

آب و توسعه پایدار

سال دهم . شماره دوم (پیاپی ۲۸) . شهریور ۱۴۰۲

حل مشکل آب در پیوند با انرژی



فهرست مقالات

- تحلیل سازوکارهای همبست آب، انرژی و غذا در واحدهای بهره‌برداری کشاورزی کوچک مقیاس استان همدان
مهسا معتقد، حسین شعبانعلی فمی، علی اسدی، خلیل کلانتری
- بررسی تغییرات مقدار و توزیع بارش و دما در ایران و اثرات آن‌ها بر رخدادهای حدی آمنه میان‌آبادی، کامران داوری
- معرفی کاربردهای تکنیک چرخه عمر در ارزیابی سامانه‌های توزیع آب
مینو جعفری، جابر سلطانی، سیدمهدی هاشمی شاهدانی، محمد جواد منعم
- روند تغییرات رطوبت نسبی در استان خراسان رضوی، شمال شرق ایران
زهرا شیرمحمدی- علی اکبرخانی، سید فرهاد صابرعلی، سید محمدجواد میرزایی، محمدناصر مودودی
- سنجش تحلیلی تغییرات اقلیمی آبی در دشت آمل- بابل با استفاده از متغیرهای اصلی اثرگذار بر روند آن
عباس غلامی
- امنیت غذایی پایدار به کمک آبی‌پرویی پایدار با استفاده از سامانه‌های نوین آبی‌پرویی (قسمت دوم): فرصت‌ها و چالش‌های توسعه سامانه‌های نوین
سعید زاهدی، محمدحسین خانجانی، سودابه صفائی‌ان
- راهکارهای پیشنهادی به منظور مدیریت پایدار و حفاظت مؤثر از آبخوان‌های مشترک مرزی محمد نخعی، علی احمدی، علاهن شیخ‌زاده
- تأثیرات احداث سد حسنلو بر جامعه محلی در حوزه آبریز دریاچه ارومیه
یونس اکبری، سید نوید موسوی
- بررسی آزمایشگاهی موقعیت تشکیل حفره آبشستگی در پایین‌دست سد‌ها و پیش‌بینی آن به کمک روش‌های داده‌کاوی
علی طاهری اقدم، عطالله ندیری، جلال شیرینی
- کاربرد نانوذرات نقره (Ag-NPs) در میکروبی‌زدایی آب در سیستم‌های پرورش آبزیان و اثرات ناشی از رهائش آن در محیط
علیرضا رادخواه، سهیل ایگدری

سال دهم - شماره دوم (پیاپی ۲۸) - شهریور ۱۴۰۲

این نشریه طبق نامه شماره ۱۲۶۶۳۱/۱۸ مورخ ۱۳۹۴/۰۶/۲۹ از کمیسیون بررسی نشریات علمی وزارت علوم تحقیقات و فناوری، اعتبار علمی دریافت نموده است. همچنین این نشریه در تاریخ ۱۳۹۴/۱۷/۰۵ موفق به دریافت پروانه انتشار نشریه از وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی به شماره ثبت ۷۶۷۶۶ شده است. این نشریه حاصل فعالیت های علمی مشترک دانشگاه فردوسی مشهد و انجمن هیدرولیک ایران است.

صاحب امتیاز

مدیر مسئول

سردبیر

دانشگاه فردوسی مشهد

ناصر شاهنوشی فروشانی / استاد گروه اقتصاد کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد

کامران داوری / استاد 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

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

سعید مرید / استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس

حمیدرضا ناصری / استاد گروه زمین شناسی، 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

علیرضا طاهری / 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

کامران داوری / سردبیر نشریه

مشاوران هیئت تحریریه

انوش نوری اسفندیاری / اندیشکده تدبیر آب ایران

سید حسین سجادی فر / شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور

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 شاهدی، فاطمه طالبی حسین آباد

مرجان قوچانیان، مهری شاهدی (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: تبدیل تهدید به فرصت در جهت کاهش تنش بر منابع آب زیرزمینی / علی باقری (عضو هیئت تحریریه نشریه)
- یادداشت کوتاه: آیا چالش‌های آب از مسیر مدیریت مصرف انرژی قابل حل است؟/ بنفشه زهرایی (دانشیار دانشگاه تهران و دبیر کارگروه ملی سازگاری با کم‌آبی) ت
- ۱ تحلیل سازوکارهای همبست آب، انرژی و غذا در واحدهای بهره‌برداری کشاورزی کوچک مقیاس استان همدان
مهسا معتقد، حسین شعبانعلی فمی، علی اسدی، خلیل کلانتری
- ۱۳ بررسی تغییرات مقدار و توزیع بارش و دما در ایران و اثرات آن‌ها بر رخدادهای حدی
آمنه میان‌آبادی، کامران داوری
- ۳۷ معرفی کاربردهای تکنیک چرخه عمر در ارزیابی سامانه‌های توزیع آب
مینو جعفری، جابر سلطانی، سیدمهدی هاشمی شاهدانی، محمد جواد منعم
- ۳۵ روند تغییرات رطوبت نسبی در استان خراسان رضوی، شمال شرق ایران
زهره شیرمحمدی-علی اکبرخانی، سید فرهاد صابرعلی، سید محمدجواد میرزایی، محمدناصر مودودی
- ۴۵ سنجش تحلیلی تغییرات اقلیمی آبی در دشت آمل-بابل با استفاده از متغیرهای اصلی اثرگذار بر روند آن
عباس غلامی
- ۵۳ امنیت غذایی پایدار به کمک آبی‌پروری پایدار با استفاده از سامانه‌های نوین آبی‌پروری (قسمت دوم): فرصت‌ها و چالش‌های توسعه سامانه‌های نوین
سعید زاهدی، محمدحسین خانجانی، سودابه صفائیان
- ۶۵ راه کارهای پیشنهادی به منظور مدیریت پایدار و حفاظت مؤثر از آبخوان‌های مشترک مرزی
محمد نخعی، علی احمدی، علاهن شیخزاده
- ۸۵ تأثیرات احداث سد حسنلو بر جامعه محلی در حوزه آبریز دریاچه ارومیه
یونس اکبری، سید نوید موسوی
- ۹۹ بررسی آزمایشگاهی موقعیت تشکیل حفره آبشستگی در پایین دست سدها و پیش‌بینی آن به کمک روش‌های داده کاوی
علی طاهری اقدم، عطالله ندیری، جلال شیری
- ۱۰۹ کاربرد نانوذرات نقره (Ag-NPs) در میکروپزدایی آب در سیستم‌های پرورش آبزیان و اثرات ناشی از رهائش آن در محیط
علیرضا رادخواه، سهیل ایگدری



تبدیل تهدید به فرصت در جهت کاهش تنش بر منابع آب زیرزمینی

قاب اول: مشکل بیش‌بارگذاری بر منابع آب زیرزمینی

مرثیه مسیر توسعه ناپایدار و بارگذاری بیشتر از حد ظرفیت تحمل منابع آب زیرزمینی در پهنه سرزمینی ایران، بخصوص در محدوده فلات مرکزی، تازگی ندارد. مساحت حوضه فلات مرکزی بیش از نصف مساحت ایران است و استان‌هایی مانند اصفهان، کرمان، فارس، و یزد با تمدن‌های کهن خود از جمله مهمترین مراکز سکونتگاهی آن به شمار می‌روند. بخش اعظم کشاورزی، صنایع سنگین و معادن کشور نیز در این محدوده قرار دارند که همگی جزو فعالیت‌های آب‌بر محسوب می‌شوند. با توجه به اقلیم خشک این محدوده، تکیه اصلی این فعالیت‌ها برای تأمین آب خود بر منابع زیرزمینی قرار دارد. مسیر توسعه ناپایدار ایران از آغاز شکل‌گیری «ایران مدرن» طی بیش از هشت دهه اخیر، باعث شکل‌گیری یک روند فزاینده تقاضای آب در این پهنه از کشور شده، به طوری که فشار بیش از حد آن بر منابع آب زیرزمینی وارد شده است. مشکلات ناشی از خشکسالی و کاهش بارندگی‌ها نیز در سال‌های اخیر، عادت به بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی را تشدید کرده است. در نتیجه تخلیه آبخوان‌ها در محدوده فلات مرکزی، نشست‌ها و فروچاله‌های عظیم در دشت‌های این منطقه به وقوع پیوسته است که عملاً دیگر برگشت‌پذیر نیستند. علاوه بر بروز نمودهای معضلات زیست‌محیطی مانند نشست زمین، تقاضای رقابتی آب در این محدوده، اشکال مختلفی از مناقشات آبی را در مقیاس‌های مختلف، اعم از محلی تا ملی، رقم زده که خود باعث تقلیل در امنیت اجتماعی شده است.

قاب دوم: کشاورزی غیربهره‌ور، زمین‌های کشاورزی بدون آب

کشاورزی از دیرباز روش غالب اقتصادی در ایران و بخصوص در فلات مرکزی بوده است. این بخش از اقتصاد به واسطه اتفاقاتی که از زمان پهلوی دوم به بعد در کشور افتاد (مانند اصلاحات ارضی، اصل چهار ترومن، انقلاب سال ۱۳۵۷) و نیز به پشتوانه سیاست‌های حمایتی بعد از انقلاب، دچار یک وابستگی به مسیر شده است. تحت تأثیر پدیده خرده‌مالکی (ناشی از اصلاحات ارضی) و رویکرد رفع تبعیض از محرومان در بعد از انقلاب، بخش کشاورزی توسعه زیادی پیدا کرده است. توسعه بخش کشاورزی علاوه بر آن که سهم قابل توجهی

از جمعیت را درگیر کرده است، از سویی دیگر این بخش، سهم قابل توجهی از مصرف آب را به خود اختصاص می‌دهد که خود نیروی محرک رشد تقاضای آب و رقابت بر سر آن به شمار می‌رود. در نتیجه رقابت تنگاتنگ بر سر دستیابی به منابع آبی، بخصوص در محدوده فلات مرکزی، و همزمان با آن کاهش نزولات، سهم سرانه آب قابل دسترس کاهش پیدا کرده است. بنابراین در بیشتر دشت‌ها آب کافی برای کشاورزی آبی وجود ندارد و عملاً نمی‌توان نیاز آبی محصولات کشت شده را به صورت کافی و کامل برآورده نمود. این مسأله در کنار مسائلی دیگر مانند خرد شدن اراضی کشاورزی و عدم تناسب الگوی کشت با ظرفیت‌های اکولوژیکی سرزمین باعث شده بهره‌وری تولید کشاورزی پایین بیاید. معنی این گزاره آن است که در بخشی از زمین‌های کشاورزی آب مصرف می‌شود، ولی مقدار تولید محصول کشاورزی کمتر از یک زمین استاندارد است. به عبارت دیگر به ازای آبی که از سهم استاتیک منابع زیرزمینی استخراج می‌کنیم، چیز زیادی تولید نمی‌کنیم.

از سویی دیگر، در بسیاری از مناطق خشک ایران، با کاهش آبدی پیکره‌های آبی و منابع آب زیرزمینی، زمین‌های کشاورزی بدون کشت رها می‌شوند. یعنی نه تنها این زمین‌ها در تولید GDP کشور نقشی ایفا نمی‌کنند، بلکه اعتراضات مالکان آنها در مطالبه آب به صورت یک معضل اجتماعی درآمده است. به علاوه، ترک کشاورزی در این مناطق متناظر با تخلیه روستاها و مهاجرت به شهر و شکل‌گیری مشکلات مترتب بر آن است.

قاب سوم: بحران کمبود انرژی برق

در چند سال اخیر با فرارسیدن فصل گرما معضل کمبود برق خودنمایی می‌کند. بنا به روایات مختلف میزان کمبود برق در فصل تابستان بین ۱۰۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰ مگاوات است. رویکرد مواجهه با این معضل بخصوص در دو سال گذشته به صورت انفعالی و از جنس مدیریت بحران بوده است. به این معنی که با تغییر ساعات کار ادارات و جیره‌بندی برق صنایع و بخش کشاورزی، سعی شد این کمبود مدیریت شود. هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم قطع برق در بخش‌های اقتصادی به میلیارد‌ها ریال می‌رسد. قطع برق در بخش صنعت به کاهش تولید و در بخش کشاورزی بعضاً به از بین رفتن تولید می‌انجامد. با توجه به روند فزاینده تقاضا در بخش برق، این کمبود در سال‌های آتی بیشتر هم خواهد شد. مسأله آن‌جایی حادث می‌شود که در زمستان نیز به دلیل تخصیص گاز به گرمایش بخش خانگی، تأمین گاز برای نیروگاه‌های حرارتی که ۹۲٪ تولید برق کشور را بر عهده دارند، با مشکل مواجه می‌شود. به این ترتیب معضل کمبود برق علاوه بر تابستان در زمستان نیز وجود خواهد داشت. در واکنش به این معضل، دولت مسؤلیت تأمین انرژی برق را برای صنایع بزرگ به خود این صنایع واگذار کرده است.

اگر به هریک از سه مسأله فوق در قالب‌های جداگانه نگریسته شود و تلاش شود در پاسخ به آنها، فقط در مرزهای همان قالب خود مسأله به دنبال راه حل گشت، با سه مسأله پیچیده‌ای مواجه می‌شویم که چه بسا راه حل یکی به ضرر دیگری تمام شود. اما اگر این سه قالب را در کنار یکدیگر بگذاریم و مسأله را در پیوند این سه قالب با یکدیگر ببینیم، مشاهده خواهیم کرد که نقطه ضعف یکی می‌تواند به عنوان نقطه قوت دیگری نقش ایفا کند و این سه قالب مسأله می‌توانند در قالب یک همکاری بین بخشی با همدیگر، پنجره فرصتی را بگشایند.

بخش کشاورزی می‌تواند از موقعیت و پتانسیل زمین‌های خود، بخصوص آن دسته از زمین‌هایی که آب ندارند یا اینکه کشاورزی در آنها از بهره‌وری کافی برخوردار نیست، استفاده کند و ظرفیت تولید برق خورشیدی را توسعه دهد. به این ترتیب بخشی از مزارع کشاورزی به مزارع تولید برق خورشیدی تبدیل می‌شوند. برق تولیدی از این بخش می‌تواند از طریق شبکه سراسری به واحدهای صنعتی متقاضی فروخته شود. به این ترتیب درآمد بخش کشاورزی افزایش می‌یابد و بهره‌وری پایین آن جبران می‌شود. از سویی دیگر بخش صنعت به جای آن که برای تأمین برق خود به دنبال سرمایه‌گذاری‌های جدید برود، می‌تواند یا خودش با بخش کشاورزی در تولید برق شریک شود یا اینکه برق مورد نیاز خود را از بازار برقی که به این ترتیب شکل می‌گیرد

تأمین نماید. در این رابطه عرضه و تقاضای برق بین تولیدکننده و مصرف‌کننده بدون واسطه دولت شکل گرفته و از طریق سازوکار بازار برق به هم وصل می‌شوند و بهای برق مستقیماً از مصرف‌کننده به تولیدکننده پرداخت می‌شود. بنابراین از آنجایی که نیازی به دخالت دولت برای خرید برق و فروش مجدد آن به صنایع وجود ندارد، مشکل کمبود نقدینگی دولت در پرداخت به موقع به نیروگاه‌های خصوصی نیز موضوعیت پیدا نمی‌کند. علاوه بر آن، دولت نیز از محل ترانزیت برق در شبکه سراسری، محل درآمد جدیدی پیدا می‌کند.

نقش دولت در این فرآیند در مقام تنظیم‌گری بازار مبادله برق و نیز حذف بارگذاری‌های اضافه بر منابع آب زیرزمینی ناشی از بخش کشاورزی خواهد بود. مهمترین حلقه اتصال این سه قالب مسأله به یکدیگر در اینجا است که دولت به گونه‌ای سیاستگذاری کند که با استفاده از فرصت پیش آمده برای تأمین برق صنایع از محل مشارکت بخش کشاورزی، اضافه بارگذاری‌های بر منابع آب زیرزمینی را در بخش کشاورزی حذف کند. این فرصت تاریخی امکان این کار را با ایجاد منافع جدید برای کشاورزان فراهم می‌آورد. اگر از این فرصت استفاده نشود و صنایع در طول سال‌های آتی، خود برای تأمین برق مورد نیازشان دست به اقدامات موضعی بزنند، فرصت نجات منابع آب زیرزمینی در فلات مرکزی ایران از دست خواهد رفت.

آیا چالش‌های آب از مسیر مدیریت مصرف انرژی قابل حل است؟



موضوع هم‌بست (نکسوس) آب، غذا و انرژی از زمان طرح آن برای اولین بار در مجمع جهانی اقتصاد در سال ۲۰۱۱ منشا راه‌حل‌های نوآورانه بسیاری در مدیریت سامانه‌های آب، غذا و انرژی بوده است. امروز بعد از گذشت ۱۲ سال از طرح این رویکرد، سوالی که برای ما در ایران مطرح است این است که با وجود چالش‌های فراوانی که در کشور در تأمین امنیت آب و انرژی وجود دارد، فرصت‌های موجود در ارتباطات بین سیستم‌های آب و انرژی تا چه حد در مواجهه با این چالش‌ها مورد توجه قرار گرفته است؟

کاهش امنیت آب و انرژی به مخاطره‌ای جدی در بسیاری از مناطق کره زمین تبدیل شده است. در مناطق خشک و نیمه خشک، فرصت‌های تولید انرژی برق آبی محدود است و تولید برق از آب نیز غالباً در رقابت با سایر بخش‌های مصرف کننده آب در اولویت پایین‌تری قرار می‌گیرد. تجربیات جهانی مرتبط با هم‌بست آب - غذا - انرژی نشان داده هنگامی که تصمیم‌گیرندگان، بخشی نگرانه صرفاً به دنبال تغییر وضعیت یکی از منابع و سیستم‌های سه گانه ذکر شده هستند، ناخودآگاه باعث تخریب و به خطر افتادن پتانسیل‌های دسترسی و تولید سایر منابع می‌شوند. بنابراین یکی از موضوعات کلیدی در مورد مدیریت سیستم‌های آب و انرژی، توجه به پیوند جدایی‌ناپذیر این سیستم‌ها و فرصت‌های استفاده از این پیوندها برای مدیریت مصرف این منابع حیاتی است.

در یک تقسیم‌بندی کلی، آب برای استخراج، پالایش و تولید انواع حامل‌های انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مرحله استخراج، آب برای خنک کردن تجهیزات و تسریع در عملیات حفاری مورد استفاده قرار می‌گیرد که مقدار آن برای حامل‌های انرژی مختلف متفاوت است. در مراحل مختلف پالایش نفت و گاز نیز آب برداشت و مصرف می‌شود و همه این فرآیندها آلودگی آب را نیز به همراه دارند. در بخش تولید برق، میزان آب مصرفی به نوع نیروگاه بستگی دارد. به طور مثال در نیروگاه‌های برقابی، انرژی تولید شده کاملاً به آب وابسته است. شدت وابستگی انرژی به آب، به شرایط منطقه‌ای و ملی بستگی دارد. مثلاً برای تولید انرژی، انتخاب نوع حامل انرژی و فن‌آوری‌های مورد استفاده تأثیر زیادی بر مقدار آب مورد نیاز این بخش دارد. در مناطقی که دسترسی به منابع آب محدود است، فن‌آوری‌هایی

اهمیت پیدا می‌کنند که کمترین تنش را به منابع آب وارد کنند. برای مناطق حاشیه ساحل دریاهای آزاد، استفاده از فن‌آوری‌های با مصرف انرژی بالا مثل نمک‌زدایی آب دریا و یا پمپاژ آب ژرف از اعماق زیاد از جمله روش‌های گران قیمت و با شدت مصرف انرژی بالا هستند. برای استخراج آب زیرزمینی و تأمین و تصفیه آب و فاضلاب، انرژی مصرف می‌شود. افت روزافزون آب‌های زیرزمینی در بسیاری از مناطق، انرژی مورد نیاز برای استحصال آب را تا حد زیادی افزایش داده است.

کاهش محسوس امنیت آب و انرژی در کشور بخصوص در چند سال اخیر و گسترش سریع جمعیت و پهنه‌های جغرافیایی متأثر از معضلات این دو بخش، ضرورت بهره‌مندی از همه فرصت‌های موجود برای ارتقای امنیت این دو منبع حیاتی را دو چندان نموده است. در ایران بخصوص با قرار گرفتن دو بخش آب و برق در یک وزارتخانه، ظرفیت نهادی مناسبی برای مدیریت هم‌بست آب و انرژی وجود دارد که باید مورد توجه سیاست‌گذاران و تصمیم‌گیران قرار گیرد.

از جمله تلاش‌هایی که در وزارت نیرو در چند سال گذشته در این زمینه شده است، تجمیع بانک‌های اطلاعاتی مربوط به مشترکین آب با مشترکین برق چاه‌ها بوده است. علیرغم اینکه پروانه‌های آب و برق هر دو توسط نهادهای ذیل وزارت نیرو صادر شده است ولی بدلیل عدم بهره‌مندی از نظام مشترک صدور پروانه و قدیمی بودن عمده پروانه‌های صادر شده، بانک اطلاعاتی مشترکی از مشترکین آب و برق بهره‌برداران آب زیرزمینی در کشور موجود نبوده و به همین دلیل برخی از مصوبات مهم دولت از جمله بند پنج مصوبه تشکیل کارگروه ملی سازگاری با کم آبی مورخ ۹۶/۱۲/۱۲ قابل اجرا نبوده است. در این بند بر تحویل حجمی آب برای کلیه مصارف از جمله کشاورزی با رعایت کارکرد مجاز تأکید شده است و دولت موظف شده که در صورت عدم رعایت سقف ساعت کارکرد برای پمپاژ منابع آب زیرزمینی و مصرف برق بیش از میزان مندرج در پروانه بهره‌برداری، بهای برق اضافی را براساس مصارف تجاری محاسبه و دریافت نماید. طبیعتاً اجرای چنین مصوباتی نیازمند بروزرسانی و تجمیع پروانه‌های آب و برق بوده است که در چند سال گذشته و بخصوص دو سال گذشته تلاش زیادی در این راستا شده است. در سال جاری خوشبختانه تطبیق پروانه‌های مشترکین آب و برق در وزارت نیرو به اتمام رسید که گام بسیار بلندی برای فراهم کردن زیرساخت‌های بهره‌مندی از ظرفیت‌های هم‌بست آب و انرژی در مدیریت این دو منبع حیاتی بوده است.

رویکرد وزارت نیرو در بهره‌برداری از فرصت ایجاد شده، عمدتاً معطوف به کنترل مصرف آب از طریق اندازه‌گیری مصرف برق است. از این رویکرد در سایر کشورها نیز استفاده شده و بخصوص در برخی از کشورها، تحقیقات گسترده‌ای در مورد

دقت اندازه‌گیری مصرف آب از روی مصرف برق انجام شده است. بررسی نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که اگرچه در مقیاس دشت با تعداد زیادی چاه، سرجمع مصارف آب و انرژی در مقیاس سالانه از ارتباط آماری نسبتاً قابل اعتمادی برخوردار است ولی این ارتباط برای تک تک چاه‌ها و به منظور ارزیابی تغییرات ماهانه یا فصلی برداشت‌های آب از روی میزان برق مصرفی می‌تواند خطای قابل ملاحظه‌ای داشته باشد. به عبارت دیگر اگرچه اعمال تعرفه‌های بازدارنده‌ی برق قطعاً می‌تواند در کنترل میزان مصرف انرژی و آب موثر باشد ولی تخطی از مصرف مجاز در پروانه برق لزوماً به معنی تخطی از میزان مصرف مجاز در پروانه آب نیست و تغییرات قابل توجهی فصلی و سالانه آبدمی چاه‌ها می‌تواند عدم قطعیت‌های قابل توجهی به معادلات حاکم بر اینگونه سیاست‌گذاری وارد کند.

عدم تناسب منصوبات چاه‌ها با موارد مندرج در پروانه مشکل دیگری است که در مورد برخی از بهره‌برداران آب زیرزمینی موضوعیت پیدا می‌کند. افزایش قابل توجه قیمت منصوبات چاه‌ها در سال‌های اخیر مانعی است در برابر الزام بهره‌برداران به اصلاح منصوبات. مجموعه این عوامل می‌تواند چالش‌هایی را برای استفاده از ظرفیت مواد قانونی مثل بند پنج مصوبه هیأت وزیران برای تشکیل کارگروه ملی سازگاری با کم‌آبی مورخ ۹۶/۱۲/۱۲ ایجاد کند.

بهره‌مندی از فرصت‌های هم‌بست برای ارتقای امنیت آب و انرژی بیش از هر چیز نیازمند هماهنگی‌های فرابخشی است که تاکنون کمتر مورد توجه قرار گرفته است. به طور مثال در سال‌های گذشته، برای گذر از پیک مصرف انرژی در فصل تابستان بدون خاموشی، از کشاورزان خواسته می‌شد که در ساعات پیک مصرف انرژی چاه‌های خود را خاموش کنند و در عوض در سایر ساعات شبانه روز از برق مجانی بهره‌مند باشند. این سیاست اگرچه برای مدیریت مصرف برق در ساعات پیک مفید بود ولی اثرات زیان‌باری بر مصرف آب داشت و حتی خود به نوعی مشوق تخطی از پروانه مصرف آب بود. با عمیق‌تر شدن چالش امنیت انرژی البته در تابستان اخیر، برق چاه‌های کشاورزی حدود ۷ ساعت در روز قطع شد که قاعداً باید تأثیر قابل توجهی در کاهش مصرف آب و انرژی گذاشته باشد.

نگاهی به تجارب سایر کشورها در استفاده از ظرفیت‌های هم‌بست آب، غذا و انرژی می‌تواند درس آموخته‌های جالبی برای ایران داشته باشد. به طور مثال در سال‌های اخیر، در پایلوت‌های متعددی در کشورهای غربی به بررسی اثر نصب پنل‌های خورشیدی به صورت ردیفی و با فاصله در ارتفاع ۲ تا ۴ متر بالای سطح اراضی کشاورزی (زراعی و باغی) بر مصرف

آب و تولید کشاورزی پرداخته شده است. براساس تحقیقاتی که در دانشگاه Cornell در ایالات متحده و تعدادی دیگر از موسسات تحقیقاتی در آمریکا و اروپا انجام شده، نصب پنل‌ها در بالای اراضی کشاورزی به دلیل ایجاد مقداری سایه روی اراضی کشاورزی، منجر به کاهش مصرف آب می‌شود. در برخی پایلوت‌ها مثلاً در هندوستان، کشاورزان برای مقابله با کاهش تولید ناشی از گرم شدن بیش از حد هوا، به این راه کار روی آورده‌اند و توانسته‌اند افزایش تولید گندم داشته باشند. علاوه بر این عمر پنل‌های خورشیدی در این حالت نسبت به زمانی که در فاصله چند ده سانتی‌متری سطح زمین قرار می‌گیرند ارتقا پیدا می‌کند. تولید انرژی منجر به تغییر کاربری زمین کشاورزی نمی‌شود و می‌تواند به نوعی تنوع منابع درآمدی برای کشاورز ایجاد کند در صورتی که خودش در سرمایه‌گذاری برای آن شریک باشد یا می‌تواند اجاره‌ای برای زمین مورد استفاده در ایجاد مزرعه خورشیدی دریافت کند.



با توجه به محدودیت‌هایی که در تابستان‌ها برای صنایع در ایران برای مصرف برق ایجاد می‌شود، شاید بتوان برنامه‌های سوآپ انرژی با استفاده از این ایده طراحی کرد. بطور مثال صنعت روی ایجاد این مزارع خورشیدی سرمایه‌گذاری کند و متناظر برق تولیدی در مزرعه خورشیدی اجازه بهره‌برداری از برق شبکه سراسری در زمان‌های ممنوعه در تابستان داشته باشد. در این صورت دولت نیز نیازمند خرید برق مزرعه خورشیدی که معمولاً با مشکلات کسر بودجه مواجه است، نخواهد بود. ذکر این نکته ضروری است که در سال‌های اخیر واحدهای صنعتی مجبور شده‌اند ارقام بسیار کلانی برای تأمین ژنراتور هزینه کنند و سرمایه‌گذاری برای تولید انرژی مبحث جدیدی برای صنایع نیست.

در مجموع به نظر می‌رسد فرصت‌های متنوعی در ارتباط با پیوندهای سیستم‌های آب و انرژی برای ارتقای امنیت آب و انرژی در کشور وجود دارد ولی بهره‌مندی از این فرصت‌ها نیازمند پرهیز از بخشی‌نگری و آگاهی از تجربیات و درس‌آموخته‌های بین‌المللی است.

Article Type: Applied Article

نوع مقاله: پژوهش کاربردی

Analyzing the Water, Energy and Food Nexus Mechanisms in Small-Scale Farming Exploitation Units of Hamedan Province

M. Motaghd¹, H. Shabanali Fami^{2*}, A. Asadi², Kh. Kalantari²

1- Postdoctoral Researcher, Department of Agricultural Extension and Education, Tarbiat Modares University and Ph.D. Graduate, Department of Agricultural Development and Management, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Iran. 2- Professor, Department of Agricultural Development and Management, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Iran.

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

Received: 31-01-2023

Revised: 19-04-2023

Accepted: 23-04-2023

Available Online: 21-09-2023

تحلیل سازوکارهای همبست آب، انرژی و غذا در واحدهای بهره‌برداری کشاورزی کوچک مقیاس استان همدان

مهسا معتقد^۱، حسین شعبانعلی فمی^{۲*}، علی اسدی^۲، خلیل کلانتری^۲

۱- پژوهشگر پس‌دکتری گروه ترویج و آموزش کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس، دکتری توسعه کشاورزی گروه مدیریت و توسعه کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، ایران. ۲- استاد گروه مدیریت و توسعه کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، ایران.

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

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۱/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۶/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۰۳

Abstract

The occurrence of natural hazards is always associated with severe damage in the agricultural sector, especially in small-scale farming exploitation units. One of the approaches to deal with these damages is to use the approach of water-energy-food (WEF) nexus in the management decisions of these units. Therefore, the present research was carried out with the aim of analyzing the mechanisms of linking water, energy and food in small-scale farming exploitation units in Hamadan province. The statistical sample of the research was 300 active farmers in small-scale farming exploitation units (below 10 hectares) which were determined by the rule of Cochran formula and sampling was done by cluster method. The main research tool was a researcher-made questionnaire, the content validity of which was confirmed by a panel of agricultural experts and faculty members of the Department of Agricultural Development and Management at the University of Tehran. In addition, the reliability of research's tool was confirmed through internal consistency procedure calculating Cronbach's alpha and CR (Cumulative Reliability) coefficients (Both above 0.7). Data analysis was carried out using SPSSwin25 and SMART PLS 3 software. The results showed that the overall nexus of water-energy and food from the six dual mechanisms of WEF the Energy or Food has received a more significant effect. According to the findings of the research, in order to strengthen the nexus approach of these vital resources, measures such as providing and introducing coherent and multilateral investment packages; providing training to farmers regarding synergy and unbreakable link of three sources in farm management and paying attention to this approach at different levels of the management system, from policy making and planning are suggested for field-level farm management decisions.

Keywords: Climate Change, Mechanisms, Water-Energy-Food Nexus, Small-Scale Farming Exploitation Units, Hamedan Province.

چکیده

وقوع مخاطرات طبیعی همواره با آسیب‌های شدیدی در بخش کشاورزی به‌ویژه در واحدهای بهره‌برداری کشاورزی کوچک مقیاس همراه است. یکی از رویکردهای مقابله با این آسیب‌ها، بهره‌گیری از رویکرد همبست آب-انرژی-غذا در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی این واحدها است. از این رو تحقیق حاضر با هدف کلی تحلیل سازوکارهای همبست آب، انرژی و غذا در واحدهای بهره‌برداری کشاورزی کوچک مقیاس استان همدان انجام شد. نمونه آماری پژوهش ۳۰۰ نفر از کشاورزان فعال در واحدهای بهره‌برداری کشاورزی کوچک مقیاس (زیر ۱۰ هکتار) بودند که با ضابطه فرمول کوکران تعیین و نمونه‌گیری به روش خوشه‌ای انجام شد. ابزار اصلی پژوهش پرسش‌نامه محقق ساخته‌ای بود که روایی محتوایی آن را جمعی از متخصصان کشاورزی و اعضای هیئت علمی گروه مدیریت و توسعه کشاورزی دانشگاه تهران تأیید نمودند. برای بررسی پایایی از شاخص انسجام درونی و محاسبه آن از طریق ضریب آلفای کرونباخ و محاسبه ضریب پایایی ترکیبی بعد از انجام پیش‌آزمون، استفاده و با توجه به اینکه میزان ضرایب آلفا و پایایی ترکیبی برای مقیاس‌های اصلی پرسش‌نامه بیشتر از ۰/۷ بود، پایایی ابزار تحقیق تأیید شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای SPSSwin₂₅ و SMART PLS₃ انجام شد. نتایج نشان داد که همبست کلی آب-انرژی و غذا از شش سازوکار دوگانه آب بر غذا؛ غذا بر آب؛ انرژی بر آب؛ آب بر انرژی؛ غذا بر انرژی؛ انرژی بر غذا به ترتیب تأثیر معنی‌دار پذیرفته است. با توجه به یافته‌های تحقیق پیشنهاد می‌شود در راستای تقویت رویکرد همبست WEF، اقداماتی نظیر تأمین و معرفی بسته‌های سرمایه‌گذاری منسجم و چندجانبه؛ ارائه آموزش به کشاورزان در خصوص هم‌افزایی و همبست ناگسستنی سه منبع در مدیریت مزرعه و توجه به این رویکرد در سطوح مختلف نظام مدیریتی از سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی گرفته تا تصمیم‌گیری‌های میدانی مدیریت مزرعه صورت گیرد.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، سازوکارها، همبست آب-انرژی-غذا، واحدهای بهره‌برداری کشاورزی کوچک مقیاس، استان همدان.

سه بخش بسیار مهم و حیاتی در زندگی بشر و همه موجودات زنده که در سالیان اخیر در اثر پدیده تغییر اقلیم دچار تحولات، مسائل فراوان و پیچیده ای شده است، بخشهای غذا، انرژی و آب می باشند (Pereira Ribeiro و همکاران، ۲۰۲۱). برای مثال، تغییرات در میزان و مقدار آب در دسترس، تأمین انرژی و غذا را بطور قابل ملاحظه ای تحت تأثیر قرار می دهد. در همین راستا، تمرکز بر روی یکی از بخشهای آب، انرژی و غذا، بدون در نظر گرفتن اثرات متقابل بین آنها خطرات جدی را ایجاد خواهد کرد. در دهه های اخیر برآوردهای جهانی نشان می دهند که به دلیل فشارهای ناشی از افزایش جمعیت، تغییر اقلیم و افزایش تقاضا برای تولید محصولات کشاورزی، منابع غذا، انرژی و آب با کمبود مواجه شده اند (علم الهدی، ۱۳۹۴). این در حالی است که رویکرد حفظ امنیت آبی، غذایی و انرژی و همبست بین آنها در سیاست های توسعه کشور به ویژه در بخش کشاورزی کمتر دیده شده است (مالکی و همکاران، ۱۴۰۰) و این مشکل در سالهای آتی در این بخش حادتر خواهد شد. علاوه بر موارد مذکور و با افزایش فشار مصرف منابع (آب-انرژی-غذا)، محدودیت ذاتی آنها، تغییر اقلیم و وجود اثرات متقابل منابع بر یکدیگر، لزوم نگرشی نو در شناسایی و تحلیل این روابط برای پایداری و بهره برداری از آنها، غیر قابل انکار بوده است. لذا مدیریت درست و صحیح بر اساس اصول پایداری، بهره وری (اسماعیلی نژاد و داوری، ۱۳۹۹) و نظام مندسازی فرآیند تخصیص راهکاری راهبردی و اقدامی اساسی جهت دستیابی به امنیت آبی، غذایی و انرژی و توسعه پایدار تلقی می گردد. بنابراین ضرورت رویکرد همبست WEF (آب-انرژی-غذا) به عنوان رویکرد بهبود تاب آوری این نظامها در مقابل تغییر اقلیم، ابزاری برای یکپارچگی واحدهای بهره برداری کشاورزی کوچک مقیاس، بستری برای مشارکت ذینفعان و روشی برای تبیین مسیر توسعه، تلقی و موجب پدیدار شدن چارچوب و رهیافتی میان رشته ای و تخصصی شده است (Keshwani و Calderon-Ambelis، ۲۰۲۳؛ Estoque، ۲۰۲۲). رویکرد همبست WEF، مفهومی است که برهم کنشهای کلیدی بین بخشهای یک یا چند سیستم را توصیف می کند (میرزایی، ۱۳۹۶). اهمیت این همبست بدین صورت است که می تواند هم افزایی های بین بخشهای آب، انرژی و غذا را نمایان و بده بستانها و برهم کنشهای بیشتر بین بخشها در همه مقیاسها و مکانهای مجاور و دور از هم را آشکار سازد (FAO، ۲۰۱۴). بطور کلی کلید تفکر رویکرد همبست WEF؛ تعامل بین امنیت آب^۱، انرژی^۲ و غذا^۳ است، به گونه ای که تحول در یکی از آنها اغلب بر دیگری تأثیر می گذارد (FAO، ۲۰۱۴؛ Bizikova و همکاران، ۲۰۱۴). برای مثال، امنیت غذایی از الزامات توسعه پایدار بوده و برای دستیابی به آن، توجه به امنیت آبی و انرژی انکارناپذیر است (عابدی، ۱۳۹۹)؛ چرا که این سه منبع در بخش کشاورزی با هم ارتباط کامل

دارند (Sukhwani، ۲۰۱۹). آب نقش مهمی را در هریک از مراحل توسعه انرژی شامل استخراج، تولید و فرآوری سوخت های فسیلی، تولید برق و تصفیه ضایعات مربوط به فعالیت های انرژی، ایفا می کند. آب و انرژی برای تولید مواد غذایی مورد نیاز هستند و عمدتاً برای آبیاری، تولید و فرآوری محصولات کشاورزی استفاده می گردد. در مدیریت آب برای عملیات پمپاژ، جمع آوری، تصفیه و توزیع آب لازم است که انرژی مصرف شود (اسلامی و همکاران، ۱۳۹۸). انرژی در تولید مواد غذایی و فرآوری مکانیزه، آماده سازی زمین، کوددهی زمین، بکارگیری ابزارهای کشاورزی، آبیاری، کاشت، برداشت و حمل و نقل محصولات کشاورزی، بسته بندی، فرآوری و ذخیره سازی مواد غذایی مورد نیاز است که طبق بررسی های انجام شده حدود ۳۰ درصد از کل مصرف انرژی جهان مربوط به مراحل تولید و عرضه مواد غذایی است (Lawford و Mohtar، ۲۰۱۶). بنابراین رویکرد همبست WEF به منظور بهینه سازی سیستم های آب، انرژی و تولید مواد غذایی شکل گرفته و تأکید بسیاری بر وابستگی متقابل آب، غذا و انرژی دارد که موجب اهمیت آن در کشاورزی کوچک مقیاس شده است. این اهمیت به علت تأمین امنیت غذایی روز به روز افزایش می یابد؛ چنان که ۷۰ درصد از غذای جهان توسط کشاورزی خرد و کوچک مقیاس تولید می شود. کشاورزان کوچک مقیاس نیز جهت تأمین امنیت غذایی، آبی و انرژی در واحدهای کوچک مقیاس با شرایط محلی، سازگاری یافته و نظام های مقاوم و پایدار را شکل داده و ارتقاء می بخشند و با شکل دادن شیوه های خاص، امنیت غذایی، آبی و انرژی را به صورت پایدار (همبست WEF) تأمین می کنند (کاترین رضوی، ۱۳۹۷). در ایران، واحدهای بهره برداری کشاورزی کوچک مقیاس رایج ترین شکل نظام های بهره برداری کشاورزی است که در بسیاری از مناطق کشور، پایه تولید کشاورزی و تأمین معیشت اکثر خانوارهای روستایی هستند (سواری و همکاران، ۱۳۹۶). در واقع حدود ۸۳/۶ درصد بهره برداری های زراعی کشور با در اختیار داشتن ۳۷ درصد مساحت کل اراضی مزروعی را بهره برداری های کشاورزی کوچک مقیاس تشکیل می دهند (شعبانعلی فمی و همکاران، ۱۳۹۱). معیشت کشاورزان کوچک مقیاس در این نظامها به دلیل وابستگی بالا به تولیدات واحدهای بهره برداری از نظر تولید غذا و درآمد، بیش از سایر اقشار از پدیده تغییر اقلیم تأثیر می پذیرد و تغییر اقلیم به دلایل متعدد مانند کوچکی اندازه مزرعه، استفاده از فناوری های قدیمی، فقدان توان سرمایه گذاری و فقدان تحمل ریسک های اقتصادی-اجتماعی موجب آسیب پذیری در معیشت و رفاه خانوارهای کشاورزان کوچک مقیاس شده است (Subedi و همکاران، ۲۰۲۰). یکی از راههای توسعه این واحدها، بهبود مدیریت همبست آب، انرژی و غذا از طریق بهبود همبست های دوگانه بین این سه منبع و هم افزایی، پیامدسنجی، مبادله و مدیریت آنها، یعنی سازوکارهای آب برای غذا، غذا برای آب، انرژی برای آب، آب برای انرژی، غذا برای انرژی و انرژی برای غذا است (Jewitt و Simpson، ۲۰۱۹) که در

ادامه به مهم‌ترین این سازوکارها پرداخته شده و برخی از عملیات قابل‌توجه در ذیل هریک، معرفی گردیده است:

- **سازوکار آب بر غذا (WF):** مانند انواع روش‌های آبیاری کشاورزی، دسترسی به آب، تخصیص آب و تولید غذای سالم و مغذی (خیز و همکاران، ۱۳۹۷).

- **سازوکار آب بر انرژی (WE):** مانند تولید سوخت‌های زیستی و سایر انواع انرژی‌های تجدیدپذیر و استفاده از شیوه‌های نوین ذخیره‌سازی و مصرف آب برای صرفه‌جویی در مصرف کلی انرژی (Lianying و همکاران، ۲۰۱۳).

- **سازوکار انرژی بر غذا (EF):** مانند تأمین انرژی مناسب برای برداشت و حمل محصول، فرآوری محصول، بسته‌بندی و بازاریابی محصول و یا بهبود دسترسی به آب برای تولید غذا (ذوقی‌پور و ترکمانی، ۱۳۹۵). علاوه بر مذکور می‌توان به استفاده از هیزم، گاز و برق برای طبخ غذا در مزرعه؛ استفاده از انرژی در شخم و سایر عملیات برای بهبود کیفیت محصول تولیدی، آماده‌کردن، سردنگه‌داشتن محصولات کشاورزی؛ استفاده از انرژی آبی برای آسیاب کردن غلات؛ استفاده از سوخت یا هیزم برای جوشاندن یا ضدعفونی آب اشاره نمود (صیادی و همکاران، ۱۳۹۸؛ Sarkodie و Owusu، ۲۰۲۰).

- **سازوکار انرژی بر آب (EW):** مانند استفاده از انرژی در شیرین‌کردن، تصفیه و توزیع آب، کاربست درست انرژی، دسترسی به آب و آبیاری مزرعه، استفاده از انرژی در پمپاژ و انتقال آب و یا جوشاندن و ضدعفونی کردن آب و آماده‌سازی غذا.

- **سازوکار غذا بر آب (FW):** مانند حداکثرسازی محصول و کنترل تلفات در فرآیند تولید و مصرف محصولات کشاورزی به‌منظور افزایش راندمان آبیاری برای کنترل ضایعات غذا با هدف بهبود بهره‌وری آب (عابدی، ۱۳۹۹).

- **سازوکار غذا بر انرژی (FE):** مانند بهبود فرآیندهای تولید غذا در مزرعه با هدف صرفه‌جویی در مصرف انرژی (مرکز الگوی اسلامی- ایرانی پیشرفت، ۱۳۹۵).

باید توجه داشت که بهبود شاخص‌های عملکردی واحدهای بهره‌برداری، متأثر از مدیریت مناسب سازوکارهایی همچون برنامه‌های ارتقاء امنیت‌آبی، غذایی، انرژی و اقداماتی که منجر به کاهش تلفات بلایای طبیعی و افزایش تاب‌آوری واحدهای تولیدی می‌شود، است (Kim و همکاران، ۲۰۱۸).

در همین‌راستا نتایج برخی تحقیقات نشان داد که مهم‌ترین سازوکارهای متنوع در رویکرد همبست WEF، دربرگیرنده تعاملاتی همچون استفاده از انرژی برای موارد زیر است:

جوشاندن و ضدعفونی آب‌آشامیدنی (FAO، ۲۰۱۴؛ katekar و همکاران، ۲۰۲۱)؛ پختن غذا (Wa'el و همکاران، ۲۰۱۷)؛ تأمین آب در مزرعه (Ringler و همکاران، ۲۰۱۳)؛ تأمین آب آبیاری (پمپاژ آب) (Kedir و همکاران، ۲۰۲۲)؛ بهبود مدیریت منابع در واحدهای بهره‌برداری کشاورزی کوچک‌مقیاس (Correa-cano: ۲۰۱۴، OECD).

و همکاران، ۲۰۲۲)؛ عدم‌تأکید بر تولید انرژی‌زیستی جهت حفظ و ارتقاء امنیت‌آبی (Ngammuangtueng و همکاران، ۲۰۲۳)؛ استفاده از آبیاری قطره‌ای به‌منظور افزایش راندمان آب و انرژی (Maftouh و همکاران، ۲۰۲۲)؛ کاهش هزینه‌های مزرعه از طریق استفاده بهینه منابع (Jing و همکاران، ۲۰۲۳)؛ افزایش رطوبت و کیفیت خاک (Mahia و همکاران، ۲۰۲۳)؛ افزایش بهره‌وری کشاورزی و تنوع زراعی (Usman و همکاران، ۲۰۲۳)؛ افزایش تاب‌آوری در سطح مزرعه (Gathala و همکاران، ۲۰۲۰)؛ کاهش مصرف انرژی در نتیجه پیشرفت‌های مدیریتی آب در کشاورزی کوچک‌مقیاس (Karamian و همکاران، ۲۰۲۱)؛ افزایش تقاضای آب به‌دلیل افزایش رقابت درون- بخشی در کشاورزی کوچک‌مقیاس (Li و Hu، ۲۰۲۲)؛ استفاده از آب و انرژی پاک به‌منظور تهیه غذای مغذی و سالم در کشاورزی کوچک‌مقیاس (Okoth و Tucho، ۲۰۲۰)؛ افزایش قیمت و کاهش عرضه مواد غذایی در اثر تغییرات اقلیمی (Abulibdeh و همکاران، ۲۰۱۹)؛ افزایش دسترسی به مواد غذایی و درآمد در اثر دسترسی به انرژی (Gupta، ۲۰۱۹)؛ افزایش بازده و قیمت مواد غذایی در اثر دسترسی به انرژی (Olawuyi، ۲۰۲۰)؛ کاهش تلفات و ضایعات مواد غذایی در اثر دسترسی به انرژی (fkhani و Zarrinpoor، ۲۰۲۲)؛ افزایش راندمان کلی انرژی در اثر تولید ضایعات و کود دام‌ها (به‌منظور تولید بیوگاز) (Malyan و همکاران، ۲۰۲۱)؛ افزایش حفظ و نگهداری مواد غذایی در اثر دسترسی به انرژی تجدیدپذیر (Weidner و همکاران، ۲۰۲۲)؛ حفظ و ماندگاری پایدار مواد غذایی و افزایش مدیریت نهاده‌های کشاورزی در اثر اتکاء به پارانه‌های انرژی (Zarei و همکاران، ۲۰۲۱)؛ ناپایداری تولید مواد غذایی در اثر افزایش پمپاژ آب سفره‌های زیرزمینی (Granit، ۲۰۲۲).

از جمله استان‌های مهم کشور در حوزه کشاورزی، استان همدان است که اخیراً به‌دلیل کاهش چشمگیر نزولات جوی در معرض خشکسالی قرار گرفته و فعالیت‌های کشاورزی آن، با چالش اساسی روبرو گردیده است. در این استان واحدهای بهره‌برداری کشاورزی کوچک‌مقیاس، رایج‌ترین نوع نظام‌های بهره‌برداری کشاورزی می‌باشند (جمشیدی و همکاران، ۱۳۹۶). تغییر اقلیم در این استان، تأثیرات محیطی، اجتماعی و اقتصادی جدی بر این واحدها داشته است. در واقع رخداد تغییر اقلیم در استان موجب آسیب‌پذیرتر شدن بخش کشاورزی و در معرض خطر قرارگرفتن امنیت غذایی، آبی و انرژی در این بخش شده است (اسدی و همکاران، ۱۳۹۸)؛ صالحی و همکاران، ۱۳۹۶). با توجه به نوظهور بودن این رویکرد و فقدان مطالعات قبلی در این خصوص و از طرفی مشکلات ناامنی آبی در استان همدان، مطالعه حاضر با هدف بررسی و تحلیل سازوکارهای همبست آب، انرژی و غذا در واحدهای بهره‌برداری کشاورزی کوچک‌مقیاس استان همدان اجرا شد. نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند منجر به تدوین اقداماتی به‌منظور سازوکارهای همبست آب-انرژی-غذا در واحدهای مذکور گردد.

پژوهش حاضر با هدف تحلیل سازوکارهای همبست آب، انرژی و غذا در واحدهای بهره‌برداری کشاورزی کوچک مقیاس استان همدان به صورت پیمایشی انجام گرفت. ابتدا برای شناخت سازوکارها، پیشینه پژوهش از پایگاه‌های داده داخلی و خارجی مرور شد. در مقیاس اولیه، شش سازوکار اصلی آب بر غذا؛ غذا بر آب؛ انرژی بر آب؛ آب بر انرژی؛ غذا بر انرژی و انرژی بر غذا مورد توجه قرار گرفتند که برای هر سازوکار، نشانگرهایی در قالب مولفه‌های همبست‌های دوگانه در رویکرد آب-انرژی-غذا در این واحدها شناسایی و معرفی شدند. بر اساس اطلاعات به دست آمده، پرسش‌نامه‌ای برای گردآوری داده‌ها، تدوین و استفاده شد. به منظور بررسی و تحلیل سازوکارهای همبست آب، انرژی و غذا در واحدهای بهره‌برداری کشاورزی کوچک مقیاس در قالب شش سازوکار اساسی غذا بر انرژی (۸ گویه)، انرژی بر آب (۱۰ گویه)، غذا بر آب (۷ گویه)، آب بر غذا (۱۰ گویه)، آب بر انرژی (۸ گویه) و انرژی بر غذا (۱۶ گویه) به صورت طیف لیکرت مورد سنجش قرار گرفتند. به منظور ارزیابی روایی پرسش‌نامه، از روش بررسی روایی محتوایی مبتنی بر کسب نظرات تعدادی از کارشناسان جهاد کشاورزی استان همدان و اعضای هیات علمی گروه مدیریت و توسعه کشاورزی دانشگاه تهران استفاده و روایی مورد تأیید قرار گرفت. برای ارزیابی پایایی یا انسجام درونی مقیاس اصلی پرسش‌نامه نیز، ضریب آلفای کرونباخ محاسبه شد که دامنه این ضریب برای مقیاس سنجش سازوکارهای مختلف بین ۰/۷۷۲ تا ۰/۹۴۹ بدست آمد که حاکی از پایایی یا اعتمادپذیری ابزار تحقیق است. حجم جامعه آماری تحقیق یعنی کشاورزان کوچک مقیاس دارای اراضی زیر ۱۰ هکتار معادل ۷۵۴۴۲ نفر برآورد شد (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۳). گردآوری داده‌ها به روش مصاحبه صورت گرفت که طی آن ۳۰۰ نفر از کشاورزان فعال در واحدهای بهره‌برداری کوچک مقیاس با ضابطه فرمول کوکران و روش نمونه‌گیری خوشه‌ای برای حجم نمونه انتخاب و به سوالات پرسش‌نامه پاسخ دادند. نمونه‌گیری به صورت چندمرحله‌ای انجام شد. در گام اول و با لحاظ نمودن همگنی تأثیرپذیری شهرستان‌های استان همدان از اثرات تغییر اقلیم بر کشاورزی، از نمونه‌گیری خوشه‌ای استفاده شد که از بین ۹ شهرستان (خوشه)، ۵ مورد به طور تصادفی انتخاب و در گام دوم نمونه‌های مورد مصاحبه به روش تصادفی ساده، انتخاب و در فرآیند پرسش‌گری مشارکت نمودند. به منظور تحلیل آماری داده‌ها از روش آماری تحلیل عاملی تأییدی و از نرم‌افزار SMART PLS^۳ استفاده شد. در اعتبارسنجی مدل تحلیل عاملی تأییدی، برای ارزیابی اعتبار درونی مدل یا همسانی آن، هر دو شاخص آلفای کرونباخ و پایایی ترکیبی بالاتر از ۰/۷ محاسبه شدند که حاکی از انسجام درونی و اعتبار مدل می‌باشند. برای بررسی روایی تشخیصی یا واگرایی مدل نیز از شاخص Fornell و Larcker (۱۹۸۱) استفاده شد. در ضمن از متوسط واریانس استخراج شده (AVE)^۴ به عنوان معیاری برای ارزیابی

روایی همگرا استفاده شد. مقدار مطلوب شاخص متوسط واریانس استخراج شده، بزرگتر از ۰/۵ است (Henseler و همکاران، ۲۰۱۶). نتایج این شاخص هم نشان داد روایی مناسبی در مدل وجود دارد. در این تحلیل، بارهای عاملی بزرگتر از ۰/۶، مطلوب تلقی شدند. برای بررسی معنی‌داری آماری این ضرایب از مقادیر t که بزرگتر از ۱/۹۶ بودند، استفاده شد؛ زیرا ضرایب مسیر قدرت رابطه را تبیین می‌کنند (Taqwa و همکاران، ۲۰۱۳).

نتایج و بحث

• ویژگی‌های فردی و شغلی کشاورزان

میانگین سن کشاورزان مورد مصاحبه ۵۱/۲ سال و سطح تحصیلات اکثر افراد مورد مصاحبه راهنمایی (۳۶/۷ درصد) بود. ۸۶ درصد کشاورزان مورد مطالعه مرد، ۸۹/۷ درصد آن‌ها متأهل و اکثراً ۴ تا ۶ نفر عضو در خانواده داشتند. در رابطه با سابقه کار کشاورزی؛ ۱۷ درصد دارای سابقه کار کشاورزی بین ۱۶ تا ۲۰ سال بودند. ۴۱/۳ درصد از کشاورزان ابراز داشتند دارای اراضی آبی بین ۵-۲/۶ هکتار می‌باشند. ۷۰ درصد از کشاورزان دارای اراضی با مالکیت شخصی بودند. ۵۷/۷ درصد از کشاورزان اظهار داشتند تمایل زیادی به استفاده از تسهیلات بانکی برای بهبود عملیات آبیاری دارند. ۸۲ درصد از کشاورزان اشاره داشتند که از چاه عمیق به عنوان منبع آب آبیاری استفاده می‌کنند. ۸۲ درصد از کشاورزان از فناوری پمپ‌برقی و چاه عمیق به عنوان منبع اصلی آب استفاده کردند. بر اساس پاسخ کشاورزان، ۸۶ درصد دارای استخر ذخیره آب بودند و ۴۰ درصد کمتر از میزان نیاز، به آب دسترسی داشتند.

• برآورد مدل اندازه‌گیری سازوکارهای همبست آب-انرژی-غذا در نظام‌های تولیدی کوچک مقیاس

برای تحلیل سازوکارهای همبست آب-انرژی-غذا از تحلیل عاملی تأییدی استفاده شد. نتایج ارزیابی برازش مدل عاملی در جدول (۱) ارائه شده که نشان می‌دهد مدل، برازش مناسبی دارد. مقادیر بارهای عاملی و ضرایب مسیر نیز در شکل (۱) نشان داده شده است. مقادیر سه شاخص ضریب پایایی ترکیبی (بالاتر از ۰/۶)، متوسط واریانس استخراج شده (بالاتر از ۰/۵)، و آلفای کرونباخ (بالاتر از ۰/۶) نشان می‌دهد که همه متغیرهای نهفته یا سازه‌ها (سازوکارها) در مدل پیشنهادی پایایی و روایی مناسبی دارند. همچنین، نتایج ارائه شده در این جدول نشان می‌دهد که بار عاملی استاندارد شده تمامی نشانگرهای منتخب برای سازه‌های مورد نظر بیش از ۰/۵ بوده و از لحاظ آماری در سطح یک درصد معنی‌دار بودند. این نتیجه حاکی از انتخاب درست و موثر نشانگرها در معرفی سازه‌های مربوطه هستند. برای بررسی معنی‌داری آماری این ضرایب از مقادیر t در حالیکه بزرگتر از ۱/۹۶ بودند، استفاده شد، زیرا آن‌ها قدرت رابطه را تبیین می‌کنند.

جدول ۱- نتایج ارزیابی روایی و پایایی مدل وضعیت سازوکارهای همبست WEF در واحدهای بهره‌برداری کشاورزی کوچک مقیاس

سازوکارها	نماد هر گویه در مدل	گویه‌ها	خطای استاندارد	ضریب تعیین (R^2)	ضریب پایایی ترکیبی (CR)	متوسط واریانس استخراج شده (AVE)	آلفای کرونباخ (α)
غذا بر انرژی	FE۸	استفاده از روش‌های مکانیکی و بیولوژیکی کنترل آفات برای کاهش مصرف انرژی	۰/۰۱۰	۰/۸۲۳	۰/۹۵۸	۰/۸۲۱	۰/۹۴۵
	FE۴	استفاده از عملیات کشاورزی حفاظتی برای کاهش مصرف انرژی	۰/۰۱۴				
	FE۲	حمل کود با دام یا وسایل ساده (فرقون) با هدف کاهش مصرف انرژی	۰/۰۰۷۲				
	FE۳	تسطیح و یکپارچگی اراضی برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی مورد نیاز آبیاری	۰/۰۰۹۴				
	FE۱	استفاده از روشهای سنتی کودپاشی با هدف کاهش مصرف انرژی	۰/۰۱۱				
انرژی بر آب	EW۸	استفاده از انرژی برای بازچرخانی زه‌آب در مزرعه	۰/۰۰۳۸	۰/۷۷۰	۰/۹۰۱	۰/۷۵۴	۰/۸۳۳
	EW۹	استفاده از انرژی برای تأمین آب آبیاری (پمپاژ، شیرین کردن، تصفیه و توزیع آب)	۰/۰۱۶۱				
	EW۷	استفاده از بقایای گیاهی و کمپوست برای بهبود ذخیره رطوبتی خاک	۰/۰۲۴				
غذا بر آب	FW۱	استفاده از عملیات کشاورزی حفاظتی برای مدیریت حفظ رطوبت خاک	۰/۰۰۹۰	۰/۶۷۱	۰/۹۴۶	۰/۸۵۳	۰/۹۱۴
	FW۳	تسطیح اراضی برای بهبود راندمان آبیاری	۰/۰۰۴۲				
	FW۲	مبارزه با علف‌های هرز برای بهبود راندمان آبیاری	۰/۰۱۳۱				
آب بر غذا	WF۷	تولید کودسبز در فصل‌های پرآبی برای بهبود حاصلخیزی مزرعه	۰/۰۱۰۳	۰/۸۲۵	۰/۹۳۸	۰/۷۹۱	۰/۹۱۲
	WF۳	پوشش انهار با هدف بهبود راندمان آبیاری و تولید محصول بیشتر	۰/۰۰۹۶				
	WF۴	استفاده از آب‌های نامتعارف (زه‌آب) برای تولید محصول بیشتر	۰/۰۱۰۵				
	WF۶	ذخیره‌سازی آب باران یا آب‌های کشاورزی خارج از فصل برای بهبود راندمان تولید	۰/۰۱۶۱				
آب بر انرژی	WE۱	ذخیره‌سازی آب در استخر با هدف کاهش مصرف انرژی در آبیاری شبانه	۰/۰۰۵۹	۰/۷۰۲	۰/۹۲۵	۰/۷۵۵	۰/۸۹۳
	WE۲	پوشش انهار برای کاهش انرژی مصرفی در لایروبی و پاکسازی جوی‌ها	۰/۰۱۰۶				
	WE۳	استفاده از آب‌های نامتعارف (زه‌آب‌ها) برای کاهش مصرف انرژی	۰/۰۰۷۶				
	WE۴	شناخت نیاز آبی گیاه برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی	۰/۰۳۷۷				
انرژی بر غذا	EF۱۳	استفاده از انرژی آبی برای آسیاب کردن غلات	۰/۰۰۶۷	۰/۵۱۳	۰/۹۳۸	۰/۷۱۶	۰/۹۲۰
	EF۱۴	استفاده از انرژی فسیلی برای جوشاندن و ضدعفونی آب آشامیدنی	۰/۰۰۵۵				
	EF۱۰	استفاده از برق برای طبخ غذا در مزرعه	۰/۰۲۴۵				
	EF۱	استفاده از انرژی خورشیدی برای بهبود محصول تولیدی	۰/۰۲۰۱				
	EF۶	استفاده از ذغال برای طبخ غذا در مزرعه	۰/۰۲۸۲				
	EF۷	استفاده از ذغال برای فرآوری محصولات (عرق گیری و...)	۰/۰۳۱۴				

** با توجه به اینکه همه مقادیر t بالاتر از ۲/۵۴ هستند، همگی در سطح ۱ درصد معنی‌دار هستند.

واگرای خوبی دارند، زیرا ریشه دوم میانگین واریانس استخراج شده برای هرسازه در قطر ماتریس از تمام همبستگی‌های سایر عوامل با آن عامل بیشتر است.

جدول (۲) که شاخص Fornell و Larcker (۱۹۸۱) را برای تبیین روایی تشخیصی نشان می‌دهد، حاکی از آن است که نشانگرهای منتخب برای اندازه‌گیری سازه‌های موجود روایی تشخیصی یا

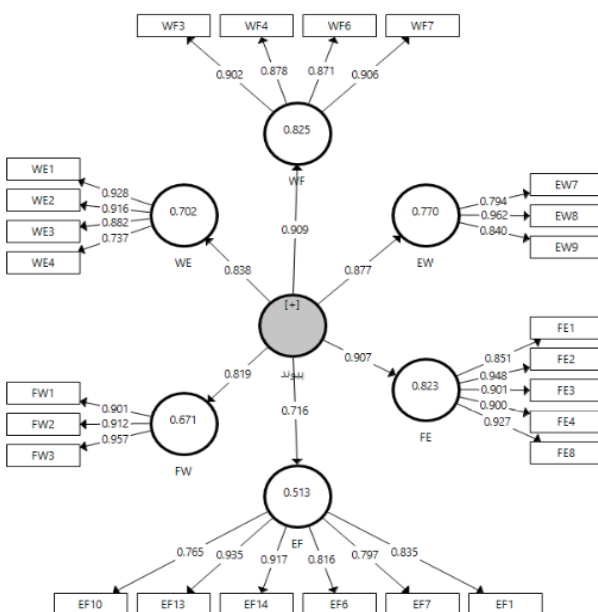
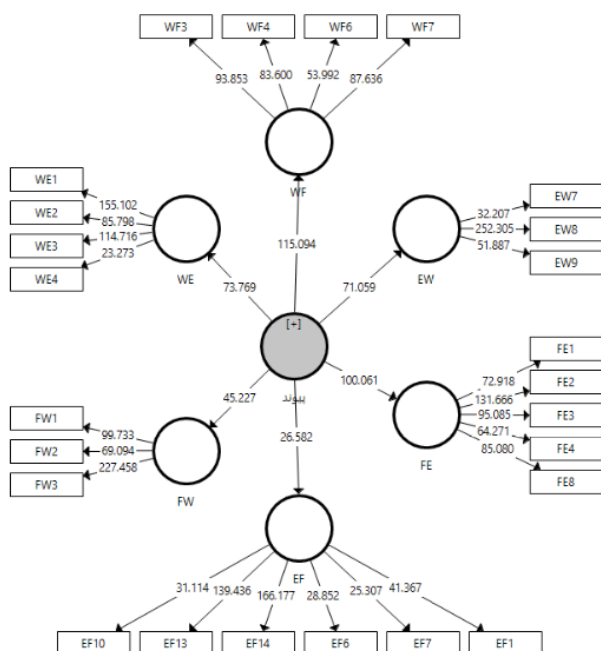
ضمن مهمترین عملیات ضروری برای بهبود هر سازوکار دوگانه در جدول (۱) آمده است.

جدول ۲- مقایسه ریشه دوم میانگین واریانس استخراج شده با همبستگی‌های موجود (معیار Fornell و Larcker، ۱۹۸۱)

سازوکارها	۱	۲	۳	۴	۵	۶
انرژی بر غذا	۰/۸۴۶	---	---	---	---	---
انرژی بر آب	۰/۷۰۵	۰/۸۶۸	---	---	---	---
غذا بر انرژی	۰/۴۵۶	۰/۶۶۱	۰/۹۰۶	---	---	---
غذا بر آب	۰/۴۱۲	۰/۶۴۱	۰/۸۶۷	۰/۹۲۳	---	---
آب بر انرژی	۰/۴۷۸	۰/۷۷۱	۰/۷۴۷	۰/۵۵۸	۰/۸۶۹	---
آب بر غذا	۰/۵۷۹	۰/۸۷۷	۰/۷۶۷	۰/۶۷۹	۰/۸۰۶	۰/۸۸۹

در جدول (۳) نیز ضرایب مسیر و مقادیر متناظر آماره t در سطح اطمینان ۹۹ درصد ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود کلیه این ضرایب در سطح اطمینان مذکور، معنادار بودند که در شکل (۱) نشان داده شده است. این حاکی از تبیین بالای همبست WEF در واحدهای بهره‌برداری کشاورزی کوچک‌مقیاس توسط سازه‌های منتخب بوده است.

مدل نهایی تأییدشده در شکل‌های (۱) و (۲) معرفی شده است. با توجه به معنی‌داری همه ضرایب ساختاری (قدرمطلق همه مقادیر t بالاتر از ۲/۵۶) که جزییات آن در جدول (۳) ارائه شده است، نتایج این مدل حاکی از آن است که همبست کلی آب-انرژی و غذا به‌ترتیب از شش سازوکار دوگانه آب بر غذا؛ غذا بر آب؛ انرژی بر آب؛ آب بر انرژی؛ غذا بر انرژی؛ انرژی بر غذا تأثیر پذیرفته است. در



شکل ۲- معناداری سازه‌های مدل عاملی وضعیت سازوکارهای همبست آب، انرژی و غذا در واحدهای بهره‌برداری کشاورزی کوچک‌مقیاس

شکل ۱- ضرایب مسیر و تبیین سازه‌های مدل عاملی* وضعیت سازوکارهای همبست آب، انرژی و غذا در واحدهای بهره‌برداری کشاورزی کوچک‌مقیاس* شاخص‌هایی که در شکل حضور ندارند، در تحلیل عاملی به‌دلیل نقش ضعیف در تبیین سازه مدنظر، از تحلیل حذف شده‌اند.

جدول ۳- ضرایب مسیر در مدل عاملی وضعیت سازوکارهای همبست آب، انرژی و غذا در واحدهای بهره‌برداری کشاورزی کوچک‌مقیاس

مقدار t	ضریب مسیر β	مقصد مسیر	مبدأ مسیر
۲۶/۵۸۲	۰/۷۱۶	سازوکار انرژی بر غذا	وضعیت سازوکارهای پیوند WEF کل
۷۱/۰۵۹	۰/۸۷۷	سازوکار انرژی بر آب	وضعیت سازوکارهای پیوند WEF کل
۱۰۰/۰۶۱	۰/۸۲۳	سازوکار غذا بر انرژی	وضعیت سازوکارهای پیوند WEF کل
۴۵/۲۲۷	۰/۹۰۷	سازوکار غذا بر آب	وضعیت سازوکارهای پیوند WEF کل
۷۳/۷۶۹	۰/۸۳۸	سازوکار آب بر انرژی	وضعیت سازوکارهای پیوند WEF کل
۱۱۵/۰۹۴	۰/۹۰۹	سازوکار آب بر غذا	وضعیت سازوکارهای پیوند WEF کل

همبست آب، انرژی و غذا یکی از ابزارها و راهکارهای مدیریتی در راستای تحقق اهداف توسعه پایدار کشاورزی است. این همبست باید به عنوان هویتی واحد در پایداری زیست محیطی واحدهای بهره برداری کشاورزی کوچک مقیاس مورد توجه قرار گیرد. در واحدهای بهره برداری هریک از منابع آب، انرژی و غذا و بطور کلی سازوکارها به طور قابل توجهی به یکدیگر وابسته اند و با هم تشکیل سیستمی پویا را می دهند و تغییرات یک بخش، تأثیر خود را بر بخش های دیگر می گذارد. همچنین علاوه بر تأثیر پذیری متقابل از یکدیگر، از عوامل متعدد اقتصادی، اجتماعی، سیاسی، فناوری و محیطی در خارج از همبست نیز تأثیر می گیرند. براساس یافته ها ضریب مسیر اثر وضعیت سازوکارهای همبست WEF کل از سازوکار آب بر غذا، معادل $0/909$ با سطح معنی داری $0/01$ بود که نشان می دهد همبست WEF از سازوکار آب بر غذا اثر معنی داری به لحاظ آماری می پذیرد. این سازوکار شامل عملیات اساسی مانند ذخیره سازی آب با هدف تولید محصول مناسب در فصل گرم، استفاده بهینه از آب به منظور تهیه غذای مغذی و سالم در کشاورزی، استفاده از روش های نوین آبیاری برای افزایش میزان تولید غذا و بهبود کیفیت محصولات تولیدی است. این یافته توسط تعدادی از تحقیقات دیگر نیز تأیید شده است (مسائلی و همکاران، ۱۴۰۱؛ مفاخری و همکاران، ۱۴۰۰؛ Aguilar و همکاران، ۲۰۲۱). در ضمن ضریب مسیر اثر وضعیت سازوکارهای همبست WEF کل از سازوکار غذا بر آب معادل $0/907$ با سطح معنی داری $0/01$ بود که نشان می دهد سازوکارهای همبست WEF کل از سازوکار غذا بر آب اثر معنی داری به لحاظ آماری می پذیرد. یافته ها حاکی از آن است که دومین سازوکار جدی و ضروری در همبست آب-غذا-انرژی، سازوکار غذا بر آب است. این نشان می دهد امنیت غذایی کشاورزان و شیوه مدیریت آن، تأثیر زیادی بر سازوکارهای بخش مدیریت آب و شاخص های آبی دارد. این یافته توسط تعدادی از تحقیقات دیگر تأیید شده است (مفاخری و همکاران، ۱۴۰۰؛ Alam و همکاران، ۲۰۲۱؛ Singh و همکاران، ۲۰۱۹). همچنین ضریب مسیر اثر پذیری وضعیت سازوکارهای همبست WEF کل از سازوکار انرژی بر آب معادل $0/877$ با سطح معنی داری $0/01$ برآورد شد که حاکی از آن است که سازوکارهای همبست WEF کل از سازوکار انرژی بر آب اثر معنی داری به لحاظ آماری می پذیرد. این سازوکار شامل استفاده بهینه از انرژی برای استحصال، تأمین، انتقال و مصرف آب است. این بیانگر آن است که بدون بهبود راندمان مصرف انرژی، ناپایداری در واحدهای بهره برداری ایجاد می شود (Rasul، ۲۰۱۶). براساس نتایج در زیر همبست انرژی بر آب؛ عملیات کاهش دسترسی به آب در کشاورزی کوچک مقیاس به دلیل گرانی انرژی، مدیریت آب سفره های زیرزمینی با استفاده از فناوری های هوشمند پمپاژ

آب انرژی-اندوز و استفاده بهینه از انرژی به منظور مدیریت مصرف آب در واحدهای بهره برداری کشاورزی کوچک مقیاس حائز بیشترین اهمیت هستند. بنابراین در شرایط بحران آبی، انرژی ابزار قدرتمندی برای بهبود این شرایط است (کریمیان و همکاران، ۱۴۰۱؛ مفاخری و همکاران، ۱۴۰۰؛ Sarkodie و Owusu، ۲۰۲۰). طبق یافته ها ضریب مسیر اثر وضعیت سازوکارهای همبست WEF کل از سازوکار آب بر انرژی معادل $0/838$ با سطح معنی داری $0/01$ برآورد شد که بیان می کند سازوکارهای همبست WEF کل از سازوکار آب بر انرژی اثر معنی داری به لحاظ آماری می پذیرد. در سازوکار آب بر انرژی شامل عملیاتی نظیر استفاده از فناوری های انرژی-اندوز در مدیریت آب مانند استفاده از لوله برای انتقال آب با هدف کاهش انرژی مصرفی انتقال آب؛ انجام آبیاری در ساعات خنک صبح یا عصر با هدف کاهش مصرف انرژی؛ شناخت نیاز آبی گیاه برای صرفه جویی در مصرف انرژی؛ ذخیره سازی آب با هدف کاهش مصرف انرژی در آبیاری شبانه؛ بهبود شبکه های توزیع و انتقال آب برای کاهش مصرف انرژی؛ پوشش انهار برای کاهش انرژی مصرفی در لایروبی و پاکسازی جوی ها؛ استفاده از آب های نامتعارف (زه آب ها و...) برای کاهش مصرف انرژی؛ ذخیره سازی آب باران یا آب های خارج از فصل برای کاهش نیاز به پمپاژ و انتقال آب در بهبود همبست آب-انرژی-غذا امری حیاتی است. البته هرچه ذخایر آبی در شرایط بحرانی تر قرار گیرند نیاز به انرژی برای بهبود راندمان آبیاری افزایش می یابد (مفاخری و همکاران، ۱۴۰۰؛ یوسفی و مهدوی دامغانی، ۱۳۹۰؛ Sarkodie و Owusu، ۲۰۲۰). البته باید توجه داشت بخش کشاورزی بزرگترین مصرف کننده آب شیرین و بیش از یک چهارم انرژی جهان است (UNWater، ۲۰۲۱). با توجه به همبست عمیق بین این دو مولفه حیاتی در سامانه های تولید غذا، امنیت غذایی بدون مدیریت مناسب و یکپارچه این منابع تحقق نمی یابد. بر اساس نتایج ضریب مسیر اثر وضعیت سازوکارهای همبست WEF کل از سازوکار غذا بر انرژی معادل $0/823$ و سطح معنی داری $0/01$ برآورد شد که نشان می دهد سازوکارهای همبست WEF کل از سازوکار غذا بر انرژی، اثر معنی داری به لحاظ آماری می پذیرد. این سازوکار که از طریق بهبود عملیات کشاورزی مانند کشاورزی حفاظتی، کنترل بهینه آفات، تناوب زراعی و نظایر آن امنیت غذایی را بهبود می بخشد، در نهایت بر مدیریت مناسب تر انرژی تأثیر می گذارد که با نتایج صفایی و همکاران (۱۳۹۸)، همسو است. طبق نتایج سازوکارهای همبست WEF کل از سازوکار انرژی بر غذا معادل $0/716$ با سطح معنی داری $0/01$ برآورد شد که حاکی از آن است سازوکارهای همبست WEF کل از سازوکار انرژی بر غذا اثر معنی داری به لحاظ آماری می پذیرد. باتوجه به موارد مذکور؛ نگاه به همبست ناگسستگی و هم افزای این سه منبع، امکان هماهنگی فعالیت های بین بخشی در این حوزه ها را فراهم می سازد (Rasul، ۲۰۱۶). فقدان نگاه سیستمیک به همبست منابع سه گانه در بسیاری از کشورهای در حال توسعه موجب شده

تا مدیریت این سه منبع مهم حیات و توسعه، ناکارآمد باشند (Khacheba و همکاران، ۲۰۱۸). البته تمرکز همبست باید فراتر از شاخص‌های صرفاً کارآیی و کمیابی منابع باشد تا بتواند در فقرزدایی و رفع نابرابری تأثیرگذار باشد (Jobbins و همکاران، ۲۰۱۵). هرچه ارتباط اجزای همبست WEF قوی‌تر و هم‌افزایی بین آن‌ها وجود داشته باشد، نظام‌های تولید غذا در مقابل تغییر اقلیم و شوک‌های محیطی سازگارتر می‌شوند (Subedi و همکاران، ۲۰۲۰). رویکرد همبست آب، انرژی و غذا توان سازگاری کشاورزان با تغییر اقلیم را افزایش می‌دهد (Nhamo و همکاران، ۲۰۱۸). گسترش رویکرد این همبست در واحدهای بهره‌برداری مستلزم توجه به آن در سطح مدیریت مزرعه است (Karamian و همکاران، ۲۰۲۱). در ضمن این رویکرد نباید صرفاً از بعد فنی مورد توجه قرار گیرد، بلکه ابعاد نهادی و سیاستی آن نیز بسیار مهم و تأثیرگذار است (Terrapon-Pfaff و همکاران، ۲۰۲۱) و عملکرد آن وابسته به میزان تلفیق با نظام‌های اجتماعی است (Molajou و همکاران، ۲۰۲۱).

نتیجه‌گیری و پیشنهاد

یکی از الزامات توسعه پایدار و رفع فقر در واحدهای بهره‌برداری کشاورزی کوچک مقیاس، توجه به رویکرد همبست آب، انرژی و غذا در سطوح مختلف نظام مدیریتی از سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی گرفته تا مدیریت مزرعه می‌باشد که در نهایت پایداری کل زیست‌بوم‌های کشاورزی را رقم می‌زند. نتایج این تحقیق حاکی از آن بود که جایگاه امنیت آبی در این همبست بسیار حیاتی است و باید مورد توجه ویژه قرار گیرد. با توجه به نتایج بدست آمده پیشنهادهای زیر به منظور تقویت رویکرد همبست WEF در واحدهای بهره‌برداری کشاورزی کوچک مقیاس ارائه می‌شود:

۱- پیشنهاد می‌شود در راستای تقویت این رویکرد در فرآیندهای تصمیم‌گیری در سطح خانوارهای کشاورزان کوچک مقیاس ظرفیت‌سازی شده و آموزش‌های لازم به آن‌ها در خصوص هم‌افزایی و پیوند ناگسستنی این سه منبع به‌ویژه بهبود مدیریت آب ارائه گردد. ۲- رویکرد همبست WEF باعث درک بهتر روابط پیچیده و پویای آب، انرژی و غذا می‌شود و کمک می‌کند تا کشاورزان بتوانند منابع محدود خود را بهتر مدیریت کنند. براساس این رویکرد، اتخاذ تصمیم در خصوص یکی از این منابع بر منابع دیگر نیز تأثیر دارد. با لحاظ نمودن هم‌افزایی بین این سه بخش، یافتن راهکارهای کارآمدتر امکان‌پذیر است. رویکرد همبست WEF ضمن تأمین امنیت سه منبع حیاتی تولید، باعث هم‌افزایی و کاهش هزینه مبادله بین این سه بخش می‌شود. بنابراین پیشنهاد می‌شود آموزش‌های لازم در خصوص این رویکرد به کشاورزان و کارشناسان ارائه شود. با توجه به جایگاه امنیت آبی در این همبست بهبود سازوکارهای مدیریت

آب در سطح مزرعه در ارتباط با دو منبع انرژی و غذا، شاخص پایداری و تاب‌آوری این واحدهای بهره‌برداری را ارتقاء می‌بخشد. ۳- براساس یافته‌ها، حدود ۸۶ درصد از کشاورزان دارای استخر ذخیره آب بودند، در حالی که هنوز ۴۰ درصد بحران کم‌آبی را تجربه می‌کردند که این می‌تواند بر امنیت غذایی آن‌ها تأثیر بگذارد. این یافته حاکی از آن است که استخرهای موجود به دلیل حجم کم، کارکرد مدیریت موقت آب را داشته و در درازمدت نمی‌توانند بحران کم‌آبی را در ماه‌های خشک سال حل کنند. بنابراین توصیه می‌شود، دولت طرح حمایت از احداث استخرهای ذخیره آب با حجم بالا را به منظور استحصال و ذخیره‌سازی آب باران و آب در ماه‌های پربارش برای مصرف در فصل‌های خشک، تشویق، ترویج و حمایت کند. این استخرها به کشاورزان کمک می‌کند تا با نوسانات فصلی دسترسی به آب مقابله کرده و آب مازاد در فصل‌های کم‌مصرف (پاییز و زمستان) را برای استفاده در فصل پرمصرف ذخیره سازند. ۴- یافته‌های تحقیق نشان داد علی‌رغم استفاده از انرژی‌های فسیلی در فعالیت‌های داخلی مزرعه مانند خشک کردن محصول و...، تمایل کشاورزان به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر بالا است. بنابراین با توجه به همبست آب و انرژی و انرژی با غذا، ایجاد و توسعه زیرساخت‌های مناسب برای تأمین امنیت انرژی ارزان، پاک و کارآمد از این طریق، توصیه می‌شود. پیشنهاد می‌شود دولت سند تأمین امنیت انرژی از بخش‌های تجدیدپذیر و غیرتجدیدپذیر را برای حمایت از امنیت آبی و غذایی کشاورزان کوچک مقیاس در دستورکار قرار دهد.

قدردانی

این تحقیق از حمایت‌های مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور و معاونت پژوهشی دانشگاه تهران-دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی برخوردار شده است که از این دو نهاد محترم تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

پی‌نوشت‌ها

۱- امنیت آبی: در بخش کشاورزی؛ امنیت آبی به معنای دسترسی مطمئن به میزان قابل قبولی از آب برای تولید محصولات زراعی، باغی و پرورش ماهی با توجه به مشکلات موجود در سطح مزرعه؛ همچون نامناسب بودن شکل و اندازه مزارع در رابطه با میزان آب و نحوه آبیاری، تلفات انتقال آب از منبع به محل مصرف، تلفات زیاد آب در مزارع کشاورزی، استهلاک سریع تأسیسات زیربنایی، افت کیفیت شبکه‌های آبیاری، عدم استفاده از شیوه‌های مناسب آبیاری و راندمان پایین آبیاری است (Monasterolo و Howarth، ۲۰۱۶). ۲- امنیت انرژی: به دسترسی به انرژی پاک، قابل قبول و مقرون به صرفه

برای پخت‌وپز، گرمایش و تولید، با توجه به نگرانی‌های محیطی و مشکلات موجود در سطح مزرعه اشاره دارد (AGECC, 2010).

۳- امنیت غذایی: دسترسی مطمئن به میزان قابل قبولی از غذا برای رفع نیازهای غذایی (با استفاده از محصولات زراعی، دامی و باغی) در کلیه مراحل تولید اعم از (کاشت، داشت، برداشت، فرآوری محصولات، انبارداری و بازاریابی) محصولات کشاورزی و امور مربوط به دامداری از قبیل (چرای دام، تعلیف، نگهداری، شیردوشی، تهیه مواد لبنی و بازاریابی)؛ با توجه به مسائل و مشکلات پیش‌بینی نشده در سطح مزرعه است (مهرابی بشرآبادی و اوحدی، ۱۳۹۳).

۴- سازوکار: در این تحقیق؛ فرآیند ارتباط متقابل و دوگانه منابع حیاتی انرژی، آب و غذا بر یکدیگر در واحدهای بهره‌برداری کشاورزی کوچک مقیاس می‌باشد. به عبارت دیگر سازوکار؛ یک فرآیند طبیعی یا تثبیت شده است که توسط آن رویدادی اتفاق می‌افتد و یا به وجود می‌آید (ویکی‌پدیا، ۱۳۹۶).

5-Average variance extracted

منابع

- اسدی، محمدتقی، زارع ابیانه، حمید، دلاور، نسرين، و اسدی، آذر. (۱۳۹۸). اثر پدیده تغییر اقلیم بر فراسنجه‌های اقلیمی همدان. مجله علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۲۱(۹)، ۱۴-۱. Doi: [10.22034/jest.2020.21435.3046](https://doi.org/10.22034/jest.2020.21435.3046)
- اسلامی، زینب، جنت رستمی، سمیه، و اشرف‌زاده، افشین. (۱۳۹۸). کاربرد مدل‌سازی در مدیریت رابطه پیوندی آب، انرژی و غذا. آب و توسعه پایدار، ۶(۲): ۸-۱۰. Doi: [10.22067/jwsd.v6i2.74126](https://doi.org/10.22067/jwsd.v6i2.74126)
- اسماعیلی‌نژاد، ابراهیم، و داوری، کامران. (۱۳۹۹). مدیریت تخصیص آب در ایران، بیراهه‌ای در گذر زمان. آب و توسعه پایدار، ۷(۲)، ۳۲-۳۳. Doi: [10.22067/jwsd.v7i2.85262](https://doi.org/10.22067/jwsd.v7i2.85262)
- جمشیدی، امید، اسدی، علی، و کلانتری، خلیل. (۱۳۹۶). سازوکارهای سازگاری با تغییر اقلیم کشاورزان خرده‌پای استان همدان. علوم ترویج و آموزش کشاورزی، ۱۳(۲)، ۱۰۹-۱۳۰.
- خیز، زهره، زیبایی، منصور، و فرج‌زاده، زکریا. (۱۳۹۷). تأثیر خشکسالی بر درآمد و رفاه خانوارها و شاخص تولید غذا. اقتصاد کشاورزی، ۱۲(۲)، ۴۳-۲۱. Doi: [10.22034/iaes.2018.32529](https://doi.org/10.22034/iaes.2018.32529)
- ذوقی‌پور، آمنه، و ترکمانی، جواد. (۱۳۹۵). تحلیل الگوی داده-ستانده انرژی در بخش کشاورزی ایران. ششمین کنفرانس اقتصاد کشاورزی ایران. دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.
- سواری، مسلم، شعبانعلی‌فمی، حسین، ایروانی، هوشنگ، و اسدی، علی. (۱۳۹۶). طراحی الگوی پایدارسازی معیشت کشاورزان کوچک‌مقیاس در شرایط خشکسالی استان کردستان. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۵(۲)، ۱۸-۱.
- شعبانعلی‌فمی، حسین، قارون، زهرا، و قاسمی، جواد. (۱۳۹۱).
- مدیریت نظام‌های بهره‌برداری کشاورزی در ایران، جلد ۱: نظام‌های بهره‌برداری کشاورزی. انتشارات سروا. چاپ اول. تهران، ایران.
- صالحی، معصومه، دهقانی، فرهاد، و ابراهیمی، نادرقلی. (۱۳۹۶). تجربه موفق تکثیر بذر سالیکورنیا با منابع آب شور. آب و توسعه پایدار، ۴(۱)، ۳۷-۴۶. Doi: [10.22067/jwsd.v4i1.56175](https://doi.org/10.22067/jwsd.v4i1.56175)
- صفایی، وحیده، داوری، کامران، و پورمحمد، یاور. (۱۳۹۸). ضرورت پیوند آب، انرژی و غذا براساس برنامه استراتژیک توسعه پایدار. آب و توسعه پایدار، ۶(۲)، ۹-۱۴. Doi: [10.22067/jwsd.v6i2.72591](https://doi.org/10.22067/jwsd.v6i2.72591)
- صیادی، محمد، سلطانی، امید، و موحدی، فرهاد. (۱۳۹۸). ارائه یک مدل مفهومی از پویایی هم‌پیوندی آب-انرژی-غذا در ایران: رویکرد سیستمی. اقتصاد محیط زیست و منابع طبیعی، ۳(۶)، ۷۹-۱۰۴. Doi: [10.22054/ecnr.2019.12483](https://doi.org/10.22054/ecnr.2019.12483)
- عابدی، سمانه. (۱۳۹۹). حکمروایی آب و ارزیابی آثار آن بر تأمین امنیت آب و غذا. آب و توسعه پایدار، ۷(۱)، ۱-۱۲. Doi: [10.22067/jwsd.v7i1.82068](https://doi.org/10.22067/jwsd.v7i1.82068)
- علم‌الهدی، علی اصغر. (۱۳۹۴). اهمیت رویداد پیوند آب و انرژی. دانشگاه شریف، تهران، ایران. موجود در: <http://enerwat.sharif.ir>
- کریمیان، فرانک، میرک‌زاده، علی‌اصغر، و آذری، آرش. (۱۴۰۱). تحلیل میزان مصرف آب و انرژی و اثرات محیط‌زیستی تولید محصولات کشاورزی در دشت میاندربند استان کرمانشاه. بوم‌شناسی کشاورزی، ۱۴(۴)، ۶۹۳-۷۱۲. Doi: [10.22067/agry.2021.67227.0](https://doi.org/10.22067/agry.2021.67227.0)
- کاترین‌رضوی، خدیجه. (۱۳۹۷). امنیت غذایی در گرو کشاورزی سنتی و خرد. علوم تغذیه و صنایع غذایی ایران، ۱۳(۱)، ۱۶۷-۱۷۳.
- مالکی، نادر، شاکری‌بستان‌آباد، رضا، صالحی‌کمرودی، محسن، و سیدآبادی، سعیده. (۱۴۰۰). بررسی وضعیت شاخص ترکیبی امنیت آبی استان‌های ایران در بازه ۱۳۹۵-۱۳۹۰: کاربردی از روش‌های تحلیل چندمعیاره. فصلنامه آب و توسعه پایدار، ۸(۲)، ۲۱-۳۲. Doi: [10.22067/jwsd.v8i2.1028](https://doi.org/10.22067/jwsd.v8i2.1028)
- مرکز الگوی اسلامی-ایرانی پیشرفت. (۱۳۹۵). اصول و الزامات حاکم بر نظام‌های بهره‌برداری مطلوب، نظام بهره‌برداری از منابع و عوامل تولید در کشاورزی، اصول و الزامات. اندیشکده آب، محیط‌زیست، مرکز الگوی اسلامی پیشرفت؛ امنیت غذایی و منابع طبیعی، تهران، ایران.
- مرکز آمار ایران. (۱۳۹۳). نتایج تفصیلی سرشماری عمومی کشاورزی-۱۳۹۳-استان همدان. همدان، ایران.
- مسائلی، حوریه، گوهری، علیرضا، و شایان‌نژاد، محمد. (۱۴۰۱). ارزیابی روش‌های مختلف آبیاری با استفاده از رویکرد همبست آب، انرژی، غذا و کربن. مدیریت آب و آبیاری، ۱۲(۳)، ۵۱۱-۵۲۵. Doi: [10.22059/jwim.2022.339054.965](https://doi.org/10.22059/jwim.2022.339054.965)
- مفاخری، صلاح، ویسی، هادی، خوشبخت، کورس، و نظری،

- Swanson, D., khachtryan, A. & Zubrychi, K. (2014). Water-Energy-Food Nexus and Agricultural Investment: A Sustainable Development Guidebook. International Institute for Sustainable Development.
- Calderon-Ambelis, H. & KeshwaniD, R. (2022). Sources of Variability and Uncertainty in Food-Energy-Water Nexus Systems. *Journal of the ASABE*, 65(6), 1343-1353. doi.org/10.13031/ja.15046
- Correa-Cano, M. E., Salmoral, G., Rey, D., Knox, J. W., Graves, A., Melo, O., ... & Yan, X. (2022). A novel modelling toolkit for unpacking the Water-Energy-Food-Environment (WEFE) nexus of agricultural development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 159, 112182. doi.org/10.1016/j.rser.2022.112182
- Estoque, R. C. (2023). Complexity and diversity of nexuses: A review of the nexus approach in the sustainability context. *Science of The Total Environment*, 854, 158612. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158612
- FAO. (2014). Walking the Nexous Talk: Assessing the Water-Energy-Food Nexous in the Context of the Sustainable Energy for All Intiative.
- Fornell, C., & Larcker, D.F. (1981). Evaluating Structural Equation Models with Unobservable Variables and Measurement Error. *Journal of Marketing Research*, 18(1), 39-50. doi: [10.1177/002224378101800104](https://doi.org/10.1177/002224378101800104)
- Gathala, M. K., Laing, A. M., Tiwari, T. P., Timsina, J., Islam, M. S., Chowdhury, A. K., ... & Gerard, B. (2020). Enabling smallholder farmers to sustainably improve their food, energy and water nexus while achieving environmental and economic benefits. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120, 109645. doi.org/10.1016/j.rser.2019.109645
- Granit, I. (2022). Microgrids through the Energy-Water-Food Security Nexus in La Guajira, Colombia: Increasing water and food security or jeopardizing groundwater levels?. *Energy Research & Social Science*, 93, 102814. doi.org/10.1016/j.erss.2022.102814
- Gupta, E. (2019). The impact of solar water pumps on energy-water-food nexus: Evidence from Rajasthan, India. *Energy Policy*, 129, 598-609. DOI: [10.1016/j.enpol.2019.02.008](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.02.008)
- Henseler, J., Ringle, C., Sinkovics, R. (2016). The use of محمد رضا. (۱۴۰۰). ارزیابی پایداری پیوند سیستم‌های آب-انرژی-غذا در محصول‌های کشاورزی (مطالعه موردی شهرستان دهگلان). *علوم محیطی*, ۱۹(۴)، ۲۸۷-۳۰۶. Doi: [10.52547/envs.2021.222630.1078](https://doi.org/10.52547/envs.2021.222630.1078)
- مهرابی بشرآبادی، حسین، و اوحدی، عبدالحسین. (۱۳۹۳). بررسی عوامل موثر بر امنیت غذایی در ایران. *اقتصاد کشاورزی*، ۸، ۱۱۱-۱۲۱.
- میرزایی، شکیبا. (۱۳۹۶). معرفی همبست و نقش آن در پایداری منابع. یادداشت تحلیلی، آب و توسعه پایدار، ۵(۱)، ۱۴۵-۱۴۶.
- ویکی‌پدیا. (۱۳۹۶). تعریف سازوکار. <https://fa.wikipedia.org/>. تاریخ به‌روزرسانی: ۱۳۹۶/۴/۲۵.
- یوسفی، محمد، و مهدوی دامغانی، عبدالمجید. (۱۳۹۰). بررسی بهره‌وری مصرف آب و انرژی در بوم‌نظام‌های فاریاب استان کرمانشاه. *بوم‌شناسی کشاورزی*، ۵(۲)، ۱۱۳-۱۲۱. Doi: <http://10.22067/jag.v5i2.24462>
- Abulibdeh, A., Zaidan, E., & Al-Saidi, M. (2019). Development drivers of the water-energy-food nexus in the Gulf Cooperation Council region. *Development in Practice*, 29(5), 582-593. DOI: [10.1080/09614524.2019.1602109](https://doi.org/10.1080/09614524.2019.1602109)
- Adebiyi, J. A., Olabisi, L. S., Liu, L., & Jordan, D. (2021). Water-food-energy-climate nexus and technology productivity: a Nigerian case study of organic leafy vegetable production. *Environment, Development and Sustainability*, 23(4), 6128-6147. DOI: [10.1007/s10668-020-00865-0](https://doi.org/10.1007/s10668-020-00865-0)
- Afkhami, P., & Zarrinpoor, N. (2022). The energy-water-food-waste-land nexus in a GIS-based biofuel supply chain design: A case study in Fars province, Iran. *Journal of Cleaner Production*, 340, 130690. DOI: [10.1007/s12649-022-01809-7](https://doi.org/10.1007/s12649-022-01809-7)
- AGECC UN. (2010). Energy for a sustainable future. Summary report and recommendations of the secretary-general's Advisory Group on Energy and Climate Change. Summary Report and Recommendation.
- Aguilar, F. X., Hendrawan, D., Cai, Z., Roshetko, J. M., & Stallmann, J. (2021). Smallholder farmer resilience to water scarcity. *Environment, Development and Sustainability*, 24, 2543-2576. doi.org/10.1007/s10668-021-01545-3
- Alam, M. F., Mandave, V., Sikka, A., & Sharma, N. (2021). Enhancing Water Productivity Through On-Farm Water Management. *Water, Climate Change, and Sustainability*, 109-124. DOI: [10.1002/9781119564522.ch7](https://doi.org/10.1002/9781119564522.ch7)
- Bizikova, I., Roy, D., Venema, H.D., McCandless, M.

- social dynamic in climate change: The implications of cumulative exposure, climate justice, and community resilience. *Contents Lists Geoforum*, 12(5), 129-140. doi.org/10.1016/j.geoforum.2018.08.006
- Lianying, W. Yangdong, H. Congjie, G. (2013). Optimum design of cogeneration for power and desalination to satisfy the demand of water and power. *Desalination*, 13(3), 324-337. DOI: [10.1016/j.desal.2013.06.006](https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.06.006)
- Maftouh, A., El Fatni, O., Fayiah, M., Liew, R. K., Lam, S. S., Bahaj, T., & Butt, M. H. (2022). The application of water-energy nexus in the Middle East and North Africa (MENA) region: a structured review. *Applied Water Science*, 12(5), 83. DOI: [10.1007/s13201-022-01613-7](https://doi.org/10.1007/s13201-022-01613-7)
- Mahia, C. R., Rabanal, F. P. Á., Coupe, S. J., & Fontaneda, L. Á. S. (2023). The Role of Geothermal Heat Pump Systems in the Water-Energy Nexus. In *Geothermal Heat Pump Systems*, 185-215. Cham: Springer International Publishing.
- Malyan, S. K., Kumar, S. S., Fagodiya, R. K., Ghosh, P., Kumar, A., Singh, R., & Singh, L. (2021). Biochar for environmental sustainability in the energy-water-agroecosystem nexus. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149, 111379. DOI: [10.1016/j.rser.2021.111379](https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111379)
- Mohtar, R.H., & lawford, R. (2016). Present and future of the water-energy-food nexus and the role of the community of practice. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 6(1), 192-199. DOI: [10.1007/s13412-016-0378-5](https://doi.org/10.1007/s13412-016-0378-5)
- Molajou, A., Pouladi, P., & Afshar, A. (2021). Incorporating social system into water-food-energy nexus. *Water Resources Management*, 35(13), 4561-4580. DOI: [10.1007/s11269-021-02967-4](https://doi.org/10.1007/s11269-021-02967-4)
- Ngammuangtueng, P., Nilsalab, P., Chomwong, Y., Wongruang, P., Jakrawatana, N., Sandhu, S., & Gheewala, S. H. (2023). Water-energy-food nexus of local bioeconomy hub and future climate change impact implication. *Journal of Cleaner Production*, 136543. DOI: [10.1016/j.jclepro.2023.136543](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136543)
- Nhamo, L., Ndlela, B., Nhemachena, C., Mabhaudhi, T., Mpandeli, S. and Matchaya, G. (2018). The water-energy-food nexus: Climate risks and opportunities in southern Africa. *Water*, 10(3), 567-581. doi.org/10.3390/w10050567
- partial least squares path modeling in international marketing, *Adv Int Market*, 20 (29), 277-319. DOI: [10.1108/S1474-7979\(2009\)0000020014](https://doi.org/10.1108/S1474-7979(2009)0000020014)
- Howarth, C. and Monasterolo, I. (2016). Understanding barriers to decision making in the UK energy-food-water nexus: The added value of interdisciplinary approaches, *Environmental Science & Policy*, 61(2), 53-60. doi.org/10.1016/j.envsci.2016.03.014
- Hu, X., & Li, P. (2022). Relief and stimulus in a cross-sector multi-product scarce resource supply chain network. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 168, 102932. doi.org/10.1016/j.tre.2022.102932
- Jing, D., Mohammed, A. A., Kadi, A., Elmiraev, S., AL-Khafaji, M. O., & Marefati, M. (2023). Wastewater treatment to improve energy and water nexus with hydrogen fuel production option: Techno-economic and process analysis. *Process Safety and Environmental Protection*, 172, 437-450. DOI: [10.1016/j.psep.2023.02.032](https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.02.032)
- Jobbins, G., Kalpakian, J., Chriyaa, A., Legrouri, A., & El Mzouri, E. H. (2015). To what end? Drip irrigation and the water-energy-food nexus in Morocco. *International Journal of Water Resources Development*, 31(3), 393-406. DOI: [10.1080/07900627.2015.1020146](https://doi.org/10.1080/07900627.2015.1020146)
- Karamian, F., Mirakzadeh, A. A., & Azari, A. (2021). The water-energy-food nexus in farming: Managerial insights for a more efficient consumption of agricultural inputs. *Sustainable Production and Consumption*, 27(3), 1357-1371. DOI: [10.1016/j.spc.2021.03.008](https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.03.008)
- Katekar, V. P., & Deshmukh, S. S. (2021). Energy-drinking water-health nexus in developing countries. *Energy and Environmental Security in Developing Countries*, 411-445. DOI: [10.1007/978-3-030-63654-817](https://doi.org/10.1007/978-3-030-63654-817)
- Kedir, Y., Berhanu, B., & Alamirew, T. (2022). Analysis of water-energy-crop nexus indicators in irrigated sugarcane of Awash Basin, Ethiopia. *Environmental Systems Research*, 11(1), 1-19. DOI: [10.1186/s40068-022-00263-7](https://doi.org/10.1186/s40068-022-00263-7)
- Khacheba, R., Cherfaoui, M., Hartani, T., & Drouiche, N. (2018). The nexus approach to water-energy-food security: an option for adaptation to climate change in Algeria. *Desalination and Water Treatment*, 131(3), 30-45. doi: [10.5004/dwt.2018.22950](https://doi.org/10.5004/dwt.2018.22950)
- Kim, H., Marcouiller, D., Woosnam, M. (2018). Rescaling

- Optimizing Food-Energy-Water (FEW) nexus to foster collective resilience in urban-rural systems. *Progress in Disaster Science*, 3(4), 1266-1291. DOI: [10.3390/smartcities3040062](https://doi.org/10.3390/smartcities3040062)
- Taqwa, M.R.; Tabataeeyan, S.H.; Salehi Sadghiani, J. & Mohammadi, K. (2013). Factors affecting the success of international technology transfer projects with the support of the facilitator organization. *Innovation Management Quarterly*, 4(8), 53-80. DOI: [10.1109/IEEM.2010.5674623](https://doi.org/10.1109/IEEM.2010.5674623)
- Terrapon-Pfaff, J., Ersoy, S. R., Fink, T., Amroune, S., Jamea, E. M., Zgou, H., & Viebahn, P. (2021). Localizing the water-energy nexus: the relationship between solar thermal power plants and future developments in local water demand. *Sustainability*, 13(1), 108-123. doi.org/10.3390/su13010108
- Tucho, G. T., & Okoth, T. (2020). Evaluation of neglected bio-wastes potential with food-energy-sanitation nexus. *Journal of Cleaner Production*, 242(1), 118547. doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118547
- UNWater. (2021). Water, Food and Energy. <https://www.unwater.org/water-facts/water-food-and-energy>
- Usman, M., Ali, A., Bashir, M. K., Baig, S. A., Mushtaq, K., Abbas, A., ... & Iqbal, M. S. (2023). Modelling well-being of farmers by using nexus of climate change risk perception, adaptation strategies, and their drivers on irrigation water in Pakistan. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(17), 49930-49947. DOI: [10.1007/s11356-023-25883-z](https://doi.org/10.1007/s11356-023-25883-z)
- Wa'el A, H., Memon, F. A., & Savic, D. A. (2017). An integrated model to evaluate water-energy-food nexus at a household scale. *Environmental modelling & software*, 93, 366-380. doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.03.034
- Weidner, T., Yang, A., Forster, F., & Hamm, M. W. (2022). Regional conditions shape the food-energy-land nexus of low-carbon indoor farming. *Nature Food*, 3(3), 206-216. DOI: [10.1038/s43016-022-00461-7](https://doi.org/10.1038/s43016-022-00461-7)
- Zarei, S., Bozorg-Haddad, O., Kheirinejad, S., & Loáiciga, H. A. (2021). Environmental sustainability: A review of the water-energy-food nexus. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 70(2), 138-154. doi.org/10.2166/aqua.2020.058
- OECD. (2014). Bridging the Digital Divide. (available at: <https://www.oecd.org/site/schoolingfortomorrowknowledgebase/>)
- Olawuyi, D. (2020). Sustainable development and the water-energy-food nexus: Legal challenges and emerging solutions. *Environmental Science & Policy*, 103, 1-9. doi.org/10.1016/j.envsci.2019.10.009
- Pereira Ribeiro, J. M., da Silva, S. A., da Silva Neiva, S., Soares, T., Montenegro, C., Deggau, A. B., . . . and de Andrade Guerra, J. B. S. O. (2021). A proposal of a balanced scorecard to the water, energy and food nexus approach: Brazilian food policies in the context of sustainable development goals. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 35(1), 129-146. DOI: [10.1007/s00477-020-01769-1](https://doi.org/10.1007/s00477-020-01769-1)
- Rasul, G. (2016). The nexus approach to water-energy-food security: an option for adaption to climate change. *Climate policy*, 16(6), 134-151. doi.org/10.1080/14693062.2015.1029865
- Ringler, C., Bhaduri, A., & Lawford, R. (2013). The nexus across water, energy, land and food (WELF): potential for improved resource use efficiency?. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5(6), 617-624. doi.org/10.1016/j.cosust.2013.11.002
- Sarkodie, S. A., & Owusu, P. A. (2020). Bibliometric analysis of water-energy-food nexus: Sustainability assessment of renewable energy. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 13(2), 29-34. doi.org/10.1016/j.coesh.2019.10.008
- Simpson, G.B., & Jewitt, P.W. (2019). The Development of the Water-Energy-Food Nexus as a Framework for Achieving Resource Security: A Review. In *Environmental Science*. doi.org/10.3389/fenvs.2019.00008
- Singh, R., Singh, P., Singh, H., & Raghubanshi, A. (2019). Impact of sole and combined application of biochar, organic and chemical fertilizers on wheat crop yield and water productivity in a dry tropical agro-ecosystem. *Biochar*, 1(2), 229-235. DOI: [10.1007/s42773-019-00013-6](https://doi.org/10.1007/s42773-019-00013-6)
- Subedi, R., Karki, M., & Panday, D. (2020). Food system and water-energy-biodiversity nexus in Nepal: a review. *Agronomy*, 10(8), 1129-1140. doi.org/10.3390/agronomy10081129
- Sukhwani, V., Shaw, R., Kumar, M.B., Wanglin, Y. (2019).

Investigation of Changes in the Amount and Distribution of Precipitation and Temperature in Iran and Their Effects on Extreme Events

A. Mianabadi^{1*}, K. Davary²

1- Assistant Professor, Department of Ecology, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran. 2- Professor, Water Sciences and Engineering Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

*(Corresponding Author Email: a.mianabadi@kgut.ac.ir:)

Received: 07-01-2023

Revised: 25-01-2023

Accepted: 05-02-2023

Available Online: 21-09-2023

بررسی تغییرات مقدار و توزیع بارش و دما در ایران و اثرات آن‌ها بر رخدادهای حدی

آمنه میان‌آبادی^۱، کامران داوری^۲

۱- استادیار، گروه اکولوژی، پژوهشکده علوم محیطی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران. ۲- استاد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

*(نویسنده‌ی مسئول، E-Mail: a.mianabadi@kgut.ac.ir:)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۶/۳۰

Abstract

Global warming in recent decades has caused significant changes in precipitation and temperature, including changes in the mean and standard deviation of these variables and changes in the intensity and frequency of climatic extremes (floods and droughts). Given the importance of these changes in water resources management, it is crucial to study the trends in these variables. In this study, in 12 selected stations in different climatic regions in Iran, the changes in monthly and annual precipitation and mean temperature during 1961-1990 and 1991-2020 were examined. The results of Mann-Kendall test showed in most stations precipitation had an increasing trend in the first period, and a decreasing trend in the second period; although in both periods the trend was not significant ($Z < 1.645$). The mean temperature has increased in both periods, which in the second period has increased with a higher level of confidence ($Z > 2.576$) and greater slope than in the first period. The average annual rainfall has decreased in most stations, and the average annual temperature has increased in all stations. The distribution of precipitation and temperature showed that in some stations, the probability of occurrence of extreme events and hot and cold periods in the second period has increased compared to the first period. In some other stations, droughts/floods are more/less likely to occur. This indicates that the activity of air masses affecting each station can be intensified or weakened due to climate change.

Keywords: Climate Change, Extremes, Flood, Drought, Water Resources.

چکیده

گرمایش جهانی در دهه‌های گذشته باعث تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای در بارش و دما از جمله تغییر در میانگین و انحراف معیار این متغیرها و تغییر در شدت و فراوانی رخدادهای حدی (سیل و خشکسالی) شده است. بررسی روند این دو متغیر با توجه به تأثیر آنها در مدیریت منابع آب، اهمیت زیادی دارد. در این پژوهش، در ۱۲ ایستگاه منتخب در اقلیم‌های مختلف ایران، تغییرات بارش و دمای متوسط ماهانه و سالانه برای دو دوره ۱۹۶۱-۱۹۹۰ و ۱۹۹۱-۲۰۲۰ بررسی شد. نتایج آزمون من-کندال نشان داد که در اکثر ایستگاه‌ها بارش در دوره اول روند افزایشی و در دوره دوم روند کاهشی داشته که البته در هر دو حالت روند تغییرات معنی‌دار نبوده است ($Z > 1.645$). دمای هوا در هر دو دوره روند افزایشی داشته که در دوره دوم با سطح معنی‌داری بالاتر ($Z > 2.576$) و شیب بیشتری نسبت به دوره اول افزایش یافته است. متوسط بارش سالانه در اکثر ایستگاه‌ها کاهش و متوسط سالانه دمای هوا در همه ایستگاه‌ها افزایش یافته است. توزیع بارش و دما نیز نشان داد که در برخی از ایستگاه‌ها احتمال وقوع بارش‌ها و رخدادهای حدی و دوره‌های گرم و سرد در دوره دوم نسبت به دوره اول افزایش داشته است. در برخی دیگر از ایستگاه‌ها احتمال وقوع خشکسالی‌ها بیشتر و احتمال وقوع بارش‌های سنگین کمتر شده است. این مسئله نشان می‌دهد که فعالیت توده‌های هوای موثر بر هر ایستگاه تحت تأثیر تغییر اقلیم می‌تواند تشدید یا تضعیف شود.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، رخداد حدی، سیل، خشکسالی، منابع آب.

گرمایش جهانی پدیده‌ای است که در اکثر نقاط جهان شواهد و اثرات آن به‌ویژه در بخش منابع آب دیده می‌شود (IPCC، ۲۰۰۷). شدت و خصوصیات اثرات تغییر اقلیم از منطقه‌ای به منطقه دیگر متفاوت است (Abbaspour و همکاران، ۲۰۰۹). تغییر در مقدار و توزیع بارش و دما (و به تبع آن تبخیر) ناشی از تغییر اقلیم می‌تواند باعث کاهش، افزایش و یا تغییر کیفیت منابع آب موجود در هر منطقه شود (Abbaspour و همکاران، ۲۰۰۹؛ Qin و Wang، ۲۰۱۷؛ Ostad-Ali-Askar و همکاران، ۲۰۱۸؛ Yu و همکاران، ۲۰۱۹؛ Schilling و همکاران، ۲۰۲۰؛ Konapala و همکاران، ۲۰۲۰؛ Mengistu و همکاران، ۲۰۲۱؛ Saeed و همکاران، ۲۰۲۱؛ Andrade و همکاران، ۲۰۲۱؛ Azadi و همکاران، ۲۰۲۱؛ Yazdani و همکاران، ۲۰۲۱؛ Ghazi و همکاران، ۲۰۲۱؛ Halwani و همکاران، ۲۰۲۲). تغییر اقلیم می‌تواند باعث تغییر در میانگین یا انحراف معیار متغیرهای اقلیمی و یا هر دو شود. کاهش مقدار میانگین بارش (با فرض ثابت بودن انحراف معیار) نشان‌دهنده کاهش احتمال وقوع بارش‌های سنگین و افزایش احتمال وقوع خشکسالی است (Ongoma و همکاران، ۲۰۱۸). افزایش میانگین دما (با فرض ثابت بودن انحراف معیار) نیز با افزایش وقوع تنش‌های گرمایی و کاهش دوره‌های سرد همراه خواهد بود. از طرف دیگر کاهش انحراف معیار بارش (با فرض ثابت بودن میانگین) نشان‌دهنده افزایش احتمال وقوع بارش‌های حدی و در نتیجه افزایش وقوع هر دو پدیده سیل و خشکسالی است (Jahn، ۲۰۱۵؛ Zhan و همکاران، ۲۰۲۰). این مسئله در مورد دما افزایش وقوع دوره‌های گرمایی و گرمایی شدید را به دنبال دارد (Jahn، ۲۰۱۵؛ Zhan و همکاران، ۲۰۲۰؛ IPCC، ۲۰۰۱). در برخی موارد هم میانگین و هم انحراف معیار متغیرها همزمان تغییر می‌کند که تبعات متفاوتی را در چرخه هیدرولوژی (Kundzewicz و Gerten، ۲۰۱۵؛ Li و Fang، ۲۰۲۱؛ Usman و همکاران، ۲۰۲۱)، عملکرد محصولات کشاورزی (Challinor و همکاران، ۲۰۱۴؛ Kogo و همکاران، ۲۰۲۱؛ Mukhopadhyay و همکاران، ۲۰۲۱) و اکولوژی (Seddon و همکاران، ۲۰۱۶؛ Prakash، Verma و همکاران، ۲۰۲۱) مناطق مختلف به دنبال خواهد داشت. چنین شرایطی هزینه‌های اقتصادی فراوانی برای جوامع به همراه دارد و با به مخاطره افتادن منابع آبی موجود، تولید محصولات کشاورزی کاهش یافته و فقر و گرسنگی گسترش خواهد یافت (Abbaspour و همکاران، ۲۰۰۹).

از منظر مدیریت منابع آب، تغییرات در مقدار و توزیع بارش و دما می‌تواند برای کشوری چون ایران که همواره با محدودیت منابع آب روبه‌رو بوده است، چالش‌هایی را به دنبال داشته باشد. وضعیت منابع آبی کشور به‌ویژه منابع آب زیرزمینی در حال حاضر در شرایط نامناسبی قرار داشته (Mianabadi و همکاران، ۲۰۲۰؛ Mianabadi و همکاران، ۲۰۲۱) و مدیریت این منابع و میزان استفاده بهینه از آن‌ها مورد توجه محققان و مسئولان می‌باشد. این مسئله در جوامع

روستایی که بیشتر به کشاورزی و آب وابسته هستند، تبعات بیشتری دارد که از آن جمله می‌توان به مهاجرت‌های گسترده از روستاها به شهرها اشاره کرد (Mianabadi و همکاران، ۲۰۲۲؛ Mianabadi و همکاران، ۲۰۲۳). بنابراین بررسی تغییرات مقدار و توزیع بارش و دما در اثر گرمایش جهانی در هر منطقه با توجه به اثری که بر میزان آب در دسترس آن منطقه دارد، اهمیت بسیاری دارد. این مسئله می‌تواند به برنامه‌ریزی مناسب و بلندمدت برای مدیریت منابع آب محدود کشور کمک نماید.

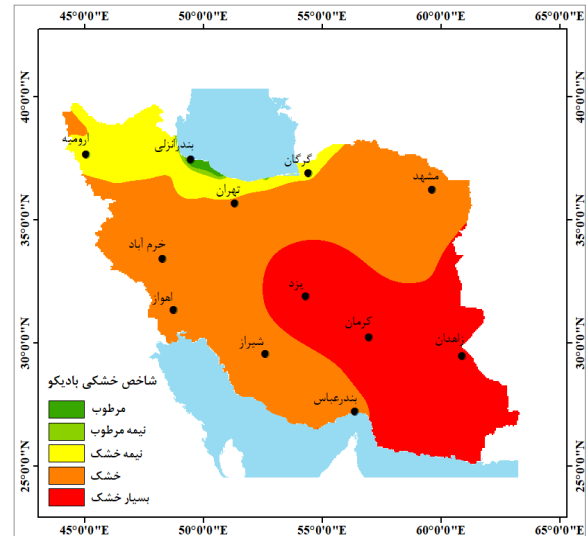
تاکنون مطالعات مختلفی در ایران و جهان برای بررسی تغییرات بارش و دما (Zarrin و Dadashi-Roudbari، ۲۰۲۱؛ Hong و همکاران، ۲۰۲۱؛ Zarrin و همکاران، ۲۰۲۲؛ Bustos Usta و همکاران، ۲۰۲۲؛ سرابی و همکاران، ۱۳۹۹؛ سرابی و همکاران، ۱۴۰۰؛ داداشی رودباری، ۱۴۰۰؛ زرین و همکاران، ۱۴۰۰؛ بهزادی و همکاران، ۱۴۰۱) و اثر تغییر اقلیم بر منابع آب و تولیدات کشاورزی انجام شده است (Nassiri و همکاران، ۲۰۰۶؛ Abbaspour و همکاران، ۲۰۰۹؛ Karimi و همکاران، ۲۰۱۸؛ Afshar و Fahmi، ۲۰۱۹؛ Konapala و همکاران، ۲۰۲۰). در زمینه بررسی تغییرات تابع توزیع بارش و دما می‌توان به مطالعات Ongoma و همکاران (۲۰۱۸)، Newton و همکاران (۲۰۲۱)، Ye و Qian (۲۰۲۱)، Zou و همکاران (۲۰۲۱) و Almazroui و همکاران (۲۰۲۱) اشاره نمود. اما باید توجه داشت که مطالعات ذکر شده با استفاده از خروجی مدل‌های اقلیمی و برای اقلیم آینده انجام شده و تاکنون برای بررسی تغییرات توزیع بارش و دما و اثر آن بر منابع آب در دسترس در ایران، از داده‌های ثبت شده موجود استفاده نشده است. درحال حاضر با توجه به اینکه در بسیاری از ایستگاه‌های هواشناسی کشور، تعداد سال‌های آماری به قدر کفایت (بیشتر از ۶۰ سال) وجود دارد، می‌توان تغییرات اقلیمی وقوع یافته و اثرات آن بر منابع آبی را بررسی نمود. از آنجا که بر اساس توصیه سازمان جهانی هواشناسی، دوره طولانی مدت حداقل ۳۰ سال برای بررسی تغییرات متغیرهای اقلیمی مورد نیاز است (Burroughs، ۲۰۰۳)، در این مقاله تغییرات رخ داده در مقدار و توزیع متوسط بارش و دمای سالانه در دو دوره ۳۰ ساله در ۱۲ ایستگاه منتخب از اقلیم‌های مختلف ایران و اثرات آن بر رخدادهای حدی بررسی می‌شود.

مواد و روش‌ها

• ایستگاه‌های منتخب

برای بررسی تغییرات دما و بارش در ایران، ۱۲ ایستگاه به عنوان نماینده اقلیم‌های مختلف انتخاب شد. این ایستگاه‌ها و موقعیت آن‌ها در شکل (۱) نشان داده شده است. با توجه به طول دوره آماری مناسب در این ایستگاه‌ها، بررسی تغییرات این دو متغیر به خوبی ممکن است. به این منظور از داده‌های روزانه بارش و دما برای ۱۲ ایستگاه

منتخب در سال‌های ۱۹۶۱ تا ۲۰۲۰ استفاده شد. دوره آماری به دو دوره ۳۰ ساله ۱۹۶۱ تا ۱۹۹۰ و ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰ تقسیم و تغییرات دو متغیر در دوره ۳۰ ساله دوم نسبت به دوره ۳۰ ساله اول بررسی شد.



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های منتخب در کشور (طبقه‌بندی اقلیم ایران براساس شاخص خشکی بادیکو (نسبت تبخیر-تعرق پتانسیل به بارش) صورت گرفته است)

• بررسی روند تغییرات در دو دوره ۳۰ ساله

بررسی روند تغییرات در سری‌های زمانی مختلف معمولاً با آزمون غیرپارامتریک من-کندال (Mann, ۱۹۴۵؛ Kendall, ۱۹۷۵) انجام می‌شود. این آزمون می‌تواند برای همه توابع توزیع استفاده شده و نیازی به شرط نرمال بودن داده‌ها ندارد. بنابراین به‌طورگسترده‌ای در بررسی روند متغیرهای اقلیمی و هیدرولوژیکی استفاده می‌شود (Mianabadi و همکاران، ۲۰۱۹). آزمون من-کندال به صورت زیر

تعریف می‌شود:

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{V(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{V(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (1)$$

که در این رابطه:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sign}(x_j - x_k) \quad (2)$$

$$V(S) = \frac{[n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5)]}{18} \quad (3)$$

در این معادلات، $V(S)$ واریانس S ، n تعداد جفت داده‌ها، t_i تعداد پیوندها برای مقدار i ام، m تعداد گروه پیوندها و x_j و x_k مقادیر داده‌های متوالی می‌باشند. گروه پیوندها به تعداد اعدادی گفته می‌شود که در سری مورد بررسی بیش از یک بار تکرار شده است. به عنوان مثال اگر در یک سری فرضی اعداد ۲، ۱۰ و ۱۴ به ترتیب ۳، ۴ و ۵ بار و بقیه اعداد هر کدام یک بار تکرار شده باشد، در این سری m برابر ۳ و t_1 ، t_2 و t_3 به ترتیب برابر ۳، ۴ و ۵ می‌باشد. مقادیر مثبت Z_{MK} روند افزایشی و مقادیر منفی آن روند کاهشی را نشان می‌دهد.

• بررسی شیب تغییرات

برای بررسی شیب تغییرات بارش و دما از تخمین‌گر شیب سن (Sen's slope) استفاده شد (Sen, ۱۹۶۸) که مقدار آن با رابطه (۴) به دست می‌آید.

$$\beta = \text{Median}((x_j - x_k)/(j - k)) \quad (4)$$

در این رابطه x_j و x_k مقادیر سری زمانی (در این مطالعه بارش و دما) در زمان‌های j و k می‌باشد ($j > k$). مقادیر مثبت β نشان‌دهنده شیب مثبت تغییرات و مقادیر منفی آن نشان‌دهنده شیب منفی تغییرات است.

• تغییرات تابع توزیع متوسط سالانه بارش و دما

همانطور که در بخش مقدمه ذکر شد، برای بررسی تغییرات توزیع متوسط سالانه بارش و دما، تغییرات مقدار میانگین و انحراف معیار در دو دوره مختلف بررسی می‌شود. به این منظور برای نمایش بهتر تغییرات میانگین و انحراف معیار، از تابع توزیع نرمال برازش داده شده به داده‌ها استفاده شد. آزمون نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آماره کولموگروف-اسمیرنوف و در سطح ۹۹ درصد با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شد. برازش تابع توزیع در محیط برنامه‌نویسی MATLAB انجام گرفت.

• تعیین شاخص خشکی ایستگاه‌ها

برای تعیین میزان خشکی ایستگاه‌ها از دو شاخص دومارتن و بادیکو استفاده شد. de Martonne (۱۹۲۵) شاخص پیشنهادی خود را به صورت زیر ارائه نمود.

$$I_{DM} = P/(T+10) \quad (5)$$

در این رابطه P بارش سالانه (میلیمتر)، T دمای متوسط سالانه (درجه سلسیوس) و I_{DM} شاخص خشکی دومارتن است.

Budyko (۱۹۷۴) رابطه زیر را برای تعیین میزان خشکی توسعه داد:

$$I_B = E_p/P \quad (6)$$

در این معادله P بارش سالانه (میلیمتر)، E_p تبخیر-تعرق پتانسیل سالانه (میلیمتر) و I_B شاخص خشکی بادیکو است. در این پژوهش تبخیر-تعرق پتانسیل با روش هارگریوز-سامانی (Hargreaves و Samani, ۱۹۸۲) محاسبه شد. این دو شاخص به این دلیل استفاده شد که هر دو متغیر دما و بارش را در خود دارند و تغییرات همزمان این دو متغیر را با هم مورد نظر قرار می‌دهند.

نتایج و بحث

• بررسی روند تغییرات بارش و دما

جدول (۱) مقدار Z آزمون من-کندال برای متغیرهای بارش و دمای متوسط در ۱۲ ایستگاه منتخب را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول ملاحظه می‌شود، در دوره ۱۹۶۱-۱۹۹۰ مقدار بارش سالانه

در اکثر ایستگاه‌ها روند افزایشی داشته است که شیب این تغییرات (شیب سن) در جدول (۲) نشان داده شده است. در ایستگاه‌های خرم‌آباد، زاهدان، کرمان و گرگان روند بارش‌ها کاهشی بوده است که از این میان تنها روند کاهش در ایستگاه گرگان، با شیب $-۵/۳۰$ ، معنی‌دار بوده است. در دوره ۱۹۹۱-۲۰۲۰، روند تغییرات بارش در اکثر ایستگاه‌ها کاهشی بوده، اما به جز در ایستگاه شیراز (با شیب $-۴/۶۸$) و کرمان (با شیب $-۱/۶۱$) در بقیه ایستگاه‌ها این روند کاهشی معنی‌دار نبوده است. حجازی‌زاده و پروین (۱۳۸۸) نیز دریافتند که بیشتر تغییرات رخ داده در بارش تهران از نوع نوسانات کوتاه مدت آب و هوایی و بدون روند معنی‌دار بوده است. برخی از مطالعات پیشین در ایران نیز نشان داده‌اند که روند کاهشی بارش اغلب معنی‌دار نبوده است (حجازی‌زاده و پروین، ۱۳۸۸؛ اسدی و حیدری، ۱۳۹۰؛ ناصرزاده و همکاران، ۱۳۹۱؛ رئیسی نافچی و سلطانی محمدی، ۱۳۹۵؛ کامیابی و عبدی، ۱۳۹۹).

جدول ۱- مقدار Z آزمون من-کندال برای متغیرهای بارش و دما در ۱۲ ایستگاه منتخب

ایستگاه	Z_{MK}			
	بارش		دمای متوسط	
	۱۹۹۱-۱۹۹۰	۱۹۹۱-۲۰۲۰	۱۹۹۱-۱۹۹۰	۱۹۹۱-۲۰۲۰
ارومیه	۰/۰۴	۰/۳۹	-۲/۱۴*	۲/۹۳*
اهواز	۰/۵۷	-۱/۴۶	۲/۶۴*	۳/۷۵*
بندرانزلی	۰/۴۶	۱/۳۲	-۱/۱۱	۴/۴۲*
بندرعباس	۱/۳۲	-۱/۲۵	-۲/۰۶۸*	۲/۳۶*
تهران	۰/۸۹	-۰/۱۱	۲/۸۲*	۱/۹۳*
خرم‌آباد	-۱/۲۸	-۰/۲۵	-۴/۶۷*	۳/۷۵*
زاهدان	-۱/۴۳	-۰/۵۴	۱/۸۹	۲/۸۵*
شیراز	۰/۴۳	-۲/۰۷*	۴/۰۳*	-۰/۱۴
کرمان	-۰/۴۶	-۱/۸۹*	۱/۰۹	۳/۲۵*
گرگان	۱/۹۳*	-۱/۰۰	-۰/۷۵	۲/۷۱*
مشهد	۱/۲۸	-۰/۳۶	۱/۵۳	۴/۰۰*
یزد	۱/۳۹	-۰/۷۱	۲/۵۰*	۴/۲۵*

* علامت ستاره در بالای اعداد نشان‌دهنده معنی‌داری روند است

روند افزایشی معنی‌داری داشته و سطح اطمینان معنی‌داری این افزایش بیشتر از دوره ۱۹۹۰-۱۹۶۱ است ($Z < ۲/۵۷۶$). شیب افزایش دما در این دوره نیز نسبت به دوره قبل بیشتر بوده است (جدول ۲). بررسی داده‌ها نشان داد که کاهش روند دمای متوسط در ایستگاه شیراز در دوره ۱۹۹۱-۲۰۲۰ به دلیل کاهش معنی‌دار روند دمای حداقل در این ایستگاه بوده است.

جدول ۲- مقدار شیب سن (Sen's Slope) برای متغیرهای بارش و دما در ۱۲ ایستگاه منتخب

ایستگاه	شیب سن (Sen's Slope)			
	بارش		دمای متوسط	
	۱۹۹۱-۱۹۹۰	۱۹۹۱-۲۰۲۰	۱۹۹۱-۱۹۹۰	۱۹۹۱-۲۰۲۰
ارومیه	۰/۱۳	۰/۷۷	-۰/۰۵	۰/۰۴
اهواز	۱/۰۹	-۲/۵۱	۰/۰۳	۰/۰۵
بندرانزلی	۳/۵۰	۸/۰۲	-۰/۰۱	۰/۰۶
بندرعباس	۲/۷۷	-۲/۹۲	-۰/۰۳	۰/۰۲
تهران	۱/۷۴	-۰/۴۷	۰/۰۴	۰/۰۳
خرم‌آباد	-۲/۳۷	-۰/۸۴	-۰/۱۱	۰/۰۶
زاهدان	-۱/۲۳	-۰/۶۰	۰/۰۳	۰/۰۴
شیراز	۱/۰۳	-۴/۶۸	۰/۰۶	-۰/۰۰۱
کرمان	-۰/۴۰	-۱/۶۱	۰/۰۱	۰/۰۴
گرگان	-۵/۳۰	-۳/۵۸	-۰/۰۱	۰/۰۳
مشهد	۱/۹۲	-۰/۶۲	۰/۰۳	۰/۰۷
یزد	۰/۷۹	-۰/۴۰	۰/۰۳	۰/۰۷

• آزمون نرمال بودن داده‌ها

نتایج آزمون نرمال بودن داده‌های بارش و دمای متوسط (آماره کولموگروف-اسمیرنوف و مقدار P-value در جدول ۳) نشان داد که به جز بارش در ایستگاه بندرعباس در دوره ۱۹۹۰-۱۹۶۱، دما در یزد در دوره ۱۹۹۰-۱۹۶۱ و دما در تهران و گرگان در دوره ۱۹۹۱-۲۰۲۰، مقادیر بارش و دما در سایر ایستگاه‌ها در سطح ۹۹ درصد از توزیع نرمال پیروی می‌کنند ($P\text{-value} < ۰/۰۱$). بنابراین در این مطالعه از توزیع نرمال برای داده‌ها استفاده شد.

• تغییرات میانگین بارش و دما در دوره‌های ۳۰ ساله

تغییرات میانگین بارش و دمای متوسط در دوره ۱۹۹۱-۲۰۲۰ نسبت به دوره ۱۹۹۰-۱۹۶۱ (شکل ۲) نشان می‌دهد، میانگین بارش در ایستگاه‌های پر بارش‌تر شامل ارومیه، بندرانزلی، خرم‌آباد و گرگان کاهش یافته است و شهرهای گرم‌تر تغییر محسوسی در مقدار بارش نشان نداده‌اند. متوسط بارش سالانه در تهران و شیراز با افزایش همراه بوده است. دمای متوسط در دوره ۳۰ ساله اول نیز نسبت به دوره ۳۰ ساله دوم در تمام ایستگاه‌ها به غیر از خرم‌آباد افزایش داشته است.

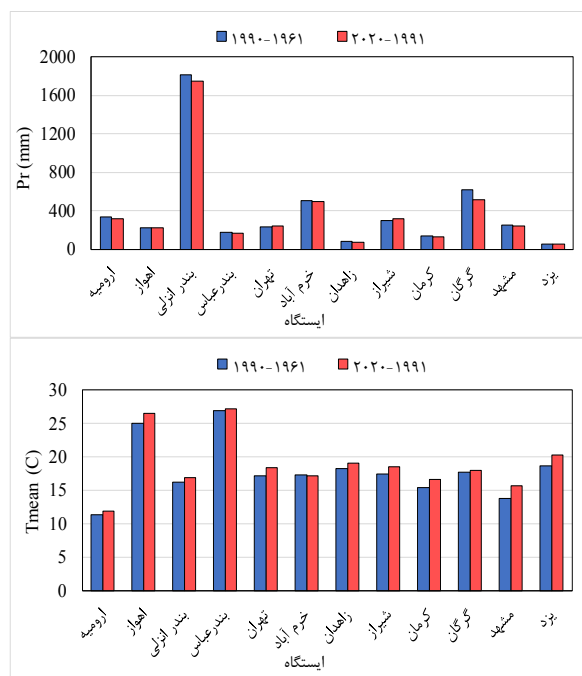
مقدار Z آزمون من-کندال برای متغیر دما (جدول ۱) نشان می‌دهد که در دوره ۳۰ ساله ۱۹۹۰-۱۹۶۱ در ایستگاه‌های ارومیه، بندرانزلی، بندرعباس، خرم‌آباد و گرگان دمای متوسط روند کاهشی داشته است که این روند کاهشی در ایستگاه‌های ارومیه (با شیب $-۰/۰۵$)، بندرعباس (با شیب $-۰/۰۳$) و خرم‌آباد (با شیب $-۰/۱۱$) معنی‌دار بوده است. در سایر ایستگاه‌ها روند دمای متوسط افزایشی و معنی‌دار بوده است (با حداکثر شیب $۰/۰۶$ در شیراز). این درحالی است که در دوره ۱۹۹۱-۲۰۲۰ در همه ایستگاه‌ها به غیر از شیراز، دمای متوسط

جدول ۳- نتایج آزمون نرمال بودن داده‌های بارش و دمای متوسط در ۱۲ ایستگاه منتخب

ایستگاه	بارش				دمای متوسط			
	۱۹۶۱-۱۹۹۰		۱۹۹۱-۲۰۲۰		۱۹۶۱-۱۹۹۰		۱۹۹۱-۲۰۲۰	
	آماره کولموگروف- اسمیرنوف	P-value	آماره کولموگروف- اسمیرنوف	P-value	آماره کولموگروف- اسمیرنوف	P-value	آماره کولموگروف- اسمیرنوف	P-value
ارومیه	۰/۱۱۲	۰/۲۰۰	۰/۱۵۰	۰/۰۸۳	۰/۱۷۸	۰/۰۱۶	۰/۱۴۸	۰/۰۹۴
اهواز	۰/۰۷۱	۰/۲۰۰	۰/۱۲۱	۰/۲۰۰	۰/۱۱۱	۰/۲۰۰	۰/۱۶۵	۰/۰۳۷
بندر انزلی	۰/۱۶۴	۰/۰۳۸	۰/۱۲۶	۰/۲۰۰	۰/۱۳۰	۰/۲۰۰	۰/۱۲۴	۰/۲۰۰
بندر عباس	۰/۱۸۸	۰/۰۰۸	۰/۱۴۳	۰/۱۲۱	۰/۱۰۰	۰/۲۰۰	۰/۱۷۱	۰/۰۲۵
تهران	۰/۰۶۱	۰/۲۰۰	۰/۱۱۲	۰/۲۰۰	۰/۱۳۲	۰/۱۹۱	۰/۲۰۰	۰/۰۰۳
خرم آباد	۰/۱۵۹	۰/۰۵۱	۰/۱۶۷	۰/۰۳۲	۰/۱۲۳	۰/۲۰۰	۰/۰۹۹	۰/۲۰۰
زاهدان	۰/۱۶۴	۰/۰۳۸	۰/۱۲۱	۰/۲۰۰	۰/۱۰۰	۰/۲۰۰	۰/۱۶۵	۰/۰۳۵
شیراز	۰/۱۳۲	۰/۱۹۴	۰/۱۲۲	۰/۲۰۰	۰/۰۹۹	۰/۲۰۰	۰/۱۲۴	۰/۲۰۰
کرمان	۰/۱۱۲	۰/۲۰۰	۰/۱۰۸	۰/۲۰۰	۰/۱۵۶	۰/۰۶۲	۰/۱۸۰	۰/۰۱۴
گرگان	۰/۰۹۴	۰/۲۰۰	۰/۱۰۹	۰/۲۰۰	۰/۱۰۰	۰/۲۰۰	۰/۱۹۸	۰/۰۰۴
مشهد	۰/۱۲۷	۰/۲۰۰	۰/۱۴۰	۰/۱۳۷	۰/۱۳۹	۰/۱۴۱	۰/۱۱۷	۰/۲۰۰
یزد	۰/۱۱۱	۰/۲۰۰	۰/۱۵۰	۰/۰۸۳	۰/۲۰۳	۰/۰۰۳	۰/۱۶۱	۰/۰۴۶

اول به سمت چپ متمایل شده است، مقدار متوسط بارش کاهشی بوده است. این مسئله در ایستگاه‌های پر باران تر (ارومیه، بندرانزلی، خرم‌آباد و گرگان) دیده می‌شود. مطالعات پیشین (عساکره، ۱۳۸۶؛ Zarrin و Dadashi-Roudbari، ۲۰۲۱) نیز نشان می‌دهند که بارش در غرب کشور در سال‌های آینده کاهش می‌یابد. نتایج Evans (۲۰۰۹) نیز این مسئله را تأیید می‌کند که مناطق نیمه‌گرمسیری در سال‌های اخیر خشک‌تر شده‌اند. بر اساس یافته‌های Naderi و Raeisi (۲۰۱۶) کاهش بارش در غرب کشور به دلیل کاهش بارش توده هوای مدیترانه‌ای، که در زمستان بادهای غربی را به همراه دارد و بخش اعظمی از بارش ایران را تأمین می‌کند (Bari Abarghouei و همکاران، ۲۰۱۱)، در اقلیم آینده است. از سوی دیگر به طور کلی قدرتمند شدن پرفشار شمالی و زبانه پرفشار سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال و کاهش رطوبت نسبی، شرایط پایدارتر، گرم‌تر، خشک‌تر و با بارش کمتر برای اکثر مناطق کشور به ویژه در مرکز ایجاد می‌کند (Kousari و همکاران، ۲۰۱۱؛ Fazel-Rastgar، ۲۰۲۱).

در ایستگاه ارومیه تابع توزیع کمی به سمت چپ متمایل شده است، اما شکل تابع تغییری نکرده است. بر این اساس احتمال وقوع بارش‌های سنگین در این ایستگاه در دوره دوم نسبت به دوره اول کاهش یافته است و در مقابل احتمال وقوع بارش‌های با مقادیر کم افزایش یافته است. به عبارت دیگر در این ایستگاه احتمال ترسالی‌ها کاهش و احتمال خشکسالی‌ها افزایش یافته است. چنین شرایط مشابهی در ایستگاه‌های کرمان و گرگان نیز مشاهده می‌شود، با این



شکل ۲- تغییرات میانگین سالانه بارش و دما در دوره ۱۹۹۱-۲۰۲۰ نسبت به دوره ۱۹۶۱-۱۹۹۰

• تغییرات توزیع بارش و دما در دوره‌های ۳۰ ساله

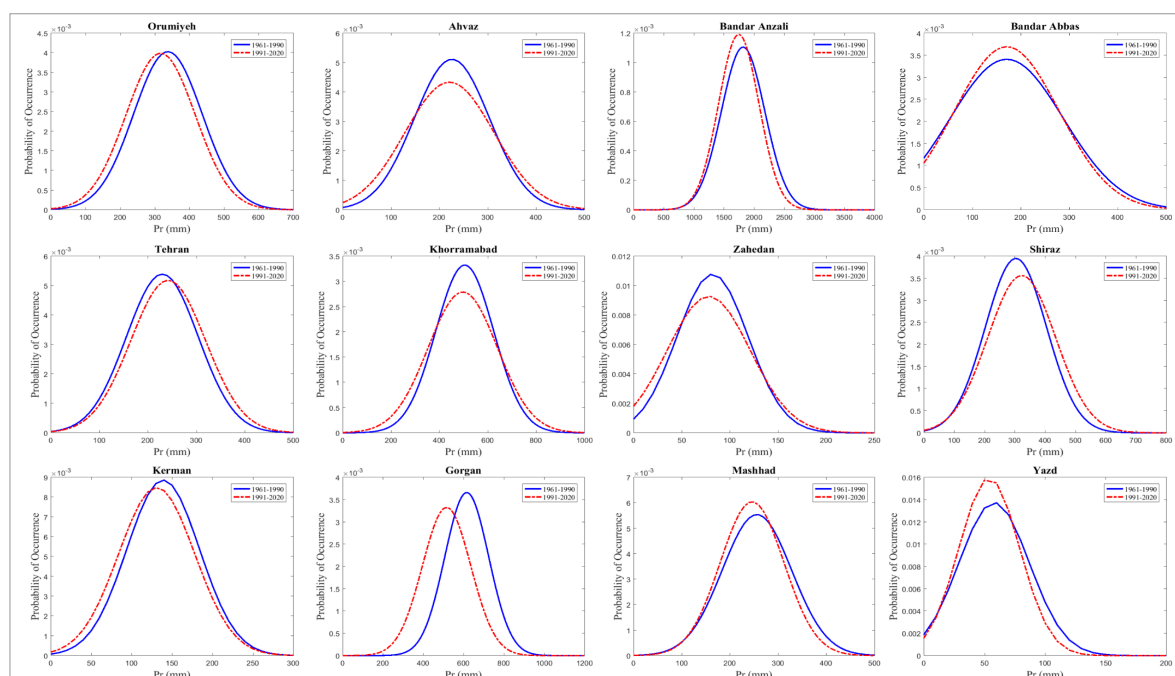
بر اساس آنچه در شکل (۳) مشاهده می‌شود، در ایستگاه‌هایی که تابع توزیع بارش در دوره ۳۰ ساله دوم نسبت به دوره ۳۰ ساله

تفاوت که احتمال وقوع بارش‌های متوسط در این دو ایستگاه در دوره دوم نسبت به دوره اول کمتر شده است. در ایستگاه‌های بندرانزلی، مشهد و یزد احتمال وقوع بارش‌های سنگین کاهش یافته و احتمال وقوع دوره‌های خشک تغییری نکرده است. در تهران و شیراز تابع توزیع به سمت راست جابه‌جا شده است که نشان‌دهنده افزایش بارش در این دو ایستگاه می‌باشد. در این دو ایستگاه احتمال وقوع دوره‌های خشک تغییر محسوسی نکرده است، اما احتمال وقوع بارش‌های شدید افزایش یافته است. در ایستگاه اهواز، خرم‌آباد و زاهدان، مقدار متوسط بارش تغییری نکرده است، اما افزایش انحراف معیار باعث جابه‌جایی تابع توزیع به سمت پایین شده است که در این شرایط احتمال وقوع پدیده‌های حدی افزایش یافته است. با توجه به افزایش احتمال وقوع بارش‌های سنگین در ایستگاه‌های خرم‌آباد، اهواز و شیراز که بارش آن‌ها تحت تأثیر سیستم کم‌فشار سودانی است (Raziei و همکاران، ۲۰۱۲)، می‌توان امکان تأثیر افزایش فعالیت این سیستم را بر تغییرات بارش ایستگاه‌های مورد توجه قرار داد. این مسئله در مورد جریان‌ات موسمی که جنوب شرق کشور (ایستگاه زاهدان) را تحت تأثیر قرار می‌دهد نیز صادق است. وقوع سیلاب‌های سال‌های ۱۳۹۸ و ۱۴۰۱ می‌تواند موید این مسئله باشد. دلیل تشدید فعالیت این سیستم‌ها می‌تواند عبور از روی آب‌های گرم‌تر به دلیل تغییر اقلیم باشد. این مسئله در ایستگاه بندرعباس برعکس بوده و با کاهش انحراف معیار، احتمال وقوع وقایع حدی کمتر شده است. با توجه به اینکه بندرعباس تحت تأثیر هر دو سیستم سودانی و موسمی قرار دارد، احتمالاً به دلیل دور بودن از این دو سیستم، شدت بارش‌ها در این ایستگاه کمتر می‌شود، اما احتمال وقوع بارش‌های متوسط در آن بیشتر است.

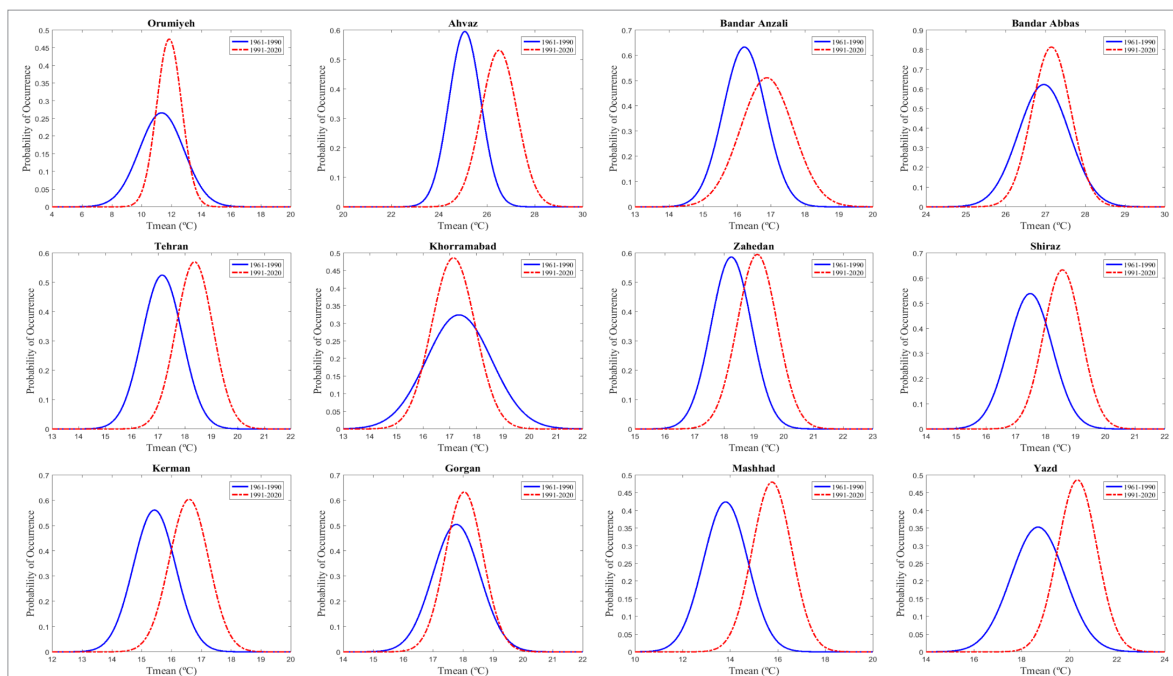
شکل (۴) نیز تغییرات تابع توزیع دمای متوسط را در دوره ۳۰ ساله اول نسبت به دوره ۳۰ ساله دوم نشان می‌دهد. در این شکل دیده می‌شود که در همه ایستگاه‌ها به غیر از خرم‌آباد، تابع توزیع به سمت راست متمایل شده است که نشان‌دهنده افزایش میانگین دما می‌باشد. در ایستگاه ارومیه دامنه دمای متوسط کاهش چشمگیری داشته است و همچنین احتمال وقوع تنش‌های گرمایی و سرمایگی کمتر شده است. چنین شرایطی در ایستگاه خرم‌آباد نیز مشاهده می‌شود. در ایستگاه‌های اهواز، بندرانزلی، تهران، زاهدان، شیراز، کرمان، مشهد و یزد احتمال وقوع دماهای بالاتر و تنش‌های گرمایی افزایش یافته و احتمال وقوع دماهای پایین‌تر کاهش یافته است. رفتار ایستگاه‌های بندرعباس و گرگان مشابه هم بوده و در هر دو احتمال وقوع دماهای پایین کمتر شده است، اما احتمال وقوع دماهای بالا تغییری نکرده است.

• تغییر در متوسط تعداد روزهای با بارش بیشتر از ۱۰ و ۵۰ میلی‌متر در سال

متوسط تعداد روزهای با بارش بیشتر از ۱۰ میلی‌متر در سال در همه ایستگاه‌ها به غیر از تهران، کرمان و یزد در دوره دوم نسبت به دوره اول کاهش یافته است (جدول ۴). با توجه به مقدار کم بارش در ایستگاه‌های خشک کشور، افزایش تعداد روزهای بارانی بیشتر از ۱۰ میلی‌متر نشان‌دهنده افزایش احتمال وقوع سیلاب در این شهرها است (Abbaspour و همکاران، ۲۰۰۹). در ایستگاه‌های بندرانزلی، خرم‌آباد، شیراز و گرگان متوسط تعداد روزهای با مقدار بارش بیش از ۵۰ میلی‌متر در سال افزایش یافته است که نشان‌دهنده افزایش احتمال تعداد روزهای سیلابی در این ایستگاه‌ها است.



شکل ۳- تغییر توزیع بارش سالانه در دوره ۱۹۹۱-۲۰۲۰ نسبت به دوره ۱۹۶۱-۱۹۹۰



شکل ۴- تغییر توزیع دمای متوسط سالانه در دوره ۱۹۹۱-۲۰۲۰ نسبت به دوره ۱۹۶۱-۱۹۹۰

کم‌باران‌تر می‌باشند (شکل ۵). جدول (۵) نیز نشان می‌دهد که الگوی منظمی برای تغییر مقدار بارش در ایستگاه‌ها و ماه‌های مختلف وجود ندارد. اما در اکثر ایستگاه‌ها بارش در ماه‌های پرباران (دسامبر، ژانویه و فوریه) و همچنین ماه می کاهش و در ماه‌های ژوئن تا نوامبر افزایش یافته است. البته باید توجه داشت که در ماه‌های گرم سال که مقدار بارش نسبت به ماه‌های سرد سال بسیار کمتر است، کمی تغییر در بارش می‌تواند درصد تغییرات بارش را به شدت افزایش دهد. افزایش بارش در ماه گرم سال به دلیل هم‌زمانی این ماه‌ها با فصل کشت و رشد گیاهان، در صورتی که سیلابی نبوده و با روش‌های آبخیزداری کنترل شود، می‌تواند اثر مثبتی بر تولیدات کشاورزی داشته باشد. کاهش بارش در ماه‌های ژانویه و فوریه به دلیل اثر آن در جریان رودخانه‌ها در بهار و کاهش تغذیه آب‌های زیرزمینی اهمیت می‌یابد.

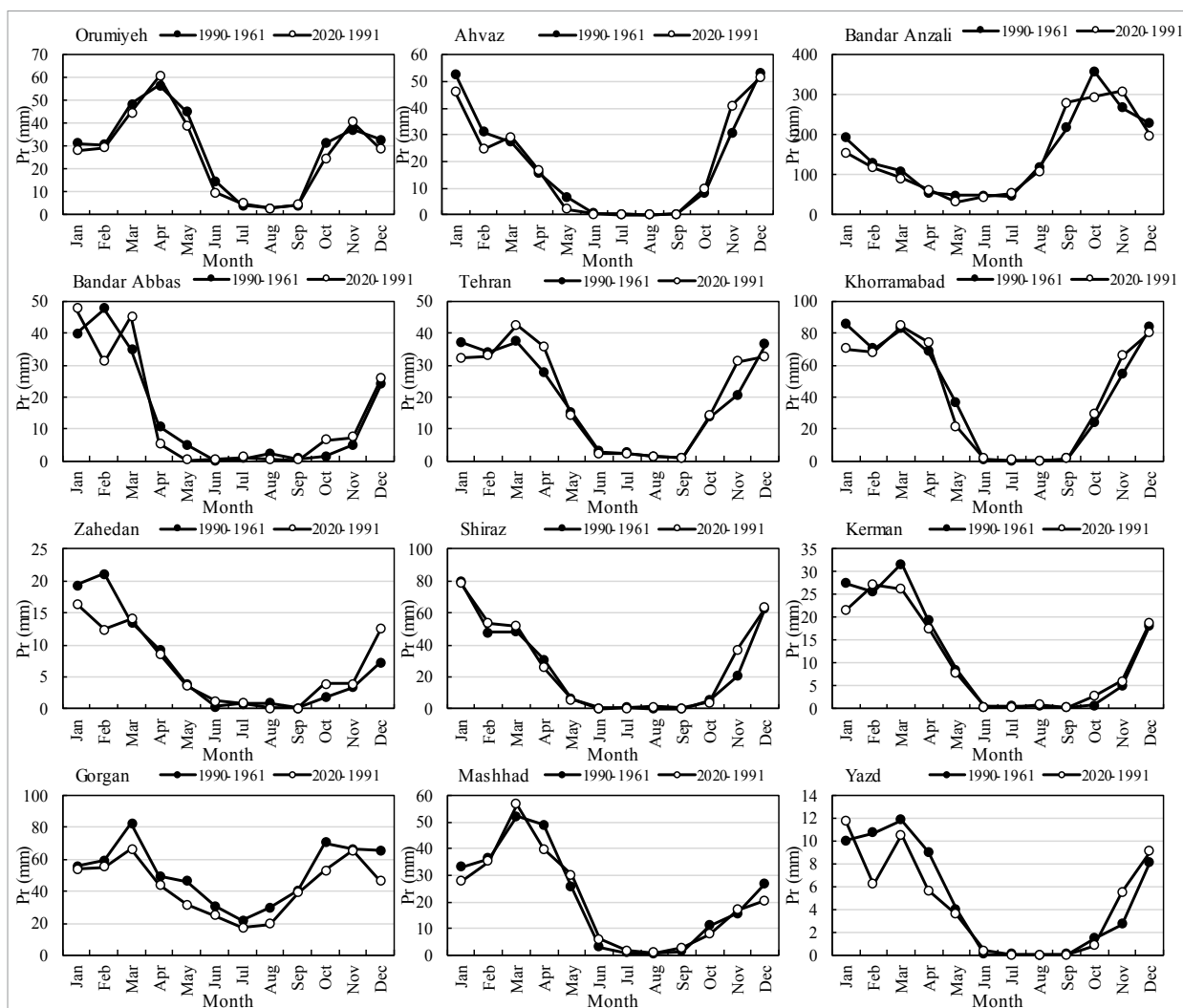
بر اساس شکل (۶) و جدول (۶) نیز تقریباً تمام ماه‌های سال افزایش دما داشته‌اند. شکل (۶) همچنین نشان می‌دهد که توزیع دما در طول سال تغییری نکرده است. در بین ایستگاه‌های مورد بررسی، افزایش دمای متوسط در مشهد مشهودتر از بقیه ایستگاه‌هاست که این تغییرات به خاطر افزایش قابل ملاحظه دمای حداقل در این ایستگاه است. این مسئله می‌تواند به دلیل وقوع جزیره حرارتی در شهر مشهد که بر دمای حداقل بیشتر از دمای حداقل اثر دارد، باشد (فرزندی و همکاران، ۱۳۹۹).

جدول ۴- تغییر در متوسط تعداد روزهای با بارش بیشتر از ۱۰ و ۵۰ میلی‌متر در سال در دوره ۱۹۹۱-۲۰۲۰ نسبت به دوره ۱۹۶۱-۱۹۹۰

ایستگاه	متوسط تعداد روزهای با بارش ≤ 10 میلی‌متر		متوسط تعداد روزهای با بارش ≤ 50 میلی‌متر	
	۱۹۹۱-۲۰۲۰	۱۹۶۱-۱۹۹۰	۱۹۹۱-۲۰۲۰	۱۹۶۱-۱۹۹۰
ارومیه	۱۰/۲	۹/۵	۰/۱	۰/۱
اهواز	۷/۶	۷/۲	۰/۳	۰/۳
بندر انزلی	۵۰/۲	۴۸/۰	۸	۸/۴
بندرعباس	۵	۵	۰/۵	۰/۴
تهران	۶/۸	۷/۲	۰	۰
خرم‌آباد	۱۶/۹	۱۶/۶	۰/۳	۰/۶
زاهدان	۲/۶	۲/۲	۰	۰
شیراز	۱۰/۹	۱۰/۵	۰/۴	۰/۵
کرمان	۳/۵	۳/۷	۰	۰
گرگان	۲۰/۳	۱۶/۰	۰/۳	۰/۶
مشهد	۷/۷	۷/۲	۰	۰
یزد	۱/۱	۱/۲	۰	۰

• تغییرات توزیع بارش و دمای ماهانه در طول سال

توزیع بارش در طول سال در دوره دوم نسبت به دوره اول تغییری نکرده و همچنین ماه‌های سرد سال پرباران و ماه‌های گرم سال

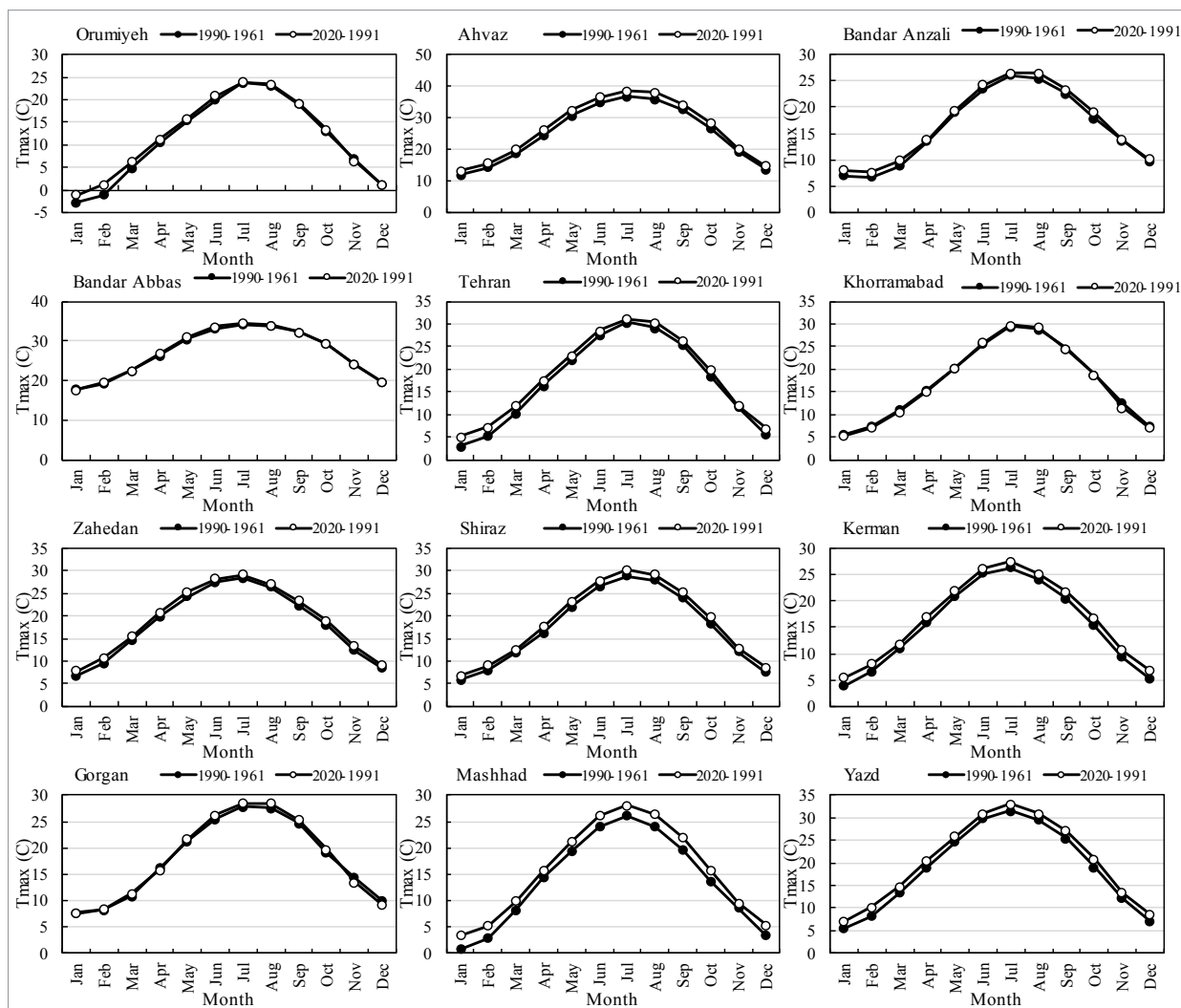


شکل ۵- تغییر مقدار و توزیع بارش ماهانه در دوره ۱۹۹۱-۲۰۲۰ نسبت به دوره ۱۹۶۱-۱۹۹۰

جدول ۵- درصد تغییرات بارش ماهانه در دوره ۱۹۹۱-۲۰۲۰ نسبت به دوره ۱۹۶۱-۱۹۹۰

ایستگاه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
ارومیه	-۹	-۵	-۸	۷	-۱۴	-۳۴	۲۴	۱	۱۳	-۲۲	۹	-۱۳
اهواز	-۱۳	-۲۰	۷	۷	-۶۷	-۷۷	-۱۰۰	-۱۰۰	۲۵	۱۹	۳۳	-۳
بندر انزلی	-۱۹	-۷	-۱۷	۱۲	-۳۴	-۹	۱۷	-۹	۲۹	-۱۸	۱۶	-۱۳
بندرعباس	۲۰	-۳۵	۳۰	-۴۹	-۹۶	۱۴۱۰	۸۲	-۸۴	-۶۱	۳۹۵	۴۹	۷
تهران	-۱۳	-۳	۱۴	۲۹	-۷	-۲۲	-۶	-۱	-۲	۳	۵۱	-۱۰
خرم آباد	-۱۸	-۴	۲	۹	-۴۱	۲۸۵	۳۰۰	-۲۳	۱۱	۲۴	۲۲	-۴
زاهدان	-۱۵	-۴۱	۵	-۷	-۶	۲۱۰	۲۰	-۸۳	-۳۵	۱۱۵	۱۴	۷۳
شیراز	-۱	۱۲	۷	-۱۶	-۱۰	۱۳۱	-۵۷	۹۵۴	5×10^4	-۲۴	۷۹	۰/۳
کرمان	-۲۲	۶	-۱۷	-۹	-۸	۱۰	-۴۲	۴۵	۱۷	۲۸۶	۲۰	۳
گرگان	-۳	-۷	-۲۰	-۱۱	-۳۱	-۱۹	-۱۹	-۳۴	-۳	-۲۵	-۱	-۲۹
مشهد	-۱۶	-۳	۹	-۱۹	۱۸	۹۸	۷۹	۲۴	۸۱	-۳۰	۸	-۲۴
یزد	۱۷	-۴۲	-۱۱	-۳۸	-۱۰	۳۱۱	-۴۶	-۱۰۰	-۱۰۰	-۴۰	۱۰۱	۱۱

* بارش در ماه سپتامبر در شیراز در دوره اول صفر بوده است. برای اینکه مخرج کسر صفر نباشد، مقدار $0/0000001$ به جای صفر در نظر گرفته شد. بنابراین برای درصد افزایش بارش عدد بزرگی به دست آمد.



شکل ۶- تغییر مقدار و توزیع دمای متوسط ماهانه در دوره ۱۹۹۱-۲۰۲۰ نسبت به دوره ۱۹۶۱-۱۹۹۰

جدول ۶- درصد تغییرات دمای متوسط ماهانه در دوره ۱۹۹۱-۲۰۲۰ نسبت به دوره ۱۹۶۱-۱۹۹۰

ایستگاه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
ارومیه	۶۱	۲۱۹	۲۷	۷	۳	۵	۱	۲	۰/۵	۴	-۵	۰/۳
اهواز	۱۱	۹	۷	۷	۶	۵	۵	۶	۵	۶	۴	۹
بندر انزلی	۱۳	۱۴	۱۳	۲	۲	۳	۲	۴	۳	۶	۰/۳	۳
بندرعباس	-۱	۲	-۰/۵	۳	۲	۱	۱	۰/۲	۰/۲	۰/۴	۰	۱
تهران	۶۷	۳۷	۱۶	۷	۵	۴	۳	۴	۴	۷	۳	۲۳
خرم آباد	-۵	-۴	-۴	-۲	-۰/۱	۱	۱	۱	-۰/۴	۱	-۹	-۵
زاهدان	۱۶	۱۳	۵	۵	۵	۳	۲	۲	۴	۵	۸	۷
شیراز	۱۵	۱۴	۶	۹	۶	۴	۵	۴	۵	۷	۶	۱۴
کرمان	۳۸	۲۱	۷	۷	۵	۴	۵	۴	۷	۱۰	۱۵	۳۰
گرگان	۱	۳	۶	-۲	۱	۳	۲	۴	۳	۳	-۶	-۸
مشهد	۳۳۲	۸۵	۲۱	۹	۹	۹	۸	۱۰	۱۲	۱۵	۱۱	۵۴
یزد	۲۹	۲۵	۱۱	۸	۵	۴	۵	۵	۶	۱۰	۱۰	۲۲

نتیجه‌گیری

در این پژوهش روند تغییرات میانگین و توزیع بارش و دمای متوسط در دو دوره ۳۰ ساله گذشته (۱۹۶۱-۱۹۹۰ و ۲۰۲۰-۱۹۹۱) در ۱۲ ایستگاه منتخب بررسی و مقایسه شد. بر اساس نتایج حاصل اگرچه روند بارش در دوره ۳۰ ساله دوم کاهشی شده است، اما این روند از نظر آماری معنی‌دار نبوده است. این مسئله نشان می‌دهد که بیشتر تغییرات رخ داده در بارش از نوع نوسانات کوتاه مدت آب و هوایی است. اما تغییرات دمای متوسط نشان می‌دهد که در هر دو دوره ۳۰ ساله به طور معنی‌داری روند این متغیر افزایشی و سطح معنی‌داری این افزایش در دوره دوم بالاتر از دوره اول است. توزیع بارش ماهانه در طول سال در این ایستگاه‌ها تغییری نکرده است، اما مقدار بارش در ماه‌های ژانویه و فوریه بیشترین کاهش را نشان داده است. بر اساس نتایج به دست آمده برای توزیع بارش و دمای سالانه در هر دو دوره، به نظر می‌رسد که برخی از جریان‌های هوایی موثر بر آب و هوای ایران از جمله کم فشار سودانی و جریان‌های موسمی تشدید شده که می‌تواند دلیل افزایش وقوع بارش‌های سنگین در مناطق تحت تأثیر از جمله اهواز، خرم‌آباد و شیراز باشد. در برخی ایستگاه‌ها در غرب و شمال کشور متوسط بارش کاهش یافته و احتمال وقوع خشکسالی‌ها بیشتر شده است که این مسئله می‌تواند به دلیل کاهش بارش توده هوای مدیترانه‌ای، که در زمستان بادهای غربی را به همراه دارد و بخش اعظمی از بارش ایران را تأمین می‌کند، باشد.

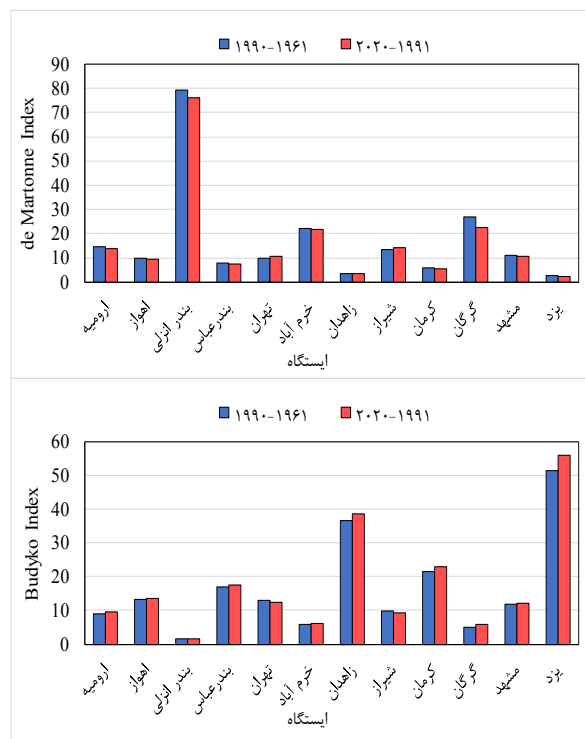
باید توجه داشت که بر اساس پیش‌بینی مدل‌های اقلیمی شرایط به وقوع پیوسته در این دوره ۶۰ ساله می‌تواند در اقلیم آینده نیز ادامه داشته باشد. بنابراین تصمیم‌گیران و سیاست‌گذاران باید برای سازگاری با شرایط اقلیمی آینده راهکارهای بلندمدت، منطقی و قابل انجام را برنامه‌ریزی کنند تا بتوانند از منابع آب در دسترس بهترین استفاده را در جهت رفع نیازهای جمعیت رو به رشد داشته باشند. این مسئله نیازمند داشتن درک کاملی از تغییرات احتمالی، منابع موجود و وضعیت آن‌ها و شناخت صحیح ظرفیت‌های موجود در شرایط فعلی و آینده برای سازگاری با تغییر اقلیم است.

پی‌نوشت

- 1- Shortage
- 2- Scarcity

• تغییرات شاخص خشکی

به طور کلی، بخش زیادی از کشور ایران دچار کمبود^۱ و یا کمبایی^۲ آب است (میان‌آبادی و داوری، ۱۳۹۹). تغییرات اقلیمی رخ داده در کشور می‌تواند میزان آب در دسترس را دچار تغییر کند. کاهش بارش و افزایش دما می‌تواند شرایط خشکی بیشتری را بر اقلیم کشور تحمیل کند. شکل (۷) تغییرات دو شاخص خشکی دومارتن و بادیکو را در ایستگاه‌های مورد بررسی در دو دوره ۳۰ ساله نشان می‌دهد. با توجه به ویژگی شاخص دومارتن، افزایش مقدار عددی آن به معنی کاهش شرایط خشکی می‌باشد. بنابراین کاهش مقدار شاخص در همه ایستگاه‌ها به جز ایستگاه تهران و شیراز نشان‌دهنده افزایش خشکی است. این مسئله در مورد شاخص بادیکو برعکس است. یعنی با افزایش مقدار شاخص، خشکی ایستگاه افزایش می‌یابد. بر اساس این شاخص نیز همه ایستگاه‌ها به جز ایستگاه تهران و شیراز افزایش خشکی را داشته‌اند. کاهش خشکی در دو ایستگاه شیراز و تهران که با افزایش بارش روبه‌رو بوده‌اند نشان می‌دهد که متغیر بارش در مقایسه با دما و تبخیر-تعرق پتانسیل، اثر بیشتری بر درجه خشکی یک منطقه دارد.



شکل ۷- تغییر در میزان خشکی ایستگاه‌ها در دوره ۲۰۲۰-۱۹۹۱ نسبت به دوره ۱۹۹۰-۱۹۶۱ (بنا بر تعریف، با افزایش شاخص خشکی بادیکو، میزان خشکی افزایش و با افزایش شاخص دومارتن، میزان خشکی کاهش می‌یابد)

- فرزندی، محبوبه، رضایی پژند، حجت، و میرکماندار، بهاره. (۱۳۹۹)، تحلیل جزیره گرمایی و بررسی روند غیرخطی تغییرات دمای ۱۳۰ ساله مشهد. *هواشناسی و علوم جو*، ۳(۴)، ۳۷۵-۳۸۹. doi: 10.22034/JMAS.2021.296910.1148
- کامیابی، سعید، و عبدی، کامیل. (۱۳۹۹). آشکارسازی و تحلیل روند تغییر اقلیم (بارش و دما) در محدوده ساری. علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۲۲(۷)، ۱۶۵-۱۷۹. doi: 10.22034/JEST.2019.43898.4642
- میان‌آبادی، آمنه، و داوری، کامران. (۱۳۹۹). ابهام‌زدایی از مفاهیم پایه در حوزه مدیریت آب: «سازگاری با کم‌آبی». آب و توسعه پایدار، ۷(۱)، ۶۱-۷۰. doi: 10.22067/JWSD.V7I1.81441
- ناصرزاده، محمدحسین، دوستکامیان، مهدی، بیرانوند، آذر، قهرمانی، فاطمه، و بیات، علی. (۱۳۹۱). توزیع فضایی روند تغییرات فصلی و سالانه دما و بارش (مطالعه موردی: استان خوزستان). اندیشه جغرافیایی، ۶(۱۱)، ۳۱-۴۷.
- Abbaspour, K. C., Faramarzi, M., Ghasemi, S. S., & Yang, H. (2009). Assessing the impact of climate change on water resources in Iran. *Water Resources Research*, 45(10), W10434. <https://doi.org/10.1029/2008WR007615>
- Afshar, N. R., & Fahmi, H. (2019). Impact of climate change on water resources in Iran. *International Journal of Energy and Water Resources*, 3(1), 55-60. <https://doi.org/10.1007/s42108-019-00013-z>
- Almazroui, M., Ashfaq, M., Islam, M. N., Rashid, I. U., Kamil, S., Abid, M. A., O'Brien, E., Ismail, M., Reboita, M. S., Sörensson, A. A., Arias, P. A., Alves, L. M., Tippet, M. K., Saeed, S., Haarsma, R., Doblas-Reyes, F. J., Saeed, F., Kucharski, F., Nadeem, I., ... Sylla, M. B. (2021). Assessment of CMIP6 Performance and Projected Temperature and Precipitation Changes Over South America. *Earth Systems and Environment*, 5(2), 155-183. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00233-6>
- Andrade, C. W. L., Montenegro, S. M. G. L., Montenegro, A. A. A., Lima, J. R. de S., Srinivasan, R., & Jones, C. A. (2021). Climate change impact assessment on water resources under RCP scenarios: A case study in Mundaú River Basin, Northeastern Brazil. *International Journal of Climatology*, 41(S1), E1045-E1061. <https://doi.org/10.1002/joc.6751>
- Azadi, F., Ashofteh, P.-S., Shokri, A., & Loáiciga, H. A. (2021). Simulation-Optimization of Reservoir Wa-
- اسدی، اشرف، و حیدری، علی. (۱۳۹۰). تحلیل تغییرات سری‌های دما و بارش شیراز طی دوره ۱۹۵۱-۲۰۰۵. جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۲۲(۴۱)، ۱۳۷-۱۵۲. doi: 20.1001.1.20.085362.1390.22.1.10.1
- بهزادی، فرهاد، جوادی، سامان، یوسفی، حسین، مریدی، علی، و هاشمی‌شاهدانی، سیدمهدی. (۱۴۰۱). تعیین تأثیر تغییر اقلیم بر خشکسالی آب زیرزمینی با استفاده از برون‌داد مدل‌های CMIP۶ (مطالعه موردی: دشت شهرکرد). *اکوهیدرولوژی*، ۹(۲)، ۴۳۶-۴۱۹. doi: 10.22059/IJE.2022.342077.1633
- حجازی زاده، زهرا، و پروین، نادر. (۱۳۸۸). بررسی تغییرات دما و بارش تهران طی نیم قرن اخیر. جغرافیا و برنامه‌ریزی منطقه‌ای، پیش شماره پاییز و زمستان ۱۳۸۸، ۴۳-۵۶.
- رئیزی نافچی، عاطفه، و سلطانی محمدی، امیر. (۱۳۹۵). بررسی تغییرات زمانی بارندگی و میانگین، حداقل و حداکثر دما (مطالعه موردی: ایستگاه شهرکرد). *نیوار*، ۹۴-۹۵، ۶۹-۸۰. doi: 10.30467/nivar.2016.42661
- زرین، آذر، و داداشی رودباری، عباسعلی. (۱۴۰۰). پیش‌نگری همادی نمایه‌های خشکسالی در ایران مبتنی بر برون‌داد چند مدلی CMIP۵. پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۲(۷)، ۸۲-۷۱. doi: 10.30488/CCR.2021.317280.1058
- زرین، آذر، و داداشی رودباری، عباسعلی. (ب. ۱۴۰۰). پیش‌نگری دمای ایران در آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۰) بر اساس رویکرد همادی چند مدلی CMIP۶. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۳(۱)، ۷۵-۹۰. doi: 10.22059/JPGR.2021.308361.1007551
- زرین، آذر، داداشی رودباری، عباسعلی، و صالح‌آبادی، نرگس. (۱۴۰۰). بررسی بی‌هنجاری و روند دمای ایران در پهنه‌های مختلف اقلیمی با استفاده از مدل‌های جفت شده پروژه مقایسه متقابل مرحله ششم (CMIP۶). ژئوفیزیک ایران، ۱۵(۱)، ۳۵-۵۴. doi: 10.30499/IJG.2020.249997.1292
- سرابی، مجتبی، دستورانی، محمدتقی، و زرین، آذر. (۱۳۹۹). بررسی تأثیرات تغییرات اقلیمی آینده بر وضعیت دما و بارش (مطالعه موردی: حوضه آبخیز سد طرق مشهد). *هواشناسی و علوم جو*، ۳(۱)، ۶۳-۸۳. doi: 10.22034/JMAS.2021.278862.1129
- سرابی، مجتبی، دستورانی، محمدتقی، و زرین، آذر. (ب. ۱۳۹۹). اثر تغییر اقلیم آینده بر پاسخ هیدرولوژیک در حوضه آبخیز سد طرق مشهد. *هواشناسی و علوم جو*، ۳(۴)، ۳۳۰-۳۱۰. doi: 10.22034/JMAS.2021.297763.1149
- عساکره، حسین. (۱۳۸۶). تغییرات زمانی-مکانی بارش ایران زمین طی دهه‌های اخیر. جغرافیا و توسعه، ۵(۱۰)، ۱۴۵-۱۶۴. doi: 10.22111/GDIJ.2007.3669

- 395–412). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-78566-6_19
- Hargreaves, G., & Samani, Z. (1982). Estimating potential evapotranspiration. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 108(3), 225–230.
- Hong, J., Javan, K., & Shin, Y. (2021). Future Projections and Uncertainty Assessment of Precipitation Extremes in Iran from the CMIP6 Ensemble. *Atmosphere*, 12(8), 1052. 1–16. <https://doi.org/10.3390/atmos12081052>
- IPCC. (2001). *Climate Change 2001, The Scientific Basis*. In Ipcc.
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment*. Cambridge University Press: Cambridge.
- Jahn, M. (2015). Economics of extreme weather events: Terminology and regional impact models. *Weather and Climate Extremes*, 10, 29–39. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.08.005>
- Karimi, V., Karami, E., & Keshavarz, M. (2018). Climate change and agriculture: Impacts and adaptive responses in Iran. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(1), 1–15. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61794-5](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61794-5)
- Kendall, M. G. (1975). *Rank Correlation Methods*. 4th Edition, Charles Griffin, London, UK.
- Kogo, B. K., Kumar, L., & Koech, R. (2021). Climate change and variability in Kenya: a review of impacts on agriculture and food security. *Environment, Development and Sustainability*, 23(1), 23–43. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00589-1>
- Konapala, G., Mishra, A. K., Wada, Y., & Mann, M. E. (2020). Climate change will affect global water availability through compounding changes in seasonal precipitation and evaporation. *Nature Communications*, 11(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16757-w>
- Kousari, M. R., Ekhtesasi, M. R., Tazeh, M., Naeini, M. A. S., & Zarch, M. A. A. (2011). An investigation of the Iranian climatic changes by considering the precipitation, temperature, and relative humidity parameters. *Theoretical and Applied Climatology*, 103(3–4), 321–335. <https://doi.org/10.1007/s00704-010-0304-9>
- Kundzewicz, Z. W., & Gerten, D. (2015). Grand Challenge: Water Quality under Climate Change. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 147(9), 1463. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001436](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001436)
- Bari Abarghouei, H., Asadi Zarch, M. A., Dastorani, M. T., Kousari, M. R., & Safari Zarch, M. (2011). The survey of climatic drought trend in Iran. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 25(6), 851–863. <https://doi.org/10.1007/s00477-011-0491-7>
- Budyko, M. I. (1974). *Climate and life*. Vol. xvii. Academic Press. New York, USA. 508 pp
- Burroughs, W. (2003). *Climate: Into the 21st Century*. First Edition. Cambridge University Press. Cambridge, UK. 240 pp.
- Bustos Usta, D. F., Teymouri, M., Chatterjee, U., & Bandyopadhyay, N. (2022). Projections of atmospheric changes over Iran in 2014–2050 using the CMIP6-HighResMIP experiment. *Arabian Journal of Geosciences*, 15, 1335. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10639-9>
- Challinor, A. J., Watson, J., Lobell, D. B., Howden, S. M., Smith, D. R., & Chhetri, N. (2014). A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. *Nature Climate Change*, 4(4), 287–291. <https://doi.org/10.1038/nclimate2153>
- de Martonne, E. (1925). *Traité de Géographie Physique*. 3 tomes. Fourth Edition. Librairie Armand Colin. Paris, France.
- Evans, J. P. (2009). 21st century climate change in the Middle East. *Climatic Change*, 92(3–4), 417–432. <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9438-5>
- Fazel-Rastgar, F. (2021). Synopsis of the dramatic climate change in Iran: a seasonal synoptic analysis. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(9), 1–31. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07154-8>
- Ghazi, B., Jelihouni, E., & Kalantari, Z. (2021). Predicting groundwater level fluctuations under climate change scenarios for Tasuj plain, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(2), 115. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06508-6>
- Halwani, J., & Halwani, B. (2022). Climate Change in Lebanon and the Impact to Water Resources. In W. Leal Filho & E. Manolas (Eds.), *Climate Change in the Mediterranean and Middle Eastern Region* (pp.

- of major climatic variables over Iran: 1966–2015. Theoretical and Applied Climatology, 135(1–2), 677–691. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2410-z>
- Mukhopadhyay, R., Sarkar, B., Jat, H. S., Sharma, P. C., & Bolan, N. S. (2021). Soil salinity under climate change: Challenges for sustainable agriculture and food security. Journal of Environmental Management, 280, 111736. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111736>
- Naderi, M., & Raeisi, E. (2016). Climate change in a region with altitude differences and with precipitation from various sources, South-Central Iran. Theoretical and Applied Climatology, 124(3–4), 529–540. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1433-y>
- Nassiri, M., Koocheki, A., Kamali, G. A., & Shahandeh, H. (2006). Potential impact of climate change on rainfed wheat production in Iran. Archives of Agronomy and Soil Science, 52(1), 113–124. <https://doi.org/10.1080/03650340600560053>
- Newton, B. W., Farjad, B., & Orwin, J. F. (2021). Spatial and Temporal Shifts in Historic and Future Temperature and Precipitation Patterns Related to Snow Accumulation and Melt REgimes in Alberta, Canada. Environmental Research Letter, 13, 1013. <https://doi.org/10.3390/w13081013>
- Ongoma, V., Chena, H., & Gaoa, C. (2018). Projected changes in mean rainfall and temperature over east Africa based on CMIP5 models. International Journal of Climatology, 38(3), 1375–1392. <https://doi.org/10.1002/joc.5252>
- Ostad-Ali-Askar, K., Su, R., & Liu, L. (2018). Water resources and climate change. Journal of Water and Climate Change, 9(2), 239–239. <https://doi.org/10.2166/wcc.2018.999>
- Prakash, S. (2021). Impact of climate change on aquatic ecosystem and its biodiversity: an overview. International Journal Biological Innovations, 3(2), 312–317. <https://doi.org/10.46505/IJBI.2021.3210>
- Raziei, T., Mofidi, A., Santos, J. A., & Bordi, I. (2012). Spatial patterns and regimes of daily precipitation in Iran in relation to large-scale atmospheric circulation. International Journal of Climatology, 32(8), 1226–1237. <https://doi.org/10.1002/joc.2347>
- es Related to the Assessment of Climate Change Impacts on Freshwater Resources. Journal of Hydrologic Engineering, 20(1), 1012. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001012](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001012)
- Li, C., & Fang, H. (2021). Assessment of climate change impacts on the streamflow for the Mun River in the Mekong Basin, Southeast Asia: Using SWAT model. CATENA, 201, 105199. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105199>
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric Tests Against Trend. Econometrica, 13(3), 245–259. <https://www.jstor.org/stable/1907187>
- Mengistu, D., Bewket, W., Dosio, A., & Panitz, H.-J. (2021). Climate change impacts on water resources in the Upper Blue Nile (Abay) River Basin, Ethiopia. Journal of Hydrology, 592, 125614. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125614>
- Mianabadi, A., Davary, K., Kolahi, M., & Fisher, J. (2022). Water/climate nexus environmental rural-urban migration and coping strategies. Journal of Environmental Planning and Management, 65(5), 852–876. <https://doi.org/10.1080/09640568.2021.1915259>
- Mianabadi, A., Davary, K., Mianabadi, H., Kolahi, M., & Mostert, E. (2023). Toward the development of a conceptual framework for the complex interaction between environmental changes and rural-urban migration. Frontiers in Water, 5, 1–13. <https://doi.org/10.3389/frwa.2023.1142307>
- Mianabadi, A., Derakhshan, H., Davary, K., Hasheminia, S. M., & Hrachowitz, M. (2020). A Novel Idea for Groundwater Resource Management during Megadrought Events. Water Resources Management, 34(5), 1743–1755. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02525-4>
- Mianabadi, A., Hasheminia, S. M., Davary, K., Derakhshan, H., & Hrachowitz, M. (2021). Estimating the Aquifer's Renewable Water to Mitigate the Challenges of Upcoming Megadrought Events. Water Resources Management, 35(14), 4927–4942. <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02980-7>
- Mianabadi, A., Shirazi, P., Ghahraman, B., Coenders-Gerrits, A. M. J., Alizadeh, A., & Davary, K. (2019). Assessment of short- and long-term memory in trends

- to the record- breaking precipitation and temperature event of summer 2020 in southern China. *Environmental Research Letters*, 16, 044058. doi: [10.1088/1748-9326/abceaf](https://doi.org/10.1088/1748-9326/abceaf)
- Yu, Y., Pi, Y., Yu, X., Ta, Z., Sun, L., Disse, M., Zeng, F., Li, Y., Chen, X., & Yu, R. (2019). Climate change, water resources and sustainable development in the arid and semi-arid lands of Central Asia in the past 30 years. *Journal of Arid Land*, 11(1), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s40333-018-0073-3>
- Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2021). Projection of future extreme precipitation in Iran based on CMIP6 multi-model ensemble. *Theoretical and Applied Climatology*, 144(1–2), 643–660. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03568-2>
- Zarrin, A., Dadashi-Roudbari, A., & Hassani, S. (2022). Future Changes in Precipitation Extremes Over Iran: Insight from a CMIP6 Bias-Corrected Multi-Model Ensemble. *Pure and Applied Geophysics*, 179, 441–464. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02904-x>
- Zhan, W., He, X., Sheffield, J., & Wood, E. F. (2020). Projected Seasonal Changes in Large-Scale Global Precipitation and Temperature Extremes Based on the CMIP5 Ensemble. *Journal of Climate*, 33(13), 5651–5671. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-19-0311.1>
- Zou, S., Abuduwaali, J., Duan, W., & Ding, J. (2021). Attribution of changes in the trend and temporal non-uniformity of extreme precipitation events in Central Asia. *Scientific Reports*, 0123456789, 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94486-w>
- Saeed, F. H., Al-Khafaji, M. S., & Al-Faraj, F. A. M. (2021). Sensitivity of Irrigation Water Requirement to Climate Change in Arid and Semi-Arid Regions towards Sustainable Management of Water Resources. *Sustainability*, 13(24), 13608. <https://doi.org/10.3390/su132413608>
- Schilling, J., Hertig, E., Trambly, Y., & Scheffran, J. (2020). Climate change vulnerability, water resources and social implications in North Africa. *Regional Environmental Change*, 20, 15. <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01597-7>
- Seddon, A. W. R., Macias-Fauria, M., Long, P. R., Benz, D., & Willis, K. J. (2016). Sensitivity of global terrestrial ecosystems to climate variability. *Nature*, 531(7593), 229–232. <https://doi.org/10.1038/nature16986>
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63, 13799–1389. <https://doi.org/10.2307/2285891>
- Usman, M., Ndehedehe, C. E., Farah, H., & Manzanar, R. (2021). Impacts of climate change on the streamflow of a large river basin in the Australian tropics using optimally selected climate model outputs. *Journal of Cleaner Production*, 315, 128091. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128091>
- Verma, A. K. (2021). Influence of climate change on balanced ecosystem, biodiversity and sustainable development: an overview. *International Journal of Biological Innovations*, 3(2), 331–337. <https://doi.org/10.46505/IJBI.2021.3213>
- Wang, Y.-J., & Qin, D.-H. (2017). Influence of climate change and human activity on water resources in arid region of Northwest China: An overview. *Advances in Climate Change Research*, 8(4), 268–278. <https://doi.org/10.1016/j.accres.2017.08.004>
- Yazdani, M. hasan, Amininia, K., Safarianzengir, V., Soltani, N., & Parhizkar, H. (2021). Analyzing climate change and its effects on drought and water scarcity (case study: Ardabil, Northwestern Province of Iran, Iran). *Sustainable Water Resources Management*, 7(2), 16. <https://doi.org/10.1007/s40899-021-00494-z>
- Ye, Y., & Qian, C. (2021). Conditional attribution of climate change and atmospheric circulation contributing

Introduction of Life Cycle Techniques in Evaluating Water Distribution Systems

M. Jafari¹, J. Soltani^{2*}, S. M. Hashemy Shahdany²,
M. J. Monem³

1, 2- MSc Student and Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology (Aburaihan), University of Tehran, Tehran, Iran. 3- Professor, Department of Water Engineering and Management, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

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

Received: 22-01-2023

Revised: 14-03-2023

Accepted: 14-03-2023

Available Online: 21-09-2023

معرفی کاربردهای تکنیک چرخه عمر در ارزیابی سامانه‌های توزیع آب

مینو جعفری^۱، جابر سلطانی^{۲*}، سیدمهدی هاشمی شاهدانی^۲،
محمد جواد منعم^۳

۱، ۲- به‌ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آب - سازه‌های آبی و دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی (ابوریحان)، دانشگاه تهران، تهران، ایران. ۳- استاد گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

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

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۲۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۶/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۳

Abstract

Our generation is facing the daunting challenges of climate change and growing pressure on the environment; Challenges caused by human activities. Considering these environmental conditions and their relationship with social and economic challenges, to achieve the United Nations sustainable development goals, comprehensive and strong tools are required to make decisions to identify the solutions supporting sustainable development in the best way. Decisions should have a systematic perspective, and consider the life cycle and all its related impacts. Life cycle assessment (LCA) is a tool possessing these characteristics. In this study, the life cycle assessment method is introduced first and then, several applications of this method in water distribution systems are examined using some articles. The review of previous studies showed that replacing the gravity transfer of water by pumping can reduce greenhouse gas emissions by 64-81%. Also, choosing the right type and diameter for the pipes of the water distribution network - which will reduce leakage from the network - will increase the life of the network and save up to 75% of costs. Finally, recycling the network after its useful life has significant positive environmental effects and can reduce the potential of human poisoning and pollution of natural resources by 60-88%.

Keywords: Life Cycle, LCA, Water Distribution Systems, Sustainable Development.

چکیده

نسل ما با چالش‌های دلهره‌آوری که تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی ایجاد شده مانند تغییر شرایط جوی و فشار رو به افزایش بر محیط‌زیست روبه‌رو است. با تأمل بر این شرایط محیط‌زیستی و ارتباط آن‌ها با چالش‌های اجتماعی و اقتصادی، برای رسیدن به هدف توسعه پایدار سازمان ملل، به ابزارهای جامع و قوی برای کمک به تصمیم‌گیری برای شناسایی راه‌حل‌هایی که به بهترین شکل از توسعه پایدار پشتیبانی می‌کنند، نیاز است. تصمیمات باید یک چشم‌انداز سیستمی داشته باشند و چرخه عمر و کلیه تأثیرات مربوط به آن را در نظر بگیرند. ارزیابی چرخه عمر (LCA) ابزاری است که این خصوصیات را دارد. در این مطالعه، ابتدا روش‌شناسی ارزیابی چرخه عمر معرفی و سپس با مرور مقالات، چند کاربرد این روش در سامانه‌های توزیع آب بررسی می‌شود. بررسی پژوهش‌های پیشین نشان داد جایگزینی انتقال ثقلی آب با پمپاژ کردن آن، می‌تواند ۶۴ تا ۸۱ درصد باعث کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای شود. همچنین انتخاب جنس و قطر مناسب برای لوله‌های شبکه توزیع آب که کاهش نشت از شبکه را در پی خواهد داشت، موجب افزایش طول عمر شبکه و تا ۷۵ درصد صرفه‌جویی در هزینه‌ها خواهد شد. در نهایت بازیافت شبکه پس از عمر مفید، اثرات محیط‌زیستی مثبت قابل توجهی دارد و می‌تواند پتانسیل مسمومیت انسان و آلودگی منابع طبیعی را ۶۰ تا ۸۸ درصد کاهش دهد. **واژه‌های کلیدی:** چرخه عمر، LCA، سامانه‌های توزیع آب، توسعه پایدار.

ارزیابی چرخه حیات به عنوان یک ابزار ارزیابی برای تحلیل و بررسی ملاحظات محیط زیستی محصولات و خدمات مطرح شد که می تواند در روند فرایندهای تصمیم گیری برای توسعه پایدار دخیل باشد. این روش دارای دو وجه متمایز نسبت به سایر ابزارهای ارزیابی محیط زیستی است:

• همه مراحل حیات یک محصول (از گهواره تا گور)، کالا یا خدمت، از استخراج منابع تا فرایند ساخت و پردازش، توزیع و حمل و نقل، مصرف تا بازیافت و دفع، با توجه به تمام جریانهای مواد و انرژی مرتبط ارزیابی می شود.

• همه پیامدهای محیط زیستی مرتبط، هم ورودیها (استفاده از منابع) و هم خروجیها (انتشارات به هوا، آب و خاک) بررسی و محاسبه می شوند (میرابی و همکاران، ۱۳۹۶).

به همین دلیل به کارگیری روشهای علمی ارزیابی محیط زیستی اثرات می تواند اطمینان کافی از رعایت سیاستها و اهداف تعیین شده در طرحها و فعالیتها را در جهت تامین ضوابط، معیارها و قوانین، فراهم آورد (پناهنده و همکاران، ۱۳۹۳).

از زمان پیدایش روش ارزیابی چرخه عمر تاکنون مطالعات بسیاری جهت ارزیابی و بررسی اثرات محیط زیستی مرتبط با زمینههای مختلف از جمله محصولات کشاورزی، لبنی، صنایع پتروشیمی، فولاد و سیماسازی و صنایع چوب و کاغذ صورت گرفته است.

Baumman و Tillman (۲۰۰۴) ارزیابی چرخه عمر را یکی از روشهای قابل اعتماد برای تجزیه و تحلیل اثرات محیط زیستی در طول چرخه عمر یک محصول و بخشی از فرایند تصمیم گیری برای حرکت به سمت محصولات سازگار با محیط زیست عنوان نمودند. Curran و Klöpffer (۲۰۱۴) ارزیابی چرخه عمر را ابزار علمی-مقایسه ای سامانه های تولید معرفی کرده و اظهار داشت از روش ارزیابی چرخه عمر می توان اثرات محیط زیستی بالقوه یک محصول را محاسبه و میزان تفاوت در اثرات در نتیجه اعمال تغییرات مانند تغییر در مواد اولیه یا مراحل و نحوه ساخت و یا طراحی محصول را بررسی کرد.

به طور کلی، ارزیابی چرخه عمر، تعدادی ویژگی تعیین کننده دارد که آن را قادر می سازد به سؤالاتی بپردازد که هیچ ابزار ارزیابی دیگری قادر به پرداختن به آنها نیست. به منظور درک بهتر، مراحل ارزیابی چرخه عمر در شکل (۱) ارائه شده است. برای بررسی اثرات محیط زیستی محصولات یا خدمات در قالب روش ارزیابی چرخه عمر، ابتدا لازم است مراحل استفاده از این روش در چارچوب استانداردهای بین المللی مورد توجه قرار گیرد. چارچوب ارزیابی چرخه عمر مطابق استاندارد جهانی شامل گامهای زیر است:

- ۱- تعریف هدف و دامنه کاربرد
- ۲- تجزیه و تحلیل موجودیها (سیاهه چرخه عمر)^۲
- ۳- ارزیابی اثرات چرخه عمر^۳
- ۴- تفسیر نتایج

با گذر از دوران نادیده گرفتن محیط زیست و توسعه بر مبنای بهره برداری بیش از حد و رشد اقتصادی، دوران تلاش در جهت توسعه با در نظر گرفتن شاخصهای محیط زیستی و "توسعه پایدار" فراسیده است. یک توسعه در صورتی پایدار خواهد بود که علاوه بر ملاحظات فنی، اجتماعی و اقتصادی، عدم تخریب سرزمینی که قرار است با بهره برداری از منابع آن بارور شود را نیز لحاظ نماید (مرادی و همکاران، ۱۳۸۹).

در سالهای اخیر مشکلاتی نظیر گرم شدن زمین، نابودی اکوسیستمها و کاهش منابع، بشر را به چاره اندیشی واداشته است. تلاش برای استفاده از تکنولوژیهای سبز و تولید محصولات دوستدار محیط زیست از جمله اقداماتی است که برای بهبود این مسائل صورت می پذیرد و بر این اساس تلاشها در جهت کاهش آثار سوء بر محیط زیست می باشد. آلودگیهایی که یک محصول به محیط زیست وارد می کند فقط مربوط به مرحله استفاده از آن نیست بلکه سهم قابل توجهی از انتشار آلاینده ها در اکثر محصولات مربوط به مراحل تولید، حمل و نقل و یا دفع آنها است (Guinée و همکاران، ۲۰۱۱).

در حوزه آب، شناسایی و پایش اثرات اجرا و بهره برداری طرحهای توسعه منابع آب ضروری است. به عنوان مثال، پیامدهای حاصل از خطرات و ضایعات ناشی از احداث یک سد، مخزن یا دریاچه بدون توجه به مسائل محیط زیستی، چنان جدی است که موجب از بین رفتن سرمایه ملی شده است که غیر قابل جبران می باشد (مرادی و همکاران، ۱۳۸۹).

نگرشهای گوناگونی برای ارزیابی محیط زیستی طرحها وجود دارد که در برگزیده شاخصهای محیط زیستی و اثرات اکولوژیکی است. در این میان ارزیابی چرخه عمر به عنوان ابزاری جهت محقق ساختن اهداف توسعه پایدار و افزایش آگاهی جامعه نسبت به مسائل محیط زیستی شناخته شده است. ارزیابی چرخه عمر^۱ روشی است که به منظور تخمین صدمات و بارهای محیط زیستی مربوط به تمام مراحل تولید، بهره برداری و پایان عمر یک محصول، فرایند یا خدمت، طراحی و استاندارد سازی شده است. هم صنعت و هم تجارت، سودمندی این روش را برای حفظ منابع طبیعی و کاهش مصرف انرژی همگام با کمینه سازی آلودگی، پسماند و هزینه ها به رسمیت شناخته اند (Racoviceanu و همکاران، ۲۰۰۷).

معرفی ارزیابی چرخه عمر

بنا به تعریف سازمان استاندارد جهانی^۲ در استاندارد ۱۴۳۴۳، ارزیابی چرخه عمر عبارت از گردآوری ورودیها و خروجیهای ناشی از یک محصول در طول چرخه عمر آن و ارزیابی پیامدهای محیط زیستی ناشی از آن می باشد.

۴- تفسیر نتایج

گام پایانی در ارزیابی چرخه عمر، تفسیر نتایج حاصل شده است که در آن، داده‌ها تبدیل به یک سری از نشانگرها و سپس براساس اثرات محیط‌زیستی طبقه‌بندی شده، کمی‌سازی می‌شوند (Hauschild و همکاران، ۲۰۱۸).

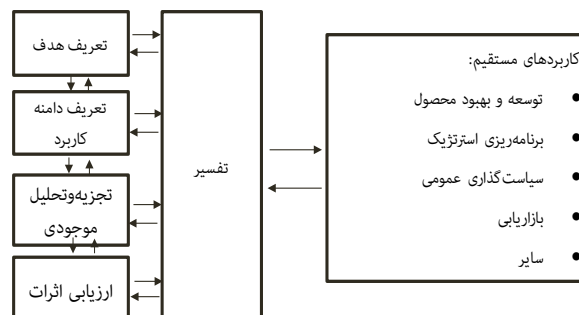
نقاط قوت و محدودیت‌های ارزیابی چرخه عمر

نقطه قوت اصلی ارزیابی چرخه عمر، جامع بودن آن از نظر دورمای چرخه عمر و مسائل محیط‌زیستی است. این امر می‌تواند مقایسه اثرات محیط‌زیستی محصول را که از صدها فرآیند تشکیل شده است، فراهم آورد و هزاران مورد استفاده از منابع و تولید گازهای گلخانه‌ای را که در زمان‌ها و نقاط مختلف اتفاق می‌افتد، حساب کند. باین حال جامع بودن نیز یک محدودیت است؛ زیرا مدل‌سازی سامانه محصول و اثرات محیطی نیاز به ساده‌سازی دارد. یکی دیگر از نقاط قوت در زمینه ارزیابی‌های مقایسه‌ای این است که ارزیابی چرخه عمر از اصل "بهترین برآورد" پیروی می‌کند؛ این امر به‌طور کلی امکان مقایسه بی‌طرفانه را فراهم می‌آورد. محدودیت مربوط به پیروی از اصل "بهترین برآورد" این است که مدل‌های ارزیابی چرخه عمر مبتنی بر عملکرد متوسط فرایندها هستند و از در نظر گرفتن خطرات حوادث نادر اما بسیار مشکل‌ساز مانند ریختن روغن سایت‌های صنعتی در دریا یا تصادفات پشتیبانی نمی‌کنند. در نتیجه، به‌عنوان مثال، انرژی هسته‌ای در ارزیابی چرخه عمر کاملاً سازگار با محیط‌زیست است زیرا ریسک ناچیز یک فاجعه ویرانگر، مانند مواردی که در چرنوبیل، اوکراین یا فوکوشیما ژاپن اتفاق افتاد، در نظر گرفته نمی‌شود (Curran و Klöpffer، ۲۰۱۴).

نکته حائز اهمیت این است که اگرچه ارزیابی چرخه عمر می‌تواند مشخص کند چه چیزی برای محیط‌زیست بهتر است، اما نمی‌تواند به شما بگوید که آیا "به اندازه کافی خوب" است یا خیر. بنابراین با استناد به ارزیابی چرخه عمر نمی‌توان گفت یک محصول از نظر محیط‌زیستی به طور مطلق قابل اطمینان است اما می‌توان مشخص کرد که یک محصول دارای اثرات محیط‌زیستی کمتری نسبت به محصول دیگر است (میرابی و همکاران، ۱۳۹۶).

خصوصیات فوق به این معنی است که ارزیابی چرخه عمر مناسب برای پاسخ به برخی از سؤالات و نامناسب برای پاسخ به برخی دیگر است. در ادامه نمونه سؤالاتی که ارزیابی چرخه عمر می‌تواند یا نمی‌تواند پاسخ دهد، ارائه شده است:

- نمونه سؤالاتی که ارزیابی چرخه عمر می‌تواند پاسخ دهد:
 - ۱- مناسب‌ترین کیسه برای حمل مواد غذایی کدام است؟ کاغذی، پارچه‌ای یا پلاستیکی؟
 - ۲- چگونه می‌توان اثرات محیط‌زیستی یخچال را با کمترین تلاش به حداقل رساند؟



شکل ۱- چارچوب ارزیابی چرخه عمر در استاندارد ISO ۱۴۰۴۰ (Curran و Klöpffer، ۲۰۱۴)

۱- تعریف هدف و دامنه کاربرد

این گام، شامل سه بخش تعیین هدف پژوهش، مرزهای سیستم و واحد عملکرد سیستم است. در این مرحله، محصول از منظر مرزها، واحد عملکردی و اینکه این ارزیابی به چه پرسش‌هایی پاسخ خواهد داد، تعریف می‌شود. ارزیابی چرخه عمر، بر مبنای محاسبه و مقایسه پیامدهای محیط‌زیستی ناشی از مقدار معینی از محصول یا خدمتی که ثمره کار سیستم است، انجام می‌شود و این مقدار معین، واحد عملکرد نامیده می‌شود. همچنین مرزهای سیستم در مطالعات مختلف متفاوت است؛ زیرا انتخاب مرزهای سیستم، وابسته به هدف مطالعه است. مرز سیستم می‌تواند تولید^۵، استفاده یا بهره‌برداری^۶ تا عمر مفید و سناریو دفع^۷ (شامل دورانداختن، از کار انداختن و استفاده مجدد یا بازیافت) را دربرگیرد (Hauschild و همکاران، ۲۰۱۸).

۲- تجزیه و تحلیل موجودی (سیاهه چرخه عمر)

این گام شامل شناسایی و کمی نمودن کلیه منابع مورد استفاده (اعم از انرژی، آب، مواد خام و فرآوری شده)، کلیه مواد منتشر شده به محیط‌زیست (مانند انتشار آلاینده‌ها به هوا، خاک و آب) و ضایعات ناشی از تولید و مصرف محصول است. کمیت و کیفیت داده‌های جمع‌آوری شده در این مرحله، به هدف مطالعه، مرز سیستم، بودجه و زمان بستگی دارد. منبع و مرجع جمع‌آوری اطلاعات نیز نقش بسیار مؤثری در اعتبار و کامل بودن داده‌ها دارد. به‌طور کلی داده‌ها را از یک یا چند منبع همچون اندازه‌گیری مستقیم، اندازه‌گیری آزمایشگاهی، اسناد دولتی و صنعتی، گزارش‌های تجاری، منابع اطلاعاتی ملی، سیاهه‌های محیط‌زیستی، مشاوران، پایگاه‌های داده، منابع علمی و قضاوت‌های مهندسی استخراج یا تهیه نمود (میرابی و همکاران، ۱۳۹۶).

۳- ارزیابی اثرات چرخه عمر

در این گام، مقصود از ارزیابی اثرات چرخه عمر، درک و ارزیابی مقدار و اهمیت پیامدهای بالقوه محیط‌زیستی ناشی از محصول نهایی می‌باشد. در این مرحله، تأثیرات بالقوه ناشی از مصرف منابع محیطی و تولید آلاینده‌ها بر انسان و طبیعت ارزیابی می‌شود (Hauschild و همکاران، ۲۰۱۸).

۳- از نظر محیط‌زیستی، پلاستیک‌ها باید سوزانده شوند یا بازیافت؟
۴- آیا شستن ظرف‌ها به صورت دستی با محیط‌زیست سازگارتر است یا استفاده از ماشین ظرفشویی؟

۵- آیا اتومبیل‌های برقی نسبت به موتورهای احتراق داخلی معمولی سازگار با محیط‌زیست هستند؟

• نمونه سؤالاتی که ارزیابی چرخه حیات می‌تواند پاسخ دهد:

۱- آیا برای کاهش انتشار ذرات باید مالیات بر روی خودروهای دیزلی قدیمی افزایش یابد و از این طریق هزینه بیمارستان را برای درمان بیماری‌های ریوی کاهش دهد؟

توضیح: ارزیابی چرخه عمر نمی‌تواند برای مقایسه مضرات اجتماعی مالیات‌های بالاتر با مزایای آلودگی کمتر استفاده شود.

۲- آیا تولید گازهای گلخانه‌ای فعلی از یک کارخانه خاص منجر به تمرکز آلاینده‌های بالاتر از آستانه نظارتی در اکوسیستم‌های آبی مجاور می‌شود؟

توضیح: ارزیابی چرخه عمر برای ارزیابی تأثیرات منبع انتشار منفرد بر اکوسیستم‌های محلی طراحی نشده است و هیچ اطلاعاتی در مورد آستانه‌های نظارتی ندارد (Curran و Klöpffer, ۲۰۱۴).

سازمان‌های پژوهشی در زمینه ارزیابی چرخه عمر

• سازمان بین‌المللی استاندارد، استانداردهای مدیریت محیط‌زیستی، سری‌های ISO ۱۴۰۰۰ را به عنوان بخشی از استاندارد بین‌المللی در ارزیابی چرخه عمر توسعه داده است.

• سازمان حفاظت محیط‌زیست^۸ ایالات متحده آمریکا، در حال توسعه کار بر روی توسعه روش ارزیابی چرخه حیات در دسته‌های مختلف می‌باشد.

• اتحاد جهانی مراکز ارزیابی چرخه عمر، شامل: مرکز مرجع بین دانشگاهی کانادا برای بررسی چرخه حیات، مرکز آمریکایی برای ارزیابی چرخه عمر، مرکز تحقیقات ارزیابی چرخه عمر ژاپن و مرکز ارزیابی چرخه عمر دانه‌مارک، کمیسیون اروپا (بسترهای نرم‌افزاری اروپایی در ارزیابی چرخه عمر)، که از تفکر چرخه عمر در توسعه کالاها و خدمات با ارجاع داده‌ها و روش‌های توصیه شده، پشتیبانی می‌کند بسترهای مورد نیاز برای کسب و کارهای خصوصی و مقامات دولتی را نشان می‌دهد (Hauschild و همکاران، ۲۰۱۸).

مروری بر تحقیقات پیشین

در این پژوهش، تلاش شده است تا تعدادی از مرتبط‌ترین مقالات و تحقیقات صورت گرفته با روش چرخه عمر در ارزیابی سامانه‌های توزیع آب طی ۲۰ سال گذشته (از ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۲) جمع‌آوری و بررسی شود. Tanji و همکاران (۲۰۰۳) از ارزیابی چرخه عمر، که یک چارچوب رایج برای ارزیابی اثرات محیط‌زیستی تولیدات کارخانه

است، برای ارزیابی اثرات محیط‌زیستی کانال‌های آبیاری از طریق بار محیطی خروجی، مانند انرژی یا دی اکسید کربن، استفاده کردند. بنابراین ارزیابی چرخه عمر آب آبیاری را می‌توان به عنوان (۱) محصول یا (۲) منابع ورودی تنظیم کرد. براساس نتایج این تحقیق، استفاده از ارزیابی چرخه عمر برای آب آبیاری می‌تواند کمک کند تا تأثیر محیط‌زیستی کربن دی اکسید تخمین زده شود که برای کاهش خطر گرمایش جهانی مفید است. بررسی کانال‌های آبیاری یک شبکه در ژاپن طی یک دوره ۳۰ ساله نشان داد یک کانال با ورودی آب به وسیله نیروی ثقل مقدار کربن تولیدی ناشی از دی اکسید کربن، ۲/۲ تن بر هکتار و برای یک کانال با ورودی از طریق هد پمپاژ این مقدار ۶ تن بر هکتار است. بنابراین ارزیابی چرخه عمر می‌تواند برای ارزیابی عملکرد سامانه آبیاری استفاده شود (Tanji و همکاران، ۲۰۰۳).

باتوجه به مشکل فرسودگی شبکه‌های توزیع آب شهری در سراسر جهان، به منظور تدوین سیاستی برای جایگزینی شبکه موجود با شبکه‌ای با عمر مفید بالاتر و نیز مقرون به صرفه، Ambrose و همکاران (۲۰۰۸) رویکرد LICAN را برای هزینه‌یابی کل عمر معرفی کردند و یک مطالعه موردی فرضی را برای نشان دادن اهمیت چنین رویکردی انجام دادند. براساس این رویکرد، مجموعه‌ای از شبکه‌های لوله با استفاده از مواد مختلف لوله (پی وی سی^۹، چدن داکتیل^{۱۰} و پلی اتیلن^{۱۱}) برای تعیین هزینه کل عمر آن‌ها، با در نظر گرفتن هزینه‌های نصب، نگهداری و تعمیر مدل‌سازی شدند. نتایج نشان داد بسیاری از مواد لوله‌های معاصر که مورد استفاده قرار می‌گیرند، مانند چدن داکتیل و پی وی سی ممکن است در طولانی مدت هزینه‌های قابل توجهی را به همراه داشته باشند. این مواد برخلاف پیش‌بینی‌های مربوط به لوله‌های پلی اتیلن، نرخ شکست نسبتاً بالاتر و نیز نرخ نشت بالاتر دارند که می‌تواند منجر به هزینه‌های نگهداری قابل توجه و از دست رفتن مقادیر بیشتر آب در طول عمر شبکه لوله شود. با این حال، بر اساس داده‌های مربوط به هزینه‌ها و شکست لوله‌ها، شبکه‌های پلی اتیلن هزینه‌های بسیار کمتری را در طول عمر خود نشان دادند که به دلیل نرخ شکست و تلفات آب پایین، در بلندمدت تا ۷۵ درصد منجر به صرفه‌جویی در هزینه‌ها خواهد شد (Ambrose و همکاران، ۲۰۰۸).

Friedrich و همکاران (۲۰۰۹) با دو هدف انجام شد: ۱- ایجاد اطلاعات در مورد مشخصات محیط‌زیستی چرخه عمر آب، از تصفیه تا توزیع، جمع‌آوری و دفع (از جمله بازیافت)، در بافت شهری eThekwin، در آفریقای جنوبی، به عنوان منطقه مورد مطالعه ۲- هدف دیگر این مطالعه مقایسه پیامدهای محیط‌زیستی برای تأمین آب آشامیدنی قابل شرب در مقابل آب بازیافتی برای صنعت در این منطقه بود. در این راستا، یک سری ارزیابی چرخه عمر محیطی انجام و امتیازات محیط‌زیستی برای فرآیندهای مربوط به آن محاسبه شد. براساس نتایج حاصل از ارزیابی چرخه عمر مشخص شد بیشترین سهمی که بین ۳۷ تا ۴۶ درصد در شاخه‌های مختلف

متغیر است، متعلق به فرآیند لجن فعال است که در تصفیه پساب استفاده می‌شود. اما در شرایطی که کل سامانه در نظر گرفته شد و شامل تلفات در شبکه توزیع آب آشامیدنی بود، فرآیند توزیع بیشترین سهم را دارد که بین ۳۲ تا ۴۸ درصد در شاخه‌های مختلف بود. همچنین مشخص شد باز یافت، اثرات محیط‌زیستی مثبت قابل توجهی دارد که مهمترین آن کاهش پتانسیل مسمومیت انسانی به میزان ۸۸ درصد است (Friedrich و همکاران، ۲۰۰۹).

Herstein و Filion (۲۰۱۱) چرخه عمر جنس لوله‌های رایج مورد استفاده در شبکه‌های توزیع آب را ارزیابی کردند. در این مقاله اثرات محیط‌زیستی اقتصادی مرتبط با تولید لوله‌های پی‌وی سی و چدن داکتیل، مخازن فولادی و تولید برق برای پمپاژ در بهینه‌سازی شبکه توزیع آب بررسی شده است. از الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب^{۱۲} برای ایجاد راه‌حل‌های بهینه پارتو در جهت حل مشکل گسترش شبکه معیار «Anytown» استفاده شده است.

در ادامه جواب‌های پارتو بهینه شبکه «Anytown» با رویکرد چرخه عمر ورودی-خروجی اقتصادی^{۱۳} و معیارهایی در مورد انتشار آلاینده‌های جوی، استفاده از انرژی تجدیدناپذیر و انتشار آلاینده‌های محیط‌زیستی ارزیابی شد. یافته‌های اصلی نشان داد فعالیت‌های تولید لوله‌های چدن داکتیل و پلی‌وینیل کلراید و تولید برق (برای پمپاژ) اثرات محیط‌زیستی مخرب‌تری نسبت به تولید مخازن فولادی و فعالیت‌های ساخت‌وساز در شبکه «Anytown» دارند.

مطابق نتایج چرخه عمر ورودی-خروجی اقتصادی، تولید لوله چدن داکتیل اثرات زیر را در پی دارد:

(۱) انتشار مونوکسید کربن ناشی از حمل‌ونقل کامیون و تجارت عمده فروشی

(۲) آسیب به زمین و منابع زیرزمینی از فعالیت‌های معدن فلز از طرفی طبق نتایج، تولید لوله‌های پی‌وی سی با موارد زیر مرتبط است:

(۱) انتشار مونوکسید کربن از حمل‌ونقل کامیون

(۲) انتشار هوای سمی از بخش تولید مواد پلاستیکی و رزین

(۳) انتشار سمی زمین و زیرزمینی از استخراج فلزات و تولید رزین

(۴) استفاده از گاز طبیعی برای مواد پلاستیکی و ساخت رزین (Herstein و Filion، ۲۰۱۱).

Du و همکاران (۲۰۱۳) تجزیه و تحلیل چرخه عمر را برای بررسی و مقایسه شش نوع متداول کاربرد جنس‌های مختلف لوله آب و فاضلاب شامل؛ پلی‌وینیل کلراید، چدن داکتیل، چدن، پلی‌اتیلن با چگالی بالا^{۱۴}، بتن و بتن مسلح انجام دادند. اهداف آن‌ها عبارت بود از: (۱) مقایسه مواد شش لوله از نظر پتانسیل گرمایش جهانی از طریق چهار فاز: تولید لوله، حمل‌ونقل، نصب و استفاده.

(۲) تعیین منبع (های) اولیه تفاوت در نتایج ارزیابی چرخه عمر (۳) بررسی اثربخشی معیارهای انتخاب اندازه لوله بر پتانسیل گرمایش جهانی.

بررسی نتایج براساس هریک از اهداف فوق نشان داد:

برای قطر لوله ≥ 61 سانتی‌متر، پتانسیل گرمایش جهانی بر اثر ساخت لوله، حمل‌ونقل و نصب لوله‌های چدن داکتیل بزرگترین بین شش ماده بود. نتایج همچنین نشان داد قطر بهینه‌ای وجود دارد که پتانسیل گرمایش جهانی طول عمر را به حداقل می‌رساند. با این حال، اندازه لوله بهینه براساس پتانسیل گرمایش جهانی مشابه قطر لوله انتخاب شده براساس هزینه اقتصادی به تنهایی بود که نشان می‌دهد ارزیابی چرخه عمر سامانه‌های توزیع آب و جمع‌آوری فاضلاب تغییرات عمده‌ای در معیارهای انتخاب اندازه لوله ایجاد نمی‌کند (Du و همکاران، ۲۰۱۳).

Hendrickson و Horvath (۲۰۱۴) ردپای گازهای گلخانه‌ای موجود، عناصر رایج سیستم توزیع آب را با استفاده از ارزیابی چرخه عمر، کمی کردند. نتایج نشان داد ۸۱٪ از گازهای گلخانه‌ای ناشی از انرژی پمپاژ است که در آن بخش بزرگی از این انتشارات ناشی از نشت توزیع است و ۲۷۰ میلیارد لیتر از تلفات آب روزانه را در ایالات متحده تشکیل می‌دهد (Hendrickson و Horvath، ۲۰۱۴).

Barjoveanu و همکاران (۲۰۱۴) از ارزیابی چرخه عمر به منظور ارزیابی سامانه خدمات آبرسانی در شهر Iasi در کشور رومانی استفاده کردند. مراحل در نظر گرفته شده در این ارزیابی شامل برداشت، انتقال، تصفیه و توزیع آب و همچنین جمع‌آوری، تصفیه و تخلیه فاضلاب است. طبق نتایج برای سامانه نامبرده، اثرات مراحل قبل از رسیدن آب به مرحله مصرف، بیشتر از مراحل بعد از مصرف می‌باشد که عمدتاً به دلیل تلفات زیاد آب در سامانه توزیع است. با این حال مراحل بعد از مصرف نیز همچنان بر بسیاری از اثرات محیط‌زیستی مانند یوتروفیکاسیون و آلودگی آب‌های سطحی مؤثر هستند. راهکارهای ارائه شده برای بهبود عملکرد این سامانه در راستای حفظ محیط‌زیست عبارت است از: تغییر در منابع آب، بهبود سامانه توزیع و ارتقاء تصفیه‌خانه فاضلاب می‌باشد (Barjoveanu و همکاران، ۲۰۱۴).

Hasegawa و همکاران (۲۰۱۶) بهینه‌سازی استراتژی‌های جایگزینی سامانه‌های توزیع آب شهری برای محاسبه هزینه چرخه عمر^{۱۵} و کل انتشار گازهای گلخانه‌ای را از هر دو دیدگاه اقتصادی و محیط‌زیستی مهم دانسته و اظهار داشتند تحقیقات متعددی با در نظر گرفتن سناریوهای متفاوت این موضوع را بررسی کرده‌اند اما پیش از این سناریوی کاهش جمعیت در نظر گرفته نشده است.

این مطالعه پیشنهاد می‌کند ارزیابی‌های چرخه عمر سیستم‌های توزیع آب شهری را در شرایط کاهش جمعیت طولانی مدت مستمر و سودمندی کوچک‌سازی لوله‌ها برای برآورده کردن پیش‌بینی‌های کاهش جمعیت در آینده بررسی کند.

از طریق ارزیابی چرخه عمر سامانه‌های توزیع آب شهری و تحلیل حساسیت نرخ تنزیل اجتماعی^{۱۶}، این مطالعه نشان داد:

(۱) طول عمر کوتاه‌تر پمپ مفید است، بنابراین، نظارت مکرر بر خروجی پمپ مربوط به کاهش تقاضای آب است.

(۲) برای ارزیابی هزینه چرخه عمر، لوله‌ها باید در پاسخ به کاهش جمعیت کوچک شوند، اما برای کاهش انتشار کل گازهای گلخانه‌ای، حفظ قطر فعلی یا کوچک کردن متوسط قطرها پیشنهاد می‌شود. (۳) نه تنها نرخ تنزیل اجتماعی بالاتر، بلکه کاهش جمعیت نیز به نفع قطرهای کوچکتر در دوره اولیه است زیرا قطر لوله‌های کاندید محاسبه شده در دوره اولیه بزرگتر از دوره آخر است. Jovanovic و همکاران (۲۰۱۹) در تحقیقی چند رشته‌ای، یک مدل ارزیابی چرخه عمر/ هزینه چرخه عمر را برای ارزیابی هزینه‌ها، مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در طول چرخه عمر واحد پمپ در سامانه‌های توزیع آب آشامیدنی توسعه دادند. روش ارائه شده شامل پایش پمپ، موتور و درایو فرکانس متغیر به عنوان یک سامانه (واحد پمپ)، از طریق مراحل چرخه عمر آن‌ها است، که این مراحل شامل: مرحله ساخت، مرحله بهره‌برداری، و مرحله دفع در پایان چرخه عمر آن‌ها می‌باشد. مدل توسعه یافته همچنین فرایندهای دیگری مانند تعمیر و نگهداری، آزمایش و بازسازی واحد پمپ را تجزیه و تحلیل می‌کند. نمایش روش ارائه شده با استفاده از واحد پمپ یک سامانه توزیع آب شهری عامل در سناریوهای مختلف، به منظور نشان دادن کاربرد مناسب این مدل انجام شد. نتایج به دست آمده نشان داد کاربرد واحدهای پمپ از نظر مصرف انرژی قابل توجه است و ۹۳ تا ۹۴ درصد انرژی مصرف شده و هزینه‌های چرخه عمر مربوط به هزینه‌های عملیاتی پمپ است، درحالی‌که بقیه مربوط به عملیات کمکی است. یافته‌ها نشان داد کشورهای مختلف می‌توانند قیمت‌های متفاوتی برای انرژی الکتریکی و انتشار گازهای گلخانه‌ای داشته باشند که به منبع انرژی الکتریکی بستگی دارد. در نهایت، نتایج بهره‌برداری از واحد پمپ در توزیع آب آشامیدنی برای نشان دادن تأثیر چنین نیروگاهی بر سطوح مختلف مصرف انرژی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و هزینه چرخه حیات استفاده شده است (Jovanovic و همکاران، ۲۰۱۹). Xue و همکاران (۲۰۱۹) اثرات محیط‌زیستی و اقتصادی چرخه عمر سامانه‌های آب و فاضلاب شهری را در منطقه سینسیناتی به عنوان یک مطالعه موردی ارزیابی کرد. دامنه این مطالعه شامل کل سامانه‌های آب و فاضلاب شهری از شروع آب خام برای آب آشامیدنی تا تصفیه و دفع فاضلاب است. ارزیابی چرخه عمر مشخص کرد بهره‌برداری و نگهداری از سامانه‌های توزیع آب آشامیدنی سهم عمده‌ای در مصرف انرژی (۴۳٪) و پتانسیل گرمایش جهانی (۴۱٪) دارد. تخلیه فاضلاب از تصفیه‌خانه فاضلاب در بیش از ۸۰٪ از کل یوتروپیکاسیون دخالت دارد. همچنین تجزیه و تحلیل هزینه‌ها نشان داد هزینه کار و تعمیر و نگهداری برای جمع‌آوری فاضلاب با ۱۹٪ و هزینه برق برای توزیع آب آشامیدنی با ۱۳٪ بیشترین سهم را دارند. طبق نتایج آنالیز حساسیت، اثرات محیط‌زیستی چرخه عمر، نسبت به انتخاب منابع تولیدکننده برق و مصرف برق، از سایر پارامترهای ورودی مانند دوزهای شیمیایی و طول عمر زیرساخت‌ها، حساس‌تر است. ارزیابی

چرخه عمر نشان داد استفاده از منابع انرژی پاک‌تر، کاهش مصرف برق، طراحی پیکربندی سامانه با اهداف مناسب، ارزیابی منابع و تمرکززدایی از استراتژی‌های موثر برای کاهش تأثیرات محیط‌زیستی و اقتصادی سامانه‌های آب شهری است (Xue و همکاران، ۲۰۱۹). Hajibabaei و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی یک مجموعه داده جامع از چرخه عمر به منظور ارزیابی بارهای محیط‌زیستی مرتبط با مراحل ساخت و نوسازی شبکه‌های توزیع آب جمع‌آوری نمودند. هدف از این پژوهش کشف اثرات داده‌های اولیه و ثانویه بر نتایج ارزیابی چرخه عمر براساس تحلیل عدم قطعیت‌ها بوده است. نتایج حاکی از اهمیت لحاظ فرآیندهای مربوط به ساخت و ساز جاده‌ای، به خصوص برای لوله‌های پلاستیکی کوچک تا متوسط بود. اگرچه انرژی حاصل از سوزاندن لوله‌های پلاستیکی تا حدی اثرات پایان عمر آن‌ها را جبران می‌کند اما این فرآیندهای مربوط به سوزاندن، تأثیر قابل توجهی بر گرمایش جهانی می‌گذارند. در نهایت این مطالعه نشان داد بدون در نظر گرفتن تمامی اطلاعات شناخته شده نیز ارزیابی چرخه عمر برای شبکه‌های توزیع آب قابل اعتماد است. همچنین این مقاله پیشنهادی را ارائه داده است که بهتر است در فرآیند جمع‌آوری داده روی کدام داده‌ها تمرکز شود (Hajibabaei و همکاران، ۲۰۲۰). Sheefa و همکاران (۲۰۲۲) با اشاره به اینکه برای یک رویداد آلودگی با نمک یا سایر آلودگی‌های تغلیظی در یک سامانه توزیع آب، باز کردن شیرهای آتش نشانی برای شستشوی سیستم در حال حاضر یک روش ضد آلودگی پذیرفته شده است اما تمام آب شستشوی آلوده به محیط اطراف شیرهای آتش نشانی تخلیه می‌شود و اثرات محیط‌زیستی را تحمیل می‌کند. بنابراین استفاده از یک حوضچه مهار برای گرفتن آب آلوده را یکی از جایگزین‌های ضد آلودگی سامانه معرفی کردند. برای کاهش اثرات محیط‌زیستی شستشوی نمک از یک سامانه توزیع آب، یک مطالعه ارزیابی چرخه عمر مقایسه‌ای برای هر دو گزینه شستشوی معمولی و شستشوی آب آلوده به یک حوضچه مهار انجام شد. این کار با استفاده از نرم‌افزار SimaPro برای هر دو گزینه ضد عفونی انجام و اثرات با استفاده از روش IMPACT ۲۰۰۲+ ارزیابی شده است. نتایج حاکی از آن بود که اثرات محیط‌زیستی را می‌توان تا ۲۵ درصد برای مناطق روستایی، ۶۹ درصد برای جاده‌های شهری، ۶۱ درصد برای چمن‌های شهری و ۶۴ درصد برای کاربری مختلط کاهش داد. علاوه بر این، آنالیز حساسیت دو متغیر حساس را نشان داد که منجر به این یافته شد که تغییر ۱۰ درصدی در زمان مورد نیاز برای رفع آلودگی سامانه منجر به تغییر ۱۰ درصدی در اثرات محیط‌زیستی و تغییر ۱۰٪ در مساحت زمین در معرض تخلیه آب آلوده منجر به تغییر ۸٪ در اثرات محیط‌زیستی می‌شود (Sheefa و همکاران، ۲۰۲۰). حاجی بابایی و همکاران (۱۳۹۵) اثرات محیط‌زیستی ناشی از تولید، حمل و نصب لوله‌های پی‌وی‌سی، پلی‌اتیلن با وزن مخصوص بالا، سیمانی الیاف‌دار و چدن نشکن را بررسی کردند. همچنین در فرآیند

- 1-International Organization for Standardization
- 2-Life Cycle Assessment
- 3-Life Cycle Inventory
- 4-Life Cycle Impact Assessment
- 5-Assembly
- 6-Life cycle
- 7-Disposal scenario
- 8-Environmental Protection Agency
- 9-Poly vinyl chloride
- 10-Ductile Iron
- 11-Polyethylene
- 12-Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II
- 13-Economic input-output
- 14-High-density polyethylene
- 15-Life cycle cost
- 16-Social discount rate

منابع

- پناهنده، محمد، عابدین‌زاده، نیلوفر، روانبخش، مکرم. (۱۳۸۹). ارزیابی اثرات زیست محیطی کارخانه کمپوست شهر یزد. علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۱۲(۳)، ۸۷-۱۰۰.
- حاجی بابایی، محسن، نظیف، سارا، واحدی زاده، سجاد. (۱۳۹۵). مقایسه اثرات زیست محیطی ناشی از ساخت و اجرای انواع لوله‌های شبکه توزیع آب با استفاده از روش ارزیابی چرخه حیات. علوم و مهندسی آب و فاضلاب، ۱(۱)، ۳۷-۴۸. doi: [10.22112/jwwse.2017.51057](https://doi.org/10.22112/jwwse.2017.51057)
- مرادی، محراب، ساداتی پور، سیدمحمدتقی، شریفلو، ناصرمنصور، و زعیم‌دار، مژگان. (۱۳۸۹). بررسی اثرات زیست محیطی سد پلرود و ارائه راهکارهای کاهنده جهت کاهش اثرات. پژوهش‌های علوم و فنون دریایی، ۵(۲)، ۲۳-۳۲.
- میرابی، مریم، بنی‌اسدی، حسن، سرگزی، حامد. (۱۳۹۶). ارزیابی زیست محیطی گزینه‌های تصفیه‌لجن فاضلاب: هاضم بی‌هوازی و روش‌های گرمایی، چهارمین کنفرانس بین‌المللی برنامه‌ریزی و مدیریت محیط زیست، تهران.
- Ambrose, M., Burn, S., DeSilva, D., & Rahilly, M. (2008). Life cycle analysis of water networks. In *Plastics Pipe XIV: Plastics Pipes Conferences Association*. Budapest, Hungary.
- Barjoveanu, G., Comandaru, I. M., Rodriguez-Garcia,

نصب، با در نظر گرفتن ترانشه مختص هر لوله، مقایسه‌ای بین اثرات محیط‌زیستی انواع ترانشه‌ها نیز صورت گرفته است. نتایج این تحقیق نشان داد در مجموع سه فاز تولید، حمل و نصب، لوله‌های چدن نشکن بیشترین و لوله‌های پی‌وی‌سی کمترین اثرات محیط‌زیستی را به خود اختصاص می‌دهند (حاجی بابایی و همکاران، ۱۳۹۵).

جمع‌بندی و بحث

در روش ارزیابی چرخه عمر با کمی‌سازی انتشارات ناشی از یک محصول، فرایند یا خدمت که به محیط وارد می‌شوند، تمام اثرات محیط‌زیستی در طول چرخه عمر آن قابل بررسی است. این روش جامع و کل‌نگر می‌تواند با شناسایی پارامترهای اصلی تولید کننده آلودگی، طراحان را برای طراحی متناسب‌تر با شرایط محیط‌زیستی و مدیران را به یافتن راهی برای کاهش آلودگی اجرای پروژه‌های عمرانی رهنمون کند. به‌کارگیری تکنیک چرخه عمر در شبکه‌های توزیع آب هنوز رایج نیست؛ اما مطالعات محدود صورت گرفته، یا حول محور اثرات لوله و پمپاژ بوده‌اند و یا در خصوص معرفی روشی بر پایه ارزیابی چرخه عمر برای شرایطی خاص انجام شده است. نتایج به‌دست آمده از تمامی پژوهش‌ها حاکی از آن است که استفاده از این روش در این حوزه مفید و مؤثر بوده و با وجود نیاز به پارامترهای ورودی زیاد قابلیت گسترش دارد. همچنین مشخص شد کشورهای توسعه یافته بسیار بیشتر از کشورهای در حال توسعه، به ارزیابی محیط‌زیستی محصولات و خدمات خود با استفاده از روش چرخه عمر پرداخته‌اند که باتوجه به دغدغه‌مندتر بودن کشورها نسبت به مسائل محیط‌زیستی و همچنین جدید بودن روش ارزیابی چرخه حیات، این امر قابل پیش‌بینی است. در مطالعات به‌کارگیری ارزیابی چرخه عمر در حوزه آب، می‌توان دریافت که ۱- در آبرسانی بیشترین تلفات مربوط به توزیع است؛ ۲- بازیافت اجزاء سازنده شبکه‌ها در پایان عمر آن‌ها می‌تواند تا بیش از ۸۰ درصد از اثرات سوء محیط‌زیستی آن‌ها بکاهد.

پیشنهادهات

- از نرم‌افزارهای موجود (به‌عنوان مثال SimaPro, Gabi, Umberto, Open LCA) برای ارزیابی گزینه‌های بهبود عملکرد شبکه‌ها استفاده شود.
- به جز شبکه‌های توزیع آب شهری، بیشتر به حیطه کشاورزی پرداخته شود.
- سناریوهای دفع اجزاء سازنده شبکه پس از پایان عمر آن‌ها بیشتر مورد توجه قرار گیرد.
- اثربخشی راهکارهای بهبود عملکرد سامانه‌های توزیع آب توسط روش چرخه عمر مقایسه شود.

- Herstein, L. M., & Filion, Y. R. (2011). Life-cycle assessment of common water main materials in water distribution networks. *Journal of Hydroinformatics*, 13(3), 346-357. <https://doi.org/10.2166/hydro.2010.127>
- Jocanovic, M., Agarski, B., Karanovic, V., Orosnjak, M., Ilic Micunovic, M., Ostojic, G., & Stankovski, S. (2019). LCA/LCC model for evaluation of pump units in water distribution systems. *Symmetry*, 11(9), 1181. <https://doi.org/10.3390/sym11091181>
- Klöpffer, W., & Curran, M. (2014). Background and Future Prospects in Life Cycle Assessment. *LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment*. Springer Dordrecht. New York, United States. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8697-3_1
- Racoviceanu, A. I., Karney, B. W., Kennedy, C. A., & Colombo, A. F. (2007). Life-cycle energy use and greenhouse gas emissions inventory for water treatment systems. *Journal of infrastructure systems*, 13(4), 261-270. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2007\)13:4\(261\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2007)13:4(261))
- Rodriguez-Garcia, G., Hospido, A., & Teodosiu, C. (2014). Evaluation of water services system through LCA. A case study for Iasi City, Romania. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19, 449-462. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0635-8>
- Sheefa, D. E., Handler, R. M., & Barkdoll, B. D. (2022). Eco-efficiency analysis of water distribution system flushing into a containment Pond. *Journal of Environmental Management*, 321, 115987. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115987>
- Tanji, H., Yoshida, K., & Soumura, H. (2003). Issues of life cycle assessment for irrigation, IWMI Books. Reports H033366. International Water Management Institute. Colombo, Sri Lanka.
- Xue, Z., Liu, H., Zhang, Q., Wang, J., Fan, J., & Zhou, X. (2019). The impact assessment of campus buildings based on a life cycle assessment–life cycle cost integrated model. *Sustainability*, 12(1), 294. <https://doi.org/10.3390/su12010294>
- G., Hospido, A., & Teodosiu, C. (2014). Evaluation of water services system through LCA. A case study for Iasi City, Romania. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19, 449-462. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0635-8>
- Baumann, H., & Tillman, A. M. (2004). *The hitch hiker's guide to LCA*. Studentlitteratur. Lund, Sweden. DOI: <http://dx.doi.org/10.1065/lca2006.02.008>
- Du, F., Woods, G. J., Kang, D., Lansey, K. E., & Arnold, R. G. (2013). Life cycle analysis for water and wastewater pipe materials. *Journal of Environmental Engineering*, 139(5), 703-711. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000638](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000638)
- Friedrich, E., Pillay, S., & Buckley, C. A. (2009). Environmental life cycle assessments for water treatment processes—A South African case study of an urban water cycle. *Water Sa*, 35(1). DOI: [10.4314/wsa.v35i1.76710](https://doi.org/10.4314/wsa.v35i1.76710)
- Guinee, J. B., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., ... & Rydberg, T. (2011). Life cycle assessment: past, present, and future. <https://doi.org/10.1021/es101316v>
- Hajibabaei, M., Hesarkazzazi, S., Lima, M., Gschösser, F., & Sitzenfrie, R. (2020). Environmental assessment of construction and renovation of water distribution networks considering uncertainty analysis. *Urban Water Journal*, 17(8), 723-734. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1783326>
- Hasegawa, K., Arai, Y., Koizumi, A., & Inakazu, T. (2016). Life cycle assessment of a water distribution system in a context of depopulation. In Conference: IWA World Water Congress an Australian Exhibition 2016. Brisbane, Queensland, Australian.
- Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., & Olsen, S. I. (2018). *Life Cycle Assessment, Theory and Practice*. Springer Cham. Berlin, Germany. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3>
- Hendrickson, T. P., & Horvath, A. (2014). A perspective on cost-effectiveness of greenhouse gas reduction solutions in water distribution systems. *Environmental Research Letters*, 9(2), 024017. DOI [10.1088/1748-9326/9/2/024017](https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/2/024017)

The Trend of Changes in Relative Humidity in Razavi Khorasan Province, Northeast Iran

Z. Shirmohammadi-Aliakbarhaneh^{1*}, S. F. Saberali², S. M. J. Mirzaei¹, M. N. Modoodi²

1- Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, High Educational Complex of Torbat-e Jam, Torbat-e Jam, Iran. 2- Assistant Professor, Department of Horticultural Science and Engineering, High Educational Complex of Torbat-e Jam, Torbat-e Jam, Iran.

*(Corresponding Author Email: shirmohammadi@tjamcaas.ac.ir)

Received: 27-02-2023

Revised: 01-05-2023

Accepted: 23-05-2023

Available Online: 21-09-2022

روند تغییرات رطوبت نسبی در استان خراسان رضوی، شمال شرق ایران

زهرا شیرمحمدی-علی اکبرخانی^{۱*}، سید فرهاد صابری علی^۲، سید محمدجواد میرزایی^۱، محمدناصر مودودی^۲

۱- استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، مجتمع آموزش عالی تربت جام، تربت جام، ایران. ۲- استادیار، گروه علوم و مهندسی باغبانی، مجتمع آموزش عالی تربت جام، تربت جام، ایران.

*(نویسنده مسئول، E-Mail: shirmohammadi@tjamcaas.ac.ir)

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۱۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۶/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۰۲

Abstract

The present study was conducted to examine the changes in monthly, seasonal, and annual trends in relative humidity of 13 meteorological stations in the Razavi-Khorasan Province from the beginning of the statistical period of each station until 2021. The study area includes Dargaz, Fariman, Golmakan, Gonabad, Kashmar, Khaf, Neyshabour, Mashhad, Quchan, Sarakhs, Sabzevar, Torbat-e Jam, and Torbat-e Heydarieh counties. Parametric linear regression and the nonparametric Mann-Kendall (MK) test were used to detect trends in relative humidity. The majority of stations have shown decreasing trends at 5% significance level in relative humidity in different time scales, and only in two stations, Quchan (June, December, and autumn season) and Sarakhs (autumn season), the relative humidity showed an increasing trend at 5% significance level. A decrease in monthly mean relative humidity for six stations has been found in the range of 0.7 to 3.5 percent/decade, while an increase for Quchan station 1.9 to 2.6 percent/decade was observed. In addition, most of the studied stations have experienced a decrease in relative humidity on a seasonal and annual scale. A decrease in Seasonal mean relative humidity for six stations has been found in the range of 0.6 to 2 percent/decade, while decreases in annual mean relative humidity stations ranged from 0.9 to 1.6 percent/decade. The results of this research indicate a decreasing trend in the average monthly, annual and seasonal relative humidity during recent years.

Keywords: Climate Change, Relative Humidity, Mann-Kendall Method, Time Series.

چکیده

مطالعه حاضر به منظور بررسی تغییرات رطوبت نسبی ۱۳ ایستگاه هواشناسی در استان خراسان رضوی در مقیاس ماهانه، فصلی و سالانه از ابتدای دوره آماری هر ایستگاه تا سال ۱۴۰۰ انجام شد. منطقه مورد مطالعه شامل ایستگاه‌های درگز، فریمان، گل‌مکان، گناباد، کاشمر، خواف، نیشابور، مشهد، قوچان، سرخس، سبزوار، تربت جام و تربت حیدریه بود. برای تعیین روند رطوبت نسبی از رگرسیون خطی و آزمون ناپارامتریک من-کندال (MK) استفاده شد. رطوبت نسبی در همه ایستگاه‌های مورد مطالعه و در مقیاس‌های زمانی مختلف، به جز در دو ایستگاه قوچان (در ماه‌های خرداد، آذر و در فصل پاییز) و سرخس (فصل پاییز)، روند کاهشی در سطح اطمینان ۵ درصد داشت. درصد کاهش میانگین رطوبت نسبی ماهانه برای شش ایستگاه در محدوده ۰/۷-۳/۵ درصد در هر ۱۰ سال مشاهده شد، درحالی‌که درصد افزایش میانگین رطوبت نسبی ماهانه برای ایستگاه قوچان در محدوده ۱/۹-۲/۶ درصد در هر ۱۰ سال مشاهده شده است. علاوه بر این، بیشتر ایستگاه‌های مورد مطالعه در مقیاس فصلی و سالانه نیز کاهش رطوبت نسبی را تجربه کرده‌اند. کاهش میانگین رطوبت نسبی فصلی برای شش ایستگاه در محدوده ۰/۶-۲ درصد در هر ۱۰ سال مشاهده شد، درحالی‌که کاهش میانگین سالانه رطوبت نسبی در ایستگاه‌ها در محدوده ۰/۹-۱/۶ درصد در هر ۱۰ سال مشاهده شده است. نتایج این تحقیق حاکی از روند کاهشی در میانگین رطوبت نسبی ماهانه، سالانه و فصلی طی سال‌های اخیر است.

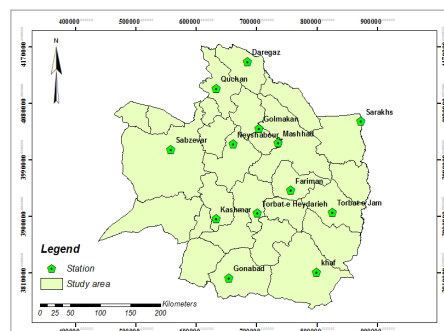
واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، رطوبت نسبی، روش من-کندال، سری زمانی.

یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های علمی چند دهه اخیر، تغییر اقلیم است که توجه محققان، دانشمندان، برنامه‌ریزان و سیاستمداران را به خود جلب کرده است. مطالعات تغییرات اقلیمی در دو یا سه دهه گذشته تا حدی به دلیل افزایش مداوم گرمایش جهانی مرتبط با اثر گلخانه‌ای افزایش یافته است (Valdez-Cepeda و همکاران، ۲۰۱۱). بررسی اثرات تغییر اقلیم بر کلیه فعالیت‌های بشری در محافل علمی به دلیل سرعت تغییر اقلیم، حساسیت خاصی پیدا کرده است. در عصر حاضر تغییر اقلیم به‌عنوان مهم‌ترین تهدید برای توسعه پایدار، کشاورزی و امنیت غذایی مطرح است (Mansouri-Daneshvar و همکاران، ۲۰۱۹). واقعیت تغییر اقلیم در میان کشورهای خاورمیانه و به‌ویژه ایران شدید است. در میان کشورهای خاورمیانه، ایران در دهه‌های آینده با افزایش ۲/۶ درجه سانتی‌گراد میانگین دما و کاهش ۳۵ درصدی بارندگی مواجه خواهد شد. برعکس، ایران با مجموع انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG) نزدیک به ۶۱۶۷۴۱ میلیون تن CO₂ اولین کشور مسئول تغییرات اقلیمی در خاورمیانه و هفتمین کشور در جهان است (IPCC، ۲۰۱۴). برای ارزیابی تغییرات اقلیمی، اخیراً بررسی روند رطوبت نسبی در دنیا مورد توجه قرار گرفته است. رطوبت نقش مهمی در زندگی روزمره دارد. رطوبت بر آسایش انسان تأثیر می‌گذارد و دمای درک شده توسط انسان تا حد زیادی به میزان رطوبت اتمسفر بستگی دارد. رطوبت، چه نسبی و چه مطلق، نقش مهمی در مطالعات تأثیرات آب‌وهوا ایفا می‌کند و به‌طور بالقوه ابزار بسیار روشنگری برای تحقیقات آب و هوایی است. در زمینه تولید محصول، رطوبت نسبی (RH) به‌طور مستقیم بر روابط آبی گیاه و به‌طور غیرمستقیم بر رشد برگ، فتوسنتز، گرده‌افشانی، بروز بیماری‌ها و عملکرد اقتصادی تأثیر می‌گذارد (Kumar و Farooq، ۲۰۲۱). در سالهای اخیر رطوبت نسبی در اثر تغییرات آب و هوایی روند افزایش یا کاهشی داشته است. روند افزایش یا کاهش رطوبت نسبی در دوره‌های اخیر به دلیل اثر تغییرات آب و هوایی است. Ross و Gaffen (۱۹۹۹) روند رطوبت نسبی و دمای نقطه شبنم را در ایالات متحده آمریکا برای دوره ۱۹۵۱-۱۹۹۰ مطالعه نمودند که نتایج نشان داد در بسیاری از مکان‌ها به‌ویژه در فصل زمستان و بهار رطوبت نسبی روند افزایشی داشته است. Wijngaarden و Vincent (۲۰۰۴) کاهش قابل‌توجهی را در رطوبت نسبی سراسر کانادا طی دوره ۱۹۵۳-۲۰۰۳ مشاهده کردند. Farooq و Kumar (۲۰۲۱) روند رطوبت نسبی ماهانه، سالانه و فصلی را در سه منطقه سرینگار (کشمیر) برای دوره ۲۶ ساله (۱۹۹۵-۲۰۱۹)، رانیچائوری^۱ برای دوره ۲۸ ساله (۱۹۸۵-۲۰۱۲) و له^۲ برای دوره ۱۵ ساله (۲۰۰۰-۲۰۱۴) بررسی نمودند. براساس نتایج آنها در منطقه سرینگار^۳ روند خاصی در تغییرات رطوبت نسبی مشاهده

نی‌شود. در منطقه رانیچائوری در هر سه دوره رطوبت نسبی روند افزایشی داشته و در منطقه له در هر سه دوره زمانی رطوبت نسبی روند کاهشی داشته است. Singh و همکاران (۲۰۰۸) روند تغییرات بارش و رطوبت نسبی را در حوزه رودخانه‌های شمال شرق و مرکز هند مطالعه نمودند. نتایج آنها نشان داد که در اکثر حوزه‌های مورد مطالعه رطوبت نسبی در مقیاس زمانی فصلی و سالانه روند افزایشی داشته است. Khan و همکاران (۲۰۲۲) روند تغییرات رطوبت نسبی فصلی را در ۴۹ ایستگاه در هند مطالعه نموده که نتایج نشان داد نرخ افزایش رطوبت نسبی در شمال غربی هند ۵،۴ درصد است و پس از این منطقه، بیشترین نرخ افزایش را به ترتیب سواحل غربی، بخش مرکزی و جنوب هند دارند. رطوبت نسبی در هند به دلیل باران‌های موسمی روند افزایشی دارد. Sein و همکاران (۲۰۲۱) به‌منظور بررسی تغییرات سالانه و فصلی دمای هوا، رطوبت نسبی و همچنین دمای نقطه شبنم مطالعه‌ای در ۴۷ ایستگاه واقع در اطراف میانه‌ار از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۹ انجام دادند. نتایج نشان داد رطوبت نسبی افزایش قابل‌توجهی در منطقه شمالی و کاهش در منطقه خشک مرکزی داشته است. در این مطالعه دمای نقطه شبنم و رطوبت نسبی رابطه خطی نسبتاً قابل قبولی از خود نشان دادند. Sachindra و Nowosad (۲۰۲۲) تغییرات رطوبت نسبی ۴۴ ایستگاه لهستان را در دوره ۱۹۹۵-۲۰۲۰ بررسی نمودند. نتایج نشان‌دهنده یک روند کاهشی در منطقه مورد مطالعه در میانگین رطوبت نسبی در دوره فوق بود. این روند در ایستگاه‌های مرکزی و شمال غربی لهستان بیشتر مشهود بود. Cséplő و همکاران (۲۰۲۲) مطالعه‌ای به‌منظور بررسی و تحلیل تغییرات طولانی مدت (۱۹۶۱-۲۰۲۰) رطوبت نسبی و دما در مجارستان انجام دادند. نتایج نشان‌دهنده افزایش قابل‌توجه دما و کاهش قابل‌توجه رطوبت نسبی تنها در بهار و تابستان بود. تغییر فصلی نشان داد که تغییر دما مستقیماً بر تغییر رطوبت نسبی در تابستان تأثیر می‌گذارد و افزایش تبخیر ناشی از افزایش دما ممکن است تأثیر گرم شدن را کاهش دهد. Katiraei و همکاران (۲۰۱۱) در پژوهشی روند تغییرات رطوبت نسبی و ویژه را در مقیاس سالانه و فصلی در ایستگاه‌های سینوپتیک ایران طی سال‌های ۱۹۷۶-۲۰۰۵ بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده روند کاهش رطوبت نسبی در بیشتر ایستگاه‌های مورد مطالعه بود. Kousari و Asadi Zarch (۲۰۱۱) مطالعه‌ای به‌منظور بررسی روند بارش و رطوبت نسبی در برخی از مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران انجام دادند. نتایج آنان نشان داد که رطوبت نسبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک روند کاهشی دارد. برای شرایط نامناسب ایجاد شده در سال‌های اخیر نیاز به بررسی تغییرات اقلیمی و روند متغیرهای اقلیمی در ایران به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک آن وجود دارد. مطالعه حاضر به‌منظور تجزیه و تحلیل روند رطوبت در ۱۳ ایستگاه استان خراسان رضوی انجام شد.

• منطقه مورد مطالعه

استان خراسان رضوی در شمالی شرقی ایران و در طول جغرافیایی 33° - 38° شرقی و در عرض جغرافیایی 33° - 38° شمالی با مساحت 117200 کیلومتر مربع گسترش یافته است. متوسط سالانه بارندگی در این استان 250 میلی‌متر گزارش شده است. این پژوهش با استفاده از داده‌های رطوبت نسبی در 13 ایستگاه سینوپتیک این استان در طول دوره آماری مختلف انجام شده است. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه در شکل (۱) آورده شده است. در میان ایستگاه‌ها مشهد با 71 سال آمار، بالاترین دوره آماری و درگز با 14 سال آمار، کمترین دوره آماری را داشتند. اطلاعات جغرافیایی و طول دوره آماری ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول (۱) آورده شده است. آنالیز روند در سه مقیاس زمانی ماهانه، فصلی و سالانه برای مناطق مورد نظر انجام گرفت.



شکل ۱- نقشه توزیع مکانی ایستگاه‌های همدید در منطقه مورد مطالعه

جدول ۱- مشخصات جغرافیایی و تعداد سال‌های آماری مورد استفاده در ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه

ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع	سال‌های آماری
تربت جام	$35^{\circ} 35'$	$35^{\circ} 16'$	$950/4$	$1372-1400$
تربت حیدریه	$59^{\circ} 13'$	$35^{\circ} 20'$	1451	$1338-1400$
خواف	$60^{\circ} 9'$	$34^{\circ} 35'$	998	$1385-1400$
درگز	$59^{\circ} 4'$	$37^{\circ} 28'$	514	$1387-1400$
سبزوار	$57^{\circ} 39'$	$36^{\circ} 13'$	962	$1334-1400$
سرخس	$61^{\circ} 10'$	$36^{\circ} 33'$	235	$1363-1400$
فریمان	$59^{\circ} 50'$	$35^{\circ} 35'$	1460	$1385-1400$
قوچان	$58^{\circ} 30'$	$37^{\circ} 4'$	1278	$1363-1400$
کاشمر	$58^{\circ} 28'$	$35^{\circ} 16'$	1110	$1366-1400$
گلمکان	$59^{\circ} 17'$	$36^{\circ} 29'$	1176	$1366-1400$
گناباد	$58^{\circ} 41'$	$34^{\circ} 21'$	1056	$1367-1400$
مشهد	$59^{\circ} 38'$	$36^{\circ} 14'$	$999/2$	$1330-1400$
نیشابور	$58^{\circ} 48'$	$36^{\circ} 16'$	1213	$1371-1400$

• روش‌شناسی

مطالعه حاضر بر روی تشخیص روند در رطوبت نسبی برای استان خراسان رضوی صورت گرفت. در مطالعه حاضر از آزمون ناپارامتریک، معروف به آزمون من-کندال (MK) برای تشخیص روند رطوبت نسبی استفاده شد. اگرچه آزمون‌های روند پارامتریک قوی‌تر هستند، اما این روش‌ها نیاز به داده‌های با توزیع نرمال دارند. روش من-کندال روشی ناپارامتری است که تحت تأثیر توزیع واقعی داده‌ها نبوده و به شکست‌های ناگهانی به دلیل سری‌های زمانی ناهمگن، حساسیت زیادی ندارد. همچنین به مقادیر داده‌های پرت حساس نیست. به همین دلایل به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. از نقاط قوت این روش می‌توان به مناسب‌تر بودن کاربرد آن برای سری‌های زمانی که از توزیع آماری خاصی پیروی نمی‌کنند، اشاره نمود. با توجه به این آزمون، فرضیه صفر (H_0) فرض می‌کند که هیچ روندی وجود ندارد (داده‌ها مستقل و به‌صورت تصادفی مرتب‌شده‌اند) و این در برابر فرضیه جایگزین H_1 که فرض می‌کند روند وجود دارد، آزمایش می‌شود (Kumar و Farooq, 2021). قبل از انجام آزمون من-کندال ابتدا در مناطقی که داده‌های از دست رفته رطوبت نسبی وجود داشت با استفاده از روش رگرسیون خطی و مشابه با روش مورد استفاده به وسیله Afrifa-Yamoah و همکاران (2020) داده‌ها بازسازی و اصلاح گردیدند.

- آزمون پیش سفیدکردن:

آزمون من-کندال که برای تشخیص روند در یک سری زمانی استفاده می‌شود، زمانی که روی یک سری خود همبسته بدون روند اعمال شود، نتایج نادرستی از روند را نشان می‌دهد. پیش سفید کردن، این وضعیت را اصلاح می‌کند. به همین منظور آزمون پیش سفید برای حذف وجود هرگونه خودهمبستگی موجود در سری‌های زمانی در داده‌ها انجام شد، زیرا آزمون من-کندال فرض می‌کند که سری‌های زمانی خودهمبستگی ندارند. اما این آزمون در صورت وجود روند، قدرت آزمایش را کاهش می‌دهد. تحقیقات نشان داده است که به‌طور کلی، زمانی که آزمون دارای قدرت بالایی (ضریب تغییرات بسیار پایین، شیب روند زیاد و اندازه نمونه بزرگ) است، باید از پیش سفیدی اجتناب شود. در موارد دیگر، پیش سفید کردن از تشخیص کاذب یک‌روند غیر موجود، بدون افت قدرت قابل‌توجه در شناسایی روندی که وجود دارد، جلوگیری می‌کند؛ البته در استفاده از این آزمون باید احتیاط لازم را انجام داد (Bayazit و Öñöz, 2007؛ Razavi و Vogel, 2018). بنابراین پس از بررسی‌های لازم، ابتدا داده‌های رطوبت نسبی با استفاده از آزمایش پیش سفید، قبل از اعمال آزمون من-کندال پردازش شدند. این آزمون مطابق با روش انجام شده در پژوهش Sharma و همکاران (2015) و برنامه‌نویسی در نرم‌افزار MS-Excell 2019 انجام شد. پس از انجام این عملیات، آزمون من-کندال بر روی داده‌های جدید انجام گرفت.

آزمون من-کندال:

آزمون من-کندال با محاسبه اختلاف بین تک تک مشاهدات بایکدیگر و استخراج آماره S به شکل رابطه (۱) تعریف می شود. بدین ترتیب که مقادیر داده ها به عنوان سری های زمانی مرتب شده ارزیابی می شوند. هر یک مقدار داده با تمام مقادیر داده های بعدی مقایسه می شود. مقدار اولیه آماره S در روش من-کندال برابر صفر در نظر گرفته می شود. اگر مقدار داده مربوط به دوره زمانی بعدی، بالاتر از مقدار داده مربوط به دوره زمانی قبلی باشد، مقدار آماره S به میزان ۱، افزایش می یابد. از سوی دیگر، اگر مقدار داده از دوره زمانی بعدی کمتر از مقدار داده مربوط به دوره زمانی قبلی باشد، مقدار آماره S به مقدار ۱، کاهش می یابد. در نتیجه خالص افزایش ها و کاهش ها، مقدار نهایی S به دست می آید.

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

در این رابطه n، برابر با تعداد مشاهدات سری، x_i و x_j به ترتیب داده های iام و jام و زام سری و تابع علامت از رابطه (۲) محاسبه می شود.

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

با این فرض که داده ها مستقل و دارای توزیع یکسان هستند، Kendall (۱۹۷۵) میانگین و واریانس آماره S را با رابطه های (۳) و (۴) ارائه نمود. در این روابط n تعداد داده های مشاهداتی، m معرف تعداد سری هایی که در آن ها حداقل یک داده تکراری وجود دارد، t نیز مقدار فراوانی داده هایی با ارزش یکسان می باشد. مقدار نمره استاندارد شده Z نیز از رابطه (۵) محاسبه می گردد.

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

$$V_S = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=0}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (4)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{V_S}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{V_S}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

در یک آزمون دو دامنه جهت روندیابی سری داده ها، فرض صفر در صورتی که رابطه (۶) برقرار باشد، پذیرفته می شود.

$$|Z| \leq Z_{\alpha/2} \quad (6)$$

در این رابطه α سطح معنی داری است که برای آزمون در نظر گرفته شده و Z_{α} آماره توزیع نرمال استاندارد در سطح معنی داری α می باشد (Farooq و Kumar، ۲۰۲۱). فرضیه صفر در سطح اطمینان ۹۵٪ و ۹۰٪ برای رطوبت نسبی در هر ۱۳ ایستگاه در استان خراسان رضوی بررسی شد. همچنین مقدار روند در رطوبت نسبی از طریق آزمون رگرسیون خطی پارامتریک (یک روش پارامتری رایج) به دست آمد. رابطه خطی بین دو متغیر بایک خط مستقیم نشان داده می شود که x نشان دهنده متغیر زمان و m شیب خط رگرسیون و c عرض از مبدأ است. شیب به دست آمده پس از رسم نمودار رطوبت نسبی و زمان، نشان دهنده روند داده ها (مثبت یا منفی) می باشد. برای انجام آزمون آماری من-کندال از افزونه ۲۰۱۴ XLSTAT در نرم افزار Exell

استفاده شد. نمودارها با استفاده از نرم افزار Sigmaplot ترسیم گردید.

• مقایسه تبخیر-تعرق سالانه و رطوبت نسبی سالانه

سرعت تبخیر آب از هر سطحی، چه از سطح دریاچه یا از طریق روزنه های روی برگ گیاه، تحت تأثیر شرایط آب و هوایی است که شامل تابش خورشید، دما، رطوبت نسبی و باد (و سایر عوامل هواشناسی) می باشد. سرعت تبخیر در دماهای بالاتر بیشتر است. در هوای آفتابی و گرم از دست دادن آب در اثر تبخیر بیشتر از هوای ابری و خنک است. رطوبت یا میزان بخار آب هوا نیز بر تبخیر اثر دارد. هر چه رطوبت نسبی کمتر باشد، هوا خشک تر و میزان تبخیر بیشتر می شود. هر چه هوا مرطوب تر باشد، هوا به اشباع نزدیک تر است و تبخیر کمتری ممکن است رخ دهد (Farhat، ۲۰۱۸). به منظور ارزیابی تغییرات رطوبت نسبی و تبخیر-تعرق فائو پمن مانیت از نتایج تحقیقات Shirmohammadi-Aliakbarkhani و Saberali (۲۰۲۰) استفاده شد و روند تغییرات رطوبت نسبی و تبخیر-تعرق در مقیاس سالانه، بررسی شد.

نتایج و بحث

به منظور بررسی روند در داده های رطوبت نسبی در مقیاس ماهانه، سالانه و فصلی به کمک پکیج Timeseries analysis در افزونه ۲۰۱۴ XLSTAT در نرم افزار Exell، آزمون ناپارامتری من-کندال انجام گردید. مقادیر آماره Z در آزمون من-کندال در مقیاس ماهانه در ایستگاه های استان خراسان رضوی در جدول (۲) آورده شده است. همان طور که در جدول مشاهده می گردد، رطوبت نسبی در اکثر ماه ها در بیشتر مناطق مورد مطالعه، از روند معنی داری خاصی پیروی نمی کند، به طوری که در ایستگاه های خواف، درگز، فریمان، کاشمر، سرخس و نیشابور در هیچ یک از ماه های سال روندی در تغییرات رطوبت نسبی مشاهده نگردید که دلیل عدم روند در برخی ایستگاه ها مانند خواف، درگز و فریمان را می توان به کوتاه بودن طول دوره آماری نسبت داد. در ایستگاه تربت جام در تیرماه، در تربت حیدریه در ماه های مرداد، شهریور، مهر و بهمن، در سبزوار در تیر، مرداد، دی و بهمن، در گلستان در تیرماه و مرداد ماه، در گناباد در ماه های خرداد، تیر و دی، در ایستگاه مشهد در اکثر ماه های سال به جز در ماه های شهریور، مهر و آذر، رطوبت نسبی روند کاهشی نشان داد، اما در ایستگاه قوچان در ماه های خرداد و آذر روند رطوبت نسبی افزایشی بوده است. مقادیر آماره Z در آزمون من-کندال مقیاس فصلی و سالانه در ایستگاه های استان خراسان رضوی در جدول (۳) آورده شده است. نتایج نشان می دهد، رطوبت نسبی در اکثر ماه ها در بیشتر مناطق مورد مطالعه از روند معنی داری خاصی پیروی نمی کند، به طوری که در ایستگاه های خواف، درگز، فریمان، کاشمر، گناباد و نیشابور در هیچ یک از فصول سال روندی در تغییرات رطوبت نسبی مشاهده نشد.

جدول ۲- مقادیر آماره Z محاسبه شده از طریق آزمون من-کندال در مقیاس ماهانه در استان خراسان رضوی

ایستگاه	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
ترتیب جام	۰/۷۷	۰/۱۳	-۱/۷۶	-۲/۰۴*	-۱/۸۶	-۱/۵۲	-۱/۳۷	۰/۵۴	۰/۸۱	-۰/۸۹	-۰/۴۳	-۰/۲۸
ترتیب حیدریه	-۱/۳۲	-۱/۰۲	-۱/۸۹	-۱/۹۶	-۲/۰۸*	-۲/۱۰*	-۲/۱۸*	-۰/۴۰	۰/۳۱	-۱/۷۳	-۲/۶۲*	-۰/۹۵
خواف	۱/۰۹	۰/۵۹	-۰/۴۹	-۱/۲۹	۰/۸۹	۰/۵۹	۰/۰۰	-۰/۲۰	-۰/۱۰	-۰/۵۰	-۱/۰۹	۰/۰۰
درگز	۱/۵۳	۰/۱۱	-۰/۱۱	-۰/۰۰	۰/۹۹	۰/۵۵	-۰/۹۹	۰/۱۱	۰/۳۰	-۱/۱۹	-۰/۵۵	۰/۳۳
سبزوار	-۱/۰۶	-۰/۶۶	-۱/۸۸	-۲/۴۷*	-۲/۲۰*	-۱/۴۴	-۱/۲۸	۰/۶۶	۰/۶۶	-۲/۱۱*	-۲/۴۲*	-۰/۳۶
سرخس	۱/۱۳	۰/۵۵	-۰/۰۸	-۱/۹۱	-۰/۹۷	۱/۰۶	۱/۴۳	۱/۷۳	۱/۴۶	-۰/۴۳	-۰/۸۸	-۰/۵۹
فریمان	۱/۲۰	۱/۰۹	-۰/۸۹	-۰/۸۹	۰/۸۹	۰/۴۰	۱/۲۲	۰/۱۴	-۱/۳۱	-۱/۵۸	-۰/۹۹	۰/۹۹
قوچان	۱/۷۹	۱/۵۳	۲/۰۵*	۱/۱۵	-۰/۲۰	۰/۸۸	۰/۲۸	۱/۴۳	۲/۶۸*	-۰/۵۰	۰/۴۸	۰/۷۵
کاشمر	-۰/۰۶	-۰/۴۵	-۱/۷۳	-۱/۳۶	-۱/۷۳	-۰/۶۱	-۱/۷۰	۱/۴۶	۱/۱۶	-۱/۲۴	-۰/۵۷	-۰/۳۱
گلمکان	۰/۲۸	۰/۵۸	-۱/۱۳	-۲/۲۶*	-۲/۱۱*	-۱/۵۶	-۰/۲	۰/۵۱	۱/۹۲	-۱/۳۹	-۱/۵۶	-۰/۵۷
گناباد	۰/۶۲	-۰/۳۶	-۲/۳۱*	-۲/۱۱*	-۱/۶۹	-۰/۸۹	-۱/۱۶	۱/۶۰	۰/۵۶	-۲/۱۰*	-۱/۳۶	-۰/۵۶
مشهد	-۲/۸۴*	-۲/۴۵*	-۲/۶۵*	-۲/۶۰*	-۲/۰۲*	-۱/۹۲	-۱/۴۹	-۲/۳۱*	-۱/۱۱	-۲/۵۴*	-۴/۴۶*	-۳/۶۴*
نیشابور	۱/۳۲	-۰/۳۹	-۰/۱۸	-۱/۰۲	-۰/۶۸	۰/۳۱	-۱/۰۹	۱/۳۹	-۰/۳۴	-۱/۵۰	-۱/۴۳	-۰/۳۹

* مقادیر آماره آزمون من-کندال (Z) بیش از ۱/۹۶- است که نشان دهنده معنی داری روند تغییرات رطوبت نسبی در سطح ۹۵ درصد است

در ایستگاه‌های مشهد و تربت حیدریه روند کاهشی در رطوبت نسبی سالیانه مشاهده گردید. Kousari و Asadi Zarch (۲۰۱۱) در بررسی روند سالیانه رطوبت نسبی در ایستگاه مشهد، روند کاهشی و در ایستگاه‌های تربت حیدریه و سبزوار روندی در متوسط رطوبت نسبی سالیانه مشاهده نمودند. نتایج تحقیقات آن‌ها با نتایج به دست آمده در این تحقیق در ایستگاه مشهد و سبزوار مشابه بود، اما در ایستگاه تربت حیدریه نتایج متفاوت می‌باشد که دلیل اصلی آن را می‌توان به طول دوره آماری متفاوت در این تحقیق و تحقیقات آن‌ها مربوط دانست.

Katiraei و همکاران (۲۰۱۱) در بررسی روند سالانه و فصلی در ایستگاه‌های مشهد، سبزوار و تربت حیدریه در دوره زمانی (۲۰۰۵-۱۹۷۶) نشان دادند که رطوبت نسبی در مقیاس سالانه و فصلی در ایستگاه مشهد دارای روند معنی دار کاهشی می‌باشد. رطوبت نسبی در ایستگاه سبزوار در تمام مقیاس‌های مورد مطالعه و در ایستگاه تربت حیدریه در مقیاس سالانه و در فصول بهار و پاییز روند معنی داری نشان نداد. اما در ایستگاه تربت حیدریه در فصل زمستان روند کاهشی و در تابستان روند افزایشی نشان داد. نتایج تحقیقات آن‌ها با نتایج روند رطوبت نسبی فصلی و سالانه به جز در فصل پاییز در ایستگاه مشهد، با نتایج این پژوهش مشابه بود. روند رطوبت نسبی فصلی و سالانه در ایستگاه سبزوار به جز در فصل‌های تابستان و زمستان و در ایستگاه تربت حیدریه به جز در فصل‌های پاییز و تابستان، با نتایج این پژوهش مشابه بود که دلیل اصلی آن را می‌توان به طول دوره آماری متفاوت در این تحقیق و تحقیقات آن‌ها، مربوط دانست.

در ادامه به منظور بررسی دقیق‌تر روند تغییرات رطوبت نسبی

جدول ۳- مقادیر آماره Z محاسبه شده از طریق آزمون من-کندال در مقیاس فصلی و سالانه در استان خراسان رضوی

ایستگاه	بهار	تابستان	پاییز	زمستان	سالانه
ترتیب جام	-۰/۵۸	-۲/۹۱*	۰/۲۸	-۰/۹۶	-۰/۲۶
ترتیب حیدریه	-۱/۷۰	-۲/۰۶*	-۱/۰۷	-۲/۹۷*	-۲/۷۸*
خواف	۰/۵۹	۰/۴۹	۰/۰۰	-۰/۶۶	۰/۴۳
درگز	۰/۶۶	۰/۱۱	۰/۰۰	-۰/۹۹	۱/۵۳
سبزوار	-۱/۵۲	-۲/۲۶*	۰/۴۲	-۲/۴۴*	-۱/۸۶
سرخس	۰/۸۳	-۰/۷۰	۲/۰۴*	-۰/۵۴	۱/۳۷
فریمان	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۵	-۱/۲۰	۰/۲۱
قوچان	۱/۲۳	۰/۶۹	۲/۱۶*	-۰/۰۸	۰/۷۵
کاشمر	-۰/۹۴	-۱/۳۳	۰/۸۹	-۰/۵۷	-۰/۷۱
گلمکان	۰/۰۳	-۲/۳۳*	۰/۲۶	-۱/۶۵	-۰/۸۶
گناباد	-۰/۸۰	-۱/۶۹	۰/۷۱	-۱/۵۱	-۰/۶۰
مشهد	-۲/۸۵*	-۲/۲۶*	-۱/۹۱	-۳/۵۵*	-۲/۰۶*
نیشابور	-۰/۰۴	-۱/۲۸	۰/۳۴	-۱/۱۴	-۰/۲۸

* مقادیر آماره آزمون من-کندال (Z) بیش از ۱/۹۶- است که نشان دهنده معنی داری روند تغییرات رطوبت نسبی در سطح ۹۵ درصد است

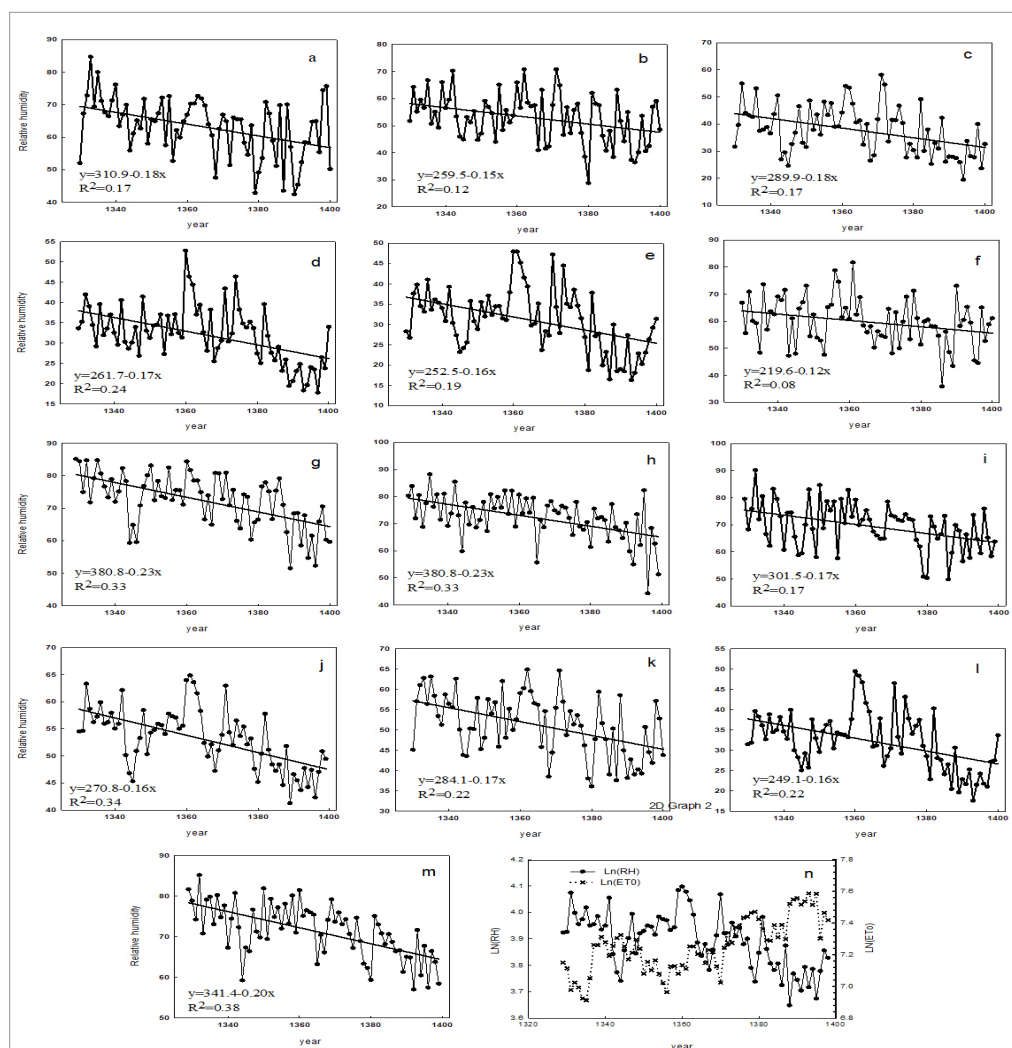
تغییرات رطوبت نسبی در فصل بهار تنها در ایستگاه مشهد روند کاهشی از خود نشان داد و در فصل تابستان رطوبت نسبی از یک روند کاهشی در مشهد، تربت جام، تربت حیدریه، گلمکان و سبزوار برخوردار بود. در فصل پاییز رطوبت نسبی دارای روند افزایشی در سرخس و قوچان بود. در فصل زمستان رطوبت نسبی روند کاهشی در ایستگاه‌های مشهد، سبزوار و تربت حیدریه نشان داد.

در مقیاس ماهانه، سالانه و فصلی در ایستگاه‌هایی که سری زمانی رطوبت نسبی در آنها معنی‌دار گردیده، هر کدام از ایستگاه‌ها بطور جداگانه مورد بحث قرار گرفته است. لازم به ذکر است که تنها در مقیاس‌های زمانی که سری زمانی رطوبت نسبی در ایستگاه معنی‌دار گردیده، نمودارهای تغییرات رطوبت نسبی رسم شده است. برای تعیین میزان افزایش یا کاهش در روند رطوبت نسبی در مقیاس‌های زمانی مختلف از مقیاس درصد/دهه استفاده گردید؛ بدین ترتیب که چنانچه شیب نمودار روند در ۱۰ ضرب شود، میزان درصد تغییرات در هر دهه محاسبه می‌شود.

• ایستگاه مشهد

جدول (۲) روند نزولی معنی‌داری در رطوبت نسبی ایستگاه مشهد در سطح ۹۵ درصد و در اکثر ماه‌های سال به جز شهریور، مهر و آذر را نشان می‌دهد. میزان این روند نزولی در ماه‌های فروردین، اردیبهشت، خرداد، تیر، مرداد، آبان، دی، بهمن و اسفند به ترتیب به میزان ۱/۸، ۱/۵، ۱/۷، ۱/۶، ۱/۲، ۲/۳، ۲/۳ و ۱/۷ درصد/دهه می‌باشد.

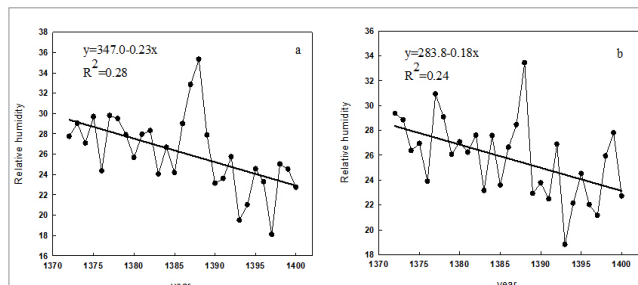
درحالی‌که در ماه‌های باقیمانده هیچ روند معنی‌داری در رطوبت نسبی در سطح ۹۵ درصد، مشاهده نگردید. همان‌طور که در جدول (۳) مشاهده می‌گردد، در مقیاس سالانه و فصلی رطوبت نسبی در این ایستگاه به جز در فصل پاییز روند نزولی معنی‌دار از خود نشان داد. میزان این روند نزولی در مقیاس سالانه و در فصل‌های بهار، تابستان و زمستان به ترتیب ۱/۶، ۱/۷، ۱/۶ و ۲ درصد/دهه می‌باشد. در شکل (m:a-۲) سری زمانی رطوبت نسبی با نمودار روند خطی در مقیاس‌های زمانی مختلف، ارائه شده است. در شکل (n-۲) تغییرات لگاریتم رطوبت نسبی و تبخیر-تعرق پمن مانیت‌آرانه شده است. رطوبت یا میزان بخارآب هوا، بر تبخیر اثر دارد. هر چه رطوبت نسبی کمتر باشد، هوا خشک‌تر و میزان تبخیر بیشتر می‌شود. هر چه هوا مرطوب‌تر باشد، هوا به اشباع نزدیک‌تر است و تبخیر کمتری ممکن است رخ دهد. نتایج این پژوهش هم این مطالب را تایید می‌نماید. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود هر زمان رطوبت نسبی کاهش یافته، مقدار تبخیر-تعرق افزایش یافته است.



شکل ۲- سری زمانی رطوبت نسبی و نمودار روند خطی در مقیاس‌های زمانی مختلف در ایستگاه مشهد a: فروردین‌ماه، b: اردیبهشت‌ماه، c: خردادماه، d: تیرماه، e: مردادماه، f: آبان‌ماه، g: دی‌ماه، h: بهمن‌ماه، i: اسفندماه، j: سالانه، k: فصل بهار، l: فصل تابستان، m: فصل زمستان، n: تغییرات رطوبت نسبی و تبخیر-تعرق سالانه

• ایستگاه تربت جام

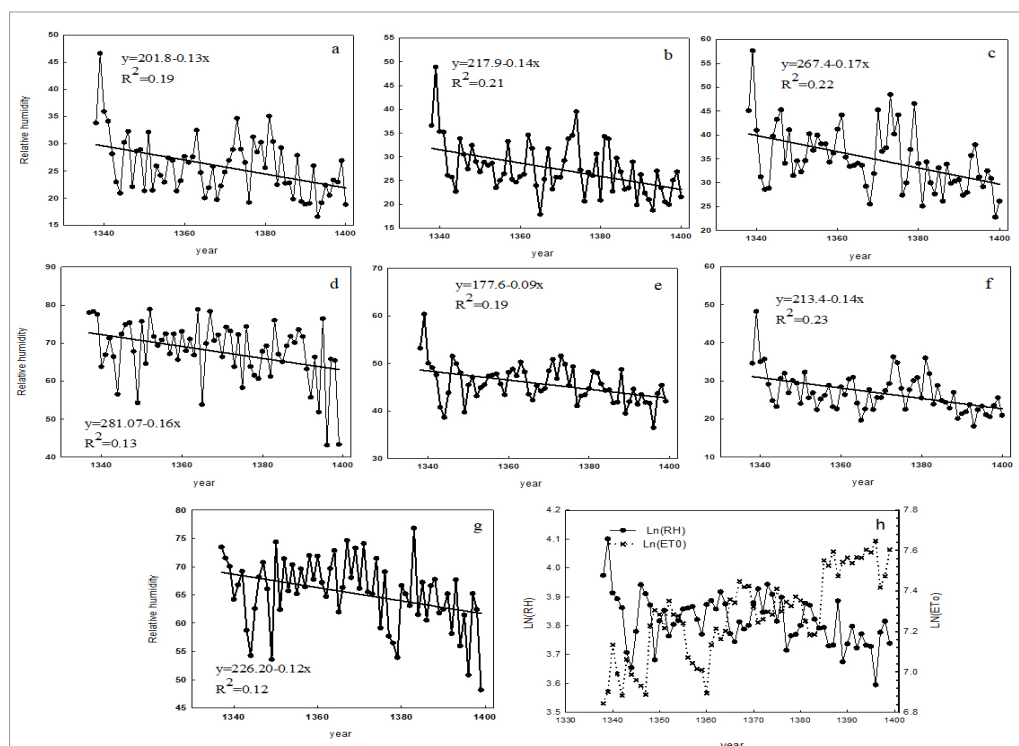
جدول (۲) و (۳)، روند نزولی معنی‌داری در رطوبت نسبی ایستگاه تربت‌جام در سطح ۹۵ درصد در تیرماه و در فصل تابستان را نشان می‌دهند. در دیگر ماه‌ها و فصل‌ها هیچ روند معنی‌داری در رطوبت نسبی در سطح ۹۵ درصد، مشاهده نشد. در مقیاس زمانی سالانه نیز روند رطوبت نسبی در این ایستگاه در سطح ۹۵ درصد معنی‌دار نشد. در شکل (۳) سری زمانی رطوبت نسبی با نمودار روند خطی در دو مقیاس زمانی آورده شده است. میزان این روند نزولی معنی‌دار در تیرماه و فصل تابستان به ترتیب $2/3$ و $1/8$ درصد/دهه به دست آمد.



شکل ۳- سری زمانی رطوبت نسبی و نمودار روند خطی در مقیاس‌های زمانی مختلف در ایستگاه تربت‌جام (a: تیرماه، b: فصل تابستان)

• ایستگاه تربت‌حیدریه

جدول (۲) روند نزولی معنی‌داری در رطوبت نسبی در این ایستگاه در سطح ۹۵ درصد در ماه‌های مرداد، شهریور، مهر و بهمن را نشان می‌دهد. میزان این روند نزولی در ماه‌های مرداد، شهریور، مهر و بهمن به ترتیب $1/3$ ، $1/4$ ، $1/7$ و $1/6$ درصد/دهه می‌باشد. درحالی‌که در ماه‌های دیگر، هیچ روند معنی‌داری در رطوبت نسبی در سطح ۹۵ درصد مشاهده نشد. در مقیاس سالانه و فصلی رطوبت نسبی در این ایستگاه به‌جز در فصل‌های بهار و پاییز، روند نزولی معنی‌دار از خود نشان داد (جدول ۳). میزان این روند نزولی در مقیاس سالانه و در فصل‌های تابستان و زمستان به ترتیب $1/9$ ، $1/4$ و $1/2$ درصد/دهه می‌باشد. در شکل (g:a-f) سری زمانی رطوبت نسبی با نمودار روند خطی در مقیاس‌های زمانی مختلف، آورده شده است. در شکل (h-f) تغییرات لگاریتم رطوبت نسبی و تبخیر-تعرق پهن مانیت‌آورد شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در هر سال که رطوبت نسبی سالیانه کمتر بوده است، مقدار تبخیر-تعرق افزایش‌یافته است و هر زمان رطوبت نسبی زیاد شده میزان تبخیر-تعرق کاهش‌یافته است.



شکل ۴- سری زمانی رطوبت نسبی و نمودار روند خطی در مقیاس‌های زمانی مختلف در ایستگاه تربت‌حیدریه (a: مردادماه، b: شهریورماه، c: مهرماه، d: بهمن‌ماه، e: سالانه، f: فصل تابستان، g: فصل زمستان، h: تغییرات رطوبت نسبی و تبخیر-تعرق سالانه)

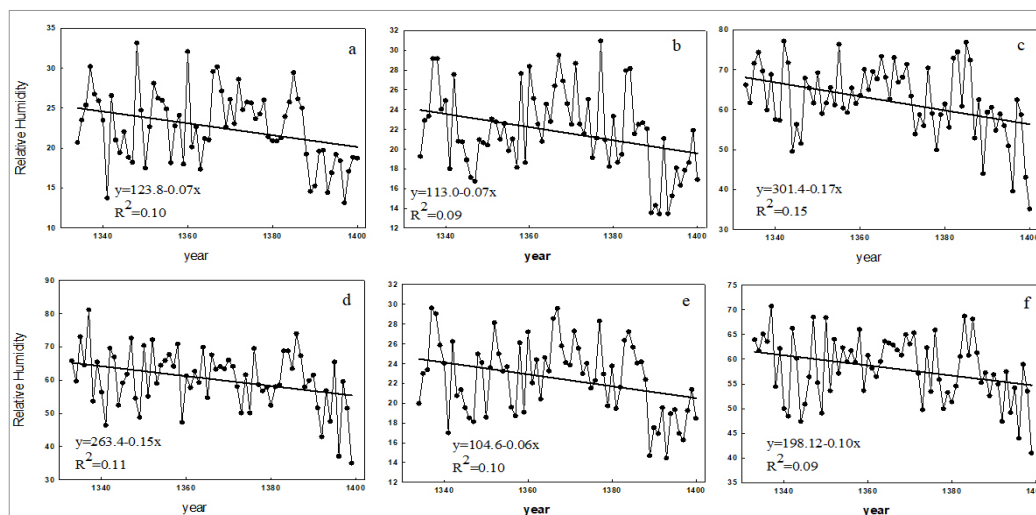
• ایستگاه سبزوار

را نشان می‌دهد. میزان این روند نزولی در ماه‌های تیر، مرداد، دی و بهمن به ترتیب به میزان $1/7$ ، $1/7$ ، $1/5$ و $1/5$ درصد/دهه می‌باشد. درحالی‌که در ماه‌های دیگر هیچ روند معنی‌داری در

جدول (۲) روند نزولی معنی‌داری در رطوبت نسبی در این ایستگاه در سطح ۹۵ درصد در ماه‌های تیر، مرداد، دی و بهمن

رطوبت نسبی در سطح ۹۵ درصد، مشاهده نگردید. همان‌طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود در مقیاس سالانه و فصلی رطوبت نسبی در این ایستگاه تنها در فصول تابستان و زمستان، روند نزولی معنی‌دار از خود نشان داد. در مقیاس سالانه این

روند معنی‌دار نشد. میزان این روند نزولی در فصل‌های تابستان و زمستان به ترتیب به میزان ۰/۶ و ۱ درصد/دهه می‌باشد. در شکل (۵-f) سری زمانی رطوبت نسبی با نمودار روند خطی در مقیاس‌های زمانی مختلف آورده شده است.



شکل ۵- سری زمانی رطوبت نسبی و نمودار روند خطی در مقیاس‌های زمانی مختلف در ایستگاه سبزوار (a): تیرماه، (b): مردادماه، (c): دی‌ماه، (d): بهمن‌ماه، (e): فصل تابستان، (f): فصل زمستان)

در سطح ۹۵ درصد مشاهده نشد. در مقیاس سالانه نیز این روند معنی‌دار نشد. در شکل (۷-a-c) سری زمانی رطوبت نسبی با نمودار روند خطی در مقیاس‌های زمانی مختلف آورده شده است.

• ایستگاه گلکان

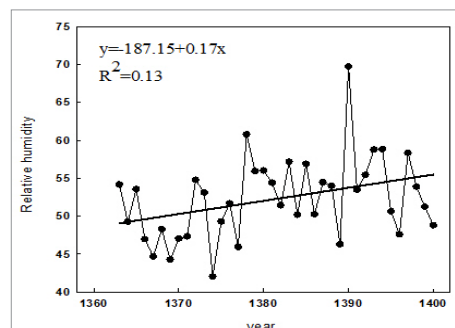
جداول (۲) و (۳) روند نزولی معنی‌داری در رطوبت نسبی در ایستگاه گلکان در سطح ۹۵ درصد در تیرماه، مرداد ماه و فصل تابستان را نشان می‌دهند. میزان این روند کاهشی در ماه‌های تیر، مرداد و فصل تابستان به ترتیب ۱/۹، ۱/۹ و ۱/۸ درصد/دهه می‌باشد. درحالی‌که در ماه‌های باقیمانده و سایر مقیاس‌های زمانی، هیچ روند معنی‌داری در رطوبت نسبی در سطح ۹۵ درصد مشاهده نشد. در شکل (۸) سری زمانی رطوبت نسبی با نمودار روند خطی در تیر، مرداد ماه و فصل تابستان آورده شده است. در مقیاس سالانه و سایر فصول، رطوبت نسبی در این ایستگاه روند معنی‌داری از خود نشان نداد.

• ایستگاه گناباد

جدول (۲) روند نزولی معنی‌داری در رطوبت نسبی در این ایستگاه در سطح ۹۵ درصد در ماه‌های خرداد، تیر و دی را نشان می‌دهد. میزان این روند نزولی در ماه‌های خرداد، تیر و دی به ترتیب ۱/۵، ۱ و ۳/۵ درصد/دهه می‌باشد. درحالی‌که در ماه‌های باقیمانده، هیچ روند معنی‌داری در رطوبت نسبی در سطح ۹۵ درصد مشاهده نگردید. همان‌طور که در جدول (۳) مشاهده می‌گردد در مقیاس سالانه و فصلی رطوبت نسبی در این ایستگاه روند معنی‌داری از خود نشان نداد. در شکل (۹) سری زمانی رطوبت نسبی با نمودار روند خطی در مقیاس‌های زمانی مختلف آورده شده است.

• ایستگاه سرخس

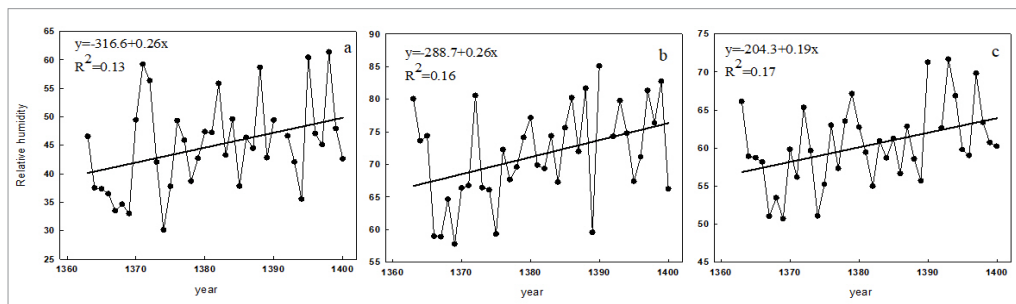
رطوبت نسبی در فصل پاییز ایستگاه سرخس در سطح ۹۵ درصد روند صعودی معنی‌داری را نشان می‌دهد (جدول ۳). در مقیاس ماهانه و سالانه رطوبت نسبی روند معنی‌داری در سطح ۹۵ درصد در این ایستگاه از خود نشان نداد. در شکل (۶) سری زمانی رطوبت نسبی با نمودار روند خطی در فصل پاییز آورده شده است. میزان این روند افزایشی معنی‌دار در فصل پاییز ۱/۷ درصد/دهه به دست آمد.



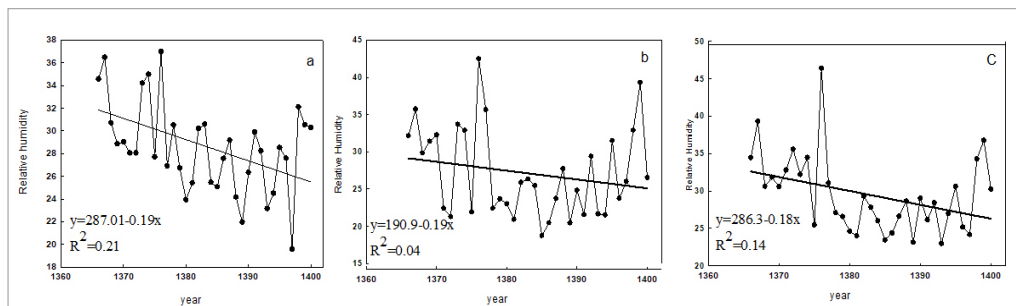
شکل ۶- سری زمانی رطوبت نسبی و نمودار روند خطی در فصل پاییز در ایستگاه سرخس

• ایستگاه قوچان

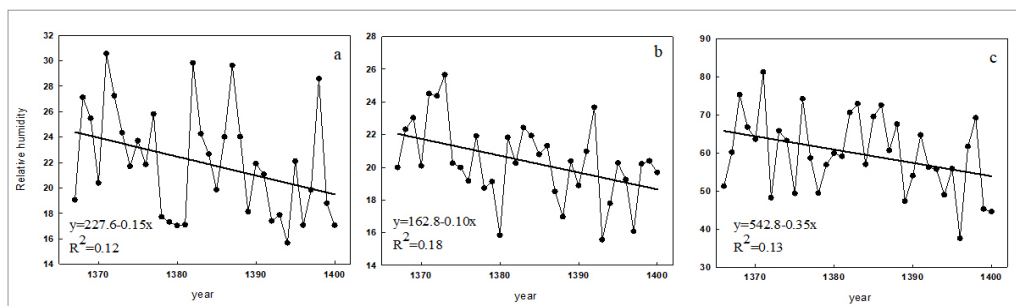
می‌توان از جداول (۲) و (۳) روند صعودی معنی‌داری در رطوبت نسبی ایستگاه قوچان در سطح ۹۵ درصد و در ماه‌های خرداد، آذر و فصل پاییز را مشاهده کرد. میزان این روند افزایشی در ماه‌های خرداد، آذر و فصل پاییز به ترتیب ۲/۶، ۲/۶ و ۱/۹ درصد/دهه می‌باشد. درحالی‌که در ماه‌های دیگر هیچ روند معنی‌داری در رطوبت نسبی



شکل ۷ - سری زمانی رطوبت نسبی و نمودار روند خطی در مقیاس‌های زمانی مختلف در ایستگاه قوچان (a: خردادماه، b: آذرماه، c: فصل پاییز)



شکل ۸ - سری زمانی رطوبت نسبی و نمودار روند خطی در مقیاس‌های زمانی مختلف در ایستگاه گل‌مکان (a: تیرماه، b: مردادماه، c: فصل تابستان)



شکل ۹ - سری زمانی رطوبت نسبی و نمودار روند خطی در مقیاس‌های زمانی مختلف در ایستگاه گناباد (a: خردادماه، b: تیرماه، c: دی‌ماه)

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

پژوهش حاضر روند ماهانه، فصلی و سالانه رطوبت نسبی با استفاده از روش تحلیل من-کندال در ۱۳ ایستگاه استان خراسان رضوی را ارزیابی نمود. رطوبت نسبی در اکثر ماه‌ها در بیشتر مناطق مورد مطالعه از روند معنی‌داری خاصی پیروی نمی‌کند، به‌طوری‌که در ایستگاه‌های خواف، درگز، سرخس، فریمان، کاشمر و نیشابور هیچ روند آماری معنی‌داری در سطح ۵ درصد در رطوبت نسبی مشاهده نشد. در ایستگاه تربت‌جام در تیرماه، در تربت‌حیدریه در ماه‌های مرداد، شهریور، مهر و بهمن، در سبزوار در تیر، مرداد، دی و بهمن، در گل‌مکان در تیر و مرداد، در گناباد در ماه‌های خرداد، تیر و دی، در ایستگاه مشهد در اکثر ماه‌های سال به‌جز در ماه‌های شهریور، مهر و آذر، رطوبت نسبی روند کاهشی از خود نشان داد. اما در ایستگاه قوچان در ماه‌های خرداد و آذر روند رطوبت نسبی افزایشی بوده است. تغییرات رطوبت نسبی در فصل بهار تنها در

ایستگاه مشهد روند کاهشی از خود نشان داد. در فصل تابستان رطوبت نسبی در مشهد، تربت‌جام، تربت‌حیدریه، گل‌مکان و سبزوار روند کاهشی دارد. در فصل پاییز رطوبت نسبی دارای روند افزایشی در سرخس و قوچان بود. در فصل زمستان رطوبت نسبی روند کاهشی در ایستگاه‌های مشهد، سبزوار و تربت‌حیدریه نشان داد. در ایستگاه‌های مشهد و تربت‌حیدریه روند کاهشی به ترتیب با میزان ۱/۶ و ۰/۹ درصد/دهه در رطوبت نسبی سالیانه مشاهده گردید. نتایج تحقیقات ما حاکی از روند کاهشی در میانگین رطوبت نسبی ماهانه، سالانه و فصلی، طی سال‌های اخیر در نیمی از ایستگاه‌های مورد مطالعه است. با توجه به اینکه رطوبت نسبی می‌تواند بر چرخه هیدرولوژیکی تأثیرگذار باشد، یافته‌های این مطالعه می‌تواند نتایج مفیدی در اجرای سیاست‌های مدیریت آب داشته باشد. علاوه بر این، این نتایج را می‌توان در آینده برای تجزیه و تحلیل در مدل‌سازی اثرات تغییر آب‌وهوا بر اقلیم در مناطق مختلف استان خراسان رضوی، استفاده نمود.

maximum, and mean annual temperatures, relative humidity, and precipitation trends in arid and semi-arid regions of Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 4(5), 907–914. <https://doi.org/10.1007/s12517-009-0113-6>

Mansouri Daneshvar, M. R., Ebrahimi, M. & Nejadsoleymani, H. (2019). An overview of climate change in Iran: facts and statistics. *Environmental Systems Research*, 8(1), 7. <https://doi.org/10.1186/s40068-019-0135-3>

Razavi, S. & Vogel, R. (2018). Prewhitening of hydroclimatic time series? Implications for inferred change and variability across time scales. *Journal of Hydrology*, 557, 109–115. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.053>

Sachindra, D. A. & Nowosad, M. (2022). Variations in relative humidity across Poland and its possible impacts on outdoor thermal comfort: An analysis based on hourly data from 1995 to 2020. *International Journal of Climatology*, 42(7), 3861–3887. <https://doi.org/10.1002/joc.7449>

Sein, Z. M. M., Ullah, I., Iyakaremye, V., Azam, K., Ma X., Syed, S. & Zhi, X. (2021). Observed spatiotemporal changes in air temperature, dew point temperature and relative humidity over Myanmar during 2001–2019. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 134(1), 7. <https://doi.org/10.1007/s00703-021-00837-7>

Sharma, P., Loliyana, V., Nagpal, G., S R, R., Tripathi, A., Timbadiya, P. V. & Patel, P. L. (2015). Investigation of Long-Term Trends and Temporal Variability of Rainfall in Surat District, Gujarat. 49th Annual Convention of IWWA on "Smart Water Management" At: VNIT Nagpur

Shirmohammadi-Aliakbarkhani, Z. & Saberali, S. F. (2020). Evaluating of eight evapotranspiration estimation methods in arid regions of Iran. *Agricultural Water Management*, 239, 106243. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106243>

Singh, P., Kumar, V., Thomas, T. & Arora, M. (2008). Changes in rainfall and relative humidity in river basins in northwest and central India. *Hydrological Processes - HYDROL PROCESS*, 22, 2982–2992. <https://doi.org/10.1002/hyp.6871>

Valdez-Cepeda, R., Hernández-Ramírez, D., Mendoza, B., Valdes, J. & Maravilla, D. (2011). Fractality of monthly extreme minimum temperature. *Fractals*, 11(2), 137–144. <https://doi.org/10.1142/S0218348X0300163X>

Wijngaarden, W. and Vincent, L. (2004). Trends in Relative Humidity in Canada from 1953–2003.

- | | |
|----------------------|---------------------|
| 1-Ranichauri | 2-Leh |
| 3-Srinagar | 4-Mann-Kendall test |
| 5-Pre whitening test | |

منابع

Afrifa-Yamoah, E., Mueller, U. A., Taylor, S. M. & Fisher, A. J. (2020). Missing data imputation of high-resolution temporal climate time series data. *Meteorological Applications*, 27(1), 1873. <https://doi.org/10.1002/met.1873>

Bayazit, M. & Önöz, B. (2007). To prewhiten or not to prewhiten in trend analysis? *Hydrological Sciences Journal*, 52(4), 611–624. <https://doi.org/10.1623/hysj.52.4.611>

Cséplő, A., Izsák, B. & Geresdi, I. (2022). Long-term trend of surface relative humidity in Hungary. *Theoretical and Applied Climatology*, 149(3), 1629–1643. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04127-z>

Farhat, N. (2018). Effect of relative humidity on evaporation rates in Nabatieh Region. *Lebanese Science Journal*, 19(1), 59–66. <https://doi.org/10.22453/LSJ-019.1.059-066>

Farooq, Z. & Kumar, R. (2021). Spatial and temporal trend analysis of relative humidity in the Himalayan region: a case study. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(21), 2237. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08624-9>

Gaffen, D. J. & Ross, R. J. (1999). Climatology and Trends of U.S. Surface Humidity and Temperature. *Journal of Climate*, 12(3), 811–828. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<0811:CATOUS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<0811:CATOUS>2.0.CO;2)

IPCC. (2014). Climate change: 2014. synthesis report (SYR). Intergovernmental panel on climate change, Geneva; p. 151. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr>

Katiraei, P. S., Arkyan, F. & Rezaei Farkosh, R. (2011). Trend of humidity (specific and relative) in synoptic stations in Iran in period 1976–2005. *JMSTR*, 6(2), 17–29. https://jmstr.ntb.iau.ir/article_522960.html

Kendall, M.G. (1975). Rank Correlation Methods, 4th edn. London, Charles Griffin.

Khan, P. I., Ratnam, D. V., Prasad, P., Basha, G., Jiang, J. H., Shaik, R., Ratnam, M. V. & Kishore, P. (2022). Observed Climatology and Trend in Relative Humidity, CAPE, and CIN over India. In *Atmosphere*, 13(2), 361. <https://doi.org/10.3390/atmos13020361>

Kousari, M. R. & Asadi Zarch, M.A. (2011). Minimum,

Analytical Assessment of Future Climate Changes in the Amol-Babol Plain Using the Main Variables Affecting Its Trend

A. Gholami

Assistant Professor, Faculty of Technical and Engineering, Shomal University, Amol, Iran.

Email: gholami@shomal.ac.ir

Received: 12-03-2023

Revised: 01-05-2023

Accepted: 23-05-2023

Available Online: 21-09-2022

سنجش تحلیلی تغییرات اقلیمی آبی در دشت آمل-بابل با استفاده از متغیرهای اصلی اثرگذار بر روند آن

عباس غلامی

استادیار دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شمال، آمل، ایران.

E-Mail: gholami@shomal.ac.ir

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۱۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۶/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۰۲

Abstract

According to the base period selected in this research and the average monthly precipitation and temperature, the base period extracted from the statistics of the nearest synoptic station to the study area, the average monthly precipitation and temperature of the future years were simulated by the famous climate model LARS-WG5. Based on the results of this research, it is revealed that from the first of January to the first of March, the average monthly rainfall will increase in the future periods compared to the base period, it will decrease in the month of March and a relative increase in the amount of rainfall will be seen in the rest of the year, that will be more evident in October and November. The decrease of rainfall in the coming months of March due to the beginning of the vegetation period and the water requirement of agricultural plants, Also premature fall of pastures due to drought stress has an effective role in changing hydrological processes and naturally its effect on other environmental components. Regarding the current and future temperature situation, according to the climate change scenarios, the monthly temperature from the HADCM3 model for different months of the year shows the highest temperature changes in the months of March, June, and January, respectively, which indicates the warming of early spring and early summer, as well as It is the beginning of winter in the future periods that these phenomena will have a significant impact on the flowering time of plants, creating water stress in these seasons.

Keywords: Precipitation Amounts, Temperature Changes, Climate Scenarios, Amol-Babol Plain.

چکیده

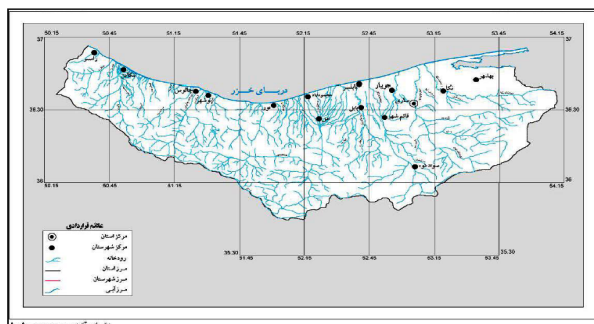
باتوجه به دوره پایه انتخاب شده در این پژوهش و میانگین بارش و دمای ماهانه، دوره پایه استخراج شده از آمار نزدیکترین ایستگاه سینوپتیک به محدوده مطالعاتی، میانگین بارش و دمای ماهانه سالهای آینده توسط مدل مشهور آب و هوایی LARS-WG5 شبیه سازی شد. براساس نتایج این پژوهش آشکار می شود که از اول ماه ژانویه تا اول ماه مارس میانگین بارش ماهانه در دوره های آینده نسبت به دوره پایه افزایش می یابد، در ماه مارس کاهش و در بقیه ماه های سال افزایش نسبی در مقدار بارش را شاهد خواهیم بود که این موضوع در ماه اکتبر و نوامبر مشهودتر است. کم شدن بارش ماه های مارس آبی باتوجه به شروع دوره رویش گیاهی و نیاز آبی گیاهان زراعی و همچنین خزان زود هنگام مراتع در اثر تنش خشکی نقش موثری در تغییر فرایندهای هیدرولوژیکی و طبعاً تأثیر آن بر سایر مولفه های محیط زیست دارد. در مورد وضعیت دمایی حال و آینده باتوجه به سناریوهای تغییر اقلیم دمای ماهانه از مدل HADCM3 برای ماه های مختلف سال نیز نشان دهنده بیشترین تغییرات دمایی به ترتیب در ماه های مارس، ژوئن و ژانویه می باشد که نشان دهنده گرم تر شدن اوایل بهار و اوایل تابستان و همینطور اوایل زمستان در دوره های آینده می باشد و این تغییرات دمایی نیز بر روی زمان گل دهی گیاهان، ایجاد تنش آبی در این فصول تأثیر قابل توجهی خواهد گذاشت.

واژه های کلیدی: مقادیر بارش، تغییرات دمایی، سناریوهای اقلیمی، دشت آمل-بابل.

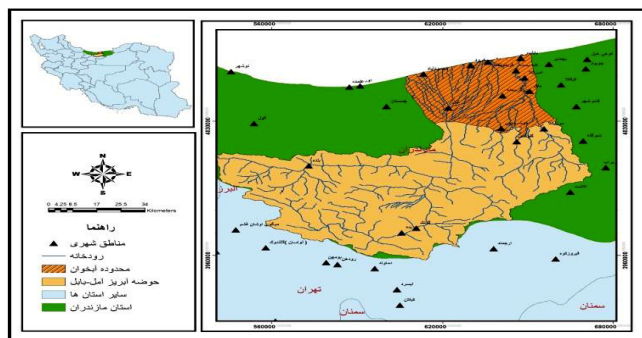
بسیاری از محققین قرار گرفته است (Feola و همکاران، ۲۰۱۵). بخش کشاورزی به دلیل تعاملات گسترده‌ای که با محیط دارد، بیشترین تأثیر را از پدیده تغییر اقلیم می‌پذیرد (Pradhan و همکاران، ۲۰۱۵؛ Walthall و همکاران، ۲۰۱۲) و در نتیجه ضمن تغییر شرایط تولید باعث تغییرات رفاهی نیز در سطح جامعه می‌شود. باتوجه به اتکای مستقیم کشاورزی بر منابع طبیعی، مردمی که معیشت خود را از این بخش تأمین می‌کنند، به دلیل اثرپذیری از تغییر اقلیم، به شدت آسیب‌پذیر می‌باشند (Deressa و همکاران، ۲۰۰۸؛ Haden و همکاران، ۲۰۱۲؛ Thorlakson و Neufeldt، ۲۰۱۲). باتوجه به مباحث مطرح شده فوق در خصوص تأثیر تغییرات اقلیمی در حوضه مطالعاتی آینده، قابل ذکر است که محققان متعددی از روش‌های بسیار متنوعی برای بررسی این موضوع در نقاط مختلف دنیا استفاده نمودند به‌عنوان نمونه به چند مورد آن اشاره می‌شود: Souvignet و همکاران (۲۰۱۰) در تحقیقی به بررسی عملکرد مدل ریز مقیاس نمایی آماری SDSM تحت سناریوهای A2 (مقدار بالای CO₂ و بدون پایداری آن) و B2 (مقدار متوسط به پائین CO₂ با اندازه ۶۵۰ قسمت در میلیون) مدل گردش عمومی جو HadCM3 در حوضه الکیو شیلی پرداختند و عملکرد این مدل را قابل قبول گزارش کردند. Abdo و همکاران (۲۰۰۹) اثر تغییر اقلیم بر پارامترهای دمای کمینه و بیشینه و بارش با مدل گردش عمومی HadCM3 را بررسی کردند و برای ریز مقیاس نمایی از روش‌های آماری تحت سناریوهای A2 و B2 استفاده کردند. Vanuytrechta و همکاران (۲۰۱۴) اثرات تغییرات اقلیمی بر برداشت غلات با استفاده از مدل‌ها و سناریوهای GCM، EU-ENSEMBLES و با کاربرد مدل LARS-WG را ارزیابی کردند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد انتخاب یک یا دیگر سناریوها (با وضوح متفاوت مدل‌های اقلیمی) در ارزیابی عدم قطعیت مدل تأثیر می‌گذارد. Lu و همکاران (۲۰۱۵) تغییرات هیدرولوژیکی تحت تأثیر تغییرات اقلیمی در آینده نزدیک با استفاده از مدل REGCM4 در آفریقای جنوبی را با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی بزرگ مقیاس بررسی کردند. آنها در کل نتیجه‌گیری نمودند که ما در آینده شاهد افزایش دما در آفریقای جنوبی و نیز شاهد تغییرات بارش ماه‌های مختلف در زیر حوضه‌های آن منطقه خواهیم بود. آنها همچنین نتیجه‌گیری نمودند که ما در آینده نزدیک شاهد افزایشی در رواناب و تبخیر و تعرق واقعی حوضه در بخش شرق آفریقای جنوبی، موزامبیک جنوبی و مالاوی را مشاهده خواهیم نمود و براساس آن کاهشی در عوامل ذکر شده در امتداد خشک‌ترین مناطق در محدوده گسترده‌ای از صحرای کالاهاری را شامل خواهد شد و همینطور علائم نیرومند تغییرات اقلیمی در نواحی حاره‌ای مرطوب این قاره در نواحی آنگولا، مالاوی و جنوب جمهوری کنگو وجود دارد و نشانه‌های بارزی حاکی از تغییرات اقلیمی در آفریقای جنوبی

افزایش جمعیت کره زمین که باعث تغییر کاربری زمین، تخریب جنگل‌ها، افزایش فعالیت‌های کشاورزی و دامداری و تولید ضایعات جامد و مایع شده، پیامدهایی گوناگون به همراه داشته است که پدیده تغییر اقلیم یکی از آنها است. براساس تعریف هیئت بین دولتی تغییرات آب‌وهوایی (IPCC)^۱ تغییر اقلیم، عبارت است از تغییر برگشت‌ناپذیر در متوسط شرایط آب‌وهوایی یک منطقه نسبت به رفتاری که در طول یک افق زمانی بلندمدت از اطلاعات مشاهده یا ثبت شده در آن منطقه مورد انتظار است (Parry و همکاران، ۲۰۰۷). باوجودی که تغییر اقلیم در برخی از مناطق جهان به‌ویژه نواحی واقع در عرض‌های شمالی بالاتر از ۵۵ درجه اثرات مثبتی بر تولیدات کشاورزی به همراه خواهد داشت (Ewert و همکاران، ۲۰۰۵). امروزه با افزایش فعالیت‌های انسانی، غلظت گازهای گلخانه‌ای افزایش یافته و باعث گرم شدن کره زمین و در نهایت، منجر به تغییراتی گسترده در آب‌وهوای جهان خواهد شد. این تغییرات ممکن است باتوجه به هر منطقه اثرات مثبت، خنثی و حتی منفی نیز داشته باشد (Janjua و همکاران، ۲۰۱۴). ازجمله مهمترین گازهای گلخانه‌ای دی‌اکسیدکربن (CO₂)، اکسید نیتروژن (N₂O)، متان (CH₄) و بخار آب می‌باشد که فعالیت‌های انسانی باعث تغییر در ترکیب و افزایش غلظت این گازها شده و در نهایت منجر به افزایش دمای زمین و پدیده تغییر اقلیم می‌شود (Baier و Motha، ۲۰۰۵). روی هم رفته، اقلیم، شرایط متوسط آب‌وهوا برای محدوده‌ای ویژه و یک دوره خاص است. فعالیت‌های بشری دهه‌های اخیر جدا از ایجاد آلودگی‌های محیط‌زیستی باعث گرمایش کره زمین شده است (Parry و همکاران، ۲۰۰۷) به‌طوری‌که در قرن بیستم، میانگین دمای جهانی حدود ۰/۶ درجه سانتیگراد افزایش یافته است (Christopher و همکاران، ۲۰۱۴) و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۱۰۰ این مقدار بین ۴/۱ تا ۸/۵ درجه سانتیگراد دیگر نیز افزایش یابد (Stocker و همکاران، ۲۰۱۳). این گرمایش جهانی باعث به وجود آمدن مشکلاتی ازجمله ذوب شدن یخ‌های قطبی، یخ رودها و یخچال‌های طبیعی (Barrett، ۲۰۱۴)، تشدید وقوع بلایای طبیعی ازجمله سیل، طوفان و خشکسالی (Haden و همکاران، ۲۰۱۲)، نوسانات دمای سطح آب دریا و اقیانوس‌ها (Solomon و همکاران، ۲۰۰۹)، تغییر در زنجیره غذایی اکوسیستم‌های طبیعی و تهدید امنیت غذایی (IFAD، ۲۰۱۵؛ Parry و همکاران، ۲۰۰۷) خواهد شد که ادامه این وضعیت بدون شک باعث انهدام آینده بشری و محیط‌زیست خواهد شد (Christopher و همکاران، ۲۰۱۴). امروزه مبحث تغییر اقلیم به دلیل اثرات مستقیم و غیرمستقیم آن بر روی اکوسیستم‌های طبیعی و زراعی از یک طرف (Wang، ۲۰۱۲) و سیستم‌های اجتماعی انسانی از طرف دیگر مورد توجه

آمل- بابل بر روی عکس هوایی را نشان می‌دهد. در جدول (۱) نیز مشخصات جغرافیایی ایستگاه سینوپتیک بابلرس آورده شده است.



شکل ۱- موقعیت رودخانه‌ها و حوزه‌های آبخیز مازندران



شکل ۲- موقعیت جغرافیایی دشت آمل-بابل بر روی عکس هوایی

جدول ۱- موقعیت ایستگاه سینوپتیک بابلرس

طول جغرافیایی: ۵۲° و ۳۹'	عرض جغرافیایی: ۳۶° و ۴۳'
ارتفاع از سطح دریای آزاد: ۲۱- متر	تاریخ تاسیس: ۱۳۳۰

• معرفی مدل LARS-WG

مدل LARS-WG یکی از مشهورترین مدل‌های مولد داده‌های تصادفی وضع هوا می‌باشد که برای تولید مقادیر بارش، تابش، درجه حرارت‌های بیشینه و کمینه روزانه در یک ایستگاه تحت شرایط اقلیم حاضر و آینده به کار می‌رود. اولین نسخه آن در بوداپست طی سال ۱۹۹۰ به عنوان ابزاری برای ریز مقیاس نمایی آماری در کشور مجارستان ابداع شد. شایان ذکر است این مدل برای مدل‌سازی متغیرهای هواشناسی، توزیع‌های آماری پیچیده‌ای را به کار می‌برد. خروجی‌های این مدل شامل دمای کمینه، دمای بیشینه، بارش و تابش می‌باشند (Downing و همکاران، ۲۰۰۰). آخرین مدل این نرم‌افزار عبارت است از LARS-WG5 که در تولید داده‌های تصادفی هواشناسی در دوره زمانی طولانی توسعه زیادی یافته و کاملاً پیشرفته است. این مدل به منظور مدل‌سازی متغیرهای هواشناسی توزیع‌های

می‌باشد. Hashemi و همکاران (۲۰۱۰) توانایی هر دو مدل SDSM و LARS-WG برای شبیه‌سازی فراوانی بارش‌های حداکثر حاصل از شرایط فعلی حوضه کلوتا در جنوب نیوزیلند را ارزیابی کردند و به این نتیجه رسیدند هر دو مدل توانایی قابل قبولی برای شبیه‌سازی اقلیم دارند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان مازندران را براساس خصوصیات دما و بارش و توپوگرافی منطقه می‌توان به دو نوع آب‌وهوای معتدل خزری و آب‌وهوای کوهستانی تقسیم کرد. آب‌وهوای کوهستانی خود بر دو نوع معتدل کوهستانی و سرد کوهستانی می‌باشد. ۱- آب‌وهوای معتدل خزری: این نوع اقلیم جلگه‌های غربی و مرکزی استان تا کوهپایه‌های شمال البرز را شامل می‌شود. در این نواحی به دلیل فاصله کوتاه کوهستان و دریا، رطوبت تجمع می‌یابد، که پیامد آن را می‌توان بارش‌های قابل ملاحظه و دمای معتدل بیان کرد و ۲- آب‌وهوای معتدل کوهستانی: با افزایش تدریجی ارتفاع از اراضی جلگه‌های دامنه‌های شمالی ارتفاعات البرز و فاصله دریا، تغییرات خاصی در آب‌وهوای استان پدیدار می‌شود. در نوار ارتفاعی ۱۵۰۰ تا ۳۰۰۰ متر شرایط آب‌وهوایی کوهستانی حاکم است که از ویژگی‌های این محدوده می‌توان کاهش میزان بارندگی سالیانه و همچنین کاهش متوسط درجه حرارت نسبت به بخش جلگه‌ای را بیان کرد. موقعیت جغرافیایی ویژه استان مازندران به عنوان یکی از استان‌های ساحلی دریای خزر سبب شده است در طول سال از اثرات آب‌وهوایی همسایگانی چون سرزمین پهناور سیرری، دریای مدیترانه و دریای خزر و فلات مرکزی ایران بهره‌مند شود. دشت آمل-بابل در بخش مرکزی مازندران بین طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۵۲ درجه و ۵۰ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۴۵ درجه و ۳۵ دقیقه تا ۴۵ درجه ۳۶ دقیقه شمالی قرار دارد. وسعت آن ۶۸۰۴ کیلومترمربع است که در حدود ۱۴۸۰ کیلومترمربع آن را دشت مورد مطالعه و بقیه را دشت‌های پراکنده در ارتفاعات شامل می‌شود. در سطح دشت حداکثر ارتفاع ۲۵۰ متر و حداقل آن زیر سطح دریای آزاد قرار دارد و ارتفاع متوسط دشت از سطح دریا ۱۶ متر می‌باشد. حوضه آبریز رودخانه‌های ساحلی، بخش میانی حوزه آبریز دریای مازندران را تشکیل می‌دهد. دشت آمل بابل اکثراً به وسیله تشکیلات کواترنری^۲ پوشیده شده است و قسمت کوچکی از آن متعلق به سازندهای میوسن و پلیوسن است (گزارش فیزیوگرافی حوزه آبخیز بابل - آمل، ۱۳۹۱). شکل (۱) موقعیت رودخانه‌ها و حوزه‌های آبخیز مازندران و شکل (۲) موقعیت جغرافیایی دشت

آماري پيچيده‌اي را به‌کار مي‌برد. مبنای اين مدل براي مدل‌سازي طول دوره‌هاي خشک و تر، بارش روزانه و سري‌هاي تابش توزيع نيمه تجربي مي‌باشد. شبیه‌سازي بارندگي براساس روزهاي تر و خشک مدل‌سازي مي‌شود، درحالي‌که روزهاي تر به روزي اطلاق مي‌شود که بارندگي بيشتر از صفر ميلي‌متر باشد. طول هر سري به طور اتفاقي در هر ماه انتخاب مي‌شوند. براي محاسبه روزهاي خشک، ميزان بارندگي از توزيع نيمه تجربي بارندگي براي ماه خاصي که به سري‌هاي تر يا به ميزان بارندگي در روز قبل بستگي ندارد، ايجاد مي‌شود (Harmel و همکاران، ۲۰۲۲). ورودی‌هاي اين مدل آمار روزانه اقليمي شامل ميزان بارندگي، دما و تابش است و خروجی‌هاي اين مدل شامل دمای کمينه، دمای بیشينه، میانگین دمای ماهانه و سالانه، مقادير بارش و تابش مي‌باشند. توليد داده توسط مدل در سه مرحله کالبره کردن، ارزيابي و ايجاد داده‌هاي هواشناسي انجام مي‌شود در اين مدل داده‌هاي مدل گردش عمومي جو شامل بارش، دمای کمينه، دمای بیشينه و تابش HADCM3 به‌صورت روزانه استخراج شده و براي هر شبکه از مدل گردش عمومي جو يك سناريوي خاص مدل تدوين مي‌شود. براي تدوين اين سناريو داده‌هاي شبکه‌اي مدل HAD-CM3 در دوره ارزيابي بايد با دوره پايه مقايسه شود. در اين جا دوره پايه ۳۰ ساله محدوده زمانی ۱۹۸۵-۲۰۱۴ و دوره‌هاي ۲۰ ساله ۲۰۳۰-۲۰۱۱، ۲۰۶۵-۲۰۴۶ و ۲۰۹۹-۲۰۸۰ باتوجه‌به تعريف محدوده‌هاي زمانی در مدل در نظر گرفته شده است. براي اجراي مدل علاوه‌بر سناريوي تدوين شده براي هر شبکه محاسبه شده آينده، نياز به فايل مشخصه رفتار اقليم گذشته ايستگاه‌هاي واقع در داخل آن شبکه نيز وجود دارد. سازوکار عمل مدل به اين صورت است که آن در ابتدا با استفاده از سناريوي توليد داده ماهانه که در برگيرنده رفتار اقليم پايه مي‌باشد، تمام داده‌هاي ماهانه براساس رابطه (۱) محاسبه مي‌شود:

$$F_{fut} = F_{obs} + (F_{GCM}^{fut} - F_{GCM}^{base}) \quad (1)$$

در اين فرمول‌ها: fut: آينده، obs: گذشته مي‌باشد و با حفظ میانگين، انحراف معيار آن‌ها را مطابق رابطه (۲) تغيير مي‌دهد:

$$STD_{fut} = \frac{STD_{OBS}}{STD_{base}^{GCM}} \times STD_{fut}^{GCM} \quad (2)$$

خروجی‌هاي اين مدل شامل دمای کمينه، دمای بیشينه، بارش و تابش مي‌باشد (Semenov و Barrow، ۲۰۰۲). ارزيابي اين مدل از طريق مقايسه داده‌هاي دوره آماری و داده‌هاي توليد شده توسط مدل با استفاده از آزمون‌هاي آماری و نمودارهاي مقايسه‌اي انجام مي‌پذيرد. براي اين کار يك سناريوي حالت پايه براي دوره آماری مورد استفاده تهيه و مدل براي دوره پايه مذکور اجرا مي‌شود. براي ارزيابي خروجی‌هاي مدل داده‌هاي ديده‌باني و مدل شده براي ۴ متغير دمای کمينه، بیشينه، بارش و تابش و همچنين خصوصيات آماری آن‌ها شامل میانگين ماهانه انحراف معيار و غيره تهيه

مي‌شوند و توانمندی مدل براي ايجاد اقليم گذشته ايستگاه‌هاي مورد بررسی تجزيه و تحليل قرار مي‌شود. به‌منظور مقايسه داده‌هاي ديده‌باني و توليد شده توسط مدل از آزمون‌هاي آماری استفاده مي‌شود. مقايسه آماری اين داده‌ها براي ۴ متغير مذکور و خصوصيات آماری آن‌ها شامل میانگين ماهانه انحراف معيار، خطاهای نسبی مقادير متوسط، خطاهای نسبی انحراف معيار و ميزان همبستگي و ديگر آزمون‌ها (T-test) و غيره تهيه مي‌شوند. پژوهش‌ها نشان دهنده توانمندی مدل در مدل‌سازي دمای کمينه و بیشينه، بارش و تابش دوره مي‌باشد.

نتايج و بحث

جهت انجام اين پژوهش باتوجه‌به دوره پايه در نظر گرفته شده ۱۹۸۵-۲۰۱۴ به مدت ۳۰ سال مربوط به نزديک‌ترين ايستگاه سينوپتيک منطقه (ايستگاه سينوپتيک بابلسر)، میانگين بارش و دمای ماهانه دوره پايه براي ماه‌هاي مختلف سال از آمار اين ايستگاه استخراج شد و سپس میانگين بارش و دمای ماهانه براي دوره‌هاي آينده با استفاده از مدل LARS-WG5 شبیه‌سازي شد. همچنين دمای کمينه (حداقل) و دمای بیشينه (حداکثر) براي دوره‌هاي آينده توسط مدل محاسبه شد. باتوجه‌به اين موارد، اختلاف براي دما و نسبت براي بارندگي جهت ريز مقیاس غايی براي اين حوزه محاسبه شد. جدول (۲) محاسبه نسبت‌هاي ذکر شده براي اين محدوده را نشان مي‌دهد. لازم به ذکر است باتوجه‌به اينکه مجموعه‌اي از عمليات آماری توسط اين مدل انجام مي‌شود، تنها مواردی که در اهداف اين پژوهش در نظر گرفته شده بود استفاده و ارزيابي شدند. ورودی‌هاي اين مدل به‌صورت آمار روزانه اقليمي شامل ميزان بارندگي، دما و تابش به مدل داده شد. همچنين دمای کمينه (حداقل) و دمای بیشينه (حداکثر) براي دوره‌هاي آينده نيز توسط مدل محاسبه شد. باتوجه‌به اين موارد، مقدار اختلاف براي دما و نسبت براي بارندگي جهت ريز مقیاس غايی براي اين حوزه محاسبه شد.

شکل (۳) مقايسه میانگين بارش ماهانه دوره پايه و دوره شبیه‌سازي شده با مدل HADCM3 براي ماه‌هاي مختلف سال و شکل (۴) مقايسه میانگين دمای ماهانه دوره پايه و دوره شبیه‌سازي شده براي محدوده مطالعاتی را نشان مي‌دهد. دمای کمينه (حداقل) ماهانه شبیه‌سازي شده و دمای بیشينه (حداکثر) ماهانه شبیه‌سازي شده در مقايسه با دوره پايه در شکل‌هاي (۵ و ۶) نشان داده شده است. شکل (۷) سناريوهای محاسبه شده تغيير اقليم بارش ماهانه از مدل HADCM3 و شکل (۸) سناريوهای محاسبه شده تغيير اقليم دمای ماهانه از مدل HADCM3 براي محدوده مطالعاتی را نشان مي‌دهد.

جدول ۲- محاسبه نسبت برای بارندگی و اختلاف برای دما در محدوده مطالعاتی

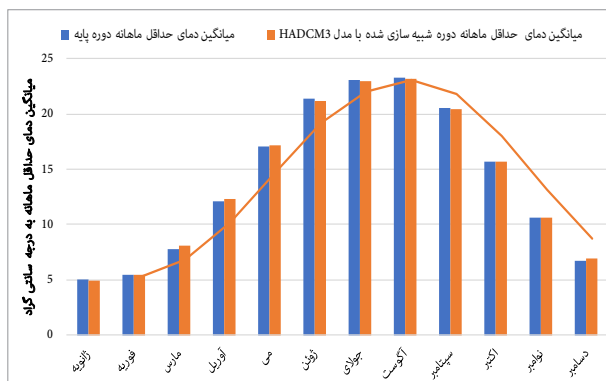
ماه‌های سال	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
ژانویه	۱۰۰/۱	۱۰۹/۵	۵/۰۲	۱۲/۱۹	۸/۶۹	۴/۹۳	۱۲/۰۵۱	۸/۴۹	۰/۲	۱/۰۹
فوریه	۶۷/۵	۷۹/۲۷	۵/۴۲	۱۱/۸۳	۸/۶۳	۵/۴۷	۱۱/۴۲	۸/۴۵	۰/۱۸	۱/۱۸
مارس	۶۲/۵	۵۷/۰۹	۷/۸۱	۱۳/۸۱	۱۰/۸۱	۸/۱۴	۱۳/۴۴	۱۰/۴۹	۰/۳۲	۰/۹۱
آوریل	۲۹/۹۳	۳۲/۴۳	۱۲/۱۴	۱۸/۶۷	۱۵/۴۱	۱۲/۲۸	۱۸/۷	۱۵/۴۹	۰/۰۸	۱/۰۸
می	۱۵/۸	۲۶/۶۸	۱۷/۰۸	۲۳/۶۶	۲۰/۳۷	۱۷/۲	۲۳/۶۱	۲۰/۴۱	۰/۰۴	۱/۶۹
ژوئن	۲۳/۴۱	۲۸/۱۱	۲۱/۳۵	۲۸/۵۲	۲۴/۹۴	۲۱/۱۵	۲۸/۱۸	۲۴/۶۷	۰/۲۷	۱/۲
جولای	۲۶/۱۳	۲۶/۶۵	۲۳/۰۴	۳۰/۷۱	۲۶/۸۸	۲۲/۹۸	۳۰/۵۷	۲۶/۷۸	۰/۱	۱/۰۲
آگوست	۴۷/۹۷	۵۳/۷۹	۲۳/۳۱	۳۱/۱۷	۲۷/۲۴	۲۳/۱۴۴	۳۰/۹۵	۲۷/۰۵	۰/۱۹	۱/۱۲
سپتامبر	۱۰۱/۵۳	۱۰۳/۹۲	۲۰/۵۷	۲۸/۲۶	۲۴/۴۲	۲۰/۴۴	۲۸/۰۹	۲۴/۲۷	۰/۱۵	۱/۰۲
اکتبر	۱۵۴/۸۷	۱۸۰/۱۶	۱۵/۷۲	۲۳/۶۷	۱۹/۷	۱۵/۶۷	۲۳/۵۴	۱۹/۶۱	۰/۱۱	۱/۱۶
نوامبر	۱۶۰/۲۳	۱۸۶/۲۴	۱۰/۶	۱۸/۳۸	۱۴/۴۹	۱۰/۶۱	۱۸/۵۵	۱۴/۵۸	۰/۰۹	۱/۱۶
دسامبر	۱۳۰/۳۳	۱۴۵/۱۵	۶/۷۱	۱۴/۰۸	۱۰/۴	۶/۹۳	۱۳/۷۷	۱۰/۳۵	۰/۰۵	۱/۱۱

C: میانگین دمای حداقل ماهانه دوره پایه، B: میانگین بارش ماهانه دوره شبیه‌سازی شده، A: میانگین بارش ماهانه دوره پایه،

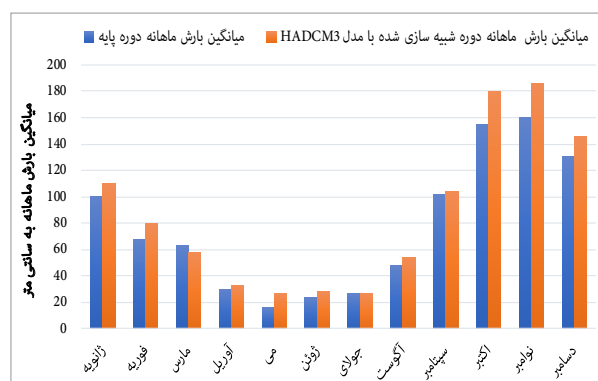
F: میانگین دمای حداقل ماهانه دوره شبیه‌سازی شده، E: میانگین دمای ماهانه دوره پایه، D: میانگین دمای حداکثر ماهانه دوره پایه،

I: سناریوهای تغییر اقلیم دمای ماهانه، H: میانگین دمای ماهانه دوره شبیه‌سازی شده، G: میانگین دمای حداکثر ماهانه دوره شبیه‌سازی شده،

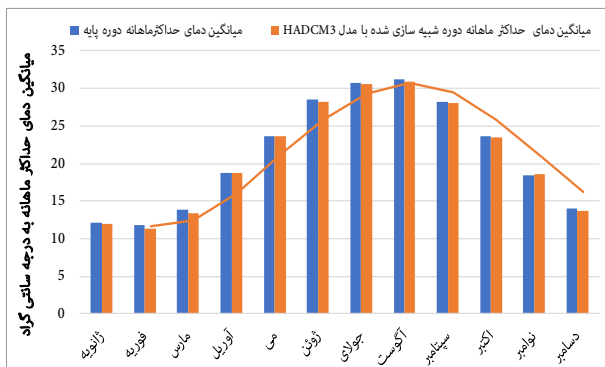
J: سناریوهای تغییر اقلیم بارش ماهانه. (واحد دما درجه سانتی‌گراد و واحد بارش سانتی‌متر است).



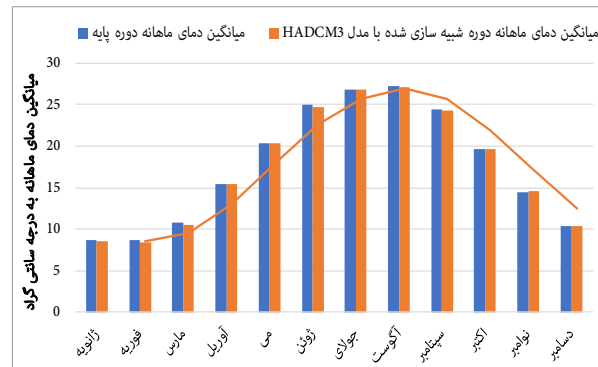
شکل ۵- مقایسه میانگین دمای حداقل ماهانه دوره پایه و شبیه‌سازی شده با مدل HADCM3 در دشت آمل- بابل



شکل ۳- مقایسه میانگین بارش ماهانه دوره پایه و شبیه‌سازی شده با مدل HADCM3 در دشت آمل- بابل



شکل ۶- مقایسه میانگین دمای حداکثر ماهانه دوره پایه و شبیه‌سازی شده با مدل HADCM3 در دشت آمل- بابل

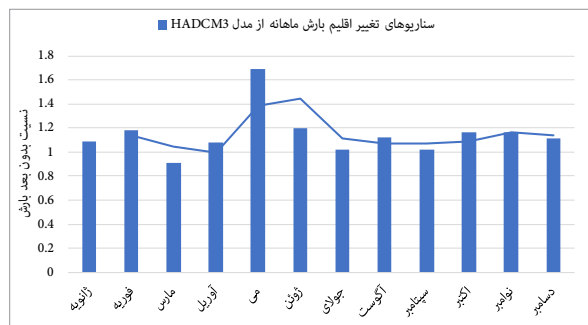


شکل ۴- مقایسه میانگین دمای ماهانه دوره پایه و شبیه‌سازی شده با مدل HADCM3 در دشت آمل- بابل

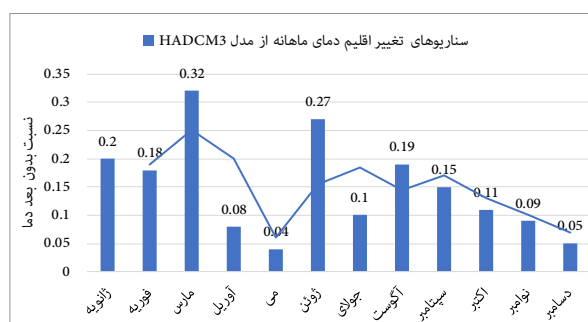
ژوئن و ژانویه می‌باشد که نشان‌دهنده گرمتر شدن اوایل بهار، اوایل تابستان و اوایل زمستان در دوره‌های آینده می‌باشد. این شرایط ایجاد شده ناشی از تغییر اقلیم بر روی زمان گل‌دهی گیاهان، ایجاد تنش آبی در این فصول تاثیر قابل توجهی خواهد گذاشت. شکل (۴) مقایسه میانگین دمای ماهانه دوره پایه و شبیه‌سازی شده با مدل HADCM3 در محدوده مطالعاتی دشت آمل-بابل را نشان می‌دهد. از بررسی این نمودار مشخص می‌شود که ماه‌های آوریل، می، ژوئن و نوامبر با افزایش درجه حرارت در دوره‌های آینده همراه خواهد بود و در بقیه ماه‌های سال‌های آینده دما کمتر می‌شود که از جنبه‌های گوناگون قابل بررسی می‌باشد. مقایسه میانگین دماهای حداکثر (بیشینه) و حداقل (کمینه) در دوره پایه و شبیه‌سازی شده با مدل HADCM3 در حوزه دشت آمل-بابل که جز مناطق مستعد کشت برنج می‌باشد (شکل‌های ۵ و ۶) نشان‌دهنده بی‌نظمی‌های اقلیمی و تأیید ایجاد تغییرات اقلیمی در محدوده مذکور را دارد که از لحاظ برنامه‌ریزی کشت این محصول باید مد نظر قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

براساس نتایج این پژوهش آشکار می‌شود از اول ماه ژانویه تا اول ماه مارس میانگین بارش ماهانه در دوره‌های آینده نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد، در ماه مارس کاهش و در بقیه ماه‌های سال افزایش نسبی در مقدار بارش را شاهد خواهیم بود که این موضوع در ماه اکتبر و نوامبر مشهودتر است. کم شدن بارش ماه‌های مارس آبی باتوجه‌به شروع دوره رویش گیاهی و نیاز آبی گیاهان زراعی و همچنین خزان زود هنگام مراتع در اثر تنش خشکی نقش موثری در تغییر فرایندهای هیدرولوژیکی و طبعاً بر سایر مولفه‌های محیط‌زیستی دارد. در مورد وضعیت دمایی حال و آینده باتوجه‌به سناریوهای تغییر اقلیم دمای ماهانه از مدل HADCM3 برای ماه‌های مختلف سال نشان دهنده بیشترین تغییرات دمایی به‌ترتیب در ماه‌های مارس، ژوئن و ژانویه می‌باشد که نشان دهنده گرمتر شدن اوایل بهار، اوایل تابستان و اوایل زمستان در دوره‌های آینده می‌باشد که این پدیده‌ها نیز بر روی زمان گل‌دهی گیاهان، ایجاد تنش آبی در این فصول تاثیر قابل توجهی خواهد گذاشت. بخش کشاورزی به واسطه ماهیت خود نسبت به سایر بخش‌های اقتصادی بیشتر تحت تأثیر پدیده تغییر اقلیم است. از طرفی اثرات تغییر اقلیم بر تولید محصولات کشاورزی، معیشت جوامع روستایی را نیز با چالش جدی مواجه کرده و زمینه‌ساز افزایش فقر، کاهش فرصت‌های اشتغال و افزایش مهاجرت به سمت شهرها خواهد شد (Amiri و Eslamian، ۲۰۱۰). کشاورزان نیز به واسطه ماهیت فعالیت تولیدی خود بیشتر از سایر اقشار تحت تأثیر اثرات این پدیده قرار دارند. شدت این اثر وقتی افزایش پیدا می‌کند که



شکل ۷- سناریوهای تغییر اقلیم بارش ماهانه (نسبت بدون بعد) از مدل HADCM3



شکل ۸- سناریوهای تغییر اقلیم دمای ماهانه (نسبت بدون بعد) از مدل HADCM3

یکی از مواردی که در جدول (۲) و در شکل (۳) مشاهده می‌شود این است که در ماه‌های مختلف سال اختلاف‌های زیادی بین بارش‌های ماهانه مشاهده شده و شبیه‌سازی توسط مدل وجود دارد. تغییرات میانگین‌های بارش ماهانه به این صورت است که از اول ماه ژانویه تا اول ماه مارس میانگین بارش ماهانه در دوره‌های آینده نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد، در ماه مارس کاهش و در بقیه ماه‌های سال افزایش نسبی در مقدار بارش را شاهد خواهیم بود که این موضوع در ماه اکتبر و نوامبر مشهودتر است. کاهش باران ماه‌های مارس آینده باتوجه‌به شروع دوره رویش گیاهی و نیاز آبی گیاهان زراعی و همچنین خزان زود هنگام مراتع در اثر تنش خشکی نقش موثری در تغییر فرایندهای هیدرولوژیکی و طبعاً تأثیر آن بر سایر مولفه‌های محیط‌زیست دارد. شکل (۷) سناریوی ایجاد شده تغییر اقلیم بارش ماهانه از مدل HADCM3 را نشان می‌دهد. باتوجه‌به این نمودار مشخص می‌شود به ترتیب ماه‌های می، فوریه، اکتبر و نوامبر بیشترین تغییرات بارش در دوره‌های آینده را دارد. پیامدهای این تغییرات می‌تواند در وقوع سیلاب‌های فصلی در حوزه مورد مطالعه تاثیر شایان توجهی داشته باشد. در مورد وضعیت دمایی حال و آینده باتوجه‌به شکل (۸) محاسبه سناریوهای تغییر اقلیم دمای ماهانه از مدل HADCM3 برای ماه‌های مختلف سال نیز نشان دهنده بیشترین تغییرات دمایی به ترتیب در ماه‌های مارس،

- Amiri, M., & Eslamian, S. (2010). Investigation of climate change in Iran. *Journal of Environmental Science and Technology*, 3(4), 208-216. DOI: [10.3923/jest.2010.208.216](https://doi.org/10.3923/jest.2010.208.216)
- Barrett, K.N. (2014). Assessing the determinants facilitating local vulnerabilities and adaptive capacities to climate change impacts in high mountain areas: A case study of Northern Ladakh. Graduate Student Theses, Dissertation, & Professional Paper, University of Montana, Missoula, Montana.
- Christopher, B.f., Vicente, R.b., Dokken, D.j., Katharine, J.m. & Mastrandrea, M.d. (2014). Impacts, Adaptation, and Vulnerability Part A: Global and Sectoral Aspects. . Volume 1. Cambridge University Press. Cambridge, England.
- Downing, T.E., Harrison, P.A., Butterfield, R.E., & Lonsdale, K.G. (2000). Climate Change Climatic Variability and Agriculture in Europe, An integrated assessment. Environmental Change Institute/ University of Oxford. Oxford, United Kingdom.
- Ewert, F., Rounsevell, M.D.A., Reginster, I., Metzger, M.G., & Leemans, R. (2005). Future scenarios of European agricultural land use. I. Estimating changes in crop productivity. *Agricultural Ecosystems Environmental*, 107, 101-116. DOI: [10.1016/j.agee.2004.12.003](https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.12.003)
- Feola, G., Lerner, A.M., Jain, M., Montefrio, M. J.F., & Nicholas, K. A. (2015). Researching farmer behaviour in climate change adaptation and sustainable agriculture: Lessons learned from five case studies. *Journal of Rural Studies*, 39, 74-84. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrurstud.2015.03.009>
- Haden, V.R., Niles, M.T., Lubell, M., Perlman, J., & Jackson, L.E. (2012). Global and local concerns: What attitudes and beliefs motivate farmers to mitigate and adapt to climate change. *PloS one*, 7(12), e52882. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0052882>
- Harmel, R. D. & Richardson, C.W. (2002). Evaluating the Adequacy of Simulating Maximum and Minimum Daily Air Temperature With the Normal Distribution, Canadian Society for engineering , *Journal of Applied Meteorology* 41(7), 26. DOI: [10.1175/1520-0450\(2002\)041<0744:ETAOSM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2002)041<0744:ETAOSM>2.0.CO;2)

آسیب‌پذیری کشاورزان نسبت به تغییر اقلیم زیاد بوده و توانایی سازگاری با آن نیز محدود باشد. از طرفی دیگر باتوجه به کاهش منابع آب در دسترس، مدیریت و برنامه‌ریزی دقیق منابع آبی اهمیت بسیار زیادی دارد. بخش کشاورزی بزرگترین مصرف‌کننده آب می‌باشد. بنابراین برآورد دقیق از میزان آب مورد نیاز این بخش به مدیریت منابع آب بسیار کمک خواهد کرد. تغییرات آب‌وهوایی باعث تغییر پارامترهای اقلیمی، تبخیر- تعرق گیاهان، تغییر نیاز آبی گیاهان زراعی و باغی می‌شود. نتایج پژوهش‌های متعددی در خصوص تغییرات اقلیمی و با روش‌های علمی گوناگون که در این پژوهش به نمونه‌هایی از آنها اشاره شده است نشان‌دهنده تأثیر این پدیده بر شرایط اقلیمی آینده حوزه‌های آبخیز می‌باشد که در کل شباهت‌های زیادی در اصل موضوع یعنی تأثیر این پدیده بر شرایط آب‌وهوایی آینده و طبعاً تأثیر آن بر سایر بخش‌های وابسته به آن مانند بخش کشاورزی و افزایش سیل‌ها و خشکسالی‌ها به دلیل بی‌نظمی‌های اقلیمی دارد. براین اساس باتوجه به اینکه نتایج این پژوهش می‌تواند جهت پژوهش‌های آینده در محدوده مورد مطالعه و سایر مناطق مورد استفاده قرار گیرد؛ لذا پیشنهاد ذیل می‌تواند در این زمینه راهگشا باشد:

۱- استفاده از مدل و سناریوهای اقلیمی دیگر در دوره‌های آینده در منطقه مطالعاتی آینده برای بررسی بهتر موضوع به منظور کاربرد نتایج آنها برای برنامه‌ریزی دقیق مقابله با شرایط حاد اقلیمی و برنامه‌ریزی جهت برآورده کردن نیاز آبی کشت برنج در این منطقه.

۲- تدوین یک استراتژی سازگاری و پیشگیری با اثرات منفی تغییرات اقلیمی باتوجه به نتایج این پژوهش و سایر تحقیقات مرتبط در مناطق مختلف کشور مانند برنامه‌ریزی استفاده از منابع آبی در بخش‌های مختلف مانند بخش کشاورزی در مواقع مختلف سیلابی یا خشکسالی.

پی‌نوشت

- 1-Intergovernmental Panel on Climate Change
- 2-Quaternary

منابع

- گزارش فیزیوگرافی حوزه آبخیز بابل - آمل. (۱۳۹۱). مهندسین مشاور پایداری طبیعت. تهران. ایران.
- Abdo, K.S., Fiseha, B.M., Rientjes, T.H.M., Gieske, A.S.M., & Haile, A.T. (2009). Assessment of climate change impacts on the hydrology of Gilgel Abay catchment in lake Tana Basin. Ethiopia. *Hydrological Processes*, 23(26), 3661-3669. <https://doi.org/10.1002/hyp.7363>

- stein, P. (2009). Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106, 1704-1709. <https://doi.org/10.1073/pnas.0812721106>, [pnas-0812721106](https://doi.org/10.1073/pnas.0812721106)
- Souvignet, M., Gaese, H., Ribbe, L., Kretschmer, N., & Oyarzun, R. (2010). Statistical downscaling of precipitation and temperature in north-central Chile: an assessment of possible climate change impacts in an arid Andean watershed. *Hydrological Sciences Journal*, 55(1), 41-57. <https://doi.org/10.1080/02626660903526045>
- Stocker, T.F., D. Qin, G.-K., Plattner, M., Tignor, S.K., Allen, J., Boschung, A., Nauels, Y., Xia, V., B. & Midgley, P.M. (2013). Climate change: the physical science basis, Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom.
- Thorlakson, T. & Neufeldt, H. (2012). Reducing subsistence farmers' vulnerability to climate change: Evaluating the potential contributions of agroforestry in western Kenya. *Agriculture & Food Security*, 1(1), 1-13. <https://doi.org/10.1186/2048-7010-1-15>
- Vanuytrechta, E. Raesa D, Willems P b., & Semenov, M A. (2014). Comparing climate change impacts on cereals based on CMIP3 and EU-ENSEMBLES climate scenarios. *Agricultural and Forest Meteorology*, 195-196, 12-23. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.04.017>
- Walthall, C.L., Hatfield, J., Backlund, P., Lengnick, L., Marshall, E., Walsh, M., & Anderson, C.J. (2012). climate change and agriculture in the United States: Effects and adaptation. USDA (United States Department of Agriculture) technical bulletin 1935. Washington, DC. USA.
- Wang, Wei Wei. (2012). Three Essays on Climate Change Impacts, Adaptation and Mitigation in Agriculture. Doctoral dissertation, Texas A & M University. <https://hdl.handle.net/1969.1/ETD-TAMU-2012-08-11485>
- Hashmi, M.Z., Shamseldin, A.Y., & B.W. Melville. (2010). Comparison of SDSM and LARS-WG for simulation and down scaling of extreme precipitation events in a watershed. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 25, 475-484. <https://doi.org/10.1007/s00477-010-0416-x>
- International Fund for Agricultural Development. (2015). Investing in smallholder family agriculture for global food security and nutrition. IFAD POST-2015 POLICY BRIEF.
- Janjua, P.Z., Samad, G., & Khan, N. (2014). Climate Change and Wheat Production in Pakistan; autoregressive distributed lag approach, *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 68, 13-19. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2013.11.002>
- Lu, L., Ismaila, D., Chong-Yu, X. , & Frode, S. (2015). Hydrological projections under climate change in the near future by RegCM4 in Southern Africa using a large-scale hydrological model, *Journal of Hydrology*, In press. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2015.05.028](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.028)
- Motha, R. & Baier, W. (2005). Impact of Present and Future Climate Change and Climate Variability on Agriculture in the Temperate Regions: North America. *Climate Change*, 70: 137-164. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-005-5940-1>
- Parry, M. L., Canziani, O., Palutikof, J., Linden, P.v.d., & Hanson, C. (2007). Climate change 2007-impacts, adaptation and vulnerability: Working group II contribution to the fourth assessment report of the IPCC. Volume 4. Cambridge University Press. Cambridge, England.
- Pradhan, N.S., Sijapati, S., & Bajracharya, S.R. (2015). Farmers' responses to climate change impact on water availability: insights from the Indrawati Basin in Nepal. *International Journal of Water Resources Development*, 31(2), 269-283. <https://doi.org/10.1080/07900627.2015.1033514>
- Semenov, M.A. & Barrow, E. M. (2002). LARS-WG a stochastic weather generator for use in climate impact studies. User's manual, Environment Canada. Version 3. Saskatchewan, Canada.
- Solomon, S., Plattner, G.K., Knutti, R., & Friedling-

Sustainable Food Security with the Help of Sustainable Aquaculture Using Modern Aquaculture Systems (part 2): Opportunities and Challenges of New Systems Development

S. Zahedi^{1*}, M. H. Khanjani², S. Safaeiyan³

1, 3- Assistant Professor and M.Sc student, Department of Fisheries, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

2- Associate Professor, Department of Fisheries Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, Jiroft University, Jiroft, Iran.

*(Corresponding Author Email: saeedzahedi@um.ac.ir)

Received: 17-04-2023

Revised: 30-05-2023

Accepted: 30-05-2023

Available Online: 21-09-2023

امنیت غذایی پایدار به کمک آبی‌پروری پایدار با استفاده از سامانه‌های نوین آبی‌پروری (قسمت دوم): فرصت‌ها و چالش‌های توسعه سامانه‌های نوین

سعید زاهدی^{۱*}، محمدحسین خانجانی^۲، سودابه صفائیانی^۳

۱ و ۳- به ترتیب استادیار و دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. ۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران.

*(نویسنده مسئول، E-Mail: saeedzahedi@um.ac.ir)

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۰۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۲۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۶/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۰۹

Abstract

Aquaculture is a sustainable solution to respond to the increasing demand for animal protein and also, food security in the world, and today, in order to develop it, it is necessary to pay attention to the sustainable aquaculture approach (economically, socially and environmentally). The development of modern aquaculture systems has been greatly expanded in recent years and each of them pursues the goals of sustainable aquaculture in some way. In fact, modern aquaculture systems enable the achievement of sustainable aquaculture by maximizing the productivity of resources, reducing costs, appropriate production quantitatively and qualitatively, and a slight environmental effects. Among the systems introduced so far, recirculating aquaculture system, cages, aquaponics, biofloc and integrated multitrophic aquaculture systems are known as promising systems in aquatic production in the world that can be developed in Iran as well. In this review study, in addition to introducing and discussing the importance of these systems in sustainable aquaculture, the resulting opportunities and also, the challenges of developing these systems in the country are addressed.

Keywords: Recirculating Aquaculture Systems, Cage, Aquaponic, Biofloc, Integrated Multi-Trophic Aquaculture System.

چکیده

آبی‌پروری راه‌حلی پایدار برای پاسخ به افزایش تقاضای پروتئین جانوری و امنیت غذایی در جهان است و امروزه، جهت توسعه آن، توجه به رویکرد آبی‌پروری پایدار (به لحاظ اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی) ضروری است. توسعه سامانه‌های نوین آبی‌پروری طی سال‌های اخیر گسترش زیادی یافته است و هر کدام از آنها، به نوعی اهداف آبی‌پروری پایدار را دنبال می‌کنند. سامانه‌های نوین آبی‌پروری، با به حداکثر رساندن بهره‌وری از منابع، کاهش هزینه‌ها، تولید مناسب از بعد کمی و کیفی و اثرات محیط‌زیستی اندک، حصول آبی‌پروری پایدار را مقدور می‌سازند. در بین سامانه‌های معرفی شده تا کنون، سامانه‌های بازگردشی، قفس، آکواپونیک، بیوفلاک و پرورش تلفیقی جز سامانه‌های نویدبخش در تولید آبزیان در جهان شناخته می‌شوند که می‌توانند در ایران نیز توسعه زیادی بیابند. در مطالعه مروری حاضر، علاوه بر معرفی و بررسی اهمیت این سامانه‌ها در آبی‌پروری پایدار، به فرصت‌های حاصل از توسعه این سامانه‌ها در کشور و چالش‌های فراروی آن پرداخته می‌شود.

واژه‌های کلیدی: سامانه بازگردشی، قفس، آکواپونیک، بیوفلاک و پرورش تلفیقی.

مختصر و ذکر برخی از مزایا و معایب این سامانه‌ها، به فرصت‌های جدید ناشی از توسعه آنها و نیز، چالش‌ها و موانع پیش روی توسعه آنها در کشور خواهیم پرداخت. لازم به توضیح است که تمرکز در اینجا، بر سامانه‌هایی است که باتوجه به اولویت‌های ذکر شده در قسمت اول مقاله، برای آینده آبی‌پروری کشور نویدبخش و قابل توصیه‌اند.

مهمترین سامانه‌های نوین قابل توصیه برای آینده آبی‌پروری ایران

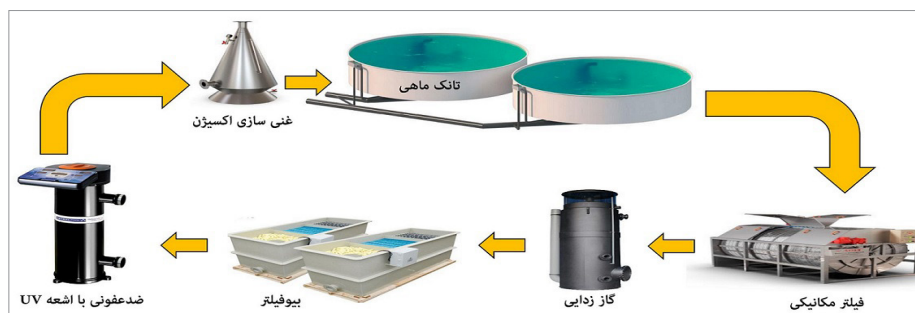
۱- سامانه‌های بازگردشی

در سال‌های اخیر، سامانه‌های آبی‌پروری بازگردشی، رشد و توسعه چشمگیری را در جهان به‌ویژه کشورهای توسعه یافته پیدا کرده است. افزایش تقاضای عمومی در جهت رسیدن به یک آبی‌پروری پایدار و سازگار با محیط‌زیست، کمبود روز افزون منابع آب شیرین و نیز، پیدایش فناوری‌های نوین تصفیه آب، منجر به علاقه‌مندی بیشتر پیرامون استفاده از سامانه‌های پرورشی بازگردشی برای تولید آبزیان شده است که مصرف آب تازه ورودی می‌تواند به میزانی حدود ۹۰-۹۹٪ کاهش بیاید (Gutierrez و Wing، ۲۰۰۶). در این سامانه‌ها، آب درون اجزای مختلف سامانه گردش نموده و بر حسب طراحی سامانه، درصدی از آب تعویض و درصدی تصفیه می‌شود که بر اساس میزان بازگردش، سطح فناوری و واحدهای تصفیه‌ای موجود، دو سامانه بازگردشی نسبی (آب برگشتی) و بازگردشی کامل (مدار بسته) تعریف شده است (Summerfelt و همکاران، ۲۰۰۱). یک سامانه بازگردشی کامل شامل مخازن ماهی، واحدهای تصفیه و پمپاژ آب است (شکل ۱).

باتوجه به افزایش جمعیت جهان، توسعه آبی‌پروری به‌عنوان یکی از منابع تأمین‌کننده غذا و راه‌حلی در جهت رسیدن به امنیت غذایی پایدار، ضروری است. صنعت آبی‌پروری با هدف تأمین نیاز بشر به منابع پروتئینی، در سرتاسر جهان رشد نسبتاً بالایی داشته است و توان تأمین افزایش جهانی تقاضای آبزیان را دارد (FAO، ۲۰۲۲).

برای گسترش تولیدات آبی‌پروری، سه هدف عمده را باید در نظر گرفت. هدف اول، توسعه آبی‌پروری باید تولید بیشتر، بدون افزایش قابل توجه استفاده از منابع طبیعی (آب و زمین) را مد نظر قرار دهد (Avnimelech، ۲۰۱۲). به‌همین جهت، بسیاری از متخصصان آبی‌پروری، در پی یافتن راهکارهایی برای به حداقل رسانیدن مصرف آب در فرآیند پرورش آبزیان هستند. هدف دوم، توسعه آبی‌پروری باید مبتنی بر توسعه سامانه‌های پرورشی پایدار باشد که اثرات زیان‌آوری بر محیط‌زیست نداشته باشند (Naylor و همکاران، ۲۰۲۱). هدف سوم، در سامانه‌های مذکور، نسبت هزینه/سود باید منطقی باشد تا حمایت اقتصادی جامعه و پایداری تولید را میسر سازد (Avnimelech، ۲۰۱۲).

در قسمت اول این مقاله (زاهدی و همکاران، ۱۴۰۲)، پیرامون اهمیت گنجاندن سامانه‌های نوین آبی‌پروری در اسناد بالادستی برای رسیدن به آبی‌پروری پایدار در کشور صحبت شد. به‌طورکلی، سامانه‌های نوین آبی‌پروری، امکان تولید گونه‌هایی از آبزیان را در زمان‌ها و مکان‌های جدیدی مقدور می‌سازند که در گذشته، چنین امکانی میسر نبود. همچنین، تولیدات این سامانه‌ها، از بعد کمی و کیفی، قابل توجه و پایدار است. در اینجا، ضمن معرفی



شکل ۱- نمایی از یک سامانه بازگردشی

شده‌تر با کنترل کامل همه متغیرهای محیطی و در نتیجه، امکان تولید برنامه‌ریزی شده در کل سال، کنترل بیماری و افزایش امنیت زیستی، حفظ انرژی، بازده اقتصادی مطلوب و سازگاری با محیط‌زیست (Timmons و Ebeling، ۲۰۱۰). به‌همین‌علت، به‌کارگیری و توسعه این سامانه‌ها، سبب تحولی چشمگیر در مزارعی می‌شود که با محدودیت آبی مواجه‌اند (حاجی بگلو و

واحدهای تصفیه آب، قلب سامانه بازگردشی بوده که از فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی برای تصفیه آب تا سطوح قابل قبول برای گونه پرورشی مدنظر، بهره می‌جویند. مزایای متعددی برای سامانه‌های بازگردشی عنوان شده است که عبارتند از: تولید بالا در تراکم‌های نگهداری بالا، کاهش حجم آب تازه مورد نیاز جهت تولید، شرایط محیطی پایدارتر و کنترل

همکاران، ۱۳۹۷). در مقابل، سامانه‌های بازگردشی معیایی نیز دارند که مهم‌ترین آنها، از دست دادن کیفیت آب طی بازگردش (در صورت عدم کنترل فرآیند تصفیه) می‌باشد که روی سلامتی آبی اثرگذار بوده و سبب کاهش تولید و گاهی خسارت‌های بسیار سنگین می‌شود. همچنین، برخی از فرآیندهای تصفیه‌ای همچون انجام تصفیه زیستی توسط باکتری‌های کمواتوتروف، پیچیدگی و حساسیت بالایی دارد. در آخر، هزینه‌های سرمایه‌گذاری و اجرایی چنین سامانه‌هایی بسیار زیاد می‌باشد (Ebeling و Timmons، ۲۰۱۰).

۲- سامانه قفس

پرورش در قفس، نوعی از پرورش آبزیان است که در آن، آبی مورد نظر در قفس‌های مستقر شده در محیط آبی، به‌منظور انجام عملیات پرورشی رهاسازی می‌شود و آب، به راحتی توان جابه‌جایی بین محیط محصور قفس و بدنه آبی اطراف را دارد (کردگاری، ۱۳۹۸). محدودیت منابع آب شیرین در جهان و اهمیت مدیریت برداشت از آنها و همچنین، وجود منابع عظیم دریایی، پرورش ماهی در قفس را در جایگاه ویژه‌ای در سطح جهانی قرار داده است به نحوی که، بسیاری از کشورهای پیشرفته از نظر آبی پروری، سرمایه‌گذاری‌های زیادی را در این زمینه انجام داده‌اند و تمرکز اصلی در توسعه آبی‌پروری را، بر توسعه پرورش در قفس‌های مستقر در دریا بنا نهاده‌اند (اسحق زاده و مرتضایی، ۱۳۹۷).

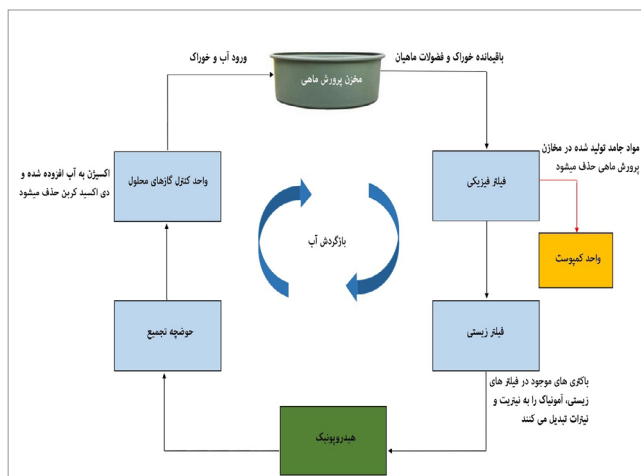
شاید بزرگترین مزیت پرورش ماهی (آبزیان) در قفس، ظرفیت تولیدی بالا در چنین سامانه‌هایی باشد چراکه وسعت محیط‌های دریایی، امکان استقرار سامانه‌های بزرگ پرورشی (با توان تولید چند هزار تن ماهی) را مقدور می‌سازد (اسحق زاده و مرتضایی، ۱۳۹۷). لازم به ذکر است که پرورش ماهی در قفس مزایای متعدد دیگری نیز دارد. ازجمله این مزایا، سهولت عادت‌پذیری ماهی با شرایط فیزیکی‌وشیمیایی آب نسبت به سایر روش‌ها، سرمایه‌گذاری ثابت پایین‌تر به علت عدم نیاز به خرید زمین و آب، نزدیک بودن طعم و مزه آبی پرورشی به آبزیان صید شده از دریا به دلیل پرورش یافتن در محیط طبیعی، مدیریت آسان‌تر نسبت به سایر روش‌ها، افزایش تنوع گونه‌ای و ارزش آوری بالا با هدف صادرات می‌باشد (اسحق زاده و مرتضایی، ۱۳۷۹).

در مقابل، توسعه پرورش ماهی در قفس، با چالش‌های محیط‌زیستی متنوعی روبه‌رو است. به‌عنوان مثال، می‌توان به مواردی همچون ورود حجم بالای پساب به محیط آبی و نیز، ورود انواع آنتی بیوتیک‌ها، داروها و ترکیبات ضدعفونی به آب حین عملیات پرورشی اشاره نمود (کردگاری، ۱۳۹۸). عدم استفاده بهینه از نهاده‌ها به‌ویژه خوراک ماهیان، می‌تواند منجر به نشر حجم زیادی از مواد مغذی همچون نیتروژن، فسفر و کربن به محیط‌های آبی و در نتیجه، پدیده یوتروفیکاسیون شود که طی

آن، جلبک‌های پلانکتونی، خز و گیاهان به میزان نامطلوبی رشد می‌کنند و مشکلات اکسیژنی را در محیط آبی ایجاد می‌کند (Price و Morris، ۲۰۱۳). همچنین انتقال بیماری‌های مشترک بین محیط پرورشی و وحشی، ورود ساختارهای مصنوعی به محیط، فرار ماهیان پرورشی و احتمال بروز تداخلات ژنتیکی بین جمعیت‌های بومی و وحشی و سرانجام، اثرات بوم‌شناختی ازجمله معایب این سامانه‌ها می‌باشد (Pillay، ۲۰۰۴).

۳- سامانه آکوپونیک

امروزه آکوپونیک در بین جامعه، جذابیت زیادی برای ایجاد اشتغال، تولید غذا و درآمد دارد (Somerville و همکاران، ۲۰۱۴). آکوپونیک یک سامانه آبی‌پروری است که در آن پساب تولید شده توسط ماهیان پرورشی، به‌عنوان محلول مغذی، برای گیاهانی استفاده می‌شود که به‌صورت هیدروپونیک رشد می‌کنند (رادخواه و همکاران، ۱۴۰۱). در اینجا، از مفاهیم طراحی محیط‌زیستی، مکانیک و مهندسی عمران و نیز، زیست‌شناسی، بیوشیمی و فناوری زیستی مرتبط با آب و گیاه، استفاده می‌شود (شکل ۲) (Thorarinsdottir، ۲۰۱۵). در مقابل، گیاهان به‌عنوان فیلتراسیون زیستی، نیتروژن مازاد آب را مصرف کرده و آب تصفیه شده، به مخازن نگهداری ماهی برگشت داده می‌شود (رادخواه و همکاران، ۱۴۰۱). به‌عبارت ساده، آکوپونیک نوعی سازگان زیستی یکپارچه و ترکیب دو فناوری سامانه‌های آبی‌پروری بازگردشی و هیدروپونیک (تولید گیاه در آب و بدون خاک) در یک سامانه نیمه بسته می‌باشد (Junge و همکاران، ۲۰۱۷؛ Baganz و همکاران، ۲۰۲۲). بنابراین، برای کاشت گیاه در این سامانه، دیگر نیازی به کوددهی نیست و پرورش ماهی در آن، نیازی به تعویض مکرر آب ندارد و این موضوع، به ماهی‌ها، محصولات گیاهی و میکروارگانیسم‌ها اجازه می‌دهد تا هم‌زیستی سودمند متقابلی با یکدیگر داشته باشند (Somerville و همکاران، ۲۰۱۴).



شکل ۲- مفهوم آکوپونیک (Thorarinsdottir، ۲۰۱۵)

مزایای سامانه‌های آکوپونیک متعدد هستند: در این سامانه‌ها، تولیدکنندگان دو محصول (گیاه و ماهی) را از یک واحد تولیدی برداشت می‌کنند، ضمن اینکه محصولات تولیدی می‌تواند ارگانیک، سالم و طبیعی باشد. در مقایسه با سامانه‌های سنتی پرورش تجاری ماهی و گیاه، آکوپونیک می‌تواند در حدود ۹۰٪ صرفه‌جویی در مصرف آب را ایجاد کند (Love و همکاران، ۲۰۱۴). در این سامانه، دی اکسید کربن تولیدی (که یک عامل محدود کننده محسوب می‌شود) در طول روز، طی عمل فتوسنتز، توسط گیاه مصرف می‌شود. همچنین می‌توان فسفر تولید شده در پساب را بازیافت نمود و از آن به‌عنوان یکی از اجزای اصلی کود کشاورزی بهره جست (خانجانی و جمال‌الدینی، ۱۳۹۹). علاوه بر آن، عدم استفاده از علف‌کش و حشره‌کش، حذف بیماری‌های خاکی با حذف خاک از سامانه، کشت متراکم گیاه، امکان تولید در سرتاسر سال، کاهش سرمایه‌گذاری (در مقایسه با سرمایه‌گذاری مجزا برای هر کدام از سامانه‌های آبی‌پروری و هیدروپونیک)، از دیگر مزایای این سامانه‌ها به‌شمار می‌روند (Zheng و Yep، ۲۰۱۹).

یکی از مهمترین چالش‌های سامانه آکوپونیک، یافتن ترکیب مناسبی برای خوراک ماهی به‌منظور دستیابی به ترکیب آبی است که تا حد امکان، به نیازهای گیاه مدنظر نزدیک باشد که این موضوع، بستگی به گونه ماهی، تراکم ماهی، دما و نوع گیاهان (میوه‌ای یا برگ‌دار) دارد (Ragnarsdottir و همکاران ۲۰۱۱؛ Sverdrup و Ragnarsdottir، ۲۰۱۱). تاکنون، سامانه‌های بزرگ تجاری آکوپونیک در پرورش محصولات گلدار با ارزش مثل فلفل شیرین، گوجه‌فرنگی یا خیار، به دلیل وجود نسبت‌های نامناسب از مواد مغذی در محلول آکوپونیک (به‌ویژه پتاسیم، منیزیم و کلسیم)، دچار مشکلات زیادی بوده‌اند (Zheng و Yep، ۲۰۱۹). از سایر معایب سامانه‌های آکوپونیک می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: غالباً مخازن پرورش ماهی، فضای زیادی را اشغال نموده و سنگین هستند، پرورش برخی از ماهی‌ها، مستلزم داشتن مهارت کافی است، در زمستان باید مخازن گرم نگهداشته شوند که به انرژی بالایی نیاز دارد و نیز، هزینه نصب، راه‌اندازی و نگهداری این سامانه‌ها بالا است (روستا، ۱۳۸۸). همچنین، انجام برخی از اندازه‌گیری‌های خاص و نیز، فناوری‌های کنترلی، داشتن دانش مرتبط با رشته علوم کامپیوتر را در سامانه‌های کنترل خودکار، ضروری می‌سازد. سرانجام، بزرگترین چالش در آکوپونیک تجاری، سطح بالای پیچیدگی و چند رشته‌ای بودن آن است که تخصص بیشتری را می‌طلبد که این امر، بر کارایی سامانه در حال اجرا اثر مستقیم دارد (Goddek و همکاران، ۲۰۱۵).

۴- سامانه‌های مبتنی بر فناوری توده زیستی (بیوفلاک)

فناوری بیوفلاک به‌عنوان یک رکن مهم تحول یا انقلاب آبی^۱ در قرن ۲۱ شناخته می‌شود که در آن، مواد مغذی به طور پیوسته بازیافت و مجدداً استفاده می‌شود. فناوری بیوفلاک، فناوری مبتنی بر مصرف و تعویض آب محدود، تنظیم نسبت کربن به نیتروژن

و هوادهی شدید می‌باشد که منجر به رشد و توسعه باکتری‌های هتروتروف و انواع میکروارگانیسم‌ها در سازگان پرورشی می‌گردد (Avnimelech، ۲۰۱۲). باکتری‌ها و میکروارگانیسم‌های متصل به آن که در اصطلاح، بیوفلاک نامیده می‌شود، سه نقش اصلی را در سامانه بر عهده دارد:

۱) بهبود کیفیت آب با جذب ترکیبات نیتروژن غیر آلی
۲) تولید پروتئین میکروبی در همان محل پرورش به‌عنوان غذای مکمل

۳) خاصیت پروبیوتیکی: به‌دلیل وجود ترکیبات آلی متعدد در بیوفلاک‌ها نظیر پلی بتا هیدروکسی بوترات، باکتری‌های حاوی پپتیدوگلوکان و لیپوپلی ساکارید در دیواره سلولی خود، کاروتنوئیدها، کلروفیل‌ها، فیتواسترول‌ها، پلی‌فنول‌ها و انواع ویتامین‌ها (Khanjani و همکاران، ۲۰۲۲a؛ Khanjani و همکاران، ۲۰۲۳b).

نکته محدود کننده این است که تنها گونه‌هایی که بتوانند سطوح متوسط اکسیژن محلول در آب (۳ تا ۶ میلی گرم در لیتر)، مواد جامد معلق نسبتاً بالا، کیفیت متوسط آب و تراکم پذیری را تحمل بکنند، می‌توانند در سامانه‌های مبتنی بر بیوفلاک پرورش بیابند (Khanjani و همکاران، ۲۰۱۶). به‌این‌علت تاکنون، استفاده از این فناوری تنها در آبیانی مانند میگوی سفید غربی (Khanjani و همکاران، ۲۰۱۶)، تیلایپای نیل (Khanjani و همکاران، ۲۰۲۱)، کپور معمولی (Minabi و همکاران، ۲۰۲۰)، گربه ماهی (Dauda و همکاران، ۲۰۱۸)، میگوی موزی (Khanjani و Sharifinia، ۲۰۲۲b)، کپور نقره ای (Zhao و همکاران، ۲۰۱۸)، کپور کاراس (Liu و همکاران، ۲۰۱۹) و کپورماهیان هندی از قبیل کاتلا، روهو و مریگال (Deb و همکاران، ۲۰۲۰) گزارش شده است.

به‌طور کلی، در سامانه‌های پرورش متراکم آبیان، تعویض آب یک عملیات ضروری برای حفظ کیفیت آب می‌باشد. امروزه باتوجه‌به کمبود منابع آب شیرین به‌منظور تعویض آب در آبی‌پروری، به‌کارگیری فناوری بیوفلاک به‌شدت مورد توجه قرار گرفته است (De Schryver و همکاران، ۲۰۰۸). در مطالعه Deb و همکاران (۲۰۲۰) میزان مصرف آب در سامانه پرورشی مبتنی بر فناوری بیوفلاک به‌طور معنی‌داری (۲۸٪) کمتر از سامانه معمولی بود که در جدول (۱) برخی از نتایج به‌صورت جزئی ذکر شده است. همچنین، در مطالعه دیگری، نیاز به تعویض آب در سامانه پرورشی مبتنی بر فناوری بیوفلاک برای پرورش کپور هندی روهو (*Labeo rohita*)، ۳۶٪ کمتر از سامانه معمولی بود (Mahanand و همکاران، ۲۰۱۳). در مطالعه Cang و همکاران (۲۰۱۹)، برای پرورش ماهی کاراس (*Carassius auratus gibelio*) در سامانه معمولی، میزان تعویض آب، ۲۴۰۱۲ مترمکعب و مصرف آب ۳۱/۷ مترمکعب به ازای هر کیلوگرم ماهی تولیدی بود درحالی‌که در سامانه مبتنی بر فناوری بیوفلاک، میزان تعویض آب صفر مترمکعب و مصرف آب ۰/۳

مترمکعب به ازای هر کیلوگرم ماهی تولیدی گزارش شد. مصرف آب در فناوری بیوفلاک، در حدود ۶/۸ مترمکعب برای تولید هرکیلوگرم از میگوی عظیم جثه آب شیرین و ۰/۰۷۱ مترمکعب برای تولید هر کیلوگرم از تیلایپای نیل می باشد (Pérez-Fuentes و همکاران، ۲۰۱۳؛ ۲۰۱۶). برای روشن تر شدن ذهن مخاطب، ذکر این نکته ضروری است که در سامانه های پرورشی باز، اگر به ازای هر سه لیتر بر ثانیه آب ورودی، یک تن قزل آلا رنگین کمان در سال تولید شود (که میزان راندمان تولید اکثر مزارع سردابی ایران کمتر از این مقدار است)، نزدیک به ۱۰۰۰۰۰ متر مکعب آب به ازای هر تن ماهی تولیدی در سال نیاز است. اما نیاز آبی تولید تیلایپا با استفاده از فناوری بیوفلاک (۷۰ مترمکعب)، حدود ۱۴۰۰ برابر کمتر است. به جزء تعویض محدود آب، سامانه های بیوفلاک مزایای متعدد دیگری همچون کاهش اثرات محیط زیستی آبی پروری به دلیل عدم وجود پساب، کاهش هزینه خوراک و بهبود رشد و ایمنی آبی (به جهت تغذیه از بیوفلاک مغذی) و نیز، امنیت زیستی بالا (به دلیل عدم نیاز به ورود آب از محیط و در نتیجه، کاهش ورود پاتوژن های بیماری زا به سامانه و مدیریت جوامع میکروبی مفید و ایجاد محدودیت برای عوامل بیماری زا) دارد (Moss و Leung، ۲۰۰۷). استفاده از بیوفلاک به عنوان خوراک مکمل در آبی پروری حدود ۱۵٪ از کل هزینه های تولید را کاهش می دهد

(Khanjani و همکاران، ۲۰۲۳a). استفاده از بیوفلاک برای تولید یک کیلوگرم میگوی ببری سبز (*Penaeus semisulcatus*) با ۳۳٪ (Megahed، ۲۰۱۰) و برای تولید یک کیلوگرم تیلایپا با ۱۰٪ (De Verstraete و Schryver، ۲۰۰۹) کاهش هزینه همراه بوده است. بطور کلی، این کاهش هزینه خوراک بستگی به گونه، جیره غذایی، میزان مصرف بیوفلاک و قیمت کربوهیدرات مصرفی دارد. بزرگترین چالش فناوری بیوفلاک، کنترل ذرات جامد معلق در آن است زیرا با افزایش آنها، کدورت آب افزایش و میزان اکسیژن محلول، کاهش می یابد که در طول دوره پرورش، سبب کاهش رشد، افزایش طول دوره پرورش و افزایش میزان ضریب تبدیل خوراک خواهد شد. محدودیت دیگر، مصرف بالای انرژی در این سامانه است چراکه تعداد زیادی پمپ آب و هواده الکتریکی، برای ایجاد جریان در آب استخر و نیز، تأمین اکسیژن مورد نیاز آبی و سامانه، باید هم زمان کار کنند (Avnimelech، ۲۰۱۲). متأسفانه، هرگونه نقص فنی و خرابی در سیستم هوادهی و پمپاژ، در مدت زمان کوتاهی، می تواند سبب تلفات شدید آبیان شود. بنابراین فناوری بیوفلاک علاوه بر جذابیت بالا، پیچیدگی بسیار زیادی دارد و افراد علاقه مند به راه اندازی سامانه های مبتنی بر این فناوری، باید دانش فنی و تجربه کافی در این زمینه را داشته و یا از کارشناسان مجرب بهره گیرند (قائدی و همکاران، ۱۴۰۱).

جدول ۱- نیاز به مصرف آب در دو سامانه بیوفلاک و معمولی برای پرورش

منبع	روزهای تعویض آب پس از ذخیره سازی ماهی	کل نیاز آب (لیتر)	تعداد دفعات تعویض آب	سیستم پرورش	تراکم نگهداری	گونه پرورش یافته
Deb و همکاران، ۲۰۲۰	۲۰، ۳۸، ۵۵، ۷۳، ۸۶	۱۷۵۰	۵	سیستم معمولی	۴/۲۸	<i>Rohu (Labeo rohita)</i>
	۳۵، ۵۸، ۷۸	۱۰۵۰	۳	سیستم بیوفلاک	مترمکعب / ماهی	
	۱۶، ۳۱، ۴۸، ۶۵، ۸۳	۱۷۵۰	۵	سیستم معمولی	۸/۵۷	<i>Catla (Catla catla)</i> , <i>Mrigal (Cirrihinus mrigala)</i>
	۳۴، ۵۵، ۷۵	۱۰۵۰	۳	سیستم بیوفلاک	مترمکعب / ماهی	
	۱۳، ۲۹، ۴۳، ۵۷، ۷۱، ۸۴	۲۱۰۰	۶	سیستم معمولی	۱۲/۸۵	
	۳۸، ۶۲، ۷۴، ۸۶	۱۴۰۰	۴	سیستم بیوفلاک	مترمکعب / ماهی	
Mahanand و همکاران، ۲۰۱۳	۳۰، ۴۲، ۶۰، ۷۲	۳۴۵	۴	سیستم معمولی	۱/۳	<i>Rohu, Labeo rohita</i>
	۵۳، ۶۵، ۸۶	۲۰۸	۳	سیستم بیوفلاک	مترمربع / ماهی	
	۲۳، ۵۰، ۶۵، ۸۳	۲۰۸/۵	۴	سیستم معمولی	۲/۶	
	۳۱، ۶۲، ۷۷	۱۴۰/۴	۳	سیستم بیوفلاک	مترمربع / ماهی	
	۲۰، ۳۲، ۴۷، ۶۲، ۷۷	۲۰۰/۵	۵	سیستم معمولی	۳/۹	
	۴۴، ۵۹، ۷۱، ۸۳	۱۳۳/۷	۴	سیستم بیوفلاک	مترمربع / ماهی	

۵- سامانه های پرورش تلفیقی آبیان^۲

سامانه پرورش تلفیقی (هم زمان) آبیان، طی دهه های گذشته ایجاد شده و مبتنی بر استفاده از تمام سطوح غذایی (تروفی) برای تولید هم زمان برخی از گونه های آبی است که این آبیان،

از سطوح مختلف زنجیره غذایی استفاده می کنند، به گونه ای که به پایداری محیطی (کنترل زیستی)، ثبات اقتصادی (تنوع محصول و کاهش خطر) و پذیرش اجتماعی (مدیریت بهتر) کمک کند. در این سامانه، انتخاب گونه های پرورشی مناسب و در نظر

گرفتن اندازه جمعیتی آنها برای دستیابی به یک فرآیند زیستی و شیمیایی بهینه، بهبود سلامت بوم سازگان و پایداری صنعت کاملاً ضروری است (Khanjani و همکاران، ۲۰۲۲c).

در این سامانه، پسماند تولیدی توسط آبزیان متعلق به یک سطح غذایی، به عنوان غذا یا کود برای آبزیان واقع در سطوح پایین تر غذایی مورد استفاده قرار می گیرد که همزمان با آنها پرورش داده می شوند. به عبارت ساده تر، در این سامانه پرورشی، مواد غذایی استفاده نشده، مواد معدنی و متابولیت های تولید شده توسط گونه های هدف اصلی که غالباً به سطوح بالای زنجیره غذایی تعلق دارند یعنی گوشتخوار می باشند (مثل ماهی سالمون پرورش یافته در قفس های دریایی)، به عنوان غذا برای آبزیانی همچون گیاهان، نرم تنان، سخت پوستان و غیره که به سطوح پایین تر غذایی تعلق دارند و محل پرورش آنها در همان حوالی قفس ها تعبیه شده است، با اهداف زیر استفاده می شود: ۱) بازگرداندن تعادل به محیط، بهبود شرایط محیطی و زیست پالایی ۲) افزایش دوام اقتصادی (بهبود و تنوع محصول، کاهش هزینه و سود خالص بیشتر) ۳) افزایش پذیرش اجتماعی محصولات آبزی پروری (از طریق تبلیغ شیوه های مدیریتی برتر) (Neori و همکاران، ۲۰۰۴؛ Barrington و همکاران، ۲۰۰۹؛ Cutajar و همکاران، ۲۰۲۲).

ازجمله مشکلات پیش روی این سامانه های پرورشی می توان به مسائل مربوط به فرار ماهیان از مزارع (Chopin، ۲۰۱۳)، افزایش احتمال انتقال بیماری بین گونه های مختلف پرورشی در سایت پرورش (Mortensen و Skår، ۲۰۰۷)، عدم سهولت توسعه این سامانه ها و نیز، نیاز به شناخت کافی و داشتن اطلاعات جامع فیزیولوژیک برای گونه هایی که با هم پرورش داده می شوند، اشاره کرد (Ren و همکاران، ۲۰۱۲).

فرصت ها، چالش ها و راهکارهای توسعه سامانه های نوین آبزی پروری در ایران

توسعه سامانه های نوین آبزی پروری در کشور، مشابه هر سامانه یا فناوری جدیدی، فرصت های تازه ای را در اختیار کشور قرار داده که با مشکلات و چالش هایی نیز در مسیر توسعه روبه رو خواهد بود. البته باتوجه به ماهیت و شرایط متفاوت سامانه های معرفی شده، توصیه راهکارهای توسعه یکسان مقدور نمی باشد. در ادامه، به اختصار به برخی از مهمترین فرصت ها، چالش ها و راهکارهای (پیشنهادی) توسعه سامانه های نوین در کشور پرداخته می شود.

۱- سامانه های بازگردشی:

توان تولیدی سامانه های بازگردشی به ویژه سامانه های بازگردشی کامل (در اصطلاح مدار بسته) به نسبت آب مورد استفاده بسیار بالا است. مهم تر، با استمداد از این سامانه ها، پرورش هرگونه ای

با هر نوع نیاز دمایی، در اقلیمی با شرایط کاملاً متفاوت ممکن می شود چراکه این سامانه ها، حداقل تبادل را با محیط اطراف دارند (Ebeling و Timmons، ۲۰۱۰). باتوجه به اینکه گونه های مهم تجاری ایران همچون قزل آلا رنگین کمان و فیل ماهی (از ماهیان خاویاری) از سطوح بالای زنجیره غذایی تغذیه می کنند، پرورش آنها در سامانه های بازگردشی کامل، کاملاً توجیه پذیر است.

باوجود تلاش های زیادی که طی دو دهه گذشته پیرامون توسعه سامانه های بازگردشی کامل در ایران صورت پذیرفته، توفیق و توسعه قابل توجهی در این زمینه در کشور ایجاد نشده است. ضعف مدیریت، عدم تطابق سامانه با آبزی و راندمان پایین تجهیزات به کار گرفته شده، از نکات قابل تأمل می باشد. سامانه های بازگردشی به شدت سامانه های پیچیده و نیازمند مدیریت بسیار بالای تصفیه آب هستند (Ebeling و Timmons، ۲۰۱۰). کمبود دانش فنی و تجهیزاتی در این زمینه در کشور کاملاً احساس می شود. نکته ای که برخی از صاحب نظران این سامانه ها بر آن تأکید دارند، عدم دسترسی به خوراک مناسب برای چنین سامانه هایی در کشور است، جایی که میزان مدفوع تولیدی زیاد و در نتیجه، میزان ذرات معلق جامد بالا می باشد. افزایش مواد آلی آب بر عملکرد باکتری های نیتریفیکانت اثر منفی دارد که این باکتری ها، گلوگاه واحدهای تصفیه بوده و نقش تصفیه زیستی را بر عهده دارند (Khanjani و همکاران، ۲۰۲۲a). همچنین، هزینه تمام شده تولید ماهی در چنین سامانه هایی در مقایسه با سامانه های باز بالاتر است چراکه هزینه های ثابت سرمایه ای بسیار بیشتر می باشد.

تشکیل کارگروه تخصصی سامانه های بازگردشی در سازمان شیلات ایران با حضور تخصص های مختلف مرتبط، آموزش کارشناسان و بهره برداران، افزایش سطح فناوری مزارع، تولید خوراک تخصصی برای سامانه های بازگردشی کامل، تغییر نوع فعالیت برخی از مزارع به مزارع حد واسط و یا تولید بچه ماهی انگشت قد و یا تغییر گونه پرورشی، هوشمندسازی و ... می تواند در بهبود و افزایش راندمان این سامانه ها کمک نماید.

۲- قفس:

با توجه به موقعیت جغرافیایی ایران، پرورش ماهی در قفس، پتانسیل رشد و توسعه فوق العاده ای دارد و چون فرصت های ویژه ای را در اختیار قرار می دهد، در برنامه ششم توسعه، اهمیت و جایگاه ویژه ای به آن داده شد (زاهدی و همکاران، ۱۴۰۲). در ایران، وجود نوار ساحلی گسترده در شمال و جنوب کشور، امکان بالقوه ای را برای پرورش ماهی در قفس ایجاد نموده است. برآوردهای اولیه انجام شده در مطالعات امکان سنجی و پتانسیل یابی پرورش ماهیان دریایی در قفس (همکاری شرکت نروژی Refa با سازمان شیلات ایران) نشان داد پتانسیل تولید ماهیان دریایی در قفس در دریای خزر، خلیج فارس و دریای عمان به ترتیب ۴۴۰، ۳۰۰ و ۱۷۰ هزار تن می باشد (اسحق زاده و

مرتضایی، ۱۳۹۷). به این دلیل، بسیاری از کارشناسان آبریزپروری معتقد هستند که پرورش ماهی در قفس‌های دریایی می‌تواند به عنوان اولویت اول و مهمترین راهکار توسعه محصولات آبریزپروری در ایران تلقی شود که اهمیت بالایی در توسعه اشتغال در مناطق ساحلی و ارزآوری برای کشور دارد.

در مقابل، آمارهای ارائه شده توسط سازمان شیلات این موضوع را به خوبی نشان می‌دهد که ایران برخلاف سایر کشورهای آسیایی در حوزه پرورش ماهی در قفس‌های دریایی، با وجود پتانسیل بالای مکانی در شمال و جنوب کشور و داشتن نیروی کار کافی، توفیق توسعه چندان‌اندیشه است (آسمان نسب و عشاق خسروشاهی، ۱۳۹۹). در سبب‌شناسی آن، موارد متعددی را می‌توان مطرح نمود که شاید از مهمترین آنها، عدم وجود دانش فنی و تجربه کافی در کشور باشد. هنوز در ایران، وابستگی بالایی در مقوله مکان‌یابی، مهندسی، تجهیزات و ... به شرکت‌های خارجی وجود دارد. ایجاد مشوق‌های لازم برای ورود جامعه محققین و متخصصین شیلاتی، فناوران و شرکت‌های دانش بنیان داخلی تولیدکننده تجهیزات قفس برای رفع این نقیصه امری ضروری است. علاوه بر آن، تأمین بچه ماهی و خوراک با کیفیت از محدودیت‌های اصلی این صنعت است. شاید راهکار میانه برای تأمین بچه ماهی مورد نیاز قفس‌ها، واردات بچه ماهی گونه‌های مهم تجاری از خارج کشور باشد (که هم اکنون انجام می‌شود) اما نمی‌تواند به عنوان راهکار دائمی و اصلی مطرح شده و در آینده قطعاً، صنعت پرورش ماهی در قفس را با مشکلاتی مشابه صنعت قزل‌آلای رنگین‌کمان مواجه خواهد نمود. تأمین اعتبار و انجام حمایت‌های مالی لازم برای ادامه پروژه‌های تکثیر و پرورش گونه‌های بومی و طرح‌های پایلوت در مراکز تحقیقات شیلاتی کشور (به منظور تأمین نیاز بخش تولید) می‌تواند گام موثری در این زمینه باشد.

از بعد دیگر، در بحث چالش‌های محیط‌زیستی این سامانه‌ها، انجام مطالعات منطقه‌ای برای ارزیابی اثرات محیط‌زیستی پرورش ماهی در قفس لازم است. همچنین، مکان‌یابی دقیق، رعایت مهندسی سازه، تدوین مقررات لازم پیرامون استفاده از داروها، مواد ضدعفونی و آنتی فولینگ، الزام به واکسیناسیون، مدیریت صحیح تغذیه‌ای و بهداشتی و ... می‌تواند در تقلیل اثرات محیط‌زیستی قفس‌ها موثر افتد.

در پایان، هزینه‌های سرمایه‌گذاری و لجستیکی بالا برای سامانه قفس، یکی از چالش‌های فراروی توسعه آنها در کشور است؛ چراکه این فعالیت بایستی در مقیاس بالا انجام شود تا از نظر اقتصادی قابل توجیه باشد. در اینجا، سیاست‌گذار باید سیستم بانکی کشور را مجبور به انجام حمایت‌های مالی لازم در غالب تسهیلات بانکی ارزان قیمت با دوره تنفس کافی بنماید. به نحوی که سود تسهیلات پرداختی و بازه زمانی بازپرداخت

منطبق بر دوره‌های تولید و هزینه‌های تولید باشد. باتوجه به ظرفیت بالای تولید قفس‌ها و نیاز به صادرات محصولات تولیدی، برداشتن موانع قانونی موجود، تسهیل امر صادرات و اعطای مشوق‌های مالی لازم، بسیار ضروری می‌نماید.

۳- آکواپونیک:

چرخش مجدد آب در سامانه‌های آکواپونیک منجر به حفظ قابل توجه آب در آنها می‌شود و تنها نیاز آبی سامانه برای جبران مواردی همچون تعرق گیاه، تبخیر سطحی و خروج مواد جامد معلق می‌باشد. این موضوع امکان این را می‌دهد که چنین سامانه‌هایی در مناطق درگیر خشکسالی و یا زمین‌هایی استفاده شود که برای کشاورزی سنتی مناسب نیستند (Zappernick و همکاران، ۲۰۲۲). باتوجه به مزایای بی‌شمار سامانه‌های آکواپونیک و محدودیت‌های روز افزون آبی در ایران، توسعه چنین سامانه‌هایی به قطع، نقش مهمی در امنیت غذایی کشور خواهند داشت (رادخواه و همکاران، ۱۴۰۱).

چالش‌های متعددی پیرامون توسعه سامانه‌های آکواپونیک در ایران وجود دارد که مهمترین آنها، نبود دانش فنی کافی به جهت جوان بودن این سامانه‌ها در کشور و پیچیدگی ذاتی آن است جایی که چندین گونه با ویژگی‌ها و نیازمندی‌های زیستی متفاوت با هم پرورش داده می‌شود (خانجانی و جمال‌الدینی، ۱۳۹۹؛ رادخواه و همکاران، ۱۴۰۱). هنوز، پیرامون نسبت بهینه ماهی به گیاه یا نحوه درمان گیاه/ماهی اطلاعات کاملی وجود ندارد. تفاوت ماهوی نیازهای ماهی و گیاه به مواد مغذی و نیاز به تنظیم دقیق آن و مهمتر، پیچیدگی جوامع میکروبی موثر در رشد گیاه، از چالش‌های کلیدی سامانه‌های مذکور است که در کشور ما نیز شاید دلیل بروز مشکلات برخی از پرورش‌دهندگان بوده است. با این حال، انجام تحقیقات پیرامون بهینه‌سازی عملکرد گیاهان مختلف در چنین سامانه‌هایی بدون نیاز به اضافه کردن افزودنی‌ها و انجام طرح‌های پایلوت در اندازه مناسب و در مناطق مختلف کشور می‌تواند مفید باشد. سود حاصل از فعالیت باتوجه به هزینه‌های سرمایه‌گذاری به نسبت بالا، از چالش‌های دیگر این سامانه‌ها است که شاید توجیه اقتصادی و برگشت سرمایه را با ابهاماتی متوجه سازد. متأسفانه خیلی از محصولات ارگانیک و لوکس این سامانه‌ها، مصرف قابل توجه و بازار تضمین شده‌ای در داخل کشور ندارد.

متخصصین، مبحث انرژی را از دیگر چالش‌های مهم توسعه سامانه آکواپونیک در کشورهای جهان سوم می‌دانند (Goddek و همکاران، ۲۰۱۵). هرچند، ایران به دلیل برخورداری از ذخایر فراوان انرژی‌های فسیلی و قیمت مناسب انرژی در بخش کشاورزی، محدودیتی در این زمینه ندارد، ولی تأمین مستمر انرژی (گاز و برق) به‌ویژه در مواقع محدودیت عرضه (ناشی از اوج مصرف) می‌تواند از چالش‌های جدی فراروی سامانه باشد.

شاید تجهیز سامانه به سیستم پشتیبان انرژی (از منابع انرژی پاک مثل خورشیدی و بادی) تا حدی در مواقع اضطرار کمک کننده باشد، ولی به قطع، تکیه به آنها برای طولانی مدت، می تواند ریسک بالایی برای تولیدکننده ایجاد نماید.

در پایان، نگارندگان بر این باورند که ما علاوه بر توسعه سامانه های آکوپونیک در مقیاس بزرگ (با توان تولید محصولاتی با قابلیت صادرات)، نیازمند توسعه سامانه های آکوپونیک به صورت مزارع خرد روستایی هستیم که می تواند علاوه بر امنیت غذایی و ایجاد اشتغال در این مناطق، به افزایش درآمد روستاییان کمک نموده و در مجموع، به امنیت عمومی جامعه به ویژه در مناطق مرزی و کاهش سرعت مهاجرت روستاییان به مناطق شهری کمک نماید. البته طراحی مدل مناسب ترویج، تولید و توسعه آن، آموزش، حمایت حاکمیتی و ... از جمله مسائلی است که نباید از نظر دور نگهداشته شود.

۴- بیوفلاک:

استفاده کاربردی از فناوری بیوفلاک، به عنوان یک فناوری آبی پروری سازگار با محیط زیست، با توان تولید بالا، یکی از راهکارهای رسیدن به آبی پروری پایدار در کشور است. نگارندگان معتقدند توسعه فناوری بیوفلاک و سامانه های پرورشی مبتنی بر آن، می تواند گام مهمی در توسعه آبی پروری کشور به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک باشد که شاید بتوان از آن، به عنوان گام چهارم توسعه آبی پروری در ایران نام برد. با کمک این فناوری، امکان توسعه آبی پروری در شرایط خشک سالی اخیر کشور و با محدودیت های روز افزون استحصال از منابع آب شیرین وجود دارد. با استمداد از فناوری بیوفلاک، می توان پتانسیل مغفول مانده استفاده از آب های نامتعارف کشور برای آبی پروری را فعال نمود و در چرخه تولید قرار داد. نکته بسیار مهم دیگر، تولید بیوفلاک چه به صورت مجزا از آبی (سامانه های غیرمستقیم یا ex-situ) یا توأم با آن (سامانه های مستقیم یا in situ)، به واردات هیچ اقلامی وابستگی نداشته و از منظر اقتصادی کاملاً به صرفه می باشد.

لازم به ذکر است پرورش گونه هایی مثل تیلپیا که مخالفت های (گاهاً نادرست) محیط زیستی را در کشور ایجاد کرده است (وزیرزاده، ۱۳۹۶) و درگیر اختلاف نظرهای بین سازمان شیلات و سازمان حفاظت محیط زیست شده است، در سامانه های مبتنی بر فناوری بیوفلاک، به دلیل تعویض آب محدود، قابل قبول است. رفع بن بست تولید و توسعه پرورش ماهی تیلپیا (به عنوان گزینه اول پرورش ماهی در قرن ۲۱ در جهان و ماهی که می تواند به راحتی و با صرفه اقتصادی پرورش یابد) در کشور، با توجه به شرایط کنونی اقتصادی، تنها در سامانه های بیوفلاکی بیشترین توجیه اقتصادی را دارد که هم نگرانی های محیط زیستی به دلیل بسته بودن سامانه به حداقل می رسد، هم اراضی شور و کم ارزش

بیابانی می تواند در آبی پروری استفاده شود (برای عدم ارتباط آب و خاک در این سامانه). با بهره جستن از این سامانه، فشاری بر منابع آب شیرین وارد نیامده و بیشترین راندمان استفاده از آب در تولید آبی حاصل می شود. به این دلیل، با برداشت ممنوعیت صدور مجوز پرورش تیلپیا در اکثر نقاط کشور، می توان به توسعه کشوری فناوری بیوفلاک امید داشت. البته مطرح نمودن امکان جایگزینی تیلپیا با سایر گونه ها، موضوع چالش برانگیز دیگری است چراکه با فرض جایگزینی کپور معمولی با تیلپیا، سود به دست آمده از فعالیت پرورشی می تواند تغییر یابد.

شاید بدیهی ترین چالش در ترویج فناوری بیوفلاک، متقاعدسازی جامعه محافظه کار بهره برداران بخش کشاورزی ایران برای استفاده از آب قهوه ای برای پرورش ماهی/میگو باشد و متأسفانه، عمده بهره برداران سن بالا و سطح سواد پایینی دارند و درک فناوری برای آن ها مشکل است (مرکز پژوهش ها مجلس شورای اسلامی، ۱۴۰۰). به طور کل، پذیرش نوآوری و بهره گیری از فناوری های نوین در عرصه کشاورزی و نیز یادگیری، فرآیندی پیچیده و چندمرحله ای است (سالارپور و همکاران، ۱۴۰۰). ترویج و توسعه سامانه های پرورشی مبتنی بر فناوری بیوفلاک در کشور، مستلزم انجام پروژه ها و طرح های پایلوت متعدد، در مقیاس متفاوت برای گونه های مختلف است. فناوری پرورش هم زمان آبی و بیوفلاک (سامانه های مستقیم)، به مدیریت بالای آب نیازمند می باشد که مدیریت آن برای بیشتر پرورش دهندگان معمولی، امر مشکلی است. شاید الزام ورود متخصصین و فارغ التحصیلان شیلاتی به چنین مزارعی توسط سازمان های ذی ربط، بتواند راهگشا بوده و از بروز خسارت های شدید جلوگیری نماید. از طرف دیگر، به نظر می رسد راه اندازی سامانه های پرورش مجزای آبی و بیوفلاک (سامانه های غیرمستقیم) در شرایط کنونی کشور، زیاد توجیه پذیر نباشد. پرواضح است که برای نیاز به عدم تماس آب سامانه با خاک و نیز، کنترل دما برای تأمین نیاز رشدی آبی و جامعه هتروتروفی، هزینه های اولیه ساخت و راه اندازی این سامانه ها بسیار بالا است که تنها در صورتی دارای توجیه اقتصادی برای پرورش متراکم آبزیان خواهد بود که ظرفیت تولیدی مزرعه بالا باشد. صدور مجوزهای لازم توسط سازمان نظام مهندسی کشاورزی و منابع طبیعی، پذیرش بیمه محصول توسط صندوق بیمه محصولات کشاورزی و تأمین صحیح مالی پروژه ها توسط بانک های عامل می تواند در ترغیب بخش خصوصی برای سرمایه گذاری در این فناوری، موثر باشد.

۵- پرورش تلفیقی آبزیان:

انتظار می رود سامانه های پرورش تلفیقی آبزیان به ویژه به دلیل مزیت های متعددی که برای پایداری پرورش ماهی در قفس دارند، رشد قابل توجهی را در آینده جهان داشته باشند. همچنین، چشم انداز اقتصادی روشن، پذیرش اجتماعی و مهمتر

آسمان نسب، بهزاد، و عشاق خسروشاهی، مریم. (۱۳۹۹). بررسی فرصت‌ها و چالش‌های سرمایه‌گذاری در شیلات بخش "پرورش ماهی در دریا (قفس)" در ایران. پنجمین کنفرانس بین‌المللی تحقیقات بین‌رشته‌ای در مدیریت، حسابداری و اقتصاد در ایران. دانشگاه علمی و کاربردی سازمان همیاری شهرداری‌ها، تهران. ایران.

اسحق‌زاده، حمید، و مرتضایی، رضا. (۱۳۹۷). وضعیت جهانی صنعت پرورش ماهیان دریایی در قفس. مجله شیل، ۱(۶)، ۸-۱. حاجی بگلو، عباسعلی، جعفرقلی، مهسا، عالی، ساناز، و امیرپور، زهره. (۱۳۹۷). مکانیسم سیستم مدار بسته در آبی‌پروری. چهارمین کنفرانس بین‌المللی یافته‌های نوین در علوم کشاورزی، منابع طبیعی و محیط‌زیست. انجمن توسعه و ترویج علوم و فنون بنیادین، تهران. ایران.

خانجانی، محمدحسین، و جمال‌الدینی، ابراهیم. (۱۳۹۹). سیستم آکوپونیک: سیستمی در جهت تولید آبی‌پروری پایدار و مصرف بهینه آب. دومین همایش ملی راهبردهای مدیریت منابع آب و چالش‌های زیست محیطی. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری. ایران.

رادخواه، علیرضا، ایگدری، سهیل، و صادقی‌نژاد ماسوله، ابراهیم. (۱۴۰۱). مروری بر فناوری‌های مورد استفاده جهت پالایش آب در سیستم‌های آبی‌پروری با تأکید بر الگوی توسعه پایدار در ایران. آب و توسعه پایدار، ۹(۳)، ۱۲۷-۱۴۰. jwsd/10.22067/v9i3.2205.1150

روستا، حمیدرضا. (۱۳۸۸). آکوپونیک (کشت و پرورش توأم ماهی و گیاه در سیستم مدار بسته با بازچرخانی آب)، انتشارات پلک. چاپ اول. تهران.

زاهدی، سعید، برخوردار، محسن، و طاهرپور، مجید. (۱۴۰۲). امنیت غذایی پایدار به کمک آبی‌پروری پایدار با استفاده از سامانه‌های نوین آبی‌پروری (قسمت اول): نقش قوانین و اسناد بالادستی. آب و توسعه پایدار، ۱۰(۱)، ۲۷-۳۶. doi: jwsd.v10i1.2303-1228

سالارپور، ماشالله، داورپناه، مجتبی، و زارع، ق. (۱۴۰۰). بررسی عوامل مؤثر بر پذیرش فناوری‌های نوین آبیاری در بین کشاورزان منطقه سیستان. آب و توسعه پایدار، ۸(۴)، ۲۳-۳۲. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v8i4.2107.1064>

قائدی، علیرضا، سرسنگی، حبیب، عالی محمودی، مزدک، و محمدی، محمد. (۱۴۰۱). دستورالعمل راه‌اندازی سیستم بیوفلاک به زبان ساده. دوفصلنامه علوم آبی‌پروری پیشرفته، ۶(۱)، ۵۱-۶۱.

کردگاری، مهناز. (۱۳۹۸). پرورش ماهی در قفس: مشکلات، معایب و راه‌کارها. مجله ترویجی میگو و سخت پوستان، ۴(۱)، ۴۳-۴۵.

از آن، رویکرد سازگار با محیط‌زیست آنها به محبوبیت جهانی آنها خواهد افزود. توسعه اقتصادی و ایجاد شغل در مناطق ساحلی محیط‌زیست، توسعه اقتصادی و ایجاد شغل در مناطق ساحلی در سرتاسر جهان کمک کند (Khanjani و همکاران، ۲۰۲۲). توسعه سامانه‌های پرورش تلفیقی در ایران به مفهوم کلاسیک آن، منوط به رشد و توسعه پرورش ماهی در قفس می‌باشد که پیرامون پرورش ماهیان دریایی در قفس، سرمایه‌گذاری و تلاش‌های خوبی طی سال‌های اخیر در کشور انجام شده است. در حال حاضر، باتوجه به عدم استقرار چنین سامانه‌هایی در کشور، اظهار نظر پیرامون وضعیت آنها مقدور نمی‌باشد. اما انجام مطالعات برای توسعه نوعی از این سامانه‌ها، که قابلیت استقرار در خشکی یا نوار ساحلی دارند و برای پرورش هم‌زمان چند گونه آبی‌پروری می‌شوند، می‌تواند آینده نویدبخشی را برای توسعه نوعی از آبی‌پروری پایدار (و اقتصادی) در مناطق بیابانی و نیمه بیابانی کشور رقم بزند که منابع لب‌شور و شور کافی، جهت احداث چنین سامانه‌هایی وجود دارد.

نتیجه‌گیری و پیشنهاد

توسعه سامانه‌های نوین پرورشی برای آینده آبی‌پروری کشور و در سطح بالاتر، امنیت غذایی ایران، یک ضرورت است چراکه رشد و توسعه پایدار و قابل توجه تولیدات آبی‌پروری را باتوجه به محدودیت‌های بوم‌شناختی، محیط‌زیستی و اقتصادی موجود مقدور می‌سازد. در این میان و باتوجه به واقعیت‌های موجود کشور، در بین سامانه‌های توصیه شده، شاید بتوان وزن بیشتری را برای سامانه‌های بازگردشی، قفس و بیوفلاک قائل شد. بازمهندسی سامانه‌های باز کشور به بازگردشی (با درصدهای متفاوت بازگردش و تصفیه) می‌تواند گامی مهم در حفظ و توسعه تولیدات آبی‌پروری به‌ویژه سردابی و خاویاری کشور باشد. ادامه توسعه استقرار قفس‌های دریایی در نوار ساحلی به‌ویژه در جنوب کشور می‌تواند گامی مهم در جهت افزایش تولید ماهیان دریایی با اهداف صادراتی باشد. با به‌کارگیری سامانه بیوفلاک در مناطق خشک و نیمه خشک کشور که با محدودیت منابع آبی روبه‌رو هستند و پرورش گونه‌هایی نظیر تیلاپیا و کپور معمولی که می‌توانند تغییرات محیطی گسترده را تحمل کنند، می‌توان گام مهمی در افزایش تولیدات آبی‌پروری در استان‌های غیرساحلی برداشت.

پی‌نوشت‌ها

1-Blue revolution

2-Intagrated multi-trophic aquaculture system

- nology: the added value for aquaculture. *Aquaculture*, 277, 125–137. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.02.019>
- De Schryver, P., & Verstraete, W. (2009). Nitrogen removal from aquaculture pond water by heterotrophic nitrogen assimilation in lab-scale sequencing batch reactors. *Bioresource technology*, 100(3): 1162-1167. doi: [10.1016/j.biortech.2008.08.043](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.08.043)
- Deb, S., Noori, M. T., & Rao, P. S. (2020). Application of biofloc technology for Indian major carp culture (polyculture) along with water quality management. *Aquacultural Engineering*, 91, 102106. doi: [10.1016/j.aquaeng.2020.102106](https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2020.102106)
- Ebeling, J.M., & Timmons, M.B. (2010). *Recirculating aquaculture*. Cayuga Aqua Ventures. Ithaca New York, USA.
- FAO. (2022). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2022. Towards Blue Transformation*. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cc0461en>
- Goddek, S., Delaide, B., Mankasingh, U., Ragnarsdottir, K.V., Jijakli, H., & Thorarinsdottir, R. (2015). Challenges of sustainable and commercial aquaponics. *Sustainability*, 7(4), 4199-4224. doi: [10.3390/su7044199](https://doi.org/10.3390/su7044199)
- Gutierrez-Wing, M.T., & Malone, R.F. (2006). Biological filters in aquaculture: trends and research directions for freshwater and marine applications. *Aquacultural engineering*, 34(3), 163-171. doi: [10.1016/j.aquaeng.2005.08.003](https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.08.003)
- Junge, R., König, B., Villarroel, M., Komives, T., & Jijakli, M.H. (2017). Strategic points in aquaponics. *Water*, 9(3), 182. doi: [10.3390/w9030182](https://doi.org/10.3390/w9030182)
- Khanjani, M.H., Sajjadi, M.M., Alizadeh, M., & Sourinejad, I. (2016). Study on nursery growth performance of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei* Boone, 1931) under different feeding levels in zero water exchange system. *Iranian Journal of Fisheries Sciences*, 15(4), 1465-1484.
- Khanjani, M. H., Alizadeh, M., Mohammadi, M., & Aliabad, H. S. (2021). The effect of adding molasses in different times on performance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) raised in a low-salinity biofloc system. *Annals of Animal Science*, 21(4), 1435-1454. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.02.019>
- مرکز پژوهش‌ها مجلس شورای اسلامی. (۱۴۰۰). بررسی عملکرد دولت. ۵. بخش کشاورزی و منابع طبیعی (۱۷۴۹۸). تهران، ایران.
- وزیرزاده، آریا. (۱۳۹۶). پرورش تیلپیا در ایران: ناجی آبی‌پروری یا مخرب محیط‌زیست، مجله شیل، ۵(۳)، ۱۰۴-۱۱۰.
- Avnimelech, Y. (2012). *Biofloc technology: a practical guide book*. The World Aquaculture Society, 2nd Edition. Baton Rouge, Louisiana, United States.
- Baganz, G.F., Junge, R., Portella, M.C., Goddek, S., Keesman, K.J., Baganz, D., Staaks, G., Shaw, C., Lohrberg, F., & Kloas, W. (2022). The aquaponic principle—It is all about coupling. *Reviews in Aquaculture*, 14(1), 252-264. doi: [10.1111/raq.12596](https://doi.org/10.1111/raq.12596)
- Barrington, K., Chopin, T., & Robinson, S. (2009). Integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) in marine temperate waters. *Integrated mariculture: a global review*. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper, 529, 7-46.
- Cang, P., Zhang, M., Qiao, G., Sun, Q., Xu, D., Li, Q., Yuan, X., & Liu, W. (2019). Analysis of Growth, Nutrition and Economic Profitability of Gibel Carp (*Carassius auratus gibelio* ♀ × *C. carpio* ♂) Cultured in Zero-water Exchange System. *Pakistan Journal of Zoology*, 51(2), 619. doi: [10.17582/journal.pjz/2019.51.2.619.630](https://doi.org/10.17582/journal.pjz/2019.51.2.619.630)
- Chopin, T. (2013). Aquaculture, integrated multi-trophic (IMTA). *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*, 12, 542-564.
- Cutajar, K., Falconer, L., Massa-Gallucci, A., Cox, R.E., Schenke, L., Bardócz, T., Sharman, A., Deguara, S., & Telfer T. C. (2022). Culturing the sea cucumber *Holothuria poli* in open-water integrated multi-trophic aquaculture at a coastal Mediterranean fish farm. *Aquaculture*, 550, 737881. doi: [10.1016/j.aquaculture.2021.737881](https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.737881)
- Dauda, A. B., Natrah, I., Karim, M., Kamarudin, M. S., & Bichi, A. U. H. (2018). African catfish aquaculture in Malaysia and Nigeria: Status, trends and prospects. *Fisheries and Aquaculture Journal*, 9(1), 1-5. doi: [10.4172/2150-3508.1000237](https://doi.org/10.4172/2150-3508.1000237)
- De Schryver P., Crab R., Defoirdt T., Boon N. and Verstraete W. (2008). The basics of bioflocs tech-

131. doi: [10.1080/10454438.2013.788898](https://doi.org/10.1080/10454438.2013.788898)
- Megahed, M. E. (2010). The effect of microbial biofloc on water quality, survival and growth of the green tiger shrimp (*Penaeus semisulcatus*) fed with different crude protein levels. *Journal of the Arabian Aquaculture Society*, 5(2), 119-142.
- Minabi, K., Sourinejad, I., Alizadeh, M., Ghatrami, E. R., & Khanjani, M. H. (2020). Effects of different carbon to nitrogen ratios in the biofloc system on water quality, growth, and body composition of common carp (*Cyprinus carpio* L.) fingerlings. *Aquaculture International*, 28, 1883-1898. doi: [10.1007/s10499-020-00564-7](https://doi.org/10.1007/s10499-020-00564-7)
- Moss S. M., & Leung, P. 2007. Comparative cost of shrimp production: earthen ponds versus recirculating aquaculture systems. In P. Leung and C. Engle (eds.), *Shrimp Culture: Economics, Marketing and Trade*, Blackwell Publishing. 291-300. <https://doi.org/10.1002/9780470277850.ch19>
- Naylor, R.L., Kishore, A., Sumaila, U.R., Issifu, I., Hunter, B.P., Belton, B., Bush, S.R., Cao, L., Gelcich, S., Gephart, J.A., Golden, C.D., Jonell, M., Koehn, J.Z., Little, D.C., Thilsted, S.H., Tigchelaar, M., & Crona, B. (20219). Blue foods demand across geographic and temporal scales. *Nature Communications*, 12, 5413. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25516-4>
- Neori, A., Chopin, T., Troell, M., Buschmann, A. H., Kraemer, G. P., Halling, C., Shpigel M., & Yarish, C. (2004). Integrated aquaculture: rationale, evolution and state of the art emphasizing seaweed biofiltration in modern mariculture. *Aquaculture*, 231(1-4): 361-391. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2003.11.015>
- Pérez-Fuentes, J. A., Pérez-Rostro, C. I., & Hernández-Vergara, M. P. (2013). Pond-reared Malaysian prawn *Macrobrachium rosenbergii* with the biofloc system. *Aquaculture*, 400, 105-110. doi: [10.1016/j.aquaculture.2013.02.028](https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.02.028)
- Pérez-Fuentes, J. A., Hernández-Vergara, M. P., Pérez-Rostro, C. I., & Fogel, I. (2016). C: N ratios affect nitrogen removal and production of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* raised in a biofloc system under high density cultivation. *Aquaculture*, 452, 247-[10.2478/aoas-2021-0011](https://doi.org/10.2478/aoas-2021-0011)
- Khanjani, M.H., Mohammadi, A., & Emerenciano, M.G.C. (2022a). Microorganisms in biofloc aquaculture system. *Aquaculture Reports*, 26, 101300. doi: [10.1016/j.aqrep.2022.101300](https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2022.101300)
- Khanjani, M.H., & Sharifinia, M. (2022b). Biofloc as a Food Source for Banana Shrimp *Fenneropenaeus merguensis* Postlarvae. *North American Journal of Aquaculture*, 84(4), 469-479. <https://doi.org/10.1002/naaq.10261>
- Khanjani, M. H., Zahedi, S., & Mohammadi, A. (2022c). Integrated multitrophic aquaculture (IMTA) as an environmentally friendly system for sustainable aquaculture: functionality, species, and application of biofloc technology (BFT). *Environmental Science and Pollution Research*, 29(45), 67513-67531. doi: [10.1201/b17540](https://doi.org/10.1201/b17540)
- Khanjani, M. H., da Silva, L. O. B., Fóes, G. K., do Nascimento Vieira, F., Poli, M. A., Santos, M., & Emerenciano, M. G. C. (2023a). Synbiotics and aquamimicry as alternative microbial-based approaches in intensive shrimp farming and biofloc: Novel disruptive techniques or complementary management tools? A scientific-based overview. *Aquaculture*, 739273. doi: [10.1016/j.aquaculture.2022.738757](https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738757)
- Khanjani, M.H., Torfi Mozanzade, M., Sharifinia, M., & Emerenciano, M.G.C. (2023b). Biofloc: A sustainable dietary supplement, nutritional value and functional properties. *Aquaculture*, 562, 738757. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738757>
- Liu, H., Li, H., Wei, H., Zhu, X., Han, D., Jin, J., Yang, Y., & Xie, S. (2019). Biofloc formation improves water quality and fish yield in a freshwater pond aquaculture system. *Aquaculture*, 506, 256-269. doi: [10.1016/j.aquaculture.2019.03.031](https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.03.031)
- Love, D.C., Fry, J.P., Genello, L., Hill, E.S., Frederick, J.A., Li, X., & Semmens, K. (2014). An international survey of aquaponics practitioners. *PloS one*, 9(7), e102662. doi: [10.1371/journal.pone.0102662](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102662)
- Mahanand, S.S., Moulick, S., & Rao, P.S. (2013). Water quality and growth of Rohu, *Labeo rohita*, in a biofloc system. *Journal of Applied Aquaculture*, 25(2), 121-

- 1586-1599. doi: [10.1016/j.jclepro.2019.04.290](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.290)
- Zappernick, N., Nedunuri, K. V., Islam, K. R., Khanal, S., Worley, T., Laki, S. L., & Shah, A. (2022). Techno-economic analysis of a recirculating tilapia-lettuce aquaponics system. *Journal of Cleaner Production*, 365, 132753. doi: [10.1016/j.jclepro.2022.132753](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132753)
- Zhao, Z., Luo, L., Wang, C. A., Li, J., Wang, L., Du, X., and Xu, Q. (2018). Effects of organic carbon addition on water quality and growth performance of bottom-and filter-feeding carp in a minimum-water-exchange pond polyculture system. *Fisheries Science*, 84, 681-689. doi: [10.1007/s12562-018-1204-7](https://doi.org/10.1007/s12562-018-1204-7)
251. doi: [10.1016/j.aquaculture.2015.11.010](https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.11.010)
- Pillay, T.V.R. (2004). *Aquaculture and the environment*. Second Edition. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470995730.fmatter>
- Price, C.S., & Morris Jr, J.A. (2013). *Marine cage culture and the environment: Twenty-first century science informing a sustainable industry*. NOAA/National Centers for Coastal Ocean Science, 164, 158P.
- Ragnarsdottir, K.V., Sverdrup, H.U., & Koca, D. (2011). Challenging the planetary boundaries I: Basic principles of an integrated model for phosphorous supply dynamics and global population size. *Applied Geochemistry*, 26, S303-S306. doi: [10.1016/j.apgeochem.2011.03.088](https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.03.088)
- Ren, J. S., Stenton-Dozey, J., Plew, D. R., Fang, J., & Gall, M. (2012). An ecosystem model for optimising production in integrated multitrophic aquaculture systems. *Ecological Modelling*, 246, 34-46. doi: [10.1016/j.ecolmodel.2012.07.020](https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.07.020)
- Skår, C.K., & Mortensen, S. (2007). Fate of infectious salmon anaemia virus (ISAV) in experimentally challenged blue mussels *Mytilus edulis*. *Diseases of Aquatic Organisms*, 74(1), 1-6. doi: [10.3354/dao074001](https://doi.org/10.3354/dao074001)
- Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., & Lovatelli, A. (2014). *Small-scale aquaponic food production: integrated fish and plant farming*. FAO Fisheries and aquaculture technical paper, (589), I.
- Summerfelt, S., Bebak-Williams, J., & Tsukuda, S. (2001). *Controlled systems: water reuse and recirculation*. In G. Wedermeyer (ed.), *Fish hatchery management* (second edition), Bethesda, MD: American fisheries society, 285-295.
- Sverdrup, H. U., & Ragnarsdottir, K. V. (2011). Challenging the planetary boundaries II: Assessing the sustainable global population and phosphate supply, using a systems dynamics assessment model. *Applied Geochemistry*, 26, S307-S310. doi: [10.1016/j.apgeochem.2011.03.089](https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.03.089)
- Thorarinsdottir, R.I. (2015). *Aquaponics Guidelines*. Haskolaprent. Reykjavik, Iceland.
- Yep, B., & Zheng, Y. (2019). Aquaponic trends and challenges—A review. *Journal of Cleaner Production*, 228:

Proposed Solutions for the Sustainable Management and Effective Protection of Shared Boundary Aquifers

M. Nakhaei¹, A. Ahmadi^{2*}, A. Sheikhzadeh²

1, 2- Professor and PhD Student of Hydrogeology, Kharazmi University, Tehran, Iran.

*(Corresponding Author Email: std_aliahmadi@khu.ac.ir)

Received: 04-01-2023

Revised: 13-03-2023

Accepted: 28-03-2023

Available Online: 21-09-2023

راه کارهای پیشنهادی به منظور مدیریت پایدار و حفاظت مؤثر از آبخوان‌های مشترک مرزی

محمد نخعی^۱، علی احمدی^{۲*}، علاهن شیخزاده^۲

۱ و ۲- به ترتیب استاد و دانشجوی دوره دکتری هیدروژئولوژی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

*(نویسنده مسئول، E-Mail: std_aliahmadi@khu.ac.ir)

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۲۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۶/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۰۸

Abstract

Groundwater is a vital resource that supplies water needs for various purposes. In recent years, with the increase in population growth, the demand for water along with climate change have led to excessive extraction of underground water and the quantitative and qualitative reduction of this valuable resource at the global level. With the increasing understanding of the interdependence of water and development, paying attention to the sustainable management of underground water in shared boundary aquifers to deal with threats such as lack of water, food, energy, loss of ecosystems and biodiversity and most importantly a decrease in human security, is a must-do act. Therefore, in order to achieve an increase in the level of cooperation for the fair and sustainable use of the country's shared boundary aquifers and also to prevent any disputes and conflicts in the future, the successful experiences of international cooperation between shared boundary aquifers such as the Geneva Aquifer Agreement (between France and Switzerland) has been used and suggestions have been made in this regard. The proposed solution includes an initial agreement contract for more cooperation in the field of identifying technical, socio-cultural, political, economic and legal parameters with the participation and activity of all governmental and non-governmental organizations, technical and specialist experts, academic and civil communities as a common set, provision of financial resources to achieve a comprehensive study of the common aquifer status, sharing reliable information in a common base, establishing an organization agreed by the beneficiary countries and defining the necessary laws and obligations, forming an advisory committee in order to reduce disputes and to monitor the implementation of commitments, and finally, presenting a comprehensive framework in the form of a shared agreement between the beneficiary countries with a common aquifer.

Keywords: Shared Boundary Aquifer, Sustainable Development, Groundwater Management, Management Solution.

چکیده

آب زیرزمینی یک منبع حیاتی تأمین کننده نیازهای آبی برای مصارف گوناگون می باشد. در سال های اخیر افزایش رشد جمعیت و تقاضا برای آب و تغییر اقلیم، منجر به برداشت بیش از حد آب زیرزمینی و کاهش کمی و کیفی این منبع ارزشمند در سطح جهانی شده است. با درک روزافزون وابستگی متقابل آب و توسعه، توجه به مدیریت پایدار آب زیرزمینی در آبخوان های مشترک مرزی برای مقابله با تهدیدهایی هم چون کمبود آب، غذا، انرژی، از بین رفتن اکوسیستم ها و تنوع زیستی و از همه مهم تر کاهش امنیت انسانی، امری الزامی است. بنابراین برای دستیابی به افزایش سطح همکاری به منظور استفاده عادلانه و پایدار از آبخوان های مشترک مرزی کشور و همچنین جلوگیری از هر گونه اختلاف و مناقشات در آینده، از تجارب موفق همکاری های بین المللی میان آبخوان های مشترک مرزی هم چون توافق نامه آبخوان ژنو (میان فرانسه و سوئیس)، استفاده نموده و پیشنهادهای در این زمینه ارائه شده است. راهکار پیشنهادی شامل انعقاد توافق نامه اولیه برای همکاری بیشتر در زمینه شناسایی پارامترهای فنی، فرهنگی-اجتماعی، سیاسی، اقتصادی و حقوقی با مشارکت و فعالیت تمام سازمان های دولتی، غیردولتی، کارشناسان فنی و متخصص، جوامع دانشگاهی و مدنی در یک مجموعه مشترک، تأمین منابع مالی برای دستیابی به مطالعه جامع وضعیت آبخوان مشترک، اشتراک گذاری اطلاعات قابل اعتماد در یک پایگاه مشترک، ایجاد یک سازمان مورد توافق کشورهای ذی نفع و تعریف قوانین و تعهدات لازم، تشکیل کمیته مشورتی به منظور کاهش اختلافات و نظارت بر اجرای تعهدات و در آخر ارائه یک چارچوب جامع در قالب یک توافق نامه مشترک میان کشورهای ذی نفع با یک آبخوان مشترک می باشد.

واژه های کلیدی: آبخوان مشترک مرزی، توسعه پایدار، مدیریت آب زیرزمینی، راهکار مدیریتی.

آب زیرزمینی یکی از مهمترین منابع تأمین‌کننده آب شیرین برای استفاده‌های مختلف می‌باشد که از نیم قرن گذشته تاکنون به یک منبع مهم و حیاتی برای تأمین نیازهای گوناگون آبی تبدیل شده است. هر چه وابستگی جهانی به آب‌های زیرزمینی افزایش پیدا کند، چالش‌ها و مشکلات جدیدی نیز در مورد مالکیت، نحوه استفاده، دسترسی، حفاظت و توسعه این منابع به‌ویژه در نواحی مرزی که دارای آبخوان‌های مرزی هستند، به وجود می‌آید (Utton و Hayton، ۱۹۸۹). آبخوان‌های مرزی منابع پنهان آب‌های زیرزمینی هستند که بین دو یا چند کشور مشترک می‌باشند و از مرزهای سیاسی پیروی نمی‌کنند. تحقیقات سیستماتیک جهانی در مورد آبخوان‌های مرزی در سال ۲۰۰۰ با طرح مدیریت منابع آبخوان مشترک بین‌المللی (ISARM) توسط پروژه هیدرولوژیکی سازمان بین‌المللی یونسکو آغاز شد (IGRAC، ۲۰۱۵). از نظر آماری در مجموع ۵۹۲ آبخوان مشترک مرزی در سطح جهانی از جمله ۷۲ آبخوان در آفریقا، ۷۳ در قاره آمریکا، ۱۲۹ در آسیا و اقیانوسیه، و ۳۱۸ در اروپا شناسایی شده است (IGRAC، ۲۰۱۵). بیش از ۱۵۰ کشور دارای آبخوان مشترک مرزی می‌باشند (IGRAC و UNESCO_IHP، ۲۰۱۵) و بسیاری از آن‌ها ظرفیت فنی برای ارزیابی مناسب منابع آب زیرزمینی ندارند. این امر منجر به وضعیتی می‌شود که در آن آب‌های زیرزمینی مرزی به طور گسترده مورد مطالعه قرار نگرفته و مدیریت نمی‌شوند (Eckstein، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۷). باتوجه به ارتباطات یک سیستم آب زیرزمینی، بهره‌برداری بیش از حد یک طرفه از آبخوان مشترک، می‌تواند جریان صحرایی آب زیرزمینی را تغییر دهد که منجر به از دست رفتن منابع آب زیرزمینی خارج از مرز (یعنی در کشورهای همسایه) می‌شود؛ به همین دلیل رقابت برای منابع آبی اجتناب‌ناپذیر است و می‌تواند منجر به درگیری بین کشورهای همسایه متعاقب آن شود (Lesser و همکاران، ۲۰۱۹). علاوه بر این، در زمینه تغییرات آب‌وهوایی، با تشدید بیشتر درجه خشکسالی و رشد سریع جمعیت، بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی در مناطق خشک به طور فزاینده‌ای شدید می‌شود (Soden و Held، ۲۰۰۶). در نتیجه، توسعه و حفاظت از منابع آب زیرزمینی در یک آبخوان مشترک مرزی با خطرات و چالش‌های بیش‌تری مواجه است (Fallatah و همکاران، ۲۰۱۷؛ Gaye و Tindimugaya، ۲۰۱۹). شفاف‌سازی شکل‌گیری، توزیع، توسعه و بهره‌برداری از منابع آبی مشترک و ارزیابی دقیق میزان منابع آب موجود، مبانی برای برنامه‌ریزی علمی و تعیین استفاده منطقی از منابع آب زیرزمینی در آبخوان‌های مشترک مرزی را تشکیل می‌دهد (Liu و همکاران، ۲۰۲۰). باتوجه به این مسائل، شناخت و مدیریت منابع آب زیرزمینی در سطح مرزی به منظور استفاده عادلانه و پایدار (تأمین آب شرب، توسعه انرژی، امنیت غذایی و انسانی، حفظ تنوع زیستی و بقای اکوسیستم‌ها) و همچنین جلوگیری از هرگونه اختلاف و مناقشات میان کشورها در آینده امری ضروری می‌باشد.

در این تحقیق باتوجه به اهمیت منابع آب زیرزمینی در آبخوان‌های مشترک مرزی در سطح بین‌المللی، به مطالعه این آبخوان‌ها، جنبه‌های اصلی پروژه مدیریت آبخوان‌های مشترک بین‌المللی، حکمرانی آب زیرزمینی (شاخص‌های حکمرانی مطلوب، چالش‌های حکمرانی، حکمرانی اثربخش آب زیرزمینی و مشارکت در حکمرانی آب) و همچنین حکمرانی محلی آب در ایران پرداخته و روند تکاملی توافق‌نامه‌های مرزی موجود در زمینه آب زیرزمینی و مدیریت آن‌ها بررسی شده است. وضعیت منابع آب همسایگان ایران و آبخوان‌های مشترک ایران با همسایگان نیز مطالعه شده است. یکی از موفق‌ترین توافق‌نامه‌ها در مدیریت آبخوان‌های مشترک مرزی، توافق‌نامه ژنو بین کشورهای سوئیس و فرانسه می‌باشد که در این تحقیق به آن اشاره شده و با استفاده از تجارب موفق آن و همچنین تجارب توافق‌نامه‌های مشترک همچون سیستم آبخوان شمال غربی صحرای بزرگ آفریقا، آبخوان گورانی و آبخوان الساگ-الدیسی پیشنهاداتی برای مدیریت مؤثر آبخوان‌های مشترک مرزی و افزایش سطح همکاری بین آن‌ها ارائه شده است. این راهکار پیشنهادی در مورد آبخوان‌های مشترک مرزی ایران با همسایگان نیز قابل استفاده می‌باشد. در این مقاله روش‌های تحلیلی نهادی-توصیفی و الگوبرداری به کار گرفته شده است. اطلاعات موجود در این بررسی، برگرفته از مطالعات اسنادی اعم از کتب، مجلات، نشریات داخلی و خارجی، ارقام خام آماری، جستجوهای اینترنتی و اسناد منتشر شده در زمینه مطالعه حاضر می‌باشد.

مبانی تحقیق

• آبخوان‌های مرزی در مقیاس بین‌المللی

کمیسیون قوانین بین‌المللی سازمان ملل متحد (UNILC) در پیش‌نویس قوانین آبخوان‌های مرزی (۲۰۰۸) آبخوان یا سیستم آبخوان مرزی را به عنوان آبخوان یا سیستم آبخوانی که بخش‌هایی از آن درون قلمروهای سیاسی مختلف قرار گرفته است، تعریف می‌نماید (اسکندری مایوان و محمدزاده، ۱۳۹۱). در شکل (۱) موقعیت آبخوان‌های مشترک مرزی سراسر جهان نشان داده شده است (IGRAC، ۲۰۱۵). امروزه آب‌های زیرزمینی مهمترین منبع تأمین آب شیرین برای انسان‌ها هستند. به همین دلیل قسمت اعظم استخراج منابع زیرزمینی توسط دولت‌ها بر این حوزه متمرکز است. وجود آبخوان‌های مشترک میان چندین دولت و علاقه مفرط دولت‌ها در بهره‌برداری و استخراج از این سفره‌ها سبب پیدایش اختلاف میان آنها شده است. مهمترین چالش‌های پیش روی دولت‌ها درخصوص آبخوان‌های مرزی مربوط به رژیم حقوقی حاکم و نحوه بهره‌برداری، استخراج و مدیریت این ذخایر می‌باشند (حاتمی و بابایی، ۱۳۹۳).

گرفته شود (اسکندری مایوان و محمدزاده، ۱۳۹۱).

- توزیع مکانی پارامترها:

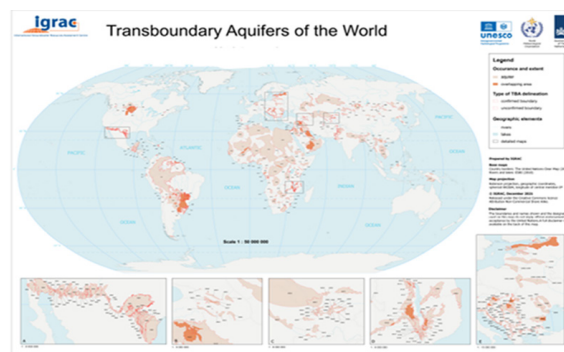
عوامل بسیار زیادی بر رفتار و پتانسیل‌های توسعه آبخوان‌های مرزی مؤثر می‌باشند که ازجمله آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود: پارامترهای هیدرولیکی، بارندگی و مناطق تغذیه آبخوان، مناطق تخلیه طبیعی آبخوان، مناطق توسعه آب زیرزمینی شامل مناطق فعلی و مناطق برنامه‌ریزی شده آینده، کیفیت آب، مخاطرات بالقوه (مانند آلودگی، تغییرات اکوسیستم، نشست زمین و ...) و میزان وخامت آن‌ها، میزان آسیب‌پذیری آبخوان نسبت به عوامل آلوده کننده. هر یک از این پارامترها در کشورهای مختلف دارای آبخوان مشترک، ارزش وزنی متفاوتی دارند. به‌عنوان مثال در یک آبخوان مرزی که بین دو کشور واقع شده، ممکن است مناطق تغذیه آبخوان در یک سوی مرز سیاسی قرار گرفته باشد، درحالی که مناطق تخلیه (گاهی اوقات مناطق دارای آلودگی بهتر) در آن سوی دیگر مرز سیاسی واقع شده باشند. ازجمله این موارد می‌توان به آبخوان گورانی واقع در آمریکای جنوبی اشاره کرد که در آن، نواحی رخنمون آبخوان با میانگین بارندگی سالانه بیش از ۱۰۰۰ میلی‌متر، در کشور برزیل قرار دارد، درحالی‌که بخشی از تخلیه آبخوان در کشور اوروگوئه واقع می‌باشد (اسکندری مایوان و محمدزاده، ۱۳۹۱).

- هیدرولیک آب‌های زیرزمینی و تأثیرات بین‌المللی:

استخراج بی‌رویه آب‌های زیرزمینی از آبخوان‌های مرزی، سبب تغییر در وضعیت سطح ایستابی و تغییر در الگوی جریان آب زیرزمینی می‌شود که پیامدهایی از نظر کمی و کیفی (تخریب کیفیت و آلودگی آب زیرزمینی) در پی خواهند داشت:

الف- تغییر در سطح ایستابی و الگوی جریان آب زیرزمینی استخراج آب زیرزمینی از آبخوان‌های مرزی می‌تواند موجب تغییر در وضعیت سطح ایستابی به شکل مخروط افت و گسترش آن در طول مرز سیاسی، بشود. از آنجایی‌که برآورد جریان آب زیرزمینی عبوری از یک مرز سیاسی از طریق اندازه‌گیری مستقیم امکان‌پذیر نیست، بنابراین به‌منظور تخمین میزان جریان می‌توان از مدل‌های ریاضی استفاده نمود. استخراج بی‌رویه آب‌های زیرزمینی در یک طرف مرز سیاسی می‌تواند منجر به تغییر الگوی جریان آب زیرزمینی در منطقه آبخوان مرزی شود، بنابراین لازم است در طراحی سایت‌ها و الگوی بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی مرزی، تمامی اصول مدیریت پایدار و توسعه همسان در استفاده از منابع آبخوان‌های مرزی در نظر گرفته شود (اسکندری مایوان و محمدزاده، ۱۳۹۱).

ب- تخریب کیفیت و آلودگی آب زیرزمینی: از دیگر پیامدهای استخراج بی‌رویه آب زیرزمینی، تخریب کیفیت آب زیرزمینی در نتیجه افت سطح ایستابی و در اثر اختلاط با آب‌های شور داخلی و یا نفوذ آب دریا در مناطق ساحلی می‌باشد، که در نواحی آبخوان‌های مرزی می‌تواند از یک کشور به کشور دیگر سرایت نماید. برخی فعالیت‌های انسانی مانند دفن زباله‌ها، منجر به آلودگی آب‌های



شکل ۱- نقشه آبخوان‌های مشترک فرامرزی جهان (IGRAC، ۲۰۱۵)

هم‌زمان با افزایش تقاضا برای منابع آب شیرین در دنیا و به تبع آن افزایش فشار بر منابع آب زیرزمینی، تقاضا در جهت ایجاد سازوکارهای همکاری و مدیریتی در زمینه بهره‌برداری و حفاظت منابع آب زیرزمینی در عرصه بین‌المللی رو به افزایش می‌باشد. در نتیجه پروژه مدیریت آبخوان‌های مشترک بین‌المللی (ISARM) در ژوئن ۲۰۰۰ و با هدف تدوین سیاست‌های جهانی مدیریت آبخوان‌های مرزی و همچنین افزایش آگاهی عمومی درباره نقش منابع آب زیرزمینی در توسعه پایدار ملی و بین‌المللی، توسط برنامه بین‌المللی هیدرولوژی یونسکو (UNESCO-IHP) آغاز شد. تا قبل از سال ۲۰۰۰ میلادی، هیچ‌گونه برنامه جهانی تخمین آبخوان‌های مرزی وجود نداشت. اما، در طی چهارمین جلسه انجمن بین دولتی برنامه بین‌المللی هیدرولوژی یونسکو با اتخاذ تصمیماتی مبنی بر فهرست و ارزیابی تمام آبخوان‌های دنیا، این خلأ جبران شد. پروژه مدیریت آبخوان‌های مشترک بین‌المللی حاصل تلاش چندین آژانس یونسکو برای توسعه همکاری بین کشورهای دارای منابع آب زیرزمینی مشترک است و دارای رویکردی چند وجهی می‌باشد که در فهم پنج موضوع اصلی علمی، اقتصادی، اجتماعی، قانونی، سازمانی و محیط‌زیستی مربوط به آب‌های زیرزمینی مشارکت دارد (اسکندری مایوان و محمدزاده، ۱۳۹۱).

• جنبه‌های علمی-فنی مدیریت آبخوان‌های مرزی

جنبه‌های علمی-فنی (هیدروژئولوژیکی) در امر شناخت و توسعه آبخوان‌های مرزی اهمیت بسیار زیادی دارد که بخش‌های مختلف مطالعاتی (هیدرولیک آب‌های زیرزمینی، مدیریت منابع، سیمای منابع آبخوان مرزی و توزیع فضایی پارامترها) را در بر می‌گیرد:

- شناسایی آبخوان‌های مرزی:

وقتی یک آبخوان به‌عنوان آبخوان مرزی به رسمیت شناخته می‌شود، این امر باید منجر به پذیرش بین‌المللی منابع مشترک شود. اما برخلاف آب‌های سطحی، به دلیل مبهم بودن مرزهای منابع آب زیرزمینی، در اغلب موارد آبخوان‌های مرزی به طور همه‌جانبه به رسمیت شناخته نمی‌شوند. ازاین‌رو، لازم است در مدیریت آبخوان‌های مرزی، سیستم آبخوان، آبخوان‌هایی که با یک دیگر ارتباط هیدرولیکی دارند، در نظر

زیرزمینی می‌شود، که در نواحی مرزی این آلودگی می‌تواند از مرز سیاسی عبور کرده و از کشوری به کشور دیگر سرایت نماید. از آنجایی که اغلب زمان بسیار زیادی طول می‌کشد تا آلودگی آب‌های زیرزمینی آشکار شود، بنابراین رفع آن نیز بسیار کند و گاهی غیر ممکن می‌باشد (اسکندری مایوان و محمدزاده، ۱۳۹۱).

- مدیریت مشترک آبخوان‌های مرزی:

بررسی‌ها و مطالعات انجام شده در مورد آبخوان‌های مرزی همگی تأییدکننده لزوم ایجاد یک پایگاه دانش مبتنی بر فهم دقیق سیستم آبخوان و تهیه مدل مفهومی از آبخوان مرزی می‌باشد، که در آن تمامی جنبه‌های توسعه‌ای و مدیریتی آبخوان در نظر گرفته شده باشد. شناخت دقیق آبخوان بدون داشتن اطلاعات هیدروژئولوژیکی نظیر میزان گسترش آبخوان، ارتباط آن با سایر آبخوان‌ها و دیگر پدیده‌های هیدروژئولوژیکی نظیر تغذیه و تخلیه آبخوان و منابع آلوده‌کننده، امکان‌پذیر نخواهد بود. بنابراین به منظور اعتباربخشی به مدل مفهومی آبخوان، باید اطلاعات هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی نظیر میزان بارندگی، سطح آب زیرزمینی، جریان رودخانه، تبخیر و وضعیت بهره‌برداری از آب زیرزمینی در آبخوان مرزی در همه کشورهای دارای حق‌آبه از آبخوان مشترک به صورت دائم رصد شود (اسکندری مایوان و محمدزاده، ۱۳۹۱).

• جنبه‌های حقوقی مدیریت آبخوان‌های مرزی

نگرانی در زمینه کمیت و کیفیت آب زیرزمینی، در مناطق مرزی که جریان آب زیرزمینی از مرزهای سیاسی عبور می‌کند با چالش‌های سیاسی روبه‌رو خواهد شد. حساسیت کشورهای مختلف در مورد حاکمیت ملی، تفاوت در سیستم‌های حقوقی و سیاسی- اجتماعی و همچنین تنوع طرح‌های توسعه ملی، ازجمله مواردی است که مدیریت پایدار و توسعه همسان را در کشورهای دارای آبخوان مشترک پیچیده می‌کند. با در نظر گرفتن این حقیقت که سیستم‌های حقوقی و سازمان‌های ملی هیچ یک از کشورهای دارای آبخوان مشترک، به تنهایی نمی‌تواند قوانینی در مورد آبخوان‌های مرزی وضع نماید که مورد پذیرش تمامی کشورها باشد، وجود چنین قوانینی را باید در جای دیگری، به عنوان مثال وجود یا عدم وجود معاهده‌ها و توافق‌های صورت گرفته میان کشورهای ذی‌ربط جستجو نمود (اسکندری مایوان و محمدزاده، ۱۳۹۱).

• جنبه‌های سازمانی مدیریت آبخوان‌های مرزی

- لزوم ایجاد سازمان‌های فرامرزی:

ازجمله مشکلات مدیریت منابع طبیعی (به‌طور خاص آبخوان‌های مرزی) عدم انطباق مقیاس و مرزهای این منابع با مقیاس و مسئولیت نهادهای مدیریت‌کننده آن‌ها می‌باشد. ازاین‌رو، به منظور مدیریت این منابع در شرایط مرزی به ایجاد نهادهای اداری چندگانه نیاز است. لذا دلایل اصلی برای لزوم ایجاد نهادهای فرامرزی مدیریت

آبخوان‌های مرزی را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- از آنجایی که کشورهای دارای آبخوان مشترک در یک منطقه آبی- اقتصادی مشابه (در ناحیه آبخوان) واقع شده‌اند، تأثیرات استفاده از آبخوان و یا تهدیدهای جانبی متوجه آبخوان (تغییرات آب و هوایی و ...)، مشکلات یکسانی را برای کشورهای منطقه به ارمغان خواهد آورد. بنابراین رویکرد مشارکتی کشورها در مواجهه با مشکلات مشترک، منفعی را برای این کشورها در پی خواهد داشت و بهتر است ایجاد نهادهای فرامرزی در جهت هماهنگ‌سازی فعالیت‌ها در دستور کار این کشورها قرار بگیرد.

- گاهی ممکن است تأثیر هیدروژئولوژیکی ناشی از توسعه آبخوان از مرز سیاسی عبور کرده و اثراتی فرامرزی را به آبخوان کشور دیگر تحمیل نماید، که اغلب این موضوع منبعی بالقوه برای بروز مناقشات بین‌المللی بر سر منابع آب در منطقه محسوب می‌شود. لذا بهتر است در جهت نهادینه کردن تعاملات کشورها در زمینه همکاری در مدیریت اثرات فرامرزی و جلوگیری از تبدیل آن‌ها به مناقشات بین‌المللی، ایجاد نهادهای فرامرزی مورد توجه قرار گیرد (اسکندری مایوان و محمدزاده، ۱۳۹۱).

- ساختارهای سازمانی:

سازمان‌های درگیر با مدیریت منابع آب زیرزمینی در کشورهای مختلف جهان، بسیار متنوع هستند؛ چراکه این سازمان‌ها تحت تأثیر حکومت کشور متبوع خود می‌باشند. سازمان‌ها در کشورهای دارای حکومت بسیط^۱ که در آن مدیریت آبخوان‌ها در قالب طرح‌های کشوری و وزارت‌خانه‌های دولتی انجام می‌شود و کشورهای دارای حکومت فدرال که دارای دو حکومت مرکزی و فدرال هستند، تا کشورهایی که در آن مسائل مدیریت آب‌های زیرزمینی صرفاً در سطح همیاری مردمی حل‌وفصل می‌شود، متفاوت هستند. البته در این میان کشورهایی نیز وجود دارند که در آن‌ها، سازمان‌ها و بخش‌های مختلف دولت، بازار و جامعه (وزارت‌خانه‌ها، سازمان‌های دولتی و غیردولتی، شرکت‌ها، نهادهای کاربران آب و ساختارهای غیررسمی) درگیر مسئله مدیریت آب زیرزمینی می‌باشند. در بین این سازمان‌ها، دولت مرکزی محتمل‌ترین نهادی است که مجاز به رسیدگی به امور فرامرزی و بین‌المللی می‌باشد. البته محدود شدن مسأله مدیریت آبخوان‌های مرزی به سطوح دولتی، خطر سیاسی شدن مدیریت منابع آب را در پی دارد که این موضوع به نوبه خود موجب از بین رفتن و یا محدود شدن تمامی راه‌حل‌های ممکن است که دیگر سازمان‌ها و نهادهای درگیر در امر مدیریت آب‌های زیرزمینی، می‌توانند ارائه دهند. واضح است که راه‌حل قطعی و روشنی برای ایجاد ساختارهای سازمانی در امر مدیریت آبخوان‌های مشترک وجود ندارد، ولی به هر حال لازم است بسترهای آن، مبتنی بر جنبه‌های هیدروژئولوژیکی، اجتماعی- اقتصادی و اجتماعی- فرهنگی در هر یک از کشورهای دارای آبخوان مشترک به وجود آید (اسکندری مایوان و محمدزاده، ۱۳۹۱).

• جنبه‌های اقتصادی - اجتماعی آبخوان‌های مرزی

منابع آب زیرزمینی فرصت‌های بی‌شماری جهت توسعه ملی کشورها فراهم نموده، به‌طوری که در بسیاری از نقاط دنیا آب زیرزمینی به اصلی‌ترین منبع برای رفع نیازهای آبی مردم تبدیل شده است و این وابستگی روبه‌روز در حال افزایش است. در دهه‌های اخیر پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه تکنولوژی اکتشاف و استخراج آب زیرزمینی، حجم زیادی از منابع آبی را در اختیار طیف وسیعی از کاربران آب قرار داده است، به‌طوری که هم‌زمان با این پیشرفت‌ها پیامدهای اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی ناشی از استخراج بی‌رویه و آلودگی آب‌های زیرزمینی، روبه‌روز در حال افزایش است. افت سطح آب زیرزمینی، تغییر شرایط مرزی هیدرولیکی و الگوی نشت و کاهش کیفیت آب زیرزمینی ازجمله نشانه‌های افزایش رقابت برای به‌دست آوردن منابع آب زیرزمینی می‌باشد. این موارد به‌علاوه افزایش هزینه‌های اکتشاف و استخراج آب زیرزمینی بر اقتصاد داخلی کشورها تأثیراتی دارد که پیامدهای فیزیکی، اجتماعی و اقتصادی ناشی از آن، فراتر از مرزهای بین‌المللی خواهد بود. آلودگی آب زیرزمینی ناشی از توسعه شهری، کشاورزی و صنعتی و گسترش این آلودگی‌ها در طول مرزهای سیاسی از دیگر پیامدهای این تغییر الگوی مصرف آب‌های زیرزمینی می‌باشد (اسکندری مایوان و محمدزاده، ۱۳۹۱).

• جنبه‌های محیط‌زیستی آبخوان‌های مرزی

جنبه‌های محیط‌زیستی آبخوان‌های مرزی را می‌توان، هم از دیدگاه منطقه‌ای و هم جهانی بررسی نمود. اکثر سیستم‌های آبخوان دارای اکوسیستم، چشم‌انداز طبیعی و آب‌بران سنتی خاص خود می‌باشند که وابسته به الگوی طبیعی تغذیه و تخلیه آبخوان هستند. سیاست‌ها و طرح‌های توسعه بیشتر آبخوان، ممکن است این وابستگی‌ها را متأثر نماید. ازاین‌رو، چنانچه این وابستگی‌ها به‌طور کاملاً دقیق شناسایی نشوند، که طرح‌های مدیریتی آینده با مشکلات غیرپیش‌بینی شده‌ای روبه‌رو شوند. اما اگر تمامی ویژگی‌های آبخوان به دقت مطالعه و شناسایی قرار گیرند و تأثیرات احتمالی در نظر گرفته شود، هیچ‌گونه تضادی بین حفاظت از این اکوسیستم‌ها و برداشت منابع آب زیرزمینی از آبخوان به‌وجود نخواهد آمد (اسکندری مایوان و محمدزاده، ۱۳۹۱).

• سازمان‌هایی که با پروژه مدیریت آبخوان‌های مشترک بین‌المللی همکاری دارند

بخش هیدرولوژی بین‌المللی یونسکو در راستای پروژه مدیریت آبخوان‌های مشترک بین‌المللی، همکاری گسترده‌ای با شمار زیادی از سازمان‌های بین‌المللی از قبیل انجمن بین‌المللی هیدروژئولوژیست‌ها (IAH)، سازمان جهانی غذا و کشاورزی (FAO)، کمیسیون اقتصادی سازمان ملل در اروپا (UNECE)، سازمان کشورهای آمریکایی

(OAS)، شبکه بین‌المللی مرکز محیط‌زیست و آب بالکان (INWEB)، مرکز ارزیابی منابع آب بین‌المللی (IGARC)، برنامه ارزیابی و نقشه‌برداری هیدروژئولوژیکی جهانی (WHYMAP) و دیگر سازمان‌ها همکاری دارد (اسکندری مایوان و محمدزاده، ۱۳۹۱).

• حکمرانی آب زیرزمینی

در تشریح مفهوم حکمرانی آب شاید شناخته‌شده‌ترین و پرکاربردترین تعریف، مربوط به GWP^۲ باشد. طبق این تعریف، حکمرانی مجموعه‌ای از سیستم‌های سیاسی و اجتماعی، اقتصادی و اجرایی موجود است که توسعه و مدیریت منابع آب و ارائه خدمات آب در سطوح مختلف جامعه را تنظیم می‌کند (Hall و Rogers، ۲۰۰۳). حکمرانی آب، به کلیت نظام‌هایی اطلاق می‌شود که در تصمیم‌گیری درباره توسعه و مدیریت منابع آب دخیل هستند، در واقع، حکمرانی آب مفهومی کامل‌تر از حکومت است که بر روابط بین جامعه و دولت تأکید می‌کند. همچنین، این مفهوم به معنای سیاست‌گذاری و مدیریت منابع آبی است به‌نحوی که از نظر اجتماعی پذیرفته شده باشد و هدف آن توسعه پایدار، کاربرد صحیح منابع آبی و اجرای این سیاست‌ها با همکاری مؤثر ذی‌نفعان و کنش‌گران درگیر در این فرآیند است (سالاری و همکاران، ۱۳۹۴).

-شاخص‌های حکمرانی مطلوب:

مفهوم حکمرانی خوب یا مطلوب، مفهومی است که چند دهه بیشتر از عمر آن نمی‌گذرد، اما تاکنون برداشت‌های مختلفی از آن ارائه شده است. بانک جهانی در سال ۱۹۸۹ میلادی نخستین بار حکمرانی خوب را به مفهوم ارائه خدمات عمومی کارآمد، نظام قضایی قابل اعتماد و نظام اداری پاسخگو توصیف نمود. همچنین، صندوق بین‌المللی پول نیز با نگاهی معطوف به توسعه، حکمرانی مطلوب را به نتایج بهتر توسعه تعریف نموده است. این سازمان در تعریف حکمرانی مطلوب، آن را مکانیزم‌ها، فرایندها و رویه‌هایی می‌داند که به واسطه آن‌ها، ذی‌نفعان و گروه‌ها منافع خود را دنبال می‌کنند، حقوق قانونی را اجرا می‌کنند، تعهدات را برآورده می‌سازند و تفاوت‌های موجود را تعدیل می‌کنند (Simms، ۲۰۰۸).

یونسکو، حکمرانی مطلوب را به معنای سازوکارها، فرآیندها و نهادهایی می‌داند که به‌واسطه آن‌ها شهروندان، گروه‌ها و نهادهای مدنی، منافع مدنی خود را دنبال می‌کنند و حقوق قانونی خود را به اجرا در می‌آورند و تعهداتشان را برآورده می‌سازند. همچنین حکمرانی مطلوب را فرآیند تصمیم‌گیری و اجرای تصمیم‌ها با تمرکز بر بازیگران رسمی و غیررسمی تعریف می‌کنند (UNDP، ۱۹۹۹). کمیسیون اقتصادی و اجتماعی سازمان ملل متحد برای آسیا و اقیانوسیه، هشت ویژگی را پاسخگویی، شفافیت، حاکمیت قانون، مشارکت، مسئولیت‌پذیری، اجماع محوری، کارایی و اثربخشی، انصاف و عدالت و برابری برای حکمرانی مطلوب برشمرده است (Weiss، ۲۰۰۰؛ Mobius، ۲۰۰۱).

همچنین برای حکمرانی مطلوب شاخص‌هایی همچون مشارکت جویی، اجماع‌گرایی، شفافیت، قانون‌گرایی و حاکمیت قانون، اثربخشی و کارآمدی، عدالت جویی و توجه به درخواست‌های مردم و ذی‌نفعان معرفی شده است (Simms, 2008).

-چالش‌های حکمرانی آب زیرزمینی:

بحث حکمرانی به حیطه‌های مختلفی از جمله بخش آب (باتوجه به ویژگی‌های آن) قابل تعمیم است. توافق گسترده‌ای در سومین نشست شورای جهانی آب در کیوتو در سال ۲۰۰۳ در مورد اهمیت و مفاد حکمرانی آب صورت گرفت. این نشست حکمرانی مشخص می‌کند چه کسی و در چه شرایطی به آب دسترسی دارد، کیفیت آب چگونه حفظ می‌شود، چگونه با موضوعات قابل همکاری و تصمیم‌گیری باید روبه‌رو شد، آیا برای صرفه‌جویی در آب سیاست‌هایی وجود دارد، چه کسی داور می‌کند و چه کسی تخصیص می‌دهد. بر این اساس، بحران موجود آب در نتیجه حکمرانی نامناسب و نه صرفاً کمبود خود آب است (فرشته‌پور و همکاران، ۱۳۹۴). حکمرانی آب زیرزمینی، فرآیندی است که در آن این منبع ارزشمند، از طریق مفاهیمی چون، مسئولیت‌پذیری، مشارکت، اطلاعات در دسترس، شفافیت، عرف و قواعد قانونی مدیریت می‌شود. وضعیت آب‌های زیرزمینی، ارتباط نزدیکی به حکمرانی آن دارد. اگرچه بسیاری از توافقات، کنوانسیون‌ها و قوانینی که برای سازمان‌دهی آب‌های سطحی مشترک توسعه داده شده‌اند، می‌توانند با کمی تغییر بر روی آبخوان‌های مرزی نیز اعمال شوند، اما تفاوت‌های مهمی بین این دو مورد (آب‌های زیرزمینی و سطحی) باقی می‌ماند که در حکمرانی آب‌های مرزی، نقش حیاتی دارند (Linton و Brooks, 2011).

اولین تفاوت اینکه، نظارت بر اجرای قوانین و توافقات در مورد آب سطحی آسان‌تر از آب‌های زیرزمینی است. به عنوان مثال، اثر اضافه برداشت از منابع آب زیرزمینی می‌تواند بعد از سال‌ها مشاهده شود. تفاوت دوم در ارتباط با آلودگی آب‌های زیرزمینی است. این منابع آبی از جهت آسیب‌پذیری نسبت به آلاینده‌ها، مشابه آب‌های سطحی هستند با این تفاوت که آبخوان‌ها برای بازگشت به شرایط اولیه و پاک شدن از آلودگی، زمان زیادی نیاز دارند. مورد دیگر آنکه آبخوان‌ها بیشتر از آب‌های سطحی به عنوان یک منبع با دسترسی آزاد، انگاشته می‌شوند. هرچه آبخوان‌ها بین تعداد کشورهای بیشتری مشترک باشند، این تهدید بیشتر خواهد شد. به دلایل فوق، توافق بر سر قواعد حکمرانی خوب و مورد نیاز برای توسعه، مدیریت و حفاظت از آبخوان‌های مشترک بسیار مشکل است (فرشته‌پور و همکاران، ۱۳۹۴).

-حکمرانی اثربخش آب زیرزمینی:

حکمرانی اثربخش آب، ساختارها و معیارهای لازم را برای مدیریت خوب آب زیرزمینی فراهم می‌آورد. اگر تمهیدات مناسب برای آب زیرزمینی اندیشیده نشده باشد، کشورها ممکن است در برابر خالی

شدن آبخوان‌ها و کاهش کیفیت منابع آب زیرزمینی آسیب‌پذیر باشند. حکمرانی ضعیف آب زیرزمینی در یک کشور، سلامت و امنیت غذایی مردم، موفقیت اقتصاد، پایداری محیط طبیعی و در مورد آبخوان‌های فرامرزی، روابط خوب با همسایگان را به خطر می‌اندازد. حکمرانی اثربخش، بر سیاست‌ها، قوانین، ترتیبات نهادی و پیاده‌سازی سازوکارهای نظارت بر رعایت قوانین تکیه می‌کند. این مؤلفه‌ها بر روی هم "ظرفیت حکمرانی آب" یک جامعه را می‌سازند. اصلاحات در حکمرانی آب باید متناسب با نظام حاکمیتی و قوانین یک کشور باشد. سیاست‌ها، قوانین و ترتیب‌های نهادی موفق برای آب می‌تواند شکل‌های فراوانی داشته باشد که هر کدام آن‌ها، مناسب سنت‌ها و شکل خاص دولت در یک کشور هستند. هیچ نقشه‌ای برای حکمرانی خوب آب وجود ندارد، با این همه می‌توان اصول راهنما را برشمرد که می‌تواند به سیاست‌گذاران کمک کند و می‌توان از تجربه دیگر کشورها نیز آموخت. حکمرانی آب هم‌چنین مستلزم سازمان‌یابی اجتماعی، گفت‌وگوی ذی‌نفعان و کنش شهروندی) که برای حکمرانی محلی آب لازم است) و استفاده از ابزارهای اقتصادی است (Smith و همکاران، ۲۰۱۶).

-مشارکت در حکمرانی آب:

از آنجایی که آب ضرورت حیات است، همگان درباره آن دغدغه دارند. همه باید به دور "میز آب" گرد آیند تا درباره استفاده و مدیریت آن بحث کنند. از این رو سازمان‌یابی اثربخش اجتماعی برای حکمرانی خوب منابع آب زیرزمینی یک پیش‌نیاز است. سازمان‌یابی اجتماعی برای حکمرانی اثربخش آب، تصمیم‌گیری آگاهانه را تسهیل و حل تعارض را آسان می‌کند. سازمان‌یابی اجتماعی شامل فراهم آوردن مجال و سازوکارهایی است که شرکت فعالانه تمام ذی‌نفعان را در گفت‌وگو، برنامه‌ریزی، تصمیم‌گیری و پیاده‌سازی فعالیت‌ها در مورد مسئله‌ای معین، به گونه‌ای که تا بیشترین حد ممکن منافع و دغدغه‌های ذی‌نفعان را مورد توجه قرار می‌دهد، امکان‌پذیر می‌سازد. بسترهای مشارکتی، امکان شنیده شدن صدای گروه‌های بی‌قدرت مانند افراد آسیب‌پذیر را فراهم می‌آورد. مشارکت، فرصت شناختن حقوق و نقش‌ها، عمل به مسئولیت‌ها، یافتن حس تعلق و مطالبه حقوق‌شان را فراهم می‌آورد. حکمرانی محلی یا جمعی، آن گونه که در محیط‌های قبیله‌ای یا دیگر محیط‌های بومی به کار می‌رود، قدیمی‌ترین شکل حکمرانی آب به شمار می‌آید. وقتی دولت-ملت‌ها شکل گرفتند، مدیریت آب معمولاً مسئولیت دولت‌های ملی شد، چون آب زیرزمینی یک منبع مشترک شناخته می‌شد. با این همه در موارد بسیاری راه‌ورسم مدیریت دولت، بوروکراتیک و بالا-پایین است و به سبب نفوذ صاحبان منافع در سطوح عالی، جهت‌گیری خاصی پیدا می‌کند درحالی‌که غالباً توجه اندکی به دغدغه‌های جامعه محلی معطوف می‌شود. در مقابل، رویکردهای حکمرانی محلی، ذی‌نفعان را به شکل‌گیری مسئولیت و هنجارهای مشترک در مدیریت منبع مشترک به عنوان کالایی

مشترک هدایت می‌کند. در چنین رویکردی، مردم صرفاً نمایندگان را برای حکم راندن انتخاب نمی‌کنند، بلکه مشارکت‌کنندگان فعال در حکمرانی باقی می‌مانند. حکمرانی محلی شامل موضوعات سازمان‌یابی اجتماعی، مذاکره، منصفانه بودن و رفتار مسئولانه است (Smith و همکاران، ۲۰۱۶).

- حکمرانی محلی آب در ایران:

مفهوم "حکمرانی محلی آب در ایران" مورد توجه ذی‌مدخلان متعدد بوده است. مطالعات میدانی نشان می‌دهد حکمرانی مشارکتی مبتنی بر جوامع محلی نه فقط مورد تأیید پژوهشگران، بلکه کارشناسان دستگاه‌های دولتی، سمن‌ها و نمایندگان جوامع محلی بوده است. اما در ایران سعی جدی برای ایجاد این نوع حکمرانی نشده است. عده زیادی از سیاست‌گذاران مؤثر و با نفوذ معتقد هستند که نگاه ملی و منافع ملی قربانی نگاه و منافع محلی می‌شود. بنابراین، تمرکزگرایی در مدیریت آب در ایران که گفتمان غالب است، مانع از ایجاد حکمرانی محلی آب شده است. حکمرانی محلی آب به معنای استقلال از حاکمیت مرکزی یا هرج و مرج سیاسی نیست. این امر مستلزم به رسمیت شناختن نهادهای غیررسمی و محلی در چارچوب حقوقی با در نظر گرفتن سه مؤلفه رویکردهای فرهنگی و اخلاقی به شیوه‌های مدیریتی آب و خاک است: ۱) تأمین انسجام اجتماعی و معیشت پایدار برای جوامع محلی؛ ۲) ارائه ضوابط برای مالکیت/حقوق آب و استفاده بر اساس گنجایش/ ظرفیت برد و بازسازی منابع؛ ۳) تقویت حفاظت از محیط‌زیست و مدیریت انطباقی. لذا استدلال می‌شود علاوه بر واقعیت‌های اجتماعی-اقتصادی و سیاسی، گفتمان‌های فرهنگی و اخلاقی باید در استراتژی مبتنی بر مشارکت چندجانبه برای اجرای موفقیت‌آمیز سیاست‌های عمومی در زمینه آب و خاک مورد توجه قرار گیرد (هاشمی، ۱۴۰۱).

چهار فرض سیاسی اصلی برای ایجاد حکمرانی محلی آب در ایران وجود دارد: ۱) توقف بهره‌برداری بیش از حد از منابع طبیعی بدون مشارکت جوامع محلی و توجه به نظام‌های فرهنگی و اعتقادی آن‌ها محقق نمی‌شود؛ ۲) حلقه اتصالی محکم و ارتباط صریح بین خاک و مدیریت آب وجود دارد؛ ۳) شیوه‌های سنتی، سیستم‌های دانش بومی و نهادهای محلی می‌توانند بستری را برای ایجاد مدیریت منابع طبیعی مبتنی بر جوامع طبیعی ارائه دهند؛ ۴) اخلاق و ارزش‌های اجتماعی (از جمله اخلاق اسلامی و فرهنگ سیاسی جدید) می‌تواند مجموعه منسجمی از اصول را برای مدیریت منابع طبیعی جامعه‌محور (مبتنی بر جوامع محلی) در ایران فراهم کند (هاشمی، ۱۴۰۱).

برای ایجاد حاکمیت آب محلی پایدار در ایران نیاز هست ۵ حوزه قضایی اصلی در چارچوب حقوقی (مقرراتی) به‌عنوان بخشی از تمهیدات سازمانی (نهادی) حل و فصل و برطرف شوند: ۱) تبدیل قوانین و مقررات و قواعد در سطوح تصمیم‌گیری انتخاب جمعی و قانون اساسی به قوانین قابل اجرا در سطوح عملیاتی و محلی که به

طور خاص با مالکیت آب و حقوق آب سروکار دارند (Hashemi، ۲۰۱۲)؛ ۲) تأثیر نظام دموکراتیک دولت بر سیاست تمرکززدایی و ایجاد توازن قدرت سیاسی میان نظام‌های حکمرانی ملی/استانی و محلی با تأکید بر فرهنگ و اخلاق سیاسی؛ ۳) ایجاد "تشکیلات تودرتو" در سطح حوزه آبخیز (زیرحوضه‌ها) در داخل حوضه رودخانه بزرگتر؛ ۴) تعیین استراتژی برای توسعه ظرفیت‌ها در سطح محلی؛ ۵) ایجاد و تدوین مدل حل اختلاف مبتنی بر جوامع محلی (هاشمی، ۱۴۰۱).

لازم است دانسته شود هرگونه تغییر (افزایش یا کاهش) در قدرت سیستم‌های حقوقی رسمی و دولت، تأثیر مستقیمی بر جوامع محلی خواهد داشت. بنابراین، سیستم حکمرانی محلی آب تحت تأثیر تنظیمات قانونی و حقوقی دولتی یا رسمی خواهد بود. در حالت ایده‌آل، سیستم حکمرانی محلی آب باید جایگاه خود را بر روی نقشه قانونی یا سیستم حکمرانی کلی پیدا کند. همچنین، باید در مورد محیط‌ها یا تمهیدات سازمانی فکر شود که با شرایط محلی مناسب‌ترین حالت را دارند و با چارچوب‌های حقوقی دوگانه (جامعه‌محور و متعارف) سازگار باشد. بنابراین، یکی از وظایف اصلی، ارائه مقررات حقوقی برای سیستم حکمرانی محلی آب است. این مقررات (احکام/قواعد/آیین‌نامه) به معیارهای خاصی نیاز دارند: ۱) دسترسی عادلانه به آب؛ ۲) تقویت مدیریت مشارکتی (هم‌گردانی)؛ ۳) به رسمیت شناختن سیستم‌های حقوقی غیررسمی/بومی/سنتی؛ ۴) شناسایی و حمایت از نهادهای قانونی دارای مشروعیت برای حل منازعه. به عبارت دیگر، نهادهای مختلفی که منابع طبیعی (آب و خاک)، منازعات اراضی (مانند کمیته کارشناسان)، ادارات محلی (رسمی و غیررسمی)، دولت‌های منطقه‌ای (استانداری‌ها) و سیستم‌های دانش محلی را مدیریت می‌کنند یا درگیر آن هستند، را باید شناسایی کرد (هاشمی، ۱۴۰۱).

به‌منظور استقرار نظام حکمرانی محلی آب، چالش‌های سیاسی مانند فقدان اراده سیاسی، بی‌اعتمادی دولت به شهروندان (و بالعکس)، توانمندسازی قانونی مردم، عدم آگاهی دولت از فرصت‌ها و در نتیجه نبود سیاست‌های مناسب باید مورد توجه قرار گیرد (Hashemi، ۲۰۱۲). یک فرهنگ سیاسی جدید که پذیرای مشارکت دموکراتیک محلی است باید تشویق شود و در نتیجه سیاست عمومی، باید توزیع قدرت سیاسی بین بازیگران محلی و ملی را متعادل کند. بنابراین، سیاست تمرکززدایی باید به چارچوب حقوقی تبدیل شود که امکان اتخاذ تصمیمات در سطح محلی را فراهم کند. در واقع یک رویکرد حوضه رودخانه در تضاد مستقیم با حکمرانی محلی آب است. در سطح محلی، بازیگران بسیار زیادی با منافع متفاوت و معمولاً متضاد وجود دارند و بنابراین ایجاد تعادل بین منافع همه ذی‌نفعان محلی فرآیندی پیچیده است. بنابراین فرهنگ سیاسی جدید باید حکمرانی مشارکتی را بپذیرد (هاشمی، ۱۴۰۱).

سیاست‌هایی که می‌توانند از رویکرد حکمرانی محلی آب حمایت کنند، پراکنده و غیرمنسجم می‌باشد. بنابراین، نیاز است سیاست‌های به هم پیوسته تدوین شود که از به رسمیت شناختن و تشویق حکمرانی مشارکتی مبتنی بر جوامع محلی حمایت کند. از آنجاییکه اجرای قوانین ضمانت اجرایی کم دارد و امکان عملیاتی کردن سیاست‌ها کم است، پیشنهاد می‌شود حسابرسی محیط‌زیستی ایجاد شود. تقویت نهادی باید با چالش‌های فساد (شفافیت) مقابله کند. بنابراین چارچوب‌های حقوقی و نظارتی مؤثر مورد نیاز است. یکی از اولویت‌ها ایجاد مشوق‌های مبتنی بر بازار برای ترویج مشارکت بخش خصوصی و مشارکت جوامع محلی در فرایند حفاظت محیط‌زیست می‌باشد. رویکرد حکمرانی محلی آب همچنین می‌تواند باعث: ۱) رشد سبز به عنوان یک راهبرد سیاستی ملی و ۲) امنیت آب-انرژی-غذایی شود. این رویکرد را می‌توان به عنوان سیستم توسعه پایدار در نظر گرفت و آن را بخشی از یک ابتکار جهانی مانند برنامه توسعه پایدار سازمان ملل تعریف کرد. از آنجایی که نیاز به پروژه‌های پایلوت در زمینه حکمرانی محلی وجود دارد، می‌توان با استفاده از منابع اعتباری از اهداکنندگان منطقه‌ای و جهانی به منظور ارتقای مدیریت منابع طبیعی مبتنی بر جوامع محلی و بازگرداندن سرزمین به جوامع محلی، پروژه‌های منطقه‌ای فرامرزی را توسعه و اجرا نمود. همچنین ضروری است از طریق سیستم جامعه محور، بشردوستانه را تشویق کرد (هاشمی، ۱۴۰۱).

• پیمان نامه و توافق نامه‌های موجود در مورد آبخوان‌های مشترک مرزی

در طی دهه‌های گذشته، جامعه بین‌المللی به طور فزاینده در فرایند شناسایی و وضع قوانین حقوقی جهت فراهم نمودن مکانیزم‌های منصفانه و معقول برای ذی‌مدخلان حاضر در بحث مدیریت منابع آب‌های زیرزمینی مشترک، مشارکت داشته است. پیش‌نویس قانون بین‌المللی برای آبخوان‌های فرامرزی در سال ۲۰۰۸ را می‌توان یکی از اولین تلاش‌ها برای تنظیم بهره‌برداری از آبخوان‌های فرامرزی دانست (Eckstein, ۲۰۱۱). ادبیات فنی بیان می‌دارد تعداد محدودی طرح مدیریت آبخوان‌های فرامرزی به نگارش یک توافق نامه رسمی بین کشورها منجر شدند، که برخی از آن‌ها نیز تصویب و یا اجرا نشدند (روغنی و همکاران، ۱۳۹۹). کشورهای زیادی از آب‌های زیرزمینی یک آبخوان مشترک، اغلب به صورت یک طرفه و بدون اطلاع از پیامدهای مرزی یا حتی مرزی بودن آبخوان، استفاده می‌کنند. امروزه، تنها تعداد معدودی از معاهدات در حال اجرا، در مورد آبخوان‌های مشترک مرزی اعمال می‌شود و تعداد کمی از کشورها به طور مستقیم با همسایگان خود بر روی آب‌های زیرزمینی مشترک درگیر شده‌اند. بنابراین، قانون ثابت (قوانین مورد توافق و تصویب شده بین کشورهای ذی‌نفع با

یک یا چند آبخوان مشترک مرزی در قالب یک توافق نامه) کمی در این زمینه وجود دارد. اگر چه قوانینی برای آب‌های سطحی مرزی وجود دارد و ممکن است به عنوان پایه‌ای برای آبخوان‌های مشترک مرزی به کار روند، اما بعید است مستقیماً بدون اصلاحات بر روی آن‌ها، برای آب زیرزمینی استفاده شوند (Eckstein, ۲۰۲۱).

برنامه مدیریت منابع آبخوان مشترک بین‌المللی (ISARM) یونسکو بسیاری از آبخوان‌های فرامرزی را در تمام قاره‌ها مستند و نقشه‌برداری کرده است. بهره‌برداری و مدیریت آب‌های زیرزمینی توسط قوانینی در حقوق بین‌الملل با هدف پیشگیری از زیان دیدن کشورها یا ترمیم پیامدهای ایجاد شده، اداره می‌شود. قوانین بین‌المللی در برابر آب زیرزمینی، بر دو قاعده بنیادی زیر استوار است:

۱. هیچ دولتی حق ندارد آسیب قابل ملاحظه را در مرز بین‌المللی از طریق خود یا اقدامات شهروندان خود وارد آورد و دولت‌ها ملزم هستند اقداماتی را برای پیشگیری از چنین آسیب‌هایی انجام داده و برای حذف یا کاهش آسیب (وقتی رخ دهد) اقدام کنند.

۲. تمام دولت‌هایی که در یک آبخوان سهیم هستند، مستحق سهم معقول و عادلانه در استفاده‌های آب زیرزمینی در آبخوان‌های مرزی مشترک هستند (Smith و همکاران، ۲۰۱۶).

این دو قاعده اساسی درباره مدیریت آبخوان‌های مرزی و تأثیر متقابل آن‌ها، هسته اصلی آن چیزی است که غالباً به آن قوانین عرفی (مرسوم) بین‌المللی^۲ گفته می‌شود و مبنای مذاکرات میان دولت‌ها بر سر منابع مشترک آب زیرزمینی به شمار می‌آید (Smith و همکاران، ۲۰۱۶). این دو قاعده به صورت زیر بیان می‌شوند:

۱) اصل منع ایراد آسیب مهم، یکی از اصول اساسی حقوق بین‌الملل آب است. این اصل در بسیاری از اسناد مربوط به حقوق بین‌الملل آب از جنبه‌های گوناگون مدنظر قرار گرفته است. به لحاظ تاریخی، اصل منع ایراد آسیب تحت عنوان "Sic utere tuo alienum non laedas" شناخته شده و مبنی بر ممنوعیت آسیب و ورود ضرر به دیگری است. این اصل انعکاسی از برابری حاکمیتی دولت‌ها به شمار می‌رود (Report of the International Law Commission, ۱۹۸۸) و به عنوان قاعده حقوق بین‌الملل عرفی است (Helal, ۲۰۰۷). اصل منع ایراد آسیب مهم، ریشه در "نظریه حاکمیت سرزمینی محدود" داشته که طبق آن دولت‌های ساحلی حق یکسانی برای استفاده از آبراه مشترک دارند اما باید به حاکمیت دیگر دولت‌ها و حقوق برابر آن‌ها برای استفاده از آبراه نیز احترام بگذارند (نواری، ۱۳۹۸). مطابق کنوانسیون ۱۹۹۷ زمانی که آسیب مهمی به دولت دیگری که در مجاورت آبراه قرار دارد وارد می‌شود، دولتی که مسبب ایراد آسیب بوده باید باتوجه به عوامل مختلف و مشورت و مذاکره با دولت زیان دیده، تمامی اقدامات لازم برای برطرف نمودن و کاهش این آسیب و ضرر را به عمل آورد و در صورت لزوم در مورد پرداخت خسارت با دولت مذکور مذاکره نماید.

پروفسور مک کافری معتقد است که: "آسیب ممکن است به شکل کاهش مقدار آب باشد، مانند اقدامات بالادست جدید یا پمپاژ بیش از حد سفره‌های آب زیرزمینی، مهاجرت بی‌رویه، تداخل در جریان آب، ایجاد آثار منفی بر اکوسیستم ساحلی، ساخت و بهره‌برداری از سد و سایر اقدامات دولت ساحلی که اثرات سوئی نسبت به دولت ساحلی دیگر دارند و پایدار می‌مانند (زمانی و برلیان، ۱۴۰۱).

(۲) یکی دیگر از اصول اساسی حقوق بین‌الملل آب، اصل "بهره‌برداری معقول و منصفانه از منابع" است. به موجب این اصل، هر دولتی که در حریم رودخانه واقع است مشمول سهمی معقول و منصفانه در استفاده سودمند از منابع آبی مشترک است. این اصل از نظر حقوقی در مقام قاعده حقوق بین‌الملل عرفی بوده و در اسناد گوناگونی از جمله در مجموعه قواعد هلسینکی ۱۹۶۶، کنوانسیون هلسینکی ۱۹۹۲ برای حفاظت و استفاده از منابع آبی و دریاچه‌های بین‌المللی، کنوانسیون ۱۹۹۷ راجع به حقوق استفاده‌های غیرکشتیرانی از آبراه‌های بین‌المللی و مجموعه قواعد برلین ۲۰۰۴ میلادی گنجانده شده است (زمانی و برلیان، ۱۴۰۱).

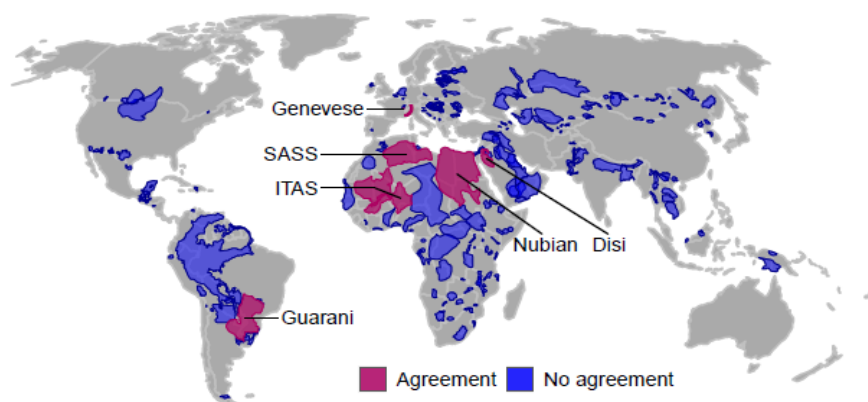
اصل بهره‌برداری معقول و منصفانه به‌عنوان بنیان و اساس حقوق بین‌الملل آب تا حدودی مبهم و انعطاف‌پذیر است که طبق آن حقوق بهره‌برداری دولت‌های ساحلی براساس مفاهیم انصاف، عدالت و معقول بودن با در نظر گرفتن همه شرایط مرتبط تعیین خواهد شد (McIntyre، ۲۰۱۳). استفاده منصفانه ناظر به تخصیص و توزیع منبع آبی مشترک و منافع آن بین دولت‌های ساحلی است. استفاده معقول اما به چگونگی استفاده از منبع آبی مشترک اشاره دارد و در واقع بیان‌گر این است که برای چه منظور از آب استفاده می‌شود و چه مقداری برای استفاده در شرایطی منصفانه، منطقی است. اصل بهره‌برداری معقول و منصفانه مهم‌ترین ابزار به منظور اطمینان‌یابی از تحقق عدالت بین نسلی با در نظر گرفتن همه عوامل و شرایط استفاده از آبراه‌های بین‌المللی، حفاظت از محیط‌زیست و نیازهای توسعه اقتصادی و اجتماعی دولت‌های هم‌جوار آبراه‌ها است. این اصل علی‌رغم وجود ابهام و انعطاف، دربرگیرنده یک قاعده کلی حقوقی برای تعیین حقوق و تعهدات دولت‌ها در حوزه مدیریت منابع آبی مشترک به شمار می‌رود. به منظور شناخت اصل بهره‌برداری معقول و منصفانه و تحقق آن در مدیریت منابع آبی مشترک نخست باید به تصویر روشن و کاربردی از انصاف دست یافت. در مجموع واژگان "انصاف" و "منصفانه" به منظور حصول اطمینان از "برابری حقوقی" در دست‌یابی به سطوح مشابه توسعه و شکوفایی برای همه مردم در کشورهای در حال توسعه هم‌چون مردم کشورهای توسعه یافته به کار گرفته می‌شود. مبنای اصلی نیز این است که پایداری محیط‌زیست برای تأمین حقوق نسل‌های آینده و هم‌چنین نسل حاضر نیاز به توجه اساسی دارد (زمانی و برلیان، ۱۴۰۱). اصول موصوف به همراه دیگر اصول حاکم در این حوزه قادر هستند با پدید آوردن سیستمی قانونمند برای دولت‌ها،

روند اختلافات میان دولت‌ها در حوزه مدیریت منابع آبی مشترک را مهار و کنترل نمایند (زمانی و برلیان، ۱۴۰۱).

مفهوم عدالت آبی، به شکل پیچیده‌ای، ترکیبی از دسترسی عادلانه به منابع آب و به منافع و هزینه‌های اقتصادی-اجتماعی حاصل از آن و همچنین، ایجاد بستر فرهنگی و سیاسی منصفانه و اثربخش و اقتصاد سیاسی سالم، می‌باشد. فهم عدالت آبی نیازمند درک عمیق و خلاقانه از پیوند بینش هیدرولوژیکی نسبت به آب با عوامل اثرگذار اجتماعی، فنی، حقوقی، سیاسی و فرهنگی در نحوه دسترسی و تخصیص آب در یک منطقه، کشور و سطح جهان می‌باشد. عدالت آبی زمانی محقق می‌شود امکان توزیع منابع آب و منافع و هزینه‌های آن منصفانه باشد؛ رویه‌ها و فرآیندهای تصمیم‌گیری برای مشارکت و تأثیرگذاری همه گروه‌داران (ذی‌منفعان) عادلانه و مناسب باشد؛ گروه‌داران از فرآیندها و نتایج تخصیص منابع و منافع و هزینه‌ها آب احساس رضایت کنند؛ حقوق تاریخی و حق نسل‌های آینده در آب محترم شمرده شود؛ و همچنین امکان دسترسی عادلانه به آب برای همه افراد در مناطق مختلف در سطح محلی، حوضه آبریز، ملی و بین‌المللی فراهم باشد. باتوجه به محلی بودن مسئله آب و مدیریت آن، در نظر گرفتن شرایط، نیازها، روابط اجتماعی، سبک معیشتی و اقتصادی، نوع منبع آب و هیدرولوژی آن، ارزش‌ها و سبک زندگی و سطوح قدرت در سطح محلی، عدالت آبی برای هر منطقه آبی مختص آن منطقه و گاه متفاوت با مناطق دیگر تعریف می‌شود (ارشدی، ۱۳۹۷).

قوانین عرفی بین‌المللی برای تمام دولت‌ها الزام‌آور است و مبنای پیمان‌نامه‌ها و توافقی‌نامه‌های صورت گرفته میان دولت‌هایی است که در آبخوان مرزی مشترک هستند. تا به امروز پیمان‌نامه و توافقی‌نامه‌های اندکی را می‌توان برشمرد که مشخصاً به آبخوان مرزی پرداخته باشند. مشهورترین توافقی‌نامه‌ها در مورد آبخوان‌های مرزی، کشورهای مشترک و موضوع‌های مورد توافق در جدول (۱) بیان شده است (Smith و همکاران، ۲۰۱۶). از حدود ۶۰۰ آبخوان مرزی، تنها شش مورد یک توافقی‌نامه بین‌المللی دارند (شکل ۲). توافقی‌نامه‌ها ذکر شده شامل توافقی‌نامه‌های آبخوان ژنو، آبخوان الساگ-الدیسی، آبخوان گورانی، آبخوان ماسه سنگ نوبی، سیستم آبخوان شمال غربی صحرای بزرگ آفریقا (SASS) و سیستم آبخوان یوملدن و تاودنی-تانزروفستون (ITAS) می‌باشند (Burchi، ۲۰۱۸).

از راه‌های جایگزین توافقی‌نامه‌های آب زیرزمینی برای دولت‌ها و شیوه‌ای که متداول‌تر است، گنجاندن آب زیرزمینی در توافقی‌نامه‌های آب‌های سطحی مرزی یا حوضه‌های آبریز (رودخانه و دریاچه) مرزی است. این شیوه معمولاً تعهداتی که را که دولت‌ها برای همکاری در مدیریت آب‌های سطحی یا حوضه آبریز رودخانه و دریاچه پذیرفته‌اند، به آب زیرزمینی مرزی گسترش می‌دهند (Smith و همکاران، ۲۰۱۶). نمونه‌هایی از این اقدامات در جدول (۲) گزارش شده است.



شکل ۲- موقعیت آبخوان‌های مشترک مرزی دارای توافق‌نامه‌های بین‌المللی (Burchi, ۲۰۱۸)

جدول ۱- مشهورترین پیمان‌نامه و توافق‌نامه‌ها در مورد آبخوان‌های مرزی (Smith و همکاران، ۲۰۱۶)

موضوع	مشترک میان	توافق‌نامه
توافق‌نامه آبخوان ژنو/آبازار پیچیده‌ای است که کنترل برداشت‌های آب زیرزمینی، عملیات تغذیه مصنوعی آبخوان، کنترل آلودگی، تقسیم تمام هزینه‌های مربوط به آن و یک نهاد دائمی دو جانبه را برای اداره و پیاده‌سازی توافق‌نامه پوشش می‌دهد.	فرانسه و سوئیس	دو توافق‌نامه درباره آبخوان ژنو (Geneva) در سال‌های ۱۹۷۸ و ۲۰۰۷
پی‌ریزی یک چهارچوب که هسته‌ی اصلی آن یک نهاد مشترک برای پایش آبخوان، گردآوری و تبادل داده‌ها است.	الجزایر، لیبی و تونس	توافق بر سر تأسیس یک کمیته مشورتی سه‌جانبه برای سیستم آبخوان شمال غربی صحرای بزرگ آفریقا (۲۰۰۸-۲۰۰۲)
	آرژانتین، برزیل، پاراگوئه و اوروگوئه	توافق بر سر آبخوان گورانی (Guarani) سال ۲۰۱۰
	اردن و عربستان سعودی	توافق‌نامه آبخوان الساگ-الدیسی (Al-Sag/Al-Disi) سال ۲۰۱۵

جدول ۲- گنجاندن آب زیرزمینی در برخی توافق‌نامه‌های آب‌های سطحی مرزی (Smith و همکاران، ۲۰۱۶)

سال	توافق‌نامه/کنوانسیون
۱۹۷۸	توافق‌نامه رودخانه اصلاح‌کننده کیفیت آب دریاچه‌های بزرگ
۱۹۸۳	پروتکل کیفیت آب دریاچه‌های بزرگ میان کانادا و ایالات متحده آمریکا
۱۹۹۴	کنوانسیون دانوب
۱۹۹۴	پیمان‌نامه صلح میان اسرائیل و اردن
۱۹۹۹	کنوانسیون حفاظت راین
۲۰۰۲	توافق‌نامه چارچوبی حوضه آبریز ساوا (Sava)
۲۰۰۳	کنوانسیون دریاچه تانگانیکا (Tanganyika)
۲۰۰۳	کنوانسیون دریاچه ویکتوریا

اخلاقی و سیاسی است. ظرفیت ضعیف اجتماعی و نهادی و فقر قانونی و چارچوب‌های سیاسی مانع از توسعه پایدار ملی این منبع مهم می‌شود. زمانی که بحث مرزی بودن آب‌های زیرزمینی مطرح می‌شود این چالش‌ها به دلیل تفاوت سطح دانش، ظرفیت و چارچوب نهادی در طرف‌های ذی‌نفع شدت می‌یابد. درحالی‌که نمونه‌های خوبی از برخورد با چنین مسائلی در مدیریت رودخانه‌های بین‌المللی وجود دارد، مدیریت آبخوان‌های مشترک بین‌المللی در این زمینه پیشرفت قابل توجهی نداشته است (فرشته‌پور و همکاران، ۱۳۹۴). پرداختن به بحث آب زیرزمینی در معاهده‌های بین‌المللی (به دلیل افزایش میزان چالش‌های مربوط به این منابع) رو به افزایش است، اما عموماً به صورت غیرمستقیم در این معاهده‌ها ذکر می‌شود. موضوع آب‌های زیرزمینی در مدیریت آب‌های مرزی برای اولین بار در اوایل دهه ۱۹۸۰ مورد توجه قرار گرفت (Barberis, ۱۹۹۱). جدول (۳) روند تکامل و تدوین قوانین بین‌المللی مربوط به آب‌های زیرزمینی را نشان می‌دهد (Giordano و همکاران، ۲۰۱۴).

یکی از تفاوت‌های منابع آبی مشترک نظیر آب‌های سطحی و زیرزمینی، پنهان بودن آب زیرزمینی (نداشتن درک کافی و صحیح از این منبع پنهان) می‌باشد. ازاینرو استفاده مؤثر از آب‌های زیرزمینی، بیش از آب‌های سطحی در معرض ملاحظات اجتماعی و اقتصادی، نهادی، حقوقی، فرهنگی،

جدول ۳- روند تکامل و تدوین قوانین بین‌المللی مرتبط با آب زیرزمینی (Jarvis و همکاران، ۲۰۰۵؛ اسکندری مایوان و محمدزاده، ۱۳۹۲)

عنوان	سال	توضیحات
قوانین هلسنیکی	۱۹۶۶	• این قوانین، آب زیرزمینی را به عنوان بخشی از حوضه زهکشی بین‌المللی تعریف کرده است. • این قوانین آبخوان‌های محبوس را نادیده گرفته است.
قوانین ستول	۱۹۸۶	• اصطلاحات تخصصی مربوط به آب زیرزمینی مورد توجه قرار گیرد. • آبخوان‌هایی با عدم ارتباط هیدرولیکی با آب‌های سطحی حوضه زهکشی بین‌المللی نیز به عنوان حوضه زهکشی بین‌المللی به رسمیت شناخته شد.
پیش‌نویس معاهده بلایو	۱۹۸۸	• ارتباط هیدرولوژیکی بین آب‌های سطحی و زیرزمینی را به رسمیت شناخته است. • آبخوان‌های مرزی به عنوان بخشی از یک حوضه بین‌المللی در نظر گرفته می‌شود.
دستورالعمل ۲۱، فصل ۱۸	۱۹۹۲	• آب‌های زیرزمینی هم‌ارز آب‌های سطحی و توده‌های آب شیرین در نظر گرفته می‌شوند. • پیشنهاد می‌شود در مدیریت آب‌های شیرین کلی‌نگری صورت پذیرد. • مدیریت آب‌های شیرین مرزی را نادیده گرفته است.
استفاده‌های غیر از کشتیرانی از آبراه‌های بین‌المللی	پیش‌نویس ۱۹۹۷	• شبکه آب‌های زیرزمینی و سطحی بین‌المللی را به رسمیت شناخته است. • آبخوان‌های محبوس را نادیده گرفته است.
کنوانسیون ۱۹۹۷	کنوانسیون ۱۹۹۷	• آبراهه‌های بین‌المللی که در پیش‌نویس لیست شده است را به رسمیت شناخته است. • آبخوان‌های محبوس را نادیده گرفته است.
قطعه‌نامه ۱۹۹۷	۱۹۹۷	• آبخوان‌های محبوس را به رسمیت شناخته شده است. • قوانین مدیریت آب که در پیش‌نویس به آن اشاره شده بود، می‌تواند قابل اجرا در مورد آبخوان‌های محبوس مرزی باشد.
کنوانسیون جهت حفاظت و استفاده از آبراه‌های مرزی و دریاچه‌های بین‌المللی	۱۹۹۹	• مدیریت جامع منابع آبی را پیشنهاد نموده است که آب‌های زیرزمینی را نیز شامل می‌شود. • گسترده نمودن مدیریت منابع آبی جهت شامل شدن مباحث مرزی را پیشنهاد می‌نماید.
قانون سیستم‌های آبخوان‌های مرزی (پیش‌نویس کنوانسیون)	۲۰۰۴	• سیستم آبخوان مرزی را تعریف می‌نماید. • کشورهای دارای حقایق از سیستم آبخوان را مشخص می‌نماید.
مواد پیش‌نویس قطع‌نامه مجمع عمومی سازمان ملل متحد	۲۰۰۸	• مفاد این پیش‌نویس با محوریت مفهوم (آبخوان) تعریف شده و مسائل بهره‌برداری، مدیریت، حفاظت و نگهداری آبخوان مورد توجه قرار گرفته است.

بررسی مدیریت آبخوان مرزی ژنو واقع در قاره اروپا

یکی از مواردی را که می‌توان به عنوان یک تجربه موفق در زمینه مدیریت آبخوان‌های مشترک به حساب آورد، آبخوان ژنو است. توافق‌نامه ژنو طولانی‌ترین و مشارکتی‌ترین توافق‌نامه ثبت شده در مورد آبخوان‌های مشترک مرزی می‌باشد. این آبخوان بین دو کشور سوئیس و فرانسه قرار گرفته و برای تأمین آب آشامیدنی حدود ۷۰۰ هزار نفر استفاده می‌شود. حدود ۸۰ درصد از آب آشامیدنی ژنو از دریاچه ژنو و بیست درصد آن از چاه‌های پمپاژ آبخوان ژنو تأمین می‌شود. لازم به ذکر است تغذیه طبیعی این آبخوان، بیشتر از جریان نفوذی رودخانه آرو^۵ صورت می‌گیرد که از کوه‌های مون‌بلان^۶ سرچشمه می‌گیرد و حدود ۹۰ درصد آن در خاک فرانسه واقع است. در طی دهه‌های شصت و هفتاد میلادی، سطح آبخوان به دلیل پمپاژ بیش‌ازحد، بیش‌تر از ۷ متر

افت کرده بود که منجر به نابودی حدود یک سوم از کل ذخیره آب زیرزمینی در طی یک دوره ۲۰ ساله شد (de los Cobos, ۲۰۱۸). در سال ۱۹۷۵، فرانسه اعلام کرد دیگر از این آبخوان استفاده نخواهد کرد و به سراغ سایر منابع آب موجود در خاک خودش خواهد رفت، اما تمایل دارد امکان مشارکت در تغذیه آبخوان و برداشت از آن در آینده برایش حفظ شود. در نهایت تصمیم بر آن شد فرانسه می‌تواند سهمی معادل دو میلیون مترمکعب به صورت سالانه از آبخوان برداشت کند. در همین راستا، موافقت‌نامه ۳۰ ساله‌ای در سال ۱۹۷۸ امضا شد (که به طور مداوم هر ۵ ساله تمدید می‌شد مگر اینکه توسط هر یک از طرفین با اطلاع قبلی یک ساله، به پایان برسد) و پس از اتمام مدت زمان قرارداد، مجدداً در سال ۲۰۰۷ تجدید نظر و تصویب شد که نشان‌دهنده موفقیت این طرح مدیریت مشترک بوده است. در این موافقت‌نامه مسائلی از قبیل کمیته بهره‌برداری (اعضا، هدف

و نحوه عملکرد آن)، برنامه‌ی مدیریت سالانه آبخوان، تأسیسات تغذیه‌ی آبخوان، میزان حق برداشت آب، قیمت آب (که متأثر از هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری از تأسیسات جدید ساخته شده بود) و مقررات متفرقه (مانند مسائل مربوط به کیفیت آب) ذکر شده بود. هر گونه اختلاف ناشی از اجرای این طرح، باید به اطلاع کمیته محلی ترکیبی از فرانسه و سوئیس ارجاع داده می‌شد و در صورت عدم رفع مشکل، موضوع باید توسط یک کمیته مشورتی بررسی و حل می‌شد. این کمیته، پس از تصویب توافق، نقش نظارتی بر مدیریت برداشت آب از این آبخوان نیز داشت (روغنی و همکاران، ۱۳۹۹). با نگاهی به ۳۰ سال اول این توافق‌نامه و با تجربه‌ای که از طراحی پروژه و اجرای آن به‌دست آمد، می‌توان بیان کرد کلید موفقیت این طرح، حل مسئله منابع آب مرزی در سطح محلی است و نه در سطح ملی. علاوه بر آن تمام جنبه‌های فنی (مانند مطالعات هیدروژئولوژیکی، مدیریت ایستگاه‌های پمپاژ، ارزیابی‌های هیدرولیک آبخوان) همواره مشخص بودند و توسط بازیگران محلی به اشتراک گذاشته می‌شدند و سپس همین اطلاعات به تصمیم‌گیرندگان در سطح محلی انتقال داده می‌شد. به عبارت دیگر، نقش کمیته‌ی ایجاد شده به عنوان مشارکت‌کننده اصلی، در مرکز همه مباحث و جلسات، برای رسیدن به این موفقیت بسیار حیاتی بود (de los Cobos, ۲۰۱۸). از نقاط قوت توافق‌نامه منعقد شده در آبخوان ژنو می‌توان به تمرکز و توجه به منابع آبی مشترک از طرف هر دو کشور، حل و فصل مسائل اداری و قانونی مربوط به مدیریت آبخوان در مقیاس محلی و توانایی بلوک ژنو در مدیریت مسائل فرامرزی به‌طور مستقیم را اشاره کرد (روغنی و همکاران، ۱۳۹۹).

وضعیت منابع آبی همسایگان ایران

• **وضعیت منابع آبی کشورهای همسایه شمال شرقی ایران**
اگر چه کشور افغانستان در یک محیط نیمه‌خشک واقع شده است، اما به دلیل وجود رشته‌کوه‌های بلندی مانند هندوکش و بابا، که پوشیده از برف هستند، سرشار از منابع آب است. بیش از ۸۰ درصد منابع آب این کشور از رشته کوه هندوکش از ارتفاعات بیش از ۲۰۰۰ متری سرچشمه می‌گیرد (ICARDA, ۲۰۰۲). سرازیر شدن آب ناشی از ذوب برف و یخ در ارتفاعات با سرعتی لجام‌گسیخته، نه تنها به کشاورزی کمکی نمی‌کند بلکه باعث نابودی دسترنج کشاورزان نیز می‌شود. آب‌های زیرزمینی سهم عمده‌ای (۷۰ درصد) در تأمین آب شرب افغانستان دارند. استفاده بیش از حد از آب‌های زیرزمینی برای انواع مقاصد به‌طور قابل توجهی تراز آب در آبخوان‌ها را در سرتاسر افغانستان کاهش داده است. اگر چنین روندی به زودی معکوس نشود، این کشور با کمبود شدید آب آشامیدنی مواجه خواهد شد. در طول

چند سال گذشته منابع آب زیرزمینی این کشور در حدود ۵۰ درصد کاهش یافته است. دسترسی محدود به آب‌های سطحی باعث شده است بسیاری از کشاورزان عمدتاً، در بخش‌های در معرض خشک‌سالی جنوب و شمال، به‌طور فزاینده‌ای از آب‌های زیرزمینی برای آبیاری زمین‌های کشاورزی استفاده کنند. اکثریت جمعیت از آب‌های زیرزمینی به‌عنوان اولین و در بعضی مناطق تنها منبع آب آشامیدنی استفاده می‌کنند. بنابراین با کاهش آب‌های زیرزمینی، تعداد زیادی از مردم افغانستان با کاهش دسترسی به آب آشامیدنی مواجه می‌شوند (فرشته‌پور و همکاران، ۱۳۹۴).

ترکمنستان به‌عنوان همسایه دیگر ایران نیز با محدودیت‌های جدی منابع آب روبه‌رو است. این کشور دارای اقلیم خشک و قاره‌ای است و ۸۰ درصد مساحت آن را صحرای قره‌قوم تشکیل می‌دهد. بارش‌های جوی با میانگین سالانه ۱۹۱ میلی‌متر، تبخیر و تعرق بسیار زیاد سالیانه در حدود ۲۰۰۰ میلی‌متر و تفاوت‌های صحرایی را بر ترکمنستان تحمیل کرده است (Berdiev, ۲۰۰۶). ترکمنستان نه تنها محاط به خشکی است بلکه به‌طور کامل به آب‌های ورودی وابسته است. رودخانه‌های آمودریا و مرغاب از افغانستان و هریرو و اترک از ایران وارد این کشور می‌شود و تنها روانابی معادل ۱ کیلومتر مکعب بر سال از خود ترکمنستان سرچشمه می‌گیرد (FAO Aquastat, ۲۰۱۳). سهم آب زیرزمینی در تأمین نیازهای کشاورزی بسیار کم و در حدود یک درصد است و بیشتر آب زیرزمینی برای شرب استفاده می‌شود (سینائی، ۱۳۹۰). در این بین ایران کشوری است که دو سوم وسعت آن در مناطق خشک و نیمه‌خشک قرار گرفته است و کمتر از یک سوم آن در اقلیم مرطوب و نیمه‌مرطوب قرار دارد. این مناطق خشک و نیمه‌خشک، عمده مراکز و قطب‌های جمعیتی از جمله کلان شهرهای کشور که منابع تأمین آب آن‌ها متکی بر منابع زیرزمینی است، را در بر می‌گیرد. استان خراسان بزرگ که همسایه کشورهای ترکمنستان و افغانستان است از گذشته به آب‌های زیرزمینی متکی بوده است. در کشور ایران حدود ۷۸ درصد از دشت‌ها به دلیل رشد جمعیت، خشک‌سالی و حفر بی‌رویه چاه‌های عمیق، در محدوده ممنوعه و بحرانی قرار دارند که از این حیث استان خراسان رضوی یکی از نمونه‌های بارز است. در سال‌های اخیر، از مجموع ۳۷ دشت این استان، ۳۴ دشت ممنوعه و ۱۵ دشت در شرایط بحرانی اعلام شده است (KhRW, ۲۰۱۵). دو دشت سرخس و دشت صالح‌آباد-جنت‌آباد که در نزدیکی کشورهای ترکمنستان و افغانستان قرار دارند، جزء دشت‌های ممنوعه هستند و دشت‌های مرکزی استان نیز اکثراً ممنوعه بحرانی هستند. همین تنگناها، لزوم توجه به بهره‌برداری پایدار آب‌های مشترک را به موضوعی اجتناب‌ناپذیر در این استان تبدیل کرده است (فرشته‌پور و همکاران، ۱۳۹۴).

• وضعیت منابع آبی کشورهای همسایه شمال غربی ایران

کشور عراق دارای اقلیم قاره‌ای نیمه‌گرمسیری و نیمه‌خشک و در مناطق کوهستانی) شمال و شمال شرق دارای اقلیم مدیترانه‌ای است. میزان بارندگی سالانه در این کشور نیز از ۲۱۰۰ میلی‌متر در شمال شرقی تا ۲۰۰ میلی‌متر در جنوب متغیر است. دو رود دجله (به طول ۱۴۱۸ کیلومتر) و فرات (به طول ۱۲۰۰ کیلومتر) دو رودخانه مهم عراق هستند که از ترکیه سرچشمه می‌گیرند و در سرتاسر این کشور جریان می‌یابند (FAO Aquastat, ۲۰۰۹). اگر چه در قسمت مرکزی عراق، منطقه تاریخی بین‌النهرین، با ذخایر غنی آب شناخته شده است (جاییکه در آن برای اولین بار در جهان، سیستم‌های آبیاری معرفی شد)، اما مناطق دیگر آن ازجمله مناطق کردنشین در شمال، به این اندازه سرشار از منابع آب سطحی نیستند. آب زیرزمینی به دلیل وجود رودخانه‌های پر آب در سرتاسر منطقه سهم بسیار کمی در تأمین نیازها دارد. به این علت تاکنون مطالعات اندکی پیرامون مدیریت آب‌های زیرزمینی در این کشور صورت پذیرفته است. لازم به ذکر است در بخش‌های شمالی این کشور که شامل استان‌های سلیمانیه، اربیل و دوهوک می‌شوند، آب زیرزمینی نقش بسیار مهمی در کشاورزی، تأمین آب شرب و سلامتی ایفا می‌کند. در این منطقه برخلاف وضعیت آشفته سیاسی، اقتصادی و اجتماعی در بخش‌های مرکزی عراق، توسعه شهرنشینی و رشد اقتصادی در همه جا قابل مشاهده است (Jurkiewicz و Stevanovic, ۲۰۰۹). به استثنای چند رودخانه‌ی اصلی، ازجمله زاب بزرگ و کوچک، کمبود آب‌های سطحی در این منطقه وجود دارد. بنابراین، اجتناب از تخریب آبخوان‌ها با مدیریت مناسب آب‌های زیرزمینی، تنها راه‌حل برای توسعه پایدار کل منطقه است (فرشته‌پور و همکاران، ۱۳۹۴). آب در ترکیه برای توسعه کشاورزی و صنعت نقشی حیاتی دارد و پروژه‌های آبیاری و تولید انرژی مربوط به رودخانه‌های دجله و فرات که از کوه‌های شرق این کشور سرچشمه می‌گیرند، بنیادی‌ترین وسیله تحقق این هدف شناخته می‌شوند. از مهمترین این طرح‌ها، طرح آب جنوب شرقی آناتولی موسوم به طرح گاپ (GAP) است (برقی و قنبری، ۱۳۸۹). براساس اهداف تعریف شده در این پروژه، در حدود ۱/۸ میلیون هکتار از زمین‌های کشاورزی ترکیه زیر کشت رفته و بیش از ۲۷ هزار گیگا وات ساعت برق تولید خواهد شد. براساس اصلاحات صورت گرفته در این پروژه در سال ۲۰۰۵، ساخت بیش از ۲۲ سد و ۱۹ طرح برق‌آبی و توسعه سیستم کشاورزی در حوضه‌های دجله و فرات تا سال ۲۰۲۳ در دستور کار دولت ترکیه قرار گرفته است (Daoudy, ۲۰۰۹). براساس نظر کارشناسان، تکمیل این پروژه به برداشت حداکثر ۵۰ درصد (از دجله) و ۷۰ درصد (از فرات) از جریان طبیعی دجله و فرات منجر شده و مشکلات و چالش‌های جدید محیط‌زیستی در کشورهای پایین دست به‌ویژه عراق ایجاد می‌کند (فرشته‌پور و همکاران، ۱۳۹۴).

• آبخوان‌های مشترک ایران با همسایگان

کشور ایران در مرزهای شرقی و غربی خود، دارای رودخانه‌های مشترکی است که بزرگ‌ترین و مهمترین آن‌ها رودخانه هیرمند، هریرود، ارس و دجله و فرات است. باتوجه به اندرکنشی که آب‌های سطحی و زیرزمینی دارند، اصلی‌ترین آبخوان‌های مرزی نیز در حوضه آبریز همین رودخانه‌ها قرار گرفته‌اند. براساس آخرین آمار ارائه شده، کشور ایران دارای ۱۱ آبخوان مرزی مشترک با همسایگان می‌باشد (جدول ۴). از مجموع ۱۱ آبخوان مشترک فقط در ۳ آبخوان تاروس/زاگرس، سرخس و جنت‌آباد-صالح‌آباد، کشور ایران در موضع بالادستی مطرح است. در شرق و شمال شرقی ایران ۶ آبخوان مشترک با مجموع مساحت ۵۸۱۶ کیلومترمربع قرار دارد که به دلیل اقلیم خشک و نیمه‌خشک آن منطقه و توسعه و ثبات روزافزون کشورهای همسایه، پتانسیل بیشتری برای ایجاد تنش و یا ایجاد همکاری و مشارکت دارد (فرشته‌پور و همکاران، ۱۳۹۴).

جدول ۴- آبخوان‌های مشترک ایران (IGRAC, ۲۰۱۵)

نام آبخوان	کشورهای مشترک	مساحت آبخوان (کیلومترمربع)
تاروس/زاگرس	ایران، عراق و ترکیه	۲۶۳۴۸
لنکوران/آستارا	آذربایجان، ایران	۵۶۶۱
لنیناک-شیراک	آذربایجان، ارمنستان، ایران و ترکیه	۵۱۶۰
نخجوان/لاریجان و جبریل	آذربایجان، ارمنستان، گرجستان، ایران، ترکیه و روسیه AS21	۴۵۲۴
نخجوان/لاریجان و جبریل	آذربایجان، ارمنستان، گرجستان، ایران، ترکیه و روسیه AS24	۳۲۳۵
فریمان-تربت‌جام	افغانستان، ایران	۲۸۰۲
تایباد	افغانستان، ایران	۱۱۵۹
سرخس	ترکمنستان، ایران	۹۱۶
کارت	افغانستان، ایران	۴۱۱
جنت‌آباد-صالح‌آباد	افغانستان، ترکمنستان و ایران	۳۹۶
آق‌دربند	افغانستان، ایران	۱۷۰

• آبخوان‌های مشترک مرز شرقی ایران

در منطقه شرقی کشور شامل استان‌های خراسان رضوی، خراسان جنوبی و سیستان و بلوچستان آبخوان‌های متعددی وجود دارد. همان‌طور که قبلاً ذکر شده است تعداد ۶ آبخوان در شرق و شمال شرق ایران به‌عنوان آبخوان مشترک مرزی در سطح جهانی شناسایی شده‌اند اما نور و همکاران (۱۳۹۷) در مطالعه‌ای در سطح ایران، بیان کردند تعداد ۷ آبخوان در مرزهای مشترک ایران و کشورهای همسایه وجود دارند. در جدول (۵) نام، کد و مشخصات مختصری از آبخوان‌های واقع در مرز شرقی کشور نشان داده شده است (نور و همکاران، ۱۳۹۷).

جدول ۵- مشخصات آبخوان‌های موجود در مرز شرقی کشور (نور و همکاران، ۱۳۹۷)

نام استان	کد	نام محدوده	آبخیز درجه یک	مساحت محدوده (کیلومترمربع)	مساحت دشت
خراسان رضوی	۶۰۰۴	سرخس	قره‌قوم	۱۹۵۱	۱۷۵۱
خراسان رضوی	۶۰۱۳	کرات	قره‌قوم	۱۰۶۸	۵۵۷
خراسان رضوی	۶۰۱۱	تایباد	قره‌قوم	۳۰۰۹	۱۶۲۹
خراسان رضوی	۶۰۰۲	کلات نادری	قره‌قوم	۵۹۴۰	۱۵۰
سیستان و بلوچستان	۵۳۰۴	میرجاوه	مرز شرقی	۳۶۶۳	۸۶۸
سیستان و بلوچستان	۵۳۰۲	تهلاب	مرز شرقی	۸۳۶۶	۳۲۸۵
سیستان و بلوچستان	۵۲۰۸	هرمک	مرز شرقی	۱۲۳۸	۳۵۴

میزان بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در آبخوان‌های موجود در مرز شرقی کشور متفاوت است، با این حال مقدار مصرف (کشاورزی، شرب و صنعت) بالا است و بیشترین مصرف آب‌های زیرزمینی این منطقه به منظور کشاورزی می‌باشد. همچنین بین آبخوان‌های موجود در این منطقه، آبخوان‌های سرخس و تهلاب بیشترین مصرف از آب‌های زیرزمینی را دارند. مقادیر مصرف آب‌های زیرزمینی در این منطقه باعث افت سطح ایستابی شده است و بیشترین میزان افت در آبخوان‌های مورد مطالعه، در آبخوان کرات مشاهده شده است که بالاتر از میانگین حوضه قره‌قوم می‌باشد (جدول ۶). جدول (۶) نشان‌دهنده وضعیت بحرانی آبخوان‌های مرزی استان خراسان رضوی می‌باشد به گونه‌ای که ۲ آبخوان ممنوعه و ۲ آبخوان نیز ممنوعه بحرانی می‌باشند

و تنها محدوده کلات نادری آبخوان آزاد از نظر بهره‌برداری دارد. از نظر کاهش حجم آبخوان آبخوان‌های تایباد و کرات بالاترین متوسط افت سالانه را دارند. باید توجه داشت اتکای مناطق شرقی کشور به منابع آب زیرزمینی بسیار بالا می‌باشد، به گونه‌ای که در استان خراسان رضوی میزان برداشت از آب‌های زیرزمینی بالاتر از میانگین کشور بوده و از مجموع ۳۷ دشت این منطقه ۳۴ دشت ممنوعه و ۱۵ دشت ممنوعه بحرانی می‌باشد. بنابراین توجه به آبخوان‌های مرزی این منطقه بسیار بیشتر از مناطق غربی ضروری می‌باشد. همچنین باتوجه به رشد و توسعه سریع منابع آب سطحی در افغانستان در موضع بالا دست، احتمال وقوع بحران در تأمین آب شرب در مناطق شرقی کشور بیشتر خواهد شد (نور و همکاران، ۱۳۹۷).

جدول ۶- میزان افت و کاهش حجم در آبخوان‌های واقع در مرز شرقی کشور (نور و همکاران، ۱۳۹۷)

نام محدوده	افت تجمعی سطح ایستابی (متر)	میانگین سالانه افت سطح ایستابی (متر)	کاهش تجمعی حجم آبخوان	میانگین سالانه کاهش حجم آبخوان	متوسط هدایت الکتریکی $\mu s/cm$	وضعیت بهره‌برداری
سرخس (۱۳۶۲-۹۲)	۳/۵۳	۰/۱۵	۱۸۴/۲۱	۸/۰۱	۵۳۴۹	ممنوعه
کرات (۱۳۷۲-۹۲)	۳۳/۲۳	۱/۶۶	۵۴۸/۰۳	۲۷/۴۰	۱۴۷۱	ممنوعه بحرانی
تایباد (۱۳۷۶-۹۲)	۱۳/۱	۰/۸۲	۵۷۱/۱۶	۳۵/۷۰	۳۸۶۴	ممنوعه بحرانی
کلات نادری	-	-	-	-	۱۳۱۵	آزاد
میرجاوه (۱۳۶۴-۹۲)	۲/۱۷	۰/۰۸	۸۶/۸	۰/۳۲	۴۷۲۵	ممنوعه
تهلاب (۱۳۷۸-۹۲)	۳/۱۵	۰/۲۲	۲۲/۴۱	۱/۶۰	۴۲۴۸	آزاد
هرمک	-	-	-	-	۶۲۹۷	آزاد

آبخوان‌های کلات نادری و هرمک فاقد شبکه سنجش می‌باشند.

• آبخوان‌های مشترک غرب و شمال غرب ایران

در بخش شمال غربی، ایران با سه کشور ارمنستان، آذربایجان و ترکیه و در غرب با کشور عراق مرز مشترک دارد. در بین این کشورها، ایران از لحاظ میزان برداشت آب زیرزمینی در جایگاه اول قرار دارد و پس از ایران، ارمنستان و ترکیه به ترتیب در

جایگاه‌های بعدی به آب زیرزمینی وابسته هستند. کشور عراق و آذربایجان نیز کمترین وابستگی به آب‌های زیرزمینی را در بین کشورهای منطقه دارند. میزان برداشت آب زیرزمینی در ایران از میزان تغذیه بسیار بیشتر است و کشور ارمنستان نیز در در آستانه بحران قرار دارد. اما سایر کشورها از این منظر

وضعیت عادی دارند (فرشته‌پور و همکاران، ۱۳۹۴). این منطقه دارای پنج آبخوان مرزی تاروس/زاگرس، لنکوران/آستارا، لنیناک-شیرک، نخجوان/لاریجان و جبریل AS21 و نخجوان/لاریجان و جبریل AS24 می‌باشد که، بزرگترین آن آبخوان تاروس/زاگرس است و بین کشورهای ایران، عراق و ترکیه مشترک است. ایران در آبخوان مذکور در موضع بالا دستی مطرح است. کل جمعیت تحت پوشش آبخوان مشترک تاروس/زاگرس برابر ۱/۴۴ میلیون نفر است که شامل شهرهای مهمی چون دربندخان و زاخو در عراق، گیلان غرب، قصرشیرین و سرپل ذهاب در ایران و همچنین شهرهای کوچکی در ترکیه مانند باسکوی و کاپیلی می‌باشد (Un-Escwa و B.G.R، ۲۰۱۳). در بقیه آبخوان‌های این منطقه، ایران در موضع پایین‌دستی مطرح است (فرشته‌پور و همکاران، ۱۳۹۴). در این منطقه تاکنون هیچ توافق‌نامه‌ای پیرامون سیستم آبخوان‌های مشترک منعقد نشده است. عراق و ترکیه تاکنون چندین کمیته فنی پیرامون مسائل آبی تشکیل داده‌اند. با این حال، آن‌ها عمدتاً تنها به مسائل مربوط به آب‌های سطحی پرداخته‌اند و کشور عراق با هیچ یک از همسایگان خود در ارتباط با مدیریت آب‌های زیرزمینی مشترک، بحث و تبادل نظری نداشته است. ایران نیز با عراق یا ترکیه بر سر مسائل مربوط به مدیریت آب‌های زیرزمینی مشترک همکاری نداشته است (Un-Escwa و B.G.R، ۲۰۱۳). باید توجه داشت در شمال غرب ایران، که شامل حوزه‌های آبریز درجه دو مرزی غرب، دریاچه ارومیه و ارس می‌باشد و استان‌های آذربایجان شرقی و غربی، کردستان، کرمانشاه و ایلام را در بر می‌گیرد، بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی در سال مجموعاً به ۳۰۳۶ میلیون مترمکعب می‌رسد که این میزان تقریباً با میزان برداشت سالانه فقط در استان خراسان رضوی برابر است (IWRMC، ۲۰۱۴). این مسأله می‌تواند به دلیل وجود آب سطحی فراوان و موضع بالادستی نسبت به همسایگان غرب و شمال غربی باشد (فرشته‌پور و همکاران، ۱۳۹۴).

باتوجه به قرارگیری کشور ایران در موقعیت جغرافیایی خشک و نیمه‌خشک و دارای چندین حوضه آبریز مرزی، تحت تأثیر بهره‌برداری‌های بی‌رویه در کشورهای نظیر افغانستان و ترکیه، ضروری است چارچوبی منسجم پیرامون چگونگی همکاری‌ها، نهادهای مورد نیاز و نحوه مشارکت تمامی ذی‌نفعان داخلی و منطقه‌ای ارائه شود. به عبارت دیگر در شمال شرق ایران، دو کشور افغانستان (در موضع بالادستی) و ترکمنستان (در موضع پایین‌دستی) قرار دارند که به دلیل قرار گرفتن در منطقه خشک و نیمه‌خشک، دچار کم‌آبی و نیازهای مشابهی هستند. در این منطقه رشد جمعیت، توزیع نامتناسب آب، منابع آبی مشترک، سیاست‌های نادرست کشاورزی، فقدان مدیریت صحیح و یکپارچه بر منابع آب و نبود موافقت‌نامه‌های بهره‌برداری مشکل

را دو چندان کرده است. هم‌چنین در بخش شمال غربی، ایران با سه کشور ارمنستان، آذربایجان و ترکیه و در غرب با کشور عراق دارای آبخوان‌های مشترک است و در بین این کشورها، ایران از لحاظ میزان برداشت آب زیرزمینی و سهم آن در کل آب استحصالی در جایگاه اول قرار دارد. لیکن چارچوب پوشش‌گرانه‌ای برای جلوگیری از بروز هرگونه چالش آبی در منطقه مورد نیاز است (روغنی و همکاران، ۱۳۹۹). نبود موافقت‌نامه‌ها و معاهدات بین‌المللی در زمینه آب‌های زیرزمینی مرزی بین ایران و کشورهای همسایه، نشانگر عدم توجه دولت‌های مذکور به این منبع حیاتی و اتخاذ رویکردی در جهت امنیت و منافع ملی‌شان بوده است. علاوه بر این نبود یک نگاه جامع به اندرکنش آب‌های سطحی و زیرزمینی در این منطقه سبب شده است تا اندک توافق‌نامه‌های صورت گرفته حول محور آب‌های سطحی باشد و به آب‌های زیرزمینی اشاره مستقیم نشود (فرشته‌پور و همکاران، ۱۳۹۴). بنابراین برای بهبود وضعیت مدیریت و حفاظت از آبخوان‌های مرزی و کاهش مشکلات ناشی از بحرانی شدن بیش از اندازه منابع آبی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، با استفاده از تجارب و همکاری‌های موفق صورت گرفته در زمینه مدیریت آبخوان‌های مرزی (همانند توافق‌نامه ژنو) یک راهکار پیشنهادی ارائه شده است.

بحث و نتایج

• راهکار پیشنهادی برای مدیریت مؤثر و کارآمد آبخوان‌های مشترک مرزی

برای مدیریت پایدار و کارآمد آبخوان‌های مشترک مرزی و هم‌چنین آبخوان‌های مشترک ایران با همسایگان غربی و شرقی خود، می‌توان از تجارب موفق موجود در این زمینه هم‌چون توافق‌نامه آبخوان ژنو و آبخوان‌های مشترک ذکر شده در جدول (۱) استفاده نمود. بنابراین با روش الگوبرداری و استفاده از تجربه‌های این همکاری‌های موفق و مطالب عنوان شده قبلی، یک رویکرد پیشنهادی برای مدیریت و حفاظت بهتر آبخوان‌های مشترک مرزی ارائه داده شده است:

ابتدا باید به‌طورکلی کشورهای مشترک با یک آبخوان، یک توافق‌نامه و قراردادی برای همکاری بیشتر در زمینه‌های مختلف مربوط به مسائل آبی منعقد کنند. مسائل مذکور شامل مواردی همچون شناسایی پارامترهای هیدروژئولوژیکی آبخوان مشترک، شناسایی اکوسیستم‌های وابسته به آب زیرزمینی، میزان بهره‌برداری عادلانه، حق برداشت و تشکیل نهادی مشترک برای چگونگی اجرا و نظارت بر میزان بهره‌برداری، ارزش‌گذاری و قیمت آب (متأثر از هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری از تأسیسات موجود)، چگونگی تأمین بودجه و تقسیم هزینه‌ها برای اجرای هر گونه پروژه (مانند

تغذیه مصنوعی، کنترل آلودگی و...) در بین کشورهای مشترک در آبخوان، بررسی عوامل ایجاد تعهد به عدم آسیب جدی به آبخوان، چگونگی تبادل داده و اطلاعات بین آن‌ها، بررسی سازوکارهای مدیریتی و روش‌های حل و فصل مربوط به ایجاد هر گونه اختلاف و مناقشه، لزوم مطالعه توأم و یکپارچه منابع آب زیرزمینی و سطحی، چگونگی همکاری و ارتقای دانش علمی بین آن‌ها، آموزش و آگاهی دادن به عموم مردم برای طرز مصرف بهینه از این منبع ارزشمند و آشنایی آن‌ها با اثرات مخرب و زیان‌بار بیش‌بهره‌برداری، بررسی چگونگی استفاده از دانش بومی و محلی و لزوم مشارکت بیشتر بازیگران محلی در مباحث برنامه‌ریزی، تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و چگونگی اجرا و نظارت بر هر گونه برنامه مدیریتی و چگونگی نظارت و پایش آب زیرزمینی از لحاظ کمی و کیفی می‌باشند. بنابراین باتوجه به مطالبی که عنوان شده است، در ادامه باید آبخوان‌های مشترک مرزی از منظرهای گوناگون طبیعی، فنی، حقوقی، اقتصادی-اجتماعی و سیاسی بررسی و مطالعه شوند که این مطالعات شامل: ۱- بررسی نوع آبخوان (محبوس، آزاد و یا دارای نشت عمودی)؛ ۲- تعیین ارتباطات هیدرولیکی آبخوان با آبخوان‌های مجاور و یا آب‌های سطحی در صورت وجود؛ ۳- بررسی لیتولوژی آبخوان؛ ۴- تعیین نقاط تغذیه و تخلیه طبیعی آبخوان؛ ۵- ارزیابی میزان ذخیره آب موجود در آبخوان مشترک و میزان برداشت سالانه آب برای مصارف گوناگون؛ ۶- بررسی و تعیین تجدیدپذیر یا تجدیدنپذیر بودن آبخوان؛ ۷- بررسی کیفیت آب آبخوان؛ ۸- بررسی و تشخیص آلودگی‌های موجود و احتمالی در آینده در اثر برداشت بی‌رویه و افت تراز آب؛ ۹- بررسی میزان آسیب‌پذیری آبخوان نسبت به عوامل آلاینده؛ ۱۰- بررسی گسترش هاله آلودگی و تعیین جهت حرکت آن در مرزهای مشترک؛ ۱۱- مطالعه تأثیراتی که آلاینده‌ها در هر دو سمت مرز مشترک آبخوان بر جوامع انسانی، جانوری و گیاهی می‌گذارد؛ ۱۲- بررسی احتمال نفوذ آب شور در اثر برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی در یک سمت مرز مشترک آبخوان به آن سوی مرز در آبخوان‌های ساحلی؛ ۱۳- میزان تمرکز جمعیت و میزان وابستگی به آب زیرزمینی در آبخوان؛ ۱۴- روش‌های احیای مجدد آبخوان (تغذیه مصنوعی) و ارزیابی شیوه و امکان اجرای آن در آبخوان؛ ۱۵- تعیین میزان اتصالات مرزی آبخوان در سطوح محلی و منطقه‌ای؛ ۱۶- بررسی‌های ایستگاه‌های پمپاژ و شیوه مدیریت بهره‌برداری در میان کشورهای ذی‌نفع؛ ۱۷- شناسایی چارچوب قانونی (حقوقی)، اداری و شیوه حکمرانی و همچنین میزان دانش فنی موجود در دو سوی مرز آبخوان مشترک؛ ۱۸- بررسی میزان روابط و تمایل (بررسی اشتراکات مذهبی، فرهنگی، سیاسی و...) کشورهای ذی‌نفع به افزایش سطح همکاری‌های مشترک و ... می‌باشند. برای دستیابی به مواردی که در بالا ذکر شده است، باید سازمان‌های مختلف دولتی، غیردولتی (سازمان‌های مردمی و NGOها)، نهادهای مختلف، کارشناسان

فنی و متخصص و همچنین جوامع دانشگاهی و مدنی تحت یک مجموعه مشترک و هماهنگ با هم در سطوح مختلف محلی، ملی و مرزی فعالیت داشته باشند. بررسی چنین مطالعه‌ای وسیع و جامع، نیاز به تأمین منابع مالی از سوی دولت‌ها و سازمان‌های مختلف در هر یک از کشورهای مشترک با آبخوان می‌باشد. هر یک از کشورها باید بسترها و ظرفیت‌های لازم برای دستیابی به این اطلاعات از وضعیت آبخوان مشترک را برای متخصصان مختلف فراهم نمایند. بعد از مرحله مطالعه، باید بسترهای لازم را برای ایجاد یک پایگاه داده مشترک قابل اطمینان و مورد توافق کشورهای مشترک با آبخوان مرزی فراهم نموده و تمامی اطلاعات مربوط به آبخوان مشترک در این پایگاه، ثبت و به اشتراک گذاشته شوند. بنابراین با انجام این کار، داده‌های ناقص معلوم شده و باید برای رفع آن‌ها اقدامات لازم صورت گیرد. ذکر این نکته لازم است که داده‌های اشتراک گذاشته بین کشورهای دارای آبخوان مشترک، باید شفاف و قابل اعتماد بوده تا هرگونه تصمیم‌گیری بر اساس یک درک صحیح از این اطلاعات علمی اشتراکی صورت گیرد. از آنجا که دیدگاه و نگرش‌های متفاوتی به مقوله مدیریت آب زیرزمینی، میزان برداشت و محافظت از آن، چارچوب‌های سازمانی و دولتی، وضعیت سیاسی، اقتصادی و اجتماعی در هر کشور با کشور یا کشورهایی که با یک آبخوان مشترک هستند، با هم متفاوت می‌باشد، این امر باعث ایجاد اختلافات و مناقشاتی می‌شود که برای رفع آن‌ها باید یک کمیته‌ای تشکیل شود تا موانع و مشکلات موجود و ایجاد شده در آینده را شناسایی و برای حل و فصل آن‌ها مطابق یک استاندارد بین‌المللی اقدام نماید. این کمیته مشورتی ترکیبی باید متشکل از نمایندگان از طرفین درگیر در آبخوان مشترک مرزی بوده و مورد توافق هر دو باشند. برای به نتیجه مطلوب رسیدن مباحث ایجاد شده در مورد مدیریت پایدار آبخوان مشترک، استفاده از یک تسهیل‌گر فرآیند نیز سودمند می‌باشد. تسهیل‌گر می‌تواند با گرد هم آوردن کنش‌گران، شناخت دریافت‌های آنان، گفت‌وگو در مورد منافع متعارض و یافتن راه‌حل‌های برد-برد یا مصالحه معقول، به کشورهای ذی‌نفع کمک کند. در ادامه توسط یک سازمانی که مورد قبول کشورهای مشترک با آبخوان می‌باشد، باید قوانینی در چارچوب توافق‌نامه‌هایی صورت گیرد و تمام چالش‌های فنی، حقوقی، سیاسی، اقتصادی و اجتماعی ایجاد شده برای یک آبخوان مشترک مرزی در آن مد نظر قرار گیرد. باید یک سری قوانین، احکام و آیین‌نامه‌هایی تعریف شود و طرفین ذی‌نفع را ملزم به رعایت آن‌ها نمود. در این توافق‌نامه‌ها باید به منافع تمام ذی‌مدخلان، ذی‌نفعان و همین‌طور اکوسیستم‌های وابسته به آب زیرزمینی و خدمات آن‌ها توجه اساسی شده و نمایندگانی برای تمام آن‌ها در نظر گرفته شود. همچنین نهادهای مردمی و محلی را نیز در این توافق‌نامه‌ها گنجانده و در مدیریت محلی آبخوان مشترک مرزی، مشارکت مستقیم آن‌ها امکان‌پذیر باشد. مشارکت ذی‌نفعان

دارای جنبه‌هایی است که نیاز به بررسی دارند. ابتدا باید ضرورت و مزایای مشارکت آنان تبیین شود. در گام بعدی تمام سطوح مشارکت ذی‌نفعان تشریح شده و در آخر باید نحوه مشارکت مشخص شود. بر این اساس وجود یک ساختار مدیریتی با چنین ویژگی‌هایی سبب قانون‌مند شدن و افزایش اعتماد ذی‌نفعان شده و منجر به شناسایی راه‌حل‌های مؤثر و اتخاذ تصمیمات کارآمدتر مدیریتی می‌شود. از این‌رو یک چیدمان نهادی در سطوح مختلف در دو سوی مرز باید ایجاد شود و از سوی دولت‌ها به رسمیت شناخته شوند. هر گونه نهاد محلی ایجاد شده باید مورد حمایت و پشتیبانی دولت‌های مرکزی قرار گیرد. مشارکت ذی‌نفعان محلی در نظارت، اجرا، اصلاح قوانین و چارچوب حقوقی باعث افزایش سطح اعتماد آنان شده و این امر منجر به پایداری بیشتر آنان به انجام تعهدات و اجرای قوانین می‌شود. در این توافق‌نامه‌ها باید چگونگی انجام الزامات حقوقی برای عدم اجرای تعهدات کشورها تعریف شود و در صورت هر گونه دخل و تصرفی که باعث ایجاد اختلاف و درگیری شود، اقدامات لازم صورت پذیرد همان‌طور که ذکر شد این اقدامات توسط تشکیل کمیته مشورتی برای سهولت و رفع بهتر مشکل و اختلاف انجام می‌شود. در نهایت یک چارچوب جامع مدیریتی مشترک در قالب توافق‌نامه‌هایی تنظیم و منعقد می‌شود و باید هر چند سال یک‌بار به‌روزرسانی شود.

نتیجه‌گیری

ماهیت پنهان و پیچیدگی سیستم‌های آب زیرزمینی باعث شده اغلب درک صحیحی از آن‌ها وجود ندارد و بنابراین مدیریت، حفاظت و توسعه پایدار این منبع ارزشمند از نظر کمی و کیفی با مشکلات فراوانی مواجه می‌شود. با افزایش وابستگی جهانی به آب زیرزمینی و افزایش برداشت‌های بی‌رویه، مشکلات و چالش‌هایی در خصوص چگونگی استفاده عادلانه، دسترسی، حفاظت، توسعه پایدار و همچنین نظارت منابع آبی در آبخوان‌های مشترک مرزی به‌وجود می‌آید. افزایش تقاضا و نیازهای آبی به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک منجر به افزایش بهره‌برداری و رقابت برای منابع آبی شده و می‌تواند منجر به بروز اختلاف (به دلیل تفاوت در توسعه اجتماعی-اقتصادی، شیوه‌های مدیریتی و چارچوب حکمرانی و نظارتی، ظرفیت و توسعه زیرساخت‌ها، سطح دانش فنی) و درگیری بین کشورهای ذی‌نفع با آبخوان مشترک متعاقب آن می‌شود. بنابراین شناخت و مدیریت منابع آب زیرزمینی در آبخوان‌های مشترک مرزی به‌منظور استفاده عادلانه و پایدار (تأمین آب شرب، توسعه انرژی، امنیت غذایی و انسانی، حفظ تنوع زیستی و بقای اکوسیستم‌ها) و همچنین جلوگیری از هر گونه اختلاف و مناقشات میان کشورها در آینده امری ضروری می‌باشد.

تاکنون توافق‌نامه‌ها و کنوانسیون‌های متعددی در مورد منابع آب سطحی مشترک میان کشورها منعقد شده است ولی به دلایلی همچون مشخص نبودن مرز کامل آبخوان مشترک، نامرئی و نهان بودن آن، توزیع ناهمسان، پیچیدگی آب زیرزمینی و نداشتن درک کافی از آن و دشواری‌های پایش و نظارت آبخوان‌ها، کم‌تر به مدیریت آبخوان‌های مشترک مرزی پرداخته شده و توافقات بسیار اندکی در این زمینه صورت پذیرفته است.

ایران با داشتن ۱۱ آبخوان مشترک مرزی با همسایگان غربی و شرقی خود توافقاتی در زمینه بهره‌برداری عادلانه و پایدار از آب زیرزمینی با همسایگان خود نداشته است. لذا باتوجه به اهمیت موضوع و با استفاده از تجارب موفق جهانی همانند توافق‌نامه ژنو به‌عنوان طولانی‌ترین و مشارکتی‌ترین توافق‌نامه مشترک مرزی موجود میان کشورهای سوئیس و فرانسه در زمینه مدیریت پایدار، پیشنهاداتی در زمینه مدیریت مؤثر و افزایش همکاری‌ها میان کشورهای ذی‌نفع در یک آبخوان مشترک مرزی ارائه داده شده است:

- انعقاد توافق‌نامه و قراردادی برای همکاری‌های بیشتر در زمینه شناسایی پارامترهای فنی، فرهنگی-اجتماعی، سیاسی، اقتصادی، حقوقی و همچنین اکوسیستم‌های طبیعی وابسته به آب زیرزمینی در کشورهای دارای آبخوان مشترک مرزی
- فعالیت سازمان‌های مختلف دولتی، غیردولتی (سازمان‌های مردمی و NGOها)، نهادهای مختلف، کارشناسان فنی و متخصص و همچنین جوامع دانشگاهی و مدنی تحت یک مجموعه مشترک و هماهنگ با هم در سطوح مختلف محلی، ملی و مرزی
- تأمین منابع مالی و تخصیص بودجه برای دستیابی به مطالعه جامع وضعیت آبخوان مشترک از سوی دولت‌ها و سازمان‌های مختلف بین‌المللی و تقسیم هزینه‌ها برای هر اقدام مشترک (تغذیه مصنوعی، کنترل و پاک‌سازی آلودگی و ...)
- اشتراک‌گذاری اطلاعات و داده‌های مطمئن، قابل اعتماد و شفاف در یک پایگاه مشترک داده و تبادل مداوم و مستمر اطلاعات و همچنین ارائه گزارشات منظم در مورد هر گونه اقدام از سوی کشورهای ذی‌نفع
- ایجاد یک سازمان مورد توافق کشورهای ذی‌نفع و تعریف قوانین و تعهدات لازم با در نظر گرفتن هر گونه چالش فنی، حقوقی، سیاسی، اقتصادی و اجتماعی ایجاد شده و همچنین باتوجه به منافع تمام کنش‌گران درگیر در آبخوان مشترک مرزی
- تشکیل کمیته مشورتی (به‌منظور کاهش اختلافات و مناقشات، شناسایی مشکلات، موانع و ارائه بهترین راه‌حل و نظارت بر اجرای تعهدات)
- ارائه یک چارچوب جامع در قالب یک توافق‌نامه مشترک با در نظر گرفتن تمام تفاوت‌های موجود میان آبخوان‌ها، ساختارهای اجتماعی-فرهنگی اقتصادی، اداری و شیوه حکمرانی مختلف کشورها و استفاده از نهادهای محلی در تمام تصمیمات اتخاذی و مدیریتی.

۱- در حکومت بسیط، قدرت در پایتخت کشور متمرکز شده است، اما در حکومت فدرال در حقیقت دو نوع حکومت وجود دارد: یکی حکومت مرکزی و دیگری حکومت‌های ایالتی و قدرت حاکمیت بین این دو نوع حکومت تقسیم می‌شود.

- 2-Global water partner ship
- 3-customary international laws
- 4-Arve River
- 5-Mont Blanc
- 6-Guneydogu Anadolu Projesi: GAP

منابع

- ارشدی، محمد. (۱۳۹۷). عدالت اجتماعی و آب درآمدی بر مفاهیم و رویکردها. اندیشکده تدبیر آب، تهران، ایران. <http://iwpri.ir/home/single/531>
- اسکندری مایوان، جواد، و محمدزاده، حسین. (۱۳۹۲). ارایه چارچوبی استاندارد برای تهیه شناسنامه آبخوان‌های مرزی کشور بر اساس قوانین بین‌المللی. سی و دومین گردهمایی و نخستین کنگره بین‌المللی تخصصی علوم زمین. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران.
- اسکندری مایوان، جواد، و محمدزاده، حسین. (۱۳۹۱). بررسی آبخوان‌های مرزی (مشترک بین‌المللی) و مسائل مربوط به مدیریت آن‌ها. همایش ملی بهره‌برداری از منابع آب. دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی آب، دزفول، ایران.
- برقی، حمید، و قنبری، یوسف. (۱۳۸۹). بحران منابع آب، چالش اساسی جهان اسلام. چهارمین کنگره بین‌المللی جغرافیدانان جهان اسلام. زاهدان، ایران. <https://civilica.com/doc/82831>
- حاتمی، مهدی، و بابایی، حسن. (۱۳۹۳). تحلیل و ارزیابی طرح کمیسیون حقوق بین‌الملل ۲۰۰۸ در خصوص حقوق بین‌الملل حاکم بر سفره‌های آبی زیرزمینی مشترک میان دولت‌ها. پژوهش حقوق عمومی، ۱۶(۴۴)، ۳۳-۹. https://qjplatu.ac.ir/article_666.html
- روغنی، بردیا، فرشته‌پور، محمد، و علیایی، محمدعلی. (۱۳۹۹). هیدروپلیتیک آبخوان‌های مرزی: به سوی همکاری‌های کاربردی. فصلنامه ژئوپلیتیک، ۱۶(۲)، ۱۸۷-۲۱۶. [20.1001.1.17354331.1394.11.39.7.2](https://doi.org/10.17354331.1394.11.39.7.2)
- زمانی، سیدقاسم، و برلیان، پویا. (۱۴۰۱). مفهوم و قلمرو اصل بهره‌برداری معقول و منصفانه از منابع آبی مشترک از منظر حقوق بین‌الملل. پژوهش حقوق عمومی، ۲۴(۷۵)، ۴۴-۹. [QJPL.2021.59799.2597/10.22054](https://doi.org/10.22054/QJPL.2021.59799.2597/10.22054)

- سالاری، فاطمه، قربانی، مهدی، و ملکیان، آرش. (۱۳۹۴). پایش اجتماعی شبکه ذی‌نفعان در حکمرانی محلی منابع آب (منطقه مورد مطالعه: حوضه آبخیز رزین، شهرستان کرمانشاه). مرتع و آبخیزداری (منابع طبیعی ایران)، ۶۸(۲)، ۲۸۷-۳۰۵. <https://sid.ir/paper/508423/fa>
- سینائی، وحید. (۱۳۹۰). هیدروپلیتیک، امنیت و توسعه همکاری‌های آبی در روابط ایران، افغانستان و ترکمنستان. فصلنامه روابط خارجی، ۳(۲)، ۱۸۵-۲۱۱. [20.1001.1.20085419.1390.3.2.5.6](https://doi.org/10.1001.1.20085419.1390.3.2.5.6)
- فرشته‌پور، محمد، روغنی، بردیا، و میان‌آبادی، حجت. (۱۳۹۴). چالش‌های ژئوپلیتیک منابع آب‌های زیرزمینی بین‌المللی با تأکید بر منابع مشترک ایران. فصلنامه ژئوپلیتیک، ۱۱(۳)، ۱۷۰-۲۰۴. [20.1001.1.17354331.1394.11.39.7.2](https://doi.org/10.17354331.1394.11.39.7.2)
- نواری، علی. (۱۳۹۸). بهره‌برداری از سد ایلسو در ترکیه و موازین حقوق بین‌الملل آب. فصلنامه پژوهش حقوق عمومی، ۲۱(۶۳)، ۱۹۰-۱۶۳. <https://doi.org/10.22054/qjpl.2018.27436.1687>
- نور، حمزه، باقریان‌کلات، علی، رجایی، سیدحسین، واحدی‌طرقی، رضا، بیگی، حبیب‌الله، و شمشیری‌نصرآباد، ربابه. (۱۳۹۷). ارزیابی آبخوان‌های مشترک واقع در مرز شرقی کشور از نظر تغییرات کمی و کیفی. هفتمین همایش ملی سامانه‌های سطوح آگیر باران. پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری - انجمن سیستم‌های سطوح آگیر باران، تهران، ایران.
- هاشمی، سید مختار. (۱۴۰۱). حکمرانی محلی آب در ایران: پیامدها و توصیه‌های سیاستی. نشریه آب و توسعه پایدار، ۹(۱)، ۱۴۴-۱۳۵. https://jwsd.um.ac.ir/article_42615.html
- Barberis, J. (1991). Development of International Law of Transboundary Groundwater. The. Nat. Resources Journal, 31, 167-186.
- Barberis, J. (1991). The development of international law of transboundary groundwater. Natural Resources Journal, 31(1), 167-186. <https://digitalrepository.unm.edu/nrj/vol31/iss1/9>
- Berdiyev, A. (2006). Progress in Domestic Water Supply in View of the Achievement of UN Millennium Development Goals, issues of the implementation of integrated water resource management in view of the achievement of UN.
- Brooks D.B., Linton J. (2011). Governance of Transboundary Aquifers: Balancing Efficiency, Equity and Sustainability. International Journal of Water Resources Development, 27(3), 431-462.
- Brooks, D. B., & Linton, J. (2011). Governance of transboundary aquifers: balancing efficiency, equity and

- Fallatah, O. A., Ahmed, M., Save, H., & Akanda, A. S. (2017). Quantifying temporal variations in water resources of a vulnerable middle eastern transboundary aquifer system. *Hydrological Processes*, 31(23), 4081-4091. <https://doi.org/10.1002/hyp.11285>
- Gaye C.B., Tindimugaya C. 2019. Review: Challenges and opportunities for sustainable groundwater management in Africa. *Hydrogeol.* (27), 1099-1110.
- Gaye, C. B., & Tindimugaya, C. (2019). Challenges and opportunities for sustainable groundwater management in Africa. *Hydrogeology Journal*, 27(3), 1099-1110. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1892-1>
- Giordano, M., Drieschova, A., Duncan, J. A., Sayama, Y., De Stefano, L., & Wolf, A. T. (2014). A review of the evolution and state of transboundary freshwater treaties. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics*, 14, 245-264. <https://doi.org/10.1007/s10784-013-9211-8>
- Hasemi, M. (2011). A socio-technical assessment framework for integrated water resources management (IWRM) in Lake Urmia Basin, Iran (Doctoral dissertation, Newcastle University).
- Hayton R.D., Utton A.E. 1989. Transboundary Groundwaters: The Bellagio Draft Treaty. *Nat. Resources J*, 29:668-722. Hayton, R. D., & Utton, A. E. (1989). Transboundary groundwaters: The Bellagio draft treaty. *Nat. Resources J*, 29, 663. <https://digitalrepository.unm.edu/nrj/vol29/iss3/4>
- Helal, M. S. (2007). Sharing Blue gold: the 1997 UN convention on the law of the non-navigational uses of international watercourses ten years on. *Colo. J. Int'l Env'tl. L. & Pol'y*, 18, 337.
- Held, I. M., & Soden, B. J. (2006). Robust responses of the hydrological cycle to global warming. *Journal of climate*, 19(21), 5686-5699. <https://doi.org/10.1175/JCLI3990.1>
- IGRAC (International Groundwater Resources Assessment Centre) .(2015).Transboundary Aquifers of the World. http://www.unigrac.org/dynamics/modules/SFIL0100/view.php?fil_Id=317
- IGRAC, U. I. (2015). Transboundary aquifers of the world [map]. 1:50 000 000.
- sustainability. *International Journal of Water Resources Development*, 27(3), 431-462. <https://doi.org/10.1080/07900627.2011.593117>
- Burchi S. 2018. Legal frameworks for the governance of international transboundary aquifers: Pre- and post-IS-ARM experience. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 20:15–20. Burchi, S. (2018). Legal frameworks for the governance of international transboundary aquifers: Pre-and post-ISARM experience. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 20, 15-20. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.04.007>
- Daoudy M. 2009. Asymmetric Power: Negotiating Water in the Euphrates and Tigris. *International Negotiation*, 14(2): 361-391. Daoudy, M. (2009). Asymmetric power: Negotiating water in the Euphrates and Tigris. *International Negotiation*, 14(2), 361-391. DOI: [10.1163/157180609X432860](https://doi.org/10.1163/157180609X432860)
- de los Cobos G. 2018. The Genevese transboundary aquifer (Switzerland-France): The secret of 40 years of successful management. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 20:116-127. de los Cobos, G. (2018). The Genevese transboundary aquifer (Switzerland-France): The secret of 40 years of successful management. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 20, 116-127. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.02.003>
- Eckstein, G. (2017). The international law of transboundary groundwater resources. *Routledge Handbook of Water Law and Policy*, Alistair Rieu-Clark, Andrew Allan & Sarah Hendry, Routledge publisher. British. 217-233. <https://ssrn.com/abstract=3927407>
- Eckstein, G. (2021). International law for transboundary aquifers: a challenge for our times. *American Journal of International Law*, 115, 201-206. doi: [10.1017/aju.2021.18](https://doi.org/10.1017/aju.2021.18).
- Eckstein, G. E. (2007). Commentary on the UN International Law Commission's draft articles on the law of transboundary aquifers. *Colo. J. Int'l Env'tl. L. & Pol'y*, 18, 537.
- Eckstein, G. E. (2011). Managing buried treasure across frontiers: the international Law of Transboundary Aquifers. *Water International*, 36(5), 573-583. <https://doi.org/10.1080/02508060.2011.598642>

- Smith, M., Cross, K., Paden, M., & Laban, P. (2016). Spring-Managing groundwater sustainably. IUCN, Gland, Switzerland.
- Stevanovic, Z., & Iurkiewicz, A. (2009). Groundwater management in northern Iraq. *Hydrogeology journal*, 17(2), 367. doi: [10.1007/s10040-008-0331-0](https://doi.org/10.1007/s10040-008-0331-0)
- UNDP. (1999). Governance for sustainable growth and equity report of international conference., United Nations. New York, 28-30.
- Un-Escwa, B. G. R. (2013). United Nations economic and social commission for western Asia; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Inventory of Shared Water Resources in Western Asia, Beirut.
- Weiss, T. G. (2000). Governance Good Governance & Global Governance: conceptual & actual challenges' *Third World Quarterly*, 21(5), 795-814.
- International Center for Agricultural Research in the Dry Areas. (2002). ICARDA annual report. International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA).
- IWRMC (Iran Water Resources Management Company). (2014). Evaluation of Groundwater Resources of Iran by the End of 2012-2013, Center of Water Resources Studies, Groundwater Group. http://wrs.wrm.ir/index_fa.asp
- Jarvis, T., Giordano, M., Puri, S., Matsumoto, K., & Wolf, A. (2005). International borders, ground water flow, and hydroschizophrenia. *Groundwater*, 43(5), 764-770. doi: [10.1111/j.1745-6584.2005.00069.x](https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.00069.x)
- KhRW. (2015). Khorasan Razavi Regional Water Authority. <http://www.khrw.ir/SC.php?type=static&id=19>
- Lesser, L. E., Mahlknecht, J., & López-Pérez, M. (2019). Long-term hydrodynamic effects of the All-American Canal lining in an arid transboundary multilayer aquifer: Mexicali Valley in north-western Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 78, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8487-6>
- Liu, Y., Wang, P., Ruan, H., Wang, T., Yu, J., Cheng, Y., & Kulmatov, R. (2020). Sustainable use of groundwater resources in the transboundary aquifers of the five Central Asian countries: challenges and perspectives. *Water*, 12(8), 2101. doi: [10.3390/w12082101](https://doi.org/10.3390/w12082101)
- McIntyre, O. (2013). Utilization of shared international freshwater resources—the meaning and role of “equity” in international water law. *Water International*, 38(2), 112-129. <http://dx.doi.org/10.1080/02508060.2013.779199>
- Mobius, M. (2001). Good governance is a global challenge. *Corporate Board*, 22, 1-4.
- Report of the International Law Commission on the Work of its Fortieth Session. (1988). Extract from the Yearbook of the International Law Commission, 11(2), 35.
- Rogers, P., & Hall, A. W. (2003). Effective water governance, (7). Stockholm: Global water partnership. <https://hdl.handle.net/10535/4995>
- Simms, C. (2008). Good governance at the World Bank. *The Lancet*, 371(9608), 202-203. doi: [10.1016/S0140-6736\(08\)60128-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(08)60128-2)

The Effects of Hasanlu Dam Construction on the Local Community in the Catchment Area of Lake Urmia

Y. Akbari^{1*}, S. N. Mousavi²

1- Ph.D. Graduate in Sociology, Rural Social Development, University of Tehran, Tehran, Iran. 2- MSc Graduate in Demography, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran

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

Received: 05-02-2023

Revised: 09-04-2023

Accepted: 30-04-2023

Available Online: 21-09-2023

تأثیرات احداث سد حسنلو بر جامعه محلی در حوزه آبریز دریاچه ارومیه

یونس اکبری^{۱*}، سید نوید موسوی^۲

۱- دانش‌آموخته دکتری جامعه‌شناسی-گرایش توسعه اجتماعی روستایی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. ۲- دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد جمعیت‌شناسی، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران.

*(نویسنده‌ی مسئول، E-Mail: Younes.akbari@ut.ac.ir)

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۱/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۶/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۰

Abstract

This study, using a qualitative method, seeks to find out what results and consequences the construction of Hasanlu Dam, as a development action on the Lake Urmia catchment area, has from the local people's point of view, and finally Provide a clear definition from the point of view of the local community regarding the effects of this dam on Lake Urmia. Findings of the research show that the construction of Hasanlu Dam as a development action has positive results such as increasing the income of farmers in the region, improving the welfare of local residents and creating dependent employment for some residents, as well as increasing agricultural production. This can be evaluated as a desirable developmental action from this perspective. The positive attitude of the local community towards this developmental action can be inferred by referring to the concern of local residents to preserve the Hasanlu dam and expand such developmental actions, in exchange for the drying up of Lake Urmia. However, this development initiative has negative consequences in addition to positive results, the most important of which is the exacerbation of the critical situation of Lake Urmia. In general, it can be said that the construction of numerous dams on the rivers flowing into Lake Urmia is a reckless development that is the main cause of the worsening of Lake Urmia's drought, and it should be replaced with responsible and managed development.

Keywords: Lake Urmia, Hasanlu Dam, Development Action, Impact Assessment of Development Action, Responsible Development.

چکیده

این مطالعه با استفاده از روش کیفی به دنبال آن است تا دریابد ساخت سد حسنلو، به‌عنوان یک اقدام توسعه‌ای بر حوزه آبریز دریاچه ارومیه، از نظر مردم محلی چه نتایج و پیامدهایی را به دنبال داشته است و در نهایت صورت‌بندی روشنی از دیدگاه جامعه محلی در رابطه با تأثیرات این سد بر دریاچه ارومیه ارائه دهد. یافته‌های تحقیق گویای آن است که احداث سد حسنلو به‌عنوان یک اقدام توسعه‌ای، در نگاه جامعه محلی نتایج مثبتی ازجمله افزایش درآمد کشاورزان منطقه، بهبود وضع معیشتی و رفاهی اهالی منطقه و ایجاد اشتغال وابسته برای بخشی از ساکنان و همچنین افزایش تولید محصولات کشاورزی را به همراه داشته است و از این جنبه می‌توان آن را به‌عنوان یک اقدام توسعه‌ای مطلوب ارزیابی نمود. دیدگاه مثبت جامعه محلی نسبت به این اقدام توسعه‌ای را می‌توان با استناد به دغدغه ساکنان محلی برای حفظ سد حسنلو و گسترش اقدامات توسعه‌ای از این دست، در ازای خشک شدن دریاچه ارومیه استنباط نمود. بااین‌حال این اقدام توسعه‌ای علاوه بر نتایج مثبت، پیامدهای منفی نیز به همراه داشته است که مهم‌ترین آن تشدید وضعیت بحرانی دریاچه ارومیه است. به‌طورکلی می‌توان اینگونه بیان کرد که تعدد سدهای احداث شده بر روی رودخانه‌های ورودی به دریاچه ارومیه نمودی عریان از توسعه افسار گسیخته بوده که عامل اصلی تشدید خشک شدن دریاچه ارومیه است و باید با توسعه مسئولانه و مدیریت شده جایگزین شود.

واژه‌های کلیدی: دریاچه ارومیه، سد حسنلو، توسعه اقدام توسعه‌ای، ارزیابی تأثیرات اقدام توسعه‌ای، توسعه مسئولانه.

دریاچه ارومیه که در روزگاری نه چندان دور به عنوان بزرگترین دریاچه آب شور جهان شناخته می شد، امروزه بیش از هر لحظه ای در تاریخ حیات خود به مرگ نزدیکتر است. آخرین آمارها از سطح آب دریاچه حاکی از آن است که با وجود سالهای متمادی که از اجرای طرحهای احیای دریاچه می گذرد، سطح آب دریاچه طی سالهای گذشته تغییر محسوسی را تجربه نکرده است، در واقع سطح آب دریاچه در فروردین سال ۱۴۰۲ نسبت به فروردین ۱۳۹۸، اندکی کاهش یافته است (از ۱۲۷۰/۹۶ به ۱۲۷۰/۲۶ متر بالاتر از سطح آب دریا) ولی با در نظر گرفتن سطح آب دریاچه نسبت به سطح آبهای آزاد در بازه زمانی بلند مدت نظیر ۱۳۷۴ (۱۲۷۸/۰۲) متر بالاتر از سطح آبهای آزاد) تا سال ۱۴۰۱ (۱۲۷۱/۲۶) متر بالاتر از سطح آبهای آزاد) بیش از ۷ متر کاهش را نشان می دهد. این کاهش سطح آب دریاچه سبب شده است که یک چهارم از سطح دریاچه تنها طی یک دهه (۲۰۰۱ تا ۲۰۱۱) به سرعت به شوره زار تبدیل شود (Hassanzadeh و همکاران، ۲۰۱۱)، روند سریع و پرشتاب مورد اشاره طی سالهای مذکور موجب تشکیل کارگروه ملی نجات دریاچه ارومیه در بهمن سال ۱۳۹۲ شد که با آغاز عملیات اجرایی طرحهای مصوب این کارگروه در ۸ تیر ۱۳۹۳، روند کاهشی تراز دریاچه ارومیه به طور مقطعی متوقف و معکوس شد؛ به نحوی که در پایان سال آبی ۹۹-۱۳۹۸ نسبت به ابتدای سال آبی ۹۳-۱۳۹۲ (سال شروع عملیات اجرایی احیای دریاچه ارومیه) تراز دریاچه ارومیه ۸۷ سانتی متر بالاتر قرار گرفت.

اما با توقف روند پیش گفته و ادامه روند فعلی باید در آینده ای نه چندان دور شاهد خشک شدن این سرمایه ملی باشیم. بنا بر انبوهی از شواهد و اجماع کارشناسان امر خشک شدن دریاچه ارومیه پیامدهای سنگین محیط زیستی و انسانی عدیده ای را به دنبال خواهد داشت. از جمله پیامدهای محیط زیستی خشک شدن دریاچه ارومیه می توان به از بین رفتن انواع منحصر به فرد و نادری از دیاتومها، فیتوپلانکتونها و آرتمیا (که منبع غذایی برای پرندگان مهاجر مانند فلامینگو، پلیکان و اردک است) اشاره نمود (Aghakouchak و همکاران، ۲۰۱۵). خشک شدن دریاچه، علاوه بر پیامدهای محیط زیستی، پیامدهای انسانی مستقیم و غیر مستقیمی نیز به دنبال دارد. از جمله پیامدهای غیر مستقیم می توان به وقوع طوفانهای نمک، در نتیجه از بین رفتن و کاهش باروری زمینهای کشاورزی اشاره کرد (Aghakouchak و همکاران، ۲۰۱۵) پیامد مستقیم این پدیده بر روی انسانها نیز، به علت افزایش ذرات نمک و گرد خاک معلق در هوا، افزایش بیماریهای التهابی، مانند آلرژی، تشدید علائم آلرژی ناشی از گرد و غبار و همچنین بیماریهای تنفسی می باشد (Yamaguchi و همکاران، ۲۰۱۲).

درباره عوامل موثر در کاهش تراز آب دریاچه مطالعات بسیاری صورت پذیرفته است. این مطالعات عواملی همچون رقابت در بالادست حوزه بر سر برداشت بیشتر از منابع آبی، بهره برداری بیش از حد از منابع آب، توسعه بی رویه فعالیت های زراعی، کشت محصولات پر آب بر، طرحهای توسعه منابع آب منطقه ای (ساخت سدها و آب بندها)، خشکسالی و کاهش میزان بارش را عوامل موثر در کاهش سطح آب دریاچه دانسته اند (Hassanzadeh و همکاران، ۲۰۱۱؛ Aghakouchak و همکاران، ۲۰۱۵؛ Ghobadi hamzekhani و همکاران، ۲۰۱۵). همچنین بررسی مطالعات مذکور حاکی از روند صعودی وقوع بیابانزایی و تبدیل بستر دریاچه به شوره زار است. معیار وضعیت آب زیرزمینی، اقلیم و درصد پوشش گیاهی، مهمترین عوامل موثر در وقوع بیابانزایی در دریاچه ارومیه است. (خدائی قشلاق و همکاران، ۱۳۹۹). با نگاهی اجمالی به عوامل ذکر شده میتوان این عوامل را به عوامل انسانی و طبیعی سهیم در کاهش چشمگیر سطح آب دریاچه ارومیه تقسیم بندی کرد که در این میان، عوامل انسانی نسبت به عوامل طبیعی سهم بیشتری در کاهش تراز دریاچه ارومیه را به خود اختصاص داده اند (Ghobadi hamzekhani و همکاران، ۲۰۱۵) و این تلقی را تقویت می نماید که توجه به ذی نفعان انسانی حوزه آبریز دریاچه ارومیه در مواجهه با مشکل به وجود آمده تأثیرگذاری بیشتری نسبت به بخش طبیعی دارد.

یکی از اقداماتی که در بخش انسانی و در رابطه با توسعه کشاورزی مناطق آبریز صورت گرفته احداث سد بر روی رودخانه های منتهی به دریاچه بوده است که در تمامی مطالعات انجام شده به عنوان یکی از عوامل مهم در کاهش تراز آب دریاچه از آن یاد شده است. مطالعات حاکی از آن است که تا سال ۲۰۱۱ نزدیک به ۲۵۷ پروژه توسعه منابع آب (سد، سیل بند و سازه های بتونی) در دست مطالعه بوده است که از این تعداد ۲۳۱ پروژه به تصویب رسیده در آینده نزدیک ساخته شوند (Hassanzadeh و همکاران، ۲۰۱۱). اما با تشکیل ستاد احیای دریاچه ارومیه ممانعت از بارگذاری بیشتر بر روی منابع آب حوزه شامل ساخت سدهای جدید، توسعه کشاورزی و تبدیل اراضی با ماهیت توسعه ای تصویب شد و موضوع تخلیفات برای برخورد قانونی به دستگاه های نظارتی و قوه قضاییه محول شد اما همچنان اثرات و تبعات اجرای طرحهای توسعه ای پیشین همچون سد حسنلو بر وضعیت دریاچه ارومیه ادامه دارد.

سد حسنلو در استان آذربایجان غربی و شمال شهر نقده در حد فاصل رودخانه گدار و دریاچه ارومیه قرار دارد. ساخت این سد به صورت خارج از بستر رودخانه سال ۱۳۷۵ آغاز و سال ۱۳۷۹ به بهره برداری رسیده است. حجم مخزن و حجم تنظیمی آن به ترتیب ۹۹ و ۹۳ میلیون متر مکعب است.

هدف اولیه احداث این سد ذخیره سازی آب رودخانه گدارچای و تأمین آب کامل برای ۸ هزار هکتار از اراضی بلند آب حسنلو و

تأمین آب تکمیلی مورد نیاز در ماه‌های حداکثر مصرف برای ۸۸۰۰ هکتار از اراضی دشت نقده (محمدیار) بوده است.

براساس نتایج مطالعات انجام شده برای طرح تأمین آب شبکه آبیاری و زهکشی اراضی پایاب سد حسنلو، الگوی کشت مصوب این اراضی شامل محصولات گندم و جو، چغندر قند، یونجه، حبوبات، سویا و آفتابگردان است که در سال زراعی ۹۴-۹۳ محصولات ذرت دانه‌ای و کدو آجیلی جایگزین حبوبات، آفتابگردان و سویا شده است. نیاز خالص آبیاری محصولاتی چون چغندر قند، ذرت دانه‌ای و یونجه حدوداً ۲ برابر محصولاتی چون گندم و جو است.

مسئله‌ای که در رابطه با اقدامات بخش انسانی مانند احداث سدها مطرح می‌شود آن است که در کنش‌های توسعه‌ای سازه‌انگاری از این قبیل تا چه اندازه توجه به سایر ذی‌نفعان شامل جوامع محلی و محیط طبیعی (دریاچه ارومیه) مد نظر است؟ و کنش‌های توسعه‌ای سازه‌انگار مهندسی مانند ساخت سد چه نتایج ناخواسته و پیامدهای مثبت و منفی‌ای را برای مردم محلی به دنبال خواهد داشت؟ مقاله حاضر قصد بررسی ذهنیت ذی‌نفعان تحت تأثیر احداث سد حسنلو (یکی از سدهای ساخته شده در حوزه آبریز دریاچه ارومیه) را دارد و درصدد بررسی این مطلب است که دیدگاه جامعه محلی در رابطه با تأثیرات این سد چگونه است؟

سوالات تحقیق

مطالعه حاضر سعی بر آن دارد با رویکرد صرفاً اجتماعی و با استفاده از روش تحقیق کیفی و رویکرد مشارکتی و پایین به بالا ذهنیت مردم محلی متأثر از احداث سد حسنلو بررسی و تحلیل شود و دریابد که:

از منظر جامعه محلی احداث سد حسنلو چه تأثیرات اجتماعی بر آنان در ابعاد گوناگون داشته است؟

ذهنیت جامعه محلی نسبت به احداث سد حسنلو چگونه است؟ نظر جامعه محلی درباره تأثیرات احداث سد حسنلو بر دریاچه ارومیه چیست؟

ذهنیت جامعه محلی درباره طرح احیای دریاچه ارومیه چگونه است و به نظر آنها احیای دریاچه ارومیه چه تأثیرات اجتماعی آن بر زندگی آنان می‌گذارد؟

پیشینه تحقیق

در رابطه با مطالعه اثرات اجتماعی، فرهنگی، اقتصادی ساخت سدها بر جوامع تحت تأثیر این سازه‌ها، مطالعات متنوعی انجام گرفته است که در ادامه بحث به نتایج به‌دست آمده از این مطالعات اشاره خواهد شد. در واقع در این تحقیق احداث سد به‌عنوان نوعی از کنش توسعه‌ای بالا به پایین قلمداد شده است که پیامدهای متنوع

اجتماعی، فرهنگی، محیط‌زیستی اقتصادی به دنبال دارد. تحقیق حاضر صرفاً به دنبال بررسی بعد اجتماعی تأثیرات این کنش است، لذا در ادامه به بررسی مطالعاتی که به تأثیرات اجتماعی احداث سدها پرداخته‌اند توجه شده است.

- مطالعات خارجی

Rosenberg و همکاران (۱۹۹۵) در مقاله‌ای با عنوان "اثرات محیطی و اجتماعی توسعه برق آبی بزرگ مقیاس: چه کسی گوش می‌دهد" سه ادعای متداول بیان شده برای تولید و توسعه سازه‌های تولید برق آبی را بررسی کردند. این سه ادعای عنوان شده شامل: - تولید برق آبی پاک است، ۲- جریان آب به‌صورت کنترل نشده، به هدر می‌رود، ۳- ساکنان محلی از ساخت و توسعه این سازه‌ها منتفع می‌شوند، هستند. این سه ادعا با استفاده از موارد تاریخی در کانادا و سایر نقاط جهان مورد بررسی انتقادی قرار گرفتند. این بررسی انتقادی براساس مقالات، کتاب‌ها و سایر منابعی که در دسترس عموم است صورت گرفته است. نتایج این بررسی حاکی از آن است که سه مدعای مطرح شده در تطابق با واقعیت مورد تایید قرار نمی‌گیرند و بین واقعیت و تمایلات سازندگان این سازه‌ها شکافی عمیق وجود دارد.

Cernea (۲۰۰۴) در پژوهشی تحت عنوان "تأثیرات و ریسک اجتماعی در رابطه با برنامه‌های برق آبی: برنامه‌ریزی پیشگیرانه و اقدامات محافظتی" اثرات مثبت و منفی ساخت سدها را بررسی می‌کند. وی در این مقاله عنوان می‌کند بهترین راه برای کاهش اثرات منفی سدها و تقویت اثرات مثبت آنها پیش دستی در ارزیابی این اثرات است و راه موثر برای این ارزیابی نه در تمرکز بر سد بلکه توجه به حوزه آبریز رودخانه‌ای است که سد بر روی آن ساخته می‌شود. همچنین وی استدلال می‌کند در توجه به سد و توجه به حوزه آبریز رودخانه، ۴ طبقه از اثرات مضر قابل تفکیک است که باید به اثرات آنها قبل از احداث سد توجه شود که این ۴ عامل شامل-فقیرسازی و جابه‌جایی جمعیت به اجبار، ۲- شهری شدن سریع اطراف سازه سد، ۳- تغییرات پیش‌بینی نشده پایین دست در زمینه سیستم‌های تولید کشاورزی و ۴- از دست دادن دارایی‌های میراث فرهنگی هستند.

Duflo و pande (۲۰۰۷) در مقاله‌ای با عنوان "سدها" به بررسی اثرات بهره‌وری و توزیعی سدهای بزرگ مقیاس در هند پرداختند. نتایج تحقیق بیانگر این مطلب بود که در نواحی پایین‌دست سد، تولید کشاورزی افزایش یافته و اثرات باران‌های ناگهانی کاهش یافته است. در مقابل تولید کشاورزی افزایش غیر محسوسی را در ناحیه‌ای که سد ایجاد شده نشان می‌دهد و حتی نوسانات نیز در این نواحی افزایش یافته است. نتایج همچنین نشان می‌دهد که فقر روستایی در نواحی پایین‌دست کاهش یافته اما در نواحی‌ای که سد ایجاد شده فقر روستایی روند افزایشی را نشان می‌دهد.

Tilt و همکاران (۲۰۰۹) در تحقیقی با عنوان "تأثیرات اجتماعی

پروژه‌های بزرگ سدسازی: مقایسه مطالعات موردی بین‌المللی و دلالت‌هایی برای اقدام مناسب" با اعمال ابزار ارزیابی تأثیر اجتماعی برای فهم تأثیراتپروژه‌های بزرگ سدسازی بر جوامع انسانی به بررسی نتایج دو مطالعه بر روی ۱- پروژه لسوتو در آفریقای جنوبی و ۲- سد نان وان در جنوب غربی چین پرداختند. این تحقیق درصدد این بود که اثرات اجتماعی پروژه‌های بزرگ سدسازی را در طول زمان و در مقیاس‌های جغرافیایی مختلف ارزیابی نماید. در این تحقیق بر طیفی از تأثیرات اجتماعی متداول پرداخته شده است که شامل: ۱- مهاجرت و اسکان مجدد جمعیت محدوده استقرار سد، ۲- تغییر در ساختار شغلی و اقتصاد روستایی، ۳- تأثیرات بر روی زیرساخت‌ها و مسکن، ۴- تأثیرات بر روی جنبه‌های غیر مادی و فرهنگی زندگی و ۵- تأثیرات بر روی سلامت اجتماع و ارتباطات جنسیتی. هدف این تحقیق این بود که با تشخیص قبلی تأثیرات بالقوه چنین پروژه‌هایی کارگزاران و تصمیم‌گیرندگان می‌توانند از پیش آگاهی داشته باشند که باید چه نوع مداخلاتی و چگونه صورت گیرد. جمع‌بندی این پژوهش بیان می‌دارد چنین مطالعات پیشنهاداتی برای اقدام مناسب در ارزیابی تأثیرات اجتماعی سدسازی‌های بزرگ به‌دست می‌دهند و انجام چنین مطالعاتی می‌تواند استراتژی‌های توسعه‌ای را که بر روی جمعیت محلی تأثیرگذار هستند تقویت کند و پایداری بلند مدت پروژه را ارتقا بخشد.

Tajziehchi و همکاران (۲۰۱۳) در مقاله با عنوان "تعیین مقدار اثرات اجتماعی سدهای تولید برق بزرگ مقیاس: مطالعه موردی سد البرز در استان مازندران- شمال ایران" هزینه‌های واقعی تولید برق تحمیل شده بر اجتماعات و محیط‌زیست را به‌منظور شفاف‌سازی تأثیرات اجتماعی مضر سدهای بزرگ که اغلب بخاطر منافع کوتاه مدت اقتصادی نادیده گرفته می‌شوند، بررسی کردند. نتایج به‌دست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد هزینه‌های خارجی تولید برق به وسیله سد البرز سالانه رقمی معادل ۴/۸ میلیون دلار است. بیشترین سهم از این هزینه را بخش کشاورزی متحمل می‌شود و کمترین هزینه آن کاهش کیفیت زندگی مردم است. از عملکرد تولید برق توسط این سد براساس ارزش تخمینی در طول سال به میزان ۱۰۷۴ تن گاز گلخانه‌ای به هوا منتشر شود.

Borimnejad و salimian (۲۰۱۴) در مقاله‌ای با عنوان "بررسی اثرات اقتصادی-اجتماعی-محیط‌زیستی سد طالقان با استفاده از مدل معادلات ساختاری به بررسی اثرات اجتماعی-اقتصادی-محیط‌زیستی سد طالقان در دو دوره قبل و بعد از احداث سد پرداختند. داده‌های مورد نیاز این تحقیق با استفاده از پرسشنامه و مصاحبه با ۴۰۰ پاسخگو در ناحیه و شبکه آبیاری و زه‌کشی سد طالقان گردآوری و با بهره‌گیری از نرم‌افزار لیزرل تجزیه و تحلیل شده است. نتایج به‌دست آمده نشان دهنده توسعه اقتصادی منطقه است اما در عین حال نشان‌دهنده فاکتورهایی مانند فقدان

اعتماد، فقدان مزیت اقتصادی و کمبود امکانات، کاهش جمعیت روستایی و کاهش تمایل به سرمایه‌گذاری نیز هستند. نتایج همچنین نشان داد ۶۳/۳ درصد افزایش آلودگی محیطی منطقه به‌وسیله توریست‌های بازدید کننده از سد رخ می‌دهد. در زمینه منابع آبی نیز نه تنها افزایشی صورت نگرفته بلکه مطالعات حاکی از کاهش منابع آبی است. درحالی‌که ۹۸ درصد پاسخگویان نیز اعلام داشتند از آنها درباره ساخت سد هیچ سوالی نشده است. همچنین در مورد ضریب تأثیر سد بر توسعه اقتصادی-اجتماعی و محیط‌زیستی منطقه، روستاییان اعلام کردند ساخت سد هیچ تأثیر مثبتی بر توسعه منطقه نداشته است.

Kirchherr و charles (۲۰۱۶) در مقاله‌ای تحت عنوان "تأثیرات اجتماعی سدها: چارچوبی نوین برای تحلیل علمی" با هدف یک دست کردن فهم تأثیرات اجتماعی سدها از طریق تحلیل و جمع‌آوری چارچوب‌های متنوعی که عموماً در ادبیات علمی مربوطه وجود دارد به‌صورت سیستماتیک ۲۷ چارچوب به‌کار گرفته شده در تحلیل‌های علمی مربوط به تأثیرات اجتماعی سدها (از بین ۲۱۷ مقاله مورد بررسی) جمع‌آوری و تحلیل کردند. یافته کلیدی این تحقیق بیانگر آن است که چارچوب‌های متداول مورد استفاده منحصراً به مطالعه تأثیرات اجتماعی سدها نپرداخته‌اند و در نتیجه تأثیرات کلیدی مرتبط با سدها مورد توجه قرار نگرفته است. نتیجه تحقیق همچنین ارائه چارچوبی نوین برای تحلیل علمی مخصوص به تأثیرات اجتماعی مرتبط با فضا، زمان، زیرساخت‌ها، اجتماع و امرار معاش در رابطه با سدها است که "چارچوب ماتریس" نامیده شده است. بنا به نظر مولفین این مقاله با ساخت این چارچوب علمی درباره موضوع پژوهشگران قادر خواهند بود موضوع تأثیرات اجتماعی سدها را مفهوم‌سازی کنند و این موضوع چند بعدی را در قالبی کل‌گرا ارزیابی نمایند.

Fung و همکاران (۲۰۱۹) در مقاله‌ای با عنوان "ترسیم اثرات اجتماعی سدهای کوچک: مطالعه موردی حوزه رودخانه Ing تایلند" تأثیرات اجتماعی چندین سد کوچک را در یک روستای بالادست و یک روستای پایین‌دست در حوضه رودخانه اینگ تایلند بررسی کردند. این تحقیق، براساس مصاحبه‌های نیمه ساختار یافته با ذی‌نفعان، دولت و سازمان‌های غیردولتی انجام شده است. نتایج نشان داد تأثیرات اجتماعی سدهای کوچک چند وجهی و در عین حال نابرابر است. یافته‌های این تحقیق حاکی‌ازاین است که سدها باعث از میان رفتن وفور ماهی و کاهش تخریب سیل می‌شود. علاوه‌براین، سدها امکان دسترسی به آب آبیاری را برای کشاورزان بالادست، که آب خود را از طریق سدها با هزینه آنهایی که در پایین‌دست هستند، افزایش داده‌اند و به همین دلیل سدهای کوچک به نوعی موجب ظهور پدیده تعارض تخصیص آب گشته‌اند. Bhatti و همکاران (۲۰۱۹) در مقاله‌ای با عنوان "ارزیابی تأثیر اجتماعی-اقتصادی سدهای کوچک براساس آزمون تی زوجی با

استفاده از نرم افزار SPSS" تأثیرات سدهای کوچک بر جوامع محلی در منطقه Sindh و Nagarparkar پاکستان را بررسی کردند. نتایج حاصل از این بررسی نشان داد تغییرات مثبتی در منطقه مورد مطالعه پس از ساخت سد رخ داده است به طوری که پس از ساخت سد تعداد خانه سازی ها و عمق آب افزایش یافته است و فاصله جمع آوری آب و زمان آب گیری به ترتیب ۶ و ۵/۶۱ درصد کاهش یافته است. به طور کلی سطح متوسط زیر کشت محصولات نیز ۲۶/۵ درصد افزایش داشته است و متعاقباً عملکرد متوسط تقریباً هر محصول در هر دو فصل بهار و تابستان در مناطق اطراف سدها ۵۵ درصد افزایش یافته است. تعداد کل دام ها ۱۸/۰۸٪ افزایش یافته، در حالی که تعداد اسب ها ۱/۵٪ پس از ساخت سد کاهش یافته است. درآمد، هزینه و پس انداز به طور قابل توجهی به ترتیب ۳۶/۱۶٪، ۱۷/۶۸٪ و ۳۲/۱۵٪ افزایش یافته است، در حالی که میزان مهاجرت از زمان ساخت سد ۱۹،۰۹٪ کاهش یافته است. همچنین انتخاب محصولات از محصولات فرودست به محصولات برتر و بازار محور تغییر یافته است. نهایتاً سطح آب و کیفیت بهبود یافته و چاه ها دوباره شارژ شده اند.

- مطالعات داخلی

رحمتی و نظریان (۱۳۸۹) در مقاله ای با عنوان "آثار اقتصادی- اجتماعی و محیط زیستی سکونتگاه های مشمول جابه جایی ناشی از ایجاد سدها: مطالعه موردی سد گتوند علیا، بر روی رودخانه کارون به "بررسی تبعات اقتصادی و اجتماعی و محیط زیستی سکونتگاه های پشت مخزن سد گتوند" پرداخته اند. در این تحقیق برای تعیین راهبردهای اسکان مجدد با استفاده از مدل SWOT تمایلات و گرایش های کمی و کیفی افراد و خانوارهای ساکن بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشانگر این امر بود که احداث سد گتوند به علت قرار گرفتن برخی از روستاها و زمین های کشاورزی در پشت مخزن سد، آثار اقتصادی و اجتماعی منفی فراوانی در پی دارد و این تبعات برای جوامع روستایی که به دلیل شرایط خاص جغرافیایی، اجتماعی و اقتصادی و فرهنگی کاملاً وابسته به محیط جغرافیایی هستند، دو چندان است.

ملک حسینی و میرک زاده (۱۳۹۲) در تحقیقی با عنوان "ارزیابی تأثیرات اجتماعی سد سلیمان شاه سنقر بر روستاهای تحت پوشش شبکه آبیاری و زهکشی سد" با استفاده از روش تحقیق کمی و کیفی و با بهره گیری از ابزار پرسشنامه، مصاحبه، مشاهده و بازدید میدانی به بررسی آثار اجتماعی سد سلیمان شاه سنقر بر منطقه تحت پوشش شبکه آبیاری و زهکشی سد پرداختند. حجم نمونه در این تحقیق شامل ۳۰۰ نفر از روستاییان سرپرست خانوار روستاهای پایین دست سد بودند که با استفاده از جدول مورگان به صورت احتمالی انتخاب شدند. نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان داد آثار مثبت و منفی سد سلیمان شاه را می توان در ۱۰ دسته کلی دسته بندی کرد که شامل: ۱- افزایش امید به زندگی، ۲- بهبود

امنیت منطقه، ۳- توسعه توریسم، ۴- افزایش ماندگاری در روستا، ۵- افزایش اشتغال، ۶- کاهش فقر ۷- وحدت و انسجام اجتماعی، ۸- تقویت سرمایه اجتماعی، ۹- توسعه ناموزون و ۱۰- نقض حقوق اساسی مردم هستند. همچنین نتایج نشان داد روستاهای جوب کبود علیا و قروه در برخورداری از شاخص های اجتماعی به ترتیب رتبه اول و آخر را به خود اختصاص داده اند.

کرامت زاده و همکاران (۱۳۹۲) در تحقیقی با عنوان "تحلیل تأثیرات اقتصادی و اجتماعی ایجاد و توسعه بازار آب در بخش کشاورزی: مطالعه موردی اراضی پایین دست سد شیرین دره بجنورد" بازار آب و تحلیل تأثیرات اقتصادی و اجتماعی ناشی از آن در مناطق مختلف اراضی پایاب سد شیرین دره استان خراسان شمالی را بررسی کردند. در این تحقیق ابتدا با استفاده از روش های برنامه ریزی اثباتی به برآورد توابع تقاضای آب، شبیه سازی بازار آب و تعیین قیمت تعادلی آب در شرایط مختلف خشکسالی و نرمال پرداخته شده است و سپس تأثیرات اقتصادی و اجتماعی ناشی از اعمال قیمت تعادلی آب در منطقه مورد مطالعه بررسی شده است. نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان داد ایجاد بازار آب رفاه کل منطقه را به میزان ۲۶۴۰ و ۱۱۸۲ میلیون ریال، مجموع سود حاصل از کشت محصولات را به میزان ۱۲ و ۲۳ درصد و اشتغال ناشی از تغییر الگوی کشت را نیز به میزان ۶۲ و ۳۲ درصد در شرایط نرمال و خشکسالی افزایش خواهد داد. لازم به ذکر است داده های مورد تجزیه و تحلیل این مطالعه از اطلاعات سال زارعی ۱۳۸۶-۸۷ و با تکمیل ۱۸۷ پرسشنامه و با استفاده از بسته نرم افزاری GAMS استخراج شده است.

احمدی اوندی و همکاران (۱۳۹۳) در مقاله ای با عنوان "ارزیابی پیامدهای اجتماعی و فرهنگی پروژه احداث سد کارون ۳" با استفاده از روش کیفی پیامدهای اجتماعی و فرهنگی پروژه احداث سد کارون ۳ را ارزیابی کردند. یافته های این تحقیق حاکی از آن است تأثیرات منفی سد کارون ۳ در ۳ دسته قرار گرفته اند که شامل: ۱- خانواده های نقل مکان شده از محل خود، ۲- جوامع میزبان و پذیرنده و ۳- جوامع ساکن در حاشیه رودخانه کارون می شوند. براساس یافته های این تحقیق مهمترین پیامد احداث سد کارون ۳ ویرانی نظام تولید سنتی و مهاجرت روستاییان به سوی شهرها بوده است که این امر خود، منجر به از دست دادن هویت، از بین رفتن همبستگی و روابط خویشاوندی، افزایش فردگرایی و انزوا، حاشیه نشینی و بزهکاری و در نهایت فقر و بیکاری بوده است. از سوی دیگر، با احداث سد کارون ۳ و با توجه به جابه جایی و تجمع صورت گرفته می توان به بروز مسائلی از قبیل برهم خوردن نظام گذشته، کمزنگ شدن آداب و رسوم خاص محلی به دلیل ورود افراد از سایر روستاها و تجمع ساکنان روستاهای مختلف در یک مکان، از بین رفتن راه های ارتباطی و کاهش سرمایه اجتماعی را برای روستاییان حاشیه سد برشمرد.

ملک حسینی و میرکزاده (۱۳۹۳) در پژوهشی با عنوان "تحلیل اثرات اجتماعی- اقتصادی سدسازی بر توسعه روستایی: مطالعه موردی سد سلیمانشاه" تحلیل اثرات اجتماعی- اقتصادی سد سلیمانشاه بر توسعه روستایی منطقه تحت پوشش شبکه آبیاری و زهکشی سد را انجام دادند. جامعه آماری تحقیق شامل روستایان سرپرست خانوار روستاهای تحت تأثیر سد (N=۱۲۷۳) می باشد که ۲۹۱ نفر از آنها براساس جدول مورگان و با بهره گیری از روش نمونه گیری به صورت طبقه ای با انتساب متناسب انتخاب شدند. روش های تحلیل داده در این تحقیق شامل تکنیک شاخص های ترکیبی و مدل موریس بودند. نتایج به دست آمده نشانگر این مطلب است که مهمترین اثرات مثبت سد سلیمانشاه بر منطقه شامل افزایش درآمد فعالیت های کشاورزی، توسعه راه ها و ارتباطات روستایی (سهولت رفت و آمد)، افزایش ارزش زمین های کشاورزی، سر سبزی و آبادانی روستا و اثرات منفی سد نیز شامل از دست دادن تعلقات اجتماعی- فرهنگی (مساجد، به زیر آب رفتن قبور نیاکان، به هم خوردن محدوده عرفی اراضی و ...) از دست دادن درختان و باغات میوه چند ساله بارده و تصرف زمین اهالی با قیمت کم هستند. براساس نتایج از میان ۱۲ روستا تحت پوشش سد سلیمانشاه دو روستای سلیمانشاه و جوب کبود علیا در حال توسعه و بقیه روستاها در سطح کمتر توسعه یافته بودند و دو روستای قروه و غیاث آباد کمترین بهره را از مواهب احداث سد داشته اند.

طاهری صفار و همکاران (۱۳۹۴) در مقاله ای با عنوان "ارزیابی اثرات اقتصادی، اجتماعی و محیط زیستی احداث سد بار نیشابور" به بررسی اثرات ناشی از طرح توسعه ای احداث سد نیشابور پرداخته اند. در این تحقیق سعی شده با استفاده از ماتریس لئوپولد اثرات اجرا و عدم اجرای طرح توسعه ای احداث سد مورد سنجش قرار گیرد. نتایج این تحقیق حاکی از آن است که با بررسی ماتریس ارزیابی اثرات پروژه مورد مطالعه بر محیط زیست، گزینه عدم اجرای پروژه در مجموع ۴۸ امتیاز منفی را کسب کرده است و درحالی که گزینه اجرای پروژه با انجام اقدام اصلاحی در طرح احداث و بهره برداری از سد مخزنی بار و سازه های وابسته به آن با کسب ۱۵۱ امتیاز مثبت، گزینه برتر و نهایی معرفی شد.

زنگی دارستانی و عباس نژاد (۱۳۹۵) در مقاله ای با عنوان "ارزیابی اثرات محیط زیستی سد صفارود رابر بر مناطق پایین دست" برای ارزیابی اثرات محیط زیستی سد صفارود بر شهرستان جیرفت از روش چک لیست استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که احداث سد صفارود باعث ایجاد اثرات منفی بر مناطق پایین دست، شهرستان جیرفت و تالاب جازموریان شده است و در مجموع اثرات منفی احداث سد بر مناطق پایین دست در محیط های فیزیکی- شیمیایی، بیولوژیکی، اقتصادی و اجتماعی بیش از اثرات مثبت بوده که با ارائه راهکارهای مناسب از جمله تنظیم جریان رودخانه و کشت محصولات دیمی می توان اثرات سوء احداث سد را کاهش داد.

خاتون آبادی و همکاران (۱۳۹۸) در مقاله ای با عنوان "بررسی اثرات اقتصادی، اجتماعی و محیط زیستی احداث سد شاه قاسم یاسوج از دیدگاه روستایان بهره بردار" اثرات ناشی از سدسازی از دیدگاه روستایان بهره بردار از آب سد شاه قاسم در یاسوج را بررسی کردند. روش تحقیق توصیفی- پیمایشی و جامعه آماری متشکل از روستایان چهار روستا در دهستان سررود جنوبی بوده است. حجم نمونه از فرمول کوکران، ۱۹۲ نفر تعیین و با استفاده از روش تخصیص متناسب سهم هر روستا از حجم نمونه مشخص شد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد بیشترین تأثیرات سد در بخش اقتصادی و کمترین تأثیرات در بخش محیط زیستی بوده است. همچنین نتایج نشان داد از دیدگاه روستایان ساخت سد بر بهبود درآمد روستایان، افزایش سطح زیر کشت منطقه، بهبود وضعیت اشتغال، تنوع در محصولات کشاورزی، افزایش تولیدات در منطقه و بهبود وضعیت توریستی منطقه اثرگذار است. علاوه بر این روستایان بر نادیده گرفتن نقش مشارکتی مردم در احداث سد و عدم تغییر گونه های گیاهی نیز تأکید دارند. بررسی دلیل این موضوع نشان از آن دارد که روستایان به موضوعاتی همچون تفکر غلط فراوانی آب و اثرات کوتاه مدت احداث سد بیشتر توجه می کنند؛ درحالی که سدها در بلندمدت، اثرات منفی بسیاری دارند.

بررسی مطالعات انجام شده در رابطه با موضوع تحقیق نشان دهنده این امر است که غالب این مطالعات در بررسی تأثیرات احداث طرح های توسعه ای مانند احداث سد، هم زمان ابعاد محیط زیستی ، اقتصادی و اجتماعی را مد نظر قرار داده اند که خود این امر نشان دهنده این است که این مطالعات دقت زیادی ندارد؛ چون هر یک از ابعاد یاد شده حوزه ای تخصصی است که زیر شاخه های خاص خود را دارد و در نتیجه توجه به یک بعد می تواند نتایج دقیقتری را به دنبال داشته باشد. از جنبه روش شناسی نیز می توان اینگونه بیان کرد که بیشتر پژوهش های بررسی شده از روش پژوهش کمی استفاده کرده اند و در این نوع از مطالعات ذهنیت مولفین مقدم بر ذهنیت ذی نفعان محلی تحت تأثیر طرح توسعه ای است و در واقع در مطالعاتی مانند رویکرد در احداث سد، نوعی رویکرد بالا به پایین حاکم است. مطالعاتی که به صورت تخصصی ابعاد مختلف تأثیرات این کنش های بالا به پایین را بسنجند به همین جهت جای خالی تحقیقاتی که رویکرد پایین به بالا و کیفی داشته باشند احساس می شود.

ملاحظات نظری

منطق روش کیفی ایجاب می کند محقق بدون استفاده از نظریه و فرضیه های از پیش تعیین شده وارد میدان تحقیق شود. باوجوداین، پژوهشگران کیفی به گونه ای متفاوت از پژوهشگران اثبات گرا و کمی گرا از نظریه ها و ادبیات فنی پیرامون موضوع تحقیق استفاده

می‌کنند. استراوس و کوربین (۱۳۹۱) بیان کردند استفاده از مفاهیم موجود در ادبیات فنی می‌تواند منبع انجام مقایسه داده‌ها شود. همچنین، آشنایی با نوشته‌های مرتبط می‌تواند حساسیت محقق به ظرایف پنهان داده‌ها را تقویت کند. بنابراین، در این بخش نظریه‌های مرتبط با موضوع مورد تحقیق به اجمال مرور شده‌اند. روش اجرای این پژوهش مبتنی بر «ارزیابی تأثیر اجتماعی» (اتا) است. این روش کاربردی، در علوم اجتماعی از ابتدای دهه ۱۹۷۰ و در پی بروز عوارض منفی ناشی از اقدامات توسعه‌ای مطرح شد و بیشتر معطوف به دغدغه‌هایی از قبیل مشارکت محور بودن و اجتماع محور بودن اقدامات توسعه‌ای و در نتیجه توسعه پایدار است. هم‌زمان با آنکه بسترهای اجتماعی-فرهنگی مد نظر برنامه‌ریزان توسعه قرار گرفتند، نظرات و عقاید اجتماعات محلی نیز واجد اهمیت انگاشته شد (محمدی و دانشمهر، ۱۳۹۳). در واقع ارزیابی تأثیرات اقدامات توسعه‌ای بخشی از سیاست جهانی توسعه در کشورهای پیشرفته است تا با جهت‌گیری اجتماعی و فرهنگی به مداخلات فنی و مهندسی شده بعد انسانی ببخشند؛ مداخلاتی که از دیرباز در سیاست‌ها و الگوهای توسعه‌ای کشورها توسط دولت‌ها، از بالا به پایین، مهندسی شده و ابزاری بوده است. در واقع مطالعات ارزیابی تأثیر اجتماعی و فرهنگی دلالت بر یک نوع بینش جامعه‌شناختی است که با اتخاذ رویکرد انتقادی از منافع گروه‌های حاشیه‌ای، آسیب‌پذیر و خاموش جامعه دفاع می‌کند (فاضلی، ۱۳۸۹). از نظر Frank Vanclay ارزیابی تأثیر اجتماعی فرآیند تحلیل، شامل نظارت و مدیریت پیامدهای خواسته و ناخواسته اجتماعی رخدادهای برنامه‌ریزی شده (سیاست‌ها، برنامه‌ها، طرح‌ها و پروژه‌ها) و همچنین پیامدهای خواسته و ناخواسته هر فرآیند تغییر اجتماعی می‌شود. ریل بارچ نیز ارزیابی تأثیر اجتماعی را عبارت از تحلیل منظم و پیش‌بینی پیامدهای محتمل یک طرح، برنامه یا سیاست پیشنهادی در زندگی افراد و اجتماعات می‌داند (فاضلی و پاک سرشت، ۱۳۸۸). کمیته بین‌سازمانی راهبردها و اصول ارزیابی پیامدهای اجتماعی «اتا» را به معنی تلاش برای ارزیابی کردن تأثیرات اجتماعی احتمالی ناشی از اقدامات و سیاست‌های خاص و اجرای برنامه‌های دولتی مشخص از جمله اختصاص دادن زمین‌های زیاد به پروژه‌های استحصال منابع طبیعی تعریف کرده است (ملک حسینی و میرک زاده، ۱۳۹۳). Lynch و Western (۱۳۹۳) بیان کردند ارزیابی تأثیر اجتماعی، ارزیابی پیامدهای سیاست‌های مختلف است. آنان هر فرآیند سیاست‌گذاری را شامل چهار مرحله می‌دانند که شامل: ۱- صورت‌بندی سیاست‌های مختلف و جایگزین یکدیگر، ۲- انتخاب سیاستی برای اجرا، ۳- اجرای سیاست انتخاب شده و ۴- ارزیابی و اصلاح. همچنین آنها بیان کردند تحلیل تأثیر اجتماعی، ابزاری برای مرحله دوم است، هر چند در مرحله چهارم نیز از آن استفاده می‌شود (ملک حسینی و میرک زاده، ۱۳۹۳). Vanclay و Becker مزایای بالقوه اجرای ارزیابی تأثیر اجتماعی

برای سازمان‌ها را این چنین برمی‌شمارند: تصمیم‌گیری بهتر برای انتخاب محل اجرای پروژه، مدیریت آن محل و مدیریت بهتر اختلاف‌ها با نیروی کار، دستیابی به شناخت بیشتر نسبت به پیامدهای محیط‌زیستی و اجتماعی احتمالی، مدیریت بهتر مخاطرات، پیدا کردن روش‌های خلاقه برای کاستن از پیامدهای منفی و پیدا کردن راه‌هایی برای به حداکثر رساندن ارزش پروژه‌ها برای اجتماعات محلی و سازمان‌های مجری پروژه (ابراهیم‌پور و مصطفوی، ۱۳۸۷). در واقع هدف از ارزیابی پیامدهای اجتماعی، کسب اطمینان از این امر است که پروژه‌های توسعه بیشترین منافع و کمترین هزینه‌ها (به ویژه هزینه‌هایی که بر اجتماع محلی تحمیل می‌شوند) را در بر داشته باشد. ملک حسینی و میرک زاده (۱۳۹۳) در زمینه ابعاد تحت بررسی ارزیابی تأثیرات اجتماعی نیز عموماً به ابعاد ۱- تغییرات جمعیتی، ۲- تغییرات در اشتغال، ۳- جابه‌جایی مکانی، ۴- برهم خوردن ساختار محل‌های مکان زندگی مردم، ۵- تأثیرات سر و صدا، ۶- تأثیرات زیبا شناختی، ۷- تغییرات در دسترسی مردم به امکانات، ۸- تأثیرات بر تسهیلات فراغت و تفریح، ۹- بهداشت و ایمنی، ۱۰- بررسی واکنش‌های مردم، ۱۱- تأثیرات بر اجتماع محلی و ۱۲- تغییرات در کاربری زمین (ملک حسینی و میرک زاده، ۱۳۹۳) اشاره کرده‌اند. در تحقیق حاضر باتوجه به ماهیت روش تحقیق به کار گرفته شده در پژوهش به بررسی تأثیرات اجتماعی ساخت سد حسنلو از ذهنیت خود مردم محلی متأثر از احداث سد پرداخته شده است.

روش تحقیق

پیش از پرداختن به روش تحقیق در این پژوهش لازم به ذکر است سد حسنلو در استان آذربایجان غربی و شمال شهر نقده در حد فاصل رودخانه گدار و دریاچه ارومیه قرار دارد. ساخت این سد به‌صورت خارج از بستر رودخانه سال ۱۳۷۵ آغاز و سال ۱۳۷۹ به بهره‌برداری رسید. حجم مخزن و حجم تنظیمی آن به ترتیب ۹۹ و ۹۳ میلیون متر مکعب است. آبگیری سد حسنلو از طریق انحراف آب در بند انحرافی نقده روی رودخانه گدار و انتقال آب توسط کانال تغذیه کننده به ظرفیت ۱۵ متر مکعب بر ثانیه انجام می‌پذیرد. این بند در شرق شهر نقده بر روی رودخانه گدارچای و به‌منظور انحراف آب رودخانه جهت آبگیری مخزن سد حسنلو و همچنین تأمین آب به هنگام اراضی شبکه ثقلی ساحل چپ رودخانه گدار در ماه‌های پرآبی رودخانه احداث شده است.

در رابطه با ستاد احیای دریاچه ارومیه نیز لازم به توضیح است که با قرارگیری دریاچه ارومیه در آستانه بحران محیط‌زیستی در مقیاس بین‌المللی در سال‌های منتهی به سال ۱۳۹۲ هیأت وزیران را بر آن داشت که در اولین جلسه خود در دولت یازدهم تشکیل کارگروه نجات دریاچه ارومیه را به تصویب رسانند و به‌منظور

جدول ۱- لیست مشارکت کنندگان

ردیف	شغل	محل سکونت
۱	کشاورز	روستای کهریزه عجم
۲	کشاورز	روستای حسنلو
۳	کشاورز	روستای نظام آباد
۴	کشاورز	روستای حسنلو
۵	کشاورز	روستای حسنلو
۶	کشاورز	روستای قره قصاب
۷	کشاورز	روستای تلخاب
۸	کشاورز	روستای حسنلو
۹	کشاورز	روستای درگه سنگی
۱۰	کشاورز	روستای درگه سنگی
۱۱	کشاورز	روستای درگه ارسخان
۱۲	کشاورز	روستای درگه لطف اله
۱۳	کشاورز و دهیار روستا	روستای درگه لطف اله
۱۴	کشاورز	روستای گرده قیط
۱۵	کشاورز	روستای یادگارلو
۱۶	کشاورز	روستای یادگارلو
۱۷	کشاورز	روستای یادگارلو
۱۸	کشاورز	روستای درگه سنگی
۱۹	کشاورز و دهیار روستا	روستای حسنلو
۲۰	مصاحبه گروهی با جمعی از کشاورزان	روستای ممیند
۲۱	مصاحبه گروهی با جمعی از کشاورزان	سه راه محمد بار
۲۲	کشاورز و دهیار	بارانی کرد
۲۳	مصاحبه گروهی با مطلعین محلی	مسجد روستای حسنلو
۲۴	کشاورز و دهیار روستا	روستای دورگه ارسخان
۲۵	کشاورز و دهیار روستا	روستای بارانی عجم

یافته‌های تحقیق

در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار MAX QDA پس از کدگذاری باز، مصاحبه ۷۱۳ کد باز از کل مصاحبه‌ها استخراج شده که پس از کدگذاری محوری در ۵ مقوله محوری و یک کد هسته دسته‌بندی شدند. در فرآیند کدگذاری باز تلاش شده تمامی گزاره‌های مهم مرتبط با موضوع که توسط مشارکت کنندگان بیان شده استخراج شوند و در بخش کدگذاری محوری تلاش شده جامع و مانع دسته‌بندی شوند و در مورد کد هسته نیز تلاش شده مفهومی انتخاب شود که مانند چتر تمامی موضوعات محوری را پوشش دهد. در ادامه بحث هر یک از کدهای محوری ذکر شده و با استناد به گزاره‌های مشارکت کنندگان تفسیر و توضیح داده شده است. شرح مفاهیم و کدهای مستخرج از مصاحبه با مشارکت کنندگان در جدول (۲) آورده شده است.

تمرکز و تسریع در روند اقدامات مرتبط با احیای دریاچه ارومیه، پیشنهاد تشکیل «کارگروه ملی نجات دریاچه ارومیه» در جلسه مورخ ۱۳۹۲/۱۱/۰۲ هیأت وزیران مطرح و به موجب اختیارات اصل ۱۳۸ قانون اساسی، رئیس و دبیر کارگروه منصوب شدند و ۷ وزیر، ۲ معاون رئیس‌جمهور و ۳ استاندار حوضه آبریز نیز به‌عنوان اعضای این کارگروه معرفی شدند. پس از این تاریخ، ستاد احیای دریاچه ارومیه به‌عنوان رکن دبیرخانه‌ای کارگروه، نسبت به جمع‌آوری سریع همه مطالعات صورت گرفته در کشور و ارزیابی توان متخصصین داخلی و بین‌المللی در ارتباط با چالش‌های احیای دریاچه ارومیه اقدام نمودند و راه‌کارهای مواجهه با این مسأله پیچیده و روش‌شناسی آن‌ها را تدوین کردند.

در رابطه با روش تحقیق این پژوهش لازم به ذکر است متناسب با اهداف و همچنین مسئله‌ای که پژوهش حاضر درصدد یافتن پاسخ برای آن است، روش شناختی حاکم بر این تحقیق نیز از نوع روش تحقیق کیفی است. هدف تحقیق کیفی دستیابی به فهمی از ماهیت و شکل پدیده مورد مطالعه جهت بازگشایی معنا، توصیف عمیق، تولید ایده‌ها، مفاهیم و عناصر متشکل از آن، رویدادها و فرآیندها است که در نهایت به فهم پدیده کمک نماید. در این نوع از رویکرد روش‌شناسی، پژوهشگر قصد دارد پدیده یا رویداد مورد مطالعه را از درون بشناسد و بر این فرض استوار است که در گفتگوها و گفتمان‌ها، پدیده‌ها به شکل تعامل به‌وجود می‌آیند و به این ترتیب واقعیت برساخته می‌شود. همچنین در این فرآیند تفهم ساختارهای پنهان معنا و قواعد برساخت اجتماعی واقعیت، نقش ویژه‌ای دارند (فیلیک، ۱۳۹۱). بر همین مبنا در این تحقیق قصد بر آن است که تفاسیر و معانی ذهنی مردم محلی در رابطه با ساخت سد حسنلو و اثرات آن بر زندگی مردم و همچنین پیامدهای آن بر دریاچه ارومیه کشف شود. در این پژوهش، به وسیله مصاحبه با اعضای شوراهای محلی و اهالی روستاهای منطقه حسنلو داده‌ها گردآوری شد و در مجموع ۲۵ مصاحبه انجام شد که ۴ مصاحبه به‌صورت گروهی بود و برای انتخاب نمونه‌ها از روش نمونه‌گیری هدفمند استفاده شد. به‌منظور اطمینان از اعتبار تحقیق تلاش شده است که مشارکت کنندگان با تنوع و کثرت (جنسیت و سنین، شغل‌های گوناگون و ... در جهت غنی کردن اطلاعات از موضوع تحقیق) تجربه‌های گوناگون انتخاب شوند که به این وسیله ابعاد گوناگون مسئله تحقیق بر حسب تجربه زیسته متفاوت مشارکت کنندگان روشن شود. علاوه‌براین از مصاحبه نیمه ساختاریافته برای جمع‌آوری داده‌ها بهره گرفته شد و حتی بعد از اشیاع نظری تعداد بیشتری مصاحبه صورت گرفت که شاید جنبه‌ای نو از مسئله تحقیق آشکار شود که این امر نیز (یعنی انتخاب روش مناسب گردآوری داده‌ها و تعداد و میزان داده‌ها) از معیارهای اطمینان از اعتبار تحقیق هستند. در جدول (۱) لیست مشارکت کنندگان در این پژوهش آورده شده است.

جدول ۲- مفاهیم و کدهای مستخرج از مصاحبه با مشارکت کنندگان

کدهای اصلی	مفاهیم	کد هسته
عدم رضایت از خرید محصولات کشاورزی	پرداخت با تأخیر پول محصولات کشاورزی، نسبه فروختن محصولات کشاورزی، نقد نشدن محصولات، قیمت پایین محصولات کشاورزی، به صرفه نبودن کشت گندم و محصولات کم آب‌بر، هدر رفتن زحمات کشاورزان، بی‌اعتمادی نسبت به وعده‌های مسئولان در پرداخت پول محصولات کشاورزی، پرداخت نشدن پول محصولات توسط کارخانه‌ها، بالا بردن قیمت گندم	
بی‌اعتمادی به مسئولان و ضعف مدیریت	ضعف مدیریت مسئولان محلی، تعدد سدهای احداث شده، عدم مدیریت بر بازار، درخواست حمایت از طرف دولت، قطع کردن سهمیه آب توسط مسئولین، مقصر دانستن مسئولان در خشک شدن دریاچه، درخواست تضمین از طرف مسئولین، پارتی بازی در ادارات، پاسخگو نبودن مسئولان، درخواست ساماندهی چاه‌های منطقه، درخواست باز کردن آب رودخانه، عدم نظارت در سهمیه‌بندی،	توسعه
بی‌تفاوتی نسبت به احیای دریاچه ارومیه	بی‌ارتباط دانستن احداث سد با خشکی دریاچه، خشکسالی را علت خشک شدن دریاچه دانستن، بی‌اهمیت بودن دریاچه در ذهن مردم محلی در نسبت به معیشت زندگی، رونق گرفتن کشاورزی بعد از احداث سد، اجتناب ناپذیر بودن خشکی دریاچه، قطع امید از احیای دریاچه، اهمیت زندگی مردم در نسبت با احیای دریاچه	افسار گسیخته کشاورزی
محرومیت نسبی نسبت به وضعیت درآمدی	صادر نشدن مجوز چاه، نگرانی درباره تأمین معاش، کاشت محصولات با درآمد بیشتر، بالا بردن قیمت محصولات کم آب‌بر، مکانیزه کردن زمین‌های کشاورزی، دغدغه درآمد بیشتر، مقایسه با همسایه با درآمد بیشتر، بهره‌کشی بیشتر از زمین‌ها، تبدیل مراتع به زمین کشاورزی	
احساس محرومیت نسبت به بهره‌مندی از آب سد	درخواست پمپ کردن آب سد توسط دولت، قطره‌ای و بارانی کردن زمین‌های کشاورزی، از دست دادن حق آب، حفر چاه برای جبران کم‌آبی، وابستگی زندگی مردم به کشاورزی، کمبود آب برای زمین‌های پایین‌دست، مقایسه خود با مناطق برخوردار از آب، درخواست استفاده از آب سد، سهمیه‌بندی نامناسب آب سد، قطع کردن آب پایین‌دست، برخورداری بیشتر زمین‌های بالادست از آب سد	

• بی‌تفاوتی نسبت به احیای دریاچه

تحلیل مصاحبه‌های انجام شده با مشارکت کنندگان در تحقیق حاکی از این است که مردم منطقه حسنلو که غالباً به شغل کشاورزی مشغول هستند نسبت به احیای دریاچه ارومیه بی‌تفاوت هستند. این بی‌تفاوتی گاهی به تخاصم با احیای دریاچه نیز تبدیل می‌شود. تخاصم به این معنا که بعد از احداث سد حسنلو و آبی شدن زمین‌های دیم و تبدیل آبیاری سنتی به آبیاری مکانیزه در بالادست، صاحبان این زمین‌ها منفعت مالی قابل توجهی از احداث سد به‌دست آورده‌اند و زمانی که دریاچه با خشکی مواجه شده و بنا به تصمیمات ستاد احیای دریاچه ارومیه از میزان آب تخصیص یافته به زمین‌های کشاورزی برای رها سازی آب سد به دریاچه کاسته شد، اهالی نسبت به دریاچه و احیای آن موضع‌گیری خصمانه‌ای دارند؛ چرا که احیای دریاچه را در تضاد با منافع مالی خود می‌دانند به‌طوری که یکی از مشارکت‌کنندگان بیان می‌کند که:

”سد حسنلو برای کل دشت سولدوز کافی است و حتی

اضافی هم خواهد بود. آیا انسان مهمتر است یا دریاچه؟!

وقتی ما از گرسنگی از بین رفتیم و زمین‌های ما خشک شد

دیگر احیای دریاچه چه دردی را درمان خواهد کرد؟!

در موارد دیگر هم از وابسته بودن زندگی کشاورزان و مردم منطقه به سد و کشاورزی به‌دست آمده از آن اشاره می‌کنند و عنوان می‌کنند احداث سد باعث رونق کسب و کار در منطقه شده است و اگر کشاورزی در منطقه از بین برود مردم مجبور خواهند بود که

شهرهای مجاور برای دستفروشی و شغل‌های کاذب مهاجرت کنند: به‌طوری که یکی از مشارکت‌کنندگان بیان می‌کند که:

”روی هر رودخانه ۱۰ عدد سد احداث کرده‌اند.

حداقل ۲ سد احداث می‌کردند“

زمانی که از احیای دریاچه ارومیه با اهالی منطقه حسنلو صحبت می‌شود غالباً اینگونه بیان می‌کنند که ساخت سد حسنلو هیچ تأثیر بر خشکی دریاچه ارومیه نداشته و دریاچه ارومیه از زمان‌های گذشته که خشکسالی اتفاق افتاده شروع به خشک شدن کرده است: به‌طوری که یکی از مشارکت‌کنندگان بیان می‌کند که:

”در کل سیستم آب‌وهوا عوض شده است؛ تغییرات

آب‌وهوایی صورت پذیرفته است و اکنون دیگر برف نمی‌بارد

و همین باعث خشک شدن دریاچه شده است“

در وضعیت دیگر نیز برخی از اهالی برای به حداقل رساندن تأثیر احداث سد حسنلو بر خشکی دریاچه ارومیه اینگونه عنوان می‌کنند که این سد به تنهایی تأثیر ناچیزی بر کاهش آب دریاچه داشته است و تعدد سدهای احداث شده در بالادست مسبب خشکی دریاچه است. درحالی که وقتی از ارائه راهکار برای افزایش سطح آب دریاچه و احیای آن از مردم منتفع از احداث سد سوال می‌شود متفق القول بیان می‌کنند که دریاچه را باید از خدا خواست و برخی دیگر به صراحت از مرگ دریاچه سخن گفته‌اند.

آنگونه که از گفته‌های مشارکت‌کنندگان تحقیق بر می‌آید احداث سد حسنلو برای کشاورزان بالادست صورت عام و برای افرادی که

زمین‌های دیم آنها به آبی تبدیل شده به صورت خاص دارای منفعت مالی مناسبی بوده و بر این اساس در دوگانه احیای دریاچه و کسب سود بیشتر از زمین‌های خود، به گزاره دوم گرایش دارند و سرنوشت دریاچه ارومیه در این وضعیت برای آنها اهمیت چندانی ندارند و در ذهن کشاورزان کسب درآمد بیشتر، از طریق زمین‌های کشاورزی‌شان اهمیت بیشتری دارد. در واقع ساکنین محلی از احیای دریاچه قطع امید کرده‌اند به طوری که برخی اینگونه عنوان می‌کنند که:

“اگر مرده زنده شود دریاچه هم احیا می‌شود”

و یا در جهت بهره‌برداری بیشتر خود از آب سد حسنلو توسعه کشاورزی را زمینه‌ساز احیای دریاچه مطرح می‌کنند.

“ده زنده شود دریاچه هم احیا می‌شود”

به طور کلی می‌توان اینگونه بیان کرد که سد حسنلو برای افزایش درآمد ساکنان محلی به خصوص کشاورزان بالادست بسیار مفید بوده و از این جهت و از ترس کاهش یا قطع شدن سهمیه آب کشاورزی‌شان توسط ستاد احیای دریاچه ارومیه اینگونه عنوان می‌کنند که احداث سد حسنلو تأثیر چندانی در تشدید روند خشکی دریاچه ارومیه ندارد و روند خشکی دریاچه قبل از احداث سد حسنلو شروع شده و سدسازی‌های متعدد تنها باعث تشدید این روند شده است. نکته جالب اینکه راهکارهایی هم که برای احیای دریاچه ارومیه از سوی اهالی منطقه مطرح می‌شود هیچکدام ربطی به سد حسنلو ندارد و به امور خارج از منطقه و سیستم آبیاری منشعب از سد بر می‌گردد؛ به عنوان مثال مشارکت کنندگان برای احیای دریاچه به راهکارهایی مانند “انتقال آب دریای خزر، انتقال آب رودخانه زاب، رحمت خداوند در نزول باران و برف و ...” اشاره می‌کنند که خود بیانگر اهمیت حفظ سد حسنلو برای کسب درآمد و بهره‌برداری بیشتر از زمین‌های کشاورزی‌شان است.

• بی‌اعتمادی به مسئولان و ضعف مدیریت توزیع آب

تحلیل مصاحبه‌های انجام شده بیانگر نارضایتی مشارکت کنندگان از وضعیت مدیریت آب در منطقه حسنلو است. آنها اینگونه عنوان می‌کنند که مدیریت آب منطقه دچار مشکلات فراوانی است و نظام توزیع آب در آن به درستی اعمال نمی‌شود. مشارکت کنندگان دلایلی از جمله پارتی بازی و رشوه‌گیری و همچنین ذی‌نفع بودن ساختار اداری مدیریت توزیع آب را علت اصلی ضعف مدیریت آب در منطقه عنوان می‌کنند.

“مدیریتی وجود ندارد ما با سه سازمان سروکار داریم؛ با

سه وزارتخانه؛ دیگه نمی‌دانیم کی به کی است. یکی

جهاد کشاورزی که می‌گویند مزرعه‌ها مال جهاد کشاورزی

است، یکی اداره آب است یکی ستاد احیاء”

انتقاد مشارکت کنندگان نه برای نحوه رسیدگی به امور آب در جهت احیاء دریاچه ارومیه بلکه بیشتر در راستای سهمین شدن خود آب سد حسنلو است. در واقع دریاچه اهمیت چندانی برای آنها ندارد

و نظام توزیعی که آنها منتقد آن هستند و بر این نظر هستند که دخالت‌های بیرونی و فساد اداری سبب اختلال در آن شده توزیع آب سد حسنلو برای زمین‌های کشاورزی آنان است. به نظر مشارکت کنندگان تحقیق منطقه حسنلو در زمینه نظام توزیع و نظارت بر آن نیازمند یک مدیریت قوی است که بتواند تعادل را بین حق آبه کشاورزان از آب سد ایجاد کند. لازم به ذکر است این ایجاد تعادل نه در رابطه با حق آبه برای دریاچه ارومیه بلکه برای بهره‌مندی از آب سد حسنلو است. به روایت مشارکت کنندگان طرح‌هایی که در منطقه قرار است اجرا شود نیمه‌کاره رها شده یا پس از مدتی آن طرح دیگر اجرا نمی‌شود.

“باید مدیریتی قوی بر زمین داشته باشند و با کسی رودرواسی

نداشته باشند. یک طرح قرار است که به اجرا دربیاید بعد از یک

ماه پشیمان می‌شوند. پس یک نقطه ضعفی موجود است”

به نظر مشارکت کنندگان در تحقیق نبود نظارت و مدیریت بر منابع آبی منطقه سبب شده که تعداد چاه‌های غیر مجاز بیشتر شود که خود سبب شور شدن و کاهش ذخیره آب سفره‌های زیرزمینی در منطقه شده است.

به طور کلی مشارکت کنندگان بر این نظر هستند که مسئولان منطقه‌ای براساس قانون دوگانه کار میکنند و خود را از قاعده کلی مستثنی می‌کنند چرا که خود مسئولان یا از زمین‌داران منطقه هستند یا زمین را از کشاورزان اجاره می‌کنند و قانونی را که برای کشت نکردن محصولات که به آبیاری زیاد نیاز دارد، خود نقض می‌کنند و به همین دلیل شکست قانون را توسط خود قانون‌گذار در نظر می‌گیرند و بر این اساس اعتمادی به مسئولان منطقه‌ای ندارند.

“الان هر کسی از مسئولان دو شغل داره. بعدشم مگه الگوی کشت

ندارن. خب بیان نظارت کنن. بیان هر کسی رو از قانون سرپیچی

میکنن بیان مجازات کنن. اگر کشاورزان رعایت نمی‌کنند چون خود

مسئولان هم از کشاورزان هستن. مسئولان اینجا زمین دارن. وقتی

خودشون عمل نمی‌کنن چطور میتونن به من بگن رعایت کن”

عواملی که ذکر آنها رفت سبب بی‌اعتمادی کشاورزان به مسئولان منطقه‌ای شده است. بی‌اعتمادی به مسئولان منطقه‌ای امری است که در ذهن مشارکت کنندگان تحقیق نقش بسته و بر این نظر هستند که دولت مرکزی برای احقاق حق آنها از مسئولان وارد کار شود. ریشه این بی‌اعتمادی در ضعف در نظارت دقیق بر توزیع آب و همچنین ذی‌نفع بودن خود مسئولان در زمینه اختصاص آب است چرا که کشاورزان بر این نظر هستند که مسئولانی که خود زمین‌دار هستند و یا زمین اجاره می‌کنند در توزیع آب عدالت را رعایت نمی‌کنند و به نفع خود استانداردهای دوگانه‌ای را اعمال می‌کنند.

“کارمندا همش میخوابن و ظهر که بشه بره خونه و کار دیگه

کنه. الان همه کارمندا اینجا زمین گرفتن و کرایه کردن و کاشتن.

مثلا سرهنگ بازنشسته هست اینجا ۱۳ هکتار چغندر کاشته”

در واقع همسو شدن منافع مالی و شغلی کارمندان در ادارات

منطقه سبب چنین نگرشی در ذهن کشاورزان شده است و به همین سبب اهالی منطقه حسنلو اعتماد چندانی به نظارت و توزیع متعادل آب توسط مسئولان منطقه‌ای ندارند.

• نارضایتی از خرید محصول کشاورزی

یکی از مسائلی که مشارکت‌کنندگان در تحقیق متفق القول و مکرر از آن یاد می‌کردند نارضایتی آنها از نحوه خرید محصولات کشاورزی آنها توسط دولت بود. عموماً کشاورزان از قیمت خرید محصولات کم آب بر مانند گندم و جو انتقاد می‌کردند و بر این نظر بودند که زمانی که ستاد احیاء محدودیت کشت محصولات پر آب بر مانند چغندر، یونجه و ذرت را اعمال می‌کند باید قیمت غله را بالاتر برد که کشاورزان بتوانند مخارج زندگی خود را تأمین کنند. اینگونه به نظر می‌رسد که در اوایل ساخت و بهره‌برداری از سد حسنلو محدودیتی در کشت محصولات وجود نداشته "سال پیش هیچ محدودیتی در مصرف آب وجود نداشت" و کشاورزان نیز به کشت محصولات درآمدزایی مانند چغندر و ذرت و یونجه اقدام کرده‌اند و کسب این درآمد بیشتر از این محصولات انتظارات فرآیندهای را در آنها به وجود آورده و دیگر حاضر به کشت محصولاتی مانند گندم و جو که نیازمند آبیاری کمتر و در عین حال درآمد کمتری نیز هستند، آنها را راضی نمی‌کند. کسب درآمد بیشتر از محصولات پرآب بر سبب شده که حتی با وجود پرداخت با تأخیر زیاد پول این محصولات توسط دولت، کشاورزان باز هم خواهان کشت آنها باشند. کشاورزان از تأخیر پرداختی‌های دولت برای محصولاتشان بسیار ناخرسند هستند ولی این حافظه تاریخی که چون طرف حساب آنها دولت است و دست آخر دولت پول محصول آنها را پرداخت خواهد کرد باز به کشت محصول پرآب بر برای فروش به خریدار انحصاری محصولات کشاورزی که همان دولت است، ادامه می‌دهند.

لازم به ذکر است تأخیر در پرداخت پول محصولات شامل محصولات کم آب بر مانند گندم و جو هم می‌شود. هر چند میزان تأخیر در تسویه حساب این محصولات کمتر از محصولات پر آب بر مانند چغندر و ذرت است ولی پرداخت باز با قدری تأخیر مواجه است و کشاورزان نیز با این حساب که تأخیر در پرداخت یکی از شروط فروش به دولت است، ترجیح می‌دهند تأخیر بیشتری در پرداخت را تحمل کنند ولی سودی که از کشت چغندر و ذرت و ... حاصل می‌کنند قابل مقایسه با کشت گندم و جو نیست.

"گندم به آن صورت درآمد ندارد. پارسال ۱۲۰۰ تومان بوده است

و البته خرج هم دارد و چیزی برای کشاورز باقی نماند ولی چغندر از گندم بهره بیشتری دارد. البته پول چغندر پارسال را هنوز نداده‌اند. ما از روی بدبختی این کار را می‌کنیم؛ چه کار کنیم؟ کشت نکنیم چه کار کنیم؟ پول گندم را در عرض ۳ تا ۵ ماه پرداخت می‌کنند. البته دست آخر پول چغندر را هم خواهند پرداخت. چغندر کاشت نکنیم، چه کار کنیم؟ گدایی کنیم؟"

• محرومیت نسبی نسبت به بهره‌مندی از آب سد

ساخت سد حسنلو در منطقه سبب شده کشاورزانی که از آب آن بی‌بهره شده‌اند نسبت به کشاورزان بهره‌بردار احساس محرومیت نسبی و تخصص داشته باشند. آنگونه که از گفته‌های مشارکت‌کنندگان تحقیق برمی‌آید تا قبل از احداث سد به واسطه رودخانه موجود در منطقه، زمین‌های آبی بالادست و پایین‌دست از نعمت آبیاری بهره‌مند بوده و چاه‌های موجود در منطقه نیز به واسطه جریان داشتن رودخانه در بالا و پایین‌دست ذخیره مناسبی داشتند و شوری آب دریاچه در آنها نفوذ نکرده بود. ولی با احداث سد و قطع شدن جریان آب رودخانه به سمت پایین‌دست کشاورزان آبی‌کار پایین‌دست که تا قبل از آن از آب رودخانه محصولات خود را آبیاری می‌کردند و چاه‌های آنان نیز به واسطه جریان داشتن رودخانه ذخیره مناسبی داشتند با مشکل مواجه شده‌اند و دیگر به مانند گذشته قادر به آبیاری محصولات خود نیستند. از سوی دیگر کشاورزان دیم کار بالادست که زمین‌های دیم آنها به واسطه احداث سد به زمین آبی تبدیل شده و بهره‌دهی بسیار بالاتری دارد از وضعیت موجود بیشترین بهره را برده‌اند. همچنین کشاورزان آبی‌کار بالادست نیز به علت مکانیزه شدن سیستم آبیاری آنها به واسطه احداث سد و به علت نزدیک بودن زمین‌های آنان به مخزن سد چاه‌هایی با ذخیره مناسب آب دارند. این دسته از کشاورزان نیز از موهبت احداث سد حسنلو بهره‌مند شده‌اند.

بنا بر آنچه ذکر آن رفت کشاورزان آبی‌کار پایین‌دست که تا قبل از احداث سد وضعیت مناسبی از نظر آبیاری محصولات خود داشته‌اند نسبت به کشاورزان بالادست دچار محرومیت نسبی شده‌اند و اینگونه تصور می‌کنند که قصد و تعمدی در دیمی کردن زمین‌های آبی آنها و آبی کردن زمین‌های دیم بالادست وجود دارد. طبق برنامه قرار بوده سیستم آبیاری مکانیزه برای زمین‌های پایین‌دست اجرا شود و بنا به دلایلی روند انجام این کار با وقفه طولانی مواجه شده این محرومیت رنگ تخصص به خود گرفته است.

"وقتی هم که سد حسنلو را آبیگری کرده‌اند باید گفت که از محمدیار به این طرف را کلاً ویران ساخته‌اند؛ زمین‌های آبی ما را به دیم و دیم بالادست را به آبی تبدیل کرده‌اند؛ بعد از آبیگری سد حسنلو ما به این روز افتاده‌ایم، بعضی از مردم چنان به فلاکت دچار شده‌اند که حتی پول برای خریدن نان خالی را هم ندارند؛ برخی زمین‌های کشاورزی را رول کرده و رفته‌اند" باین‌وجود روستاییان آبی‌کار پایین‌دست که نسبت به بالادست احساس محرومیت نسبی می‌کنند و ساخت سد را عامل بدبختی خود می‌دانند به‌عنوان راهکار سهیم شدن از آب سد و مکانیزه کردن سیستم آبیاری زمین‌های خود را پیشنهاد می‌کنند و تلاش دارند از منفعتی که به واسطه احداث سد در منطقه ایجاد شده بهره‌مند شوند.

"آبیاری کردن دیمی‌ها راحت است ولی آبیاری آبی‌ها نه. باید

پدرت دریابید که آبی را آبیاری کنی. من اکنون حاضر هستم

همین حالا ۳ هکتار زمین آبیاری را به قطره‌ای تبدیل کنم،

به هر نحوی که آنها بگویند؛ ولی از من حمایت کنند"

• احساس محرومیت نسبت به وضعیت درآمدی

غالباً ساخت سدها با توجیه مهار، کنترل و استفاده بهینه از منابع طبیعی در راستای توسعه و پیشرفت صورت می‌گیرد. ساخت سد حسنلو نیز به منظور استفاده بهینه از جریان رودخانه دائمی "گه‌دار" صورت گرفته که با استفاده از آن بتوان زمین‌های بیشتری را تحت کشت آبی درآورد و سطح تولید را برای کشور از یک سو و سطح اشتغال و درآمد را برای مردم منطقه از سوی دیگر بالا برد. نتایج این تحقیق حاکی از آن است که با احداث سد و آبی شدن زمین‌های دیم بالادست و همچنین با مکانیزه شدن سیستم آبیاری زمین‌های آبی در اراضی محدوده سد، سطح درآمد و میزان اشتغال در منطقه بالا رفته و وضعیت درآمدی به گونه‌ای تغییر یافته که بهره‌مندان اصلی یا همان روستاهای بالادست سد که از سیستم مکانیزه آبیاری برای زمین‌های آبی و دیم منتفع شده‌اند اگر احساس محرومیتی دارند نه برای امرار معاش و گذران زندگی روزمره بلکه محرومیت آنها نسبت و مقایسه با همسایه ثروتمندتر خود است. در چه شرایطی افراد از تحرک صعودی در قشر بندی اجتماعی برخوردار می‌شوند و جنس محرومیت آنها از محرومیت مطلق به محرومیت نسبی تغییر پیدا می‌کند. به طوری که در محرومیت مطلق درآمد و وضع معیشتی آنها تنها برای زنده ماندنشان کفایت می‌کرد و در محرومیت نسبی درآمد افراد مکفی آنها است ولی کماکان نسبت به افراد با درآمد بیشتر و استانداردها و هزینه‌هایی متداولی که سایر افراد جامعه برای خود دارند، خود را محروم قلمداد می‌کنند. وجود چنین محرومیتی در جامعه بیانگر این است که آن جامعه در مسیر توسعه و پیشرفت و گذار از وضعیت زیست اولیه و معاش حداقلی قرار گرفته است.

مشارکت کنندگان در تحقیق به گونه‌ای دیگر این وضعیت را بیان کردند به طوری که از بهتر شدن وضعیت خود نسبت به گذشته صحبت به میان می‌آورند.

"الان مردم درآمدشون بیشتر شده ولی مشکلات اجتماعی و مخارج شون هم زیاد شده. باید به اندازه گلیم پاتو دراز کنی. چشم به هم چشمی زیاد شده. کسی حاضر نیست به اندازه گلیمش پا دراز کنه. قبلاً چشم به هم چشمی نبود. خرج کم بود. الان چشم به هم چشمی شده".

این به تعبیری چشم و هم چشمی به نوعی اشاره به همان وضعیت محرومیت نسبی دارد که به واسطه افزایش درآمد ساکنان به بیش از نیازهای حداقلی ایجاد شده است. چنین ذهنیتی حاضر نیست که خواسته‌هایی که در جامعه به ارزش تبدیل شده دست بکشد و به دنبال به حداکثر رساندن درآمد برای به دست آوردن خواسته‌هایی از نظر اجتماعی ترویج شده است. چنین وضعیتی در مورد کشاورزان یعنی کشت محصولات پر آب‌بر و کشت دوم برای کسب درآمد بیشتر و عدم توجه به احیای دریاچه ارومیه و تمرکز بر کسب سود بیشتر به هزینه نابودی دریاچه ارومیه.

نتیجه‌گیری

احداث سدها غالباً برای کنترل و بهره‌برداری و به خدمت گرفتن نیروی طبیعت توسط انسان است. این اقدامات جز اقدامات توسعه‌ای هستند که دولت‌ها برای تسریع روند توسعه در کشورها انجام می‌دهند. باین وجود هر اقدام توسعه‌ای توانمند می‌تواند واجد نتایج مثبت و پیامدهای منفی باشد و به همین جهت انجام ارزیابی‌های اجتماعی، اقتصادی و محیط‌زیستی قبل از چنین اقداماتی یکی از الزامات اولیه برای کاهش پیامدهای منفی و به حداکثر رساندن نتایج مثبت چنین اقداماتی است.

احداث سد حسنلو به عنوان یک اقدام توسعه‌ای، در نگاه جامعه محلی نتایج مثبتی از جمله افزایش درآمد کشاورزان منطقه، بهبود وضع معیشتی و رفاهی اهالی منطقه و ایجاد اشتغال وابسته برای بخشی از ساکنان و همچنین افزایش تولید محصولات کشاورزی را به همراه داشته است و از این جنبه می‌توان آن را به عنوان یک اقدام توسعه‌ای مطلوب ارزیابی نمود. دیدگاه مثبت جامعه محلی نسبت به این اقدام توسعه‌ای را می‌توان با استناد به دغدغه ساکنان محلی برای حفظ سد حسنلو و گسترش اقدامات توسعه‌ای از این دست، درازای خشک شدن دریاچه ارومیه استنباط نمود. باین حال این اقدام توسعه‌ای علاوه بر نتایج مثبت، پیامدهای منفی نیز به همراه داشته است که مهم‌ترین آن تشدید وضعیت بحرانی دریاچه ارومیه و همچنین ایجاد حس تبعیض در بین کشاورزان منطقه نسبت به توزیع و تخصیص ناعادلانه آب سد و بهره‌مندی نابرابر از مواهب احداث سد حسنلو است. سد حسنلو بر روی رودخانه گه‌دار احداث شده است که یکی از مهم‌ترین رودخانه‌های ورودی به دریاچه ارومیه است و به همین دلیل باعث کاهش آب ورودی به دریاچه و تشدید روند خشکی آن شده است. ذکر این نکته نیز لازم به نظر می‌رسد که سد حسنلو به تنهایی سبب خشکی دریاچه ارومیه نشده است بلکه روند افسار گسیخته سدسازی بر روی رودخانه‌های ورودی به دریاچه ارومیه علت اصلی خشک شدن دریاچه ارومیه است به طوری که در حوزه آبریز دریاچه ارومیه ۷۹ سد ساخته شده^۲ که از یک سو سبب توسعه کشاورزی منطقه و از سوی دیگر تشدید خشک شدن دریاچه ارومیه را در پی داشته است. درست است که اقدامات توسعه‌ای یعنی سدسازی‌ها، سبب افزایش درآمد و رفاه ساکنان محلی منطقه شده است ولی به نظر می‌رسد باید برآورد دقیقی از پتانسیل سدسازی در حوزه آبریز دریاچه ارومیه صورت می‌پذیرفت؛ به طوری که سطح آب دریاچه در حد قابل قبولی باقی بماند، که گویا با نتایج پیش آمده یعنی تشدید خشکی دریاچه ارومیه چنین برآورد و تدبیری صورت نگرفته است. درواقع شاید بتوان عنوان توسعه افسار گسیخته را عامل اصلی خشکی دریاچه ارومیه دانست که باید با توسعه مسئولانه و مدیریت شده جایگزین می‌شد.

از دیگر پیامدهای منفی احداث سد حسنلو بهره‌مندی ناچیز کشاورزان پایین‌دست از آب سد است که سبب احساس محرومیت نسبی و خصومت و تعارض آنها نسبت به کشاورزان بالادست شده است که باید روند توزیعی آب به‌گونه‌ای مدیریت می‌شد که چنین حس محرومیتی در ساکنان محلی ایجاد نشود. از آنجا که این برآورد برای توزیع عادلانه منافع به‌دست آمده از احداث سد در قالب نظام توزیعی آب صورت نگرفته است، کشاورزان پایین‌دست اعتماد خود را به مسئولان که به نظر آنها عامل اصلی این عدم تعادل هستند را از دست داده‌اند. چنین کاهش سطح اعتماد اجتماعی در منطقه روند انجام سایر امور که نیازمند مشارکت مردم است را دچار اختلال نموده است، که به‌عنوان نمونه می‌توان به حفر چاه‌های غیرمجاز و امتناع از انسداد آنها اشاره کرد. به‌عنوان راهکار پیشنهادی و در جهت کاهش پیامدهای منفی و تقویت آثار مثبت اقدامات توسعه‌ای به نظر می‌رسد که باید ابتدا توسط متخصصان برآوردی از تأثیرات اجتماعی و اقتصادی و محیط‌زیستی اقدام توسعه‌ای انجام شود و نه اینکه بعد از انجام و پایان پذیرفتن چنین اقداماتی به دنبال ارزیابی اثرات آن بر محیط‌زیست و ساکنان محلی بود. به نظر می‌رسد اگر چنین برآوردی در رابطه با سدسازی‌های صورت گرفته در منطقه آبریز دریاچه ارومیه و رودخانه‌های منتهی به دریاچه ارومیه صورت می‌گرفت، از جنبه محیط‌زیستی اجازه احداث سدهای متعدد بر روی رودخانه‌های منتهی به دریاچه ارومیه داده نمی‌شد و در نتیجه آب دریاچه ارومیه به چنین حدی کاهش پیدا نمی‌کرد. از جنبه اجتماعی نیز اگر برآوردهای دقیقی از پیامدها اجتماعی و ذی‌نفعان احداث سدها صورت می‌گرفت، شاید مسئولان امر در رابطه با توزیع عادلانه منافع حاصل از احداث سد چاره‌اندیشی می‌کردند و در نتیجه از یک سو توسعه‌ای مسئولانه در منطقه صورت می‌پذیرفت و از سوی دیگر تخصیص، تعارض و بی‌اعتمادی بین کشاورزان با یکدیگر و بین کشاورزان با مسئولان منطقه‌ای به وقوع نمی‌پیوست.

پی‌نوشت

1-<https://www.ulrp.ir/fa>

2-<https://www.sceg.ir>

منابع

ابراهیم‌پور، محسن، و مصطفوی، رضا. (۱۳۸۷). ارزیابی آثار و پیامدهای اجتماعی و فرهنگی طرح‌ها و پروژه‌ها. دفتر مطالعات اجتماعی و فرهنگی شهرداری تهران. تهران.

احمدی اوندی، ذوالفقار، بهمنی، سجاد، سپهوند، عزیزاله، و لجم‌اورک مرادی، علی. (۱۳۹۳). ارزیابی پیامدهای اجتماعی و فرهنگی پروژه احداث سد کارون ۳ شهرستان ایذه. توسعه اجتماعی، ۸(۳)،

۵۲-۲۷. Doi: [20.1001.1.25383205.1393.8.3.2.2](https://doi.org/10.1001.1.25383205.1393.8.3.2.2). استراوس، آنسلم، و کوربین، جولیت. (۱۳۹۱). مبانی پژوهش کیفی: فنون و مراحل تولید نظریه زمینه‌ای. مترجم: ابراهیم افشار. نشر نی. چاپ دوم. تهران.

خاتون آبادی، سیداحمد، پرویزی، عنایت، و عطایی، مریم. (۱۳۹۷). بررسی اثرات اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی احداث سد شاه قاسم یاسوج از دیدگاه روستاییان بهره‌بردار. علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، ۲۲(۴)، ۱۰۹-۱۲۷.

Doi: [10.29252/jstnar.22.4.109](https://doi.org/10.29252/jstnar.22.4.109).

خدائی قشلاق، فاطمه، روستایی، شهرام، و مختاری، داود. (۱۳۹۹). پایش روند بیابان‌زایی در محدوده پیرامونی دریاچه ارومیه (۲۰۰۰-۲۰۱۸). جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، ۳۱(۳)، ۲۱-۴۰.

doi: [10.22108/gep.2020.121458.1264](https://doi.org/10.22108/gep.2020.121458.1264)

رحمتی، علیرضا، و نظریان، اصغر. (۱۳۸۹). آثار اقتصادی- اجتماعی و محیط‌زیستی سکونت‌گاه‌های مشمول جابه‌جایی ناشی از ایجاد سدها (مطالعه موردی سد گتوند علیا، رودخانه کارون). پژوهش‌های محیط‌زیست، ۱(۲)، ۵۳-۶۶. <https://sid.ir/pa-per/192351/fa>

زنگی دارستانی، منصوره، و عباس‌نژاد، احمد. (۱۳۹۵). ارزیابی اثرات زیست محیطی سد صفارود رابر بر مناطق پایین‌دست. فصلنامه زمین‌شناسی محیط‌زیست، ۱۰(۳۷)، ۵۷-۶۸. https://geojournal.islamshahr.iau.ir/article_529485.html

طاهری صفار، مرجان، شاهنوشی فروشانی، ناصر، و ابوالحسنی، لیلی. (۱۳۹۴). ارزیابی اثرات اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی احداث سد بار نیشابور. جغرافیا و مخاطرات محیطی،

Doi: [10.22067/GEO.V4I3.45355](https://doi.org/10.22067/GEO.V4I3.45355). ۱۴۶-۱۲۷، ۱۵(۴)

فاضلی، محمد، و پاک‌سرشت، سلیمان. (۱۳۸۸). جزوه ارزیابی تأثیرات اجتماعی، مرکز مطالعات شهرداری تهران. تهران.

فیلیک، اووه. (۱۳۹۱). درآمدی بر تحقیق کیفی. مترجم: هادی جلیلی. نشری نی. تهران.

کرامت‌زاده، علی، چیدری، امیرحسین، و شرزه‌ای، غلامعلی. (۱۳۹۲). تحلیل تأثیرات اقتصادی و اجتماعی ایجاد و توسعه بازار آب در بخش کشاورزی (مطالعه موردی اراضی پایین دست سد شیرین دره بنجورد). تحقیقات اقتصادی، ۴۸(۳)،

Doi: [10.22059/JTE.2013.35813](https://doi.org/10.22059/JTE.2013.35813). ۱۲۸-۱۰۷

محمدی، جمال، و دانش‌مهر، حسین. (۱۳۹۲). ارزیابی اثرات اجتماعی ترمیم و بازسازی پارک‌ها به شیوه نظریه مبنایی مطالعه موردی: پارک‌های سطح منطقه ۱۸ شهرداری تهران. فصلنامه مطالعات شهری، ۷، ۶۱-۷۲. https://urbstudies.uok.ac.ir/article_5948.html

ملک حسینی، افسانه، و میرک زاده، علی اصغر. (۱۳۹۳). ارزیابی تأثیرات اجتماعی سد سلیمان‌شاه سنقر بر روستاهای تحت

- the Urmia Lake Level by Using System Dynamics Modeling. *Water Resources Management*, 26(1), 129-145. DOI: [10.1007/s11269-011-9909-8](https://doi.org/10.1007/s11269-011-9909-8)
- Kirchherr, J., & Charles, K. (2016). The social impacts of dams: A new framework for scholarly analysis. *Environmental Impact Assessment Review*, 60, 99-114. Doi: [60.10.1016/j.eiar.2016.02.005](https://doi.org/60.10.1016/j.eiar.2016.02.005).
- Rosenberg, D.M., Bodaly, R., & Usher, P.J. (1995). Environmental and social impacts of large scale hydro-electric development: who is listening? *Global Environmental Change-human and Policy Dimensions*, 5, 127-148. DOI: [10.1016/0959-3780\(95\)00018-J](https://doi.org/10.1016/0959-3780(95)00018-J)
- Tajziehchi, S., Monavari, S., Karbassi, A. R., Shariat, S., & Khorasani, N. (2013). Quantification of Social Impacts of Large Hydropower Dams- a case study of Alborz Dam in Mazandaran Province, Northern Iran. *International Journal of Environmental Research*, 7, 377-382. Doi: [10.22059/IJER.2013.615](https://doi.org/10.22059/IJER.2013.615)
- Tilt, B., Braun, Y., & He, D. (2009). Social impacts of large dam projects: a comparison of international case studies and implications for best practice. *Journal of environmental management*, 90(3), S249-S257. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.07.030>
- Yamaguchi, N., Sakotani, A., Ichijo, T., Kenzaka, T., Tani, K., Baba, T., & Nasu, M. (2012). Break Down of Asian Dust Particle on Wet Surface and Their Possibilities of Cause of Respiratory Health Effects. *Biological & pharmaceutical bulletin*, 35, 1187-1190. Doi: [10.1248/bpb.b12-00085](https://doi.org/10.1248/bpb.b12-00085)
- پوشش شبکه آبیاری و زهکشی سد. پژوهش‌های روستایی، ۵۸۹، (۳)، ۶۱۰-۶۱۵. doi: [10.22059/jrur.2014.53184](https://doi.org/10.22059/jrur.2014.53184)
- ملک حسینی، افسانه، و میرک زاده، علی اصغر. (۱۳۹۴). تحلیل اثرات اجتماعی- اقتصادی سدسازی بر توسعه روستایی (مطالعه موردی: سد سلیمان‌شاه). *جغرافیا و برنامه ریزی*، ۱۹ (۵۳)، ۳۲۵-۳۵۱. [SID. https://sid.ir/paper/203667/fa](https://sid.ir/paper/203667/fa)
- Aghakouchak, A., norouzib, H., madani, K., mirchid, A., azarderakhshe, M., nazemif, A., nasrollahia, N., farahmanda, A., mehrana, A., & hasanzadehf, E. (2015). aral sea syndrome desiccates lake urmia: call for action. *journal of great lakes research*, 41, 307-311 <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2014.12.007>
- Bhatti, N., Altaf A. S., Qureshi, A. I., & Bhatti, A. I. (2019). Socio-Economic Impact Assessment of Small Dams Based on T-Paired Sample Test Using SPSS Software. *Civil Engineering Journal*, 5(1), 153. Doi: [10.28991/cej-2019-03091233](https://doi.org/10.28991/cej-2019-03091233)
- Borimnejad, V., & salimian, F. (2014). investigation of socio-economic and environmental effects of taleghan dam using structural equation modeling. *international journal of agricultural management and development*, 4(3), 193-202. DOI: [10.22004/ag.econ.246097](https://doi.org/10.22004/ag.econ.246097)
- Cernea, M.M. (2004). Social Impacts and Social Risks in Hydropower Programs: Preemptive Planning and Counter-risk Measures. session on social aspects of hydropower development united nations symposium on hydropower and sustainable development beijing, china.
- Duflo, E., & pande, R. (2007). Dams. *The Quarterly journal of Economics*, 122(2), 601-646. DOI: [10.1162/qjec.122.2.601](https://doi.org/10.1162/qjec.122.2.601)
- Fung, Z., Pomun, T., Charles, K. J., & Kirchherr, J. (2019). Mapping the social impacts of small dams: The case of Thailand's Ing River basin. *Ambio*, 48(2), 180-191. <https://doi.org/10.1007/s13280-018-1062-7>
- Ghobadi hamzekhani, F., Saghafian, B., & Araghinejad, Sh. (2016). Environmental management in Urmia Lake: Thresholds approach. *International Journal of Water Resources Development*. 32(1), 77-88. [10.1080/07900627.2015.1024829](https://doi.org/10.1080/07900627.2015.1024829)
- Hassanzadeh, E. & Zarghami, M., & Hassanzadeh, Y. (2012). Determining the Main Factors in Declining

Laboratory Investigation of Scour Hole Location Downstream of Dams and its Prediction Using Data Mining Methods

A. Taheri Aghdam^{1*}, A. Nadiri², J. Shiri³

1, 3- Ph.D. Student and Associate Professor, Department of Water Engineering, Tabriz University, Iran. 2- Associate Professor, Department of Earth Sciences, Tabriz University, Iran.

*(Corresponding Author Email: : ali.taheri@tabrizu.ac.ir)

Received: 03-12-2022

Revised: 26-02-2023

Accepted: 27-02-2023

Available Online: 21-09-2023

بررسی آزمایشگاهی موقعیت تشکیل حفره آبشستگی در پایین دست سدها و پیش‌بینی آن به کمک روش‌های داده‌کاوی

علی طاهری اقدم^{۱*}، عطالله ندیری^۲، جلال شیري^۳

۱ و ۳- به‌ترتیب دانشجوی دکتری تخصصی و دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز، ایران. ۲- دانشیار، گروه علوم زمین، دانشگاه تبریز، ایران.

*(نویسنده مسئول، E-Mail: ali.taheri@tabrizu.ac.ir)

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۱۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۶/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۸

Abstract

Various factors affect the location of the scour hole formed by the falling flow. Among these factors, we can mention the tailwater depth, the height of the falling flow, the velocity of the flow, the cross-section of the flow and the amount of air entering the flow. In the present study, the location of the formation of scour holes was investigated in the hydraulic laboratory of Tabriz University. Also, the ability of artificial neural networks (ANN) and tree models (M5P tree model) in estimating the location of scour holes downstream of dams was investigated using laboratory data and the results of these two models have been compared with the multivariate nonlinear regression method. The results showed that all three methods, the artificial neural network, the M5 tree model and regression method provide relatively accurate results in predicting the location of scour hole. RMSE value for ANN=1.75, M5=3.75 and Regression=3.89, but due to providing simple linear relationships by the M5 tree model, this method can be used as a practical method to determine the location of scour hole. The analysis of the M5 tree model showed that 4 equations with different linear equations model the pattern of changes in the location of scour hole. In addition, the analysis of the laboratory results showed that the regression equations presented in the present study compared to the common method (using projectile equations) have much less error when predicting the location of scour hole. Also, the laboratory results showed that the head passing through the structure is the most effective parameter in the formation of the scour hole.

Keywords: Scouring Hole, M5 Tree Models, Artificial Neural Networks, Falling Flow, Projectile Equation.

چکیده

عوامل مختلفی بر محل تشکیل حفره آبشستگی ایجاد شده در اثر جریان‌های ریزشی تأثیر دارند. از جمله این عوامل عمق پایاب، ارتفاع ریزش، سرعت جریان، سطح مقطع جریان ریزشی، زاویه برخورد جریان و میزان هوای ورودی به جریان می‌باشد. در تحقیق حاضر محل تشکیل حفره آبشستگی به‌صورت آزمایشگاهی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تبریز بررسی شد. همچنین توانایی شبکه‌های عصبی مصنوعی و مدل‌های درختی (مدل درختی M5P) در تخمین محل ایجاد حفره آبشستگی در پایین دست سدها با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی بررسی شده و نتایج این دو مدل با روش رگرسیونی غیر خطی چند متغیره مقایسه شد. نتایج نشان داد هر سه روش، شبکه عصبی مصنوعی، مدل درختی M5 و روش رگرسیونی نتایج نسبتاً دقیقی را در پیش‌بینی محل تشکیل حفره آبشستگی ارائه می‌دهند؛ که برای مقدار RMSE، ANN=1.75، M5=3.75 و Regression=3.89 می‌باشند، ولی به دلیل ارائه روابط خطی ساده توسط مدل درختی M5، این روش می‌تواند به‌عنوان روشی کاربردی برای تعیین محل تشکیل حفره آبشستگی مورد استفاده قرار گیرد. تحلیل مدل درختی M5 نشان داد که ۴ رابطه با معادلات خطی متفاوت، الگوی تغییرات محل تشکیل حفره آبشستگی را مدل می‌کنند. علاوه بر این، تجزیه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی نشان داد روابط رگرسیونی ارائه شده در تحقیق حاضر نسبت به روش رایج (استفاده از معادلات پرتابه)، خطای خیلی کمتری در هنگام پیش‌بینی محل تشکیل حفره آبشستگی دارند. همچنین نتایج آزمایشگاهی نشان داد ارتفاع آب گذرنده از روی سازه موثرترین پارامتر در محل تشکیل حفره آبشستگی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: حفره آبشستگی، مدل درختی M5، شبکه‌های عصبی مصنوعی، جریان ریزشی، معادلات پرتابه.

باتوجه به شکل (۱ب) مشاهده می‌شود محل تشکیل حفره آبستگی در پایین‌دست سدها، منطبق بر قسمت انتهایی مسیر جریان ریزشی می‌باشد. بنابراین برای محاسبه مختصات محل تشکیل حفره آبستگی، از معادلات پرتابه استفاده می‌شود. رابطه (۱) محل تشکیل حفره آبستگی در پایین‌دست سدها را نشان می‌دهد.

$$X = V_0 \times \sqrt{\frac{2 \times P}{g}} \quad (1)$$

باتوجه به رابطه (۱) محل تشکیل حفره آبستگی در پایین‌دست سدها در حالتی که زاویه اولیه جریان ریزشی از افق برابر صفر باشد در مختصات $(V_0 \times \sqrt{\frac{2 \times P}{g}}, -P)$ واقع می‌شود. قابل ذکر است که این مختصات به دلیل عدم لحاظ نیروی مقاومت هوا خطا دارد اما با این حال در طراحی‌ها استفاده می‌شود (USBR، ۱۹۶۰).

Pagliara و همکاران (۲۰۰۹) پدیده آبستگی را در حوضچه‌های استغراق ناشی از جت‌های مدور در شرایط حضور و عدم حضور سازه محافظ آبستگی، بررسی کردند و روابطی برای تخمین محل شروع آبستگی بر حسب پارامترهای اصلی موثر بر آبستگی، از جمله عدد فرود ذرات بستر ارائه نمودند. تاکنون راهکارهای متنوعی برای مقابله با پدیده آبستگی بیان شده است. یکی از روش‌های کاهش اثرات منفی پدیده آبستگی، کاهش قدرت فرسایش جت خروجی از سرریز است. یکی از روش‌های کاهش قدرت فرسایش جت آب خروجی از سرریزهای ریزشی، استفاده از شکافنده‌ها^۱ برای هوادهی در سرریز می‌باشد. عملکرد این سیستم به گونه‌ای است که جریان عبوری از روی سرریز، با یک مانع دندان‌های شکل مواجه می‌شود. این امر سبب گسستگی جریان و در نتیجه آن افزایش ورود هوا به درون جت می‌شود. افزایش هوای داخل جت سبب افزایش سطح مقطع جت و از این رو کاهش قدرت فرسایش‌دهندگی آن می‌شود که در نتیجه آن، عمق آبستگی کاهش می‌یابد (Mason، ۱۹۸۳).

Karamigolbaghi و همکاران (۲۰۱۷) در یک پژوهش آزمایشگاهی با طراحی مجموعه‌ای از آزمایشات مختلف تلاش کردند فرسایش‌پذیری حوضچه‌های استغراق را با تغییر شرایط جت‌های آب عمودی بررسی نمایند. آن‌ها دریافتند تغییر در مقدار آبستگی، علاوه بر مقدار تنش برشی بحرانی بستر و ضریب فرسایش‌پذیری، به حد بسیار بالایی به شرایط جت آب وابسته است. در نتیجه آن‌ها با ثابت نگهداشتن تمامی شرایط رسوب، با تغییر در شرایط جت آب، مجموعه‌ای از آزمایشات را انجام دادند و در پایان دریافتند معادلات آبستگی ارائه شده برای جت‌های مستغرق در پیش‌بینی عمق و حجم چاله آبستگی ناتوان بوده و خصوصیات جت در مقدار آبستگی بسیار موثر است.

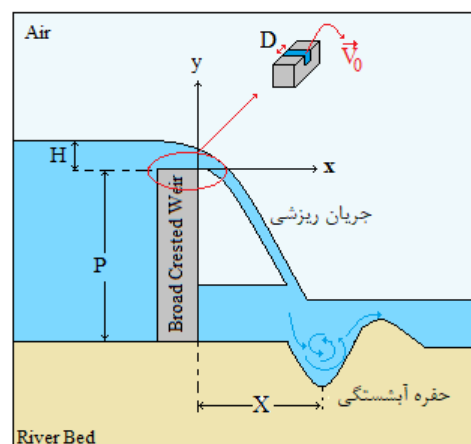
He و همکاران (۲۰۱۷) آبستگی بسترهای ماسه‌ای تحت تأثیر جت‌های عمودی آب را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند با افزایش دبی جت آب، عمق و حجم چاله آبستگی رفته رفته افزایش می‌یابد،

جریان خروجی از مخزن سدها انرژی بسیار زیادی دارد که برخورد این جریان خروجی (جت آب) با بستر، آن را دچار آبستگی می‌نماید. با آگاهی از میزان تأثیر آبستگی بر سازه‌ها و محل وقوع آن، می‌توان از وجود خرابی و مشکلات ناشی از آبستگی جلوگیری نمود. یکی از سازه‌های تسکین جریان در پایاب سرریزها، حوضچه‌های استغراق می‌باشد (حسینی و همکاران، ۱۳۹۵). محل تشکیل حفره آبستگی ناشی از جریان ریزشی تابع پارامترهای متعددی می‌باشد که اطلاع کامل از این عوامل و نحوه تأثیر آن‌ها بر محل تشکیل حفره آبستگی، به طراحان در جانمایی حوضچه‌های آرامش کمک زیادی می‌نماید.

شکل (۱-الف و ب) به ترتیب شکل واقعی و مقطع شماتیک محل تشکیل حفره آبستگی در پایین‌دست سدها را نشان می‌دهد. در شکل (۱) هد گذرنده از روی سد، D عرض مقطع خروجی جریان ریزشی، X فاصله محل حفره آبستگی از بدنه سد، V_0 سرعت اولیه جریان پرتابی، P ارتفاع ریزش، x و y مختصات لبه پایین جریان ریزشی می‌باشند.



شکل ۱ الف- شکل واقعی محل تشکیل حفره



شکل ۱ ب- شماتیک محل تشکیل حفره آبستگی در پایین‌دست سدها

اما با رسیدن جریان به یک مقدار بحرانی، رفتار چاله آبشستگی تحت تأثیر تغییر در مشخصات جریان خروجی از جت آب قرار می‌گیرد. آن‌ها دریافتند بعد از دبی بحرانی، مقدار آشفته‌گی جریان خروجی تغییر زیادی کرده که منجر به تغییر در روند آبشستگی پایین‌دست می‌شود.

داده‌کاوی^۲ یک رشته علمی جدید در زمینه‌های استخراج و ارزیابی اطلاعات از پایگاه داده‌ها است. مدل‌های داده‌کاوی شامل روش‌هایی از قبیل شبکه عصبی مصنوعی^۳، منطق فازی^۴، سامانه هوشمند مبتنی بر قانون^۵، استخراج تصمیم^۶، روش‌های یادگیری ماشینی^۷، خوشه‌بندی^۸ و ... می‌باشد (Sattari و همکاران، ۲۰۱۲). مدل M5 به‌عنوان یکی از روش‌های تصمیم‌گیری درختی^۹ مبتنی بر روش‌های یادگیری ماشینی و داده‌کاوی است. شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) نیز به‌عنوان یکی از قدیمی‌ترین روش‌های داده‌کاوی در علوم مهندسی مطرح می‌باشد. یک شبکه عصبی مصنوعی، تعدادی اجزای پردازشگر را تحت عنوان نرون‌ها و آکسون‌ها به یکدیگر متصل می‌کند (یک شبکه عصبی، از تعدادی نرون ساخته شده است. آکسون، یک کانال ارتباطی است که اطلاعات پردازش شده را از هسته نرون خارج می‌کنند). اتصال اجزا از طریق وزن‌های شبکه، مطابق با معماری شبکه عصبی مورد نظر انجام می‌شود. تحقیقات انجام یافته قدرت و تأثیر بالای این مدل‌ها را اثبات می‌کنند. از شبکه‌های عصبی مصنوعی در حوزه‌های متنوعی از فعالیت‌های بشری استفاده شده است و راهکارهایی برای مسائل مختلفی که مدت‌های طولانی بدون راه‌حل باقی‌مانده بودند توسط این روش ارائه شده است (Salmasi و همکاران، ۲۰۲۱). ازجمله پژوهش‌های کار شده با روش شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌توان به مطالعات طاهری اقدم و همکاران (۱۴۰۰) در پیش‌بینی ارتفاع آبشار در پایین‌دست سرریزهای اوجی جهت کنترل پرش هیدرولیکی، Solomatine و Xue (۲۰۰۴) در پیش‌بینی سیل، Bhattacharya و Solomatine (۲۰۰۴) در شبیه‌سازی رابطه دبی- اشل، صبا و همکاران (۱۳۹۷) در تعیین آستانه لغزش پایداری شیروانی و بهینه‌یابی حجم عملیات خاکریزی سد خاکی و در تحقیق سلماسی و همکاران (۱۴۰۱) به برآورد ضریب دبی سرریز لبه پهن مستطیلی اشاره نمود.

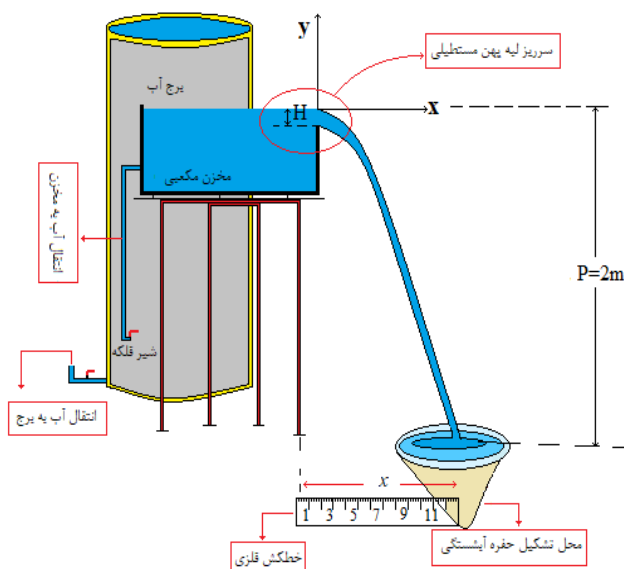
تشکیل حفره آبشستگی در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی و در بستر طبیعی رودخانه‌ها، موضوع تحقیق در پژوهش‌های سال‌های اخیر نیز بوده است که خصوصیات بسیار متنوعی دارند و پیش‌بینی آن‌ها از دیدگاه هیدرولیکی و سازه‌ای بسیار با اهمیت است. مرور منابع و تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد مطالعه‌ای برای بررسی محل تشکیل حفره آبشستگی در پایین‌دست سدها به‌صورت آزمایشگاهی وجود ندارد. اکثر تحقیقات انجام شده در مورد ابعاد حفره آبشستگی و گسترش

آن در جهات مختلف می‌باشد. همچنین با مطالعه منابع گذشته جای خالی روش‌های داده‌کاوی در پیش‌بینی محل تشکیل حفره آبشستگی مشاهده می‌شود. در تحقیق حاضر ضمن بررسی آزمایشگاهی محل تشکیل حفره آبشستگی در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی، توانایی شبکه عصبی مصنوعی و مدل درختی M5 نیز در پیش‌بینی آن‌ها بررسی شده و نتایج این دو مدل با روش رگرسیون غیرخطی چند متغیره لجستیک قابل اعمال روی داده‌های گسسته مقایسه شده است. همچنین در تحقیق حاضر، میزان خطای معادله پرتابه (معادله ۱) در پیش‌بینی محل تشکیل حفره آبشستگی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

• مشخصات هندسی مدل فیزیکی

در پژوهش حاضر، آزمایشگاهی در آزمایشگاه هیدرولیک گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه تبریز در یک مخزن مکعبی شکل به طول ۲ متر، عرض ۱/۲ متر و ارتفاع ۱/۵ متر انجام گرفت. بر روی این مخزن یک سرریز لبه پهن مستطیلی نصب شد. همچنین در پایین‌دست آن یک فلوم شیشه‌ای فلزی برای انتقال آب به مخزن اصلی و در بالادست یک لوله انتقال آب به مخزن مکعبی شکل تعبیه شد. با تغییر پارامترهای موثر در محل تشکیل حفره آبشستگی آزمایشات انجام و داده‌های محل تشکیل حفره آبشستگی استخراج شد. در شکل (۲) شماتیک مخازن آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری‌های محل تشکیل حفره آبشستگی نشان داده شده است.



شکل ۲- شماتیک مخازن آزمایشگاهی مورد مطالعه در تحقیق حاضر برای بررسی محل تشکیل حفره آبشستگی

$$\frac{X}{D} = f' \left(\frac{\mu}{\rho V_0 D}, \frac{P}{D}, \frac{\sigma}{\rho V_0^2 D}, \frac{Dg}{V_0^2}, \frac{H}{D} \right) \quad (5)$$

$$\frac{X}{D} = f' \left(\frac{1}{R_e}, \frac{1}{W_e}, \frac{1}{F_r^2}, \frac{H}{D}, \frac{P}{D} \right) \quad (6)$$

در رابطه (۶) R_e عدد رینولدز، W_e عدد وبر و F_r عدد فرود می‌باشند.

برای سیال معین مقادیر ρ ، g ، μ و σ معلوم و ثابت می‌باشد، از این رو ترم‌های R_e و F_r و W_e به صورت تابعی از H می‌توان در نظر گرفت. بنابراین رابطه (۶) به فرم رابطه (۷) کاهش می‌یابد.

$$\frac{X}{D} = f \left(\frac{H}{D}, \frac{P}{D} \right) \quad (7)$$

• محاسبات رگرسیونی

بعد از انجام آزمایشات مربوط به محل تشکیل حفره آبشستگی، پارامترهای بی‌بعد ارائه شده در روابط فوق، محاسبه شدند. به دنبال آن، به منظور برآورد محل تشکیل حفره آبشستگی، معادلات رگرسیونی خطی و غیر خطی با استفاده از نرم‌افزار SPSS به دست آمد. در ادامه تحقیق حاضر، توانایی شبکه‌های عصبی مصنوعی و مدل درختی M5 با استفاده از روابط بی‌بعد بررسی شد. نتایج این محاسبات در بخش نتایج و بحث ارائه شده است. لازم به ذکر است این معادلات برای محدوده آزمایش شده (محدوده آزمایشات در جدول ۱ ارائه شده است) معتبر هستند. برای ارزیابی، توانایی و دقت در فرمول رگرسیونی در تعیین محل تشکیل حفره آبشستگی، از شاخص‌های آماری شامل ضریب تبیین (R^2) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)^{۱۱} استفاده شده است.

• شبکه‌های عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه (MLP)

شبکه‌های عصبی مصنوعی جز سیستم‌های دینامیکی می‌باشند که با پردازش روی داده‌های تجربی، دانش یا قانون نهفته در داخل داده‌ها را به ساختار شبکه منتقل می‌کنند. به این دلیل به این سیستم‌ها هوشمند گفته می‌شود زیرا که براساس محاسبات روی داده‌های مشاهداتی قوانین کلی حاکم بر پدیده‌ها را کشف نموده و براین اساس آن‌ها پیش‌بینی‌هایی را می‌کنند. مدل‌های اساساً فیزیکی به علت سادگی اغلب توسط الگوریتم ANNs قابل مدل‌سازی می‌باشند. مدل‌های ANNs اغلب توسط توپولوژی شبکه، خواص گره‌ها و قوانین آموزش و یادگیری مشخص می‌شوند. در میان الگوهای متفاوت ANNs، شبکه‌های پیش‌خور^{۱۲} نسبت به سایر الگوها محبوبیت بیشتری دارند. ساختار شبکه شامل لایه‌هایی از امان‌های پردازشی موازی بوده که اصطلاحاً به آن نرون گفته می‌شود که در آن هر لایه توسط اتصال‌های میانی وزن‌دار به لایه پردازشی متصل می‌شود. شکل (۴) یک شبکه عصبی سه لایه شامل i و j و k با اتصال دهنده‌های میانی وزنی W_{ij} و W_{jk} بین نرون‌ها را نشان می‌دهد. در هنگام شروع آموزش شبکه، وزن‌ها دارای یک

بعد از برقراری جریان، آب از طریق سرریز لبه پهن مستطیلی به صورت آزاد سقوط می‌کند. در محل برخورد خط جریان به زمین حفره آبشستگی تشکیل می‌شود. با تغییر پارامترهای موثر بر محل تشکیل حفره آبشستگی (هد آب گذرنده از روی سرریز و عرض سرریز)، داده‌های آزمایشگاهی استخراج شد. لازم به توضیح است که دبی جریان به روش حجمی در طول آزمایشات اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری دبی جریان به این روش از یک مخزن مکعب مربعی شکل به ابعاد ۰/۵ متر استفاده شد. به صورتی که بعد از برقراری جریان از مدل، میزان آب ریخته شده به داخل مخزن مکعب مربعی شکل در یک زمان مشخص اندازه‌گیری می‌شد و مقدار دبی محاسبه می‌شد. همچنین در هر آزمایش، ارتفاع آب داخل مخزن در یک تراز نگهداشته می‌شد و هد گذرنده از داخل سرریز لبه پهن مستطیلی و همچنین محل تشکیل حفره آبشستگی برای هر آزمایش اندازه‌گیری می‌شدند.

• آنالیز ابعادی

به منظور دستیابی به اهداف این تحقیق، ابتدا پارامترهای متعددی که بیشترین تأثیر را در محل تشکیل حفره آبشستگی در جریان‌های خروجی از سرریز لبه پهن مستطیلی دارند شناخته شد و با تحلیل ابعادی رابطه کلی شامل پارامترهای بدون بعد استخراج می‌شوند. پارامترهای موثر در این تحقیق در رابطه (۲) و پارامترهای بی‌بعد در روابط بعدی ارائه شده است.

$$f(\sigma, g, \rho, \mu, \theta_0, V_0, D, P, H, X) = 0 \quad (2)$$

در معادله فوق، H هد (ارتفاع آب) گذرنده از روی سد، D عرض مقطع خروجی جریان ریزشی، V_0 سرعت اولیه جریان پرتابی و θ_0 زاویه اولیه جریان ریزشی از افق، ρ جرم مخصوص سیال، μ لزجت دینامیکی، P ارتفاع محل ریزش از سطح زمین، X فاصله محل تشکیل حفره آبشستگی از بدنه سد، g شتاب ثقل و σ کشش سطحی می‌باشد.

با انتخاب پارامترهای ρ و V_0 و D به عنوان پارامترهای تکرارشونده، پارامترهای بدون بعد برای محل تشکیل حفره آبشستگی به شکل زیر به دست می‌آید.

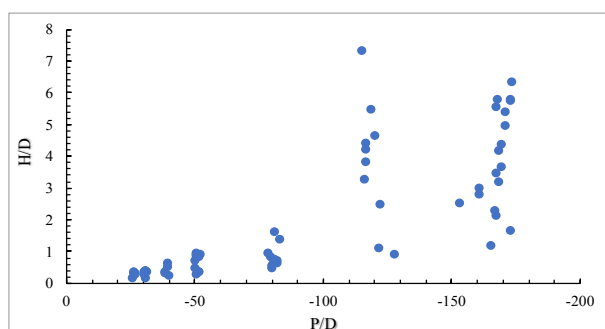
$$f' \left(\frac{\mu}{\rho V_0 D}, \frac{\sigma}{\rho V_0^2 D}, \frac{Dg}{V_0^2}, \frac{P}{D}, \frac{H}{D}, \frac{X}{D}, \theta_0 \right) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{X}{D} = f' \left(\frac{\mu}{\rho V_0 D}, \frac{P}{D}, \frac{\sigma}{\rho V_0^2 D}, \frac{Dg}{V_0^2}, \frac{H}{D}, \theta_0 \right) \quad (4)$$

از آنجایی که پارامتر بدون بعد θ_0 (زاویه اولیه جت از افق) در تحقیق حاضر ثابت در نظر گرفته شده است، بنابراین با توجه به فاکتورهای متغیر در این تحقیق معادله نهایی به فرم معادله زیر ارائه می‌شود.

نتایج و بحث

در این پژوهش، ابتدا جریان خروجی از سرریز لبه پهن مستطیلی نصب شده بر روی یک مخزن در ارتفاع حدود ۲ متری به صورت آزمایشگاهی بررسی شده و سپس با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، توانایی شبکه‌های عصبی مصنوعی و مدل‌های درختی (مدل درختی M5) در برآورد مختصات تشکیل حفره آبشستگی بررسی شد. همچنین لازم به توضیح است حدود ۶۵ سری آزمایش در مطالعه حاضر انجام شد. در تحقیق حاضر، پارامتر وابسته محل تشکیل حفره آبشستگی بر حسب دو پارامتر مستقل دیگر (P/D و H/D) تعریف می‌شوند. در شکل (۴) توزیع این آزمایش‌ها در فضای دو بعدی P/D و H/D مشخص شده است. در این شکل H هد گذرنده از روی سد، D عرض مقطع خروجی جریان ریزشی و P ارتفاع ریزش می‌باشد.

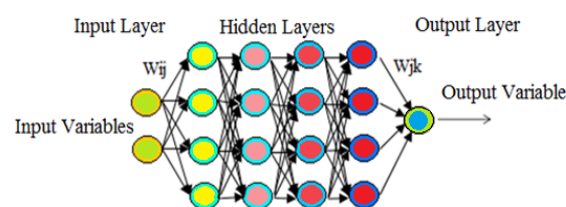


شکل ۴- توزیع داده‌های تحقیق حاضر در فضای دو بعدی P/D و H/D

• تحلیل داده‌های آزمایشگاهی

در شکل (۵-الف و ب) محدوده تغییرات محل تشکیل حفره آبشستگی (در جریان ریزشی از سرریز لبه پهن مستطیلی) نسبت به H/D و همچنین نسبت به P/D با استفاده از داده‌های به دست آمده از آزمایشات تحقیق حاضر ارائه شده است. باتوجه به شکل (۵-الف) مشاهده می‌شود با افزایش نسبت H/D مقدار X/D افزایش پیدا می‌کند. به بیان دیگر برای یک عرض ثابت، با افزایش هد گذرنده از روی سد (افزایش جریان عبوری از داخل سرریز)، فاصله محل تشکیل حفره آبشستگی از بدنه سد بیشتر می‌شود. همچنین باتوجه به شکل (۵-ب) مشاهده می‌شود در ارتفاع ریزش‌های کمتر، فاصله محل تشکیل حفره آبشستگی از بدنه سد کم می‌باشد. لازم به توضیح است شکل (۵-ب) برای یک هد گذرنده از روی سد ثابت رسم نشده است، به همین دلیل برای یک P/D ثابت، چندین X/D مختلف وجود دارد. تغییرات محل تشکیل حفره آبشستگی نسبت به P/D پراکندگی بیشتری دارد (در مقایسه با متغیر H/D) و به نظر می‌رسد علاوه بر متغیر P/D عامل

مقدار اولیه بوده که یا توسط مقادیری اتفاقی و یا توسط نتایج آزمایشگاهی پیشین، مقاداردهی می‌شوند. اساساً ایجاد ساختار مناسب شبکه در یک مسئله، توسط سه مرحله تثبیت ساختار، آموزش شبکه و کنترل شبکه انجام می‌گیرد (شریف زاک و بارانی، ۱۳۹۰). در این تحقیق برای مدل‌سازی شبکه عصبی مصنوعی از نرم‌افزار Neuro Solutions 5 با چهار لایه پنهان، هر لایه حاوی ۴ نرون و تابع فعال‌ساز ورودی $Tanh$ و تابع انتقال خروجی $Tanh$ Linear استفاده شده است. در شکل (۳) فایبی از ساختار کلی شبکه عصبی مصنوعی به کار گرفته شده در این تحقیق ارائه شده است.



شکل ۳- ساختار کلی شبکه عصبی مصنوعی (ANN) در تحقیق حاضر

• مدل درختی M5

مدل درختی M5 زیر مجموعه‌ای از روش‌های یادگیری ماشینی و داده‌کاوی است. داده‌کاوی به فرآیند جست‌وجو و کشف مدل‌های گوناگون، مختصرسازی‌ها و پیش‌بینی داده‌ها از مجموعه‌ای از داده‌های معلوم گفته می‌شود (کانتاردزیک، ۱۳۹۲). روش‌های داده‌کاوی برای مجموعه داده‌های بزرگ با متغیرهای زیاد ساخته شده‌اند، بنابراین با روش‌های آماری قدیمی که برای مجموعه داده‌های کوچک با متغیرهای اندک طراحی شده‌اند متفاوت هستند. روش‌های بر مبنای درخت^{۱۲} کی از تکنیک‌های داده‌کاوی است که در این روش‌ها خروجی به صورت یک مدل با سازه درختی با استفاده از داده‌های ورودی و خروجی می‌باشد. مدل M5 یک مدل درختی برای پیش‌بینی صفات عددی پیوسته است که در آن توابع رگرسیونی خطی در برگ‌های این درخت ظاهر می‌شوند (Pal، ۲۰۰۶). در سال‌های اخیر تحول قابل توجهی در مسائل طبقه‌بندی و پیش‌بینی ایجاد نموده است. نتایج مدل درختی برای فهم و شبیه‌سازی آسان هستند و خروجی مدل دقت بالایی دارد که می‌توان آن را با سایر مدل‌ها مقایسه کرد، مدل درختی می‌تواند در مسائل گوناگون مورد استفاده محققین قرار گیرد (فلاحی و همکاران، ۱۳۹۰). در این تحقیق جهت مدل‌سازی روش M5 از گزینه M5P نرم‌افزار WEKA که در دانشگاه Waikato نیوزلند (Hall و همکاران، ۲۰۰۹) توسعه داده شده، استفاده شده است.

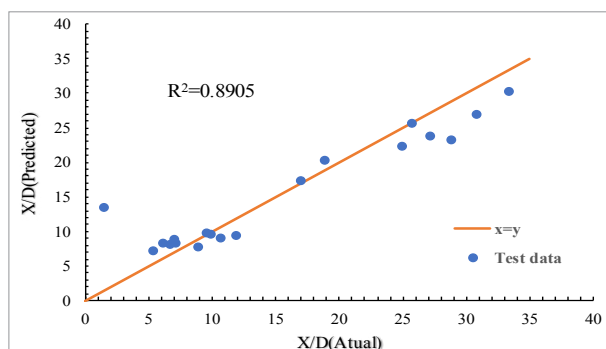
• مدل رگرسیونی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی

در تحقیق حاضر نسبت به برازش روابط مختلفی برای پیش‌بینی محل تشکیل حفره آبستگی اقدام شد که در نهایت روابط موجود در جدول (۲) برای محاسبه محل تشکیل حفره آبستگی ارائه شدند.

جدول ۲- روابط ارائه شده در تحقیق حاضر برای محاسبه محل تشکیل حفره آبستگی (خروجی از نرم‌افزار SPSS)

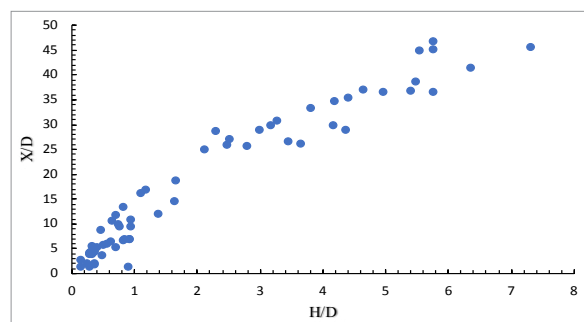
معادله	R ²	%RE
$\frac{X}{D} = \frac{(-H/D)^2}{9.81 \times P/D} + 7.99 \times \frac{H}{D}$	۰/۹۳۳۶	۱۳/۵
$\frac{X}{D} = 5.66 \times \frac{H}{D} - 0.057 \times \frac{P}{D} + 0.398$	۰/۹۵۲۷	۸
$\frac{X}{D} = 5.69 \times \frac{H}{D} + 0.0003 \times \left(\frac{P}{D}\right)^2 + 2.48$	۰/۹۴۶۷	۷/۵
$\frac{X}{D} = 7.59 \times \frac{H}{D} - 0.075 \times \frac{P}{D} + 0.014 \times \frac{H \times P}{D^2} - 1.23$	۰/۹۵۶	۶

باتوجه به جدول (۲)، رابطه (۱۱) با خطای ۶ درصدی نسبت به داده‌های آزمایشگاهی می‌تواند محل تشکیل حفره آبستگی را پیش‌بینی نماید، درحالی‌که معادله پرتابه (رابطه ۱) با حدود ۲۰ درصد خطا محل تشکیل حفره آبستگی را پیش‌بینی می‌کند. لازم به توضیح است روابط ارائه شده در جدول (۲)، برای Hهای بزرگتر از صفر برازش داده شده‌اند و در محدوده آزمایشات تحقیق حاضر معتبر می‌باشند. همچنین برای هد برابر با صفر، مقدار فاصله محل حفره آبستگی از بدنه سد برابر با صفر می‌باشد. علاوه بر پارامترهای آماری ارائه شده در جدول (۲)، در شکل (۷) برای بررسی دقت معادلات رگرسیونی ارائه شده در تحقیق حاضر، نمودار پراکندگی داده‌ها برای رابطه (۱۱) نیز رسم شده است. لازم به توضیح است که مشخصات آماری ارائه شده در جدول (۲) برای کل داده‌ها بوده ولی نمودار شکل (۷) برای ۳۰ درصد از داده‌ها (داده‌های آزمون) رسم شده است.

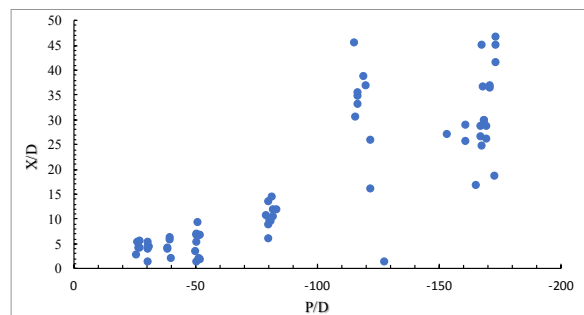


شکل ۷- نمودار پراکندگی داده‌ها برای رابطه ۱۱

دیگری بر محل تشکیل حفره آبستگی تأثیرگذار بوده است. لذا فرض تک متغیره بودن تابع X/D قابل پذیرش نخواهد بود و باید از توابع چند متغیره بهره برد. در جدول (۱) خصوصیات آماری برای داده‌های مورد استفاده در این تحقیق و در شکل (۶) توزیع داده‌ها برای هر یک از پارامترهای بی‌بعد و پارامتر هدف ارائه شده است.



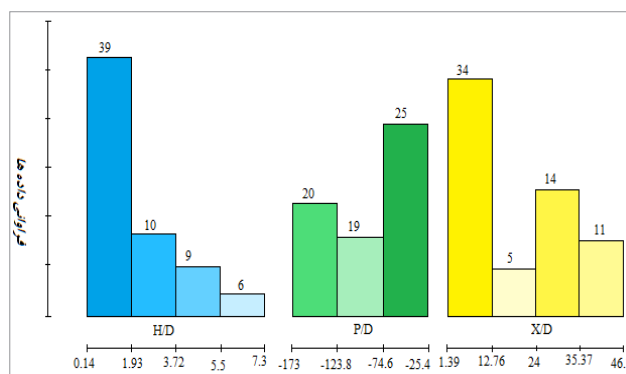
شکل ۵ الف- تغییرات محل تشکیل حفره آبستگی نسبت به H/D



شکل ۵ ب- تغییرات محل تشکیل حفره آبستگی نسبت به P/D

جدول ۱ - خصوصیات آماری داده‌های مورد استفاده در این تحقیق

آماره	H/D	P/D	X/D
میانگین	۲/۰۵	-۹۶/۱۷	۱۷/۶
حداقل	۰/۱۴	-۱۷۲/۹	۱/۳۸
حداکثر	۷/۲۹	-۲۵/۴	۴۶/۷
انحراف معیار	۲/۰۰۳	۵۴/۶۲	۱۴/۲۸



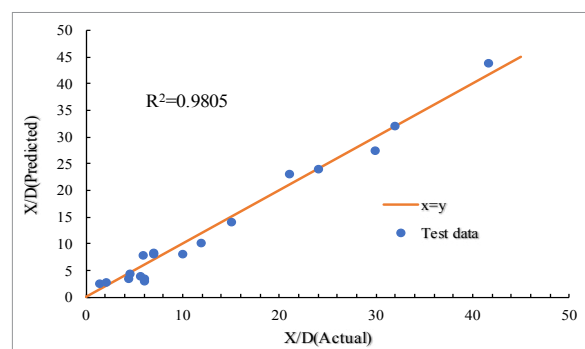
شکل ۶ - توزیع داده‌ها بر اساس H/D, P/D و X/D

• مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی

در تحقیق حاضر از شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی محل تشکیل حفره آبشستگی استفاده شده است. لازم به توضیح است روش شبکه عصبی مصنوعی با تعداد لایه‌های پنهان متفاوت و توابع انتقال متفاوت و همچنین تعداد نرون‌های متفاوت در هر لایه امتحان شد و بهترین نتایج مربوط به هر تعداد لایه در جدول شماره (۳) نشان داده شده است که از بین این نتایج بهترین نتیجه مربوط به تعداد لایه‌های پنهان ۴ با تعداد نرون‌های ۴ در هر لایه با توابع انتقال ورودی و خروجی مشخص شده در جدول (۳) می‌باشد. ضمناً ۷۰ درصد داده‌ها برای مرحله آموزش و ۳۰ درصد بقیه به صورت تصادفی برای مرحله آزمون به کار رفتند. باتوجه به این جدول مشاهده می‌شود که بهترین نتیجه مربوط به تعداد لایه‌های پنهان ۴ با تعداد نرون‌های ۴ در هر لایه با توابع انتقال ورودی و خروجی مشخص شده در جدول (۳) می‌باشد. در شکل (۸) نمودار پراکندگی داده‌ها برای آزمون خروجی از مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی ارائه شده است.

جدول ۳- نتایج بررسی حالات مختلف در روش شبکه عصبی مصنوعی

تعداد لایه پنهان	تعداد نرون در هر لایه	تابع انتقال لایه‌ها	تابع انتقال خروجی	R ² (test)
۱	۴	Tanh	LinearTanh	۰/۹۵
۲	۴, ۴	Tanh	LinearTanh	۰/۹۷۵۹
۳	۴, ۴, ۴	Tanh	LinearTanh	۰/۹۷۸۸
۴	۴, ۴, ۴, ۴	Tanh	LinearTanh	۰/۹۸۰۵



شکل ۸- نمودار پراکندگی داده‌های استخراجی از شبکه عصبی مصنوعی برای داده‌های آزمون

باتوجه به شکل (۸) مشاهده می‌شود که داده‌های آزمون در نزدیکی نیم‌ساز ناحیه اول واقع شده‌اند و مقدار ضریب تبیین بالایی دارند. این نمودار نشانگر دقت بالای هوش مصنوعی در پیش‌بینی محل

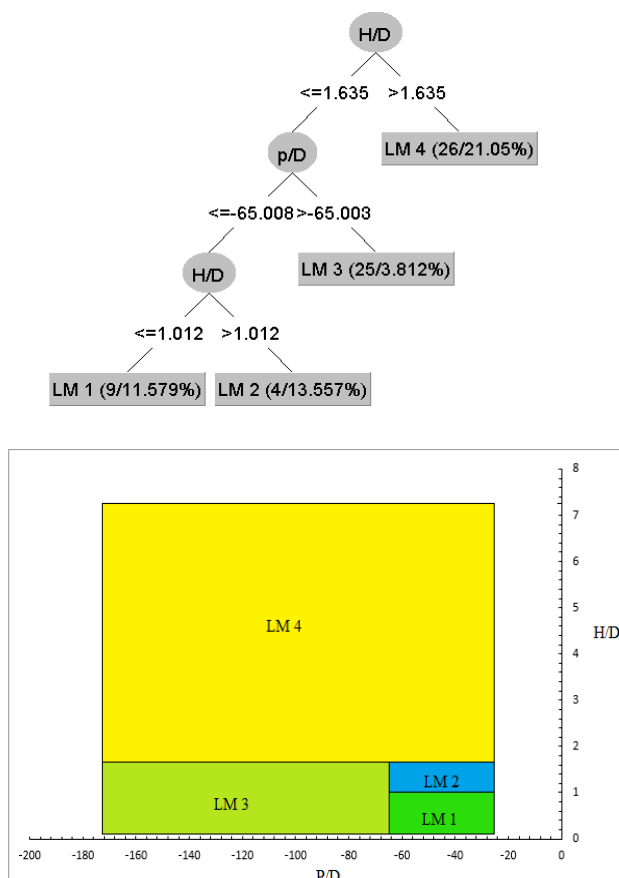
تشکیل حفره آبشستگی می‌باشد.

• مدل درختی M5 با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی

در تحقیق حاضر از مدل درختی M5P که یکی از مدل‌های پیش‌بینی در نرم‌افزار Weka می‌باشد برای تخمین محل تشکیل حفره آبشستگی استفاده شده است. در جدول (۴) روابط خطی ارائه شده توسط مدل درختی M5P و همچنین نمودار درختی مدل M5P نشان داده شده است. همچنین در شکل (۹) محدوده اعمال این روابط به صورت واضح نشان داده شده است.

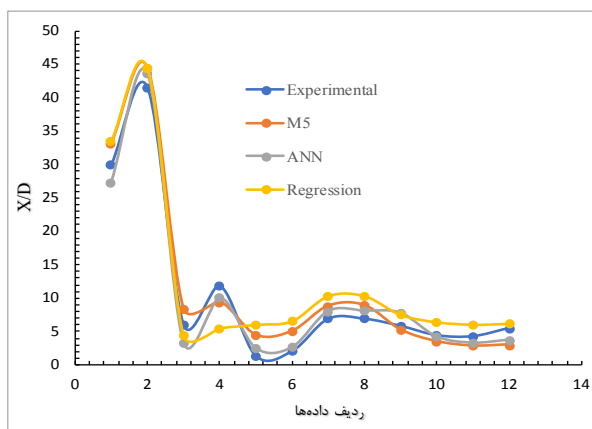
جدول ۴- روابط خطی ارائه شده به وسیله مدل درختی M5P و درخت مدل

شماره رابطه	معادله
LM 1	$\frac{X}{D} = 6.76 \times \frac{H}{D} - 0.003 \times \frac{P}{D} + 3.98$
LM 2	$\frac{X}{D} = 6.05 \times \frac{H}{D} - 0.03 \times \frac{P}{D} + 2.65$
LM 3	$\frac{X}{D} = 8.24 \times \frac{H}{D} - 0.03 \times \frac{P}{D} + 2.47$
LM 4	$\frac{X}{D} = 4.98 \times \frac{H}{D} - 0.02 \times \frac{P}{D} + 9.13$



شکل ۹- محدوده روابط استخراجی از نرم‌افزار Weka

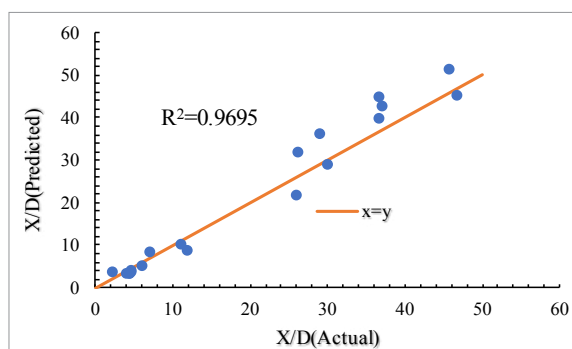
باتوجه به جدول (۵) مشاهده می شود روش شبکه های عصبی مصنوعی (ANN) بیشترین R^2 و کمترین RMSE را دارد که نسبت به دو روش مدل درختی M5P و روش رگرسیونی بهترین پیش بینی را در محل تشکیل حفره آبستگی دارد. اما این نکته نیز قابل توجه است که خروجی روش شبکه های عصبی مصنوعی به شکل یک رابطه یا گراف نیست و لذا نمی تواند برای طراحان و مجریان امر مفید باشد. به بیان دیگر، به ترتیب روش مدل درختی و روش رگرسیونی با دقت قابل قبولی می توانند محل تشکیل حفره آبستگی را پیش بینی نمایند و باتوجه به خروجی آن ها، می تواند برای طراحان مفید باشد. معادله پرتابه نیز هرچند در عمل استفاده می شود اما خطای زیادی نسبت به داده های آزمایشگاهی دارد. باتوجه به این نکته که معادله پرتابه در شرایط خلاء استخراج شده است، این خطای زیاد می تواند ناشی از تأثیر مقاومت هوا بر مسیر جت های ریزی و در نهایت بر مختصات محل تشکیل حفره آبستگی باشد. بنابراین توصیه می شود در طراحی ها به این نکته بیشتر توجه شود. شکل (۱۱) برای نشان دادن تشابه بالای سه روش مدل درختی، شبکه های عصبی مصنوعی و روابط رگرسیون خطی با نتایج آزمایشگاهی در پیش بینی محل تشکیل حفره آبستگی نشان داده شده است.



شکل ۱۱- انطباق نتایج به دست آمده از روش های مختلف در پیش بینی محل تشکیل حفره آبستگی

باتوجه به شکل (۱۱) مشاهده می شود روش شبکه های عصبی مصنوعی و مدل درختی بیشترین تشابه را در پیش بینی محل تشکیل حفره آبستگی دارند. لازم به توضیح است داده های مورد استفاده در نمودار شکل (۱۱) به نحوی انتخاب شده اند که هر ۴ رابطه پیشنهادی در مدل درختی M5P در استخراج این نمودار موثر هستند. در شکل (۱۲) پارامترهای موثر در محل تشکیل حفره آبستگی با استفاده از داده های آزمایشگاهی و به صورت منحنی های کنترولی در محیط از نرم افزار Surfer بررسی شده است. با داشتن این منحنی می توان محل تشکیل حفره آبستگی

در نرم افزار Weka برای استخراج نتایج به دست آمده از مدل درختی M5P از ۷۰ درصد داده ها برای آزمون شبکه و از ۳۰ درصد داده ها برای تست شبکه استفاده شده است. لازم به توضیح است که انتخاب داده های آزمون و آموزش توسط خود نرم افزار و به صورت تصادفی از بین کل داده ها انجام می شود. نمودار شکل (۱۰) پراکندگی داده ها را برای داده های آزمون نشان می دهد. باتوجه به این شکل مشاهده می شود داده های آزمون در نزدیکی نیم سازه ناحیه اول واقع شده اند و مقدار ضریب تبیین بالایی دارند. این غوار نشانگر دقت بالای مدل درختی M5P در پیش بینی محل تشکیل حفره آبستگی است.



شکل ۱۰- نمودار پراکندگی داده ها استخراجی از مدل درختی M5P برای داده های آزمون

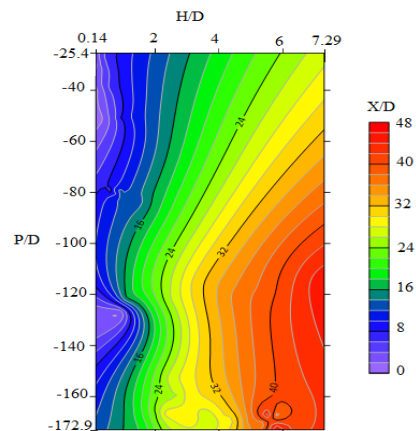
مقایسه مدل های ارائه شده در تحقیق حاضر

همانطور که قبلاً اشاره شد، در تحقیق حاضر با استفاده از داده های آزمایشگاهی ضمن ارائه روابط مختلفی برای پیش بینی محل تشکیل حفره آبستگی، توانایی شبکه ها عصبی مصنوعی و مدل درختی M5 نیز در پیش بینی آن بررسی شده است. طراحان در عمل برای محاسبه محل تشکیل حفره آبستگی از معادله پرتابه استفاده می کنند. همانطور که در بخش مقدمه ذکر شد، برای محاسبه محل تشکیل حفره آبستگی از رابطه (۱) استفاده می شود. با تجزیه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی میزان خطای معادله پرتابه در تخمین محل تشکیل حفره آبستگی نیز اندازه گیری شد. در جدول (۵) مقایسه ای بین ۳ روش ارائه شده در تحقیق حاضر و همچنین معادله پرتابه انجام شده است.

جدول ۵- نتایج حاصل از چهار روش متفاوت در پیش بینی محل تشکیل حفره آبستگی برای داده های آزمون

روش	R^2	RMSE
Projectile Equation	۰/۷۷	۵/۸۶
Regression	۰/۸۹	۳/۸۹
M5P	۰/۹۶	۳/۷۵
ANN	۰/۹۸	۱/۷۵

را در ازای مقادیر مختلف H/D و P/D به دست آورد. لازم به ذکر است نحوه استفاده از منحنی کنتوری شکل (۱۲) به این صورت است که برای یک H/D و P/D مفروض، با وصل کردن این اعداد به صورت عمودی و افقی به هم، می توان محل تشکیل حفره آبشستگی را به دست آورد. باتوجه به این شکل مشاهده می شود منحنی های کنتوری در جهت محور افقی (H/D) بیشتر از محور عمودی (P/D) تغییرات نشان می دهند که این تغییرات نمایانگر عمودی است که تأثیر پارامتر H/D در پیش بینی محل تشکیل حفره آبشستگی بیشتر از P/D است.



شکل ۱۲- منحنی کنتور محل تشکیل حفره آبشستگی به ازای تغییر H/D و P/D

بخش مدل رگرسیونی ($R^2=0.89$ و $M5: R^2=0.96$) استفاده شود. همچنین نتایج نشان داد موثرترین پارامتر در تخمین محل تشکیل حفره آبشستگی، هد گذرنده از روی سازه می باشد. علاوه بر این، نتایج داده های آزمایشگاهی و نتایج حاصل از بررسی معادله پرتابه نشان دادند، با افزایش هد گذرنده از روی سازه، فاصله محل تشکیل حفره آبشستگی از بدنه سازه بیشتر می شود.

پی نوشت

- 1-Splitters
- 2-Data mining
- 3-Artificial Neural Network (ANN)
- 4-Fuzzy Logic
- 5-Rule Based Expert systems
- 6-Decision Extraction
- 7-Machine Learning systems
- 8-Clustering
- 9-Decision Tree
- 10-Root Mean Square Error
- 11-Feed Forward Network
- 12-Tree-Based Methods

منابع

- حسینی، خسرو، نوحاسته، حامد، کرمی، حجت، و سلامتیان، سید امین. (۱۳۹۵). مطالعه عددی آبشستگی بت ریزشی آزاد. مهندسی عمران فردوسی، ۲۸(۲)، ۹-۲۲. doi: [10.22067/civil.v28i2.36669](https://doi.org/10.22067/civil.v28i2.36669)
- سلماسی، فرزین، نهرین، فرناز، و طاهری اقدم، علی. (۱۴۰۱). استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و مدل درختی M5 برای تعیین ضریب دبی سرریز لبه پهن مستطیلی. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۵۴(۱۲)، ۴۴۳۵-۴۴۵۸. doi: [10.22060/ceej.2022.18990.7021](https://doi.org/10.22060/ceej.2022.18990.7021)
- شریف زاک، مسعود، و بارانی، غلام عباس. (۱۳۹۰). پیش بینی دبی جریان در کانال های مرکب با استفاده از الگوریتم شبکه های عصبی. اولین کنفرانس ملی عمران توسعه. دانشگاه آزاد اسلامی زیباکنار، رشت، ایران.
- صبا، حمیدرضا، کمالیان، محسن، و رئیس زاده، احسان. (۱۳۹۷). تعیین آستانه لغزش پایداری شیروانی و بهینه یابی حجم عملیات خاکریزی سد خاکی همگن با استفاده از ترکیب شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۵۰(۴)، ۷۴۷-۷۵۴. doi: [10.22060/ceej.2017.11051.4965](https://doi.org/10.22060/ceej.2017.11051.4965)

نتیجه گیری

پدیده فرسایش یکی از مسائل اساسی در سازه های آبی است که در بسیاری از موقعیت ها امکان رخداد آن وجود دارد. برخورد بت آب خارج شده از خروجی سازه های هیدرولیکی، به ویژه سدها، با کف رودخانه در پایین دست این سازه ها سبب فرسایش و جابه جایی مصالح بستر رودخانه می شود. این امر اثرات منفی بسیاری می تواند به دنبال داشته باشد که در رأس آن ها ناپایداری بدنه سد و در نتیجه احتمال تخریب آن در اثر گسترش ابعاد حفره آبشستگی می باشد. پیش بینی و تخمین صحیح مختصات تشکیل حفره آبشستگی می تواند کمک شایانی به طراحان در جانمایی دقیق حوضچه آرامش داشته باشد. در تحقیق حاضر موقعیت تشکیل حفره آبشستگی به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. نتایج نشان داد بیشترین دقت در پیش بینی محل تشکیل حفره آبشستگی مربوط به روش شبکه های عصبی مصنوعی ($R^2=0.98$) و کمترین دقت برای روش استخراج مختصات محل تشکیل حفره آبشستگی با استفاده از معادله پرتابه ($R^2=0.77$) می باشد. باتوجه به خروجی روش مدل درختی M5P پیشنهاد می شود از این روش و همچنین معادلات ارائه شده در

- Salmasi, F., Nouri, M., Sihag, P. & Abraham, J. (2021). Application of SVM, ANN, GRNN, RF, GP and RT models for predicting discharge coefficients of oblique sluice gates using experimental data, *Water Supply*, 21(1), 232–248. <https://doi.org/10.2166/ws.2020.226>
- Solomatine, D.P., & Xue, Y. (2004). M5 model trees and neural networks: Application to flood forecasting in the upper reach of the Huai River in China. *Journal of Hydrologic Engineering*, 9, 491–501. doi: [10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2004\)9:6\(491\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2004)9:6(491))
- United States Bureau of Reclamation (USBR). (1960). Design of small dams. United States Department of the Interior, United States Government Printing Office. 1st Ed. Denver, 282–291.
- طاهری اقدم، علی، نورانی، بهرام، ارونقی، هادی، و سلماسی، فرزین. (۱۴۰۰). محاسبه ارتفاع آبشار در پایین دست سرریزهای اوجی جهت کنترل پرش هیدرولیکی. مدل سازی و مدیریت آب و خاک، ۱۱(۱)، ۱۲-۱. doi: [10.22098/MMWS.2021.1174](https://doi.org/10.22098/MMWS.2021.1174)
- فلاحی، محمد رضا، وروانی، هادی، و گلیان، سعید. (۱۳۹۰). پیش بینی بارش با استفاده از مدل رگرسیون درختی به منظور کنترل سیل. پنجمین کنفرانس سراسری آبخیزداری و مدیریت منابع آب و خاک کشور. انجمن مهندسی آبیاری و آب ایران، کرمان، ایران.
- کانتاردزیک، مهمد. (۱۳۹۲). داده کاوی. مترجم: امیر علیخوان زاده. انتشارات علوم رایانه. چاپ اول. مشهد، ایران.
- Bhattacharya, B., & Solomatin, D.P. (2004). Neural networks and M5 model trees in modeling water level-discharge relationship. *Neurocomputing*. 63, 381-396. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2004.04.016>
- He, Y., Zhu, D.Z., Zhang, T., Shao, Y., & Yu, T. (2017). Experimental observations on the initiation of sand-bed erosion by an upward water jet. *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(7). 06017007. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001302](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001302)
- Hall, m., Frank, E., Holmes, G., Pfahringer, B., Reutemann, P., & Witten, L.H. (2009). The WEKA Data Mining Software: An Update. *ACM SIGKDD Explorations Newsletter*, 11(1), 10-18.
- Karamigolbaghi M., Ghaneizad S.M., Atkinson J.F., Bennett S.J. and Wells R.R. (2017). Critical assessment of jet erosion test methodologies for cohesive soil and sediment. *Geomorphology*, 295, 529-536. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.08.005>
- Mason P.J. (1983). Energy dissipating crest splitters for concrete dams, *Water Power and Dam Construction*, 35(10), 37-40.
- Pagliara, S., Roy, D., & Palermo, M. (2009). 3D plunge pool scour with protection measures, *Journal of Hydro-environment Research.*, 4, 225-233. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2009.10.014>
- Pal, M., (2006). M5 model tree for land cover classification. *International Journal of Remote Sensing*, 27(4), 825-831. <https://doi.org/10.1080/01431160500256531>
- Sattari, M.T., Anli, A.S, Apaydin, H. & Kodali, S. (2012). Decision trees to determine the possible drought periods in Ankara. *Atmosfera*, 25, 65-83.

The Use of Silver Nanoparticles (Ag-NPs) in Water Disinfection in Aquaculture Systems and the Effects of Its Release in the Environment

A.R. Radkhah^{1*}, S. Eagderi²

1,2-Ph.D. Graduate and Associate Professor, Department of Fisheries, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

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

Received: 23-01-2023

Revised: 05-04-2023

Accepted: 03-05-2023

Available Online: 21-09-2023

کاربرد نانوذرات نقره (Ag-NPs) در میکروب زدایی آب در سیستم‌های پرورش آبزیان و اثرات ناشی از رهایش آن در محیط

علیرضا رادخواه^{۱*}، سهیل ایگدری^۲

۱-۲- به ترتیب دانش‌آموخته دکتری و دانشیار، گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

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

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۱/۱۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۶/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۳

Abstract

The present research was conducted in order to investigate the role of silver nanoparticles (Ag-NPs) in water disinfection in aquaculture systems and also the environmental effects caused by its release in the environment. The literature review showed that very few studies have been recorded about the antiviral effects of silver nanoparticles in aquaculture systems. Meanwhile, silver nanoparticles showed positive effects against many bacterial pathogens such as *Aeromonas* and *Vibrio* as well as fungal agents such as *Aspergillus* and *Candida*. Since the mentioned microbial strains are among the most important and common pathogenic agents in Iran's breeding systems, the use of silver nanoparticles with the appropriate amount (provided that more than not allowed) can be useful. Examination of various scientific sources showed that the safe and permissible level of silver nanoparticles has been studied in many farmed fish species, including rainbow trout, silver carp, common carp and zebra fish. Considering this issue, breeders can use these substances to control and prevent the spread of infectious diseases in breeding systems, considering the safe and permissible level of silver nanoparticles for each aquatic species. Based on the comparisons, the antimicrobial effects of silver nanoparticles are very high among metal nanoparticles. In general, the release of these substances into aquatic ecosystems can affect the health of many aquatic animals, including fish, and even have negative effects on human health due to the transfer of silver nanoparticles in the food chain.

Keywords: Silver Nanoparticles, Aquaculture, Fish, Toxicity, Antibacterial Properties.

چکیده

تحقیق حاضر به منظور بررسی نقش نانوذرات نقره (Ag-NPs) در میکروب‌زدایی آب در سیستم‌های آبزی‌پروری و همچنین اثرات زیست‌محیطی ناشی از رهایش آن در محیط، صورت گرفت. بررسی‌ها نشان داد که مطالعات بسیار اندکی پیرامون اثرات ضدویروسی نانوذرات نقره در سیستم‌های پرورشی آبزیان ثبت شده است، این در حالی است که نانوذرات نقره در برابر بسیاری از عوامل بیماری‌زای باکتریایی مانند *Aeromonas* و *Vibrio* و همچنین، عوامل قارچی مانند *Aspergillus* و *Candida*، تأثیرات مثبتی نشان دادند. از آنجایی‌که سویه‌های میکروبی مذکور، از مهم‌ترین و شایع‌ترین عوامل بیماری‌زا در سیستم‌های آبزی‌پروری ایران به‌شمار می‌روند، استفاده از نانوذرات نقره با مقدار مناسب (به شرطی که بیش از حد مجاز نباشد) می‌تواند مفید باشد. بررسی منابع علمی مختلف نشان داد که سطح ایمن و مجاز نانوذرات نقره در بسیاری از گونه‌های پرورشی ماهی از جمله قزل‌آلای رنگین‌کمان، کپور نقره‌ای، کپور معمولی و ماهی گورخری مورد مطالعه قرار گرفته است. با نظر به این موضوع، پرورش‌دهندگان می‌توانند با توجه به سطح ایمن و مجاز نانوذرات نقره برای هر کدام از گونه‌های آبزی، از این مواد به‌منظور کنترل و پیشگیری از شیوع بیماری‌های عفونی در سیستم‌های پرورشی استفاده نمایند. بر اساس مقایسه‌های انجام شده، اثرات ضد میکروبی نانوذرات نقره در بین نانوذرات فلزی بسیار بالا است. با توجه به این مسأله، رهایش این مواد به درون اکوسیستم‌های آبزی می‌تواند سلامت بسیاری از آبزیان از جمله ماهیان را تحت تأثیر قرار دهد و حتی به‌واسطه انتقال نانوذرات نقره در زنجیره غذایی، اثرات منفی بر سلامت انسان داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: نانوذرات نقره، آبزی‌پروری، ماهیان، سمیت، خواص ضدباکتریایی.

آئروژینوزا (*Pseudomonas aeruginosa*) با حضور یک میکروگرم در میلی لیتر یون‌های نقره، مهار می‌شود.

در چند دهه گذشته، نانوذرات حاصل از فلزات نجیب مانند نقره خواص فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی قابل توجهی در مقایسه با همتایان خود نشان داده‌اند (Abou El-Nour, ۲۰۱۰). براساس مطالعات Kim و همکاران (۲۰۰۷) و Soltani و همکاران (۲۰۰۹)، امروزه چندین نوع از ترکیبات نقره از قبیل نیترات نقره، ژئولیت نقره و نانوذرات نقره برای طیف قابل توجهی از اهداف ضد میکروبی استفاده می‌شوند. Kathiresan و همکاران (۲۰۱۰) اظهار کردند که نانوذرات نقره (AgNP) از لحاظ تاریخی برای کنترل میکروبی مورد استفاده قرار گرفته‌اند و اثرات ضد میکروبی آن‌ها حتی در برابر باکتری‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک در شرایط برون‌تنی^۲ نشان داده شده است. از این‌رو کاملاً اثبات شده است که این مواد برای میکروارگانیسم‌ها بسیار سمی هستند و به‌عنوان ترکیبات ضدباکتری استفاده می‌شوند (Sivaramasamy و همکاران، ۲۰۱۶؛ Kathiresan و همکاران، ۲۰۱۰). Zorraquín-Peña و همکاران (۲۰۲۰) نیز بیان داشتند که نانوذرات نقره به دلیل برخورداری از خاصیت ضد میکروبی به‌طور گسترده در زمینه‌های پزشکی و بیوتکنولوژی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از این نظر، مطالعات متعددی پیرامون اثربخشی این مواد در جلوگیری از رشد باکتری‌های بیماری‌زا از قبیل *Proteus vulgaris*، *Streptococcus*، *Staphylococcus aureus*، *Escherichia coli* و *pyogenes* صورت گرفته است.

اثرات زیست‌محیطی نانوذرات نقره از جمله اثرات آن‌ها بر موجودات مختلف در محیط‌های آبی هنوز تا حد زیادی ناشناخته باقی‌مانده است (Sharma و همکاران، ۲۰۱۴). سمیت نانوذرات برای ارگانیسم‌ها به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن‌ها بستگی دارد (Khan و همکاران، ۲۰۱۵). در سیستم‌های آبی، نانوذرات تحت تأثیر دگرگونی‌های فیزیکی و شیمیایی (مانند تجمع، ته‌نشینی) قرار می‌گیرند و از این منظر می‌توانند روی موجودات مختلف در اکوسیستم‌های آبی تأثیر بگذارند. با توجه به این مسأله، توصیف و ارزیابی سرنوشت و رفتار نانوذرات فلزی از جمله نانوذرات نقره در محیط آزمایشی، امری ضروری است. این مسأله زمانی اهمیت فراوانی پیدا می‌کند که سمیت یون‌های نقره (Ag^+) که احتمالاً از نانوذرات نقره آزاد می‌شوند، دلیلی برای نگرانی است؛ چراکه یون‌های Ag^+ به‌عنوان سمی‌ترین شکل نقره در آب در نظر گرفته می‌شوند (Khan و همکاران، ۲۰۱۵). خواص پیچیده و تا حد زیادی ناشناخته نانومواد مانند نانوذرات نقره همراه با فقدان داده‌های کافی پیرامون سمیت این مواد در اکوسیستم‌های آبی موجب شده است که بسیاری از محققان به بررسی تأثیرات زیست‌محیطی این مواد در بسیاری از مناطق بپردازند و سطح ایمن نانوذرات برای گونه‌های مختلف ماهی را تعیین نمایند. از جمله تحقیقات شاخص در این زمینه می‌توان به بررسی سطح

طی سال‌های اخیر، صنعت آبی‌پروری به‌طور قابل توجهی در سراسر جهان توسعه یافته است (Ogunfowora و همکاران، ۲۰۲۱). با این حال، شیوع و گسترش بیماری‌ها از معضلات و چالش‌های عمده در این صنعت مهم به‌شمار می‌رود که بسیار پیچیده است و تاکنون باعث خسارات اقتصادی زیادی در کشورهای مختلف شده است. به‌طور ویژه، آئروموناس (*Aeromonas spp*) و ویبریو (*Vibrio spp*) دو گروه از باکتری‌ها هستند که باعث بیماری در آبزیان آب شیرین و شور می‌شوند. این عوامل میکروبی که در سیستم‌های پرورشی با تراکم بالا و محیط‌های آلوده حضور دارند، به‌راحتی به درون بدن موجود زنده نفوذ کرده و موجب بیماری آبزیان می‌شوند. از این‌رو، بسیاری از ضدعفونی‌کننده‌ها و آنتی‌بیوتیک‌ها برای جلوگیری از اثرات مضر این دو گروه از باکتری‌ها در سیستم‌های آبی‌پروری استفاده می‌شوند (Cu و Khanh، ۲۰۱۹). این درحالی است که در وضعیت فعلی استفاده از مواد شیمیایی و آنتی‌بیوتیک‌ها به دلیل عواقب بسیار از جمله آلودگی محیط زیست، بقایای آنتی‌بیوتیک‌ها در آبزیان و همچنین، مقاومت آنتی‌بیوتیکی که ایجاد می‌کنند (Villella، ۲۰۱۶)، دیگر راهکار بهینه‌ای برای حل معضلات و بیماری‌های زیست‌محیطی در آبی‌پروری نیست. از این‌رو، جستجوی راه‌حلی جدید برای رفع آلودگی‌های محیطی و پیشگیری از بیماری‌ها به یکی از ضروریات در صنعت آبی‌پروری تبدیل شده است (Van و همکاران، ۲۰۱۵؛ Cu و Khanh، ۲۰۱۹).

امروزه، فناوری نانو به‌عنوان یکی از فعال‌ترین حوزه‌های تحقیقاتی در علم مواد به‌شمار می‌رود. نانوذرات دارای خواص کاملاً جدید یا بهبود یافته‌ای هستند که بر اساس ویژگی‌های خاصی مانند اندازه، شکل، ساختار کریستالی و مورفولوژی تعریف می‌شوند (Jahn، ۱۹۹۹). هنگامی که فلزات در ابعاد نانو تعریف می‌شوند، خواص منحصر به فردی از خود نشان می‌دهند. یکی از این فلزات که در سال‌های اخیر در حوزه فناوری نانو مورد توجه قرار گرفته است، فلز نقره^۱ (Ag) می‌باشد. نقره به دلیل خواص فلزی آن مانند رسانایی در صنایع مختلف و همچنین، به دلیل اثر ضد میکروبی آن در علم پزشکی به‌طور گسترده، مورد استفاده قرار می‌گیرد (Alexander، ۲۰۰۹). این فلز در برابر ارگانیسم‌های مختلف، فعالیت ضدباکتریایی از خود نشان می‌دهد و این اثر حتی در غلظت‌های پایین نیز مشاهده می‌شود (Nakamura و همکاران، ۲۰۱۹). موید این موضوع گزارش‌های مستندی است که توسط محققین مختلف در سراسر جهان ارائه شده است. از جمله این گزارش‌ها می‌توان به تحقیقات Alexander (۲۰۰۹) و Nakamura و همکاران (۲۰۱۹) اشاره کرد که بیان داشتند رشد عوامل میکروبی از قبیل اشریشیا کولی (*Escherichia coli*)، استافیلوکوکوس (*Staphylococcus*)، پروویدنسیا (*Providencia*)، سراسیا (*Serratia*) و سودوموناس

ایمن نانوذرات نقره در قزل‌آلای رنگین‌کمان (Johari و همکاران، ۲۰۱۳)، کپور نقره‌ای (Jahanbakhsh و همکاران، ۲۰۱۲)، کپور معمولی (Hedayati و همکاران، ۲۰۱۲) و ماهی گورخری (Choi و همکاران، ۲۰۰۹) اشاره کرد.

با توجه به قرارگیری کشور ایران در یک منطقه خشک و نیمه‌خشک، کنترل و مدیریت منابع آبی به‌عنوان یک اصل مهم، شناخته می‌شود. این امر سبب شده که تصفیه و بازیابی آب در بخش‌های مختلف کشور از قبیل صنعت آبی‌پروری به یک رویکرد ضروری در جهت حفظ و مدیریت منابع آبی کشور تبدیل شود. از این‌رو، در پژوهش حاضر، کاربرد نانوذرات نقره در تصفیه سیستم‌های آبی‌پروری، کنترل عوامل بیماری‌زا و همچنین بهداشت محیط، مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق، در ابتدا توضیحات کلی پیرامون نانوذرات، طبقه‌بندی و سنتز آن‌ها ارائه می‌گردد، سپس، با معرفی نانوذرات نقره، به نقش این مواد در کنترل عوامل میکروبی در سیستم‌های آبی‌پروری اشاره می‌شود. مجموعه این اطلاعات می‌تواند نقش بارز فناوری نانو را در پیشرفت صنعت آبی‌پروری و همچنین، رفاه اجتماعی جامعه منعکس نماید.

نانوذرات

امروزه فناوری نانو به‌عنوان یکی از زمینه‌های مهم در تحقیقات مدرن به‌شمار می‌رود که با طراحی، سنتز و دستکاری ساختارهای ذرات از ۱ تا ۱۰۰ نانومتر سروکار دارند (Jahn، ۱۹۹۹؛ Nikalje، ۲۰۱۵؛ CDC، ۲۰۲۲). تحقیقات نانوذرات در حال حاضر به‌دلیل کاربردهای بالقوه متنوع در زمینه‌هایی مانند مراقبت‌های بهداشتی، آرایشی، غذا و خوراک، بهداشت محیط، مکانیک، اپتیک، علوم زیست‌پزشکی، صنایع شیمیایی، الکترونیک، صنایع فضایی، دارو، تحویل ژن، علم انرژی، اپتوالکترونیک، کاتالیز، ترانزیستورهای تک‌الکترونی، ساطع‌کننده‌های نور و غیره مورد توجه قرار گرفته است (Erdal و Güzel، ۲۰۱۸؛ Zahoor و همکاران، ۲۰۲۱).

• طبقه‌بندی نانوذرات

نانوذرات به انواع معدنی، کربنی و آلی طبقه‌بندی می‌شوند. در ادامه، توضیحات مختصری از هر کدام از نانوذرات ارائه می‌گردد:

۱- نانوذرات مبتنی بر مواد معدنی:

نانوذراتی که در ترکیب خود اتم کربن ندارند، مانند اکسید فلزی و ذرات با اندازه نانو مبتنی بر فلز، به‌عنوان نانوذرات معدنی طبقه‌بندی می‌شوند. نانوذرات فلزی در این دسته قرار می‌گیرند. از جمله فلزات معروف و کاربردی می‌توان به کادمیوم (Cd)، آلومینیوم (Al)، مس (Cu)، کبالت (Co)، طلا (Au)، آهن (Fe)، نقره (Ag)، روی (Zn) و سرب (Pb) اشاره کرد. این دسته از مواد بر اساس اندازه و ویژگی‌های خود از جمله سطح منبسط‌شده، اندازه منافذ، چگالی بار روی سطح،

شکل استوانه‌ای و کروی، رنگ، ساختارهای بی‌شکل و بلوری، دارای خواص منحصر به فردی هستند. لازم به ذکر است که خواص نانوذرات تحت تأثیر عوامل محیطی از جمله هوا، گرما، نور خورشید و رطوبت تغییر می‌یابند (Zahoor و همکاران، ۲۰۲۱).

۲- نانوذرات مبتنی بر مواد آلی (ارگانیک):

نانوذرات مبتنی بر ارگانیک، غیرخطرناک و دوست‌دار محیط‌زیست هستند. فریتین، لیپوزوم‌ها، میسل‌ها و دندریمرها، پلیمرها یا ذرات آلی در اندازه نانو هستند (Jin و همکاران، ۲۰۲۰) که پس از قرار گرفتن در معرض نور و گرما، حساسیت بالایی دارند. به‌دلیل این ویژگی‌های متمایز، نانوذرات مبتنی بر ارگانیک از نظر محققان جایگزین بسیار بهتری برای تحویل دارو هستند. پایداری، توانایی حمل دارو و ویژگی جذب یا به‌دام‌انداختن دارو، این مواد را به‌واسطه‌هایی کارآمد و بالقوه برای تحویل مواد فعال دارو تبدیل می‌کند (Patra و همکاران، ۲۰۱۸). این نانوذرات مورفولوژی، اندازه، شکل و ترکیب سطحی خاصی دارند. نانوذرات ارگانیک به‌منظور تزریق مواد فعال در سیستم دارورسانی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Patra و همکاران، ۲۰۱۸؛ El-Sayed، ۲۰۲۰).

۳- نانوذرات مبتنی بر کربن:

نانوذراتی که اسکلت آن‌ها کاملاً از کربن سازماندهی شده است، به‌عنوان نانوذرات مبتنی بر کربن شناخته می‌شوند (Jeevanandam و همکاران، ۲۰۱۸). از مهم‌ترین نانوذرات مبتنی بر کربن می‌توان به گرافن، فولرن‌ها، نانوالیاف کربنی، نانوله‌های کربنی، کربن سیاه و کربن فعال اشاره کرد (Maiti و همکاران، ۲۰۱۹؛ Zahoor و همکاران، ۲۰۲۱؛ Šlepičková و همکاران، ۲۰۲۱).

ملاحظات اقتصادی در کاربرد ترکیبات نانو

فناوری نانو می‌تواند اثر شگرفی بر حوزه‌های گوناگون اجتماعی از اقتصاد گرفته تا بهداشت، محیط‌زیست، امنیت، رفاه و آموزش بگذارد تا به درک بهتر روابط بین جامعه و این فناوری کمک کرده و روش‌های مناسب برای انسجام بخشیدن به توسعه این فناوری را شناسایی کند. ماهیت فرارشته‌ای فناوری نانو به‌عنوان توانمندی تولید مواد، ابزار و سیستم‌های جدید با دقت اتم و مولکول، موجب تعریف کاربردهای بسیاری در عرصه‌های مختلف علمی و صنعتی شده است (Khan و همکاران، ۲۰۱۵). امیری و بهمنش (۱۳۸۹) در پژوهشی با عنوان «تأثیر فناوری نانو بر جوامع در حال توسعه با نگرش ویژه به ایران» بیان کردند که فناوری نانو کاربردهای بسیاری در حوزه‌های دارو، غذا، بهداشت، درمان بیماری‌ها، محیط‌زیست، انرژی، الکترونیک، رایانه، اطلاعات، مواد، ساخت، تولید، هوافضا، بیوتکنولوژی، کشاورزی، امنیت ملی و دفاع نیز دارد. با توجه به آنچه اشاره شد، فناوری نانو یک حوزه بسیار مهم است که به شدت در رشد اقتصاد و توسعه فضاهای کارآفرینی نقش به‌سزایی ایفا می‌کند.

خواص جدید نانوذرات در طیف گسترده‌ای از زمینه‌های پزشکی، آرایشی، انرژی‌های تجدیدپذیر، اصلاح محیط و دستگاه‌های زیست‌پزشکی مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. در میان نانوذرات، نانوذرات نقره (Ag-NPs) یا نانونقره به دلیل خواص فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی منحصر به فرد خود در مقایسه با هم‌تایان خود در مقیاس ماکرو بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. این ویژگی‌ها باعث می‌شود که نانوذرات نقره از ارزش بالقوه‌ای در میکروالکترونیک و تصویربرداری پزشکی برخوردار باشند. علاوه بر این، نانوذرات نقره طیف وسیعی از فعالیت‌های باکتری‌کشی و قارچ‌کشی را نشان می‌دهند که موجب شده است در بخش متنوعی از محصولات مصرفی، از جمله پلاستیک، صابون، خمیر، مواد غذایی و منسوجات مورد استفاده قرار گیرند و ارزش بازاری آن‌ها را افزایش دهند (García-Barrasa و همکاران، ۲۰۱۱). تا به امروز، کاربرد نانونقره در انواع فرآیندهای تولید و محصولات نهایی ظهور یافته است (Tran و همکاران، ۲۰۱۳).

نانونقره در بسیاری از محصولات مصرفی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، به طوری که کاربردهای مرتبط با نانونقره در حال حاضر بالاترین درجه تجاری‌سازی را دارند. طیف وسیعی از کاربردهای نانونقره در محصولات مصرفی از ضدعفونی کردن دستگاه‌های پزشکی و لوازم خانگی گرفته تا تصفیه آب پدیدار شده است (Tran و همکاران، ۲۰۱۳). در سال‌های اخیر، برخی از نانومواد از قبیل نانوذرات اکسید روی (ZnO)، نانوذرات اکسید آهن (Fe_3O_4)، نانوذرات اکسید قلع (TiO_2)، نانولوله‌های کربنی (CNTs) و نانوذرات نقره (AgNPs)، به منظور مدیریت کیفیت آب در سیستم‌های آبی‌پروری مورد توجه قرار گرفته‌اند.

• **خصوصیات ضد میکروبی سطوح پوشش داده شده با نانوذرات نقره**
سطوح ضد میکروبی یکی از نویدبخش‌ترین نوآوری‌ها برای جلوگیری از عفونت‌های باکتریایی و انتقال باکتری در محیط هستند. ترکیبات مختلف فلزات سنگین، از جمله Ag ، TiO_2 ، Cu_2O ، ZnO و خواص ضد میکروبی دارند؛ زیرا با مهار پمپ‌های پروتون دیواره سلولی، مهار تکثیر و رونویسی DNA و ایجاد آسیب به غشای سلولی، رشد باکتری را مختل می‌کنند. فلز نقره در ۱۰۰۰ سال قبل از میلاد برای جلوگیری از رشد باکتری‌ها و قابل شرب ساختن آب استفاده می‌شد (Sibiya و همکاران، ۲۰۲۲). امروزه نانوذرات فلزی، به ویژه نانوذرات نقره، پتانسیل خود را در کاربردهای مختلف ضد میکروبی از جمله پوشش‌های زیست‌پزشکی و منسوجات نشان داده‌اند (Sharma و همکاران، ۲۰۰۸). آنزیم‌ها را غیرفعال می‌کنند یا می‌توانند با افزایش نفوذپذیری غشا باعث مرگ سلولی شوند و با تغییر ساختار غشا، نانوذرات نقره نیز می‌توانند به عنوان جایگزینی برای درمان ضد میکروبی استفاده شوند (Dube و Okuthe،

نقره کاربردهای صنعتی بسیار زیادی دارد و به عنوان ثروت ذخیره محسوب می‌شود. این فلز دارای ویژگی‌های بسیاری بود که آن را برای مردمان اولیه بسیار ارزشمند کرد. از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به قابلیت چکش‌خواری، انعطاف‌پذیری، براقیت، خاصیت ارتجاعی، رسانایی و ضدباکتریایی آن اشاره کرد. همچنین، از نقره به عنوان یک کالای گران بها در ارزها، زیورآلات، جواهرات، کنتاکت‌های الکتریکی^۲، عکاسی و غیره استفاده می‌شد. اگرچه فلز نقره به طور گسترده به دلیل سطوح و رنگ‌های درخشان خود شناخته شده است، اما با این حال، زمانی که ابعاد این فلز کاهش می‌یابد، تفاوت رنگی شدیدی ایجاد می‌شود (Güzel و Erdal، ۲۰۱۸).

نانونقره (شکل ۱) یکی از رایج‌ترین نانومواد مورد استفاده است که اندازه ذرات آن از ۱ تا ۱۰۰ نانومتر متغیر است (Farouk و همکاران، ۲۰۲۰). این گروه از نانوذرات به دلیل برخورداری از نسبت سطح به حجم بالا و همچنین، قابلیت رسانایی عالی در زمینه‌های شیمی و شاخه‌های مرتبط، به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Khan و همکاران، ۲۰۱۷). نانوذرات نقره جزء ضروری بسیاری از صنایع هستند و از سوئیچ‌های الکتریکی و پنل‌های خورشیدی گرفته تا کاتالیزورهای تولیدکننده مواد شیمیایی و فعالیت ضد میکروبی قابلیت کاربرد دارند (Zahoor و همکاران، ۲۰۲۱). خواص منحصر به فرد این ماده جایگزینی آن را تقریباً غیرممکن می‌کند و کاربردهای آن طیف وسیعی از صنایع را در بر گرفته است. در عین حال، بسیاری از محصولات مصرفی که ادعا می‌کنند دارای نانو مواد هستند، حاوی نانو نقره می‌باشند. از جمله محصولات مصرفی که حاوی نانو نقره می‌باشند، می‌توان به رایانه، تلفن همراه، لوازم خودرو، مواد بسته‌بندی مواد غذایی، مکمل‌های غذایی، منسوجات، لوازم الکتریکی، لوازم خانگی، لوازم آرایشی، تجهیزات پزشکی، تکنیک‌های تصویربرداری، و ضدعفونی‌کننده‌های آب و محیط اشاره کرد. بیشتر این محصولات که حاوی نانو نقره هستند، در آمریکای شمالی، خاور دور، به ویژه در چین، کره جنوبی، تایوان، ویتنام و هند، روسیه و اروپای غربی تولید می‌شوند (Güzel و Erdal، ۲۰۱۸؛ Zahoor و همکاران، ۲۰۲۱). مجموعه اطلاعات فوق کاربرد وسیع نانوذرات نقره را در طیف وسیعی از صنایع نشان می‌دهد.



شکل ۱- نانوذرات نقره (AZOM، ۲۰۲۲)

۲۰۲۳). مزیت استفاده از نانوذرات نقره بر اساس ساختار آن‌ها است. نانوذرات (اندازه ۰/۲ تا ۱۰۰ نانومتر) نسبت سطح به حجم بالایی دارند، بنابراین ذرات کوچک برهم‌کنش خوبی با میکروب‌ها دارند و ساختار فعالیت ضد میکروبی را افزایش می‌دهند. نانوذرات و سطوح پوشش داده‌شده با نانوذرات را می‌توان با روش‌های مختلفی تولید کرد (Muller و همکاران، ۲۰۱۶).

• بهبود کیفیت آب در سیستم‌های آبی‌پروری

استفاده از شیوه‌های نادرست آبی‌پروری، می‌تواند به‌طور مستقیم بر محیط‌زیست تأثیر بگذارد. در این شیوه‌های غیرصحیح به مقادیر زیادی آب نیاز است که این منبع، روز به روز در سراسر جهان کاهش می‌یابد (رادخواه و همکاران، ۱۴۰۰b). همچنین، مصرف نکردن خوراک توسط آبزیان، تولیدات دفعی، مدفوع، محصولات شیمیایی و آنتی‌بیوتیک‌ها، مقادیر زیادی ضایعات را در طول تولید ارگانسیم ایجاد می‌کنند (رادخواه و همکاران، ۱۳۹۹) که در نهایت، ممکن است به محیط پیرامون این سیستم تولیدی رها شود (Márquez و همکاران، ۲۰۱۸).

برای مدت طولانی، بیشترین روشی که به‌منظور بهبود کیفیت آب استفاده می‌شد، تغییر مداوم آب حوضچه‌ها با آب جدید و تازه بود (Chindris، ۲۰۱۰). در این شرایط، حجم آب لازم برای سیستم‌های آبی‌پروری با مقیاس کوچک یا متوسط، می‌تواند به چند صد متر مکعب در روز برسد. در این زمینه، فناوری نانو به راه‌حل‌های نوآورانه‌ای برای ضد عفونی آب با استفاده از نانوذرات نقره، و همچنین، حذف مواد آلی و ضایعات با استفاده از نانوذرات دست یافت (Que و همکاران، ۲۰۱۸). در سال‌های اخیر، تحقیقات مختلفی در مورد نانوذرات مورد استفاده در گندزدایی آب، اجتناب از حضور باکتری‌ها و پاتوژن‌های ویروسی انجام شد که نتایج مثبت آن‌ها گزارش شد. با این حال، این پژوهش‌ها نشان داد که ایجاد تعادل بین هزینه و مزایا در این رویکرد ضروری است، چراکه روش مورد استفاده می‌تواند یک فناوری گران‌قیمت باشد (Márquez و همکاران، ۲۰۱۸).

• خواص ضدباکتریایی نانوذرات نقره

بیماری‌های عفونی یکی از بزرگ‌ترین مشکلات بهداشتی در سراسر جهان هستند. اگرچه، آنتی‌بیوتیک‌های متعددی برای استفاده تجاری در دسترس هستند، اما عمده‌تاً فاقد قدرت در برابر پاتوژن‌های مقاوم به چند دارو^۱ (MDR) هستند که باعث افزایش دوزهای هنگفت آنتی‌بیوتیک‌ها و نیاز به توسعه مداوم آنتی‌بیوتیک‌های جدید می‌شود. اخیراً قدرت نانوذرات فلزی برای کنترل پاتوژن‌های مختلف، هم به‌طور مستقل و هم به‌طور مشترک با آنتی‌بیوتیک‌های موجود ثابت شده است (Farouk و همکاران، ۲۰۲۰). خواص ضد میکروبی نقره (Ag^+) در مطالعاتی که در چندین دهه

صورت گرفت، به‌خوبی آشکار گردید (Farouk و همکاران، ۲۰۲۰). خواص ضد میکروبی نانوذرات نقره از ماهیت شیمیایی یون Ag^+ به شرح زیر ناشی می‌شود: (۱) یون‌های Ag^+ به‌شدت با پپتیدوگلیکان، که دیواره سلولی باکتری را تشکیل می‌دهد، مرتبط می‌شوند (Rai و همکاران، ۲۰۰۹) و از انتقال اکسیژن به داخل سلول برای فلج کردن باکتری‌ها جلوگیری می‌کند. (۲) پس از اینکه یون‌های Ag^+ بر روی غشای سلولی باکتری اثر می‌کنند، به داخل سلول نفوذ می‌کنند و با گروه‌های سولفیدریل مولکول‌های آنزیم متابولیسم اکسیژن واکنش می‌دهند تا آنزیم را غیرفعال کنند (Lee و Jeong، ۲۰۰۵) و در نتیجه تنفس سلولی باکتری را مهار می‌کنند. (۳) یون‌های Ag^+ به پایه مولکول DNA متصل می‌شوند و قدرت فسفات را از کار می‌اندازند و بنابراین از فرآیند همانندسازی DNA جلوگیری می‌کنند (Khanh و Galatage، ۲۰۱۹؛ Cu، ۲۰۱۹ و همکاران، ۲۰۲۱).

نانوذرات نقره (AgNPs) به‌دلیل خواص بیولوژیکی، فیزیکی و شیمیایی منحصر به فردی که از خود نشان می‌دهند، مورد توجه قرار گرفته‌اند. یکی از نقاط قوت نانوذرات نقره در مقابل آنتی‌بیوتیک‌های سنتی، برهم‌کنش آن‌ها با واکنش‌های سلولی مختلف باکتریایی است، به‌طوری‌که مقاومت باکتری‌ها در برابر آن‌ها کم‌تر می‌شود (رادخواه و صادقی‌نژاد ماسوله، ۱۴۰۰؛ رادخواه و همکاران، ۱۴۰۰a). مکانیسم‌های دقیق درباره عملکرد ضدباکتریایی نانوذرات نقره نامشخص است؛ با این وجود، محققان مختلف چندین روش عمل را شناسایی کرده‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به تداخل با دیواره سلولی باکتری، تولید گونه‌های اکسیژن فعال، تولید یون‌های Ag^+ ، و برهم‌کنش با DNA یا رسوب درون سلولی نانوذرات اشاره کرد. علاوه بر این، فعالیت باکتری‌کشی در درجه اول به‌دلیل مهار سنتز نوکلئیک اسید، پروتئین، و دیواره سلولی و همچنین اختلال در سلول‌های میکروبی است (Farouk و همکاران، ۲۰۲۰).

علی‌رغم افزایش پیوسته وجود محصولات حاوی نقره در بازار و همچنین، گزارشات گسترده در مورد فعالیت ضد میکروبی نانوذرات نقره، در حال حاضر اطلاعات کافی در مورد استفاده از نانوذرات نقره به‌عنوان عوامل درمانی در شرایط درون‌تنی در دسترس نیست. استفاده از آنتی‌بیوتیک‌ها خطر اختلالات جدی و پُر هزینه در سلامت حیوانات را به‌همراه دارد و همچنین منجر به مقاومت سریع عوامل میکروبی می‌شود. ظهور مقاومت میکروبی در برابر آنتی‌بیوتیک‌ها یکی از چالش‌های عمده در جهان امروز است. بنابراین، لازم است که از رویکردهای ایمن و جایگزین برای مهار بیماری‌های آبزیان استفاده شود (Farouk و همکاران، ۲۰۲۰).

Khanh و Cu (۲۰۱۹) اظهار داشتند که در آبی‌پروری از نانوذرات در بخش‌های مختلف مانند تغذیه، تصفیه پساب و کنترل بیماری‌های عفونی استفاده می‌شود. این محققان به بررسی خواص ضد میکروبی نانوذرات نقره بر روی سویه‌های باکتریایی *Vibrio harveyi*، *Aeromonas caviae*، *Aeromonas hydrophyla*

و *Vibrio alginoliticus* که از مزارع آبی‌پروری برداشت شده بودند، پرداختند. آن‌ها بیان کردند که محلول نانوذره نقره با غلظت ۲۵ میلی‌گرم در لیتر سویه‌های باکتریایی *A. caviae* و *A. hydrophila* را مهار می‌کند و زمان کاهش اثرگذاری آن، ۲۴ ساعت پس از قرارگرفتن در معرض باکتری بود. همچنین، محلول با غلظت ۱۲/۵ پی.پی.ام نیز سویه‌های باکتریایی *V. harveyi* و *V. alginoliticus* را مهار می‌کند که زمان کاهش اثربخشی آن، ۴۸ ساعت پس از مواجهه با عامل باکتریایی بود.

Vaseeharan و همکاران (۲۰۱۰) از نانوذرات نقره سنتز شده با عصاره برگ چای برای از بین بردن *Vibrio harveyi* بیماری‌زا برای میگوی هندی استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که تعداد گُلنی‌های *V. harveyi* با غلظت نانوذرات نقره نسبت معکوس داشت و در غلظت ۳۵ میکروگرم بر میلی‌لیتر نانوذرات نقره رشد نمی‌کند (Vaseeharan و همکاران، ۲۰۱۰). Ogunfowora و همکاران (۲۰۲۱) اظهار داشتند که فناوری نانو در تصفیه پساب‌های آبی‌پروری بسیار مفید است، چراکه استفاده از این روش، شاخص‌های فیزیکوشیمیایی در پساب را عادی می‌کند، و علاوه بر این، فلزات سنگین مانند سرب و ترکیبات آلی مانند پلی‌کلره بی‌فنیل‌ها، هیدروکربن‌های معطر چندحلقه‌ای، آفت‌کش‌ها و غیره را حذف می‌کند. همچنین، با استفاده از فناوری نانو، بار آلودگی میکروارگانیسم‌هایی مانند سالمونلا، اشریشیا کلی، کمپیلوباکتر و ویبریو در پساب کاهش می‌یابد. حتی با وجود این اثرات مثبت، نانوذرات مورد استفاده در تصفیه این پساب‌ها نیز اثرات منفی بر موجودات آبی داشته و باعث افزایش شوری محیط می‌شود. شایان ذکر است که استفاده از نانوذرات ساده و دارای برچسب فلورسنت و همچنین، پوشش نانوذرات با تیروزین موجب کاهش سمیت این مواد می‌شود (Barakat و همکاران، ۲۰۱۶).

پژوهشگران، نانوذرات نقره را به‌عنوان یکی از مؤثرترین نانوذرات فلزی معرفی می‌کنند که فعالیت ضدباکتری‌شان در مواجهه با برخی از پاتوژن‌ها از جمله پاتوژن‌های مرتبط با ماهیان، مثل قزل‌آلای رنگین کمان و باس دریایی تأیید شده است. Soltani و همکاران (۲۰۰۹) در مطالعه‌ای که به منظور بررسی اثر ضدباکتریایی نانوذرات نقره بر روی باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی که برای ماهیان قزل‌آلا پاتوژنیک هستند، انجام شده بود، بیان کردند که نانوذرات نقره به طور کلی، موجب کاهش رشد سویه‌های باکتریایی *Aeromonas*، *Streptococcus iniae*، *Lactococcus garvieae*، *hydrophila* و *Yersinia ruckeri* می‌شوند. در پژوهشی دیگر که Barakat و همکاران (۲۰۱۶) روی باس دریایی (*D. labrax*) انجام داده‌اند بیان نمودند که این گونه یکی از اقتصادی‌ترین گونه‌های پرورشی است و در عین حال حساس‌ترین گونه به *Vibrio anguillarum* می‌باشد. آنها همچنین بیان داشتند که عامل *V. anguillarum* که باعث ایجاد بیماری vibriosis می‌شود، یک سپتی‌سمی هموراژیک است

و باعث ایجاد خسارات اقتصادی قابل توجهی در تولید این گونه می‌شود. این خسارات به حدی است که میزان مرگ و میر لاروهای باس دریایی آلوده به سویه *V. anguillarum* با گذشت زمان افزایش می‌یابد. Barakat و همکاران (۲۰۱۶) در مطالعه خود، پتانسیل ضدباکتریایی نانوذرات نقره-کیتوزان سنتز شده را در غلظت‌های ۵٪ و ۱۰٪ در مواجهه با عامل میکروبی *V. anguillarum* مورد آزمایش قرار دادند. نتایج بدست آمده از این مطالعه نشان داد که نانوذرات نقره-کیتوزان سنتز شده با غلظت ۵٪ برای سرکوب عفونت کافی است و می‌تواند به‌عنوان یک جایگزین برای آنتی‌بیوتیک‌ها در کنترل پاتوژن‌های ماهیان در نظر گرفته شود.

اگرچه نانوذرات نقره ثابت کرده‌اند که انواع مختلف پاتوژن‌های آلوده‌کننده انسان را مهار می‌کنند، با این حال، اطلاعات در مورد عملکرد نانوذرات نقره روی بیماری‌های میگو هنوز محدود است. تمام شواهد حاصل از مطالعات نشان می‌دهد که نانوذرات نقره با ویژگی‌های متنوع، اثرات ضد میکروبی عمده‌ای علیه ویروس سندروم لکه سفید^۵ (WSSV) و باکتری‌های جنس ویبریو (*Vibrio*) دارند. بیماری لکه سفید ناشی از سندروم ویروسی WSSV، می‌تواند به سرعت گسترش یابد و باعث از بین رفتن کامل پرورش میگو شود و آن را به یک خطر پنهان برای مزارع تبدیل کند. از سوی دیگر، باکتری ویبریو که در همه اکوسیستم‌های ساحلی جهان وجود دارد، ممکن است باعث ایجاد بیماری‌های جدی در میگو مانند ویبریوز، سندرم نکروز حاد کبدی پانکراس^۶ (AHPNS)، بیماری لکه‌های قهوه‌ای و غیره شود که ضررهای اقتصادی قابل توجهی را در لارو ماهیان ایجاد می‌کند.

به‌طور کلی، از دو رویکرد اصلی می‌توان به‌منظور کاربرد نانوذرات برای مقابله با عفونت‌های ویروسی و باکتریایی در سیستم‌های پرورش میگو استفاده نمود که شامل کاربردهای پیشگیرانه و درمانی می‌باشند. کاربردهای پیشگیرانه، مستلزم تجویز داروها به افراد سالم قبل از شروع بیماری است، در حالی که کاربردهای درمانی مربوط به برنامه‌های کاربردی برای تغییر مسیر یک بیماری فعال است (Bhardwaj و همکاران، ۲۰۲۰).

نانوذرات نقره سنتز شده با روش‌های شیمیایی یا بیولوژیکی، قادر به مهار رشد گونه‌های ویبریو در شرایط آزمایشگاهی هستند. گونه‌های ویبریو که برای میگوهای دریایی بیماری‌زا هستند، منجر به تلفات قابل توجه میگو در سیستم‌های پرورشی در کشورهای مختلف شده‌اند (Alvarez-Cirerol و همکاران، ۲۰۱۹). نانوذرات تا حدودی از بیماری‌های ناشی از ویبریو مانند ویبریوز در میگوی هندی (*Fenneropenaeus indicus*)، میگوی ببری بزرگ (*Penaeus monodon*) و میگوی پسفید نوجوان (*Litopenaeus vannamei*) و همچنین سندرم نکروز حاد کبدی پانکراس (AHPNS) در پُست‌لارو میگوی پسفید (*L. vannamei*) جلوگیری می‌کنند (Alvarez-Cirerol و همکاران، ۲۰۱۹). در این موارد، اثرات پیشگیرانه نانوذرات

به بقای بیشتر افراد در معرض باکتری پس از تجویز نانوذرات نقره طی یک دوره زمانی منجر شد. این در حالی بود که سایر افرادی که از اثرات پیشگیرانه نانوذرات نقره استفاده نکرده بودند، مرگومیر بالایی در یک بازه زمانی نشان دادند (Alvarez-Cirerol و همکاران، ۲۰۱۹؛ Camacho-Jiménez و همکاران، ۲۰۲۰).

• خواص ضدقارچی

تاکنون کارایی نانوذرات نقره (AgNP) در مقایسه با نقره آزاد در برابر طیف وسیعی از قارچ‌ها مانند آسپرژیلوس، کاندیدا و ساکارومایسس اثبات شده است. این کارایی به‌عنوان خاصیت قارچ‌کشی توسط پژوهشگران مختلف از جمله Ramya و Subapriya (۲۰۱۲) گزارش شده است. اثر ضدقارچی نانوذرات نقره در ارتباط با ترکیبات هتروسیکلیک مانند پیرازولو، تیزاولیدین، تترازول، فتالازین و مشتقات پیریدازین در برابر *Aspergillus flavus* و *Candida albicans* آزمایش شده است. خواص ضدقارچی نانوذرات نقره در برابر سویه‌های قارچی شایع مانند *C. glabrata* و *C. albicans*، از ۰/۴ تا ۳/۳ میکروگرم در میلی‌لیتر متغیر است.

Johari و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی اثرات نانوذرات نقره کلونیدی بر رشد پاتوژن تخم قزل‌آلا (*Saprolegnia sp.*) در شرایط آزمایشگاهی پرداختند. سپس فعالیت ضدقارچی نانوذرات نقره با تعیین حداقل غلظت‌های بازدارنده^۵ (MICs) ارزیابی شد. نتایج نشان داد که نانوذرات نقره دارای یک اثر بازدارنده بر رشد قارچ‌های موردآزمایش هستند. حداقل غلظت بازدارنده نانوذرات نقره برای ساپرولگنیا (*Saprolegnia sp.*)، ۱۸۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، معادل ۰/۱۸ درصد محاسبه شد. به‌نظر می‌رسد نانوذرات نقره می‌توانند جایگزین مناسبی برای عوامل سمی مانند مالاشیت‌گرین باشند. علاوه بر این، استفاده غیرمستقیم از نانوذرات نقره می‌تواند یک روش مفید برای ارائه فعالیت ضدقارچی جدید در سیستم‌های آبی‌پروری باشد. در یکی از مطالعات اخیر، اثر ضدقارچی AgNPs انکپسوله شده^۶ با کیتوزان در شرایط آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نهایی این تحقیق که Dananjaya و همکاران (۲۰۱۷) ارائه نمودند، حاکی از اثرات ضد میکروبی این مواد در مواجهه با گونه قارچی *Fusarium oxysporum* بود.

• خواص ضدانگلی

مونوژنه‌آ (Monogenea) گروه متنوعی از انگل‌ها هستند که معمولاً در ماهیان یافت می‌شوند. برخی از گونه‌های مونوژنه‌آ برای ماهیان پرورشی بسیار بیماری‌زا هستند. کنترل مونوژنه‌آ در مزارع پرورش ماهی یا آکواریوم‌ها بسیار دشوار است. از جمله تیمارهای اصلی برای کنترل این انگل‌ها می‌توان به پراکسید هیدروژن، فرمالین، پرمنگنات پتاسیم، سولفات مس، شوری (NaCl) و حمام پرازیکوانتل (praziquantel) اشاره کرد که می‌توانند در برابر افراد جوان یا بالغ

انگل بسیار موثر باشند، اما در برابر تخم‌ها نمی‌توانند نقش قابل توجهی ایفا نمایند (Zhang و همکاران، ۲۰۱۴). Pimentel-Acosta و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی اثرات ضدانگلی نانوذرات نقره (AgNPs) بر روی بالغین و تخم‌های گونه‌ای از مونوژنه‌آ در آب شیرین (*Cichlidogyrus spp.*) پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که غلظت ۳۶ میکروگرم در لیتر نانوذرات نقره به‌مدت یک ساعت، ۱۰۰ درصد در برابر تخم‌ها و انگل‌های بالغ مؤثر بوده و موجب تورم و اختلال در بافت انگل می‌شود. Pimentel-Acosta و همکاران (۲۰۱۹) اظهار داشتند، از آنجایی که تخم‌های مونوژنه‌آ معمولاً به داروهای ضدانگل و عوامل شیمیایی متحمل هستند، این نتیجه جالب به‌نظر می‌رسد.

Saleh و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی اثرات ضدانگلی نانوذرات نقره بر روی *Ichthyophthirius multifiliis* که عامل انگلی بیماری لکه سفید یا ایک (Ich) در ماهیان آب شیرین می‌باشد، پرداختند. در این مطالعه، اثرات نانوذرات فلزی بر تولیدمثل و عفونت‌پذیری مراحل زندگی *I. multifiliis* بررسی شد. نتایج نشان داد که ۵۰ درصد از ترونت‌ها را می‌توان ظرف ۳۰ دقیقه پس از قرارگرفتن در معرض ۱۰ نانوگرم در میلی‌لیتر نقره از بین برد. همچنین بر اساس یافته‌های به‌دست آمده، نانوذرات نقره در غلظت‌های ۱۰ و ۵ نانوگرم در میلی‌لیتر به‌ترتیب ۱۰۰ و ۹۷ درصد ترونت‌ها را از بین بردند و تولیدمثل تومونت‌ها^۱ را پس از ۲ ساعت تماس، مهار کردند.

در مطالعه‌ای دیگر، Pimentel-Acosta و همکاران (۲۰۱۹) اثر آنتلمینتیک^{۱۱} (ضدانگلی) نانوذرات نقره (AgNPs) را در مواجهه با نمونه‌های بالغ و تخم یکی از گونه‌های انگلی آب شیرین (*Cichlidogyrus*) بررسی نمودند. نتیجه این تحقیق نشان داد که نانوذرات نقره موجب اختلال در انگل‌های بالغ شدند، در صورتی که تخم‌ها به مواد ضدپلازما و مواد شیمیایی تحمل نشان دادند. محققین ابراز داشتند که قبلاً در هیچ گزارشی تأثیر AgNP ها بر انگل‌های متازوان ماهیان ارزیابی نشده است. بنابراین، پژوهش حاضر را مبنایی برای تحقیقات آینده در مورد کنترل بیماری‌های انگلی ماهیان معرفی کردند.

در چندین مطالعه اثرات ضدقارچی و ضدانگلی نانوذرات نقره به‌طور خاص مورد بررسی قرار گرفته است. Daniel و همکاران (۲۰۱۶) در پژوهشی که به‌منظور کنترل و درمان بیماری‌های لکه سفید (white spot) و لکه قرمز (red spot) در ماهی گلدفیش (*Carassius auratus*) انجام شده بود، جذب نانوذرات نقره، تبادلات بیوشیمیایی و سمیت حاصل از آن‌ها را مورد بررسی قرار دادند. بیماری لکه سفید (Ichthyophthiriasis-Ich) در واقع ناشی از تک‌یاخته *Ichthyophthirius multifiliis* است که با لکه‌های نمکی‌مانند، روی باله‌های بدن ایجاد می‌شود (رادخواه و همکاران، ۱۳۹۹). سندرم زخم اپیزوتیک^{۱۲} (EUS) یا بیماری «لکه قرمز» نیز ناشی از قارچ بیماری‌زای *Aphanomyces invadans* می‌باشد. در

مطالعه Daniel و همکاران (۲۰۱۶) علائم درمانی بیماری‌های لکه قرمز و لکه سفید در مدت ۳ روز بدون نشان دادن سمیت مشخص گردید. ماهیان درمان فوری عفونت را نشان دادند و از این‌رو، محققان این پژوهش بیان نمودند که یک بار دوز ممکن است با غلظت بسیار کم (۱۰ نانوگرم بر گرم وزن بدن) با استفاده از روش حمام کردن ساده محافظت طولانی‌مدت ایجاد کند. آن‌ها همچنین تأکید کردند که این مطالعه اولین گزارش در مورد اثربخشی نانوذرات نقره برای درمان تک‌یاخته‌ها و قارچ‌ها در ماهیان می‌باشد.

• خواص ضدویروسی

بیماری‌های ویروسی در حال ظهور، تهدید اصلی برای بخش انسانی و دام‌پزشکی هستند. اگرچه نانوذرات نقره از نظر خواص ضد میکروبی توجهات زیادی را به سوی خود جلب کرده‌اند، اما با این حال، از نظر خواص ضدویروسی همچنان ناشناخته باقی مانده‌اند. با توجه به این موضوع، یک تکنیک جدید، منحصر به فرد و توسعه یافته برای غلبه بر مشکل مقاومت ضدویروسی مورد نیاز است. با این حال، برخی از مطالعات، درمان عفونت‌های ویروسی را در مراحل خاصی از بیماری‌های HIV-1 و آنفلوانزا تأیید کرده‌اند (Jasni و همکاران، ۲۰۲۱).

مکانیسم دقیقی که نانوذرات نقره (AgNP) از طریق آن ویروس‌ها را از بین می‌برند، نامشخص است. نانوذرات نقره را می‌توان برای جلوگیری از عفونت‌های ویروسی متعدد یا با مهار عفونت ویروس در سلول‌ها یا با غیرفعال کردن مستقیم ویروس‌ها، مانند ویروس هرپس سیمپلکس (HSV)، ویروس سنسیشیال تنفسی و آدنوویروس نوع ۳ به کار برد. نانوذرات نقره به دلیل سطح وسیعی که دارند، فعالیت ضدویروسی بالایی از خود نشان می‌دهند که تماس با ذرات ویروسی را تسهیل می‌کند. معمولاً عوامل ضدویروسی مستقیماً روی ذرات ویروس با اتصال به پروتئین پوششی و ممانعت از فعل و انفعالات یا عملکردهای ساختاری عمل می‌کنند. در اینجا، اندازه نانوذرات نقره نقش مهمی در فعل و انفعالات بین نانوذرات-ویروس دارد (Khandelwal و همکاران، ۲۰۱۴). در ابتدا، نانوذرات نقره با سطح ویروس برهم‌کنش می‌کنند، که در نهایت منجر به تخریب ماده ژنومی ویروس یا جلوگیری از نفوذ آن به غشای سلولی می‌شود. نانوذرات نقره در تعامل ویروس با غشای سلولی تداخل ایجاد می‌کنند. این مواد همچنین به عنوان بازدارنده نوکلئوکسپیدهای ویروسی در داخل سلول عمل می‌کنند. علاوه بر این، نانوذرات نقره با مواد ژنومی ویروس تعامل دارند و از تکثیر ژنوم در داخل سلول میزبان جلوگیری می‌کنند. در نهایت، آن‌ها عوامل سلولی مانند سنتز پروتئین را متوقف می‌کنند تا از تکثیر ویروس جلوگیری کنند. اگرچه انواع مختلف فلزات دارای خواص ضدویروسی هستند، اما نانوذرات نقره (AgNP) موثرترین نقش را ایفا کرده‌اند (Galdiero و همکاران، ۲۰۱۱؛ Ratan و همکاران، ۲۰۲۱).

شایان ذکر است که در مورد تأثیرات ضدویروسی نانوذرات نقره بر روی گونه‌های آبی نیز گزارش‌های قابل ملاحظه‌ای ارائه شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به مطالعه Sivaramasamy و همکاران (۲۰۱۶) و Ochoa-Meza و همکاران (۲۰۱۹) اشاره کرد. Sivaramasamy و همکاران (۲۰۱۶) مطالعه‌ای را با هدف بررسی تأثیر نانوذرات نقره سنتز شده از *B. subtilis* بر رشد، بقا، فعالیت ضدویروسی و بیان ژن ایمنی در میگوی پاسبید اقیانوس آرام (*L. vannamei*) در برابر پاتوژن‌های مختلف انجام دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که بیان ژن‌های مرتبط با ایمنی (سطوح mRNA) در میگوهای که از رژیم غذایی AgNPs استفاده می‌کردند، بر خلاف *B. subtilis* و شاهد، به طور قابل توجهی تنظیم شد. در مجموع، این مطالعه نشان داد که AgNP ها یک ابزار بالقوه برای مهار vibriosis در پرورش میگو هستند.

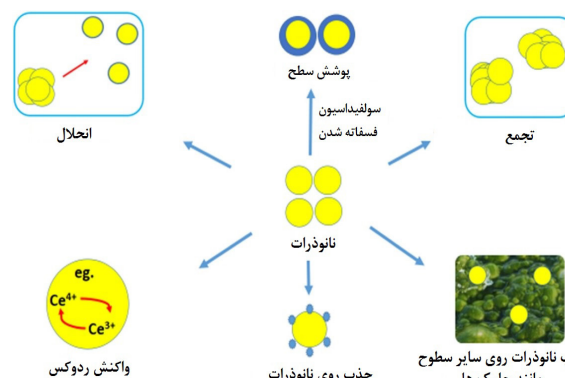
مطالعه Ochoa-Meza و همکاران (۲۰۱۹) جزو پژوهش‌های تقریباً جدید محسوب می‌شود که می‌تواند در درک پتانسیل ضدویروسی نانوذرات نقره، مفید باشد. در این پژوهش، پتانسیل ضدویروسی نانوذرات نقره در مواجهه با ویروس سندرم لکه سفید (WSSV) که یکی از مهم‌ترین پاتوژن‌های ویروسی در صنعت پرورش میگو است، در میگوی پاسبید (*Penaeus vannamei*) بررسی شده است. نتایج حاصله از این پژوهش نشان داد که مقدار کمی از نانوذرات نقره قادر به افزایش پاسخ سیستم ایمنی میگو بدون اثرات سمی در میگوهای سالم است. محققان این پروژه بیان کردند که این پاسخ ایمنی با استفاده از دوزهای دیگر قابل افزایش است و می‌تواند جایگزین بسیار مهمی برای درمان بیماری سندرم لکه سفید باشد.

رهایش نانوذرات نقره به محیط‌های آبی و سمیت آن برای موجودات آبی

• سرنوشت نانوذرات نقره در محیط‌های آبی

محیط آبی از موجودات زنده‌ای مانند ماهی، گیاهان و میکروارگانیسم‌ها تشکیل شده است که برای بقا به آب شیرین وابسته هستند. هنگامی که نانوذرات وارد اکوسیستم‌های آبی می‌شوند، احتمالاً تحت تأثیر دگرگونی‌های مختلفی قرار می‌گیرند که حالت اولیه آن‌ها را تغییر می‌دهد (Husen و Siddiqi، ۲۰۱۷؛ Siddiqi و همکاران، ۲۰۱۸). این دگرگونی‌ها به دلیل ویژگی‌های ذاتی نانوذرات نقره است و علاوه بر این می‌تواند تحت تأثیر شیمی محیط آب قرار گیرد. این دگرگونی‌ها شامل فرآیندهایی مانند انحلال، جذب، تجمع، ته‌نشینی و سایر واکنش‌هایی هستند (شکل ۲) که اغلب در یک زمان اتفاق می‌افتد و بر سرنوشت آن‌ها تأثیر می‌گذارد. با این حال باید توجه داشت که در سیستم‌های آبی، اجزای جذب شده روی نانوذرات نقره می‌توانند خواص سطحی این مواد را تغییر دهند و در نتیجه، بر تجمع، انحلال آن‌ها و بالعکس تأثیر بگذارند

(Navaladian و همکاران، ۲۰۰۸؛ Iravani و همکاران، ۲۰۱۴). این دگرگونی‌ها پیامدهای زیادی بر انتقال، جذب، زیست‌فراهمی، ماندگاری و اثرات سمی نانوذرات نقره دارند.



شکل ۲- نمایی از تبدیل نانوذرات نقره در سیستم‌های آبی (Dube و Okuthe، ۲۰۲۳)

۱- فرآیند انحلال:

انحلال نانوذرات منجر به رهاسدن و پراکندگی این مواد در محیط‌های آبی می‌شود. الگوی انحلال و رهاسازی نانوذرات نقره تحت تأثیر ویژگی‌های شیمیایی آن‌ها و همچنین، خصوصیات فیزیکوشیمیایی محیط تغییر می‌یابد. Yadav و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند که ویژگی‌های آب بر انحلال نانوذرات تأثیر می‌گذارد. آن‌ها شاهد انحلال بیشتر نانوذرات در آب دیونیزه شده (۰/۰۵۴ میلی گرم در لیتر) نسبت به آب حوضچه طبیعی (۰/۰۳۵ میلی گرم در لیتر) بودند. لازم به ذکر است که آب حوضچه طبیعی برخلاف آب دیونیزه دارای مواد معدنی، مواد آلی طبیعی (NOM) و سایر آلاینده‌ها است که می‌تواند بر سطح انحلال و سینتیک انحلال نانوذرات تأثیر بگذارد. مواد آلی طبیعی از طریق برهم‌گش فزایی و الکترواستاتیکی، گاهی اوقات، یک پوشش محافظ ایجاد می‌کند که مانع انحلال می‌شود (Zhang و همکاران، ۲۰۱۶). افزایش قدرت یونی (IS) و کاهش pH محیط، باعث افزایش انحلال نانوذرات نقره می‌شود (Yadav و همکاران، ۲۰۲۲). مشاهدات مشابهی توسط Mbanga و همکاران (۲۰۲۲) انجام شد که نشان داد، درجه و سرعت انحلال نانوذرات نقره در IS بالا و pH پایین افزایش یافت. همچنین، سینتیک انحلال بر فراوانی نانوذرات نقره در محیط تأثیر می‌گذارد و از این رو، سمیت آن‌ها را برای موجودات آبی تعیین می‌نماید (Mbanga و همکاران، ۲۰۲۲).

۲- تراکم و تجمع:

انباشتگی و تجمع به دلیل نیروهای جاذب بین ذرات شکل می‌گیرد و باعث می‌شود که آن‌ها با هم در یک جرم جمع شوند. تشکیل آگلومراها و سنگدانه‌ها به خواص ذرات و همچنین، ویژگی‌های شیمیایی محیط‌های آبی بستگی دارد. در غلظت‌های بالا، برخورد ذرات با سرعت بیشتری رخ می‌دهد که منجر به تجمع می‌شود

(Daniel و همکاران، ۲۰۱۶). تحقیقات انجام‌شده نشان داده که تجمع وابسته به غلظت است (Sharma و همکاران، ۲۰۰۸). بر طبق مطالعه Senapati (۲۰۰۵)، مورفولوژی ذرات بر سرعت تجمع نانوذرات نقره تأثیر می‌گذارد. به‌عنوان مثال، Dube و Okuthe (۲۰۲۳) نشان دادند که نانوذرات با شکل نامنظم تجمع کم‌تری دارند، در حالی که تجمع نانوذرات اکسید روی که به شکل گروی است به‌شدت به قدرت یونی محلول وابسته است.

تحقیقات نشان داده است که دما، اندازه ذرات و pH بر تجمع تأثیر می‌گذارد (Zhou و Fernando، ۲۰۱۹؛ Lee و همکاران، ۲۰۲۲) نشان دادند که افزایش دما باعث کاهش اندازه نانوذرات نقره می‌شود که در نهایت سطح تجمع را کاهش می‌دهد و باعث انحلال و آزادسازی یون‌های Ag^+ در محیط می‌شود. بیشتر سطوح نانوذرات نقره عامل‌دار هستند و گروه‌های عاملی با یون‌های H^+ یا OH^- در تعامل هستند. بنابراین pH محیط بر بار سطحی و انحلال اکسیداتیو نانوذرات نقره تأثیر می‌گذارد (Sharma و همکاران، ۲۰۰۸؛ Dube و Okuthe، ۲۰۲۳).

۳- واکنش‌های ردوکس^{۱۳}:

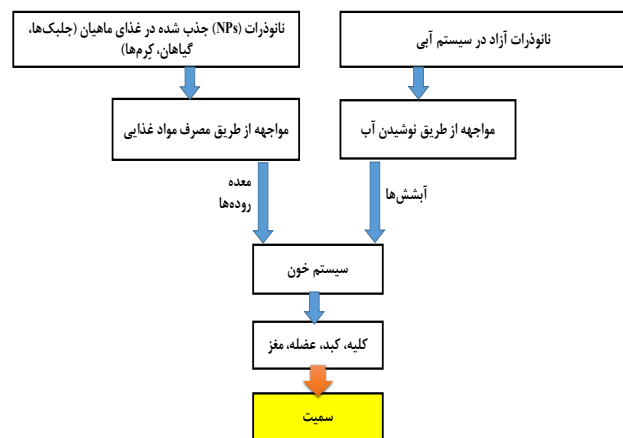
واکنش‌های ردوکس در سیستم‌های آبی طبیعی، فرآیند ترکیبی اکسیداسیون-کاهش را درگیر می‌کند. این واکنش‌ها با حضور عوامل اکسیدکننده یا کاهشنده و شرایطی مانند pH کنترل می‌شوند. در حضور گونه‌های فعال ردوکس در محیط‌های آبی، نانوذرات فعال ردوکس از طریق واکنش‌های ردوکس که متعاقباً انجام می‌شوند، خواص فیزیکوشیمیایی خودشان را تغییر می‌دهند (Galatage و همکاران، ۲۰۲۱). واکنش‌های ردوکس می‌تواند منجر به یک پوشش سطحی نامحلول حول نانوذرات نقره شود که باعث بهبود پایداری این مواد در محیط آبی می‌شود. از طرف دیگر، پایداری نانوذرات نقره را می‌توان با ایجاد یک پوشش سطحی فعال کاهش داد که برهم‌گش نانوذرات با سایر اجزای سیستم آبی را امکان‌پذیر می‌کند و از این رو اکسیداسیون بیشتر را مهار می‌کند (Senapati، ۲۰۰۵).

۴- جذب به سطوح دیگر:

نانوذرات نقره می‌توانند روی سطوح مختلف جذب شوند. این رفتار به‌طور قابل توجهی بر انتقال آن‌ها و همچنین سرنوشت آن‌ها در محیط‌های آبی تأثیر می‌گذارد. نانوذرات نقره می‌توانند با جذب به سطوح جامد در سیستم‌های آبی، به‌عنوان یک جاذب، عمل کنند و در نتیجه برهم‌گش‌هایشان را تغییر دهند. در روش دیگر، نانوذرات نقره می‌توانند با جذب موادی از محیط‌های آبی که بر رفتار و ویژگی‌های نانوذرات تأثیر می‌گذارد، به‌عنوان جاذب عمل کنند. این حالت بیشتر زمانی مشاهده می‌شود که مواد آلی طبیعی (NOM) روی سطح نانوذرات نقره در محیط‌های آبی جذب می‌شود. جذب مواد آلی طبیعی در Al_2O_3 -NPs و CuO-NPs، انحلال این مواد در محیط‌های آبی را کاهش می‌دهد (Nanjan و همکاران، ۲۰۲۰).

۵- انباشت نانوذرات نقره در بدن آبزیان:

همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد، نانوذرات نقره را می‌توان به صورت رسوب یا معلق در سیستم‌های آبی یافت که به‌شدت بر موجودات آبزی، مانند ماهیان تأثیر می‌گذارند. ماهی‌ها به وجود آلاینده‌های طبیعی در آب بسیار حساس هستند و از این‌رو، از آن‌ها به‌عنوان نشانگرهای زیستی سمیت در محیط‌های آبی استفاده می‌شود (Lawson, ۱۹۹۵). شکل (۳) مسیرهای مواجهه، زیست‌فراهمی و تأثیر بالقوه نانوذرات نقره بر ماهی را تعیین می‌کند. جذب نانوذرات توسط ماهی از طریق قرارگرفتن در معرض رژیم غذایی صورت می‌گیرد، زیرا غذاهای ماهی مانند جلبک‌ها، گیاهان آبزی، حشرات و کرم‌ها نیز می‌توانند نانوذرات نقره را در بدن خود انباشته کنند. این در حالی است که گونه‌های کف‌زی نیز در معرض نانوذرات و امکان بلع آن‌ها می‌باشند. لازم به ذکر است که مسیر دیگر برای انتقال نانوذرات نقره به بدن ماهیان از طریق ورود آب به درون بدن می‌باشد. هنگامی که نانوذرات نقره در سیستم‌های آب طبیعی آزاد می‌شوند، ویژگی‌های سطحی و فیزیکوشیمیایی آن‌ها، امکان انباشت این مواد در آبشش یا پوست ماهیان را افزایش می‌دهند (Dube و Okuthe, ۲۰۲۳).



شکل ۳- جذب و انباشت نانوذرات نقره در بدن

ماهیان (Dube و Okuthe, ۲۰۲۳)

نانوذرات نقره پس از جذب روی ماهی، از طریق انتشار یا اندوسیتوز به محیط داخل سلولی یا در سراسر اپیتلیوم منتقل می‌شوند (Dube و Okuthe, ۲۰۲۳). آن‌ها به مکان‌های گیرنده روی غشای بیولوژیکی متصل می‌شوند و با آن‌ها واکنش نشان می‌دهند، و به دنبال آن انتقال در سراسر غشا (داخلی‌سازی) انجام می‌شود. در نتیجه نانوذرات نقره در اندام‌هایی مانند کلیه، آبشش، ماهیچه‌ها، مغز، غدد جنسی، هپاتوپانکراس و کبد گزارش شده است. اندازه این نانوذرات بر میزان انباشتگی و جابه‌جایی آن‌ها تأثیر می‌گذارد. نانوذرات نقره کوچک (۲۰ نانومتر) به غشای قاعده جانبی منتقل شدند، در حالی که نمونه‌های بزرگ (۱۱۰ نانومتر) روی غشای آپیکال باقی

ماندند (Gurunathan و همکاران، ۲۰۰۹). هنگامی که نانوذرات داخل سلول هستند، با اجزای مختلف درون سلولی برهم‌کنش و فرایندهای سلولی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. جذب، انباشت و جابه‌جایی نانوذرات نقره می‌تواند به‌میزان متفاوتی در موجودات رخ دهد و منجر به سطوح مختلف سمیت شود (Khodashenas و Ghorbani, ۲۰۱۵؛ Zhang و همکاران، ۲۰۱۶).

• اثرات سمی نانوذرات نقره بر ماهیان

نانوذرات نقره به‌دلیل خواص عالی خود در زمینه‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مواد به‌ویژه برای فعالیت‌های باکتری‌کشی و ویروس‌کشی با ایجاد اختلال در غشاهای تولید ROS، اکسیداسیون، بی‌ثباتی پروتئین‌ها، آسیب‌رساندن به DNA و آزادسازی ترکیبات خطرناک بر روی میکروب‌ها تأثیر می‌گذارند. لازم به ذکر است که همین اثرات می‌تواند بر سایر موجودات از جمله ماهیان تأثیر بگذارد.

رفتار سمیت نانوذرات در سیستم‌های آب طبیعی با سمیت گزارش شده در آزمایشگاه‌ها متفاوت است. سطوح غلظتی که بیشتر در آزمایشگاه‌ها استفاده می‌شود، بسیار بیش‌تر از سیستم آبزیان طبیعی است. تقلید از سیستم آبی طبیعی که از مکانی به مکان دیگر به‌دلیل تفاوت در عوامل غیرزیستی و زیستی، همراه با شرایط اکولوژیکی-زمین‌شناختی متفاوت است، دشوار است. تعامل و تبدیل نانوذرات نقره با اجزای پیچیده در محیط‌های آبی طبیعی، می‌تواند سمیت این مواد را تغییر دهد. Lee و همکاران (۲۰۲۲)، سمیت حاد کم- $Ag-NPs$ یا $ZnO-NPs$ را برای رشد جنین گورخرماهی در سیستم‌های آبی طبیعی و سمیت حاد بالا را زمانی که جنین‌ها در $Ag-NPs$ یا $ZnO-NPs$ در آب خوشه‌ای رشد می‌کنند، گزارش کردند. در حال حاضر، سطوح نانوذرات نقره در سیستم‌های آب طبیعی ممکن است پایین باشد، با این حال، برخی از این ذرات تجمع می‌یابند و تهدیدی بالقوه برای سیستم آبی محسوب می‌شوند. سمیت نانوذرات نقره می‌تواند بسته به ویژگی‌های محیط آبی و ماهیت نانوذرات پس از تجمع در بدن ماهیان، کاهش یا افزایش یابد. اندازه ذرات، شکل، بار سطحی، پوشش‌های سطحی و ویژگی‌های محیطی در سمیت ماهی نقش دارند (Khan و همکاران، ۲۰۱۵). علاوه بر این، غلظت نانوذرات نقره، پایداری در ماهی پس از جذب، برهم‌کنش آن‌ها با اندام‌ها/سلول‌ها ماهی و ظرفیت تجمع در بافت‌ها و اندام‌ها نیز سمیت ماهی را تعیین می‌کند (Radkhah و Eagderi, ۲۰۲۰؛ Sadeghinejad Masouleh و Radkhah, ۲۰۲۰).

علی‌رغم چندین دهه استفاده، شواهد دقیقی مبنی بر سمیت نقره آشکار نشده است و محصولات ساخته‌شده با $AgNP$ را طیف وسیعی از نهادهای معتبر از جمله سازمان غذا و دارو (FDA) و سازمان حفاظت از محیط‌زیست ایالات متحده آمریکا (USEPA) (Abou El-Nour و همکاران، ۲۰۱۰؛ Zhong و همکاران،

۲۰۰۷). این در حالی است که تأثیرات ضد میکروبی این مواد به واسطه بسیاری از مطالعات به اثبات رسیده است و همچنان نگرانی‌های زیادی در مورد کاربرد آن‌ها در سیستم‌های پرورشی وجود دارد. در این بخش به برخی از پژوهش‌های صورت گرفته پیرامون این موضوع اشاره می‌شود.

Johari و همکاران (۲۰۱۳) در پژوهشی که به منظور بررسی میزان سمیت نانوذرات نقره کلونیدی (AgNPs) در سه مرحله مختلف زندگی قزل‌آلای رنگین‌کمان انجام گرفته بود، بیان کردند که ارزش تخمین زده شده LC_{50} در ۹۶ ساعت برای افراد *eleutheroembryos*، لاروی (*larvae*) و جوان (*juvenile*) به ترتیب ۰/۲۵، ۰/۷۱ و ۲/۱۶ میلی گرم در لیتر بود که حساسیت بالاتری را در مراحل اولیه زندگی نشان می‌داد (جدول ۱). نویسندگان در این پژوهش AgNP های کلونیدی را به ترتیب به عنوان «بسیار سمی» و «سمی» در مرحله‌های *eleutheroembryo-larva* و جوانی طبقه‌بندی نمودند، به این معنی که انتشار نانوذرات نقره در محیط‌های آبی یا کاربرد مستقیم آن‌ها به عنوان یک ماده ضد میکروبی در صنعت آبزی پروری، دیگر مجاز نیست.

Sohn و همکاران (۲۰۱۵) برای درک بهتر اثرات زیست محیطی نانوذرات نقره (AgNPs) و نانوسیم‌های نقره‌ای (AgNWs) در محیط‌های آب شیرین، سمیت این نانومواد را در گونه‌های دافنی (*Daphnia magna*)، ماهی (*Oryzias latipes*) و جلبک (*Raphidocelis subcapitata*) با استفاده از دستورالعمل‌های سازمان همکاری و توسعه اقتصادی^{۱۶} (OECD) بررسی و مقایسه کردند. این مطالعه نشان داد که حساسیت به نانومواد در بین ارگانیسم‌های آزمایش (دافنی < جلبک < ماهی) متفاوت است. بر اساس یافته‌های ارائه شده در این تحقیق، نانوذرات نقره به عنوان «دسته حاد ۱» برای *O. latipes* و *D. magna* و «دسته حاد ۲» برای *R. subcapitata* طبقه‌بندی می‌شوند، این در حالی است که نانوسیم‌های نقره‌ای به عنوان «دسته حاد ۱» برای *D. magna* و «دسته حاد ۲» برای *O. latipes* و *R. subcapitata* دسته‌بندی می‌شوند. نتایج حاضر نشان داد که برای جلوگیری از انتشار تصادفی یا عمدی نانومواد نقره در محیط‌های آب شیرین باید توجه بیشتری شود. لازم به ذکر است که در جدول (۱) سطح قابل تحمل و ایمن نانوذرات نقره در برخی از گونه‌های آبزی، گزارش شده است.

اگر چه امثال تحقیقات ارائه شده تأثیرات سمی نانوذرات را نشان می‌دهند، اما با این حال نباید نقش عوامل محیطی را در میزان سمیت این مواد انکار نمود. Yung و همکاران (۲۰۱۴) اظهار می‌نمایند هنگامی که نانوذرات اکسید شده وارد محیط آبزیان می‌شوند، رفتار آن‌ها توسط عوامل محیطی مانند سطح اکسیژن، pH، استحکام یونی و میزان مواد آلی کنترل می‌شود. آن‌ها همچنین تأکید می‌کنند که به دلیل استحکام یونی زیاد در آب دریا، نانوذرات اکسید شده تمایل به تجمع و کم تحرک شدن دارند، در حالی که در

آب شیرین تمایل به حل شدن سریع دارند که خطر سمیت حاد را برای موجودات آبزی افزایش می‌دهد (Franklin و همکاران، ۲۰۰۷؛ Shaalan و همکاران، ۲۰۱۷).

جدول ۱- سطح قابل تحمل و ایمن نانوذرات نقره در گونه‌های مختلف آبزی پروری (Khan و همکاران، ۲۰۱۵)

ردیف	شکل نانوذرات نقره	گونه ماهی	ارزش قابل تحمل (LC_{50})
۱	Nanocid	کپور نقره‌ای	۰/۳۴ ppm
۲	Nanocil	کپور نقره‌ای	۶۶/۴ ppm
۳	Nanpcid (61nm)	کپور نقره‌ای	۰/۲۰۲ $mg\ l^{-1}$
۴	Nanocid	کپور معمولی (نوجوان)	۰/۴۹ ppm
۵	Nanosil	کپور معمولی (نوجوان)	۷۳/۸ ppm
۶	AgNO ₃	کپور معمولی (نوجوان)	۰/۳۳ ppm
۷	Ag-NPs (50-100)	ماهی رو هو	۱۰۰/۰ $mg\ kg^{-1}$
۸	Ag-NPs (powder)	گورخر ماهی (جنین)	۲۵۰ $mg\ l^{-1}$
۹	Ag-NPs (3nm)	گورخر ماهی (نوجوان)	۹۳/۱۱ μM
۱۰	Ag-NPs (100nm)	گورخر ماهی (نوجوان)	۱۳۷/۲۱ μM
۱۱	Colloidal	گورخر ماهی (بالغ)	۷/۰ $mg\ Ag\ L^{-1}$
۱۲	Colloidal	قزل‌آلای رنگین‌کمان (جنین)	۰/۲۵ $mg\ l^{-1}$
۱۳	Colloidal	قزل‌آلای رنگین‌کمان (لارو)	۲/۱۶ $mg\ l^{-1}$

تجمع زیستی نانوذرات نقره در زنجیره غذایی

موجودات آبزی مانند ماهی منبع مهمی از مواد مغذی هستند. تجمع زیستی نانوذرات نقره در ماهیان، تهدیدی برای بقای انسان محسوب می‌شود. اولاً نانوذرات انباشته شده از طریق اثرات سمی خود می‌توانند رشد و تولید مثل ماهیان را تغییر دهند. ثانیاً، این مواد انباشته شده، می‌توانند از طریق رژیم ماهی به سطوح تغذیه‌ای بعدی (انسان) منتقل شوند (Dube و Okuthe، ۲۰۲۳).

فیتوپلانکتون‌ها و جلبک‌ها منبع غذایی برای ماهیان کوچک، سخت‌پوستان و ژئوپلانکتون‌ها (مصرف‌کنندگان اولیه) هستند که به نوبه خود منبعی از مواد مغذی برای جانوران آبزی بزرگ‌تر از جمله ماهی‌ها (مصرف‌کنندگان ثانویه) هستند. هنگامی که نانوذرات نقره در این موجودات آبزی تجمع می‌یابند، می‌توانند از طریق رژیم غذایی از سطوح تغذیه‌ای پایین‌تر به سطوح بالاتر منتقل شوند و متعاقباً در طول زنجیره غذایی انتقال یابند (Zhang، ۲۰۱۳). شکل (۴) نمایی از انتقال نانوذرات نقره از طریق زنجیره غذایی سیستم‌های آبی را نشان می‌دهد. انتقال از طریق زنجیره غذایی منجر به تجمع

اما با این حال، لازم است که برنامه‌ها و اقدامات محتاطانه در جهت جلوگیری از آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از این مواد در دستور کار قرار گیرد.

پی‌نوشت

- 1-Silver
- 2-In vitro
- 3-Electrical contacts
- 4-Medical Device Reporting
- 5-White Spot Syndrome Virus
- 6-Acute Hepatopancreatic Necrosis Syndrome
- 7-Minimum inhibitory concentrations
- 8-Encapsulated
- 9-Theronts
- 10-Tomonts
- 11-Anthelmintic
- 12-Epizootic Ulcerative Syndrome
- 13-Redox reactions
- 14-Food and Drug Administration
- 15-United States Environmental Protection Agency
- 16-Organisation for Economic Cooperation and Development

منابع

امیری، محمد، و بهمنش، مهسا. (۱۳۸۹). تأثیر فناوری نانو بر جوامع در حال توسعه با نگرش ویژه به ایران. چهارمین کنفرانس ملی مدیریت تکنولوژی ایران، انجمن مدیریت تکنولوژی ایران. شهر تهران، ۹ صفحه.

رادخواه، علیرضا، ایگدری، سهیل، و صادقی‌نژاد ماسوله، اسماعیل. (۱۳۹۹). بررسی خواص ضد میکروبی نانوذرات نقره (AgNPs) به منظور کنترل بیماری‌ها و مدیریت بهداشت در سیستم‌های آبی‌پروری. مجله آبزیان زینتی، ۷(۱)، ۷-۱۵.

رادخواه، علیرضا، و صادقی‌نژاد ماسوله، اسماعیل. (۱۴۰۰). بررسی تأثیر عوامل فیزیکوشیمیایی آب بر زیست‌فراهمی، میزان سمیت و سطح اثرگذاری نانو ذرات فلزی در اکوسیستم‌های آبی. آب و توسعه پایدار، ۸(۲)، ۷۱-۹۰. doi: [10.22067/jwsd.v8i2.1019](https://doi.org/10.22067/jwsd.v8i2.1019)

رادخواه، علیرضا، ایگدری، سهیل، و موسوی ثابت، حامد. (۱۴۰۰a). مروری بر فواید و مضرات فناوری نانو در صنعت آبی‌پروری. مجله آبزیان زینتی، ۸(۲)، ۴۳-۵۸.

زیستی نانوذرات می‌شود. در نتیجه بر مصرف‌کنندگان سطوح بالاتر به‌طور ویژه بر انسان‌ها که بخشی از زنجیره غذایی هستند، تأثیر می‌گذارد (Babaei و همکاران، ۲۰۲۲).



شکل ۴- نمایی از انتقال نانوذرات نقره از طریق زنجیره غذایی سیستم‌های آبی (Dube و Okuthe، ۲۰۲۳)

نتیجه‌گیری و چشم‌انداز آینده

نانوذرات خواص جدیدی را نشان می‌دهند که به اندازه، شکل و مورفولوژی آن‌ها بستگی دارد. نانوذرات نقره (AgNPs) خواص ضدباکتریایی عالی در برابر طیف وسیعی از میکروارگانیسم‌ها نشان داده‌اند. اگرچه برخی از پژوهش‌گران، نانوذرات نقره را به دلیل کاربرد آن‌ها در الکترونیک، کاتالیز، داروها و در کنترل رشد میکروارگانیسم‌ها، به‌عنوان دوست‌دار محیط‌زیست معرفی کرده‌اند، اما با این حال، برخی از کارشناسان نیز نظرات متناقض و مخالفی با آنچه بیان گردید، دارند. بررسی منابع علمی مختلف نشان داد که اثرات ضد میکروبی نانوذرات نقره در بین نانوذرات فلزی، بالا است. با توجه به این مسأله، رهایش این مواد به درون اکوسیستم‌های آبی، می‌تواند سلامت بسیاری از آبزیان از جمله ماهیان را تحت تأثیر قرار دهند و حتی به‌واسطه انتقال نانوذرات نقره در زنجیره غذایی، اثرات منفی بر سلامت انسان داشته باشند.

کاربرد گسترده نانوذرات نقره (AgNP) منجر به انتشار اجتناب‌ناپذیر آن‌ها در محیط می‌شود. نانوذرات نقره به‌عنوان عوامل ضد میکروبی عالی شناخته می‌شوند، بنابراین، می‌توان از آن‌ها به‌عنوان مواد ضد عفونی‌کننده جایگزین استفاده کرد. مطالعه حاضر به‌طور کلی نقش اثرگذار فناوری نانو و همچنین، کاربرد نانوذرات نقره را در سیستم‌های تصفیه فاضلاب ناشی از فعالیت‌های آبی‌پروری، منعکس نمود. این پژوهش با تکیه بر یافته‌های پیشین نشان داد که نانوذرات نقره علاوه بر اهمیتی که در فرآیند تصفیه فاضلاب دارند، می‌توانند در جهت بهبود کیفیت آب و همچنین، حذف عوامل بیماری‌زای ماهیان مورد استفاده قرار گیرند. با توجه به اینکه بخش عمده‌ای از بیماری‌های آبزیان در سیستم‌های پرورشی کشور مرتبط به عوامل باکتریایی سالمونلا و هیدروفیلا می‌باشد، بنابراین، می‌توان از نانوذرات در حد استاندارد، به‌طوری‌که اثرات زیست‌محیطی به‌همراه نداشته باشد، استفاده نمود. با توجه به این مسأله، اگرچه کاربرد نانوذرات در تحقیقات مختلف مورد تأیید قرار گرفته است،

- view. *Aquaculture Reports*, 18, 100512. doi: [10.1016/j.aqrep.2020.100512](https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2020.100512)
- Chindris, A. (2010). Degradation of refractory organic compounds in aqueous wastes employing a combination of biological and chemical treatments [Thesis], University of Cagliari, Sardinia, Italy.
- Dananjaya, S.H.S., Erandani, W.K.C.U., Kim, C.H., Nikapitiya, C., Lee, J., & De Zoysa, M. (2017). Comparative study on antifungal activities of chitosan nanoparticles and chitosan silver nano composites against *Fusarium oxysporum* species complex. *International Journal of Biological Macromolecules*, 105(Pt 1), 478-488. doi: [10.1016/j.ijbiomac.2017.07.056](https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.07.056)
- Daniel, S.C.G.K., Sironmani, T.A., & Dinakaran, S. (2016). Nano formulations as curative and protective agent for fish diseases: Studies on red spot and white spot diseases of ornamental gold fish *Carassius auratus*. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*, 4(4), 255-261.
- El-Sayed, M.E. (2020). Nanoadsorbents for water and wastewater remediation. *Science of the Total Environment*, 739, 139903. doi: [10.1016/j.scitotenv.2020.139903](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139903)
- Farouk, M.M., El-Molla, A., Salib, F.A., Soliman, Y.A., & Shaalan, M. (2020). The role of silver nanoparticles in a treatment approach for multidrug-resistant *Salmonella* species isolates. *International Journal of Nanomedicine*, 15, 6993-7011. doi: [10.2147/IJN.S270204](https://doi.org/10.2147/IJN.S270204)
- Galatage, S.T., Hebalkar, A.S., Dhobale, S.V., Mali, O.R., Kumbhar, P.S., Nikade, S.V., & Killedar, S.G. (2021). Silver Nanoparticles: Properties, Synthesis, Characterization, Applications and Future Trends. In S. Kumar, P. Kumar, & C. S. Pathak (Eds.), *Silver micro-nanoparticles - properties, synthesis, characterization, and applications*. IntechOpen, 1, 1-35. doi: [10.5772/intechopen.99173](https://doi.org/10.5772/intechopen.99173)
- Galdiero, S., Falanga, A., Vitiello, M., Cantisani, M., MARRA, V. & Galdiero, M. (2011). Silver nanoparticles as potential antiviral agents. *Molecules* (Basel, Switzerland), 16(10), 8894-8918. doi: [10.3390/molecules16108894](https://doi.org/10.3390/molecules16108894)
- Gurunathan, S., Kalishwaralal, K., Vaidyanathan, R., Venkataraman, D., Pandian, S.R., Muniyandi, J., Hariharan, N. & Eom, S.H. (2009). Biosynthesis, purification, characterization, and antibacterial activity of silver nanoparticles synthesized from *Agave* leaves. *Journal of Nanoparticles*, 2009, 1-10. doi: [10.1155/2009/109572](https://doi.org/10.1155/2009/109572)
- Radchouh, A., Elguedri, S., & Ismael, A. (2010). Synthesis and applications of silver nanoparticles. *Arabian Journal of Chemistry*, 3, 135-140. doi: [10.1016/j.arabjc.2010.04.008](https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2010.04.008)
- Alexander, J.W. (2009). History of the medical use of silver. *Surgical Infections*, 10, 289-292. doi: [10.1089/sur.2008.9941](https://doi.org/10.1089/sur.2008.9941)
- Alvarez-Cirerol, F.J., López-Torres, M.A., Rodríguez-León, E., Rodríguez-Beas, C., Martínez-Higuera, A., Lara, H.H., Vergara, S., Arellano-Jimenez, M.J., Larios-Rodríguez, E., Martínez-Porchas, M., Vega, E., & Iñiguez-Palomares, R.A. (2019). Silver nanoparticles synthesized with *Rumex hymenosepalus*: a strategy to combat early mortality syndrome (EMS) in a cultivated white shrimp. *Journal of Nanomaterials*, 2019, 8214675. doi: [10.1155/2019/8214675](https://doi.org/10.1155/2019/8214675)
- AZOM, A. (2022). Material Science news, applications, product information, and interviews. Effect of silver nanoparticle-containing fertilizer on crops. *AZOMaterials*, 5, 20-42.
- Babaei, M., Behzadi, M., Seong, M., Je, I., & Ali, S. (2022). Trophic transfer and toxicity of silver nanoparticles along a phytoplankton- zooplankton- fish food chain. *Science of the Total Environment*, 842, 156807. doi: [10.1016/j.scitotenv.2022.156807](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156807)
- Bhardwaj, P., Bhatia, E., Sharma, S., Ahmad, N., & Banerjee, R. (2020). Advancements in prophylactic and therapeutic nanovaccines. *Acta Biomaterialia*, 108, 1-21. doi: [10.1016/j.actbio.2020.03.020](https://doi.org/10.1016/j.actbio.2020.03.020)
- Barakat, K.M., El-Sayed, H.S., & Gohar, Y.M. (2016). Protective effect of squilla chitosan-silver nanoparticles for *Dicentrarchus labrax* larvae infected with *Vibrio anguillarum*. *International Journal of Aquatic Research*, 8, 179-189. doi: [10.1007/s40071-016-0133-2](https://doi.org/10.1007/s40071-016-0133-2)
- Camacho-Jiménez, L., Álvarez-Sánchez, A.R., & Mejía-Ruiz, C.H. (2020). Silver nanoparticles (AgNPs) as antimicrobials in marine shrimp farming: A review. *Aquaculture Reports*, 18, 100512. doi: [10.1016/j.aqrep.2020.100512](https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2020.100512)

- Jahanbakhsh, A., Shaluei, F., & Hedayati, A. (2012). Detection of Silver Nanoparticles (Nanosil®) LC50 in Silver Carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) and Goldfish (*Carassius auratus*). *World Journal of Zoology*, 7(2), 126-130. doi: [10.5829/idosi.wjz.2012.7.2.62129](https://doi.org/10.5829/idosi.wjz.2012.7.2.62129)
- Jahn, W. (1999). Chemical aspects of the use of gold clusters in structural biology. *Journal of Structural Biology*, 127, 106-108.
- Jasni, A.H., Ali, A.A., Sagadevan, S., & Wahid, Z. (2021). Silver nanoparticles in various new applications. In S. Kumar, P. Kumar, & C. S. Pathak (Eds.), *Silver micro-nanoparticles - properties, synthesis, characterization, and applications*. IntechOpen, 2, 30-60. doi: [10.5772/intechopen.96105](https://doi.org/10.5772/intechopen.96105)
- Jeevanandam, J., Barhoum, A., Chan, Y.S., Dufresne, A., & Danquah, M.K. (2018). Review on nanoparticles and nanostructured materials: history, sources, toxicity and regulations. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 9, 1050-1074. doi: [10.3762/bjnano.9.98](https://doi.org/10.3762/bjnano.9.98)
- Jin, C., Wang, K., Oppong-Gyebi, A., & Hu, J. (2020). Application of Nanotechnology in Cancer Diagnosis and Therapy - A Mini-Review. *International Journal of Medical Sciences*, 17(18), 2964-2973. doi: [10.7150/ijms.49801](https://doi.org/10.7150/ijms.49801)
- Johari, S.A., Kalbassi, M.R., Soltani, M., & Yu, I.J. (2013). Toxicity comparison of colloidal silver nanoparticles in various life stages of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Iranian Journal of Fisheries Sciences*, 12(1), 76-95.
- Johari, S.A., Kalbassi, M.R., Soltani, M., & Yu, I.J. (2015). Study of fungicidal properties of colloidal silver nanoparticles (AgNPs) on trout egg pathogen, *Saprolegnia* sp. *International Journal of Aquatic Biology*, 3(3), 191-198.
- Kathiresan, K., Alikunhi, N.M., Pathmanaban, S., Nabikhan, A., & Kandasamy, S. (2010). Analysis of antimicrobial silver nanoparticles synthesized by coastal strains of *Escherichia coli* and *Aspergillus niger*. *Canadian Journal of Microbiology*, 56, 1050-1059.
- Khan, M.S., Jabeen, F., Aziz Qureshi, N., Saleem Asghar, M., Shakeel, M., & Noureen, A. (2015). Toxicity of silver nanoparticles in fish: a critical review. *Journal of*
- tion and characterization of silver nanoparticles using *Escherichia coli*. *Colloids Surf. B Biointerfaces*, 74, 328-335. doi: [10.1016/j.colsurfb.2009.07.048](https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2009.07.048)
- García-Barrasa, J., López-de-Luzuriaga, J.M., & Monge, M. (2011). Silver nanoparticles: synthesis through chemical methods in solution and biomedical applications. *Central European Journal of Chemistry*, 9, 7-19. doi: [10.2478/s11532-010-0124-x](https://doi.org/10.2478/s11532-010-0124-x)
- CDC, B. (2022). Centers for Disease Control and Prevention. The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). *Nanotechnology*, 2, 1-14.
- Choi, J.E., Kim, S., Ahn, J.H., Youn, P., Kang, J.S., Park, K., Yi, J., & Ryu, D. (2009). Induction of oxidative stress and apoptosis by silver nanoparticles in the liver of adult Zebrafish. *Aquatic Toxicology*, 100(2), 151-159. doi: [10.1016/j.aquatox.2009.12.012](https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2009.12.012)
- Dube, E., & Okuthe, G.E. (2023). Engineered nanoparticles in aquatic systems: Toxicity and mechanism of toxicity in fish. *Emerging Contaminants*, 9(2), 100212. doi: [10.1016/j.emcon.2023.100212](https://doi.org/10.1016/j.emcon.2023.100212)
- Franklin, N.M., Rogers, N.J., Apte, S.C., Batley, G.E., Gadd, G.E., & Casey, P.S. (2007). Comparative toxicity of nanoparticulate ZnO, bulk ZnO, and ZnCl₂ to a freshwater microalga (*Pseudokirchneriella subcapitata*): the importance of particle solubility. *Environmental Science and Technology*, 41, 8484-8490. doi: [10.1021/es071445r](https://doi.org/10.1021/es071445r)
- Fernando, I., & Zhou, Y. (2019). Impact of pH on the stability, dissolution and aggregation kinetics of silver nanoparticles. *Chemosphere*, 216, 297-305.
- Güzel, R., & Erdal, G. (2018). Synthesis of Silver Nanoparticles. In (Ed.), *Silver Nanoparticles - fabrication, characterization and applications*. IntechOpen, 2, 30-50. doi: [10.5772/intechopen.75363](https://doi.org/10.5772/intechopen.75363)
- Hedayati, A., Shaluei, F., & Jahanbakhsh, A. (2012). Comparison of Toxicity Responses by Water Exposure to Silver Nanoparticles and Silver Salt in Common Carp (*Cyprinus carpio*). *Global Veterinaria*, 8(2), 179-184.
- Iravani, S., Korbekandi, H., Mirmohammadi, S.V., & Zolfaghari, B. (2014). Synthesis of silver nanoparticles: chemical, physical and biological methods. *Research in Pharmaceutical Sciences*, 9(6), 385-406.

- Muller, M.P., MacDougall, C., & Lim, M. (2016). Ontario Agency for Health Protection and Promotion Public Health Ontario; Provincial Infectious Diseases Advisory Committee on Infection Prevention and Control; Provincial Infectious Diseases Advisory Committee on Infection Prevention and Control. Antimicrobial surfaces to prevent healthcare-associated infections: a systematic review. *Journal of Hospital Infection*, 92(1), 7-13. doi: [10.1016/j.jhin.2015.09.008](https://doi.org/10.1016/j.jhin.2015.09.008)
- Nakamura, S., Sato, M., Sato, Y., Ando, N., Takayama, T., Fujita, M., & Ishihara, M. (2019). Synthesis and application of silver nanoparticles (Ag NPs) for the prevention of infection in healthcare workers. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(15), 3620. doi: [10.3390/ijms20153620](https://doi.org/10.3390/ijms20153620)
- Nanja, A.F., Focke, W.W., & Musee, N. (2020). Aggregation and dissolution of aluminium oxide and copper oxide nanoparticles in natural aqueous matrixes. *SN Applied Sciences*, 2, 1-16. doi: [10.1007/s42452-020-2952-4](https://doi.org/10.1007/s42452-020-2952-4)
- Navaladian, S., Viswanathan, B., Varadarajan, T.K., & Viswanath, R.P. (2008). Microwave-assisted rapid synthesis of anisotropic Ag nanoparticles by solid state transformation. *Nanotechnology*, 19, 045603. doi: [10.1088/0957-4484/19/04/045603](https://doi.org/10.1088/0957-4484/19/04/045603)
- Nikalje, A.P. (2015). Nanotechnology and its Applications in Medicine. *Medicinal Chemistry*, 5, 81-89. doi: [10.4172/2161-0444.1000247](https://doi.org/10.4172/2161-0444.1000247)
- Patra, J.K., Das, G., Fraceto, L.F., Campos, E., Rodriguez-Torres, M., Acosta-Torres, L.S., Diaz-Torres, L.A., Grillo, R., Swamy, M.K., Sharma, S., Habtemariam, S., & Shin, H.S. (2018). Nano based drug delivery systems: recent developments and future prospects. *Journal of Nanobiotechnology*, 16(1), 71. doi: [10.1186/s12951-018-0392-8](https://doi.org/10.1186/s12951-018-0392-8)
- Pimentel-Acosta, C.A., Morales-Serna, F.N., Chávez-Sánchez, M.C., Lara, H.H., Pestryakov, A., Bogdanchikova, N., & Fajer-Ávila E.J. (2019). Efficacy of silver nanoparticles against the adults and eggs of monogenean parasites of fish. *Parasitology Research*, 118(6), 1741-1749. doi: [10.1007/s00436-019-06315-9](https://doi.org/10.1007/s00436-019-06315-9)
- Ogunfowora, L.A., Iwuzor, K.O., Ighalo, J.O., & Igwegbe, C.A. (2021). Trends in the treatment of aquaculture Biodiversity and Environmental Sciences, 2, 1-18.
- Khan, I., Saeed, K., & Khan, I. (2017). Nanoparticles: Properties, Applications and Toxicities. *Arabian Journal of Chemistry*, 12(7), 908-931. doi: [10.1016/j.arab-jc.2017.05.011](https://doi.org/10.1016/j.arab-jc.2017.05.011)
- Khandelwal, N., Kaur, G., Kumar, N., & Tiwari, A. (2014). Application of silver nanoparticles in viral inhibition: A new hope for antivirals. *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*, 9(1), 175-186.
- Khanh, N.V., & Cu, P.V. (2019). Antibacterial activity of silver nanoparticles against *Aeromonas* spp. and *Vibrio* spp. isolated from aquaculture water environment at Thua Thien Hue. *Hue University Journal of Science: Agriculture and Rural Development*, 128(3), 5-16. doi: [10.26459/hueuni-jard.v128i3B.4615](https://doi.org/10.26459/hueuni-jard.v128i3B.4615)
- Khodashenas, B., & Ghorbani, H.R. (2015). Synthesis of silver nanoparticles with different shapes. *Arabian Journal of Chemistry*, 12(8), 1823-1838. doi: [10.1016/j.arabjc.2014.12.014](https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2014.12.014)
- Kim, J.S., Kuk, E., Yu, K.N., Kim, J.H., Park, S.J., Lee, H.I., Kim, S.H., Park, S.J., Park, Y.H., Hwang, C.Y., Kim, Y.K., Lee, Y.S., Jeong, D.H., & Cho, M.H. (2007). Antimicrobial effects of silver nanoparticles. *Nanomedicine, Nanotechnology, Biology, and Medicine*, 3, 95-101.
- Lawson, T.B. (1995). *Fundamentals of Aquaculture engineering*. Chapman and Hall, New York, USA.
- Lee, H.J., & Jeong, S.H. (2005). Bacteriostasis and Skin innocuousness of nanosize silver colloids on textile fabrics. *Textile Research Journal*, 75(7), 551-556.
- Maiti, D., Tong, X., Mou, X., & Yang, K. (2019). Carbon-Based Nanomaterials for Biomedical Applications: A Recent Study. *Frontiers in Pharmacology*, 9, 1401. doi: [10.3389/fphar.2018.01401](https://doi.org/10.3389/fphar.2018.01401)
- Márquez, J.C.M., Partida, A.H., Monroy, Dosta, M.D.C., Mejía, J.C., & Martínez, J.A.B. (2018). Silver nanoparticles applications (AgNPs) in aquaculture. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*, 6(2), 5-11.
- Mbanga, O., Cukrowska E., & Gulumian, M. (2022). Dissolution kinetics of silver nanoparticles: behaviour in simulated biological fluids and synthetic environmental media. *Toxicology Reports*, 9, 788-796. doi: [10.1016/j.toxrep.2022.03.044](https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2022.03.044)

- nanoparticles on zebrafish embryos in aquatic ecosystems. *Nanomaterials*, 12, 1-18. doi: [10.3390/nano12040717](https://doi.org/10.3390/nano12040717)
- Saleh, M., Abdel-Baki, A.A., Dkhil, M.A., El-Matbouli, M., & Al-Quraishy, S. (2017). Antiprotozoal effects of metal nanoparticles against *Ichthyophthirius multifiliis*. *Parasitology*, 144(13), 1802-1810. doi: [10.1017/S0031182017001184](https://doi.org/10.1017/S0031182017001184)
- Senapati, S. (2005). Biosynthesis and immobilization of nanoparticles and their applications. University of Pune, India.
- Sibiya, A., Gopi, N., Jeyavani, J., Mahboob, S., Al-Ghanim, K.A., Sultana, S., Mustafa, A., & Govindarajan, M.B. (2022). Vaseeharan Comparative toxicity of silver nanoparticles and silver nitrate in freshwater fish *Oreochromis mossambicus*: a multi-biomarker approach *Comp. Comparative Biochemistry and Physiology Part C*, 259, 109-201. doi: [10.1016/j.cbpc.2022.109391](https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2022.109391)
- Sivaramasamy, E., Zhiwei, W., Li, F., & Xiang, J. (2016). Enhancement of Vibriosis Resistance in *Litopenaeus vannamei* by Supplementation of Biomastered Silver Nanoparticles by *Bacillus subtilis*. *Journal of Nanomedicine and Nanotechnology*, 7, 352. doi: [10.4172/2157-7439.1000352](https://doi.org/10.4172/2157-7439.1000352)
- Shaalán, M.I., El-Mahdy, M.M., Theiner, S., El-Matbouli, M., & Saleh, M. (2017). In vitro assessment of the antimicrobial activity of silver and zinc oxide nanoparticles against fish pathogens. *Acta Veterinaria Scandinavica*, 59, 49-58. doi: [10.1186/s13028-017-0317-9](https://doi.org/10.1186/s13028-017-0317-9)
- Sharma, V., Yngard, R., & Lin, Y. (2008). Silver nanoparticles: green synthesis and their antimicrobial activities. *Advances in Colloid and Interface Science*, 145(1-2), 83-96. doi: [10.1016/j.cis.2008.09.002](https://doi.org/10.1016/j.cis.2008.09.002)
- Sharma, V.K., Siskova, K.M., Zboril, R., & Gardea-Torresdey, J.L. (2014). Organic-coated silver nanoparticles in biological and environmental conditions: fate, stability and toxicity. *Advances in Colloid and Interface Science*, 204, 15-34. doi: [10.1016/j.cis.2013.12.002](https://doi.org/10.1016/j.cis.2013.12.002)
- Siddiqi, K.S., & Husen, A. (2017). Recent advances in plant-mediated engineered gold nanoparticles and their application in biological system. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 40, 10-23. doi: [10.1016/j.jtemb.2016.11.012](https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2016.11.012)
- effluents using nanotechnology. *Cleaner Materials*, 2, 100024. doi: [10.1016/j.clema.2021.100024](https://doi.org/10.1016/j.clema.2021.100024)
- Ochoa-Meza, A.R., Álvarez-Sánchez, A.R., Romo-Quinonez, C.R., Barraza, A., Magallón-Barajas, F.J., Chávez-Sánchez, A., García-Ramos, J.C., Toledano-Magaña, Y., Bogdanchikova, N., Pestryakov, A., & Mejía-Ruiz, C.H. (2019). Silver nanoparticles enhance survival of white spot syndrome virus infected *Penaeus vannamei* shrimps by activation of its immunological system. *Fish and Shellfish Immunology*, 84, 1083-1089. doi: [10.1016/j.fsi.2018.10.007](https://doi.org/10.1016/j.fsi.2018.10.007)
- Que, Z.G., Torres, J.G.T., Pérez Vidal, H., Rocha, M.A.L., Pérez, J.C.A., López, I., De La Cruz Romero, D., De Los Monteros Reyna, A.E., Sosa, J.G.P., Pavón, A.A., & Hernández, J.S.F. (2018). Application of silver nanoparticles for water treatment. In (Ed.), *Silver Nanoparticles - Fabrication, Characterization and Applications*. *IntechOpen*, 1, 20-50. doi: [10.5772/intechopen.74675](https://doi.org/10.5772/intechopen.74675)
- Radkhah, A.R., & Eagderi, S. (2020). Book Review: B. Prideaux, A. Pabel. (Eds.), *Coral Reefs: Tourism, Conservation and Management*, Routledge Publishing, Taylor & Francis Group (2018). (288 p. ISBN: 978-1-315-53732-0 (ebook)). *Biological Conservation*, 241, 108403. doi: [10.1016/j.biocon.2019.108403](https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.108403)
- Radkhah, A.R., & Sadeghinejad Masouleh, E. (2020). *Fish Diseases and Medicine*. 2019. Edited by Smith, SA CRC Press, Taylor & Francis Group. 413 pages. ISBN: 978-1-4987-2786-0 (Hardback). *Journal of Fish Diseases*, 43(10), 1111-1113. doi: [10.1111/jfd.13236](https://doi.org/10.1111/jfd.13236)
- Rai, M., Yadav, A., & Gade, A. (2009). Silver nanoparticles as a new generation of antimicrobials. *Biotechnology Advances*, 27, 76-83. doi: [10.1016/j.biotechadv.2008.09.002](https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.09.002)
- Ramya, M., & Subapriya, M.S. (2012). Green synthesis of silver nanoparticles. *International Journal Pharmacy, Medical and Biology Sciences*, 5, 2-22.
- Ratan, Z.A., Mashrur, F.R., Chhoan, A.P., Shahriar, S.M., Haidere, M.F., Runa, N.J., Kim, S., Kweon, D.H., Hosseinzadeh, H., & Cho, J.Y. (2021). Silver Nanoparticles as Potential Antiviral Agents. *Pharmaceutics*, 13(12), 2034. doi: [10.3390/pharmaceutics13122034](https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13122034)
- Lee, Y.L., Shih, Y.S., Chen, Z.Y., & Wang, Y.J. (2022). Toxic effects and mechanisms of silver and zinc oxide

- Yung M.M.N., Mouneyrac C. and Leung K.M.Y. 2014. Ecotoxicity of Zinc Oxide Nanoparticles in the Marine Environment. In: Bhushan B. (eds) Encyclopedia of Nanotechnology. Springer, Dordrecht.
- Zahoor, M., Nazir, N., Iftikhar, M., Naz, S., Zekker, I., Burlakovs, J., Uddin, F., Kamran, A.W., Kallistova A., Pimenov N., & Ali Khan, F. (2021). A Review on silver nanoparticles: classification, various methods of synthesis, and their potential roles in biomedical applications and water treatment. *Water*, 13(16), 2216. doi: [10.3390/w13162216](https://doi.org/10.3390/w13162216)
- Zhang, H. (2013). Application of silver nanoparticles in drinking water purification. *Dissertations*, 29, 1-20.
- Zhang, X.F., Liu, Z.G., Shen, W., & Gurunathan, S. (2016). Silver Nanoparticles: Synthesis, Characterization, Properties, Applications, and Therapeutic Approaches. *International Journal of Molecular Sciences*, 17(9), 1534. doi: [10.3390/ijms17091534](https://doi.org/10.3390/ijms17091534)
- Zhang, X.P., Li, W.X., Ai, T.S., Zou, H., Wu, S.G., & Wang, G.T. (2014). The efficacy of four common anthelmintic drugs and traditional Chinese medicinal plant extracts to control *Dactylogyrus vastator* (Monogenea). *Aquaculture*, 420, 302-307. doi: [10.1016/j.aquaculture.2013.09.022](https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.09.022)
- Zhong, L., Hu, J., Cui, Z., Wan, L., & Song, W. (2007). In-situ loading of noble metal nanoparticles on hydroxyl-group-rich titania precursor and their catalytic applications. *Chemistry of Materials*, 19(18), 4557-4562.
- Zorraquín-Peña, I., Cueva, C., Bartolomé, B., & Moreno-Arribas, M.V. (2020). Silver Nanoparticles against Foodborne Bacteria. Effects at Intestinal Level and Health Limitations. *Microorganisms*, 8, 132. doi: [10.3390/microorganisms8010132](https://doi.org/10.3390/microorganisms8010132)
- Siddiqi, K.S., Husen, A., & Rao, R.A.K. (2018). A review on biosynthesis of silver nanoparticles and their bio-cidal properties. *Journal of Nanobiotechnology*, 16, 14. doi: [10.1186/s12951-018-0334-5](https://doi.org/10.1186/s12951-018-0334-5)
- Slepičková Kasálková, N., Slepička, P., & Švorčík, V. (2021). Carbon nanostructures, nanolayers, and their composites. *Nanomaterials* (Basel, Switzerland), 11(9), 2368. doi: [10.3390/nano11092368](https://doi.org/10.3390/nano11092368)
- Sohn, E.K., Johari, A., Kim, T.G., Kim, J.K., Kim, E., Lee, J.H., Chung, Y.S., & Yu, I.J. (2015). Aquatic Toxicity Comparison of Silver Nanoparticles and Silver Nanowires. *Biomed Research International*. 2015, 1-12. doi: [10.1155/2015/893049](https://doi.org/10.1155/2015/893049)
- Soltani, M., Ghodrathnema, M., Ahari, H., Ebrahimzadeh mousavi, H.A., Atee, M., Dastmalchi, F., & Rahmánya, J. (2009). The inhibitory effect of silver nanoparticles on the bacterial fish pathogens, *Streptococcus iniae*, *Lactococcus garvieae*, *Yersinia ruckeri* and *Aeromonas hydrophila*. *Journal of Veterinary Research*, 3(2), 137-142.
- Tran, Q.H., Nguyen, V.Q., & Le, A.T. (2013). Silver nanoparticles: synthesis, properties, toxicology, applications and perspectives. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 4, 4033001. doi: [10.1088/2043-6262/4/3/033001](https://doi.org/10.1088/2043-6262/4/3/033001)
- Van, T.Q.K., Son, N.H., & Vi, H.V. (2015). Effect of silver nanoparticles for *Vibrio* spp. causing luminous bacteria disease on *Litopenaeus vannamei* in Thua Thien Hue. *Hue University Journal of Science*, 104(5), 273-283.
- Vaseeharan, B., Ramasamy, P., & Chen, J.C. (2010). Antibacterial activity of silver nanoparticles (AgNps) synthesized by tea leaf extracts against pathogenic *Vibrio harveyi* and its protective efficacy on juvenile *Fenneropenaeus indicus*. *Letters in Applied Microbiology*, 50(4), 352-356.
- Villella S. (2016). Manual on effluent treatment in aquaculture: Science and Practice. 1, 2-10.
- Yadav, P.K., Kochar, C., Taneja, L., & Tripathy, S.S. (2022). Study on dissolution behavior of CuO nanoparticles in various synthetic media and natural aqueous medium. *Journal of Nanoparticle Research*, 24: 122. doi: [10.1007/s11051-022-05508-1](https://doi.org/10.1007/s11051-022-05508-1)

In the Name of Allah

Journal of Water and Sustainable Development

Volume 10 - Issue 2 (Serial No. 28) - September 2023

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
Davary, K. 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
Esmaili, K. Asso. Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Jolaini, M. Asso. Prof., Agricultural and Natural Resources Research Center of Khorasan Razavi
Morid, S. Prof., Tarbiat Modares University
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
Taheri, A., 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
Davary, K., 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
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., 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:

- **Analyzing the Water, Energy and Food Nexus Mechanisms in Small-Scale Farming Exploitation Units of Hamedan Province**

M. Motaghed, H. Shabanali Fami, A. Asadi, Kh. Kalantari

- **Investigation of Changes in the Amount and Distribution of Precipitation and Temperature in Iran and Their Effects on Extreme Events**

A. Mianabadi, K. Davary

- **Introduction of Life Cycle Techniques in Evaluating Water Distribution Systems**

M. Jafari, J. Soltani, S. M. Hashemy Shahdany, M. J. Monem

- **The Trend of Changes in Relative Humidity in Razavi Khorasan Province, Northeast Iran**

Z. Shirmohammadi- Aliakbarhani, S. F. Saberali, S. M. J. Mirzaei, M. N. Modoodi

- **Analytical Assessment of Future Climate Changes in the Amol-Babol Plain Using the Main Variables Affecting Its Trend**

A. Gholami

- **Sustainable Food Security with the Help of Sustainable Aquaculture Using Modern Aquaculture Systems (part 2): Opportunities and Challenges of New Systems Development**

S. Zahedi, M. H. Khanjani, S. Safaeiyan

- **Proposed Solutions for the Sustainable Management and Effective Protection of Shared Boundary Aquifers**

M. Nakhaei, A. Ahmadi, A. Sheikhzadeh

- **The Effects of Hasanlu Dam Construction on the Local Community in the Catchment Area of Lake Urmia**

Y. Akbari, S. N. Mousavi

- **Laboratory Investigation of Scour Hole Location Downstream of Dams and its Prediction Using Data Mining Methods**

A. Taheri Aghdam, A. Nadiri, J. Shiri

- **The Use of Silver Nanoparticles (Ag-NPs) in Water Disinfection in Aquaculture Systems and the Effects of Its Release in the Environment**

A.R. Radkhah, S. Eagderi



Water-Energy Nexus

