کیلوگرم در هکتار) به تفکیک نوع سامانه آبیاری می‌باشد. تعداد مزارع تحقیقاتی (اعم از تیمارهای مختلف شوری آب آبیاری، حجم آب مصرفی و تکرار آن‌ها در سال‌های مختلف) شامل ۲۷ مزرعه به روش آبیاری تیپ و ۹ مزرعه به روش غرقابی و تعداد مزارع بهره‌برداران شامل ۸ مزرعه به روش تیپ و ۱۲ مزرعه به روش غرقابی بوده است. نتایج تجزیه شیمیایی آب آبیاری تعدادی از مزارع مورد مطالعه در جدول (۱) ارائه شده است. در مقیاس تحقیقاتی، اندازه‌گیری حجم آب مصرفی برای دو روش آبیاری غرقابی و قطره‌ای نواری (تیپ) از طریق کنتور حجمی نصب شده در ابتدای هر کرت و قرائت کنتورها قبل و بعد از آبیاری‌ها و ثبت مقادیر تجمعی آن‌ها بر حسب مترمکعب بر هکتار برای هر تیمار به‌صورت جداگانه بوده است که طی سال‌های زراعی ۹۷-۱۳۹۶، ۹۸-۱۳۹۷ و ۹۹-۱۳۹۸ و در مزرعه تحقیقات شوری صدوق (ردیف‌های ۱ تا ۳ جدول ۱) انجام شده است. در مقیاس مزارع بهره‌برداران، اندازه‌گیری حجم آب مصرفی از طریق نصب کنتور حجمی در تعدادی از این مزارع و همچنین برآوردهای حجم تخلیه از استخر ذخیره آب مزرعه، اندازه‌گیری دبی سر مزرعه و در نظر گرفتن دفعات آبیاری در طول فصل و یا ساعات کارکرد سیستم آبیاری بوده است که طی سال‌های زراعی ۹۰-۱۳۸۹ و ۹۵-۱۳۹۴ در شهرستان‌های ابرکوه، خاتم و بهاباد انجام شده است. در مزارع تحقیقاتی، سعی گردیده است که تاریخ‌های آبیاری و مقادیر آب داده شده به مزرعه تابعی از تغییرات نیاز آبی گیاه در طول فصل رشد باشند. اما در مزارع بهره‌برداران، تنظیم تاریخ‌های آبیاری و حجم آب داده شده به مزرعه بر اساس تجارب کشاورزان و عرف هر منطقه بوده است. پس از برداشت محصول، عملکرد دانه در هر مزرعه اندازه‌گیری و به واحد کیلوگرم بر هکتار تبدیل گردیدند. با توجه به عملکرد دانه و حجم آب مصرفی در هر یک از تیمارهای تحقیقاتی و همچنین مزارع تحت بررسی، شاخص بهره‌وری یا کارایی مصرف آب گندم (WUE) از تقسیم عملکرد دانه بر حجم آب مصرفی محاسبه گردید:

$$WUE=Y/AW \quad (1)$$

که در آن، Y عملکرد دانه گندم بر حسب کیلوگرم بر هکتار و AW حجم آب مصرفی بر حسب مترمکعب بر هکتار است. سپس ارتباط بین WUE با اجزای تشکیل‌دهنده این شاخص (عملکرد و حجم آب مصرفی) در دو سیستم آبیاری غرقابی و تیپ از طریق رگرسیون خطی مورد بررسی، مقایسه و تحلیل قرار گرفت. در مورد هر یک از پارامترهای مذکور، ضریب تغییرات (CV) از تقسیم انحراف معیار بر میانگین نمونه‌ها بدست آمد و در تجزیه و تحلیل‌های مذکور استفاده شد:

$$CV=\sigma/\mu \quad (2)$$

که در آن σ انحراف معیار و μ میانگین داده‌ها می‌باشد.

جدول ۱- ویژگی‌های شیمیایی آب آبیاری در تعدادی از مزارع مورد مطالعه

شهرستان	نوع سامانه	بهره‌بردار	EC ($\mu\text{mho/cm}$)	pH	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^- (meq./lit)	Na^+	Cl^-	S.A.R
یزد	قطره‌ای و غرقابی	مزرعه تحقیقاتی	۳۱۱۰	۸/۳۹	۴/۷	۵/۹۹	۱/۵۳	۱۸/۳۵	۲۲/۷۸	۷/۹۴
یزد	قطره‌ای و غرقابی	مزرعه تحقیقاتی	۵۰۰۰	۸/۳۵	۵/۸۴	۹/۳۵	۱/۵۳	۳۴/۰۸	۳۴/۷۳	۱۲/۳۷
یزد	قطره‌ای و غرقابی	مزرعه تحقیقاتی	۸۱۴۰	۸/۲۳	۷/۷۲	۱۵/۲۴	۱/۸۳	۵۵/۲۹	۶۷/۲۴	۱۶/۳۲
ابركوه	قطره‌ای	فلاح‌زاده	۱۳۰۵	۶/۹	۴/۳۱	۲/۵۲	۴/۹۲	۶/۶۹	۴/۸۱	۳/۶۲
ابركوه	قطره‌ای	زارع	۱۳۷۹	۷/۳۴	۲/۱۸	۴/۵۱	۳/۸	۷/۲۱	۷/۷۷	۳/۹۴
ابركوه	قطره‌ای	حسام‌آباد	۷۹۰۰	۷/۴۲	۱۶/۵۵	۲۳/۳	۵/۹	۴۱/۷۵	۵۶/۷	۹/۳۵
ابركوه	قطره‌ای	دهقان	۱۴۰۰	-	-	-	-	-	-	-
ابركوه	قطره‌ای	کرم‌نژاد	۱۳۵۰	-	-	-	-	-	-	-
ابركوه	قطره‌ای	مولودپور	۱۱۸۰	-	-	-	-	-	-	-
ابركوه	غرقابی	صالحی	۱۶۷۳	-	-	-	-	-	-	-
ابركوه	غرقابی	غلامپور	۱۴۶۰	۷/۴۲	۳/۶۴	۴/۳۷	۴/۶۵	۷/۳۸	۶/۵۱	۳/۶۹
ابركوه	غرقابی	ابراهیمی	۲۳۷۰	۷/۳۵	۳/۷۴	۳/۹۶	۴/۹	۱۶/۲۱	۱۳/۰۹	۸/۲۶
ابركوه	غرقابی	جلال‌زاده	۱۸۱۰	۷/۳۱	۴/۶۷	۴/۷۳	۳/۴	۸/۱۳	۱۱/۰۶	۳/۷۵
خاتم	قطره‌ای	زارع	۳۵۰۰	۶/۶۲	۱۰/۳۵	۷/۱	۲/۵۸	۱۷/۳۷	۲۰/۷۶	۵/۸۸
خاتم	قطره‌ای	بابری	۱۶۹۹	۷/۱۶	۴/۶۵	۳/۱۴	۳/۷۵	۹/۱۴	۷/۰۴	۴/۶۳
خاتم	قطره‌ای	رسولی	۳۰۷۰	۸/۰۵	۴/۰۶	۶/۶۹	۴/۴۵	۲۰/۷۱	۱۲/۷۲	۸/۹۳
خاتم	قطره‌ای	سلطانی	۳۸۰۰	-	-	-	-	-	-	-
خاتم	غرقابی	هنزستان	۱۰۸۹	۸/۲۶	۳/۲۷	۲/۸	۴/۵۵	۶/۲۴	۳/۲۵	۳/۵۸
خاتم	غرقابی	فتحی	۲۰۲۰	۷/۵۱	۵/۳	۲/۲	۲/۳۵	۱۱/۲۱	۶/۱	۵/۷۹
خاتم	غرقابی	زارع	۳۴۸۰	۶/۷۶	۱۰/۸	۶	۷/۴۴	۱۶/۱۴	۲۲/۴	۵/۵۷
بهباد	غرقابی	صادقی	۴۱۵۰	۷/۳۲	-	-	۳/۳۵	۶/۴۵	۱۹/۶	-
بهباد	غرقابی	عبداللهی	۵۴۷۰	۷/۵۲	۹/۲	۱۰/۸	۲/۹	۳۶/۹	۳۰/۷	۱۱/۶۶

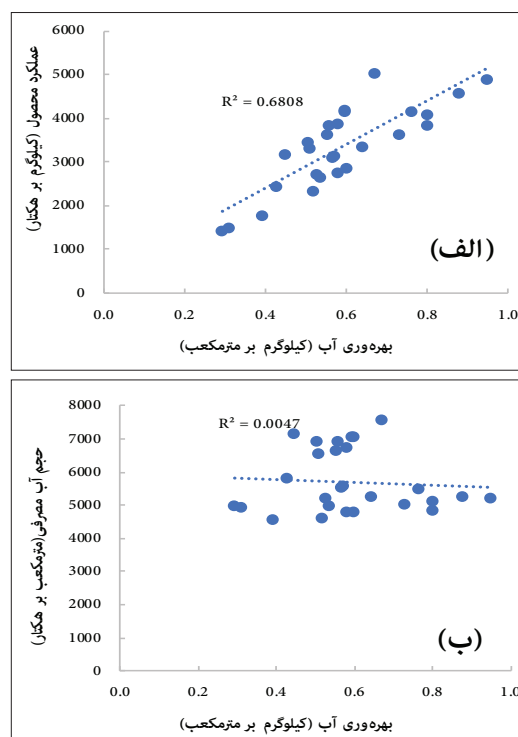
نتایج و بحث

الف- آبیاری موضعی (تیپ)

در شکل (۱- الف) ارتباط بین شاخص بهره‌وری آب با مقادیر عملکرد محصول گندم و حجم آب مصرفی سامانه آبیاری تیپ در مزرعه تحقیقاتی نشان داده شده است. بر این اساس، ضریب تبیین (R^2) بین شاخص بهره‌وری آب و عملکرد گندم ۰/۶۸ بوده، در حالی که همبستگی قابل توجهی بین شاخص بهره‌وری و حجم آب مصرفی گندم در این تیمارها دیده نمی‌شود (شکل ۱- ب). این موضوع بیانگر تأثیر قابل توجه عملکرد محصول بر شاخص WUE و نقش کمتر حجم آب مصرفی بر این شاخص در روش آبیاری تیپ است. در این تیمارها، به دلیل اینکه حجم آب مصرفی مزرعه توسط سامانه آبیاری تیپ به یک مقدار کنترل شده و نسبتاً ثابتی رسیده است، لذا تغییرات WUE تقریباً مستقل از حجم آب مصرفی گندم و عمدتاً وابسته به تغییرات عملکرد محصول گندم

بوده است؛ بطوری‌که در یک شرایط نسبتاً مشابه از نظر حجم آب مصرفی در همه تیمارها، با افزایش عملکرد محصول، شاخص WUE ارتقاء یافته و بالعکس. ضریب تغییرات حجم آب مصرفی و عملکرد گندم در مزارع تحت بررسی، به ترتیب ۰/۱۷ و ۰/۲۸ بدست آمده که نشان‌دهنده کمتر بودن دامنه تغییرات حجم آب مصرفی نسبت به دامنه تغییرات عملکرد محصول در مزارع مذکور است. حجم آب مصرفی گندم در تیمارهای تحت بررسی بین ۴۵۶۵ تا ۷۵۳۱ مترمکعب بر هکتار و عملکرد محصول بین ۱۴۵۰ تا ۵۰۴۲ کیلوگرم بر هکتار بوده است. یکی از قابلیت‌های سامانه آبیاری موضعی تیپ در مزارع گندم، کاهش حجم آب مصرفی مزرعه از طریق کاهش هدررفت عمقی و سطحی آب و در نهایت، نزدیک‌تر شدن مقادیر حجم آب مصرفی مزرعه به نیاز آبی گندم است. به همین دلیل است که در صورت مدیریت مناسب آبیاری مزارع گندم در روش تیپ، دامنه تغییرات مقادیر آب مصرفی سامانه موضعی تیپ در مقایسه با روش‌های غرقابی،

کمتر بوده و مقادیر مصرف آب در مزارع مختلف (بر خلاف مقادیر عملکرد) نسبتاً به هم نزدیک خواهند بود. این موضوع به خصوصیت ذاتی سامانه آبیاری موضعی تیپ برمی‌گردد که در آن، آب به‌صورت کنترل شده و مهار شده در سطح زمین توزیع می‌شود و امکان هدررفت و مصرف بی‌رویه آب کمتر از روش‌های آبیاری سطحی (غرقابی) می‌باشد. در واقع پس از جایگزینی روش آبیاری غرقابی با تیپ در مزارع گندم، نگرانی‌ها بابت مصرف بی‌رویه آب و توجه به میزان آب مصرفی در واحد سطح مزرعه کمتر می‌گردد. ولی در مقابل، مسائل به‌نژادی و مدیریت‌های زراعی گندم نظیر تاریخ و تراکم مناسب کاشت، انتخاب ارقام مناسب و پربازده، رعایت تعداد و دور آبیاری‌ها، عملیات مناسب تغذیه و کوددهی، کنترل آفات و بیماری‌ها نقش قابل توجهی در عملکرد محصول و نهایتاً افزایش WUE خواهد داشت. با توجه به رابطه مستقیم عملکرد محصول با میزان درآمد بهره‌بردار، بدیهی است که افزایش صرفه اقتصادی استفاده از تیپ برای گندم در گرو توجه به این موارد خواهد بود. لذا رعایت این نکات از جانب بهره‌برداران سامانه آبیاری تیپ، بسیار ضروری و پراهمیت خواهد بود.

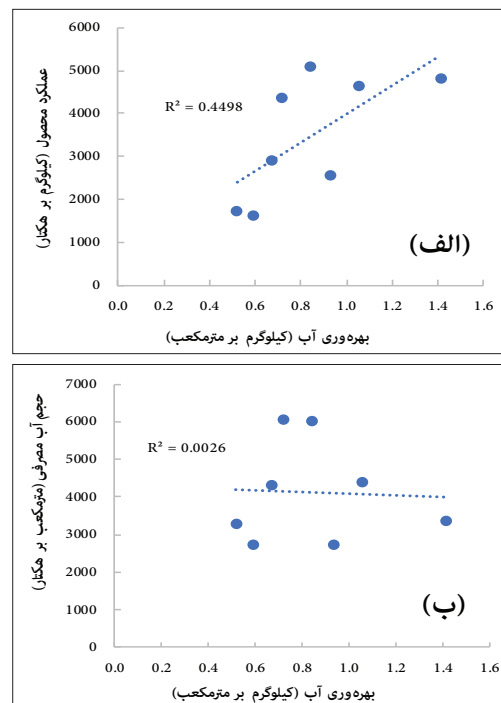


شکل ۱- ارتباط رگرسیونی بین شاخص بهره‌وری آب گندم با عملکرد محصول (شکل الف) و حجم آب مصرفی (شکل ب) در سامانه آبیاری تیپ مزارع تحقیقاتی طی سال‌های ۹۹-۱۳۹۶

ارتباط بین شاخص بهره‌وری آب با مقادیر عملکرد محصول گندم و حجم آب مصرفی در تعدادی از مزارع کشاورزان استان یزد

که از روش آبیاری تیپ برای زراعت گندم استفاده می‌نمایند نیز بررسی شد (شکل ۲). بر این اساس، ضریب تبیین (R^2) بین شاخص بهره‌وری آب و عملکرد گندم ۰/۴۵ بوده (شکل ۲ - الف)، در حالی که همبستگی قابل توجهی بین شاخص بهره‌وری آب و حجم آب مصرفی گندم (شکل ۲ - ب) در این مزارع دیده نمی‌شود. ضریب تغییرات (CV) حجم آب مصرفی و عملکرد گندم در مزارع تحت بررسی به ترتیب ۰/۳۳ و ۰/۴۱ بدست آمده که نشان‌دهنده کمتر بودن دامنه تغییرات حجم آب مصرفی نسبت به دامنه تغییرات عملکرد محصول در این مزارع و تأثیرات کمتر این پارامتر بر شاخص WUE بوده است. بایستی به این نکته هم اشاره شود که در مقایسه با نتایج تیمارهای تحقیقاتی (شکل ۱)، دامنه تغییرات حجم آب مصرفی به روش تیپ در مزارع کشاورزان (یعنی ۰/۳۳) بیشتر از تیمارهای تحقیقاتی (یعنی ۰/۱۷) بوده که نشان می‌دهد با بهبود مدیریت آبیاری مزرعه، امکان کاهش ضریب تغییرات در مزارع کشاورزان به مقادیر پایین‌تر از ۰/۳۳ نیز محتمل و ممکن خواهد بود. نتایج نشان می‌دهد که در مزارع کشاورزان صرفه‌جویی قابل توجهی در آب کاربردی از طریق سامانه تیپ صورت گرفته و باعث ارتقای شاخص کارایی مصرف آب تا مرز ۱/۴۱ کیلوگرم بر هکتار شده است. اما وقوع این مسأله در حالی بوده که در برخی از مزارع، کاهش جدی عملکرد در واحد سطح مشاهده شده و حتی منجر به عدم برداشت محصول با کمباین به دلیل عدم صرفه اقتصادی برای بهره‌بردار گردیده است. در واقع، برتری سیستم آبیاری موضعی تیپ نسبت به روش‌های آبیاری سنتی از نظر صرفه‌جویی در مصرف آب، نتوانسته کشاورزان را از نظر عملکرد محصول در واحد سطح اقناع نماید و نارضایتی‌هایی را نیز به دنبال داشته است. بنابراین، نکته بسیار مهم در این گونه مزارع، ضرورت توجه بیشتر بهره‌برداران به پارامتر عملکرد محصول و تلاش برای تولید مناسب و اقتصادی و همچنین کمتر کردن دامنه تغییرات این پارامتر در سطح مزارع تیپ است؛ به نحوی که بهره‌برداران با اطمینان و اعتماد کافی بتوانند یک عملکرد قابل قبول و مطمئن در روش تیپ (همانند روش‌های غرقابی) داشته باشند. تجارب قبلی در این زمینه نشان داده است که علی‌رغم کاهش محتمل آب مصرفی گندم در آبیاری تیپ نسبت به غرقابی و ارتقای شاخص WUE، امکان عدم دستیابی بهره‌برداران به عملکرد مطمئن و قابل توجه در واحد سطح وجود دارد که همین مسأله می‌تواند موجب عدم موفقیت اجرای این سامانه در مزارع گندم و نارضایتی بهره‌برداران شود (رحیمیان، ۱۳۹۶). بنابراین پس از اجرای سامانه آبیاری موضعی در مزارع گندم، توجه ویژه به مسائل به‌نژادی و به‌زراعی گندم از جانب بهره‌برداران و مروجین بخش کشاورزی و توصیه راهکارهای حفظ و ارتقای عملکرد گندم در شرایط آبیاری موضعی (مانند توجه به رقم بذر، تاریخ کاشت، تراکم کاشت بذر، تغذیه و ...) بسیار ضروری بوده و مورد تأکید می‌باشد.

ارتباط بین شاخص بهره‌وری آب (WUE) با عملکرد گندم و حجم آب مصرفی در مزارع کشاورزانی که از سامانه غرقابی استفاده کرده‌اند، نیز بررسی گردید (شکل ۴). بر این اساس، ضریب تبیین (R^2) بین شاخص بهره‌وری آب و عملکرد گندم ۰/۲۷ (شکل ۴-الف) و بین شاخص بهره‌وری آب و حجم آب مصرفی گندم در حدود ۰/۵۱ (شکل ۴-ب) بدست آمده است. در مزارع گندم تحت مطالعه، ضریب تغییرات حجم آب مصرفی و عملکرد گندم به ترتیب برابر با ۰/۲۳ و ۰/۱۶ بوده است. به عبارتی دیگر، تنوع اعداد و ارقام حجم آب مصرفی بیشتر از تنوع اعداد و ارقام عملکرد محصول در مزارع تحت مطالعه بوده است. بطور عمومی، بهره‌برداران مزارع گندم در این قبیل سامانه‌ها از عملکرد محصول مزرعه خود تا حدودی مطمئن بوده و دستیابی به عملکردهای قابل قبول را سهل‌الوصول و ممکن می‌بینند. سابقه طولانی مدیریت مزارع گندم به روش غرقابی در کشور و تجارب و دانش بهره‌برداران در زمینه عملیات مدیریتی و تغذیه‌ای گیاه در شرایط غرقابی از دلایل اصلی این موضوع است. البته، بخشی از تفاوت‌های حجم آب مصرفی مزارع مختلف می‌تواند ناشی از تفاوت در اقلیم، کیفیت آب آبیاری و نهایتاً نیاز آبی مزرعه باشد، اما در حقیقت بخش زیادی از این تفاوت‌ها به تنوع در دانش، تجارب و سلیقه بهره‌برداران در مدیریت آبیاری و همچنین، تنوع در میزان فراهمی آب هر مزرعه وابسته است. تفسیر نتایج این مزارع بیانگر این نکته است که حتی در صورت توجه به راهکارهای افزایش تولید در یک مزرعه گندم، در اثر بی‌تفاوتی و بی‌توجهی بهره‌برداران نسبت به حجم آب مصرفی مزرعه خود، احتمال مصرف بی‌رویه آب در مزارع غرقابی و در نهایت، افت شدید شاخص WUE وجود دارد. اصلاح موارد اخیر از طریق فرهنگ‌سازی و آموزش بهره‌برداران با هدف جایگزینی سلیقه و سنن بهره‌برداران با اصول علمی و مدیریت صحیح آبیاری، امری ممکن می‌باشد. در این مزارع، اقدامات بهینه‌سازی مصرف آب می‌بایست در اولویت اقدامات بهره‌برداران و تصمیم‌گیران مربوطه برای ارتقای شاخص WUE قرار بگیرد. تسطیح دقیق اراضی، بهینه‌سازی ابعاد کرت‌های آبیاری سنتی با توجه به پارامترهای دبی، شیب زمین و بافت خاک، کنترل و تنظیم دبی آب ورودی به کرت‌ها به منظور افزایش راندمان کاربرد آب در مزرعه، مدیریت زمان قطع جریان آب به منظور بهینه‌سازی عمق آبیاری و جلوگیری از هدررفت عمقی در حین پیشروی آب در کرت‌ها و راهکارهایی از این قبیل، مورد تأکید و توصیه می‌باشند. عمده این راهکارها نوعاً هزینه‌بر و پیچیده نیستند و پس از آموزش بهره‌برداران توسط مروجین و کارشناسان، دارای قابلیت اجرا و پیاده‌سازی در عرصه، توسط بهره‌برداران هستند.



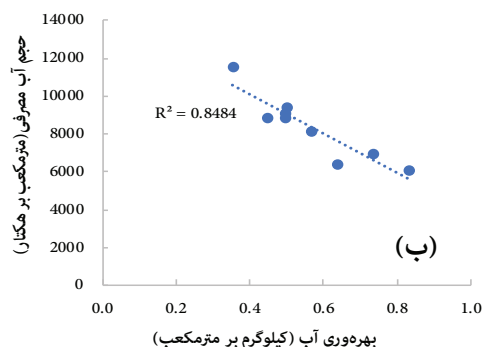
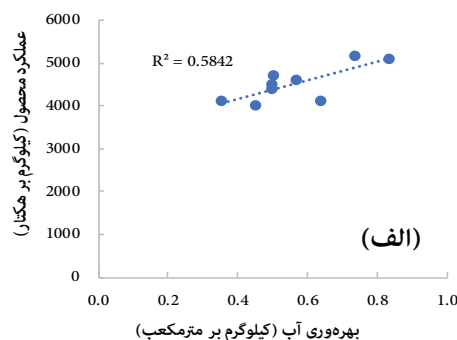
شکل ۲- ارتباط رگرسیونی بین شاخص بهره‌وری آب گندم با عملکرد محصول (شکل الف) و حجم آب مصرفی (شکل ب) در سامانه‌های آبیاری تیپ مزارع کشاورزان طی فصل زراعی ۹۵-۱۳۹۴

ب- آبیاری غرقابی

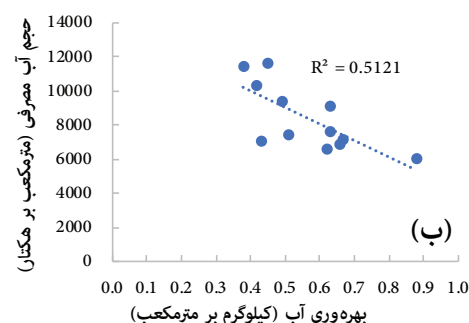
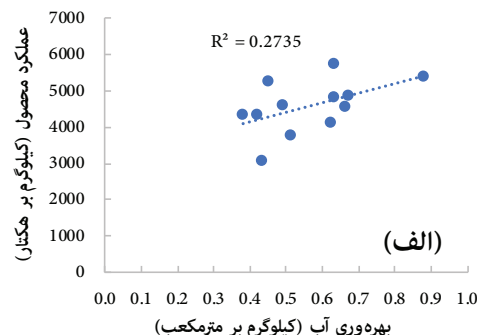
در شکل (۳) ارتباط بین شاخص بهره‌وری آب با مقادیر عملکرد گندم و حجم آب مصرفی در سامانه آبیاری غرقابی اجرا شده در مزرعه تحقیقاتی نشان داده شده است. بر این اساس، ضریب تبیین (R^2) بین شاخص بهره‌وری آب و عملکرد گندم ۰/۵۸ (شکل ۳-الف) و بین شاخص بهره‌وری آب و حجم آب مصرفی گندم در حدود ۰/۸۵ (شکل ۳-ب) بدست آمده است. این موضوع بیانگر تأثیرپذیری بیشتر شاخص WUE از پارامتر آب مصرفی در روش‌های غرقابی و نقش کم‌رنگ‌تر عملکرد محصول بر روی WUE در این شیوه آبیاری است. حجم آب مصرفی در تیمارهای مورد مطالعه بین ۶۱۲۶ تا ۱۱۵۶۸ متر مکعب بر هکتار و ضریب تغییرات آن برابر با ۰/۲۰ است. این در حالی است که عملکرد گندم بین ۴۵۲۱ تا ۵۱۴۵ کیلوگرم بر هکتار و ضریب تغییرات آن برابر با ۰/۰۹ بوده است. بنابراین، ارتقای شاخص بهره‌وری آب در سامانه آبیاری غرقابی، مستلزم توجه بیشتر به پارامتر حجم آب مصرفی و اجرای راهکارهای کاهش هدررفت آب و بهینه‌سازی این شیوه آبیاری خواهد بود. پس از آن، مسائل زراعی و به‌نژادی گندم در درجه بعدی اهمیت و تأثیر بر ارتقای WUE، قرار خواهند داشت.

نتیجه گیری

نتایج این پژوهش که در منطقه یزد انجام شده است، نشان داد که در روش آبیاری سطحی (غرقابی)، هم کاهش حجم آب مصرفی و هم افزایش عملکرد عملکرد بر ارتقای WUE گندم نقش داشته که از این دو، اولویت پرداختن به مقوله کاهش آب مصرفی بالاتر از مقوله افزایش عملکرد محصول بوده است. به عبارتی دیگر برای افزایش WUE گندم در روشهای غرقابی باید بیشتر سراغ راهکارهای بهبود و مدیریت مصرف آب در مزرعه (نظیر تسطیح دقیق زمین، بهینه سازی ابعاد کرت‌ها، تنظیم دبی ورودی به کرت‌ها، مدیریت زمان قطع جریان آب و...) را گرفت و راهکارهای افزایش عملکرد در واحد سطح (نظیر مدیریت‌های زراعی و اقدامات به‌نژادی گندم) نقش کم‌رنگ‌تری در ارتقای WUE این گونه مزارع ایفا می‌کنند. بطور عمومی، بهره‌برداران مزارع گندم در سامانه‌های آبیاری سطحی با تکیه بر دانش و تجارب قبلی، از نظر عملکرد محصول مزرعه خود تا حدودی مطمئن بوده و دستیابی به عملکردهای قابل قبول را سهل‌الوصول و ممکن می‌بینند. در حالی که در اثر بی‌توجهی و مغفول ماندن کشاورزان از مسأله حجم آب مصرفی در این مزارع، امکان افت شدید شاخص WUE وجود دارد. اما در مورد آبیاری موضعی گندم به روش قطره‌ای (تیپ)، شرایط به شکل دیگری است. بطوری‌که فاکتور عملکرد محصول نقش اساسی و تعیین‌کننده‌تری در شاخص بهره‌وری آب گندم ایفا کرده و نقش مقوله آب مصرفی کم‌رنگ‌تر و ناچیزتر بوده است. در این گونه مزارع، به دلیل خصوصیت ذاتی سامانه آبیاری تیپ، آب به‌صورت کنترل شده و مهار شده در مزرعه، مصرف می‌شود. بنابراین، بهره‌برداران نسبت به مصرف بهینه و کاهش حجم آب مصرفی مزرعه خود تقریباً اطمینان دارند و مهمترین دغدغه آنها، امکان افت محصول تحت شرایط آبیاری تیپ است. لذا باید بیشتر به مسائل به‌نژادی و عملیات زراعی گندم در این مزارع توجه شود. انتخاب ارقام مناسب و پربازده، توجه به تاریخ و تراکم مناسب کاشت، رعایت تعداد و دور آبیاری‌ها، عملیات مناسب تغذیه و کوددهی، کنترل آفات و بیماری‌ها می‌تواند در افزایش WUE مزارع تیپ بسیار تعیین‌کننده و اثربخش باشد. اهمیت این مسأله در حدی بوده که در برخی مزارع گندم آبیاری شده با روش تیپ در استان یزد، علی‌رغم کاهش قابل توجه حجم آب مصرفی و ارتقای کمی شاخص WUE، به دلیل افت عملکرد محصول در واحد سطح و کاهش درآمد بهره‌بردار، اجرای سامانه تیپ در مزارع گندم با چالش و وقفه اساسی مواجه شده است. علت افت تولید در این گونه مزارع، مغفول ماندن بهره‌برداران سامانه تیپ از مسائل مدیریتی موثر بر عملکرد محصول در واحد سطح بوده است.



شکل ۳- ارتباط رگرسیونی بین شاخص بهره‌وری آب گندم با مقادیر عملکرد محصول و حجم آب مصرفی سامانه آبیاری غرقابی اجرا شده در مزارع تحقیقاتی طی سال‌های ۹۹-۱۳۹۶



شکل ۴- ارتباط رگرسیونی بین شاخص بهره‌وری آب گندم با مقادیر عملکرد محصول و حجم آب مصرفی در تعدادی از سامانه آبیاری غرقابی اجرا شده در مزارع کشاورزان استان یزد طی سال‌های ۹۵-۱۳۹۴

- 1-Water Productivity
- 2-Physical Water Productivity
- 3-Water Use Efficiency

منابع

انتصاری، م.ر.، حیدری، ن.، خیرابی، ج.، علایی، م.، فرش، ع.ا.، وزیر، ژ.، دهقانی‌سانج، ج.، سادات‌میری، م. ج.، کاظمی، پ. و میرلطیفی، م. ۱۳۸۶. کارایی مصرف آب در کشت گلخانه‌ای. انتشارات گروه کار استفاده پایدار از منابع آب برای تولید محصولات کشاورزی. کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران.

انصاری‌دوست، ش.، اسکندری، ح.ا. و چگنی، م. ۱۳۹۲. اثر نوع تسطیح‌کننده بر شاخص‌های تسطیح‌زمین، عملکرد دانه و کارایی مصرف آب گندم در منطقه خوزستان، نشریه دانش کشاورزی و تولید پایدار، ۲۳(۲): ۷۷-۸۵.

حیدری، ن. ۱۳۸۸. مسائل، چالش‌ها و راهبردهای ارتقای بهره‌وری آب کشاورزی در ایران. مجموعه مقالات دوازدهمین همایش کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران (مدیریت آبیاری در ایران، چالش‌ها و چشم‌اندازها). تهران.

حیدری، ن. ۱۳۹۴. مسائل و راهکارهای افزایش کارایی مصرف آب در مزارع کشور. نشریه مدیریت آب در کشاورزی، ۲(۱): ۳۳-۴۸.

حیدری، ن.، دهقانی‌سانج، ج. و علایی‌تفتی، م. ۱۳۹۶. مدیریت تقاضا و مصرف آب کشاورزی در ایران. نشر تهران، کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران.

دهقانی‌سانج، ج. و نجوانی‌مقدم، م. ۱۳۸۵. کاربرد شاخص کارایی مصرف آب و تابع عملکرد در تعیین الگوی کشت با هدف افزایش کارایی مصرف آب. دومین کنفرانس مدیریت منابع آب. اصفهان.

رحیمیان، م.ج. ۱۳۹۶. ارزیابی فنی و اقتصادی سیستم آبیاری تیپ بر روی گندم و مقایسه با روش‌های غرقابی در استان یزد، گزارش

علمی فنی مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران.

رحیمیان، م.ج.، حاجی‌حسینی، ع.، اسپرس، ر. و بیرامی، ح. ۱۳۹۶. تدوین سند بهره‌وری آب کشاورزی در استان یزد، گزارش علمی فنی به شماره ثبت ۵۳۲۹۸، مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران.

رنجبر غ.ج.، رحیمیان م.ج.، هاشمی‌نژاد، ی.، شیران‌تفتی، م. و ساکی‌حسینی، ع. ۱۳۹۹. بهبود عملکرد و کارایی مصرف آب گندم در اراضی پایین دست حوزه کرخه، نشریه دانش آب و خاک، ۳۰(۱): ۱۵-۲۸.

عباسی، ف.، ناصری، ا.، سهراب، ف.، باغانی، ج.، عباسی، ن. و اکبری، م. ۱۳۹۴. ارتقای بهره‌وری مصرف آب، گزارش تحلیلی سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی.

مأم‌پوش، ع. ر.، عباسی، ف. و موسوی، س. ف. ۱۳۸۰. ارزیابی بازده کاربرد آب در روش‌های آبیاری سطحی در برخی مزارع استان اصفهان. مجله تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، ۲(۹): ۴۳-۵۸.

نیکخواه، م.، رحیمیان، م.ج.، روستا، م.ج. و رزاقیان، ح. ۱۳۹۴. ارزیابی برخی راهکارهای مدیریتی افزایش شاخص کارایی مصرف آب گندم در شرایط شور (مطالعه موردی: منطقه ابرکوه در استان یزد). نشریه آب و توسعه پایدار، ۱(۳): ۵۳-۵۸.

Keshavarz A., Ashrafi S., Hydari N., Poursan M. and Farzaneh E. 2005. Water allocation and pricing in agriculture of Iran. In Water conservation, reuse, and recycling: proceeding of an Iranian American workshop, The National Academies Press: Washington, DC (pp. 153-172).

Kijne J. W., Toungh T. P., Bennett J., Bouman B. and Oweis T. 2003. Ensuring food security via improvement in crop water productivity. CGIAR challenge program on water and food (CP), Analytical Report, ICARDA, Jordan.

Article Type: Applied

نوع مقاله: کاربردی

Investigating and Comparing the Feasibility of Using Anaerobic Digesters in Wastewater Treatment Plants with SBR and MLE Processes

M. Mehregan^{1*}, M. Tamjidi Farahbakhsh², A. Kazemi³,
M. Rouhbakhsh⁴, A. Akbarzadeh⁵

1, 2, 3- Associate Professor, MSc. Graduate in Faculty of Mechanical Engineering and MSc. Graduate in Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Iran. 4, 5- BSc. of Mechanical Engineering in Azad University of Mashhad and PhD student of Electrical Engineering in Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad Water and Wastewater Company, Mashhad, Iran.

*(Corresponding Author Email: chahartaghi@shahroodut.ac.ir)

Received: 28-02-2021

Revised: 13-05-2021

Accepted: 17-05-2021

Available Online: 06-12-2021

بررسی و مقایسه امکان‌سنجی استفاده از هاضم‌های بی‌هوازی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب با فرایندهای SBR و MLE

محمود مهرگان^{۱*}، میلاد تمجیدی فرح بخش^۲، اشکان کاظمی^۳، مسعود روحبخش^۴، امیر اکبرزاده^۵

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشیار، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک و دانش‌آموخته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران. ۴ و ۵- به ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی مکانیک دانشگاه آزاد اسلامی مشهد و دانشجوی دکتری برق دانشگاه فردوسی مشهد، شرکت آب و فاضلاب مشهد، ایران.

* (نویسنده مسئول، E-Mail: chahartaghi@shahroodut.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۱۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۲/۲۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۰/۰۹/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۲۷

Abstract

Nowadays, due to the decrease in fossil fuel resources, generating biogas from corruptible waste is getting attention. Anaerobic digesters are utilized in wastes management and produce renewable energy from it. Generally, the anaerobic digesters convert wastes to methane and carbon dioxide. Effective parameters on the anaerobic digestion process are reactor configuration, temperature range, mixing system, and waste type. In this paper, using of produced sludge in an anaerobic digester was investigated for municipal WWTP with SBR and MLE processes. For this means, Altemour and Kheine-Arab wastewater treatment plants (WWTPs) have been considered as case studies. The applied processes in Kheine-Arab and Altemour WWTPs are SBR and MLE, respectively. Results comparison shows that the produced sludge from the SBR process (Kheine-Arab WWTP) has no suitable potential for biogas production. However, there is potential for biogas production at the Altemour treatment plant, and investment can be made in the future on Altemour WWTP.

Keywords: Anaerobic Digestion, SBR Process, MLE Process, Kheine_Arab Wastewater Treatment Plant, Altemour Wastewater Treatment Plant.

چکیده

امروزه به علت کاهش منابع سوخت‌های فسیلی، تولید بیوگاز از ضایعات فسادپذیر مورد توجه قرار گرفته است. هاضم‌های بی‌هوازی برای تولید انرژی تجدیدپذیر از ضایعات قابل تجزیه و همچنین مدیریت کردن پسماندها استفاده می‌شوند. به‌طورکلی هاضم‌های بی‌هوازی مواد فسادپذیر را به متان و کربن دی اکسید تبدیل می‌کنند. از عوامل تأثیرگذار بر فرایند هضم بی‌هوازی می‌توان به نوع راکتور، محدوده دمایی راکتور، نوع اختلاط و پسماند مورد استفاده نام برد. در این پژوهش به بررسی استفاده از لجن تولید شده در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب با فرایندهای SBR و MLE در هاضم‌های بی‌هوازی پرداخته شده است. به این منظور، تصفیه‌خانه‌های فاضلاب خین عرب و التیمور در مشهد که فرایندهای آن‌ها به ترتیب از نوع SBR و MLE می‌باشد، به عنوان نمونه‌های مورد مطالعه در نظر گرفته شده است. مقایسه نتایج به دست آمده نشان می‌دهد لجن تولید شده از فرایند SBR (تصفیه‌خانه خین عرب) قابلیت مناسبی برای تولید بیوگاز ندارد، درحالی‌که پتانسیل تولید بیوگاز در تصفیه‌خانه التیمور وجود دارد و می‌توان در آینده بر روی تصفیه‌خانه فاضلاب التیمور سرمایه‌گذاری نمود.

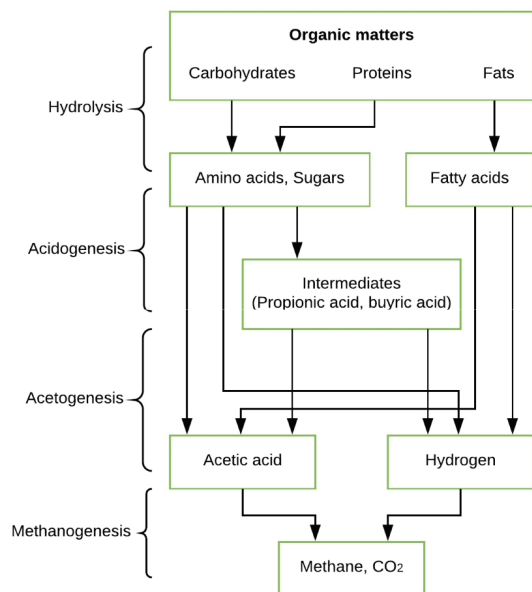
واژه‌های کلیدی: هاضم بی‌هوازی، فرایند SBR، فرایند MLE تصفیه‌خانه فاضلاب خین عرب، تصفیه‌خانه فاضلاب التیمور.

امروزه کاهش مصرف انرژی‌های فسیلی و جایگزین کردن بخشی از آن‌ها با انرژی‌های تجدیدپذیر برای تولید انرژی الکتریکی از اهداف بسیاری از محققین قرار گرفته است (Ali و همکاران ۲۰۲۰). توسعه شهرها و افزایش جمعیت جهانی منجر به افزایش تولید انواع پسماندها شده به گونه‌ای که خسارت زیادی به محیط‌زیست وارد کرده و از طرفی مدیریت دفع و یا بازیافت آن‌ها هزینه‌های بالایی را در پی دارد. به منظور کاهش آلودگی فاضلاب، تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری طراحی شده و بالا رفتن استانداردهای پساب خروجی، به افزایش مصرف انرژی در آن‌ها کشیده شده است، به گونه‌ای که هزینه مصرف انرژی در یک تصفیه‌خانه فاضلاب متداول، ۲۵ تا ۴۰ درصد هزینه‌های اجرایی تصفیه‌خانه را شامل می‌شود (Koupaie و همکاران، ۲۰۱۷). در مقابل لجن تولید شده در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب یکی از منابع تجدیدپذیر انرژی می‌باشد که می‌توان با استفاده از آن بخشی از انرژی مورد نیاز تصفیه‌خانه‌ها را تأمین نمود. یکی از روش‌های متداول در بازیابی انرژی لجن، استفاده از هاضم‌های بی‌هوازی می‌باشد که در نتیجه آن بخشی از مواد فرار لجن به بیوگاز تبدیل می‌شود. هضم بی‌هوازی یک سیستم پیچیده است که شامل چندین مرحله تغییرات زیستی بر روی مواد آلی می‌شود، این مراحل عبارت‌اند از: هیدرولیز، اسیدسازی، استات سازی و متان سازی (شکل ۱). هرکدام از این مراحل شرایط عملیاتی مخصوص به خود را دارند که مهم‌ترین آن‌ها شرایط عملیاتی مرحله متان‌سازی است (Mir و همکاران، ۲۰۱۶). باتوجه به اینکه استفاده از این منبع انرژی تجدیدپذیر پیچیدگی‌های ویژه‌ای دارد، به منظور کاربردی کردن آن باید تمامی جنبه‌های مختلف بررسی شود.

Rulkens (۲۰۰۸) روش‌های استفاده از لجن تولید شده در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به عنوان سوخت تجدیدپذیر را بررسی کرد. عمده‌ترین این روش‌ها عبارت‌اند از: هضم بی‌هوازی، هضم هم‌زمان، سوزاندن، سوزاندن همراه با زغال‌سنگ، سوزاندن همراه با ضایعات آلی، گازی‌سازی و غیره. Gikas (۲۰۱۷) یک تصفیه‌خانه فاضلاب با فرایندهای نوین پیشنهاد داده است که مصرف انرژی را به شدت کاهش می‌دهد. با استفاده از تحقیقات پیشین انجام شده در مورد سیستم گازی سازی و هضم بی‌هوازی، بیان شده مقدار برق تولید شده از برق مصرفی تصفیه‌خانه جدید بیشتر است. Hernández-Sancho (۲۰۱۱) صرفه‌جویی انرژی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در اسپانیا را بررسی کردند. در این تحقیق مشخص شد صرفه‌جویی انرژی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب اسپانیا نزدیک به ۱۰ درصد است. منظور از صرفه‌جویی انرژی مقدار انرژی مصرفی

پس از بهینه کردن فرایندهای تصفیه‌خانه نسبت به مقدار انرژی مصرفی حال حاضر می‌باشد. آن‌ها بیان کردند ظرفیت تصفیه‌خانه، مقدار مواد آلی حذف شده و نوع راکتور هوادهی مورد استفاده، از عوامل مؤثر بر صرفه‌جویی انرژی هستند و عمر تصفیه‌خانه تأثیری بر آن ندارد. Dos Santos (۲۰۱۶) روشی برای بررسی قابلیت انرژی و اقتصادی به منظور تولید انرژی یا بیوگاز در فرایند بی‌هوازی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب برزیل را بررسی کردند. نتایج نشان داد قابلیت اقتصادی تنها برای شهرهایی با جمعیت بیشتر از ۳۰۰ هزار نفر وجود دارد. Junior و همکاران (۲۰۲۰) روش‌های پیش هضم لجن و هضم هم‌زمان آن به منظور افزایش تولید بیوگاز در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب را بررسی کردند. آن‌ها مکانیزم‌ها، فواید و معایب و جنبه‌های فنی و اقتصادی هر روش را بررسی کردند و پیشنهاد کردند با وجود ارزیابی‌های صورت گرفته، استفاده از هر روش باید باتوجه به اهداف مورد انتظار به طور دقیق بررسی شود. Singh و همکاران (۲۰۲۰) چرخه حیات نیروگاه‌های بزرگ مقیاس بیوگاز سوز بر پایه لجن را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد نیروگاه‌های بیوگاز سوز در مقایسه با نیروگاه‌های ذغال سنگ گازهای گلخانه‌ای کمتری منتشر می‌کند. همچنین لجن هضم شده را می‌توان به عنوان کود جایگزین کودهای شیمیایی نمود. به عنوان یک نتیجه کلی، احداث نیروگاه‌های بیوگاز سوز بر پایه لجن، تأثیرات مثبتی بر روی محیط‌زیست نشان داده است. Lafratta و همکاران (۲۰۲۰) تولید بیوگاز و برق تولیدی از آن در حالت دینامیکی در هاضم‌های بی‌هوازی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب را بررسی کردند. منظور از حالت دینامیکی، تغییر در نرخ ورودی لجن به هاضم و در نتیجه تغییر در مقدار بیوگاز و برق تولیدی ناشی از آن می‌باشد که دلیل این امر، تعدد تعرفه‌های خرید برق تولیدی در طول روز در کشور انگلستان می‌باشد. نتایج نشان داد هاضم‌های بی‌هوازی متداول و همچنین هاضم‌های پیشرفته با فرایند پیش هضم هیدرولیز گرمایی، قابلیت انعطاف‌پذیری برای تولید بیوگاز دینامیک دارند. همچنین مقدار بیوگاز تولیدی نزدیک به ۳/۶ درصد در هاضم‌های متداول و در نزدیک به ۴/۸ درصد در هاضم با فرایند پیش هضم در مقایسه با حالت رژیم تغذیه ثابت، افزایش یافته است.

تولید برق از بیوگاز در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در مقایسه با برق تولید شده از انرژی‌های فسیلی، مستلزم هزینه‌های سرمایه‌گذاری بیشتری می‌باشد. به عبارت دیگر هزینه تولید برق از منبع تجدیدپذیر نسبت به انرژی‌های فسیلی بیشتر است. به همین دلیل تعرفه‌های خرید اختصاصی برای انواع مختلف انرژی تجدید پذیر در ایران در نظر گرفته شده است. در خصوص احداث نیروگاه‌های بیوگاز سوز، قدم اول امکان‌سنجی



شکل ۱- فرایندهای تخریب هضم بی‌هوازی (Mir و همکاران، ۲۰۱۶)

سیستم‌های ناپیوسته متوالی^۶ و یا سیستم‌های پیوسته تک^۷ یا دو^۸ مرحله‌ای باشد. باتوجه‌به اینکه در بسیاری از تصفیه‌خانه‌های بروز در دنیا از هاضم‌های اختلاط کامل استفاده می‌شود، در این تحقیق این نوع هاضم از نوع نیمه پیوسته^۹ انتخاب شده است.

• دما

دمای کارکرد برای زنده ماندن، رشد و نمو بهینه میکروب‌ها و عملکرد هاضم بی‌هوازی بسیار مهم و حیاتی است. در سیستم‌های صنعتی، هضم بی‌هوازی در دو محدوده دمایی مزوفیلیک (۲۵-۴۰ درجه سانتی گراد) و ترموفیلیک (۵۰-۶۵ درجه سانتی گراد) رخ می‌دهد. شرایط دمایی ترموفیلیک به بهبود بازدهی بیوگاز، هضم مواد، تولید متان و کاهش پاتوژن‌ها کشیده می‌شود اما کوچک‌ترین تغییراتی سمی و شرایط محیطی منجر به مرگ میکروارگانیسم‌ها خواهد شد. در مقابل در شرایط دمایی مزوفیلیک، توده‌های میکروارگانیسم در مقابل تغییرات محیطی مقاوم‌تر، پایداری هاضم‌ها بیشتر، راهبری و نگهداری هاضم‌ها آسان‌تر و هزینه‌های سرمایه‌گذاری آن کمتر است. از معایب شرایط دمایی مزوفیلیک، زمان ماند بالا و تولید بیوگاز کمتر می‌باشد. باتوجه‌به نتایج منتشر شده توسط سایر محققین پیرامون دماهای مختلف در محدوده‌های دمایی ترموفیلیک و مزوفیلیک، از آنجایی‌که بحث اقتصادی در احداث هاضم‌های بی‌هوازی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب خین عرب و التیمور از اولویت‌های اصلی بوده است، با بررسی‌های صورت گرفته، محدوده دمایی آزمایش، ترموفیلیک و دمای کارکردی هاضم ۵۵ درجه سانتی گراد انتخاب شده است. (Wang و همکاران، ۲۰۱۹)

استحصال بیوگاز از انواع مواد زیست‌توده می‌باشد تا به‌وسیله آن امکان‌سنجی اقتصادی این نوع نیروگاه‌ها در شرایط مختلف بررسی شود. باتوجه‌به اینکه در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب التیمور و خین عرب در شهر مشهد، لجن قابل توجهی در انتهای فرایندهای تصفیه‌خانه تولید می‌شود، احداث واحدهای بی‌هوازی به‌منظور هضم بیشتر لجن و همچنین استحصال بیوگاز مدنظر قرار گرفته است. از طرفی به دلیل استفاده از روش‌های مختلف برای تصفیه فاضلاب، مشخصات لجن تولید شده در هرکدام از تصفیه‌خانه‌ها با یکدیگر متمایز می‌باشد. به همین دلیل ارزیابی تولید بیوگاز در هرکدام از تصفیه‌خانه‌ها ضروری به نظر می‌رسد. در این تحقیق، در ابتدا هاضم بی‌هوازی در ابعاد کوچک برای تصفیه‌خانه فاضلاب شهری خین عرب و التیمور مشهد طراحی و ساخته شد و سپس با تزریق لجن و اعمال شرایط هضم، بیوگاز استحصال شد. سپس میزان استحصال بیوگاز و کیفیت آن در هر دو تصفیه‌خانه تعیین شد.

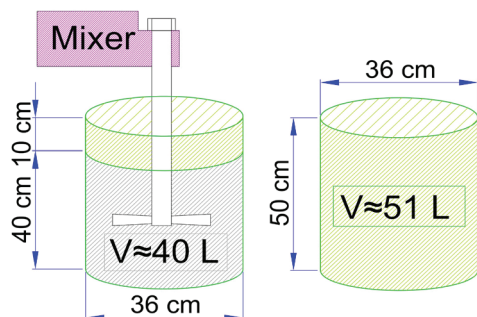
مواد و روش‌ها

هدف اصلی از این تحقیق، ارزیابی لجن‌های تولید شده در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب التیمور و خین عرب برای استفاده از آن‌ها در هاضم‌های بی‌هوازی می‌باشد. به عبارت دیگر هدف، مشخص نمودن کارایی یا عدم کارایی هاضم‌های بی‌هوازی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب مذکور است. از طرفی از آنجاکه هاضم‌های بی‌هوازی به شکل‌های مختلفی طراحی می‌شود و راهبری آن‌ها در شرایط گوناگونی صورت می‌گیرد، در پژوهش‌های انجام گرفته پیشین، عموماً یک یا چند شاخص مؤثر بر هضم بی‌هوازی مورد ارزیابی قرار گرفته است، به‌گونه‌ای که هدف اکثر این پژوهش‌ها بهینه‌سازی راهبری یا طراحی هاضم‌ها می‌باشد. باتوجه‌به اینکه در این تحقیق، هدف بهینه‌سازی هاضم‌ها یا راهبری هاضم‌ها نمی‌باشد، سعی بر آن شده است که به‌منظور حصول نتایج بهتر، با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده توسط محققین دیگر، طراحی و راهبری هاضم‌ها به‌صورت بهینه انجام پذیرد.

۱- ملاحظات طراحی

• نوع هاضم

هاضم‌های بی‌هوازی باتوجه‌به نوع ضایعاتی که در آن‌ها استفاده می‌شود به‌صورت‌های مختلفی طراحی می‌شود. هاضم‌ها می‌توانند از نوع لاگون‌های سرپوشیده^۲، اختلاط کامل^۳ (برای مواد خام ورودی شامل مواد جامد کمتر از ۱۰٪)، پلاگ فلو^۴ (برای مواد خام ورودی شامل مواد جامد کمتر از ۱۳٪)، سیستم‌های ناپیوسته^۵



شکل ۲- شماتیکی از هاضم بی‌هوازی

• زمان ماند

زمان ماند به مدت زمانی گفته می‌شود که مواد خام در هاضم باقی می‌مانند. برای تبدیل بیولوژیکی مواد خام به بیوگاز، زمان ماند بهینه‌ای تعریف شده است. این بازه بهینه برای محدوده دمایی ترموفیلیک در حدود ۱۲ تا ۲۴ روز و برای محدوده دمایی مزوفیلیک در حدود ۱۵ تا ۳۰ روز بیان شده است و به نوع ماده خام مورد استفاده، شرایط محیطی و همچنین استفاده نهایی مواد هضم شده بستگی دارد. باتوجه به مقالات منتشر شده پیرامون زمان ماند بهینه برای محدوده دمایی ترموفیلیک برای لجن‌های تولید شده در تصفیه‌خانه‌های مختلف فاضلاب، با در نظر گرفتن دمای کارکرد هاضم (۵۵ درجه سانتی گراد) مدت زمان ۱۲ روز به عنوان زمان ماند انتخاب شده است (Feng و همکاران، ۲۰۱۹).

• اختلاط

اختلاط مناسب به یکنواختی غلظت لجن، دما و جلوگیری از ته‌نشینی مواد جامد کشیده می‌شود. اختلاط باتوجه به غلظت مواد جامد می‌تواند با تیغه‌های مکانیکی یا با استفاده از چرخش گاز در هاضم انجام پذیرد (Karim و همکاران، ۲۰۰۵). از طرفی اختلاط بیش از اندازه به اختلال در فعالیت میکروب‌ها کشیده می‌شود. در پژوهش حاضر با بررسی نتایج به دست آمده از سایر تحقیقات، سیستم اختلاط فیزیکی با استفاده از یک الکتروموتور با دو مجموعه سه پره‌ای طراحی و سرعت اختلاط در حدود ۵۰ rpm انتخاب شد.

۲- ساخت ست آپ

در این پروژه که در قالب یک پایلوت آزمایشگاهی می‌باشد، دو هاضم بی‌هوازی به حجم ۵۱ لیتر و از جنس استینلس استیل ساخته شده است. حجم خالص استفاده شده برای هضم لجن نزدیک ۴۰ لیتر بوده و نزدیک ۱۱ لیتر به عنوان فضای ذخیره‌سازی موقت بیوگاز تولید شده در نظر گرفته شده است. همچنین به منظور اختلاط لجن در هر هاضم از یک الکتروموتور با قدرت ۱۸۰ وات استفاده شده است. شرایط کاری هاضم در محدوده ترموفیلیک و در دمای ۵۵ درجه سانتی گراد و زمان ماند در هاضم‌ها ۱۲ روز در نظر گرفته شده است. مدت زمان آزمایش هاضم جمعاً ۳۶ روز (۳ دوره ۱۲ روزه به طول انجامید. هاضم به صورت نیمه پیوسته^{۱۰} بوده و میزان تغذیه هاضم برابر با میزان تخلیه لجن می‌باشد. همچنین در اندازه‌گیری مقدار بیوگاز تولید شده از روش جابجایی آب^{۱۱} بهره گرفته شده است. در شکل (۲) شماتیکی از هاضم بی‌هوازی طراحی شده نشان داده شده است.

۳- شاخص‌های مورد بررسی

به منظور بررسی کارکرد هاضم بی‌هوازی ازلحاظ شکل‌گیری پایدار فرایند هضم بی‌هوازی در آن، نیاز به بررسی شاخص‌های مختلفی می‌باشد. آنالیزهای انجام شده بر روی لجن در حین آزمایش عبارت‌اند از: نسبت کربن به نیتروژن (C/N)، pH، VSS، COD و قلیائیت برحسب CaCO_3 که در ادامه به توضیح برخی از آن‌ها پرداخته شده است.

• PH و قلیائیت

PH نقشی حیاتی در پایداری هاضم و متعادل‌سازی شرایط برای فعالیت‌های بیولوژیکی دارد. ازدیاد اسیدهای آلی به خصوص زمانی که مقدار زیادی از مواد آلی وارد راکتور و تبدیل به اسیدهای آلی می‌شود، PH هاضم کاهش خواهد یافت. کاهش PH به مقادیر کم (برای نمونه به مقدار ۵) منجر به مرگ میکروارگانیسم‌های متان ساز می‌شود زیرا بیشتر آن‌ها تنها در برابر تغییرات اندک از خود مقاومت نشان می‌دهند و بهترین محدوده برای آن‌ها ۷ تا ۷/۲ گزارش شده است؛ بنابراین باید مقدار PH به طور مناسبی کنترل شود تا شرایط برای فعالیت میکروارگانیسم‌های متان ساز که اسیدهای آلی را مصرف می‌کنند تسهیل شود. از طرفی، زمانی که رشد میکروارگانیسم‌های متان ساز بیش از اندازه باشد به توقف اسیدسازی کشیده شده، غلظت آمونیاک افزایش یافته و مقدار PH بیش از ۸ می‌شود؛ بنابراین ضروری است که مقدار PH در محدوده مناسبی حفظ شود. محدوده مذکور از ۶/۸ تا ۷/۲ پیشنهاد شده است (Ward و همکاران، ۲۰۰۸).

• VSS

به منظور تصفیه مناسب و دفع لجن فاضلاب در ابتدا لازم است مشخصه‌های آن دانسته شود. به طور کلی لجن ترکیبی از مواد فرار، مواد آلی، مواد مغذی، پاتوژن‌ها، فلزات و آلاینده‌های آلی و آب است. مقدار TSS متناسب با فرایندهای مختلف تصفیه‌ای که بر روی فاضلاب انجام شده، تغییر می‌کند. مقدار TSS^{۱۲} بعد

از مرحله تغلیظ لجن می‌تواند به بیشتر از ۹٪ و بعد از مرحله آبیگری مکانیکی به ۲۵ تا ۳۵٪ برسد (Milieux, ۲۰۰۳). مواد جامد (TSS) تشکیل دهنده لجن نزدیک به ۵۵ تا ۸۸٪ از مواد فرار (VSS) می‌باشند که این مواد به‌طور عمده شامل مواد آلی با منشأ حیوانی یا گیاهی هستند. هدف اصلی استفاده از هاضم‌های بی‌هوازی، تخریب این دسته از مواد و تبدیل آن به بیوگاز می‌باشد. هضم بی‌هوازی لجن به‌صورت بیولوژیکی می‌تواند نزدیک به ۵۰٪ از مقدار VSS موجود در لجن را به بیوگاز تبدیل کند. در حقیقت میکروارگانیسم‌های بی‌هوازی از VSS به‌عنوان ماده غذایی استفاده کرده و مقدار آن را کاهش می‌دهد (Bresters, ۱۹۹۸).

• نسبت کربن به نیتروژن

نسبت کربن به نیتروژن یک پارامتر متداول در مطالعات هاضم‌های بی‌هوازی است که در بسیاری از تحقیقات بررسی قرار گرفته است. نسبت کربن به نیتروژن بیانگر مقدار کربن آلی و نیتروژن موجود در ماده اولیه می‌باشد. تغییرات در محتویات بیوگاز به‌طور مداوم بستگی به این نسبت دارد. نسبت کربن به نیتروژن یک پارامتر اصلی در هضم بی‌هوازی است. کربن در نقش منبع انرژی عمل می‌کند و نیتروژن منجر به افزایش رشد میکروارگانیسم‌ها می‌شود. اگر نسبت کربن به نیتروژن زیاد باشد به علت مصرف سریع نیتروژن مقدار تولید بیوگاز کم می‌شود (Khalid و همکاران، ۲۰۱۱).

نتایج و بحث

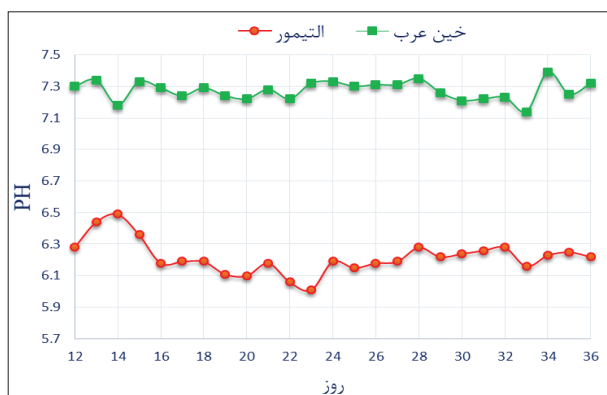
در مدت زمان انجام آزمایش برای بررسی وضعیت پایداری هاضم‌های بی‌هوازی، نیاز به اندازه‌گیری شاخص‌های مختلفی می‌باشد. هر کدام از این شاخص‌ها تأثیر مستقیمی بر عملکرد هاضم‌ها، هضم لجن و تولید بیوگاز خواهند داشت و باید مقادیر آن‌ها به‌گونه‌ای تنظیم شود تا از ایجاد اختلال در فرایندهای هضم بی‌هوازی جلوگیری به عمل آید. کنترل و مهار این شاخص‌ها می‌تواند با استفاده از تغییر در شرایط راهبری هاضم‌ها و یا استفاده از مواد افزودنی صورت بگیرد. لازم به ذکر است باتوجه به مطلوب بودن شاخص‌های موردنظر از تغییر در شرایط راهبری و افزودن مواد دیگر به هاضم خودداری شده است. در ادامه به بررسی این شاخص‌ها و نتایج حاصل از آن پرداخته می‌شود.

۱- بررسی تغییرات پارامترهای آزمایش

PH •

شکل (۳) تغییرات PH در هاضم خین‌عرب و التیمور را نشان می‌دهد. نوسانات PH می‌تواند در هنگام هضم بی‌هوازی بر روی بیوگاز به‌دست‌آمده تأثیر بگذارد. در مراحل اولیه (هیدرولیز، اسیدسازی، استات‌سازی) به دلیل تشکیل اسیدهای آلی، PH کاهش می‌یابد و زمانی که مرحله متان‌سازی شروع می‌شود، PH کمی افزایش پیدا می‌کند. باتوجه به اینکه در ۱۲ روز اول آزمایش، هاضم هیچ‌گونه تغذیه و یا تخلیه‌ای نشده است، مقدار PH از روز ۱۲ ام که اولین روز تغذیه و تخلیه می‌باشد، از روی نمونه‌های تخلیه اندازه‌گیری شده است. مقدار PH برای هر هاضم رفتاری متفاوت از هاضم دیگر به‌دست‌آمده است. به‌طوری‌که مقادیر PH در طول زمان هضم برای لجن خین‌عرب همواره در محدوده مناسب قرار

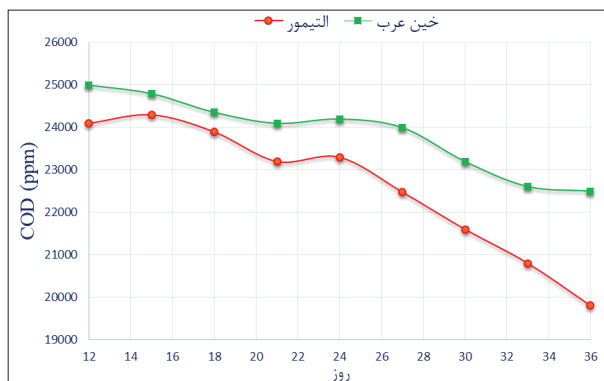
دارد. این امر منجر می‌شود که شرایط مناسب از نظر PH برای میکروارگانیسم‌های متان‌ساز فراهم باشد. از طرف دیگر در هاضم خین‌عرب مقدار PH در روز ۱۵ ام (سه روز پس از اولین تغذیه) مقداری کاهش یافته اما پس از آن تا روز ۳۲ ام روند ثابتی را پیموده و پس از آن دچار مقداری کاهش و افزایش شده است. مقدار PH در هاضم التیمور در روزهای ۱۲ الی ۱۵ ام که (در سه روز متوالی پس از اولین تغذیه) دچار افزایش شده اما پس از آن به سرعت کاهش یافته و بعد از آن روند ثابتی را پیموده است. دلیل این امر این است که پس از تغذیه هاضم، هضم بی‌هوازی وارد مراحل هیدرولیز، اسیدسازی، استات‌سازی شده و به دلیل تشکیل اسیدهای آلی، PH کاهش می‌یابد؛ اما پس از شروع مرحله متان‌سازی، مقدار PH افزایش پیدا کرده است.



شکل ۳- مقایسه تغییرات pH در هاضم خین‌عرب و التیمور

• قلیائیت^{۱۳}

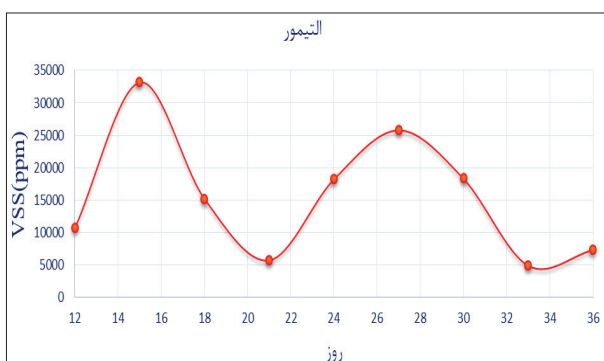
در شکل (۴) تغییرات قلیائیت نشان داده شده است. مقدار قلیائیت در روز ۱۲ ام برای هر دو نمونه لجن مقدار بالایی داشته و در روزهای بعد با شیب قابل ملاحظه‌ای کم شده



شکل ۵- تغییرات COD

• VSS

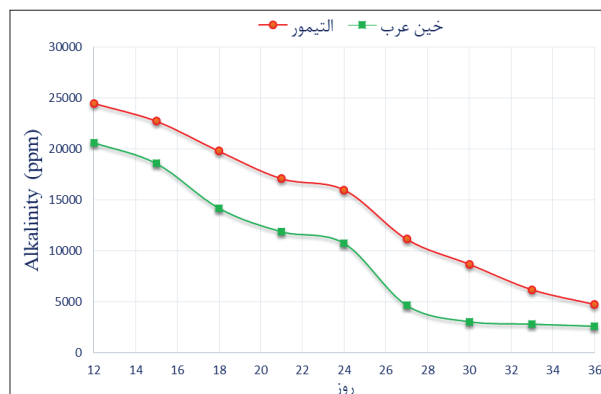
شکل (۶) تغییرات VSS در هاضم التیمور را نمایش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد فعالیت میکروارگانیسم‌ها به‌طور پایدار نمی‌باشد و به دلایلی فعالیت آنان متوقف شده و پس از مدتی مجدد شروع می‌شود. باتوجه به این نکته که PH در محدوده تقریباً مناسبی برای فعالیت میکروارگانیسم‌ها قرار دارد، نوسان مقدار VSS در لجن هضم شده می‌تواند به علت عدم تغذیه هاضم در ۱۲ روز اول باشد، زیرا اختلال در فرایند تأمین مواد مغذی منجر به نقصان فعالیت میکروارگانیسم‌ها و برهم خوردن تعادل در هاضم می‌شود. از طرفی بروز شوک‌های دمایی ناخواسته مانند قطعی برق و کاهش مقطعی دمای هاضم‌ها می‌تواند از علل دیگر نوسان فعالیت میکروارگانیسم‌ها در هاضم التیمور باشد که این امر منجر انباشت VSS می‌شود.



شکل ۶- تغییرات VSS در هاضم التیمور

شکل (۷) تغییرات VSS در هاضم خین‌عرب را نمایش می‌دهد. همان‌گونه که در شکل (۷) نشان داده شده است برخلاف شرایط ایجاد شده برای هاضم التیمور در هاضم خین‌عرب شرایط بی‌هوازی مناسبی ایجاد شده و سپس با تغذیه لجن در دوره بعدی مقدار VSS کاهش داشته یافته و در دوره آخر (روز ۲۴ تا ۳۶) به شرایطی پایدارتری رسیده است.

است و برای هر دو نمونه به کمتر از ۵۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر رسیده است. کاهش شدید قلیائیت، احتمالاً به علت تشکیل زیاد اسیدهای آلی در هاضم به علت مواد آلی افزوده شده از طریق تغذیه روزانه می‌باشد که البته با گذشت زمان و رسیدن به روزهای آخر آزمایش و افزایش تعداد میکروارگانیسم‌های متان ساز، اسیدهای آلی توسط این میکروارگانیسم‌ها مصرف شده و شیب کاهش قلیائیت کم شده است. این موضوع اهمیت بالا بودن قلیائیت در لجن مورد استفاده را نشان می‌دهد، زیرا در صورت پایین بودن قلیائیت، با تشکیل زیاد اسیدهای آلی، محیط هاضم اسیدی شده و به اختلال در فعالیت میکروارگانیسم‌های متان ساز کشیده می‌شود. از طرف دیگر همان‌طور که مشاهده می‌شود این مقدار برای لجن التیمور همواره بیشتر بوده است. برای هاضمی که به‌درستی فرایند هضم بی‌هوازی در آن شکل گرفته است مقدار قلیائیت کل باید بین ۲۰۰۰ تا ۵۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر (ppm) باشد (Metcalf و همکاران، ۲۰۰۳). همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده است مقدار قلیائیت در هر دو هاضم در محدوده بیان شده قرار دارد که نشان‌دهنده شکل‌گیری مناسب فرایند هضم بی‌هوازی است.

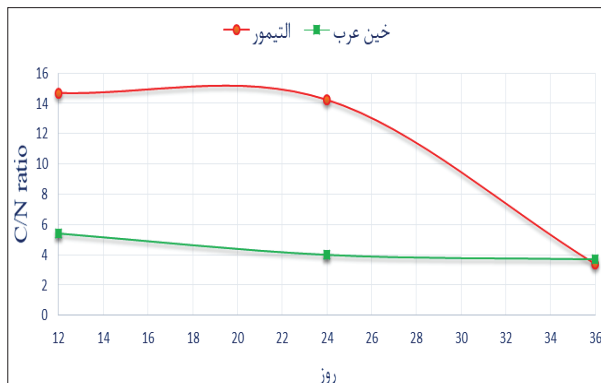


شکل ۴- تغییرات قلیائیت

• COD

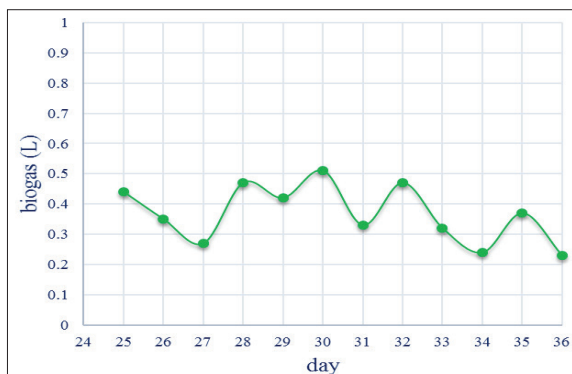
در شکل (۵) مشاهده می‌شود، میزان COD در لجن خین‌عرب از التیمور در تمام مرحله هضم بیشتر می‌باشد. با گذشت زمان تغییرات مقدار COD در هر دو هاضم روی هم رفته کاهشی بوده است. کاهش COD در هاضم، بیانگر کاهش آلودگی لجن از طریق تخریب VSS، مواد آلی و مغذی است که این امر از اهداف به‌کارگیری هاضم‌های بی‌هوازی می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود کاهش COD در هاضم التیمور نسبت به خین‌عرب بیشتر بوده که دلیل آن می‌تواند شکل‌گیری بهتر فرایند هضم بی‌هوازی و یا مستعدتر بودن لجن تولید شده در تصفیه‌خانه فاضلاب التیمور باشد.

زیستی نامناسب، فعالیت میکروارگانیسم‌ها کم شده و جمعیت آن‌ها کاهش می‌یابد (Calli و همکاران، ۲۰۰۵؛ Procházka و همکاران، ۲۰۱۲). این نمودار نشان می‌دهد نسبت کربن به نیتروژن برای لجن خین عرب پایین بوده و احتمالاً برای کاربرد در هاضم‌های بی‌هوازی نامناسب است ولی لجن التیمور شرایط مناسب‌تری برای هضم بی‌هوازی دارد.



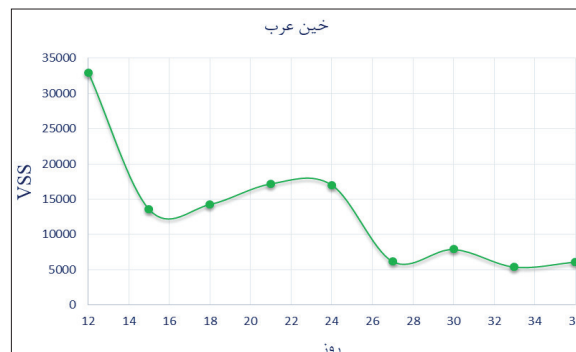
شکل ۸- نسبت کربن به نیتروژن

نیتروژن) فعالیت میکروارگانیسم‌ها در حالت پایدار نمی‌باشد، به‌طوری‌که فعالیت میکروارگانیسم‌ها در ابتدا کم و سپس با گذشت زمان افزایش پیدا کرده که نتیجه آن افزایش تولید بیوگاز می‌باشد. همچنین در روزهای ۳۲ به بعد مقدار تولید بیوگاز کاهش یافته که می‌تواند به علت کمبود مواد غذایی برای فعالیت میکروارگانیسم‌ها و یا عواملی دیگر باشد.



شکل ۱۰- میزان بیوگاز تولید شده در دوره آخر هضم برای لجن خین عرب

همان‌گونه که در شکل (۱۰) نشان داده شده است میزان تولید بیوگاز برای لجن خین‌عرب ثبات نسبی در طول آزمایش داشته، اما باتوجه‌به نوع لجن خین‌عرب که از فرایند هوادهی گسترده به‌دست آمده و همچنین نوع لجن مورد استفاده در آزمایش که نسبت کربن به نیتروژن در آن پایین است میزان تولید بیوگاز به‌شدت پایین بوده است.



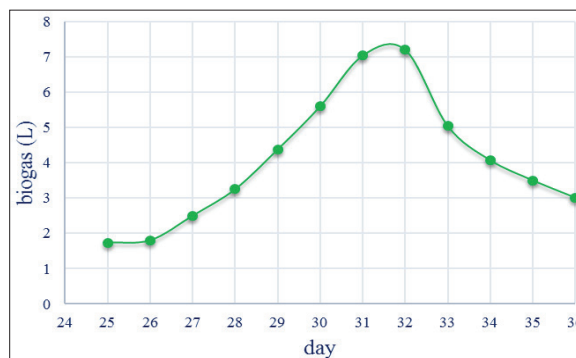
شکل ۷- تغییرات VSS در هاضم خین‌عرب

• نسبت کربن به نیتروژن

شکل (۸) نسبت کربن به نیتروژن را نشان می‌دهد. همان‌طور که پیش‌ترگفته شد این مقدار باید در محدوده ۲۰ تا ۳۰ قرار بگیرد. موادی که نسبت کربن به نیتروژن پایینی دارند، باعث غلظت بیش از اندازه آمونیاک می‌شوند که این غلظت، بیش از مقدار مورد نیاز برای رشد میکروارگانیسم‌ها می‌باشد و احتمالاً به توقف هضم بی‌هوازی کشیده می‌شود، یعنی به دلیل وجود شرایط

۲- میزان تولید بیوگاز

میزان بیوگاز تولید شده در زمان‌های مختلف هضم متفاوت می‌باشد. این مقدار در ابتدای فرایند هضم بی‌هوازی (روزهای اولیه راه‌اندازی هاضم) کم بوده و بعد از گذشت چندین روز مقدار آن افزایش پیدا می‌کند. هنگامی‌که هاضم به شرایط پایدار هضم بی‌هوازی رسیده باشند مقدار تغییرات تولید بیوگاز کاهش پیدا می‌کند. شکل‌های (۹) و (۱۰) مقدار تولید بیوگاز در دوره آخر هضم برای لجن التیمور و خین‌عرب را نشان می‌دهد.



شکل ۹- میزان بیوگاز تولید شده در دوره آخر هضم برای لجن التیمور

همان‌گونه که در شکل (۹) نشان داده شده است، میزان بیوگاز تولید شده برای لجن التیمور با گذشت زمان افزایش و سپس کاهش پیدا کرده است. این موضوع می‌تواند بیانگر این مطلب باشد که به علت نوع لجن مورد استفاده (نسبت کم کربن به

هاضم التیمور (نزدیک به ۵۰ لیتر در ۱۲ روز) نزدیک به ۸ برابر بیوگاز تولید شده در هاضم خین عرب است (نزدیک به ۵ لیتر در ۱۲ روز).

۳- آنالیز درصد بیوگاز

آنالیز نمونه‌های بیوگاز استحصال شده برای هر لجن با استفاده از دستگاه ^{14}C اندازه‌گیری شده که نتایج آن در جدول (۱) آورده شده است. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد، درصد متان بیوگاز استحصال شده از تصفیه‌خانه التیمور در محدوده مناسب است اما مقدار متان موجود در بیوگاز استحصال شده از تصفیه‌خانه خین عرب پایین می‌باشد.

جدول ۱- درصد متان هریک از تصفیه‌خانه‌های مورد مطالعه

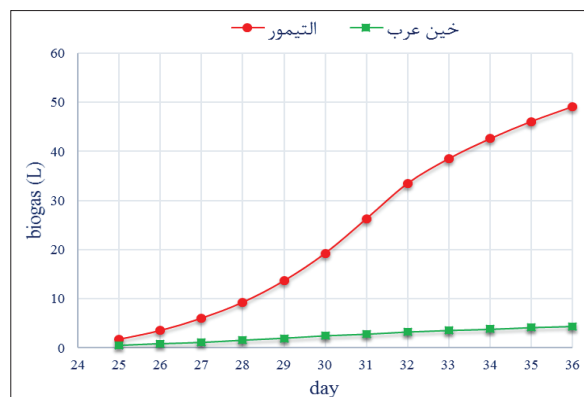
متان (%)	تصفیه‌خانه مورد مطالعه
۶۳/۵۲	التیمور
۲۵/۲۸	خین عرب

از لجن این تصفیه‌خانه بسیار پایین می‌باشد. از طرفی باتوجه‌به آنالیزهای انجام شده بر روی بیوگاز به‌دست‌آمده از تصفیه‌خانه خین عرب، مشخص شد محتویات و درصد متان موجود در آن نیز پایین می‌باشد. باتوجه‌به اینکه شرایط راهبری برای هر دو هاضم یکسان بوده و پارامترهای اندازه‌گیری شده بیانگر پایداری نسبتاً مطلوب در هر دو هاضم می‌باشد، اما به نظر می‌رسد لجن خین عرب پتانسیل مناسبی برای تولید بیوگاز ندارد. هرچند که نتیجه‌گیری قطعی در مورد آن نیازمند پژوهش‌های بیشتری می‌باشد.

باتوجه‌به اینکه در تصفیه لجن در تصفیه‌خانه‌های التیمور و خین عرب به‌ترتیب از فرایندهای MLE و SBR استفاده می‌شود، مطالعه بر روی سایر تصفیه‌خانه‌ها با فرایندهای مشابه، می‌تواند نسبت به استعداد ذاتی لجن تولید شده از این فرایندها برای بازیافت انرژی توسط هاضم‌های بی‌هوازی دید بهتری در اختیار قرار دهد. همچنین با افزودن برخی پلیمرها و ترکیبات دیگر بر روی لجن، می‌توان کیفیت تولید بیوگاز را نیز تحت تاثیر قرار داد که این امر مستلزم انجام آزمایشات بیشتری است. در نهایت، باتوجه‌به اینکه در آینده استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، امری ضروری می‌باشد، تحقیقات مشابه می‌تواند سودمند واقع شود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله، مراتب تشکر و قدردانی خود را از شرکت آب و فاضلاب مشهد و معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه صنعتی شاهرود، بابت حمایت و پشتیبانی برای انجام این تحقیق به عمل می‌آورند.



شکل ۱۱- میزان تولید تجمعی بیوگاز در دوره آخر هضم برای هاضم التیمور

در شکل (۱۱) میزان تولید تجمعی بیوگاز در دوره آخر هضم نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل (۹) نمایش داده شده است میزان تولید تجمعی بیوگاز در هر دو هاضم نشان داده شده است. با مقایسه میزان تولید بیوگاز برای دو لجن به‌کار رفته در آزمایش مشخص می‌شود، میزان تولید بیوگاز در

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، در ابتدا هاضم بی‌هوازی در ابعاد کوچک برای تصفیه‌خانه فاضلاب شهری خین عرب و التیمور مشهد طراحی و ساخته شد و سپس با تزریق لجن و اعمال شرایط هضم، بیوگاز استحصال شد. سپس شرایط تولید بیوگاز و رفتار و اثر شاخص‌های کیفی در طول آزمایش بررسی شد و میزان استحصال بیوگاز و کیفیت آن در هر دو تصفیه‌خانه اندازه‌گیری شد.

نتایج به‌دست‌آمده بیانگر دو نتیجه به‌طور کامل متفاوت برای تصفیه‌خانه‌های مورد مطالعه است. هدف اصلی از این تحقیق، ارزیابی اولیه برای پتانسیل سنجی هرکدام از لجن‌ها برای تولید بیوگاز بود. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد، شرایط در نظر گرفته شده برای راه‌اندازی و راهبری هاضم التیمور مناسب بوده است. میزان بیوگاز تولید شده برای این تصفیه‌خانه پایین‌تر از حد تئوری بوده ولی از لحاظ محتویات متان، بیوگاز در حالت کاملاً استاندارد می‌باشد، بنابراین از لحاظ کمیت ضعیف‌تر از تئوری، ولی از لحاظ کیفیت مناسب است. هرچند در این تحقیق سعی بر آن بوده است که با استفاده از نتایج دیگر محققان، پارامترهای مورد استفاده و راهبری هاضم‌ها به‌گونه‌ای بهینه انتخاب شوند، اما پایین‌تر بودن میزان بیوگاز تولیدی در این تصفیه‌خانه نسبت به حالت تئوری، بیانگر این مطلب است که با مطالعه پارامتری شاخصه‌های تأثیرگذار بر فرایند هضم، امکان بازدهی بیشتر هاضم و به عبارتی تولید بیوگاز بیشتر وجود دارد. از طرف دیگر نتایج به‌دست‌آمده برای تصفیه‌خانه خین عرب پایین‌تر از حد انتظار بوده و نشان داده شد که میزان بیوگاز قابل استحصال

- Gikas P. 2017. Towards energy positive wastewater treatment plants. *Journal of environmental management*, 203: 621-629.
- Hernández-Sancho F., Molinos-Senante M. and Salla-Garrido R. 2011. Energy efficiency in Spanish wastewater treatment plants: A non-radial DEA approach. *Science of the Total Environment*, 409(14): 2693-2699.
- Junior I.V., de Almeida R. and Cammarota M.C. 2020. A review of sludge pretreatment methods and co-digestion to boost biogas production and energy self-sufficiency in wastewater treatment plants. *Journal of Water Process Engineering*, 16: 101857.
- Karim K., Hoffmann R., Klasson K.T., Al-Dahhan M.H. 2005. Anaerobic digestion of animal waste: effect of mode of mixing. *Water Research*, 39: 3597-3606.
- Khalid A., Arshad M., Anjum M., Mahmood T. and Dawson L. 2011. The anaerobic digestion of solid organic waste. *Waste Management*, 31: 1737-1744.
- Koupaie E.H., Johnson T. and Eskicioglu C. 2017. Advanced anaerobic digestion of municipal sludge using a novel and energy-efficient radio frequency pretreatment system. *Water research*, 118: 70-81.
- Lafratta M., Thorpe R.B., Ouki S.K., Shana A., Germain E., Willcocks M. and Lee J. 2020. Dynamic biogas production from anaerobic digestion of sewage sludge for on-demand electricity generation. *Bioresource technology*, 310: 123415.
- Meegoda J.N., Li B., Patel K. and Wang L.B. 2018. A review of the processes, parameters, and optimization of anaerobic digestion. *International journal of environmental research and public health*, 15(10): 2224.
- Metcalf & Eddy, Inc., Burton F.L., Stensel H.D. and Tchobanoglous G. 2003. *Wastewater engineering: treatment and reuse*. McGraw Hill. New York, United States.
- Mir M.A., Hussain A. and Verma C. 2016. Design considerations and operational performance of anaerobic digester: A review. *Cogent Engineering*,

- 1-co-digestion
- 2-Covered lagoon
- 3-Complete mix
- 4-Plug flow
- 5-Batch system
- 6-Sequencing batch reactor
- 7-Continuous one-stage system
- 8-Continuous two-stage system
- 9-Semi-continues
- 10-Semi continuous
- 11-Water displacement method
- 12-Total suspended solids
- 13-Alkalinity
- 14-Gas chromatography

منابع

- Ali S.M.H., Lenzen M., Sack F. and Yousefzadeh M. 2020. Electricity generation and demand flexibility in wastewater treatment plants: Benefits for 100% renewable electricity grids. *Applied Energy*, 268: 114960.
- Bresters A.R. 1998. *Sludge treatment and disposal: management approaches and experiences*, Office for official publications of the European communities.
- Calli B., Mertoglu B., Inanc, B. and Yenigun, O. 2005. Effects of high free ammonia concentrations on the performances of anaerobic bioreactors. *Process Biochemistry*, 40(3-4): 1285-1292.
- Dos Santos I.F.S., Barros R.M. and Tiago Filho G.L. 2016. Electricity generation from biogas of anaerobic wastewater treatment plants in Brazil: an assessment of feasibility and potential. *Journal of cleaner production*, 126: 504-514.
- Feng Q., Song Y.C., Kim D.H., Kim M.S. and Kim D.H. 2019. Influence of the temperature and hydraulic retention time in bioelectrochemical anaerobic digestion of sewage sludge. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(4): 2170-2179.

- Singh A.D., Upadhyay A., Shrivastava S. and Vivekanand V. 2020. Life-cycle assessment of sewage sludge-based large-scale biogas plant. *Biore-source technology*, 309: 123373.
- Skinner S.J., Studer L.J., Dixon D.R., Hillis P., Rees C. A., Wall R.C. and Scales P.J. 2015. Quantification of wastewater sludge dewatering. *water research*, 82: 2-13.
- Wang S., Ma F., Ma W., Wang P., Zhao G. and Lu X. 2019. Influence of temperature on biogas production efficiency and microbial community in a two-phase anaerobic digestion system. *Water*, 11(1): 133.
- Ward A. J., Hobbs P. J., Holliman P. J. and Jones D. L. 2008. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Biore-source technology*, 99(17): 7928-7940.
- 3(1): 1181696.
- Milieux Z.d., Sludge dewatering, S. FLOERGER, Editor. 2003, SNF FLOERGER.
- Procházka J., Dolejš P., Máca J. and Dohányos M. 2012. Stability and inhibition of anaerobic processes caused by insufficiency or excess of ammonia nitrogen. *Applied microbiology and biotechnology*, 93(1): 439-447.
- Romano RT. and Zhang R: 2011 Anaerobic digestion of onion residuals using a mesophilic Anaerobic Phased Solids Digester. *Biomass Bioenerg*, 35(10): 4174-4179.
- Rulkens W. 2008. Sewage sludge as a biomass resource for the production of energy: overview and assessment of the various options. *Energy & Fuels*, 22(1): 9-15.

Causes and Risks of Increased Presence of Antibiotic-Resistant Bacteria in Drinking Water

M. Atharinia

PhD student in Food Science and Technology - Food Microbiology, Microbiology and Biology Research Group, Food Technology and Agricultural Products Research Institute, Standard Research Institute, Iran.

Email: atharinia_m@standard.ac.ir

Received: 18-04-2021

Revised: 15-06-2021

Accepted: 23-06-2021

Available Online: 06-12-2021

علل و خطرات افزایش حضور باکتری‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک در آب‌های آشامیدنی

معصومه اطهری‌نیا

دانشجوی دکتری علوم و صنایع غذایی - میکروبیولوژی مواد غذایی، گروه میکروبیولوژی و بیولوژی، پژوهشکده صنایع غذایی و فرآورده‌های کشاورزی، پژوهشگاه استاندارد، ایران.

E-Mail: atharinia_m@standard.ac.ir

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۳/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۲۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۰/۰۹/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۰۲

Abstract

In the past, the purpose of water treatment was to reduce suspended solids and eliminate living pathogens in water, which was achieved by conventional filtration and disinfection methods. However, at present with the increase of pollution in water sources, the existing methods are not fully capable of proper water treatment. Studies have illustrated that disinfection of drinking water can enhance the growth of antibiotic-resistant bacteria in the aquatic environment. Water treatment may increase the antibiotic resistance of surviving bacteria, and water distribution systems may serve as an important reservoir for extending antibiotic resistance to opportunistic pathogens. Drinking water treatment processes can not eliminate ARGs from drinking water sources, therefore, drinking water supply systems may be an initial route of ARGs release from the environment to the host, posing potential risks to human health. Moreover, it has also been shown that the number of some bacteria increases along with chlorine levels increase in drinking water, and the water treatment process is not able to entirely remove antibiotics from drinking water. Therefore, it is necessary to study more about the amount and frequency of bacteria with antibiotic-resistant mutations. In this article, a brief review of researches on drinking water treatment besides the entrance of used antibiotics in daily life through sewage and effluents and its impact on human health has been represented.

Keywords: Drinking Water, Contamination, Antibiotic Resistance, Water Quality, Chlorination.

چکیده

در گذشته هدف از تصفیه آب، کاهش مواد معلق و از بین بردن عوامل زنده بیماری‌زا در آب بود که با روش‌های متداول فیلتراسیون و گندزایی بدست می‌آمد. اما در حال حاضر با افزایش انواع آلودگی‌ها به منابع آب روش‌های موجود به‌طور کامل توانایی تصفیه مناسب آب را ندارند. مطالعات نشان داده است، ضدعفونی آب آشامیدنی می‌تواند باعث افزایش باکتری‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک در محیط‌های آبی شود. تصفیه آب ممکن است مقاومت آنتی‌بیوتیکی باکتری‌های زنده مانده را افزایش دهد و سیستم‌های توزیع آب ممکن است به‌عنوان مخزنی مهم برای گسترش مقاومت آنتی‌بیوتیکی به عوامل بیماری‌زا فرصت طلب عمل کنند. فرایندهای تصفیه آب آشامیدنی نمی‌تواند ARGها را از منابع آب آشامیدنی به‌طور کامل از بین ببرد، بنابراین، سیستم‌های تأمین آب آشامیدنی ممکن است یک مسیر انتشار اولیه ARGها از محیط به میزبان باشد که خطرات احتمالی را برای سلامتی انسان ایجاد می‌کند. همچنین مشخص شده است که تعداد بعضی از باکتری‌ها با افزایش میزان کلر در آب آشامیدنی افزایش می‌یابد و روند تصفیه آب قادر به حذف کامل آنتی‌بیوتیک‌ها از آب آشامیدنی نیست. به همین منظور کسب اطلاعات بیشتر در خصوص میزان و فراوانی باکتری‌های دارای جهش‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک‌ها ضروری به نظر می‌رسد. در این مقاله مروری کوتاه بر مطالعات صورت گرفته در مورد تصفیه آب آشامیدنی و همچنین ورود آنتی‌بیوتیک‌های استفاده شده در زندگی روزمره از طریق فاضلاب و پساب‌های تولیدی و تاثیر آن بر سلامت جامعه انسانی صورت گرفته است.

واژه‌های کلیدی: آب آشامیدنی، آلودگی، مقاومت آنتی‌بیوتیکی، کیفیت آب، کلرزنی.

ترانسپوزون‌ها و اینتگرون‌ها) یکی شده‌اند و می‌توانند از طریق باکتری‌های موجود در آب به بدن منتقل شوند. در زمینه چرخه آب شهری، باکتری‌هایی که می‌توانند در انواع مختلف آب ساکن شوند، اهمیت ویژه‌ای برای ارزیابی انتشار احتمالی مقاومت ضد میکروبی دارند (Figueira و همکاران، ۲۰۱۱). سوا از مکان‌های دست‌نخورده در رشته کوه‌ها، قبل از عبور آب از مناطق کلان‌شهرها یا کشاورزی، یافتن مکانی که در آن آنتی‌بیوتیک‌ها در آب مشاهده نشود، دشوار است (Yang و همکاران، ۲۰۰۳). محیط دریایی به‌عنوان یک مخزن حیاتی ARG و ARB^۲ در نظر گرفته شده است (Zhang و همکاران، ۲۰۰۹) و آنتی‌بیوتیک‌ها در اکوسیستم دریایی دو نگرانی وجود ARG و ARB را ایجاد کرده است. مشکل عمده سمیت احتمالی مواد ARG و ARB برای آبزیان و انسان از طریق فاضلاب تصفیه شده است. علاوه بر این، این نگرانی فزاینده وجود دارد که آزاد شدن آنتی‌بیوتیک‌ها در محیط با ظهور باکتری‌های بیماری‌زا که نسبت به غلظت‌های بالای این داروها تحمل دارند، ارتباط دارد.

تصفیه آب آشامیدنی

در گذشته هدف از تصفیه آب کاهش مواد معلق و از بین بردن عوامل زنده بیماری‌زا در آب بود که با روش‌های متداول فیلتراسیون و گندزایی به‌دست می‌آمد. اما در حال حاضر با افزایش غلظت مواد ریزدانه، ترکیبات ازته، مواد آلی و معدنی و فلزات سنگین به منابع آب روش‌های موجود به‌طور کامل توانایی تصفیه مناسب آب را ندارند و لازم است از روش و فرآیندهای جدید برای این عمل استفاده شود (قادری دهکردی، ۱۳۹۴). اثر تصفیه آب آشامیدنی (به‌طور سنتی با استفاده از فیلتراسیون و کلرزنی) برای از بین بردن عوامل بیماری‌زای باکتریایی مانند عامل وبا (ویبریو کلرا) و تب‌های حصبه (سالمونلا تیفی و سالمونلا پاراتیفی)، باکتری شاخص مدفوعی اشریشیا کلی، که از مدفوع تمام حیوانات خونگرم و برخی از خزندگان دفع می‌شود، به‌خوبی مشخص شده است (Edberg و همکاران، ۲۰۰۰). با این وجود، بسیاری از عوامل بیماری‌زای روده‌ای هستند که به‌ویژه باتوجه‌به مقاومت در برابر مواد ضدعفونی و شرایط محیطی رفتار متفاوتی دارند (Ashbolt و همکاران، ۲۰۰۱). مطالعات مشخص کرده است استفاده از کلر برای ضدعفونی آب آشامیدنی می‌تواند باعث افزایش باکتری‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک در محیط‌های آبی شود. این امر در مطالعه Ribas و همکاران (۲۰۰۰) تایید شد و مشخص شد تعداد بعضی از باکتری‌ها با افزایش میزان کلر در آب آشامیدنی افزایش می‌یابد. همچنین مشخص

بررسی کیفیت و سلامت آب آشامیدنی همواره یکی از موضوعات مهم در بهداشت عمومی بوده است. طبق گزارش سازمان بهداشت جهانی WHO^۱ آب آشامیدنی و قابل دسترس برای سلامت عمومی، از نظر نوشیدن، استفاده خانگی، تولید غذا و اهداف تفریحی مهم است، بهبود آب، بهداشت و مدیریت بهتر منابع آب، می‌تواند رشد اقتصادی کشورها را افزایش داده و به کاهش فقر کمک کند (WHO، ۲۰۱۴). کیفیت آب آشامیدنی توسط آزمون‌های فیزیکی، شیمیایی، بیولوژیکی و ارگانیک ارزیابی می‌شود. آب فقط در صورتی که غلظت اجزاء در حد استانداردهای خاص خود باشد، با در نظر گرفتن حداکثر مصرف روزانه در طول زمان، ماهیت عوامل آلاینده و میزان احتمال سمیت آن آب می‌تواند مصرف شود (Petraccia و همکاران، ۲۰۰۶). آب قبل از ورود به سیستم‌های توزیع، برای از بین بردن میکروارگانیسم‌ها ضدعفونی می‌شود. با این حال برخی از باکتری‌ها به دلیل مقاومت به ضدعفونی‌کننده‌ها و وجود میزان کمی از مواد آلی قابل تجزیه مورد نیاز باکتری‌ها در آب، دوباره قادر به رشد هستند (Ashbolt، ۲۰۰۴).

ارگانیسم‌های بیماری‌زا (عوامل بیماری‌زا) که از طریق آب آشامیدنی منتقل می‌شوند، بیشتر منشأ مدفوعی دارند، بنابراین به‌عنوان عوامل بیماری‌روده شناخته می‌شوند (Ashbolt و همکاران، ۲۰۰۱).

تخلیه فاضلاب‌های کشاورزی، شهری و صنعتی به آبراهه‌ها، سلامت عمومی را به خطر می‌اندازد و در نتیجه میزان آلودگی‌های محیطی و بیماری‌زا افزایش می‌یابد (Alipour و همکاران، ۲۰۱۴). باکتری‌های عفونی انسان و حیوان به‌طور مداوم توسط فاضلاب وارد سیستم آب می‌شوند (Baquero و همکاران، ۲۰۰۸). استحمام در آب‌های تفریحی آلوده به مدفوع با افزایش خطر انتقال بیماری‌های عفونی از جمله بیماری‌های دستگاه گوارش، عفونت‌های پوستی، بیماری‌های چشم و گوش (Alipour و همکاران، ۲۰۱۴) و همچنین افزایش خطر سلامتی در ارتباط است. باکتری‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک و ژن‌های AMR^۲ در مدفوع می‌توانند به منابع آب با فاضلاب تصفیه نشده یا تصفیه شده نفوذ کنند، این امر در مورد آب مورد مصرف برای نوشیدن، استحمام، شستشو و سایر مصارف نیز صادق است (WHO، ۲۰۱۴). وجود باکتری‌های مقاوم در برابر آنتی‌بیوتیک‌ها در مکان‌هایی که از دارو استفاده می‌شود (فاضلاب بیمارستان‌ها) رایج است و در سایر اکوسیستم‌های آبی نیز در حال افزایش است (Schwartz و همکاران، ۲۰۰۳). بسیاری از باکتری‌هایی که ژن‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک دارند در عوامل ژنتیکی متحرک (پلاسمیدها،

شد فرایند تصفیه آب نمی‌تواند به‌طور کامل باعث حذف آنتی‌بیوتیک‌ها از آب آشامیدنی شود و روند تصفیه آب قادر به حذف کامل آنتی‌بیوتیک‌ها از آب آشامیدنی نیست (Figueira و همکاران، ۲۰۱۱).

در طول تصفیه آب و در آب لوله‌کشی مقاومت به برخی از آنتی‌بیوتیک‌ها مشاهده شده است، تصفیه آب ممکن است مقاومت آنتی‌بیوتیکی باکتری‌های زنده مانده را افزایش دهد و سیستم‌های توزیع آب ممکن است به‌عنوان مخزنی مهم برای گسترش مقاومت آنتی‌بیوتیکی به عوامل بیماری‌زای فرصت طلب عمل کنند (Baquero و همکاران، ۲۰۰۸؛ Xi و همکاران، ۲۰۰۹). فرایندهای تصفیه آب آشامیدنی نمی‌تواند ARGها را از منابع آب آشامیدنی کاملاً از بین ببرد. بنابراین، سیستم‌های تأمین آب آشامیدنی ممکن است یک مسیر انتشار اولیه ARGها از محیط به میزبان باشد، که خطرات احتمالی را برای سلامتی انسان ایجاد می‌کند (Han و همکاران، ۲۰۲۰). برپایه تحقیقاتی که روی تغییر جامعه باکتری در آب آشامیدنی در طی کلرزنی انجام شده، مشخص شده است که در سطح جنس، کلرزنی می‌تواند به‌طور موثر *Methylobacter*، *Methylophilus*، *Methylobacter* و *Polynucleobacter* را حذف کند، درحالی‌که باعث افزایش فراوانی نسبی سودوموناس، اسیدووراکس، اسفنگوموناس، پلئوموناس و آندی باکتریوم در آب آشامیدنی می‌شود. همچنین مشخص شد الگوهای کلی جامعه باکتری‌ها به‌طور قابل توجهی توسط کلرزنی تغییر یافتند، تجزیه و تحلیل میزبان بالقوه نشان داد سودوموناس میزبان اصلی نهفته ARGهای پایدار است. ژن‌های مقاومت به چند دارو در آب آشامیدنی غالب بوده و فراوانی نسبی آنها پس از کلرزنی تا حد زیادی افزایش می‌یابد (Jia و همکاران، ۲۰۱۵).

مقاومت آنتی‌بیوتیکی

مقاومت آنتی‌بیوتیکی به بروز یک ویژگی خاص در یک میکروارگانیسم گفته می‌شود که باعث می‌شود تحت تأثیر داروهای آنتی‌بیوتیکی قرار نگیرد. در صورتی‌که پیش‌ازاین نسبت به داروی مذکور حساس بوده و این مقاومت باعث می‌شود آن دارو دیگر موجب مرگ یا توقف رشد میکروارگانیسم نشود. طی دهه‌های اخیر آنتی‌بیوتیک‌ها به‌طور گسترده‌ای در درمان عفونت‌های باکتریایی در انسان و حیوانات و همچنین به‌عنوان تقویت کننده‌های رشد در کشاورزی استفاده می‌شوند. افزایش درصد گونه‌های باکتریایی مقاوم در برابر آنتی‌بیوتیک‌ها در محیط‌های مختلف می‌تواند به بروز مشکلاتی در درمان انتخابی عفونت‌های باکتریایی کشیده شود. مهمترین علت بالا رفتن میزان مقاومت باکتری‌ها

نسبت به آنتی‌بیوتیک‌ها در ایران ناشی از تجویز و استفاده بی‌رویه از آنتی‌بیوتیک‌ها است. بروز مقاومت باکتریایی در محیط‌های زیست‌آبی در بسیاری از مطالعات مختلف گزارش شده است. ازاین‌رو بسیاری از محققین، محیط‌های آبی به خصوص فاضلاب را به‌عنوان دریافت کننده اصلی باکتری‌های روده‌ای، جایگاهی مساعد برای مقاوم شدن بسیاری از باکتری‌ها در مقابل انواع گوناگون آنتی‌بیوتیک‌ها می‌دانند. زیرا که در چنین محیطی انتقال ژن‌های مقاوم به دلیل بالابودن بار غذایی و بار میکروبی به‌خوبی بین گونه‌های مختلف باکتریایی صورت می‌پذیرد (Le و همکاران، ۲۰۱۸؛ manaia و همکاران، ۲۰۱۸) امروزه، آنتی‌بیوتیک‌ها نقش عمده‌ای در کشاورزی و صنایع دامی مدرن دارند و استفاده از آنها در بسیاری از کشورهای پیشرفته در حال افزایش است. یکی از عمده‌ترین کاربردهای آنتی‌بیوتیک در سال‌های اخیر، افزایش رشد و اثربخشی خوراک دام‌های سالم است. مصرف بی‌رویه یا نداشتن الگوی مصرف درست آنتی‌بیوتیک یکی از چالش‌های اساسی در بروز مقاومت آنتی‌بیوتیکی انگاشته می‌شود (Sarmah و همکاران، ۲۰۰۶). ظهور باکتری‌های مقاوم در برابر آنتی‌بیوتیک‌ها در مناطقی که از آنتی‌بیوتیک‌ها استفاده می‌شود، معمول است، اما باکتری‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک نیز به‌طور فزاینده‌ای در محیط‌های آبی مشاهده می‌شوند. استفاده گسترده از آنتی‌بیوتیک در بیمارستان‌ها و دامداری بیانگر شرایط انتخابی است که بر باکتری تأثیر می‌گذارد. دامپروری باعث ورود باکتری‌های مقاوم به داخل خاک از طریق کود مایع و جامد می‌شود (Aarestrup و همکاران، ۱۹۹۶).

گزارشات متعددی همچنین وجود انتروکوک‌های مقاوم به وانکومایسین (VRE)^۵ را در مدفوع افرادی که نه به‌تازگی در بیمارستان بوده‌اند و نه آنتی‌بیوتیک دریافت کرده‌اند، مستند کرده‌اند (manaia و همکاران، ۲۰۱۸). VRE مدفوع حیوانات سالم دام و فرآورده‌های حیوانی، در فاضلاب و آب‌های سطحی یافت شده است. VRE می‌تواند باعث ایجاد عفونت‌های اکتسابی در بیمارستان در بیماران ناتوان و کم‌نقص سیستم ایمنی شود، که به دلیل مقاومت زیاد این باکتری‌ها درمان آن دشوار است (Bates، ۱۹۹۷؛ Harwood و همکاران، ۲۰۰۱؛ Iversen و همکاران، ۲۰۰۲). آنتی‌بیوتیک‌ها به‌طور گسترده‌ای برای محافظت از سلامت انسان و حیوانات و یا افزایش سرعت رشد حیوانات به‌عنوان افزودنی غذایی استفاده می‌شوند. اکثر آنتی‌بیوتیک‌ها بدون تغییر در محیط دفع می‌شوند. بنابراین، نگرانی در مورد تأثیر احتمالی باقیمانده آنتی‌بیوتیک در محیط آبرزی در سال‌های اخیر رو به افزایش است (Kouchesfahani و همکاران، ۲۰۱۵).

باکتری‌ها مکانیسم‌های مختلفی جهت بی‌اثر کردن آنتی‌بیوتیک‌ها دارند. ژن‌های رمز کننده این مکانیسم‌های دفاعی در کروموزوم باکتریایی یا روی پلاسمیدهای خارج کروموزومی قرار دارند و به نسل بعدی (انتقال ژن عمودی) منتقل می‌شوند. عناصر ژنتیکی، مانند پلاسمیدها، همچنین می‌توانند در میان باکتری‌های مختلف (انتقال افقی ژن) مبادله شوند (Davison, 1999).

در سیستم‌های توزیع آب، تمرکز اصلی تأسیسات تصفیه، کیفیت میکروبی آب آشامیدنی می‌باشد. آنتی‌بیوتیک‌های مورد استفاده همیشه به طور کامل در بدن متابولیزه نمی‌شوند و بیشتر به صورت اولیه به محیط منتقل می‌شود. حضور سطوح ردیابی آنتی‌بیوتیک‌ها، ARG و ARB‌ها در آب منبع و فاضلاب می‌تواند تا حد زیادی بر بهداشت عمومی تأثیر بگذارد و این مسئله برای صنعت آب آشامیدنی حائز اهمیت است (Bergeron و همکاران، ۲۰۱۵). مقاومت آنتی‌بیوتیکی باکتری‌های بیماری‌زا نشان‌دهنده یک مشکل بهداشتی جهانی است که نیاز به درک بهتر از سرنوشت باکتری مقاوم در برابر آنتی‌بیوتیک‌ها (ARB) در محیط‌های آبی و گسترش آنها در سیستم تأمین آب می‌باشد. استفاده گسترده و بیش از حد آنتی‌بیوتیک‌ها باعث آلودگی منابع سطح زمین و منابع آب زیرزمینی توسط آنتی‌بیوتیک‌ها و ژن‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک (ARGs) شده است. فرایند تصفیه آب فعلی نمی‌تواند به طور کامل آنتی‌بیوتیک‌های موجود در آب آشامیدنی را از بین ببرد. علاوه بر این انتقال افقی ARG میان میکروب‌ها در سیستم تأمین آب می‌تواند ظهور و انتشار مقاومت آنتی‌بیوتیک باکتری در آب آشامیدنی و سلامت انسان را تسهیل کند (Bai و همکاران، ۲۰۱۵).

ژن‌های مقاوم در برابر آنتی‌بیوتیک، به عنوان آلودگی‌های محیطی در حال ظهور، نگرانی عمده‌ای در ارتباط با گسترش و توسعه مقاومت آنتی‌بیوتیکی هستند. محیط‌زیست آبی به عنوان یکی از مهمترین مخازن باکتری و ژن‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک شناخته شده است. با استفاده گسترده از آنتی‌بیوتیک‌ها در پزشکی انسانی و دامپزشکی و صنعت کشاورزی، ARG‌ها در محیط‌های مختلف از جمله آب‌های سطحی رودخانه، تأسیسات تصفیه‌خانه‌های شهری (MWTPs)، تأسیسات تصفیه آب آشامیدنی (DWTPs) و آب مخازن ذخیره شناسایی شده‌اند. شواهد نشان می‌دهد ARB و ARG‌ها در سیستم‌های آب آشامیدنی از آب منبع به آب پر شده انتقال پیدا می‌کند. از آنجایی‌که آب شیرین از DWTPs به دست می‌آید، شیوع ARG‌ها در سیستم‌های آب آشامیدنی می‌تواند تهدید نهفته‌ای برای سلامت عمومی باشد (Lu و همکاران، ۲۰۱۸).

در این راستا در سال‌های اخیر پژوهش‌هایی بر روی مقاومت آنتی‌بیوتیکی باکتری‌ها در منابع آبی و انتقال ژن‌های مقاوم به آنها از طریق آب آشامیدنی به انسان انجام شده است. Bergeron و همکاران (۲۰۱۵) بیان کردند مقاومت آنتی‌باکتریایی در منابع آب و آب‌های شیرین نشان داد منابع آبی ARB دارند. همچنین حضور SrRAN16 در آب شهری تأیید شد (Bergeron و همکاران، ۲۰۱۵). بررسی Xi و همکاران (۲۰۰۹) روی وجود مقاومت آنتی‌بیوتیکی در آب آشامیدنی و سیستم‌های توزیع آب نشان داد، ARB و ARGs در تمام نمونه‌های آب‌های تصفیه شده (آب منبع و آب شهری که مورد آزمون قرار گرفتند) وجود دارد (Xi و همکاران، ۲۰۰۹). مطالعه لاله کیانی و همکاران (۱۳۹۵) روی فیلترهای دستگاه‌های تصفیه آب خانگی نشان داد، باکتری سودوموناس آئروژینوزا در این فیلترها وجود دارد و تست آنتی‌بیوگرام نشان داد اکثر این باکتری‌ها مقاومت چندگانه دارند. Bai و همکاران (۲۰۱۵) نشان دادند از میان ARB‌های جدا شده در فرایند تصفیه آب آشامیدنی ۷۵٪ به چندین آنتی‌بیوتیک مقاوم بودند و همچنین نشان داده شد اکسیداسیون ازن، فیلتراسیون BAC^۱ و ضدعفونی کلرامین می‌تواند تا حد زیادی بر میزان فراوانی نسبی باکتری‌ها در جامعه تأثیر بگذارد. Lu و همکاران (۲۰۱۸) مطالعه‌ای روی توزیع و فراوانی ژن‌های مقاوم در برابر آنتی‌بیوتیک در مخازن و تأسیسات تصفیه آب آشامیدنی در رودخانه زرد چین انجام دادند، هفتاد ARG ژنتیکی را شناسایی کردند که از جمله آن aadE, strA, strB, tetA, sulIII, intI1 و Tn916 بیشترین تعداد شناسایی شده (بیش از ۸۰٪) را داشتند. Mena و همکاران (۲۰۰۹) مطالعه‌ای در مورد ارزیابی خطر سودوموناس آئروژینوزا در آب انجام دادند مشخص شد سودوموناس آئروژینوزا یکی از باکتری‌های مهم در به وجود آوردن انواع بیماری‌های مختلف می‌باشد که وجود آن در آب تأیید شد. Vaz-moriria و همکاران (۲۰۱۲) در مطالعه‌ای که روی تنوع و مقاومت آنتی‌بیوتیک روی گونه‌های سودوموناس در آب آشامیدنی انجام دادند مشخص کردند مقاومت به تیکارسیلین، تیکارسیلین با اسید کلولانیک، فسفومیسین و کوتریموکسازول ۸۴-۶۹ درصد بود. اگرچه مطالعه نشان داد که تصور نمی‌شود گونه‌های سودوموناس به طور معمول در آب آشامیدنی بسیار گسترده باشند. با این وجود، مشخص شد سودوموناس موجود در آب می‌تواند از طریق انتقال عمودی مقاومت آنتی‌بیوتیکی به دست آورد. Schwartz و همکاران (۲۰۰۳) در مطالعه‌ای روی تشخیص باکتری مقاوم در برابر آنتی‌بیوتیک و ژن‌های مقاومت آن‌ها در فاضلاب، آب‌های سطحی و بیوفیلم‌های آب آشامیدنی انجام دادند، بیان کردند ژن‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک vanA و ampC در بیوفیلم‌های تشکیل شده در آب آشامیدنی شناسایی شد.

باتوجه به افزایش روز افزون جمعیت و توسعه صنایع و افزایش آلودگی منابع آب شیرین، دسترسی به آب سالم و مناسب در اکثر کشورها به یک بحران جدی تبدیل شده است. تأثیر حیات بخش آب بر روی توسعه و زندگی از یک سو و افزایش جمعیت و رشد مصارف کشاورزی، خانگی و صنعتی و کمبود این ماده حیاتی در کشورهای خشک و نیمه خشک (مثل ایران) از سوی دیگر سبب شده است تا استفاده بهینه از آب در مصارف مختلف شرب، بهداشت، کشاورزی باعث نگرانی مسئولان شود و استفاده از آب بسته بندی شده به عنوان یک راهکار جدی در اجرای قانون عادلانه آب مورد توجه قرار گیرد. باتوجه به کمبود روزافزون آب، حفاظت از آب به منظور پیشگیری از هدررفت آن و آسیب به سلامت انسان و محیط ضروری است. دانش اپیدمیولوژی بیان می کند مصرف آب آلوده به صورت مستقیم (نوشیدن) و یا به صورت غیر مستقیم (تماس) می تواند سلامت انسان را به خطر انداخته و ایجاد بیماری کند. بسیاری از عوامل بیماری که باعث آلودگی آب می شوند، میکروارگانیسم ها هستند که از طریق مواد دفعی انسان و حیوان منتقل می شوند. علاوه بر موارد مطرح شده امروزه حضور باکتری ها و ژن های مقاوم به آنتی بیوتیک مقاومت در آب ها از جهات مختلف حائز اهمیت می باشد، ماندگاری و انتشار آنها در طبیعت منجر به افزایش عفونت با این پاتوژن ها می شود. همچنین انتشار باکتری ها و ژن های مقاوم به آنتی بیوتیک ممکن است باعث افزایش مخازن ژن های مقاوم به دارو در محیط شود و منجر به انتقال این ژن ها به سایر باکتری های بیماری زا شود. به دلیل مصرف بی رویه و خودسرانه آنتی بیوتیک های بتالاکتام مانند پنی سیلین ها، سفالوسپورین ها و کارباپنم ها که برای درمان عفونت های سودوموناسی استفاده می شوند، باعث مقاومت سودوموناس آئروژینوزا نسبت آنها شده است.

مطالعات اخیر نشان داده است، انواع مختلفی از ژن های مقاوم به آنتی بیوتیک (ARG) در آب آشامیدنی در سراسر جهان وجود دارد (Jia و همکاران، ۲۰۱۵). باکتری های مولد متالوبتالاکتاماز بیشتر الگوی مقاوم دارویی چندگانه هستند و عامل عفونت های جدی هستند که درمان آنها سخت می باشد. این آنزیم ها توانایی هیدرولیز آنتی بیوتیک های گروه بتالاکتام را دارند که بیشتر در باکتری های سودوموناس و اسینتوباکتر یافت می شوند (Walsh، ۲۰۰۷). منابع آب آشامیدنی به دلیل ارتباط آنها با آلودگی حاصل از خاک آغشته به کود فاضلاب شهری و بیمارستانی می توانند میزبان ARG ها و عوامل بیماری زا متنوعی باشند. با این وجود برخی از باکتری ها به دلیل مقاومت به مواد ضد عفونی کننده قادر به رشد در محیط آبی هستند.

مطالعات مشخص کرده است که استفاده از کلر برای ضد عفونی آب آشامیدنی می تواند باعث افزایش باکتری های مقاوم به آنتی بیوتیک در محیط های آبی شود. وجود تعداد زیادی باکتری به همراه ژن های مقاومت به آنتی بیوتیک، سلامت اعضای جامعه را در معرض خطر قرار می دهد. در طول تصفیه آب و در آب لوله کشی مقاومت به برخی از آنتی بیوتیک ها مشاهده شده است. تصفیه آب ممکن است مقاومت آنتی بیوتیکی باکتری های زنده مانده را افزایش دهد و سیستم های توزیع آب ممکن است به عنوان مخزنی مهم برای گسترش مقاومت آنتی بیوتیکی به عوامل بیماری زا فرصت طلب عمل کنند (Baquero و همکاران، ۲۰۰۸؛ Xi و همکاران، ۲۰۰۹).

نتیجه گیری

باتوجه به اینکه آب (آشامیدنی و معدنی) بخش پیوسته زندگی تمام انسان ها در تمام سنین می باشد، انتقال آلودگی های مختلف در آب، می تواند خطر بزرگی برای سلامتی اقشار مختلف جامعه باشد. امروزه قوانین لازم برای کنترل آنتی بیوتیک ها در منابع آب های سطحی و زیرزمینی و آب های آشامیدنی کافی نیست چون فرض می شود مقادیر آنها در آب بسیار کم و در ارزیابی خطرهای محیط زیستی، اثرات ثابت شده و معنی داری روی محیط زیست نشان ندادند. لذا به دست آوردن اطلاعات بیشتر در خصوص میزان و فراوانی باکتری های دارای جهش های مقاوم به آنتی بیوتیک ها ضروری به نظر می رسد. همچنین باتوجه به خطرات ناشی از فاضلاب های بیمارستانی و عدم توجه به دفع صحیح اینگونه فاضلاب ها در شهر، به نظر می رسد بررسی چگونگی دفع فاضلاب ها به خصوص فاضلاب های بیمارستانی اهمیت دارد. باتوجه به عدم مطالعه کافی روی باکتری های آلوده کننده آب های آشامیدنی و معدنی و انتقال ژن های مقاوم به آنتی بیوتیک به محیط زیست لازم است این موضوع بیشتر بررسی شود. سیستم های فاضلاب باید طوری طراحی شوند که ضد عفونی کردن باکتری های موجود در پساب ها (شهری، بیمارستانی) را قبل از تخلیه فاضلاب به اکوسیستم آبی در نظر بگیرد. از این رو، به نظارت بر مقاومت و اهمیت اکوسیستم های آبی برای انتشار عوامل تعیین کننده مقاومت آنتی بیوتیکی نیاز است، زیرا در بسیاری از نقاط آب های سطحی کره زمین به عنوان نقطه پایانی برای اثرات تصفیه شده/ تصفیه نشده از تصفیه فاضلاب در نظر گرفته می شوند (Devarajan و همکاران، ۲۰۱۷).

انتخاب و محافظت از منابع آب آشامیدنی مسئله اساسی در ایمنی آب آشامیدنی است. نتایج نشان داده است باکتری های موجود در محیط، عامل اصلی مقاومت آنتی بیوتیکی است،

سم‌شناسان، مهندسان محیط‌زیست و کشاورزی، شیمی‌دانان ارگانیک، ژئوشیمی‌دانان، ارزیابان ریسک و مهندسان مرتبط با صنعت دارد.

پی‌نوشت

- 1-World Health Organization
- 2-Antimicrobial Resistance
- 3-Antibiotic Resistance Bacteria
- 4-Antibiotic Resistance Genes
- 5-Vancomycin-resistant Enterococcus
- 6-Municipal Wastewater Treatment Plants
- 7-Drinking Water Treatment Plants
- 8-Biological activated carbon

Indicators of microbial water quality. Water quality: Guidelines, standards and health, 30: 289-316.

Bai X., Ma X., Xu F., Li J., Zhang H. and Xiao X. 2015. The drinking water treatment process as a potential source of affecting the bacterial antibiotic resistance. Science of the Total Environment, 533(15): 24-31.

Baquero F., Martínez J.L., and Cantón R. 2008. Antibiotics and antibiotic resistance in water environments. Current opinion in biotechnology, 19(3): 260-265.

Bates J. 1997. Epidemiology of vancomycin-resistant enterococci in the community and the relevance of farm animals to human infection. Journal of Hospital Infection, 37(2): 89-101.

Bergeron S., Boopathy R., Nathaniel R., Corbin A. and LaFleur G. 2015. Presence of antibiotic resistant bacteria and antibiotic resistance genes in raw source water and treated drinking water. International Biodeterioration & Biodegradation, 102: 370-374.

Davison J. 1999. Genetic exchange between bacteria in the environment. Plasmid, 42(2): 73-91.

Devarajan N., Köhler T., Sivalingam P., Van Delden C., Mulaji C.K., Mpiana P.T., Ibelings B.W. and Poté J. 2017. Antibiotic resistant Pseudomonas

فراوانی ARG با فراوانی پاتوژن‌های فرصت طلب و روند مقاومت آنتی‌بیوتیکی در ارتباط می‌باشد. بنابراین، محافظت از منابع آب آشامیدنی در برابر آلودگی‌های آنتی‌بیوتیکی و بیولوژیکی توسط سیاست‌های سختگیرانه ممکن است اقدامات عملی در جهت مدیریت منابع آب آشامیدنی در آینده باشد. فاضلاب دام و طیور، فاضلاب بالینی و فاضلاب بیمارستانی اهداف اولویت هستند. به دلیل تنوع زیاد در آلودگی آنتی‌بیوتیکی در منابع آب آشامیدنی، باید استراتژی‌های تصفیه دقیق در تصفیه آب آشامیدنی در نظر گرفته شود. نظارت بر منابع آب آشامیدنی می‌تواند کمک کند تا خطرات احتمالی سلامتی ARGها و عوامل بیماری‌زا ارزیابی شود. برای اینکه صنعت کشاورزی و نهادهای ناظر دولتی بتوانند مدیریت موثری و در این مورد اتخاذ کنند، باید تحقیقات بین رشته‌ای انجام شود و برای این منظور نیاز به همکاری میکروبی‌شناسان،

منابع

قادری دهکردی، م. ۱۳۹۴. بررسی راهکارهای فناوری نانو در مقابله با آلاینده‌های محیط‌زیست و تصفیه آب آشامیدنی. دومین کنفرانس بین‌المللی پژوهش در علوم و تکنولوژی. استانبول، ترکیه.

لاله کیانی، ا.، توفیقی، ر. و معتمدی، ح. ۱۳۹۵. شناسایی و بررسی مقاومت آنتی‌بیوتیکی باکتری‌های موجود در فیلترهای دستگاه تصفیه آب خانگی در شهر اهواز مجله سلامت و محیط‌زیست، ۹(۴): ۵۵۹-۵۷۰.

Aarestrup F.M., Ahrens P., Madsen M., Pallesen L.V., Poulsen R.L. and Westh H., 1996. Glycopeptide susceptibility among Danish Enterococcus faecium and Enterococcus faecalis isolates of animal and human origin and PCR identification of genes within the VanA cluster. Antimicrobial agents and chemotherapy, 40(8): 1938-1940

Alipour M., Hajiesmaili R., Talebjannat M. and Yahyapour Y. 2014. Identification and Antimicrobial Resistance of Enterococcus Spp. Isolated from the River and Coastal Waters in Northern Iran. Scientific World Journal, 1: 1-5.

Ashbolt N.J. 2004. Microbial contamination of drinking water and disease outcomes in developing regions. Toxicology, 198(1-3): 229-238.

Ashbolt N.J., Grabow W.O.K. and Snozzi M. 2001.

- Distribution and abundance of antibiotic resistance genes in sand settling reservoirs and drinking water treatment plants across the Yellow River, China. *Water*, 10(3): 246.
- Manaia Célia M., Jaqueline R., Nazareno S., Roberto M., Elena R., Francesco B., Francisco c., Gianuário F., Iakovos c., Ian z., Ioannis k., Ivone v.m. and Olga c.n. 2018. Antibiotic resistance in wastewater treatment plants: tackling the black box. *Environment international*, 115 : 312-324.
- Mena Kristina D. and Charles P.G. 2009. Risk assessment of *Pseudomonas aeruginosa* in water. *Reviews of environmental contamination and toxicology*, 201: 71-115.
- Petraccia L., Liberati G., Masciullo S. G., Grassi M. and Fraioli A. 2006. Water, mineral waters and health. *Clinical nutrition*, 25(3): 377-385.
- Ribas F., Perramon J., Terradillos A., Frias J. and Lucena F. 2000. The *Pseudomonas* group as an indicator of potential regrowth in water distribution systems. *Journal of applied microbiology*, (88)4: 704-710.
- Sarmah A.K., Meyer M.T. and Boxall A.B. 2006. A global perspective on the use, sales, exposure pathways, occurrence, fate and effects of veterinary antibiotics (VAs) in the environment. *Chemosphere*, (65)5: 725-759.
- Schwartz T., Kohnen W., Jansen B. and Obst U. 2003. Detection of antibiotic-resistant bacteria and their resistance genes in wastewater, surface water, and drinking water biofilms. *FEMS microbiology ecology*, (43)3: 325-335.
- Vaz-Moreira I., Nunes O.C. and Manaia C.M. 2012. Diversity and antibiotic resistance in *Pseudomonas* spp. from drinking water. *Science of the Total Environment*, 426: 366-374.
- Walsh T. R. 2005. The emergence and implications of metallo- β -lactamases in Gram-negative bacteria. *Clinical microbiology and infection*, 11(S6): 2-9.
- WHO. 2014. World Health Organization. Briefing note: antimicrobial resistance: an emerging water, sanitation and hygiene Issue. W. H. Organization. spp. in the aquatic environment: a prevalence study under tropical and temperate climate conditions. *Water Research*, 115: 256-265.
- Edberg S.C.L., Rice E.W., Karlin R.J. and Allen M.J. 2000. *Escherichia coli*: the best biological drinking water indicator for public health protection. *Journal of applied microbiology*, 88(S1): 106S-116S.
- Figueira V., Vaz-Moreira I., Silva M. and Manaia C.M. 2011. Diversity and antibiotic resistance of *Aeromonas* spp. in drinking and waste water treatment plants. *Water research*, 45(17): 5599-5611.
- Han Z., Zhang Y., An W., Lu J., Hu J. and Yang M. 2020. Antibiotic resistomes in drinking water sources across a large geographical scale: Multiple drivers and co-occurrence with opportunistic bacterial pathogens. *Water Research*, 183: 116088.
- Harwood V.J., Brownell M., Perusek W. and Whitlock J.E. 2001. Vancomycin-resistant *Enterococcus* spp. isolated from wastewater and chicken feces in the United States. *Applied and Environmental Microbiology*, 67(10): 4930-4933.
- Iversen A., Kühn I., Franklin A. and Möllby R., 2002. High prevalence of vancomycin-resistant enterococci in Swedish sewage. *Applied and Environmental Microbiology*, 68(6): 2838-2842.
- Jia S., Shi P., Hu Q., Li B., Zhang T. and Zhang X.X. 2015. Bacterial community shift drives antibiotic resistance promotion during drinking water chlorination. *Environmental science & technology*, (49)20: 12271-12279.
- Kouchesfahani M.M., Alimohammadi M., Nodehi R.N., Aslani H., Rezaie S. and Asadian S. 2015. *Pseudomonas aeruginosa* and heterotrophic bacteria count in bottled waters in Iran. *Iranian journal of public health*, 44(11): 1514.
- Le T.H., Ng C., Tran N.H., Chen H. and Gin K.Y.H. 2018. Removal of antibiotic residues, antibiotic resistant bacteria and antibiotic resistance genes in municipal wastewater by membrane bioreactor systems. *Water research*, 145: 498-508
- Lu J., Tian Z., Yu J., Yang M. and Zhang Y. 2018.

- occurrence in a river through pristine, urban and agricultural landscapes. *Water Research*, 37(19): 4645-4656.
- Zhang X. X., Zhang T. and Fang H. H. 2009. Antibiotic resistance genes in water environment. *Applied microbiology and biotechnology*, 82(3): 397-414.
- No. WHO/FWC/WSH/14.7.
- Xi C., Zhang Y., Marrs C.F., Ye W., Simon C., Foxman B. and Nriagu J. 2009. Prevalence of antibiotic resistance in drinking water treatment and distribution systems. *Applied and environmental microbiology*, 75(17): 5714-5718.
- Yang S. and Carlson K. 2003. Evolution of antibiotic

A Review of Membrane Filtration and Its Efficiency in Improving Water Quality in Recirculating Aquaculture Systems (RAS)

A.R. Radkhah^{1*}, S. Eagderi², E. Sadeghinejad Masouleh³

1,2- PhD. student and Associate Professor, Department of Fisheries, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. 3-Instructor of Inland Waters Aquaculture Research Center, Iranian Fisheries Science Research Institute (IFRSI), Agriculture Research Education and Extension Organization (AREEO), Bandar-e Anzali, Iran.

*(Corresponding Author Email: alirezaradkhah@ut.ac.ir)

Received: 30-05-2021

Revised: 04-07-2021

Accepted: 05-07-2021

Available Online: 06-12-2021

مروری بر فیلتراسیون غشایی و بررسی کارایی آن در بهبود کیفیت آب در سیستم‌های آبی‌پروری مدار بسته (RAS)

علیرضا رادخواه^{۱*}، سهیل ایگدری^۲، اسماعیل صادقی‌نژاد ماسوله^۳

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی دکتری بوم‌شناسی آبزیان و دانشیار، گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. ۳- مربی پژوهشکده آبی‌پروری آب‌های داخلی، موسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، بندرانزلی، ایران.

*(نویسنده مسئول، E-Mail: alirezaradkhah@ut.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۰۹ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۴/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۱۴ تاریخ انتشار: ۱۴۰۰/۰۹/۱۵

Abstract

Given that many commercial aquatic species of the country are bred in recirculating aquaculture systems (RASes), it is necessary to carefully evaluate and control the amount of water quality in these systems. Due to this issue, in the present study, the efficiency of membrane filtration in water treatment of RASes was investigated. First, general information about the membrane filtration process, including its types and benefits, was presented, and then, the importance of membrane filtration in removing contaminants and water treatment from aquaculture systems was discussed. Membrane filtration covers a wide range of filtration processes including reverse osmosis (RO), nanofiltration (NF), ultrafiltration (UF), and microfiltration (MF). Examination of the obtained sources showed that the membrane filtration has several advantages, the most important of which are the reduction of overall production costs, high flexibility, and high product quality. The solids in the aquaculture system come from uneaten food and feces produced by fish. These substances can cause the spread of microbial and pathogenic agents in aquatic environments. Application of different membrane filtration methods showed that these methods have significant efficiency in removing fine particles and organic matter from aquaculture effluents. Therefore, they can be used for sustainable management of water resources as well as water treatment in this sector.

Keywords: Membrane Filtration, Recirculating Aquaculture System (RAS), Water Quality, Solid Organic Matter.

چکیده

باتوجه‌به اینکه بخش قابل توجهی از آبزیان تجاری کشور در سیستم‌های مدار بسته پرورش داده می‌شوند، ارزیابی و کنترل دقیق روی میزان کیفیت آب در این سیستم‌ها ضروری است. باتوجه‌به این مسئله، در پژوهش حاضر کارایی فیلتراسیون غشایی در تصفیه آب حاصل از سیستم‌های آبی‌پروری مدار بسته بررسی شد. در ابتدا اطلاعات کلی از فرآیند فیلتراسیون غشایی شامل انواع آن و مزایای آن‌ها ارائه شد و در ادامه، به اهمیت فیلتراسیون غشایی در حذف مواد آلاینده و تصفیه آب در سیستم‌های مدار بسته آبی‌پروری پرداخته شد. فیلتراسیون غشایی، طیف وسیعی از فرآیند فیلتراسیون شامل اسمز معکوس (RO)، نانوفیلتراسیون (NF)، اولترافیلتراسیون (UF) و میکروفیلتراسیون (MF) را شامل می‌شود. بررسی منابع به‌دست آمده نشان داد مهم‌ترین مزایای روش فیلتراسیون غشایی کاهش هزینه‌های کلی تولید، انعطاف‌پذیری بالا و کیفیت بالای محصول می‌باشد. براساس مرور منابع، مواد جامد موجود در سیستم پرورش آبزیان از غذای مصرف‌نشده و مدفوع تولید شده توسط ماهی حاصل می‌شود و می‌تواند عامل گسترش عوامل میکروبی و بیماری‌زا در محیط‌های آبی باشد. کاربرد روش‌های مختلف فیلتراسیون غشایی نشان داد این روش‌ها کارایی قابل توجهی در حذف ذرات ریز و مواد آلی از پساب‌های آبی‌پروری دارند. از این‌رو، می‌توانند در جهت مدیریت پایدار ذخایر آبی و همچنین، تصفیه آب در این بخش استفاده شوند.

واژه‌های کلیدی: فیلتراسیون غشایی، سیستم پرورشی مدار بسته (RAS)، کیفیت آب، مواد آلی جامد.

باعث کاهش کیفیت آب می‌شود و ممکن است بر عملکرد و کیفیت ماهی تأثیر بگذارد (Nedberg, ۲۰۱۸).

مواد جامد موجود در سیستم پرورش آبزیان یک مشکل اساسی در رشد و سلامت ماهی به‌شمار می‌روند. منبع اصلی مواد جامد از مدفوع و مواد زائد حاصل از خوراک ماهی تأمین می‌شود (رادخواه، ۱۳۹۳). این مواد به شکل ذرات معلق و محلول وجود دارند. ذرات معلق اغلب از طریق رسوب به‌طور متعارف حذف می‌شوند. با این حال، بخش عمده‌ای از مواد جامد که چگالی نزدیک به آب دارند، ته‌نشین نمی‌شوند و در آب معلق می‌مانند. مواد جامد معلق را می‌توان به‌طور موثر توسط فیلتر حذف نمود. مواد جامد معلق ۶۰ میکرومتر یا بیشتر، اغلب توسط میکرواسکرین حذف می‌شوند. با این حال سیستم‌های معمول تصفیه، حذف ذرات ریز (کوچکتر از ۶۰ میکرومتر) را که بیشتر به تولید مواد محلول مانند آمونیاک-نیتروژن، کربن محلول و فسفر کمک می‌کنند، نادیده می‌گیرند (Chiam و Rosalam, ۲۰۱۱). از آنجایی که این ذرات ریز و محلول می‌تواند باعث تغذیه پاتوژن‌ها و یوتروفیکاسیون شود، ممکن است محتوای اکسیژن محلول در آب را کاهش دهد (Chiam و Rosalam, ۲۰۱۱). بنابراین، حذف کارآمد ذرات ریز برای جلوگیری از کاهش کیفیت آب و حفظ سلامت آبزیان پرورشی یکی از نیازهای ضروری در این زمینه می‌باشد.

باتوجه به اینکه بخش قابل توجهی از آبزیان تجاری کشور در سیستم‌های مدار بسته پرورش داده می‌شوند، لازم است ارزیابی دقیقی پیرامون کیفیت آب در این سیستم‌ها صورت گیرد. باتوجه به این مسئله، در پژوهش حاضر کارایی فیلتراسیون غشایی در تصفیه آب حاصل از سیستم‌های مدار بسته مطالعه شد. شایان ذکر است در این مطالعه، ابتدا اطلاعات کلی از فرآیند فیلتراسیون غشایی شامل انواع آن و مزایای آن‌ها ارائه و در ادامه، اهمیت فیلتراسیون غشایی در حذف مواد آلاینده و تصفیه آب در سیستم‌های مدار بسته آبزی پروری بررسی شد. باتوجه به اهمیت چرخه آب در سیستم‌های آبزی پروری و لزوم تزریق چندباره آن به سیستم تولید، ارائه اطلاعات در زمینه فیلتراسیون غشایی می‌تواند برای بهره‌برداری در پروژه‌های آبزی پروری استفاده شود.

فیلتراسیون غشایی

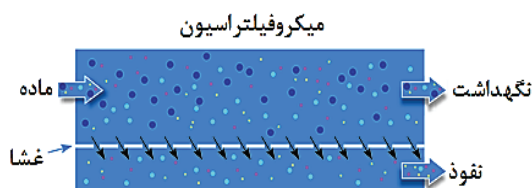
در فیلتراسیون غشایی، یک غشا به‌عنوان یک مانع نیمه نفوذپذیر برای کنترل سرعت انتقال مولکول‌های مختلف بین دو فاز مایع عمل می‌کند (Takht Ravanchi و همکاران، ۲۰۰۹). فرآیندهای غشای تحت فشار بیشتر از فشار هیدرولیکی برای

آب علاوه بر اینکه به‌عنوان مایع حیات بشر شناخته می‌شود، اهمیت زیادی در صنایع مختلف از جمله آبزی پروری دارد. صنعت آبزی پروری یکی از بخش‌های مهم است که در طول سال‌های گذشته رشد قابل ملاحظه‌ای داشته است (رادخواه و کریمی، ۱۳۹۳). امروزه جامعه بشری به تولیدات آبزی پروری نیازمند است، زیرا که این تولیدات حاوی مواد مغذی و ضروری بدن می‌باشند (Eagderi و Radkhan, ۲۰۲۱) و در واقع، نقش مهمی در امنیت غذایی بشر ایفا می‌کنند (رادخواه و همکاران، ۱۳۹۹). بررسی گزارش‌های سازمان فائو (FAO) نشان می‌دهد بخش قابل توجهی از تولیدات آبزی پروری، پرورش ماهیان است (رادخواه و ایگدری، ۱۳۹۸). ماهی منبع عمده‌ای از پروتئین در رژیم غذایی انسان است و از نظر اقتصادی ارزان قیمت است. بنابراین ماهی‌هایی که به‌عنوان غذا استفاده می‌شوند، باید سالم و عاری از هر گونه آلودگی یا سم باشند. با این حال، آلودگی‌های ناشی از صنایع در بسیاری از پیکره‌های آبی همچون دریا، دریاچه‌ها و رودخانه‌ها در حال فزونی است. بنابراین، در حال حاضر پرورش ماهی با احداث سیستم‌های آبزی پروری مدار بسته (RAS)^۱ گسترش یافته است (Chiam و Rosalam, ۲۰۱۱).

گسترش روز افزون صنعت آبزی پروری و افزایش تراکم آبزیان از جمله ماهیان در سیستم‌های تولید موجب شده است بسیاری از این سیستم‌ها از نظر شاخص‌های کیفیت آب با مشکلات و معضلاتی مواجه شوند (رادخواه، ۱۳۹۸؛ رادخواه و همکاران، ۱۳۹۹؛ رادخواه و صادقی‌نژاد ماسوله، ۱۴۰۰). از جمله مشکلاتی که در زمینه کیفیت آب ایجاد می‌شوند، می‌توان به افزایش بار مواد آلی (آمونیاک، نیترات، فسفات)، کاهش اسیدیته آب، کدر شدن آب و از همه مهمتر، شیوع انواع بیماری‌های میکروبی (با منشأ باکتریایی، ویروسی و قارچی) اشاره نمود (رادخواه، ۱۳۹۳؛ رادخواه، ۱۳۹۸؛ رادخواه و همکاران، ۱۳۹۹). از آنجایی که در صنعت آبزی پروری، حفظ کیفیت آب نقش اصلی را ایفا می‌کند، از این رو، ضروری است آب حاصل از سیستم‌های آبزی پروری تا حد امکان تصفیه شده و دوباره به چرخه تولید بازگردانده شود. شکل واقعی این پدیده در سیستم‌های مدار بسته آبزی پروری مشاهده شده است. گردش دوباره آب در سیستم‌های آبزی پروری، اگرچه از دیدگاه صرفه‌جویی در مصرف آب قابل توجیه است، اما می‌تواند با چالش‌های مختلف محیط‌زیستی همراه باشد که نیازمند مدیریت صحیح است. تجمع ترکیباتی از قبیل ذرات کوچک و مواد آلی که توسط روش‌های سنتی تصفیه آب حذف نشده‌اند،

۱- میکروفیلتراسیون

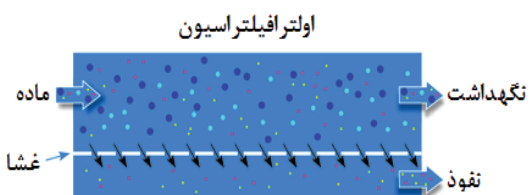
در قرن نوزدهم میکرو فیلتراسیون (MF) به عنوان یک فناوری جداسازی مبتنی بر غشا برای تصفیه پساب‌های مختلف و فاضلاب‌ها تکامل یافته است (Anis و همکاران، ۲۰۱۹). اندازه منافذ غشاهای میکروفیلتراسیون از ۰/۱ تا ۱۰ میکرومتر می‌باشد (شکل ۲). این غشاها بیشتر برای حذف ذرات بزرگ، کلونیدها و باکتری‌ها از مواد خوراکی استفاده می‌شوند. این روش به طور ویژه در صنایع غذایی و آشامیدنی برای تصفیه فاضلاب قبل از تخلیه آن به فاضلاب شهری بسیار کاربرد دارد (Synder، Filtration، ۲۰۲۱).



شکل ۲- فرآیند میکروفیلتراسیون (Alfa Laval، ۲۰۲۱)

۲- اولترافیلتراسیون

اولترافیلتراسیون (UF) فرایندی است که شبیه میکروفیلتراسیون است، اما با اندازه منافذ کوچکتر از ۰/۱ تا ۰/۱ میکرومتر متغیر است (شکل ۳). غشاهای اولترافیلتراسیون قادر به عبور ویروس‌ها و پلی پپتیدها هستند (Synder Filtration، ۲۰۲۱). در حال حاضر، از اولترافیلتراسیون به طور گسترده در زمینه‌های مختلف از قبیل تهیه آب فوق‌العاده خالص در صنعت الکترونیک، بازیافت رنگ الکتروفورزیک، تولید نوشیدنی و آب میوه، صنعت داروسازی، صنعت پزشکی، تصفیه و بازیافت فاضلاب و غیره استفاده می‌شود (Hongqi و Jianxian، ۲۰۰۹؛ Li و همکاران، ۲۰۱۸).



شکل ۳- روش اولترافیلتراسیون (Alfa Laval، ۲۰۲۱)

۳- نانوفیلتراسیون

غشاهای نانوفیلتراسیون (NF) از این نظر که شامل یک لایه کامپوزیت فیلم نازک (کمتر از یک میکرومتر) در بالای یک لایه متخلخل (۵۰ تا ۱۵۰ میکرومتر) برای انتخاب یون کوچک هستند، مشابه غشاهای اسمز معکوس هستند (Synder، ۲۰۲۱).

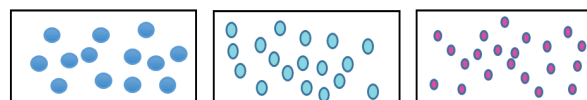
عبور مولکول‌های آب از غشا استفاده می‌کنند (Ezugbe و Rathilal، ۲۰۲۰). در این حالت، ذرات بزرگتر در آب حفظ شده و تجمع می‌یابند. امروزه بیشتر از فناوری غشا در تولید لبنیات، آب آشامیدنی و بیوتکنولوژی استفاده می‌شود (Dhineshkumar و Ramaswamy، ۲۰۱۷). استفاده از فناوری غشایی برای تصفیه فاضلاب‌هایی مانند فاضلاب روغنی، فاضلاب اسیدی، فاضلاب لبنیات و فاضلاب رنگرزی و نساجی بررسی شده است (Sun و همکاران، ۲۰۱۵؛ Ezugbe و Rathilal، ۲۰۲۰). با این حال، کاربرد فناوری غشایی در تصفیه فاضلاب حاصل از فعالیت‌های آبریزی محدود است.

• فرآیندهای فیلتراسیون غشایی تحت فشار

فیلتراسیون غشایی روشی برای جداسازی ذرات در محلول‌های مایع یا مخلوط‌های گازی است. این روش در طیف وسیعی از برنامه‌های صنعتی از فرآوری لبنیات تا تصفیه فاضلاب استفاده می‌شود. غشای نیمه‌نفوذپذیر به عنوان سدی عمل می‌کند که ذرات بزرگتر را در خود نگه می‌دارد، در حالی که به مولکول‌های کوچکتر اجازه می‌دهد از طریق غشا به داخل نفوذ کنند. مولکول‌ها به طور طبیعی از مناطق با غلظت بالا به غلظت کم منتقل می‌شوند. با اعمال فشار خارجی، مولکول‌ها می‌توانند از مناطقی با غلظت کم به غلظت زیاد انتقال یابند. اختلاف فشار در هر دو طرف غشا باعث می‌شود نفوذ صورت گیرد و در نتیجه، محیط مایع از ذرات ریز تصفیه شود (Bodzek و همکاران، ۲۰۱۹).

• انواع فیلتراسیون غشایی

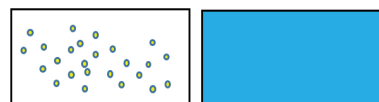
معمولاً چهار نوع اصلی فیلتراسیون غشایی تحت فشار وجود دارد که براساس اندازه ماده‌ای که برای جدا شدن از مایع مورد نیاز است، تعریف می‌شوند (شکل ۱). چهار نوع فیلتراسیون غشایی به ترتیب افزایش اندازه منافذ تحت عنوان اسمز معکوس^۲، نانوفیلتراسیون^۳، اولترافیلتراسیون^۴ و میکروفیلتراسیون^۵ شناخته می‌شوند.



باکتری، اسپور، جری

پروتئین‌ها

قندها

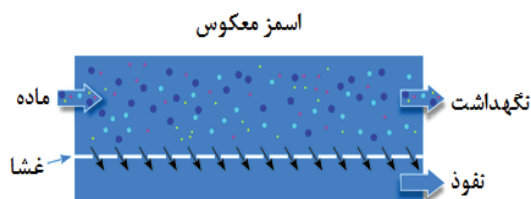


مواد معدنی

آب

شکل ۱- نوع مواد جدا شده در فیلتراسیون غشایی

با این حال، باتوجه به فشار وارد شده، ممکن است فشرده سازی در فرآیندهای اولترافیلتراسیون و میکروفیلتراسیون نیز رخ دهد (Synder Filtration، ۲۰۲۱).



شکل ۵- روش اسمز معکوس (Alfa Laval، ۲۰۲۱)

• مزایای فیلتراسیون غشایی

فرآیندهای فیلتراسیون غشایی به دلیل مزایای مختلفی که دارند، در مقیاس صنعتی مورد استفاده قرار می گیرند. از جمله این مزایا قابلیت اطمینان، سازگاری و هزینه های عملیاتی می باشد.

- کاهش هزینه های کلی تولید: یکی از مزایای فیلتراسیون غشایی ارزان بودن این روش در مقایسه با بسیاری از فناوری های جایگزین دیگر است. در این روش، هزینه های نصب و انرژی کمتر است. فیلتراسیون غشایی شامل پروسه کوتاه تری است و دستیابی به درجه خلوص بیشتر و بازده کلی بالاتر را امکان پذیر می کند (Hube و همکاران، ۲۰۲۰). علاوه بر این، از آنجایی که فیلتراسیون غشایی منجر به ایجاد فیلتر کیک نمی شود، هزینه ای در رابطه با حذف و دفع مواد وجود ندارد (Alfa Laval، ۲۰۲۱).

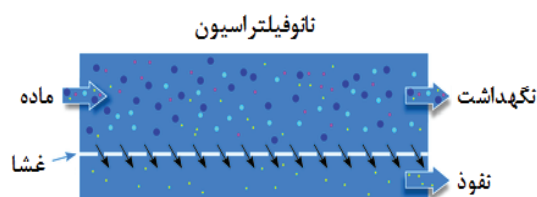
- انعطاف پذیری بالا: از فیلتراسیون غشایی می توان برای محصولات خوراکی با طیف وسیعی از ویسکوزیته های مختلف استفاده کرد. طیف گسترده ای از محصولات مختلف حاصل از فیلتراسیون غشایی نشان می دهد این تکنیک بهترین راه حل ممکن است. این روش همچنین هزینه های غیرضروری انرژی را کاهش می دهد (Hube و همکاران، ۲۰۲۰).

- کیفیت بالای محصول: فیلتراسیون غشایی یک فناوری پاک است. فرآیند جداسازی فقط براساس اندازه مولکولی انجام می شود و استفاده از مواد افزودنی را غیرضروری می کند (Ostojčić و همکاران، ۲۰۲۰). این امر منجر به تولید یک محصول نهایی با کیفیت مطلوب می شود که در نهایت، علاوه بر رعایت حقوق مصرف کنندگان از دیدگاه محیط زیستی نیز اهمیت دارد.

• کاربرد فیلتراسیون غشایی در تصفیه آب سیستم های آبی پروری

در سیستم های آبی پروری استفاده از فناوری های تصفیه آب

(Filtration، ۲۰۲۱). غشاهای نانوفیلتراسیون مانع عبور نمک های چندظرفیتی و املاح بدون بار می باشند، در حالی که به برخی نمک های تک ظرفیتی اجازه عبور می دهند (شکل ۴). این نوع از غشاهای فیلتراسیون می توانند در فشارهای کمتری نسبت به غشاهای اسمز معکوس عمل کنند (Synder Filtration، ۲۰۲۱).



شکل ۴- نانوفیلتراسیون (Alfa Laval، ۲۰۲۱)

۴- اسمز معکوس

غشاهای اسمز معکوس (RO) در مقایسه با غشاهای نانوفیلتراسیون، متراکم تر هستند و مانع عبور کلیه یون های تک ظرفیتی می شوند. این در حالی است که غشاهای اسمز معکوس به مولکول های آب اجازه می دهند از غشا عبور کنند (شکل ۵). این نوع از غشاها قادر هستند ویروس ها و باکتری های موجود در محلول های خوراکی را حذف کنند. نمک زدایی آب دریا و تصفیه آب صنعتی از کاربردهای معمول فیلتراسیون اسمز معکوس می باشد. از آنجایی که فشار عملیاتی برای اسمز معکوس و نانوفیلتراسیون بسیار بیشتر از فشار میکروفیلتراسیون (MF) و اولترافیلتراسیون (UF) است، بازده کلی آنها نیز نسبت به غشاهای MF و UF نااندازه ای کمتر است. تراکم غشایی پدیده ای است که در فرآیندهای غشایی تحت فشار رخ می دهد. حد بالای فشار برای غشای فوق فیلتراسیون و میکروفیلتراسیون ۱۲۰ پاسکال است، در حالی که حد بالا برای غشاهای نانوفیلتراسیون ۶۰۰ پاسکال است. هنگامی که غشا تا حد مشخصی فشرده شد، شار نفوذ شروع به تثبیت و نوسان کمتری می کند (Synder Filtration، ۲۰۲۱).

تغییر شکل ناشی از تراکم غشایی بیشتر به طور ویژه برای غشاهای ورق تخت برگشت ناپذیر است. اگر هیچ تراکم غشایی رخ ندهد، شار با فشار ارتباط خطی دارد. علاوه بر آن، میزان تراکم نیز متناسب با افزایش فشار و دما است. تراکم بیشتر در اسمز معکوس اتفاق می افتد، زیرا که فشارهای وارد شده نااندازه ای زیاد هستند. فشارهای عملیاتی در بعضی از برنامه ها ممکن است به بیش از ۱۰۰۰ پاسکال برسند. غشاهای اسمز معکوس و نانوفیلتراسیون در مقایسه با غشای اولترافیلتراسیون و میکروفیلتراسیون اندازه منافذ بسیار کوچکتری دارند، از این رو، در فشارهای بالاتر، بازده بیشتری خواهند داشت.

سیستم‌های مداربسته و فیلتراسیون

در سیستم‌های مداربسته (RAS)، پساب مخازن پرورشی به واسطه فرآیندهای متداول تصفیه که شامل حذف مواد جامد از سیستم می‌باشد، خارج می‌شوند. باین‌حال، مواد ریز با قطر ۲۰ تا ۲۵ میکرومتر به‌طور موثر در فرآیندهای تصفیه معمولی حذف نمی‌شوند، در نتیجه نابودی کیفیت آب کشیده می‌شوند (Roger و Viadero، ۲۰۰۳). میکروفیلتراسیون یک فناوری جداسازی تحت فشار است که در آن از یک غشای نیمه‌نفوذپذیر برای انتخاب ذرات با قطر بیش از ۰/۵ تا ۱۰ میکرون استفاده می‌شود، درحالی‌که اجازه می‌دهد مواد تشکیل‌دهنده کوچکتر، از جمله آب و اجزای محلول، آزادانه از غشا عبور کنند (Bodzek و همکاران، ۲۰۱۹). در فیلتراسیون جریان متقابل، محلول خوراک (آب حاوی مواد جامد ریز) به موازات سطح غشا عبور می‌کند و باعث نفوذ آب بدون مواد جامد و نگهداری مواد جامد غلیظ می‌شود. مهمترین مزیت فیلتراسیون جریان متقاطع، کاهش تجمع مواد جامد در سطح غشا است که باعث کاهش گرفتگی منافذ غشا می‌شود. به‌طورکلی، در شرایطی که غلظت ضایعات کم و تلاطم هیدرولیکی بالا باشد، میزان حجم تولید آب تمیز در واحد سطح غشا که معروف به "شار نفوذ" می‌باشد، متناسب با نیروی محرک، فشار غشایی است. باین‌وجود، با جمع شدن جامدات در سطح غشا، به‌دلیل تشکیل یک لایه مرزی غلظت در سطح غشا، شار از فشار غشایی مستقل می‌شود (Roger و Viadero، ۲۰۰۳).

میکروفیلتراسیون در سیستم‌های RAS

• عملکرد تصفیه

پیش‌بینی عملکرد سیستم میکروفیلتراسیون به خصوصیات فیزیکی و شیمیایی محلول مورد نظر وابسته است. گزارش Noblet و Viadero (۲۰۰۲) درباره استفاده از میکروفیلتراسیون در سیستم RAS نشان داد، غشایی با اندازه منافذ ۰/۵ میکرومتر برای حذف بیش از ۹۴ درصد کل مواد جامد معلق مناسب است. براساس نتایج حاصل از گزارش Viadero و Noblet (۲۰۰۲)، نفوذ شار از درون سیستم میکروفیلتراسیون با دمای آب افزایش می‌یابد. افزایش نفوذ شار به‌واسطه کاهش گرانیوی آب با افزایش دما صورت گرفت. همچنین، نفوذ شار با فشار غشایی تا یک حد محدود نیز افزایش می‌یابد. براساس مطالعات انجام شده، بازده روش میکروفیلتراسیون در حذف مواد جامد محلول، نیتروژن کل و فسفر کل ضعیف بود، زیرا که منافذ غشای میکروفیلتراسیون برای ممانعت از عبور مواد محلول به‌اندازه کافی کوچک نیستند.

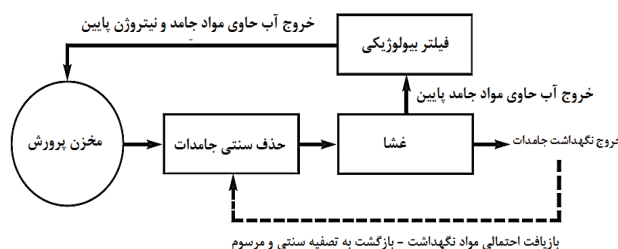
مانند فیلتراسیون غشایی با اهداف مختلفی صورت می‌گیرد که مهمترین آن‌ها کاهش مصرف آب، حذف مواد سمی برای ماهیان (به‌ویژه نیتريت و آمونیوم یا آمونیاک) و حذف ذرات معلق به‌منظور جلوگیری از رشد زیست‌توده میکروبی می‌باشد (Gemende و همکاران، ۲۰۰۸؛ Gerbeth و Gemende، ۲۰۲۱). سیستم‌های آبی‌پروری مداربسته (RASes) به‌طور گسترده به‌عنوان سیستم‌های پایدار برای تأمین تقاضای روزافزون ماهیان و محصولات دریایی در سراسر جهان مورد توجه قرار گرفته‌اند. باین‌حال، عملکرد کارآمد سیستم مداربسته به تهویه مداوم آب برای مدیریت ضایعات تشکیل شده در مخازن پرورشی، حذف مواد سمی مانند آمونیاک و حفظ غلظت‌های مناسب اکسیژن محلول وابسته است (Gemende و همکاران، ۲۰۰۸). با توجه به استفاده مداوم از آب بازیافتی، در سیستم‌های پرورشی مداربسته به‌طورکلی فرآیندهای تصفیه پیچیده است (Roger و Viadero، ۲۰۰۳).

مدیریت مواد جامد

پسماندهای جامد موجود در سیستم مداربسته مستقیم یا غیرمستقیم از خوراک اضافه شده به سیستم تولید می‌شوند. این پسماندها به‌عنوان باقی‌مانده خوراک مصرف نشده، متابولیت‌های ماهی و یا میکروارگانیسم‌هایی که در سیستم رشد می‌کنند، وجود دارند (رادخواه، ۱۳۹۳). بررسی مطالعات انجام شده نشان داده است، ارتباط مستقیمی بین بارگذاری مواد آلی جامد و بیماری‌های باکتریایی ماهیان و آلودگی آمیبی آبشش وجود دارد (رادخواه و همکاران، ۱۳۹۹). در نتیجه، اقدامات موثر در مدیریت جامدات برای عملکرد کارآمد RAS لازم است. تجمع مواد جامد آلی در سیستم RAS، میزان اکسیژن محلول موجود برای تنفس ماهی را کاهش می‌دهد و به‌عنوان یک عامل اصلی تراکم قابل تولید ماهی را محدود می‌کند. همچنین، مواد جامد آلی به‌عنوان سایت‌های میزبان برای عوامل بیماری‌زای فرصت‌طلب عمل می‌کنند. از این‌رو، این مواد می‌توانند اثرات سو بیشتری بر بهره‌وری سیستم RAS داشته باشند. فرآیندهای معمولی تصفیه مانند ته‌نشینی در حذف مواد جامد بزرگ در سیستم RAS موثر هستند. باین‌حال، مواد آلی ریز با قطر کمتر از ۲۰ تا ۲۵ میکرومتر، در اکثر موارد از تصفیه معمولی عبور می‌کنند و با گذشت زمان در سیستم تجمع می‌یابند. یک روش مناسب برای مدیریت تجمع مواد جامد و ریز در سیستم RAS، جداسازی به‌واسطه غشای تحت فشار است. در این روش، ذرات معلق بزرگتر از منافذ غشا عبور نمی‌کنند و به دام می‌افتند، در حالی‌که آب و مواد تشکیل‌دهنده محلول آزادانه از غشا عبور می‌کنند (Roger و Viadero، ۲۰۰۳).

• اجرای فرآیند

براساس ملاحظات اقتصادی، میکروفیلتراسیون نمی‌تواند در برابر سایر فناوری‌ها مانند فیلترهای میکرواسکرین دوار برای تصفیه مستقیم آب در سیستم RAS رقابت کند. اگرچه سایر فرآیندهای متداول تصفیه در شفاف‌سازی مقادیر زیادی آب موثر هستند، اما قادر به حذف ذرات ریز نیستند. در این شرایط، فیلتراسیون غشایی می‌تواند به عنوان یک مرحله اضافه برای کنترل تجمع جامدات ریز در سیستم RAS استفاده شود (Roger و Viadero, ۲۰۰۳). در شکل (۶)، نمایی از کاربرد فیلتراسیون غشایی در تصفیه آب ارائه شده است.



شکل ۶- نمای شماتیکی از اجرای میکروفیلتراسیون در سیستم‌های RAS (Viadero و Roger, ۲۰۰۳)

در چنین استراتژی، حذف ذرات معلق بزرگ تحت تأثیر فرآیندهای متداول قرار می‌گیرد. سپس، مواد جامد کوچک با استفاده از فیلتراسیون غشایی حذف می‌شوند. این آرایش باعث کاهش تقاضای اکسیژن مرتبط با مواد آلی درشت و ریز می‌شود (Roger و Viadero, ۲۰۰۳). در نتیجه، فرصت تجمع ارگانیسم‌های بیماری‌زا در سیستم‌های مدار بسته را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، نرخ رسوب و بارگذاری در بیوفیلتر را از طریق حذف مواد جامد درشت و ریز می‌توان کاهش داد، در نتیجه فرآیند تصفیه سریع‌تر و بیشتر صورت می‌گیرد (Ezugbe و Rathilal, ۲۰۲۰).

کاربرد فناوری غشایی در سیستم‌های پرورشی مختلف

• سیستم پرورش آزادماهی

استفاده از فیلتراسیون غشایی در سیستم‌های پرورشی مدار بسته (RAS) می‌تواند کیفیت آب را بهبود بخشد. در نتیجه، احتمال مرگ و میر ماهی‌ها به دلیل حضور عوامل میکروبی را کاهش می‌دهد (Bonisławska و همکاران, ۲۰۱۶). Fletcher (۲۰۲۰) به بررسی کاربرد فیلتراسیون غشایی در سیستم پرورشی مدار بسته در آزادماهی پرداخت. وی بیان کرد، چالش اصلی در سیستم‌های RAS تجمع ذرات آلی معلق می‌باشد که به دلیل ناکارآمدی سیستم‌های تصفیه قبلی امکان حذف آن‌ها وجود

نداشته است. مواد آلی بیشتر منبع تعیین‌کننده برای حضور باکتری‌های هتروتروف در سیستم هستند. Fletcher (۲۰۲۰) عنوان کرد استفاده از یک روش مناسب به منظور حذف ذرات آلی معلق شکوفایی کمتر باکتری‌های فرصت‌طلب و پویایی جامعه آبی را به همراه دارد. تحقیقات انجام شده نشان دادند غشاهای باعث افزایش سرعت رشد و کاهش مرگ و میر در پرورش لارو ماهیان دریایی می‌شوند. با این حال، فرضیه محققین این بود که فیلتراسیون غشایی در سیستم RAS با پایینتر و یکنواخت نگهداشتن ذرات آلی، پایداری را افزایش می‌دهد (Fossmark و همکاران, ۲۰۲۰; Fletcher, ۲۰۲۰). پایین نگه داشتن مواد آلی در سیستم‌های مدار بسته به ویژه سیستم‌هایی که با میزان بالای تراکم آبزیان مواجه هستند، اهمیت ویژه‌ای دارد.

• سیستم پرورش آزادماهی اقیانوس اطلس (*Salmo salar*)

Nedberg (۲۰۱۸) به بررسی چگونگی استفاده از فیلتر غشایی برای حذف ذرات در سیستم RAS به منظور توسعه کیفیت آب و عملکرد آزادماهی اقیانوس اطلس پرداخت. این محقق دو سیستم RAS در مقیاس آزمایشی را مقایسه نمود. یک سیستم با استفاده از اجزای معمولی تصفیه آب (cRAS) عمل می‌کرد و دیگری شامل یک غشای فیلترکننده (mRAS) بود. در این مطالعه، پارامترهای کیفیت آب (دما، اکسیژن، شوری، دی‌اکسید کربن، pH، نیتروژن کل، آمونیاک، نیتريت، نیترات، کدورت و مواد جامد معلق) و پارامترهای رشد ماهی (وزن، طول، شاخص‌های ایمنی و هماتولوژی) در طول ۱۸ هفته اندازه‌گیری شد و نتایج حاصل از cRAS و mRAS مقایسه شدند. تفاوت مشاهده شده در کیفیت آب ناشی از فیلتراسیون غشایی، در درجه اول به دلیل افزایش حذف ذرات و افزایش دمای آب به دلیل تولید گرمای ناشی از کار با غشا کدورت کمتری نشان داد. همچنین، در این سیستم سطح اکسیژن محلول و دی‌اکسید کربن نیز متفاوت بود و رشد بیشتر در mRAS رخ داده بود که حاصل دمای بالاتر آب بود (Nedberg, ۲۰۱۸). بیشترین اختلاف در عملکرد رشد ماهی مشاهده شد. Nedberg (۲۰۱۸) بیان کرد فیلتراسیون غشایی می‌تواند گزینه مناسبی در سیستم RAS برای حذف ذرات باشد.

نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات

مطالعه حاضر نشان داد فیلتراسیون غشایی طیف وسیعی از فرآیند فیلتراسیون شامل اسمز معکوس، نانوفیلتراسیون، اولترافیلتراسیون و میکروفیلتراسیون را شامل می‌شود. بررسی منابع به دست آمده نشان داد روش فیلتراسیون غشایی مزایای مختلفی دارند، از جمله مهم‌ترین آن‌ها کاهش هزینه‌های کلی

تولید، انعطاف‌پذیری بالا و کیفیت بالای محصول می‌باشد. براساس مرور منابع، مواد جامد موجود در سیستم پرورش آبزیان از غذای مصرف نشده و مدفوع تولید شده توسط ماهی حاصل می‌شود. جامدات بزرگتر از ۶۰ میکرومتر به‌طور متداول توسط میکرواسکرین‌ها حذف می‌شوند. با این حال، تحقیق در مورد مدیریت ذرات ریز (>۶۰ میکرومتر) و کنترل تولید آمونیاک محلول به بررسی بیشتر نیاز دارد که این امر می‌تواند با استفاده از روش‌های فیلتراسیون غشایی تحقق یابد (Kurama و همکاران، ۲۰۰۲؛ Cancino- Hurtado و Madariaga، ۲۰۱۴).

توجیه اقتصادی استفاده از فیلتراسیون غشایی در سیستم‌های آبزی‌پروری به‌ویژه سیستم‌های مدار بسته دریایی هنوز به ارزیابی‌های بیشتر نیاز دارد. به‌طور کلی، این مطالعه نشان داد فیلتراسیون غشایی کاربرد بالقوه‌ای در حذف مواد آلی و ذرات ریز جامد از سیستم‌های پرورشی مدار بسته دارد. این کاربرد می‌تواند در بخش‌های مختلف آبزی‌پروری شامل پرورش لارو ماهیان بررسی شود انتظار می‌رود یافته‌های ارائه شده در این مطالعه بتواند در جهت مدیریت پایدار ذخایر آبی و تصفیه آب در بخش‌های مختلف صنعت از جمله بخش آبزی‌پروری مورد استفاده مدیران و کارشناسان مسئول قرار گیرد.

پی‌نوشت

- 1-Recirculating Aquaculture Systems
- 2-Reverse Osmosis
- 3-Nanofiltration
- 4-Ultrafiltration
- 5-Microfiltration
- 6-Filter Cake

منابع

رادخواه، ع.ر. ۱۳۹۳. حذف آمونیاک از سیستم‌های پرورش ماهی با استفاده از باکتری‌های نیتریفیکاتور. اولین همایش آبزی‌پروری نوین- چالش‌ها و فرصت‌ها. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

رادخواه، ع.ر. و کریمی، ع. ۱۳۹۳. احیای ذخایر ماهیان خاویاری با رویکرد پرورش در قفس. اولین همایش آبزی‌پروری نوین- چالش‌ها و فرصت‌ها. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

رادخواه، ع.ر.، ایگدري، س. و صادقی نژاد ماسوله ا. ۱۳۹۹. بررسی خواص ضد میکروبی نانوذرات نقره (AgNPs)

به‌منظور کنترل بیماری‌ها و مدیریت بهداشت در سیستم‌های آبزی‌پروری. مجله آبزیان زینتی، ۷(۱): ۱۵-۱۷.

رادخواه، ع.ر. و ایگدري، س. ۱۳۹۸. بررسی خصوصیات زیست‌شناختی و پتانسیل‌های پرورشی برخی از گونه‌های جراح ماهی (خانواده: Acanthuridae) ساکن خلیج فارس جهت بهره‌برداری در صنعت پرورش ماهیان زینتی. مجله آبزیان زینتی، ۶(۴): ۱۱-۱.

رادخواه، ع.ر. ۱۳۹۸. گسترش بیماری‌های انگلی به‌عنوان تهدیدی جدی برای صنعت پرورش ماهیان زینتی: بررسی میزان شیوع انگل آرگولوس (Argulus) در ماهیان زینتی ایران. مجله آبزیان زینتی، ۶(۳): ۱۳-۲۲.

رادخواه، ع.ر. و صادقی‌نژاد ماسوله، ا. ۱۴۰۰. بررسی تاثیر عوامل فیزیکوشیمیایی آب بر زیست‌فراهمی، میزان سمیت و سطح اثرگذاری نانوذرات فلزی در اکوسیستم‌های آبزی. نشریه آب و توسعه پایدار، ۸(۲): ۷۱-۹۰.

Alfa Laval B.W. 2021. Alfa Laval Global Website. What is membrane filtration? Available at: <https://www.alfalaval.com/products/separation/membranes/what-is-membrane-filtration>. (visited 29 May 2021).

Anis S.F., Hashaikh R. and Hilal N. 2019. Microfiltration membrane processes: A review of research trends over the past decade. Journal of Water Process Engineering, 32: 100941.

Bodzek M., Konieczny K. and Rajca M. 2019. Membranes in water and wastewater disinfection-review. Archives of Environmental Protection, 45(1): 3-18.

Bonislawska M., Nedzarek A., Drost A., Rybczyk A. and Tórz A., 2016. The application of ceramic membranes for treating effluent water from closed-circuit fish farming. Archives of Environmental Protection, 42(2): 59-66.

Chiam C-k. and Rosalam S. 2011. Purification of aquacultural water: conventional and new membrane-based techniques. Separation and Purification Reviews, 40(2): 126-160.

Dhineshkumar V. and Ramasamy D. 2017. Review on membrane technology applications in food and dairy processing. Journal of Applied Biotechnology and Bioengineering, 3(5): 399-407.

Ezugbe E.O. and Rathilal S. 2020. Membrane Tech-

- Li X., Jiang L. and Li H. 2018. Application of ultrafiltration technology in water treatment. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 186: 012009.
- Nedberg H.G.A. 2018. The effects of membrane filtration in a recirculating aquaculture system on water quality and fish performance of Atlantic salmon (*Salmo salar*). Available at: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2504408>. (visited April 14, 2021).
- Ostojčić M., Brkić S., Tišma M., Zelić B. and Budžaki S. 2020. Membrane filtration as an environmentally friendly method for crude biodiesel purification. *Kemija u Industriji*, 69(3-4): 175–181.
- Radkhah A.R. and Eagderi S. 2021. Book review: *Lobsters: Biology, Fisheries and Aquaculture*, 2019. E. V. Radhakrishnan, Bruce F. Phillips and Gopalakrishnan Achamveetil (eds). *Current Science*, 12(10): 1640-1642.
- Roger C. and Viadero Jr. 2003. Membrane filtration: Emerging technology removes fine solids from recirculating systems. Available at: <https://www.aquaculturealliance.org/advocate/membrane-filtration-emerging-technology-removes-fine-solids-from-recirculating-systems>. (visited 1 June 2003).
- Sun X., Wang C., Li Y., Wang W. and Wei J. 2015. Treatment of phenolic wastewater by combined UF and NF/RO processes. *Desalination*, 355: 68–74.
- Synder Filtration. 2021. Pressure-Driven Membrane Filtration Processes. Available at: <https://synderfiltration.com/learning-center/articles/introduction-to-membranes/pressure-driven-membrane-filtration-processes>. (visited 29 May 2021).
- Takht Ravanchi M., Kaghazchi T. and Kargari A. 2009. Application of membrane separation processes in petrochemical industry: A review. *Desalination*, 235: 199–244.
- Viadero R.C. and Noblet J.A. 2002. Membrane filtration for removal of fine solids from aquaculture process water. *Aquacultural Engineering*, 26: 151–169.
- nologies in Wastewater Treatment: A Review. *Journal of Membranes*, 10: 1-28.
- Fletcher R. 2020. Membrane filters prove promising in salmon RAS. Available at: <https://thefishsite.com/articles/membrane-filters-prove-promising-in-salmon-ras>. (visited 7 May 2020).
- Fossmark R.O., Vadstein O., Rosten T.W., Bakke I., Košeto D., Bugten A.V., Helberg G.A., Nesje J., Jørgensen N.O.J., Raspati G., Azrague K., Østerhus S.W. and Attramadal K.J.K. 2020. Effects of reduced organic matter loading through membrane filtration on the microbial community dynamics in recirculating aquaculture systems (RAS) with Atlantic salmon parr (*Salmo salar*). *Journal of Aquaculture*, 524: 735268.
- Gemende B., Gerbeth A., Pausch N. and Bresinsky A.V. 2008. Tests for the application of membrane technology in a new method for intensive aquaculture. *Desalination*, 224(1–3): 57-63.
- Gerbeth A. and Gemende B. 2021. Membrane technology for process water cleaning in aquaculture - chances and challenges. Available at: http://home.zcu.cz/~tesarova/IP/Proceedings/Proc_2012/Presentations/Membrane.pdf. (visited 30 May 2021)
- Hube S., Eskafi M., Hrafnkelsdóttir K.F., Bjarnadóttir B., Bjarnadóttir M.A., Axelsdóttir S. and Wu B. 2020. Direct membrane filtration for wastewater treatment and resource recovery: A review. *Science of The Total Environment*, 710: 136375
- Hurtado C.F. and Cancino-Madariaga B. 2014. Ammonia retention capacity of nanofiltration and reverse osmosis membranes in a non steady state system, to be use in recirculation aquaculture systems (RAS). *Aquacultural Engineering*, 58: 29-34.
- Jianxian Z. and Hongqi Y. 2009. Ultrafiltration technology and its application. *Journal of Industrial Water and Wastewater*, 2: 1-5.
- Kurama H., Poetzschke J. and Haseneder R. 2002. The application of membrane filtration for the removal of ammonium ions from potable water. *Water Research*, 36(11): 2905-2909.

Investigation of Effective Parameters in Adsorption of Reactive Yellow 145 from Aqueous Solution by Using Activated Carbon Prepared from Rice Straw

O. Sedaghat¹, N. Bahramifar^{2*}, H. Younesi³

1,2- 1, 2, 3- M.Sc. Student, Associate Professor and Professor, Department of Environmental Science, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Iran.

*(Corresponding Author Email: n.bahramifar@modares.ac.ir)

Received: 01-05-2021

Revised: 04-08-2021

Accepted: 06-09-2021

Available Online: 06-12-2021

بررسی پارامترهای موثر در جذب رنگ راکتیو زرد ۱۴۵ از محلول آبی به وسیله کربن فعال تهیه شده از کاه برنج

امید صداقت^۱، نادر بهرامی فر^{۲*}، حبیب الله یونسی^۳

۱، ۲ و ۳- به ترتیب کارشناسی ارشد علوم و مهندسی محیط زیست، دانشیار و استاد، گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، ایران.

*(نویسنده مسئول، E-Mail: n.bahramifar@modares.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۱۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۵/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۱۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۰/۰۹/۱۵

Abstract

Recently, the influx of dyes into water resources has disrupted the natural order of ecologists due to their toxicity to biodiversity. In this study, activated carbon prepared from rice straw was synthesized with potassium hydroxide solution in ratios of 1: 3 and 1: 2 at temperatures of 800 °C and 900 °C, and it was used to absorb reactive yellow 145 dye prepared in a laboratory that has similar properties to the real effluent of Tehran textile industry. Then, the effect of important variables on the adsorption process such as pH (2-8), contact time (15-120 minutes), adsorbent dose (30-60 mg), dye concentration (50-200 mg/L), and temperature (15-45 °C) Checked out. The results showed that the adsorption rate was inversely related to the pH of the solution and the initial dye concentration and was directly related to the adsorbent dose, temperature, and activator saturation ratio. Among the isothermal models, the Redlich-Peterson model ($R^2 = 0.995$) with the equilibrium adsorption capacity of 324.6 mg/g had a better agreement with the experimental adsorption results and the kinetic studies showed that the adsorption process follows the pseudo-second-order model ($R^2 = 0.995$). Thermodynamic studies also showed that the adsorption process is spontaneous and the negative slope of the Van-Hoff curve indicates that the reaction is endothermic. Due to the equilibrium time of 60 minutes in the adsorption mechanism, the synthesized adsorbent has a high rate of adsorption of reactive yellow 145 dye. The synthesized adsorbent with properties such as high specific surface area, environmentally friendly, availability of precursors, and suitable performance in dye adsorption can be used effectively in dye effluent treatment systems.

Keywords: Carbon Adsorbent, Dye Absorption, Adsorption Kinetics, Reactive Yellow Dye.

چکیده

در سال‌های اخیر، ورود مواد رنگ‌زا به منابع آبی به دلیل ایجاد سمیت برای زیست‌مندان سبب برهم زدن نظم طبیعی بوم‌سازگان شده است. در این مطالعه، کربن فعال تهیه شده از کاه برنج، سنتز و با محلول پتاسیم هیدروکسید با نسبت‌های ۱:۳ و ۱:۲ در دمای ۸۰۰ °C و ۹۰۰ °C فعال‌سازی و به‌منظور جذب رنگ راکتیو زرد ۱۴۵ تهیه شده در محیط آزمایشگاهی که خصوصیات مشابه پساب واقعی صنایع نساجی شهر تهران را دارد، استفاده گردید. سپس متغیرهای مهم بر فرآیند جذب مانند pH (۲-۸)، زمان تماس (۱۵-۱۲۰ دقیقه)، دوز جاذب (۳۰-۶۰ میلی‌گرم)، غلظت رنگ (۵۰-۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) و دما (۱۵-۴۵ درجه سانتی‌گراد) بررسی شد. نتایج نشان داد که میزان جذب با pH محلول و غلظت اولیه رنگ رابطه عکس و با دوز جاذب، دما، و نسبت اشباع فعال‌ساز رابطه مستقیم دارد. از میان مدل‌های هم‌دما، مدل ردلیچ-پیترسون ($R^2 = 0.995$) با ظرفیت جذب تعادلی ۳۲۴/۶ mg/g مطابقت بهتری با نتایج تجربی جذب داشته است و مطالعات سینتیکی نشان داد فرآیند جذب از مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم ($R^2 = 0.998$) پیروی می‌کند. مطالعات ترمودینامیکی نیز نشان داد که فرآیند جذب خودبه‌خودی است و منفی بودن شیب منحنی وانت‌هوف، بیانگر گرماگیر بودن واکنش است. با توجه به زمان تعادلی ۶۰ دقیقه در مکانیسم جذب، جاذب سنتز شده از سرعت بالایی در جذب رنگ راکتیو زرد ۱۴۵ برخوردار است. جاذب سنتز شده با داشتن خصوصیات هم‌چون سطح ویژه بالا، دوست‌دار محیط‌زیست، دسترس بودن پیش‌ماده و عملکرد مناسب در جذب رنگ، می‌تواند به نحو موثری در سیستم‌های تصفیه پساب رنگی استفاده شود. **واژه‌های کلیدی:** جاذب کربنی، جذب رنگ، سینتیک جذب، رنگ راکتیو زرد.

و همکاران، ۲۰۱۱). فرآیند جذب سطحی یکی از معمول‌ترین فرآیندهای مورد استفاده در تصفیه فاضلاب‌های صنعتی می‌باشد. جذب سطحی یک فرآیند انتقال جرم است که در آن ماده مد نظر برای جذب، بر اساس روش‌های فیزیکی یا شیمیایی توسط جاذب از محیط جدا می‌شود (Lin و همکاران، ۲۰۰۸). هدف از پژوهش حاضر تهیه کربن فعال از زیست‌توده قابل دسترس کاه برنج، برای جذب رنگ نساجی راکتیو زرد ۱۴۵ و بررسی پارامتر موثر در فرآیند جذب از جمله؛ زمان تماس، دوز جاذب، غلظت اولیه رنگ در محلول و کارایی جاذب تهیه شده در شرایط دمایی و نسبت اشباع مختلف است. همچنین مطالعات تعادلی سینتیک و ترمودینامیک برای حذف رنگ راکتیو زرد ۱۴۵ بررسی شد.

مواد و روش‌ها

در مطالعه حاضر از کربن فعال تهیه شده از کاه برنج برای جذب ماده رنگ‌زای راکتیو زرد ۱۴۵ استفاده شد و تمامی آزمایش‌های جذب به صورت ناپیوسته انجام شد. همچنین مواد شیمیایی مورد استفاده در روند انجام تحقیق در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱- مواد شیمیایی به کار رفته در مطالعه حاضر

نام فارسی	درجه خلوص	نام شیمیایی
پتاسیم هیدروکسید	۹۶٪	KOH
اسید سولفوریک	۹۸٪	H ₂ SO ₄
اسید هیدروکلریک	۳۷٪	HCl
اسید نیتریک	۶۲٪	HNO ₃

۱- تهیه جاذب

جهت تهیه کربن فعال، ابتدا کاه برنج به عنوان پیش‌ماده به قطعات ۱ تا ۳ سانتی‌متری خرد و درون آون با دمای ۷۰°C قرار گرفت تا کاملاً خشک شود، سپس مقداری از نمونه آسیاب شده در کوره پیرولیز با دمای ۶۰۰°C در حضور گاز آرگون به مدت ۲ ساعت کربونیزه شد. نمونه کربونیزه شده، پس از سرد شدن کوره تا دمای اتاق، از راکتور خارج شد. سپس با پتاسیم هیدروکسید با نسبت‌های ۱:۲ و ۱:۳ مخلوط شد. بعد از این مرحله، نمونه در آون با دمای ۱۱۰°C قرارگرفت تا کاملاً خشک شود. در ادامه نمونه در کوره با دمای ۹۰۰°C به مدت ۲ ساعت در حضور گاز آرگون قرارگرفت. در نهایت نمونه تا دمای اتاق در حضور جریان گاز آرگون سرد شده و به منظور حذف پتاس و خاکستر، کربن را با استفاده محلول ۰/۰۱ نرمال هیدروکلریک اسید و آب مقطر شستشو داده شد و نمونه در آون تحت دمای ۱۱۰°C به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شد تا خشک گردد. تصویری از جاذب تهیه شده در شکل (۱) آورده شده است.

تخلیه پساب صنایع نساجی، کاغذ و چرم که حاوی انواع رنگ‌ها با ساختارهای شیمیایی پیچیده و ورود گسترده این آلاینده‌ها به محیط‌زیست که دارای پتانسیل بیماری‌زایی و سمیت هستند، نگرانی‌های بسیاری را در سال‌های اخیر به وجود آورده است. رنگ‌های راکتیو نساجی به دلیل پایداری بالا و کاربرد آسان به طور گسترده‌ای در این صنایع استفاده می‌گردند و نیمی از کل رنگ‌های مورد استفاده در صنعت نساجی را به خود اختصاص می‌دهند. در فرآیند رنگ‌رزی به طور متوسط ۵۰ لیتر آب برای رنگ کردن هر کیلو پارچه به کار می‌رود که پس از فرآیند رنگ‌رزی، بخش قابل توجهی از آن حاوی مواد سمی و رنگی خطرناک هستند که به محیط‌زیست وارد می‌شود (Kannan و همکاران، ۲۰۱۳). رنگ‌های راکتیو به دلیل حلالیت بالا در آب، دارای غلظت‌های بیشتری نسبت به سایر رنگ‌های مورد استفاده در پساب صنایع نساجی است. این رنگ‌ها به راحتی توسط سیستم‌های تصفیه، حذف و پاک‌سازی نمی‌شود (Tunc و همکاران، ۲۰۰۹). رنگ‌های مصنوعی تهدیدی جدی برای موجودات زنده و به طور کلی برای منبع‌های زندگی همه گونه‌های زنده است (Alnuaimi و همکاران، ۲۰۰۸). از این رو جلوگیری از ورود یا کاهش غلظت این آلاینده‌ها به محیط‌زیست امری حیاتی است که باید مورد توجه قرار گیرد. از آنجایی که مواد رنگی در برابر فرآیند هضم هوازی مقاومت بالایی از خود نشان می‌دهند، بنابراین لازم است که این مواد رنگی با استفاده از روش‌های کارآمد و کم‌هزینه‌تر و با در نظر گرفتن نوع آلاینده و شرایط محیطی، فرآیند حذف بر روی آن‌ها انجام پذیرد. برای تحقق این امر پژوهشگران راه‌حل‌های بسیاری از جمله؛ انعقاد، لخته‌سازی، اسمز معکوس و روش‌های بیولوژیکی را ارائه کرده‌اند (Dos Santos و همکاران، ۲۰۰۷). که به دلیل مواردی همچون هزینه بالا، پیچیدگی طراحی و اجرا و عدم کارایی مناسب برای جذب رنگ، چندان مورد توجه قرار نگرفته‌اند. در این میان، استفاده از روش جذب سطحی به وسیله جاذب‌های تهیه شده از مواد زیست‌توده، هیچکدام از مشکلات بالا را ندارد. جذب سطحی فرآیندی است که در طی آن غلظت مولکول‌های ماده جذب شونده در اثر تماس با سطح جاذب در محلول کاهش می‌یابد که این جذب به دلیل نیروی جاذبه موجود بر روی سطح جامد آن است. عوامل فیزیکی و شیمیایی مختلفی در فرآیند جذب سطحی تأثیرگذار هستند و مقدار آن به ماهیت جاذب و ماده جذب شونده دارد (Pang و Gong، ۲۰۰۸). کربن فعال سنتز شده دارای خصوصیات منحصر به فردی از جمله ساختار متخلخل، اندازه ذرات ریز، مساحت و سطح ویژه بالا و در دسترس بودن پیش ماده و مقاومت مکانیکی بالا است. خصوصیات جاذب سنتز شده باعث گردیده که استفاده از آن در حذف انواع آلاینده‌ها به خصوص محتوای رنگی پساب نساجی مورد توجه قرار گیرد (Ren



شکل ۱- کربن فعال تهیه شده از کاه برنج

کربن فعال با استفاده از رابطه (۱) و راندمان حذف با استفاده از رابطه (۲) محاسبه گردید. لازم به ذکر است برای اطمینان از دقت مطالعه، آزمایشات دو مرتبه تکرار شد.

$$q_e = (C_0 - C_e)V/W \quad (1)$$

$$R = (C_0 - C_e) \times 100 / C_0 \quad (2)$$

در این رابطه‌ها، C_0 و C_e به ترتیب غلظت اولیه و غلظت تعادلی رنگ (mg/L)، V حجم محلول رنگ (ml) و W مقدار جاذب (g) است (Birjandi و همکاران، ۲۰۱۴).

۴- هم‌دمای جذب

هم‌دمای جذب نقش مهمی در بهینه‌سازی مصرف مواد جاذب دارند. در این پژوهش به سه مورد از مهم‌ترین این مدل‌ها یعنی هم‌دمای لانگمویر، فرندلیخ و ردلیچ-پیترسون پرداخته شده است. این مدل‌ها به منظور بررسی مکانیسم جذب، خواص سطحی و توصیف داده‌های تجربی مورد استفاده قرار می‌گیرند. به همین دلیل تشکیل ارتباطی مناسب بین نمودارهای تعادل جهت بهینه‌سازی شرایط و طراحی سیستم‌های جذب، بسیار ضروری است (Birjandi و همکاران، ۲۰۱۴).

• مدل هم‌دمای لانگمویر

مدل هم‌دمای جذب لانگمویر مربوط به جذب تک‌لایه‌ای است و فرض بر این است که جذب در جایگاه‌های ویژه، یکسان رخ می‌دهند (El Nemr, ۲۰۰۹). رابطه غیرخطی آن به صورت زیر تعریف گردید.

$$q_e = (q_{\infty} - bC_e) / (1 + bC_e) \quad (3)$$

در این رابطه q_e مقدار یون‌های ماده جذب شده بر حسب mg/g، C_e غلظت تعادلی یون‌های ماده در محلول بر حسب mg/l، q_m مقدار حداکثر q_e در جذب تک لایه بر حسب mg/g و b ثابت تعادل است و بر اساس l.mg/g است (Sun و همکاران، ۲۰۱۵).

• مدل هم‌دمای فروندلیخ

فروندلیخ در سال ۱۹۰۹ مدل هم‌دمایی را تعریف کرد که بر اساس جذب چند لایه روی سطح ناهمگن جاذب است که برهمکنش مولکول‌های جذب شده را نشان می‌دهد و با افزایش غلظت آلاینده، ظرفیت جذب نیز افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر با پیوستن یک یون فلزی بر سطح جاذب، اثرات متقابل بین جاذب و یون فلزی، نیروی محرکه‌ای برای جذب یون‌های دیگر بر روی این مکان است. این مدل به صورت رابطه (۴) بیان می‌گردد.

$$q_e = k_f C_e^{1/n} \quad (4)$$

که در آن q_e و C_e همان پارامترهای لانگمویر هستند. مقدار k_f ثابت ایزوترم فروندلیخ در ارتباط با مقدار جذب بر حسب لیتر بر گرم و $1/n$ شدت جذب است که با غیر یکنواختی مواد تغییر می‌کند. n بزرگتر از یک و بدون واحد است (Freundlich, ۱۹۰۶).

۲- آماده‌سازی محلول رنگی استاندارد در محیط آزمایشگاهی

به منظور تهیه محلول رنگی در محیط آزمایشگاهی، ابتدا ۱۰۰ میلی‌گرم از ماده رنگ‌زا را در یک لیتر آب مقطر حل نموده تا استاندارد ۱۰۰ mg/l تهیه شود. سپس جهت رسم منحنی کالیبراسیون غلظت‌های ۱۰ تا ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر از آن تهیه شد و جذب محلول‌ها با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۱۸ نانومتر قرائت و منحنی کالیبراسیون ($R^2 = 0.999$) رسم شد. ضمن اینکه برخی پارامترهای محلول رنگی سنتز شده از جمله $pH=7/3$ ، دما $=26^\circ C$ ، هدایت الکتریکی $=1659$ میکروزیمنس بر سانتی‌متر و شوری $=0.93$ mg/L تنظیم گردید که تا حد ممکن به خصوصیات کیفی پساب واقعی مربوط به صنایع نساجی منتخب شهر تهران که در جدول (۲) آورده شده، نزدیک باشد.

جدول ۲- میانگین پارامترهای پساب صنایع نساجی منتخب شهر تهران

Salinity (mg/L)	Temperature ($^\circ C$)	EC (Ms/cm)	pH
۰/۹۵۸	۲۶	۱۷۶۹/۶	۷

۳- جذب رنگ در سیستم جذب ناپیوسته

در مطالعه حاضر فرآیند جذب به صورت سیستم جذب ناپیوسته انجام گرفت. در این نوع سیستم تمام پارامترهای مورد مطالعه برای بررسی هر یک از پارامترها ثابت نگه داشته می‌شود و اثر هر پارامتر بطور جداگانه بررسی می‌شود. ابتدا محلول استاندارد رنگ‌زای راکتیو زرد ۱۴۵ (۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) با حل کردن ۱ گرم از ماده رنگ‌زا در ۱ لیتر آب مقطر تهیه گردید. سپس آزمایش در pHهای ۲، ۳، ۴، ۶ و ۸، دوزهای جاذب ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ میلی‌گرم در ۱۰۰ میلی‌لیتر از محلول رنگی با غلظت‌های اولیه ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر با استفاده از جاذب‌های سنتز شده در نسبت‌های ۱:۳ و ۱:۲ از فعال‌ساز و شرایط دمایی $80^\circ C$ و $90^\circ C$ فعال‌سازی شده انجام گرفت. جهت تنظیم pH از محلول‌های ۰/۱ نرمال HCl و NaOH استفاده شد و در ادامه کربن باقی‌مانده در محلول با استفاده از دستگاه سانتیفیوژ Universal مدل ۳۲۰R به مدت ۵ دقیقه با سرعت ۵۰۰۰ دور بر دقیقه جداسازی شد. غلظت رنگ باقی‌مانده در محلول جداسازی شده با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۱۸ نانومتر اندازه‌گیری و میزان رنگ جذب شده بر روی

• مدل همدمای ردلیچ-پیترسون

با در نظر گرفتن محدودیت‌های مدل‌های قبلی در سال ۱۹۵۹، مدل ایزوترم ردلیچ-پیترسون ارائه شد. این مدل، متغیرها را در یک ایزوترم تجربی ترکیب می‌کند و از رابطه (۵) محاسبه می‌گردد.

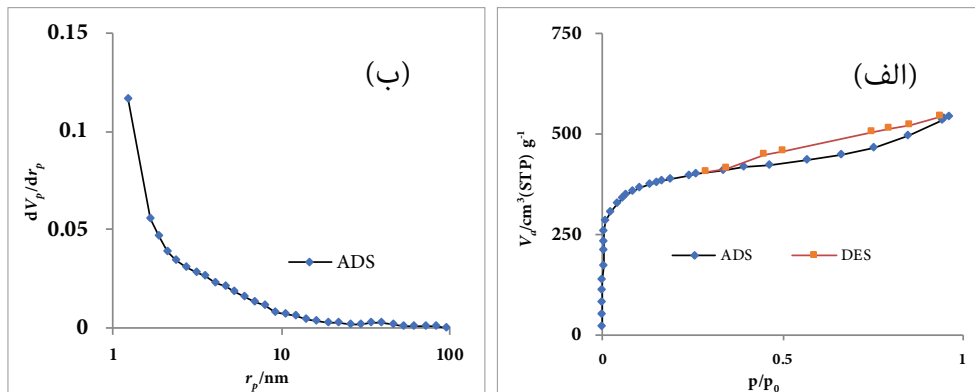
$$q_e = (K_r \times C_{eq}) / (1 + a_r \times C_{eq}^\beta) \quad (5)$$

که q_e مقدار ماده جذب شده در حالت تعادل (mg/g)، K_r ثابت تعادل ردلیچ-پیترسون (l/g)، C_{eq} غلظت محلول در حالت تعادل (mg/l)، و a_r و β ثابت‌های ایزوترم ردلیچ-پیترسون هستند (Redlich و Peterson، ۱۹۵۹).

نتایج

۱- آنالیز سطح ویژه (BET)

جهت تعیین خصوصیات چگون سطح ویژه، حجم و قطر حفرات کربن فعال از آنالیز BET استفاده شد. نتایج مربوط به فرآیند جذب و واجذب گاز نیتروژن در شکل (۲) نشان داده شده است، جذب معمولاً از طریق همدمایی بیان می‌گردد که معادل میزان ماده جذب‌شونده بر روی سطح جاذب است که تابعی از میزان غلظت ماده جذب‌شونده در شرایط ثابت دما است. بالعکس، همدمای واجذب به وسیله اندازه‌گیری مقدار گاز واجذب‌شده حاصل می‌شود. در نمونه کربن فعال تهیه شده، همدماهای جذب



شکل ۲- (الف) همدمای جذب و واجذب نیتروژن کربن فعال، (ب) توزیع اندازه حفرات نمونه کربن فعال با مدل BJH

جدول ۳- ویژگی‌های ساختاری نمونه کربن فعال سنتز شده

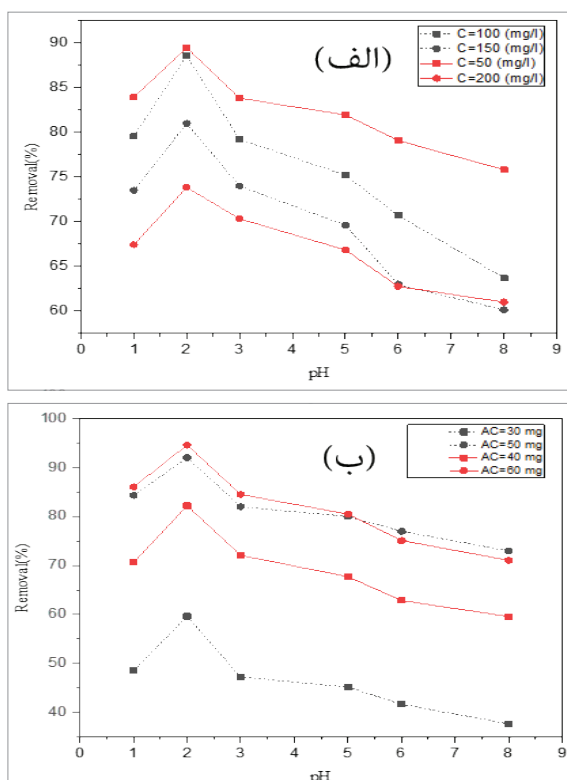
پارامترهای ساختاری					نمونه
R(nm)	V_{total} (cm ³ /g)	V_{mes} (m ³ /g)	V_{mic} (m ³ /g)	S_{BET} (m ² /g)	
۲/۴۰۷	۰/۸۴۳	۰/۳۱	۱/۰۲	۱۴۹۰	کربن فعال

SEM بررسی شد. در مطالعه حاضر ابتدا ذرات کربن فعال سنتز شده در یک میدان مغناطیسی مناسب با لایه‌ای نازک از طلا پوشانده شد و سپس تصویر SEM به وسیله میکروسکوپ SEM.LEO 1455 VP, Cambridge, U.K تهیه گردید که نتایج

۲- آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

آنالیز SEM از روش‌های پرکاربرد میکروسکوپی محسوب می‌شود. شکل ساختاری و اندازه حفرات و به طور کلی سطح نمونه کربن فعال و کربن فعال سنتز شده با استفاده از تصاویر

۲۲۱/۴ میلی گرم بر گرم و ۸۸/۶ درصد، به دست آمد. بر این اساس نتیجه گیری شد که با کاهش pH میزان ظرفیت جذب تعادلی و درصد حذف رنگ مورد مطالعه نیز افزایش می یابد. نتایج بدست آمده توسط محققان دیگر نیز این پدیده را تایید می نماید. در پژوهشی دیگر که توسط Aksu و Akın (۲۰۱۰) برای حذف رنگ نساجی با استفاده از لجن فعال انجام شد، مشخص گردید که درصد حذف رنگ در pH های پایین بسیار بیشتر است.

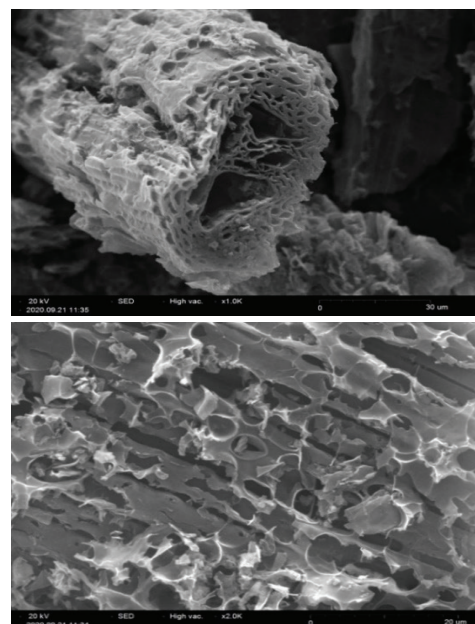


شکل ۴- اثر pH محلول بر درصد حذف رنگ توسط کربن فعال در غلظت های اولیه رنگ (الف)، مقادیر جاذب (ب)

۴- اثر زمان تماس بر میزان جذب

پس از مشخص شدن pH بهینه، در این مرحله به تعیین اثر زمان تماس جاذب با محلول رنگی در راندمان حذف رنگ توسط کربن فعال پرداخته شد، که ضمن ثابت نگه داشتن pH، غلظت و دوز جاذب، با تغییر در زمان تماس از ۳۰ تا ۱۲۰ دقیقه، کارایی جذب بررسی گردید. نتایج حاصل نشان داد فرآیند جذب رنگ توسط جاذب مورد مطالعه در ۳۰ دقیقه ۸ ابتدایی با سرعت و شیب بالایی انجام گرفت و پس از آن، درصد حذف به تدریج کاهش پیدا کرد و در نهایت بعد از گذشت مدت زمان ۶۰ دقیقه از شروع فرآیند، به تعادل رسید که به عنوان زمان بهینه جذب در نظر گرفته شد (شکل ۵). همچنین نتایج نشان داد که بیش از ۶۰ درصد جذب، در ۳۰ دقیقه ابتدایی انجام گرفته که نشان از سرعت بالای جاذب سنتز شده، دارد.

حاصل از آن در شکل (۳) نشان داده شده است. تصاویر گرفته شده از جاذب، ساختار فیزیکی و حفرات ایجاد شده بر روی سطح آن است. شکستگی ها و عدم یکپارچگی ناشی از فرآیند فعال سازی در سطح جاذب ها به وضوح قابل مشاهده است و نقاط سفید رنگ روی سطح جاذب، ممکن است در ارتباط با باقی مانده پتاسیم هیدروکسید در بافت جاذب ها در فرآیند فعال سازی و شستشو باشد.



شکل ۳- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی کربن فعال سنتز شده

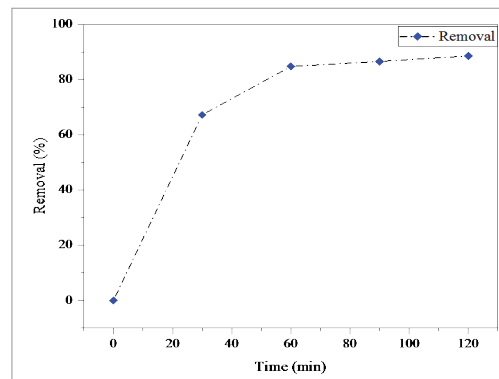
۳- اثر pH بر میزان جذب

میزان pH از جمله مهم ترین خصوصیات پساب است که با تغییر درجه یونیزاسیون، می تواند بر روی ویژگی های سطحی جاذب اثرگذار باشد (song و همکاران، ۲۰۰۹). نتایج بدست آمده از تأثیر pH بر میزان جذب رنگ راکتیو زرد ۱۴۵ مورد مطالعه توسط کربن فعال سنتز شده با غلظت های اولیه رنگ (۲۰-۵۰ میلی گرم بر لیتر) و مقادیر جاذب مورد استفاده (۳۰-۶۰ میلی گرم) در شکل (۴) نمایش داده شده است. نتایج نشان داد در pH های اسیدی به دلیل پروتونه شدن سایت های فعال و افزایش چگالی بار موجود در سطح جاذب، راندمان حذف رنگ راکتیو زرد، بالا و در pH های قلیایی، دافعه الکترواستاتیک بین یون های منفی موجود در سطح جاذب و رنگ ایجاد شده و دلیل آن را می توان این گونه بیان کرد که در pH ها قلیایی سایت های فعال بر روی سطح جاذب به شکل هیدروکسید (OH) در می آیند و در نتیجه نیروی دافعه بین رنگ و جاذب افزایش یافته و راندمان حذف کاهش یافته است. مقدار بهینه pH = ۲ برای جذب رنگ راکتیو زرد ۱۴۵ با استفاده از کربن فعال، در نظر گرفته شد که در این محدوده، ظرفیت جذب تعادلی و درصد حذف رنگ به ترتیب

pH، غلظت، دما و زمان تماس ثابت در شکل (۶-الف) نشان داد که با افزایش دوز جاذب مورد مطالعه در مدت زمان بهینه فرآیند، کارایی جذب افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت که افزایش میزان کارایی کربن فعال با افزایش میزان جاذب به دلیل افزایش سطح ویژه و منافذ داخلی جاذب است که باعث افزایش کارایی جذب رنگ می‌شود.

۶- اثر غلظت اولیه رنگ بر فرآیند جذب

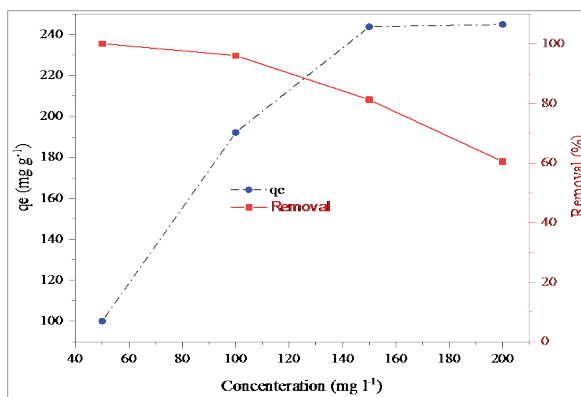
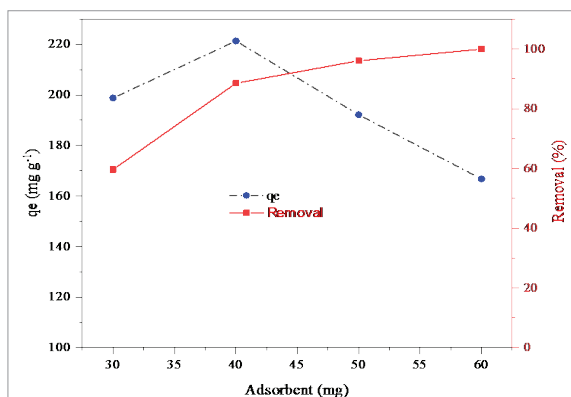
تأثیر غلظت اولیه ماده رنگ‌زای راکتیو زرد ۱۴۵ بر کارایی حذف در فرآیند جذب سطحی، با تغییرات غلظت اولیه از ۵۰ به ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم بر لیتر، در شرایط ثابت بودن سایر پارامترها، دو نمونه کربن فعال در دماهای ۸۰۰ °C و ۹۰۰ °C مطالعه و بررسی شد. همان‌طور که در شکل (۶-ب) مشخص است میزان کارایی حذف رنگ توسط جاذب مورد استفاده با افزایش غلظت رنگ کاهش یافته که امری طبیعی است، زیرا با افزایش غلظت اولیه رنگ، مقدار باقی‌مانده آن نیز افزایش می‌یابد و بنابراین راندمان حذف آن کاهش می‌یابد و علت دیگر آن اشباع شدن سطح جاذب در غلظت‌های بالای رنگ است.



شکل ۵- اثر مدت زمان تماس جاذب بر حذف رنگ (مقدار جاذب= ۴۰ mg، pH=۲، غلظت اولیه رنگ ۱۰۰ mg/l، حجم محلول ۱۰۰ ml، دما ۲۵ °C)

۵- اثر میزان جاذب در فرآیند جذب

میزان جاذب یک پارامتر مهم و تأثیرگذار در فرآیند جذب بوده، بنابراین تعیین‌کننده ظرفیت جاذب برای غلظت اولیه مشخصی از جذب‌شونده است (Nam و همکاران، ۲۰۱۵). در این بخش مقادیر مختلف ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ میلی‌گرم از جاذب در هر لیتر از محلول رنگی اضافه شد و پس از طی فرآیند جذب، نتایج جذب سطحی در



شکل ۶- اثر مقدار جاذب (الف) و غلظت اولیه رنگ (ب) بر میزان حذف (زمان تماس ۶۰ دقیقه، pH=۲، حجم محلول ۱۰۰ ml، دما ۲۵ °C)

جدول ۴- مقایسه تأثیر دمای فعال‌سازی و نسبت فعال‌ساز بر کارایی جاذب (دوز جاذب ۵۰ میلی‌گرم و غلظت رنگ ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر)

درصد حذف	ظرفیت جذب (mg/g)	نسبت فعال‌ساز به کربن	دمای فعال‌سازی (°C)
۶۷	۱۷۸	۱:۲	۸۰۰
۸۸	۲۲۱	۱:۲	۹۰۰
۷۱/۵	۱۸۹	۱:۳	۸۰۰
۹۰	۲۳۷	۱:۳	۹۰۰

همچنین مقایسه‌ای بین کارایی جذب رنگ توسط کربن فعال تهیه شده در شرایط دمای ۸۰۰ و ۹۰۰ °C و نسبت فعال‌ساز (۱:۲ و ۱:۳) انجام گرفت که نتایج آن در جدول (۴) آمده است. این نتایج نشان می‌دهد کربن فعال تهیه شده در شرایط دمایی ۹۰۰ °C و نسبت فعال‌ساز ۱:۳ بیشترین درصد حذف و ظرفیت جذب را دارد؛ اما با توجه به این‌که با تفاوت زیادی با همین شرایط دمایی و نسبت فعال‌ساز ۱:۲ ندارد، بنابراین شرایط دمایی ۹۰۰ °C و نسبت ۱:۲ فعال‌ساز مقرون به صرفه‌تر به نظر می‌رسد.

۷- مطالعات سینتیکی جذب

شده است. طبق نتایج به دست آمده ضریب همبستگی مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم نسبت به مدل سینتیکی شبه مرتبه اول، برای ماده جذب شونده بیشتر است. لذا سرعت فرآیند جذب رنگ راکتیو زرد ۱۴۵ روی کربن فعال از مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم پیروی می کند.

در این مطالعه از دو مدل سینتیکی شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم برای پیش بینی مکانیسم جذب رنگ راکتیو زرد ۱۴۵ بر روی کربن فعال سنتز شده، استفاده گردید. پارامترهای هر مدل به همراه ضریب همبستگی مدل در جدول (۵) آورده

جدول ۵- پارامترهای مورد مطالعه مدل های سینتیکی شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم برای جذب رنگ راکتیو زرد ۱۴۵ بر روی کربن فعال

غلظت (میلی گرم بر لیتر)					مدل های سینتیکی
۲۰۰	۱۵۰	۱۰۰	۵۰	پارامترها	
۰/۰۵۵۴	۰/۰۳۸۳	۰/۰۳۵	۰/۰۳۱	$k_1 (\text{min}^{-1})$	شبه مرتبه اول
۱۹۱/۷۷	۲۷۳/۷۶	۱۵۰/۸۹	۱۲۹/۴۲	$q_e (\text{mg g}^{-1})$	
۰/۹۷۶	۰/۹۸۵	۰/۹۵۵	۰/۹۷۷	R^2	
۰/۰۰۰۹۸	۰/۰۰۰۲۱	۰/۰۰۰۴۳	۰/۰۰۰۱۸	$k_2 (\text{g mg}^{-1} \text{min})$	شبه مرتبه دوم
۲۵۰	۲۷۷/۷۷	۲۸۷/۳	۱۳۳/۱۹	$q_e (\text{mg g}^{-1})$	
۰/۹۹۸	۰/۹۹۹	۰/۹۹۸	۰/۹۹۸	R^2	

توسط جاذب مورد مطالعه خود به خودی است. همچنین افزایش مقادیر منفی ΔG° با افزایش دما، بیانگر این است که با افزایش دما، تمایل اتصال مولکول های رنگ با سطح جاذب بیشتر شده و در نتیجه جذب افزایش می یابد. ΔS° بیانگر بی نظمی فرآیند جذب در سطح مشترک جاذب-جذب شونده است. مقادیر مثبت ΔS° نیز نشان دهنده افزایش بی نظمی در فاز مشترک جامد-مایع با افزایش دما در طول فرآیند جذب است.

جدول ۶- پارامترهای مدل های خطی لانگمویر، فرنولیچ و ردلیچ-پیترسون در جذب رنگ راکتیو یلو ۱۴۵ بر روی کربن فعال

همبستگی	مقدار	پارامتر	همدما
۰/۹۶۹	۲۳۰/۹۶	$q_m (\text{mg g}^{-1})$	لانگمویر
	۷/۱۵	K_L	
۰/۹۸۲	۱۵۱/۲۴	$K_f (\text{mg}^{1-1/n} \text{l}^{1/n} \text{g}^{-1})$	فرنولیچ
	۰/۱۲۵	n	
۰/۹۹۵	۱۸۳/۱۸	$KRP (\text{mg g}^{-1})$	ردلیچ-پیترسون
	۰/۹۲	α	

۸- مطالعات همدمای جذب

در مطالعه حاضر به منظور بررسی و تحلیل داده های تجربی و توصیف حالت تعادل در جذب بین فاز جامد و مایع از همدمای لانگمویر، فرنولیچ و ردلیچ-پیترسون استفاده گردید. مطالعه ای که توسط Gulnaz و همکاران (۲۰۱۱) انجام گرفت نشان داد که جذب رنگ راکتیو با استفاده از جاذب کربنی با مدل همدمای لانگمویر مطابقت دارد که با نتایج بدست آمده از مطالعه حاضر همخوانی ندارد. ضریب همبستگی بالای به دست آمده برای این مدل تایید کننده مدل انتخابی است. جدول (۶)، ثابت های معادلات و مقادیر ضرایب همبستگی (r) را نشان می دهد.

۹- مطالعات ترمودینامیکی جذب

جهت بررسی فرآیند جذب رنگ راکتیو زرد ۱۴۵ بر روی کربن فعال سنتز شده، ویژگی های ترمودینامیکی مانند تغییر در انرژی آزاد گیبس (ΔG°)، آنتالپی (ΔH°) و آنتروپی (ΔS°) تعیین شد. پارامترهای محاسبه شده ترمودینامیک در دماهای ۱۵، ۲۵، ۳۵ و ۴۵ درجه سانتی گراد و ضریب همبستگی در جدول (۷) آورده شده است. مقادیر ΔG° منفی است که نشان می دهد فرآیند جذب رنگ

جدول ۷- پارامترهای ترمودینامیک برای جذب رنگ با کربن فعال

جاذب	ΔH° (kJ/mol)	ΔS° (J/mol .K)	ΔG (kJ/mol)				R^2
			۳۱۸K	۳۰۸K	۳۹۸K	۲۸۸K	
کربن فعال	۵۷/۰۷۸	۲۰۷/۴۷۵	-۴/۷۸۰۰	-۶/۸۵۴۷	-۸/۹۲۹۵	-۲/۷۰۵۲	۰/۹۹۸

در مطالعه حاضر اثر pH بر روی ظرفیت جذب رنگ راکتیو زرد با استفاده از کربن فعال تهیه شده از کاه برنج با pH اولیه ۷، در محدوده pH های ۱ تا ۸، غلظت رنگ ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و دوز جاذب ۴۰ میلی‌گرم در لیتر با زمان تماس ۶۰ دقیقه بررسی گردید و مطابق نتایج بدست آمده، با افزایش میزان pH، کارایی کربن فعال در حذف رنگ کاهش پیدا کرده است. رنگ راکتیو زرد ۱۴۵ به دلیل داشتن گروه‌های عاملی سولفانات، در pH های بالا دارای بار منفی است. همچنین در pH بالا بار منفی بر روی سطح کربن فعال به دلیل یونیزه شدن گروه‌های هیدروکسیل و کربوکسیل افزایش می‌یابد که در نتیجه این دو پدیده، نیروی دافعه بین جاذب و مولکول‌های جاذب‌شونده افزایش یافته و در نهایت میزان جذب کاهش می‌یابد.

نتایج بررسی تأثیر زمان تماس بر فرآیند جذب سطحی رنگ نشان داد که با افزایش زمان تماس جاذب با محلول رنگی، میزان حذف رنگ با شیب بیشتری افزایش یافته، بعد از ۳۰ دقیقه از شیب نمودار کاسته شده و در زمان ۶۰ دقیقه به تعادل می‌رسد. در ابتدای شروع فرآیند به دلیل خالی بودن سایت‌های جاذب، سرعت جذب رنگ بالا است؛ ولی در ادامه به تدریج حفرات کربن متخلخل توسط مولکول‌های رنگ پر شده و نیروی دافعه‌ای بین جاذب و جاذب‌شونده ایجاد می‌شود که سبب کاهش سرعت فرآیند جذب می‌شود تا این‌که در زمان ۶۰ دقیقه، کل سایت‌های جاذب توسط مولکول‌های رنگ اشباع شده و به تعادل می‌رسد. نتایج حاصل از اثر مقدار جاذب استفاده شده، نشان داد که با افزایش دوز جاذب، کارایی جذب افزایش می‌یابد که به دلیل افزایش سطح ویژه و منافذ داخلی جاذب است که باعث افزایش کارایی جذب رنگ می‌شود. همچنین مشخص گردید با افزایش دوز جاذب، ظرفیت جذب کاهش می‌یابد که دلیل آن می‌تواند عدم اشغال کامل سایت‌های فعال موجود در سطح جاذب توسط مولکول‌های رنگ باشد که این امر باعث کاهش میزان جذب در واحد جرم جاذب می‌گردد.

بررسی تأثیر غلظت اولیه ماده رنگ‌زا نشان داد، کارایی حذف رنگ توسط جاذب مورد استفاده با افزایش غلظت اولیه رنگ کاهش یافته است که به دلیل اشباع شدن کامل مکان‌های فعال جاذب در غلظت‌های بالای رنگ است. در غلظت‌های اولیه پایین‌تر نسبت تعداد اولیه مولکول‌های ماده جذب‌شونده نسبت به جایگاه‌های فعال در دسترس کم است و در نتیجه مقدار جذب مستقل از غلظت اولیه خواهد بود. اما در غلظت‌های بالاتر ماده جذب‌شونده، میزان دسترسی به مکان‌های جذب کمتر و لذا حذف رنگ وابسته به غلظت اولیه خواهد بود.

در پژوهش حاضر مطالعات سینتیکی و ترمودینامیکی فرآیند

جذب رنگ راکتیو زرد ۱۴۵ توسط کربن فعال تهیه شده از کاه برنج نیز مورد بررسی قرار گرفت که نتایج بدست آمده از مطالعات سینتیکی نشان داد که مکانیسم غالب در فرآیند جذب رنگ راکتیو زرد ۱۴۵ بر روی کربن فعال تهیه شده از کاه برنج فرآیندی شیمیایی است و فرآیند فوق از مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم با ضریب همبستگی ۰/۹۹۸ پیروی می‌کند. مطالعه مدل‌های هم‌دمای جذب که ارتباط بین غلظت رنگ در محلول آبی و مقدار رنگ جذب شده بر روی سطح جاذب را مشخص می‌کند، نشان داد که ضریب همبستگی مدل هم‌دمای ردلیچ-پیترسون بیشتر از مدل‌های هم‌دمای لانگمویر و فرندولیچ است؛ بنابراین مکانیسم جذب در مطالعه حاضر از مدل هم‌دمای ردلیچ-پیترسون پیروی می‌کند. مقایسه بین مقادیر بدست آمده از ظرفیت جذب با مقادیر تجربی نیز تاییدکننده این موضوع است. نتایج حاصل شده از مطالعات ترمودینامیکی جذب بیان می‌کند که ΔG° واکنش منفی است و نشان دهنده خودبه‌خودی بودن جذب رنگ راکتیو زرد ۱۴۵ بر روی کربن فعال سنتز شده است. همچنین افزایش مقادیر منفی ΔG° با افزایش دما بیانگر این است که با افزایش دما، تمایل اتصال مولکول‌های رنگ با سطح جاذب بیشتر شده و در نتیجه، جذب افزایش می‌یابد. مقادیر مثبت ΔS° نیز نشان‌دهنده افزایش بی‌نظمی در فاز مشترک جامد-مایع با افزایش دما در طول فرآیند جذب است و منفی بودن شیب منحنی وانت‌هوف، بیانگر گرماگیر بودن واکنش جذب رنگ بر روی جاذب سنتز شده است.

کربن فعال سنتز شده با ظرفیت جذب ۳۲۴/۶ میلی‌گرم بر گرم در مدت زمان تعادلی ۶۰ دقیقه ظرفیت جذب بیشتری نسبت به مطالعات مشابه دارد و نیز با توجه به زمان تعادلی در مکانیسم جذب می‌توان گفت که جاذب سنتز شده از سرعت جذب بالایی در حذف رنگ راکتیو زرد ۱۴۵ برخوردار است. از دیگر مزیت‌های این جاذب، در دسترس بودن پیش ماده کربن فعال است. لذا موارد کربن فعال سنتز شده از کاه برنج، با دارا بودن خصوصیات چون سطح ویژه بالا، دوستدار محیط‌زیست و عملکرد مناسب در جذب ماده رنگ‌زا، می‌تواند به نحو موثری در سیستم‌های تصفیه پساب رنگی استفاده شود.

پی‌نوشت

- 1-Multilayer
- 2-Heterogeneous
- 3-Brunauer, Emmett and Teller method of measuring surface area
- 4-International union of pure and applied chemistry
- 5-Scanning electron microscope

- Separation and Purification Technology, 64(1): 26-30.
- Nam S.W., Jung C., Li H., Yu M., Flora J.R., Boateng L. K. and Yoon Y. 2015. Adsorption characteristics of diclofenac and sulfamethoxazole to graphene oxide in aqueous solution. *Chemosphere*, 136: 20-26.
- Pang XY., and Gong F. 2008. Study on the adsorption kinetics of acid red 3B on expanded graphite. *Journal of Chemistry*, 5(4): 802-809.
- Redlich O.J.D.L. and Peterson D.L. 1959. A useful adsorption isotherm. *Journal of physical chemistry*, 63(6): 1024-1024.
- Ren X., Chen C., Nagatsu M. and Wang X. 2011. Carbon nanotubes as adsorbents in environmental pollution management: a review. *Chemical Engineering Journal*, 170(2-3): 395-410.
- Sing K.S. 1985. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity (Recommendations 1984). *Pure and applied chemistry*, 57(4): 603-619.
- Sun L., Hu S., Sun H., Guo H., Zhu H., Liu M. and Sun H. (2015). Malachite green adsorption onto Fe₃O₄@SiO₂-NH₂: isotherms, kinetic and process optimization. *RSC Advances*, 5(16): 11837-11844.
- Song Z., Chen L., Hu J. and Richards R. 2009. NiO (111) nanosheets as efficient and recyclable adsorbents for dye pollutant removal from wastewater. *J Nanotechnology*, 20(27): 2-10.
- Tunc O., Tanacı H., and Aksu Z. 2009. Potential use of cotton plant wastes for the removal of Remazol Black B reactive dye. *J Hazard Mater*, 163(1): 187-198.
- Zhang L., Song X., Liu X., Yang L., Pan F., and Lv J. 2011. Studies on the removal of tetracycline by multi-walled carbon nanotubes. *Chemical Engineering Journal*, 178: 26-33.
- Aksu Z. and Akin AB. 2010. Comparison of Remazol Black B biosorptive properties of live and treated activated sludge. *Chemi Engin J.*, 165(1): 93-184.
- Alnuaimi M.M., Rauf M.A. and Ashraf S. S. 2008. A comparative study of Neutral Red decoloration by photo-Fenton and photocatalytic processes. *Dyes and Pigments*, 76(2): 332-337.
- Birjandi N., Yonesi H., Bahramifar N. and Hadavifar M. 2014. Investigation of Coagulation and Clotting Process of Purge of Environmental Pollutants of Paper Mill's Wastewater. *Journal of environmental science and technology*, 16(4): 53-60.
- Dos Santos AB., Cervantes FJ., and Van Lier JB. 2007. Review paper on current technologies for decolourisation of textile wastewaters: perspectives for anaerobic biotechnology. *Bioresource Technology*, 98(12): 2369-2385.
- El Nemr A. 2009. Potential of pomegranate husk carbon for Cr (VI) removal from wastewater: Kinetic and isotherm studies. *Journal of Hazardous Materials*, 161(1): 132-141.
- Freundlich, H. M. F. 1906. Over the adsorption in solution. *The Journal of Physical Chemistry*, 57: 385-471.
- Gulnaz O, Sahmurova A, and Kama S. 2011. Removal of Reactive Red 198 from aqueous solution by *Potamogeton crispus*. *Chem Eng J.*, 174(1-3): 579-585.
- Kannan C., Muthuraja K. and Devi M.R. 2013. Hazardous dyes removal from aqueous solution over mesoporous aluminophosphate with textural porosity by adsorption. *Journal of hazardous materials*, 244: 10-20.
- Lin YT., Weng CH., and Chen FY. 2008. Effective removal of AB24 dye by nano/micro-size zerovalent iron.



بازتخصیص و مسأله آب

در سال‌های اخیر، آب چالش اساسی کشور شده است و این چالش به محرومیت ذی‌نفعان مختلف از حقّ آبی که در گذشته در اختیار داشته‌اند گره خورده است. گاهی این حق مربوط به محیط‌زیست و نسل‌های آینده است، گاهی مربوط به کشاورزان به ویژه در پایین‌دست حوضه‌ها است و در مواردی نیز حتی چالش به تأمین آب با کیفیت برای شرب یا کسب‌وکارها در بسیاری از روستاها و شهرها رسیده است. این مسأله تحت عنوان بازتخصیص آب در ادبیات نظری مدیریت آب مطرح شده است. بازتخصیص مربوط به زمانی است که با توسعه مصارف در یک حوضه برای تقاضاهای جدید آبی وجود ندارد و در نتیجه با برداشت‌های جدید، بخشی از حقوق بهره‌برداران قدیمی جابه‌جا می‌شود.

بازتخصیص امری قابل انتظار در سیر مناطق خشک جهان به سمت توسعه است. در این مناطق با رشد جمعیت و نیازهای آن، برای بخش زیادی از منابع آب مصرف تعریف می‌شود و با استمرار تحولات جمعیتی و اقتصادی، لزوم جابه‌جایی حقوق آب به صورت دائمی یا در خشکسالی‌ها ایجاد می‌شود. اما آنچه در بسیاری از حوضه‌های آبریز ایران طی دهه‌های گذشته رخ داد، پذیرش دیرنگام بازتخصیص و تشدید شکاف منابع و تقاضای مصارف و به هم ریختگی در حقوق آب بوده است. طی این مدت دولت نقشی انحصارگرایانه در مدیریت آب بازی می‌کرد و جامعه‌ای که قاعدتاً باید محافظ حقوق خودش

بازتخصیص به مثابه راهکار

تاکنون بازتخصیص عامل بی‌عدالتی و تخریب محیط‌زیست بوده است. اما با وجود مسائلی که تحت تأثیر بازتخصیص در گذشته به وجود آمده است، به ناچار برای هرگونه راه‌کاری نیز باید به دنبال بازتخصیص بود. در واقع بازتخصیص هم مسأله است و هم راهکار. مواجهه با مسائل آب معادل با برگرداندن سهم آب به محیط‌زیست و دیگر گروه‌های محق به داشتن آب است و برای تأمین آب مصارف جدید حاصل از رشد جمعیت و توسعه بخش‌های اقتصادی جدید نیز باید به دنبال آب بود. در نتیجه بازتخصیص هم برای برگرداندن پایداری به محیط‌زیست ضروری است و هم برای تأمین نیازهای جدید اجتناب‌ناپذیر است. یک رویکرد محیط‌زیستی سخت‌گیرانه

می‌بود، به حاشیه رفته بود. این موضوع بی‌تفاوتی نسبت به حقوق بهره‌برداران قدیمی و محیط‌زیست را به همراه داشت تا این حقوق در مقابل مصارف اولویت‌دار و جذاب از نظر مدیریت آب، همچون شهرها و صنایع، یا شیف‌تگی و شیرینی رانت پروژه‌های بزرگ استحصال و انتقال منابع آب، نادیده گرفته شود. علاوه بر این عدم قطعیت‌های فیزیکی آب و شناخت ناکافی بیلان آب و به تبع آن توهم پرابی فرصت اشتباه و چند بار شمردن آب‌ها را فراهم می‌کرد. در این شرایط دولت و جامعه، به شواهد اولیه از تشدید بازتخصیص توجه زیادی نداشت و یا گروه‌های حساس به این موضوع، امکان کنش اثربخشی را نداشتند تا مسائل ناشی از بازتخصیص مستمر بر روی هم انباشته شود.

اما اکنون بازتخصیص برای هیچ کس قابل کتمان نیست. از یک سو بار توسعه کشور بر مصرف هر چه بیشتر آب قرار گرفته و از سوی دیگر، آب کافی برای تأمین بسیاری از بخش‌ها وجود ندارد. خشکی تالاب‌ها و تخلیه آبخوان‌ها و ریزگردها و سایر تبعات ناشی از آنها نگرانی‌های روزافزونی ایجاد کرده است. در رقابت برای دسترسی به آب، بازیگران پر قدرت آب را در اختیار می‌گیرند و سایر بازیگران از آن محروم می‌شوند. این قدرت می‌تواند ناشی از موقعیت در بالادست، قدرت سیاسی برای تأمین آب شهرها یا قدرت اقتصادی صنایع باشد. در مقابل، آنچه برای گروه‌های کم‌قدرت باقی می‌ماند، محرومیت از حقوق آبشان بدون هیچ‌گونه جبران خسارت یا هر شکلی از جلب توافق است.

مدافع احترام به طبیعت و جلوگیری از هرگونه بارگذاری جدید بر منابع آب برای رشد صنایع یا شهرها است. اما در واقع، جمعیت جدید (چه در شهر سکونت پیدا کند یا روستا) یا تحولات اقتصادی و ایجاد کسب‌وکارهای جدید (هر چقدر هم کم‌آبر) نیازمند منابع آب جدید است و تصمیم‌گیری درباره این تحولات، خارج از کنترل بخش آب خواهد بود. در نتیجه بخش آب به جای آنکه با رویکردی سخت‌گیرانه جلوی هرگونه بارگذاری جدیدی را بگیرد، باید شرایطی را برای فراهم‌شدن امکان بازتخصیص پایدار و عادلانه برقرار کند. بنابراین این سوال کلی که آیا بازتخصیص خوب است یا بد، سوال درستی نیست. بلکه بازتخصیص اجتناب‌ناپذیر است و در عوض باید پرسید چه بازتخصیصی خوب است؟ و معیار خوب‌بودن نیز عادلانه و پایدار بودنش است.

بازتخصیص به مثابه راهکار به دنبال کاهش مصرف برای فراهم شدن آب برای سایر بخش‌های اولویت‌دارتر است. اما تأکید بر کاهش مصرف آب منحصر به رویکرد بازتخصیص نمی‌شود و اکنون چنین الزامی برای کشور توسط افراد مختلف با دیدگاه‌های متفاوت بیان می‌شود. در نتیجه باید دید چارچوب‌بندی این راهکار تحت مفهوم بازتخصیص چه فضای جدید و دستاوردهایی را فراهم می‌کند؟ طرح موضوع کاهش مصرف آب به طور عام، جنبه‌های به شدت سیاسی این موضوع را پنهان می‌کند یا بدان کمتر می‌پردازد. در مقابل بازتخصیص

مسائل و الزامات بازتخصیص پایدار

در سال‌های اخیر بازتخصیص اگرچه به صورت محدود و در لفافه، ولی در سطح مدیریت آب کشور پذیرفته شده است. با نگاهی خوش‌بینانه به این رویکرد جدید، به رسمیت شناختن بازتخصیص، از یک سو پذیرش عدم وجود منابع آب جدید برای تخصیص دادن است و از سوی دیگر در مقابل این رویکرد است که آب انفال و در اختیار وزارت نیرو است تا آن را برای هر تقاضایی که مورد نظرش بود، بدون پذیرش حق بهره‌برداران قبلی، جابه‌جا کند. اما نگاه بدبینانه می‌گوید که اصطلاحات جعل می‌شوند تا پوششی برای ادامه اقدامات گذشته باشند. بر این اساس، همچنان باید نسبت به ضعف‌ها و مسائل در روندهای بازتخصیص هشدار داد. بدین منظور در ادامه چهار نکته الزامی برای بازتخصیص پایدار ذکر می‌شود.

نکته اول پذیرفتن این موضوع است که بازتخصیص باید محور حل مسائل منابع آب باشد و این در تقابل با رویکرد همچنان عرضه محور فعلی است. گزاره "مشکل آب نداریم، بلکه مشکل مدیریت آب داریم" برای مجوز تأمین از منابع جدید، مصادره به مطلوب شده است. اما بازتخصیص حتی در پایدارترین و عادلانه‌ترین شکلش که همراه با جبران خسارت و جلب رضایت باشد، به مراتب نسبت به شیوه‌های تأمین آب جدید مانند تأمین آب از دریا، آب ژرف، انتقال‌های بین حوضه‌ای و ... ارزان‌تر است. از سوی دیگر نمی‌توان هم‌زمان گروهی از بهره‌برداران را تشویق به مشارکت در بازتخصیص کرد و برای گروهی دیگر با هزینه‌های گزاف آب از منابع جدید تأمین کرد.

نکته دوم این است که در بازتخصیص آب تنها نمی‌توان توجه را به آب متمرکز کرد. آب موجود به اندازه کافی برای تقاضاها و حقوق موجود نیست و برای جلب رضایت باید به سراغ ارزش‌های جایگزینی بود. طی دهه‌های گذشته آب تاوان مشکل بیکاری، امنیت غذایی، مشروعیت سیاسی، چالش‌های

رویکردی است که موضوع حقوق آب را در مرکز توجه خود قرار می‌دهد و می‌پذیرد بهره‌برداران قدیمی حق دارند ولی اکنون بنابر ضرورت، اولویت‌های دیگری برای مصرف آب پیش آمده است. بنابراین مهم است که اکنون چه کسانی نسبت به آب حق دارند؟ چرا متقاضیان جدید نسبت به آب اولویت بیشتری دارند؟ این متقاضیان با چه شرایطی قرار است به حقوق آب دست پیدا کنند؟ و از آن مهمتر چگونه رضایت و توافق گروه‌هایی که نسبت به آب حق دارند و اکنون قرار است حقوقشان به متقاضیان جدید منتقل شود، به دست می‌آید؟

سیاست‌های خارجی و ناترازی تجاری را داده است. اما اکنون آب خودش چالشی مضاعف بر چالش‌های قبلی و بعضاً بزرگتر از آنها شده است. اکنون نه تنها باید بار توسعه را بر منابع آب کاهش داد، بلکه باید به نحوی از ارزش‌های جدیدتر برای جبران خسارت و جلب رضایت بهره‌برداران قدیمی استفاده کرد. بدین منظور هم باید در سطح فردی و هم منطقه‌ای استراتژی‌های خلق ارزش و جلب رضایت را دنبال کرد. در سطح فردی هدف از این ارزش ایجاد رضایت در بهره‌برداران قبلی برای صرف‌نظر از حقوق آبشان است. در سطح منطقه‌ای نیز باید الگویی از توسعه را حمایت کرد که با مصرف آب کمتر، شرایط پایداری را داشته باشد و بدین شکل اثرات کاهش مصرف آب را بر کل جامعه کاهش داد.

نکته سوم در ارتباط با حقوق آب (water rights) است. نمی‌شود در فضای مبهم حقوق آب و در شرایطی که مشخص نیست چه کسی به چه میزان نسبت به منابع آب حق دارد، حرف از بازتخصیص پایدار زد. در این رابطه حقوق آب (water law) مدرن و دولت‌محور دچار شکست شده است. از پنج دهه قبل مشخص کردن اینکه چه کسی نسبت به آب حق دارد بر دوش رویه‌های رسمی و دولت‌محور قرار گرفت. اما این رویه‌ها هم در آب سطحی و هم زیرزمینی به کلی شکست خورده‌اند. در آب سطحی عملاً دولت نتوانست اقدام موثری برای تعیین حقوق انجام دهد و در آب زیرزمینی هم پروانه داشتن یا نداشتن لزوماً امکان بهره‌برداری از آب را تعیین نکرده است. اکنون وقت آن است که منابعی متکثرتر برای تعریف حقوق آب را نسبت به رویه‌های دولتی مورد توجه قرار دهیم. نکته دوم و سوم مبنایی برای طرح آخرین الزام بازتخصیص است. هم برای شفاف‌سازی حقوق آب و هم تصمیم‌گیری در ارتباط با نحوه دستیابی به توافق و جلب رضایت، بازتخصیص باید در عرصه عمومی انجام شود. تصور آنکه مدل‌سازی و بهینه‌سازی و سایر روش‌های مهندسی، شیوه مطلوب بازتخصیص را تعیین کند که بتوان آن را در قالبی همچون

"آب قابل برنامه‌ریزی" اجرایی کرد دور از ذهن است. وضعیت امروز در بی‌عدالتی بازتخصیص‌های گذشته ناشی از حضور نداشتن گروه‌های ذی‌نفع در تصمیم‌گیری برای بازتخصیص بوده است. بازتخصیص از یک سو نیازمند حضور نمایندگان گروه‌های ذی‌نفع در این فرایند است و از سوی دیگر ضرورت دارد که شفافیت در اطلاعات و رویه‌های تصمیم‌گیری وجود داشته باشد. حق داشتن یا حق نداشتن صفر و یک نیست که بتوان به راحتی آنها را از یکدیگر متمایز کرد و نسخه حق و حقوق هر کسی را بر اساس هنجاری از پیش معین، مشخص کرد. در حقوق آب انتظار نسخه "یک بار برای همیشه" برای

تعیین حق‌دارها و حق‌ن‌دارها ممکن نیست. چندین دهه دخل و تصرف که بخش مهمی از آن ناشی از ناآگاهی و خطاهای دولتی با رویکرد قیم‌مآبانه بوده، پیچیدگی‌های حقوق آب را مضاعف کرده و مبنای تعیین حقوق را بسیار متکثر کرده است. راه‌حل چنین مسأله‌ای از درون جامعه و با مذاکرات و کشمکش مستمر میان ذینفعان مختلف است به دست می‌آید. نقش دولت نیز تسهیلگری همراه با به رسمیت شناختن مبنای و استدلال‌های گروه‌های مختلف برای تعریف حقوق آب و جلوگیری از بی‌عدالتی سیستماتیک در حذف برخی از گروه‌های ذی‌نفع است.

In the Name of Allah

Journal of Water and Sustainable Development



Volume 8 - Issue 3 (Serial No. 21) - Autumn 2021

Due to certificate no. 3/18/126631 dated 20/9/2015 from the scientific publications review Commission of the Ministry of Science, Research and Technology and also Due to registration number no76766 dated 25/1/2016 from the Ministry of Culture and Islamic Guidance, this journal has been licensed to publish. This journal is an output of joint scientific activities between Ferdowsi University of Mashhad and the Hydraulic Association of Iran.

Grantee
Manager in Charge
Editor in Chief

College of Agriculture , Ferdowsi University of Mashhad, Iran
Shahnooshi Foroushani, N. Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Ghahraman, B. Prof., Ferdowsi University of Mashhad

Editorial Board

Alidadi, H. Prof., Mashhad University of Medical Sciences
Ansari, H. Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Bagheri, A. Asso. Prof., Tarbiat Modares University
Davary, K. Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Esmaili, K. Asso. Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Jolaini, M. Asso. Prof., Agricultural and Natural Resources Research Center of Khorasan Razavi
Nassery, H.R. Prof., Shahid Behesti University, Tehran

Guiding Council

Sayahi, A., Assistance of research and industrial relations center of National Water and Wastewater Engineering Company (Chairman of the council)
Esmailian, H., Managing director of Mashhad Water & Wastewater Company
Alaei, M., Managing director of Khorasan Razavi Province's Regional Water Company
Mousavi, S. Y., Secretary of water Think tank at Iran Water Resources Management Company
Shahnooshi Foroushani, N., Manager in charge
Ghahraman, B., Editor in chief

Advisory Editors

Noori Esfandiari, A., Representative of water Think tank at Iran Water Resources Management Company
Sajadifar, S.H., Representative of National Water & Wastewater Company
Ghezelsoflo, A.A. Assis. Prof., Islamic Azad University of Mashhad
Kolahi, M., Ferdowsi University of Mashhad
Kalaei, GH., Representative of Mashhad Water & Wastewater Company
Tavakoli Aminian, S., Representative of Mashhad Water & Wastewater Company

Executive Expert
Editor
Graphic
Order of publication
Publisher
ISSN
Website/E-Mail
Address
Sponsor

Shahedi, M., Talebi Hossein Abad, F.
Quchanian, M., Talebi Hossein Abad, F., Shahedi, M., Oskouhi, M.
Shaikhi, M.R.
Quarterly
Ferdowsi University of Mashhad
2423-5474
<https://jwsd.um.ac.ir/> Email: jwsd@um.ac.ir
Department of Water Engineering, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran. P.O.Box: 91775- 1163
Mashhad Water & Wastewater Company

Articles in issue:

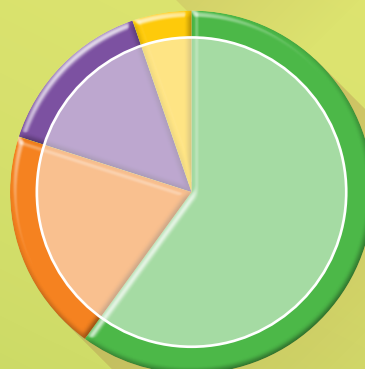
- **Use of Modeling in the Development of Water Resources and Consumption Scenarios; Case Study: Varamin Plain**
A.R. Ahmadi, B. Malemohammadi, L. Zebardast
- **Investigation and Ranking of Water Security in Study Areas of South Khorasan Province Using Gray Analysis**
M. Baharshahi, H. Khozayemhnezhad, N. Niknia, A. Khashei Siouki
- **Investigation of Water Footprint Components of Cucumber Crop in Ilam Province (Case Study: Darhshahr City)**
F. Rahimi
- **Introduction of MICE Method for Imputation Missing Meteorological Data and Comparison by Regression; Case Study: 130 Years of Monthly Temperature in Mashhad, Jask and Bushehr**
M. Farzandi, H. Rezaei-Pazhand
- **Analysis of the Effect of Climatic Factors and Drought on Inflow and Outflow from the Khuzestan Plain in the Karun Basin**
Z. Saeedifar, M. khosroshahi, A. jalili, S. Razavizadeh, F. Darghian, S. Zandifar, S. Lotfinasabasl, A. Gohardust, S. Teimuri, M. Fayaz
- **Comparison and Analysis of the Main Factors Improving Wheat Water Productivity of Surface and Drip Irrigation Methods (Case study: Yazd Province)**
M.H. Rahimian, G.H. Ranjbar, H. Gholami, M. Nikkhah, M. Shiran Tafti, N. Besharat
- **Investigating and Comparing the Feasibility of Using Anaerobic Digesters in Wastewater Treatment Plants with SBR and MLE Processes**
M. Mehregan, M. Tamjidi Farahbakhsh, A. Kazemi, M. Rouhbakhsh, A. Akbarzadeh
- **Causes and Risks of Increased Presence of Antibiotic-Resistant Bacteria in Drinking Water**
M. Atharinia
- **A Review of Membrane Filtration and Its Efficiency in Improving Water Quality in Recirculating Aquaculture Systems (RAS)**
A.R. Radkhah, S. Eagderi, E. Sadeghinejad Masouleh
- **Investigation of Effective Parameters in Adsorption of Reactive Yellow 145 from Aqueous Solution by Using Activated Carbon Prepared from Rice Straw**
O. Sedaghat, N. Bahramifar, H. Younesi



۱ در ابتدا، نیازهای آبی (دایره داخلی قرمز) را می‌توان به راحتی با منابع آب تجدیدپذیر، که اندازه آن‌ها بسیار بزرگ‌تر است (دایره بیرونی آبی) برآورده کرد.



۲ با گذشت زمان، تقاضای آب افزایش می‌یابد و منابع از طریق اقدامات مهندسی گسترش می‌یابد، همان‌طور که با گسترش دایره داخلی و دایره بیرونی نشان داده شده است، که به ترتیب نشان دهنده افزایش تقاضا و منابع آب است. همان‌طور که تقاضای آب به منابع موجود نزدیک می‌شود، آب بین هر یک از کاربران فعلی تخصیص می‌یابد، همان‌طور که با تقسیم دایره تقاضای داخلی به قطعات رنگی متنوع نشان داده می‌شود.



۳ تقاضای آب در نهایت از منابع موجود بیشتر می‌شود (دایره تقاضای داخلی اکنون بزرگ‌تر از دایره تامین آب است)، که منجر به تخصیص بیش از حد، و لذا «کمیابی» آب و تخریب محیط زیست می‌شود. در این شرایط جایی برای تخصیص بیشتر آب وجود ندارد. (البته در ایران علی‌رغم این شرایط تخصیص ادامه یافته و هنوز هم ادامه دارد!)



۴ تخصیص مجدد آب با اجازه دادن به استفاده از آب در محدوده‌های پایدار از طریق تخصیص به محیط زیست (کاهش اندازه دایره تقاضای آب داخلی) و اجازه دادن به «انتقال حقوق آب» بین کاربران جدید و فعلی (آب‌بران جدید با تکه تکه شدن اضافی دایره تقاضا نشان داده شده است؛ یعنی اندازه هر تکه مقدار تخصیص یافته به هر آب‌بر را نشان می‌دهد، که می‌تواند به صورت پویا تغییر کند).