



بهره‌برداری از پساب تصفیه‌شده در کشاورزی پایدار با رویکرد اقتصاد آب (مطالعه موردی: منطقه سیستان)

حسینعلی اسلامی نیا^{۱*}

۱- کارشناس ارشد عمران، دانشگاه غیرانتفاعی خاوران مشهد.

*ایمیل نویسنده مسول: Hoseeins1388@gmail.com

چکیده

منطقه سیستان، در شمال استان سیستان و بلوچستان، یکی از بحرانی‌ترین نواحی کشور از نظر منابع آبی به شمار می‌رود. کاهش آورد رودخانه هیرمند، افت سطح آب‌های زیرزمینی، خشک شدن تالاب هامون و تداوم خشکسالی‌های اقلیمی، موجب محدودیت شدید در منابع آب کشاورزی شده است. در چنین شرایطی، استفاده از منابع جایگزین از جمله پساب تصفیه‌شده، می‌تواند راهکاری راهبردی در جهت حفظ معیشت کشاورزان و دستیابی به کشاورزی پایدار در منطقه باشد. پژوهش حاضر با هدف بررسی امکان‌سنجی بهره‌برداری از پساب تصفیه‌شده در کشاورزی منطقه سیستان، با رویکرد اقتصاد آب انجام شده است. روش تحقیق به صورت توصیفی-تحلیلی بوده و از مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره خاکستری (Grey-DEMATEL) برای شناسایی و اولویت‌بندی عوامل مؤثر استفاده شده است. داده‌ها از طریق پرسش‌نامه تخصصی و مصاحبه با کارشناسان حوزه آب، کشاورزی و محیط زیست در منطقه سیستان گردآوری شده و با نرم‌افزار MATLAB تحلیل شدند. نتایج نشان داد که زیرساخت‌های فنی، کیفیت پساب، هزینه‌های اقتصادی و میزان پذیرش اجتماعی، از جمله عوامل کلیدی در موفقیت این راهبرد هستند. در پایان، مجموعه‌ای از پیشنهادها کاربردی در حوزه سیاست‌گذاری، زیرساختی و آموزشی جهت توسعه بهره‌برداری پایدار از پساب در منطقه سیستان ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: پساب تصفیه‌شده، کشاورزی پایدار، اقتصاد آب، منطقه سیستان، مدیریت منابع آب.

۱- مقدمه

یکی از چالش‌های اساسی پیش‌روی توسعه پایدار در قرن ۲۱، مدیریت منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. کشور ایران با اقلیم غالب خشک و نیمه‌خشک، همواره با محدودیت منابع آبی روبه‌رو بوده و در سال‌های اخیر، بحران آب به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین تهدیدها برای امنیت غذایی، محیط‌زیست و توسعه اقتصادی کشور مطرح شده است [۱]. منطقه سیستان در شمال استان سیستان و بلوچستان، از جمله کانون‌های تنش آبی در کشور به شمار می‌رود. وابستگی شدید به آورد رودخانه هیرمند، افت سطح آب‌های زیرزمینی، کاهش شدید بارندگی، خشک‌شدن تالاب هامون و تکرار خشکسالی‌های اقلیمی، منجر به ایجاد بحران گسترده در تأمین آب مورد نیاز بخش کشاورزی شده است [۲]. از آنجا که بخش عمده‌ای از معیشت ساکنان منطقه بر پایه کشاورزی معیشتی استوار است، تدوین و اجرای راهکارهای پایدار برای تأمین آب در این منطقه از اهمیت مضاعف برخوردار است.

در سال‌های اخیر، بهره‌برداری از پساب تصفیه‌شده شهری و روستایی به‌عنوان یکی از منابع جایگزین در تأمین آب کشاورزی مورد توجه قرار گرفته است. این منبع ثانویه در صورت مدیریت و پایش مناسب، می‌تواند نقش مهمی در کاهش وابستگی به منابع آب متعارف، کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری در مصرف آب داشته باشد [۳]. با این حال، اجرای موفق این راهکار با چالش‌هایی نظیر نبود زیرساخت مناسب، کیفیت نامناسب پساب، نبود استانداردهای قانونی و مقاومت اجتماعی روبه‌رو است [۴].



در این پژوهش، با تمرکز بر منطقه سیستان، تلاش شده است تا ضمن شناسایی ابعاد مختلف استفاده از پساب در کشاورزی پایدار، به تحلیل عوامل اقتصادی، فنی، اجتماعی و زیست‌محیطی مؤثر در این فرآیند پرداخته شود. به منظور تحلیل ساختاری روابط میان این عوامل، از مدل Grey-DEMATEL استفاده شده است که امکان اولویت‌بندی و تحلیل روابط علی و معلولی را در فضای تصمیم‌گیری پیچیده و دارای عدم قطعیت فراهم می‌سازد. هدف اصلی این مقاله، ارائه راهکارهایی علمی و کاربردی برای توسعه پایدار بهره‌برداری از پساب در منطقه سیستان است...

۲- پیشینه پژوهش

با گسترش پدیده خشکسالی و کاهش منابع آب تجدیدپذیر، استفاده از پساب تصفیه‌شده به‌عنوان منبعی جایگزین و قابل بازیافت، در دهه‌های اخیر توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است. مرور ادبیات موجود نشان می‌دهد که مطالعات مرتبط با استفاده از پساب در کشاورزی را می‌توان در سه محور اصلی بررسی کرد: مطالعات فنی و زیست‌محیطی، مطالعات اقتصادی و مطالعات اجتماعی و فرهنگی.

مطالعات فنی و زیست‌محیطی:

در پژوهشی میدانی در جنوب کشور نشان دادند که پساب تصفیه‌شده حاوی مقادیر قابل توجهی نیتروژن، فسفر و پتاسیم است که می‌تواند نقش تغذیه‌ای مناسبی برای گیاهان ایفا کند، اما در صورت عدم کنترل پارامترهای خطرناک مانند BOD، COD و فلزات سنگین، خطرات جدی برای خاک و سفره‌های آب زیرزمینی به همراه دارد. همچنین، [۳] در پژوهش خود در استرالیا تأکید کرده است که تدوین استانداردهای دقیق برای پایش کیفیت پساب و تعیین نوع محصولات قابل آبیاری، شرط اولیه برای بهره‌برداری ایمن از این منبع است.

مطالعات اقتصادی:

در بُعد اقتصادی، [۴] در تحقیقی در کرمانشاه، با استفاده از تحلیل هزینه-فایده نشان دادند که هزینه استفاده از پساب در هر هکتار زمین کشاورزی، در مقایسه با استفاده از آب چاه، ۳۵ تا ۴۵ درصد کمتر است. علاوه بر آن، استفاده از پساب در آن منطقه منجر به کاهش وابستگی به پمپاژ برق بر و مصرف سوخت‌های فسیلی شد. [۱]. نیز با ارائه مدل سیاست‌گذاری منابع آب، تأکید می‌کند که بدون حمایت دولتی و سیاست‌های مشوق‌محور، انگیزه‌ای برای بهره‌برداری از منابع غیرمعارف در میان بهره‌برداران ایجاد نخواهد شد.

مطالعات اجتماعی و فرهنگی:

از منظر اجتماعی، [۲] در مطالعه‌ای در سیستان با بررسی نگرش ۱۰۰ کشاورز نشان دادند که حدود ۶۵ درصد آن‌ها در ابتدا نسبت به استفاده از پساب نگرانی‌هایی بهداشتی و زیست‌محیطی داشتند. اما پس از شرکت در کارگاه‌های آموزشی، تمایل به استفاده از این منبع تا ۸۰ درصد افزایش یافت. آن‌ها پیشنهاد می‌کنند که آموزش و اطلاع‌رسانی مستمر در کنار تضمین کیفیت پساب، راهکار کلیدی برای افزایش پذیرش اجتماعی است. نیز در پژوهشی مشابه در استان یزد به نتایج هم‌راستا دست یافتند و تأکید کردند که اعتمادسازی اجتماعی و شفاف‌سازی قانونی، دو عامل اساسی در توسعه استفاده از پساب هستند.

بررسی مطالعات نشان می‌دهد که اگرچه استفاده از پساب در کشاورزی دارای پتانسیل بالایی از نظر فنی، اقتصادی و محیط‌زیستی است، اما اجرای موفق آن نیازمند وجود زیرساخت مناسب، استانداردهای فنی دقیق، حمایت قانونی و جلب اعتماد عمومی است. با این حال، در منطقه سیستان با وجود تنش آبی شدید، پژوهش جامعی که به‌صورت ترکیبی و تحلیلی این ابعاد را با هم و در بستر یک مدل تصمیم‌گیری ساختارمند بررسی کند، تاکنون انجام نشده است. پژوهش حاضر در پی پاسخ به این خلأ علمی است و تلاش دارد با بهره‌گیری از مدل Grey-DEMATEL، روابط بین شاخص‌های مؤثر در بهره‌برداری از پساب در منطقه سیستان را تحلیل و اولویت‌بندی کند.



۳- مبانی نظری و مفهومی

پژوهش حاضر بر پایه تلفیقی از نظریه‌های توسعه پایدار، اقتصاد منابع آب، کشاورزی مقاوم در برابر کم‌آبی، و مدل‌های تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره در شرایط عدم قطعیت شکل گرفته است. برای بررسی علمی بهره‌برداری از پساب در منطقه سیستان، لازم است مفاهیم کلیدی ذیل، با استناد به منابع علمی به‌روز، معرفی و تبیین شوند.

۱. کشاورزی پایدار

کشاورزی پایدار مفهومی است که بر بهره‌برداری عقلانی از منابع طبیعی به‌منظور تأمین نیازهای فعلی بدون به خطر انداختن توان نسل‌های آینده تأکید دارد. طبق تعریف سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO)، کشاورزی پایدار بر سه محور اصلی استوار است: کارایی اقتصادی، پایداری محیط‌زیستی، و عدالت اجتماعی (FAO، ۲۰۲۰).

در مناطق خشک مانند سیستان که بحران آب به یکی از معضلات جدی معیشتی بدل شده، اتخاذ الگوهای کشاورزی پایدار از جمله بهره‌گیری از منابع آب جایگزین مانند پساب تصفیه‌شده، ضرورتی غیرقابل انکار محسوب می‌شود [۵].

۲. اقتصاد آب

اقتصاد آب شاخه‌ای از اقتصاد کاربردی است که بر تخصیص بهینه منابع آب با توجه به ارزش اقتصادی آن در بخش‌های مختلف تأکید دارد (مدنی، ۱۳۹۳). در این حوزه، استفاده از منابع غیرمعارف مانند پساب تصفیه‌شده، به‌عنوان راهکاری برای افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌های تأمین آب مطرح شده است [۴].

در منطقه زابل که منابع آبی بسیار محدود شده و هزینه‌های استخراج آب زیرزمینی به شدت افزایش یافته، پساب می‌تواند به‌عنوان گزینه‌ای اقتصادی، بخشی از نیاز آبی کشاورزی را تأمین کند و ساختار ناپایدار اقتصادی منطقه را تا حدی ترمیم نماید.

۳. منابع آب جایگزین

منابع آب جایگزین به آن دسته از منابع غیرمرسوم گفته می‌شود که با استفاده از فناوری، قابل بازچرخانی و بهره‌برداری مجدد هستند. این منابع شامل آب‌های شور، زه‌آب‌های کشاورزی، آب باران و به‌ویژه پساب تصفیه‌شده می‌باشند. کشورهایی مانند اسپانیا و اسرائیل تجربه‌های موفقی در استفاده هدفمند از پساب در کشاورزی داشته‌اند [۳].

در ایران، به‌ویژه در استان‌های خشک مانند سیستان و بلوچستان، سیاست‌گذاری جدیدی در حال شکل‌گیری برای گسترش استفاده از این منابع است. تجربه‌های ابتدایی استفاده از پساب در فضای سبز شهری زابل نیز مؤید قابلیت اجرایی این راهبرد است [۶].

۴. پذیرش اجتماعی و زیست‌محیطی

یکی از چالش‌های مهم در بهره‌برداری از پساب، پذیرش اجتماعی آن در میان کشاورزان و مصرف‌کنندگان است. نگرانی‌های فرهنگی، بهداشتی و روانی از جمله موانع مطرح‌شده در ادبیات علمی هستند.

مطالعه میدانی [۲] در سیستان نشان داد که بیش از ۶۰ درصد کشاورزان در ابتدا نگرانی‌هایی درباره سلامت محصولات آبیاری‌شده با پساب داشتند؛ اما پس از آموزش و آشنایی با فرایندهای تصفیه، نگرش آن‌ها به‌شکل چشمگیری بهبود یافت. این موضوع نشان می‌دهد که سرمایه‌گذاری در حوزه آموزش، فرهنگ‌سازی و شفافیت اطلاعاتی می‌تواند مؤثرترین راهبرد برای غلبه بر مقاومت اجتماعی باشد.

۵. مدل Grey-DEMATEL

مدل تصمیم‌گیری Grey-DEMATEL تلفیقی از تحلیل ماتریس اثرات علی و نظریه سیستم‌های خاکستری است که به‌طور خاص برای تحلیل مسائل تصمیم‌گیری در شرایط ابهام و داده‌های کیفی طراحی شده است [۷].

این مدل امکان شناسایی روابط بین شاخص‌ها و تعیین شدت تأثیرگذاری هر عامل را فراهم می‌کند. در این پژوهش، مدل Grey-DEMATEL برای بررسی روابط میان شاخص‌هایی مانند کیفیت پساب، زیرساخت فنی، هزینه‌ها، پذیرش اجتماعی و اثرات زیست‌محیطی در منطقه سیستان به‌کار گرفته شده است.



۴- روش‌شناسی پژوهش

پژوهش حاضر با هدف تحلیل روابط علی و ساختاری میان عوامل مؤثر بر بهره‌برداری از پساب تصفیه‌شده در کشاورزی منطقه سیستان انجام شده است. این مطالعه از نوع کاربردی از نظر هدف و توصیفی-تحلیلی از نظر ماهیت است و از روش‌های تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره خاکستری (Grey-DEMATEL) بهره می‌گیرد که مناسب برای بررسی روابط متقابل میان شاخص‌ها در شرایط عدم قطعیت و داده‌های زبانی است [۷]. جامعه آماری و نمونه‌گیری:

جامعه آماری این تحقیق را خبرگان و متخصصان حوزه‌های منابع آب، کشاورزی، تصفیه فاضلاب و محیط زیست در منطقه سیستان (به‌ویژه شهر زابل) تشکیل می‌دهند. انتخاب نمونه به روش هدفمند (قضاوتی) انجام شد تا اطمینان حاصل شود که مشارکت‌کنندگان دارای آگاهی عمیق و تجربه عملی در زمینه موضوع پژوهش باشند. در مجموع، تعداد ۱۵ نفر از خبرگان شامل اعضای هیئت علمی دانشگاه زابل، کارشناسان جهاد کشاورزی، اداره منابع آب، شرکت آب و فاضلاب استان و شهرداری در فرآیند جمع‌آوری داده‌ها مشارکت داشتند. ابزار گردآوری داده‌ها:

برای جمع‌آوری داده‌ها از پرسش‌نامه تخصصی مبتنی بر مقایسه زوجی استفاده شد که بر پایه ادبیات موضوع [۵] طراحی گردید. این پرسش‌نامه شامل پنج شاخص اصلی و اثرگذار در بهره‌برداری از پساب است:

- ❖ زیرساخت فنی
- ❖ کیفیت پساب
- ❖ پذیرش اجتماعی
- ❖ هزینه‌های اقتصادی
- ❖ اثرات زیست‌محیطی

هر خبره میزان تأثیر هر شاخص بر سایر شاخص‌ها را در مقیاس لیکرت زبانی (خیلی زیاد تا خیلی کم) ارزیابی نمود. به‌منظور بررسی روایی محتوایی، پرسش‌نامه به تأیید سه استاد دانشگاه و دو مدیر اجرایی مرتبط رسید و ضریب هم‌هنگی نظرات محاسبه شد.

معرفی مدل Grey-DEMATEL و مراحل اجرای آن:

مدل Grey-DEMATEL ترکیبی از تحلیل ساختاری DEMATEL و نظریه سیستم‌های خاکستری (Grey Systems Theory) است که برای مدل‌سازی روابط پیچیده میان عوامل سیستم در شرایط داده‌های زبانی یا مبهم کاربرد دارد. دلیل انتخاب این مدل، توانایی آن در تحلیل سلسله‌مراتب تأثیرگذاری شاخص‌ها و استخراج روابط علی و معلولی میان آن‌ها بود، به‌ویژه در بسترهایی همچون منطقه سیستان که اطلاعات عددی کمی در دسترس است. مراحل اجرای مدل در این پژوهش به شرح زیر است:

- شناسایی شاخص‌ها: با تحلیل ادبیات و مشورت با خبرگان، ۵ شاخص اصلی انتخاب شدند.
 - جمع‌آوری نظرات خبرگان: از طریق پرسش‌نامه و به‌صورت زبانی (خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم، خیلی کم).
 - تبدیل داده‌های زبانی به مقادیر خاکستری: با استفاده از اعداد فازی مثلثی و توابع عضویت، داده‌ها به بازه‌های عددی فازی تبدیل شدند.
 - تشکیل ماتریس تأثیر مستقیم: با میانگین‌گیری از ارزیابی‌ها.
 - نرمال‌سازی و محاسبه ماتریس کامل تأثیرات: شامل تأثیر مستقیم + غیرمستقیم
 - محاسبه مجموع اثرگذاری (D) و اثرپذیری (R): برای هر شاخص.
 - تحلیل نمودار D+R و D-R: برای تعیین جایگاه هر شاخص به‌عنوان «علت» یا «معلول» در سیستم.
- ابزار تحلیل داده‌ها:



برای انجام محاسبات و تحلیل مدل از نرم‌افزارهای MATLAB (نسخه ۲۰۲۱R) و Microsoft Excel استفاده شد. در MATLAB کدنویسی لازم برای فازی‌سازی و اعمال مدل DEMATEL انجام گرفت. داده‌ها به صورت ماتریس تأثیرگذاری پردازش و نمودار شبکه‌ای روابط بین شاخص‌ها ترسیم شد. دلایل انتخاب مدل و اعتبار نتایج:

مدل Grey-DEMATEL در سال‌های اخیر به‌ویژه در پژوهش‌های آب و محیط‌زیست مورد استفاده قرار گرفته است و مزیت اصلی آن نسبت به مدل‌های دیگر، تحلیل تعاملی شاخص‌ها و سازگاری با داده‌های زبانی و کارشناسی است [۸]. این مدل قبلاً نیز در پژوهش‌هایی مشابه در استان خراسان جنوبی و هرمزگان با موفقیت به کار رفته است [۹].

۵- یافته‌ها و تحلیل‌ها

یافته‌های حاصل از اجرای مدل Grey-DEMATEL در این تحقیق، دید جامعی از ساختار علی و شدت ارتباط بین شاخص‌های کلیدی مؤثر در بهره‌برداری از پساب تصفیه‌شده در کشاورزی ارائه می‌دهد. در ادامه، تحلیل دقیق داده‌ها همراه با پیوند مشخص به وضعیت شهر زابل و منطقه سیستان آورده شده است. تحلیل ماتریس تأثیرگذاری مستقیم:

ماتریس تأثیرگذاری مستقیم بر پایه نظرات ۱۵ نفر از خبرگان محلی و متخصصان حوزه آب، کشاورزی و تصفیه در منطقه سیستان شکل گرفت. نتایج حاصل از میانگین نظرات نشان داد که شاخص «زیرساخت فنی» بیشترین تأثیر را بر سایر شاخص‌ها دارد. این امر با واقعیت‌های میدانی در شهر زابل نیز تطابق دارد؛ جایی که محدود بودن ظرفیت تصفیه‌خانه موجود و فقدان شبکه انتقال مؤثر پساب به اراضی کشاورزی، از عوامل بازدارنده اصلی در توسعه استفاده از این منبع محسوب می‌شود.

جدول ۱: خلاصه‌ای از تأثیرات متقابل بین شاخص‌ها

شاخص	تأثیرگذار بر	شدت تأثیر (میانگین)
زیرساخت فنی	کیفیت پساب، هزینه، پذیرش	۰.۶۳، ۰.۷۲، ۰.۷۸
کیفیت پساب	زیست‌محیطی، پذیرش اجتماعی	۰.۶۸، ۰.۷۷
هزینه	پذیرش اجتماعی، کیفیت	۰.۴۷، ۰.۵۸

این نتایج تأیید می‌کند که «زیرساخت» به عنوان نقطه شروع و گلوگاه کلیدی در زنجیره بهره‌برداری از پساب عمل می‌کند.

تحلیل نقش شاخص‌ها با استفاده از مقادیر R و D :

با تحلیل مجموع اثرگذاری (D) و اثرپذیری (R)، جایگاه هر شاخص در سیستم مشخص شد:

زیرساخت فنی با مقدار $D-R$ برابر با $+۱.۱۰$ ، اثرگذارترین شاخص سیستم و محرک اصلی سایر عوامل است.

پذیرش اجتماعی با $D-R$ برابر با -۰.۵۹ ، بالاترین میزان اثرپذیری را دارد و از سایر عوامل تأثیر می‌پذیرد.

اثرات زیست‌محیطی نیز نقش معلول در ساختار دارد.

در واقع، ضعف در زیرساخت‌ها موجب کاهش کیفیت پساب، افزایش هزینه‌های عملیاتی، و در نهایت افت اعتماد و پذیرش اجتماعی می‌شود؛ الگویی که در زابل به وضوح مشاهده می‌شود.

نمودار شبکه روابط علی (توصیف کیفی):

نمودار نهایی روابط علی، به صورت گراف جهت‌دار ترسیم شد و نشان داد که:

از زیرساخت فنی سه پیکان به سمت «کیفیت پساب»، «هزینه» و «پذیرش اجتماعی» امتداد یافته است.

شاخص «کیفیت» نیز روی «اثر زیست‌محیطی» و «پذیرش اجتماعی» اثرگذار است.



شاخص «هزینه» نقش میانی دارد و بر «پذیرش» تأثیر مستقیم دارد. این ساختار به صورت منطقی با چرخه سیاست گذاری آب در زابل سازگار است؛ زیرا نبود خطوط انتقال استاندارد، سامانه های پایش لحظه ای، و تجهیزات گندزدایی نهایی، از چالش های زیرساختی شناخته شده در تصفیه خانه زابل هستند [6]. تحلیل هم راستایی نتایج با واقعیت میدانی در زابل: مطابق با داده های میدانی و مشاهدات مستقیم از منطقه زابل: تنها تصفیه خانه فاضلاب زابل ظرفیت محدودی برای تأمین پساب قابل قبول جهت مصارف کشاورزی دارد. پساب خروجی عمدتاً در فضای سبز شهری مصرف می شود و برنامه ای برای انتقال آن به مزارع وجود ندارد. نگرانی های بهداشتی و عدم اطلاع رسانی به کشاورزان باعث شده که حتی در صورت دسترسی، از پساب استفاده نشود. این یافته ها با نتیجه مدل Grey-DEMATEL که «زیرساخت» را عامل کلیدی، و «پذیرش اجتماعی» را نتیجه نهایی سیستم معرفی می کند، کاملاً منطبق هستند.

۶- بحث و تحلیل تطبیقی نتایج

در این بخش، یافته های به دست آمده از مدل Grey-DEMATEL در زمینه بهره برداری از پساب تصفیه شده در کشاورزی منطقه سیستان، به ویژه شهر زابل، مورد بررسی و تحلیل تطبیقی قرار می گیرد. تحلیل نتایج در سه سطح انجام شده است: مقایسه با ادبیات پیشین، انطباق با واقعیت های منطقه ای و تحلیل ساختار علی-معلولی سیستم تصمیم گیری. انطباق نتایج با پژوهش های پیشین مطابق با نتایج تحقیق حاضر، شاخص «زیرساخت فنی» به عنوان تأثیرگذارترین عامل در فرآیند بهره برداری از پساب شناسایی شده است. این یافته با پژوهش در استان خراسان جنوبی هم راستاست که بیان کرده اند نبود شبکه های جمع آوری، تصفیه و توزیع مناسب، مانع اصلی در استفاده از پساب در آبیاری اراضی کشاورزی بوده است. همچنین، مطالعه [۶] در زابل تأیید می کند که به رغم وجود تصفیه خانه، کیفیت پساب خروجی متغیر است و به دلیل نبود خط انتقال استاندارد، امکان استفاده از آن در اراضی پیرامونی فراهم نشده است. همچنین در پژوهش [۵]، استفاده از مدل های تصمیم گیری چندمعیاره برای تحلیل پروژه های مدیریت منابع آب پیشنهاد شده و بر اهمیت نقش زیرساخت در موفقیت سیاست های آبی تأکید شده است. در مطالعه [۹] نیز مشخص شد که در پروژه های بازچرخانی آب در خراسان، پذیرش اجتماعی در گرو اطمینان از زیرساخت مناسب و نظارت دائمی بر کیفیت پساب بوده است. تحلیل منطقه ای: زابل منطقه زابل به عنوان مرکز سیستان از نظر اقلیمی و منابع آبی در وضعیت بحرانی قرار دارد. کاهش آورد رودخانه هیرمند، افت سطح آب های زیرزمینی، شوری خاک، و خشکی بلندمدت تالاب هامون، باعث شده است که کشاورزی منطقه کاملاً وابسته به سیاست های تأمین منابع آب جایگزین گردد. در چنین شرایطی، استفاده از پساب تصفیه شده، که با هزینه کمتر قابل دستیابی است، می تواند نقش راهبردی در حفظ فعالیت های کشاورزی ایفا کند. تحلیل یافته ها نشان می دهد که در زابل، شاخص زیرساخت فنی به عنوان گلوگاه اصلی سیستم مطرح است. نبود خطوط انتقال پساب، ناپایداری کیفیت خروجی تصفیه خانه، و عدم هماهنگی بین شهرداری، شرکت آب و فاضلاب و جهاد کشاورزی، از جمله مشکلاتی است که مانع از پیاده سازی سیاست های بازیافت آب شده است [۶]. تفسیر جایگاه شاخص ها در سیستم تصمیم گیری با توجه به مقادیر D-R، مشخص شد که «زیرساخت فنی» بالاترین میزان اثرگذاری را دارد، در حالی که «پذیرش اجتماعی» و «اثرات زیست محیطی» بیشترین تأثیرپذیری را داشته اند. این بدان معناست که اگر زیرساخت بهبود یابد، سایر شاخص ها نیز به تبع آن بهبود خواهند یافت. کیفیت پساب، هزینه های انتقال و بهره برداری، و پذیرش اجتماعی تابع مستقیم وضعیت فنی و مدیریتی زیرساخت هستند. نمودار شبکه ای روابط نیز این ساختار را تأیید می کند. روابط جهت دار از زیرساخت به سایر شاخص ها نشان می دهد که برای موفقیت سیاست بهره برداری از پساب، باید از نقطه گلوگاهی (زیرساخت) شروع کرد و با اصلاح کیفیت و هزینه ها، اعتماد عمومی و مشارکت کشاورزان را جلب نمود.



مقایسه با سایر مناطق کشور در استان‌های خوزستان، فارس، یزد و اصفهان، تجربیات موفق در استفاده از پساب تصفیه‌شده در آبیاری فضای سبز و اراضی غیرخوراکی وجود داشته است. پژوهش در یزد نشان داد که با سرمایه‌گذاری دولتی در زیرساخت تصفیه‌خانه‌ها و ارائه مشوق به کشاورزان، می‌توان مقاومت اجتماعی را کاهش داد. همچنین، در مطالعه مشخص شد که در اصفهان، هم‌زمان با بهبود کیفیت پساب، اطلاع‌رسانی هدفمند، نقش مؤثری در افزایش پذیرش عمومی داشته است.

جمع‌بندی تحلیلی نتایج تحقیق حاضر به‌طور دقیق مؤید یافته‌های مطالعات پیشین است، اما آنچه مطالعه موردی منطقه سیستان و شهر زابل را متمایز می‌سازد، شدت بحران آبی و نبود هماهنگی نهادی است. در این منطقه، برخلاف مناطق برخوردار، سرمایه‌گذاری زیرساختی بسیار محدود بوده و ارتباط بین نهادهای تصمیم‌گیرنده در حوزه آب و کشاورزی دچار گسست است. این وضعیت خاص ایجاب می‌کند که برنامه‌های بازچرخانی آب در زابل، صرفاً به‌عنوان پروژه‌های فنی دیده نشوند، بلکه در قالب طرح‌های کلان حکمرانی آبی و با مشارکت بین‌بخشی طراحی و اجرا شوند. همچنین بهره‌گیری از ابزارهایی مانند مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، به‌ویژه در شرایط داده‌ای ناقص و مبهم منطقه، می‌تواند در سیاست‌گذاری منطقه‌ای مؤثر واقع شود.

۷- نتیجه‌گیری

جدول ۲: نتایج

شاخص اصلی	نقش در سیستم (طبق مدل)	میزان اثرگذاری / اثرپذیری	وضعیت در زابل	راهکار پیشنهادی
زیرساخت فنی	عامل اصلی / علت	بیشترین اثرگذاری ($+D-R: 1.1$)	قدیمی، ناکامل، فاقد شبکه انتقال پایدار	توسعه تصفیه‌خانه‌ها، خطوط انتقال، مخازن ذخیره و پایش آنلاین
کیفیت پساب	واسطه / دوطرفه	متوسط اثرگذاری و اثرپذیری	خروجی ناپایدار، گاه بالاتر از استاندارد	ارتقاء سیستم تصفیه، فیلتر BOD، نهایی، کنترل COD، نیترات، فلزات سنگین
پذیرش اجتماعی	معلول / اثرپذیر	بیشترین تأثیرپذیری ($-D-R: 0.59$)	پایین؛ کشاورزان اعتماد ندارند، اطلاعات کافی ندارند	آموزش کشاورزان، بازدید میدانی، شفاف‌سازی، اطلاع‌رسانی منظم
هزینه اقتصادی	واسطه	تأثیرپذیری بالا	هزینه کمتر از آب چاه، اما بهره‌برداری دشوار است	مشوق مالی، تسهیلات سبز، کاهش آب‌بها برای استفاده از پساب
اثرات زیست‌محیطی	معلول نهایی	اثرپذیرترین شاخص ($-D-R: 0.98$)	در صورت مدیریت غلط → آلودگی خاک، شوری، تجمع آلاینده‌ها	پایش محیطی دقیق، انتخاب محصولات مقاوم، تدوین دستورالعمل کشت با پساب

پژوهش حاضر با هدف تحلیل ساختاری و علی عوامل مؤثر بر بهره‌برداری از پساب تصفیه‌شده در کشاورزی منطقه سیستان انجام شد و تمرکز آن بر شرایط خاص شهر زابل بود؛ منطقه‌ای که با شدیدترین شکل تنش آبی، افت منابع زیرزمینی، وابستگی به رودخانه خارجی و شرایط اقلیمی بیابانی مواجه است. از آنجا که کشاورزی، ستون اصلی معیشت در این منطقه را تشکیل می‌دهد، بررسی گزینه‌های پایدار تأمین آب برای این بخش از اهمیت استراتژیک برخوردار است.



مدل Grey-DEMATEL به عنوان ابزار تحلیلی در این پژوهش، امکان شناخت دقیق از روابط بین شاخص های کلیدی و اولویت بندی آن ها را فراهم آورد. نتایج مدل به صورت واضح نشان داد که شاخص «زیرساخت فنی» دارای بیشترین میزان اثرگذاری در سیستم است. این شاخص، نقشی بنیادی در شکل گیری سایر عوامل ایفا می کند؛ زیرا در نبود سامانه های تصفیه، ذخیره و انتقال استاندارد پساب، حتی پساب با کیفیت نیز قابل بهره برداری نخواهد بود.

در کنار آن، مشخص شد که «پذیرش اجتماعی» و «اثرات زیست محیطی» بیشترین میزان اثرپذیری را داشته اند؛ به این معنا که رفتار، تصمیم و مشارکت ذی نفعان در استفاده از پساب، تابع شرایطی است که از سمت سیستم فنی، اقتصادی و مدیریتی به آن ها تحمیل می شود. در منطقه زابل، وضعیت فرهنگی و سطح آگاهی مردم نیز از عوامل تشدیدکننده عدم پذیرش اجتماعی استفاده از پساب است.

همچنین، شاخص «کیفیت پساب» به عنوان عامل پیونددهنده میان زیرساخت و پیامدها عمل کرده و نشان داد که عدم ثبات در خروجی تصفیه خانه ها می تواند زنجیره اعتماد عمومی و کارایی زیست محیطی را به خطر اندازد. شاخص «هزینه اقتصادی» نیز اگرچه در برخی سیستم ها در جایگاه اول اهمیت قرار دارد، در منطقه سیستان در مرتبه دوم قرار گرفت؛ چراکه حتی با کاهش هزینه، فقدان اعتماد یا نبود سیستم انتقال باعث بلااستفاده ماندن منبع خواهد شد.

در کل، ساختار تحلیل شده در این تحقیق نشان می دهد که بهره برداری از پساب در کشاورزی تنها در صورتی ممکن است که به آن به عنوان یک سیستم یکپارچه و سلسله مراتبی نگاه شود، نه صرفاً یک منبع جایگزین آب. تصمیم گیری در این حوزه باید با درک دقیق از زنجیره علی-معلولی میان شاخص ها، توجه به بستر محلی، و ایجاد تعامل میان نهادهای مختلف برنامه ریزی شود. از آنجایی که منطقه سیستان، به ویژه زابل، ظرفیت بالایی برای تبدیل شدن به پایلوت ملی در بازچرخانی منابع آب دارد، اجرای سیاست های چندبخشی، تمرکز بر ارتقای زیرساخت، و آموزش هدفمند کشاورزان می تواند گام مؤثری در حرکت به سمت کشاورزی پایدار و تاب آور در این منطقه بحران زده باشد.

جدول ۳: تحلیل نتایج و یافته ها

شاخص	نقش در مدل Grey-DEMATEL)	اثرگذاری و اثرپذیری	وضعیت منطقه زابل	پیشنهادهای کاربردی
زیرساخت فنی	عامل اصلی / علت	بیشترین اثرگذاری (D- $+R: 1.1$)	قدیمی، ناکافی، فاقد شبکه انتقال مؤثر	توسعه تصفیه خانه ها، بهبود سیستم های توزیع پساب، پایش آنلاین
کیفیت پساب	واسطه / دوطرفه	اثرگذاری و اثرپذیری متوسط	کیفیت ناپایدار، گاه فراتر از استاندارد	ارتقاء فرایندهای تصفیه و نظارت دقیق تر بر کیفیت پساب
پذیرش اجتماعی	معلول / اثرپذیر	بیشترین تأثیرپذیری (D- $-R: 0.59$)	نگرانی ها در مورد بهداشت و نگرش های فرهنگی	آموزش کشاورزان، بازدیدهای میدانی، اطلاع رسانی شفاف
هزینه اقتصادی	واسطه	تأثیرپذیری بالا	هزینه کمتر از آب های زیرزمینی اما مشکل در دسترسی	مشوق های مالی، تسهیلات سبز، کاهش هزینه آب مصرفی برای کشاورزان
اثرات زیست محیطی	معلول نهایی	اثرپذیرترین (D- $-R: 0.98$)	آلودگی خاک و آب به دلیل عدم نظارت و کیفیت پایین پساب	پایش محیطی دقیق، انتخاب محصولات مقاوم به شوری و آلاینده ها



۸- پیشنهادهای کاربردی و اجرایی برای منطقه سیستان

با توجه به یافته‌ها، تحلیل‌ها، و بررسی وضعیت منطقه‌ای سیستان، به‌ویژه شهر زابل، مجموعه‌ای از پیشنهادها کاربردی در سه سطح فنی، اجتماعی و سیاست‌گذاری ارائه می‌شود. این پیشنهادها با هدف تسهیل بهره‌برداری از پساب تصفیه‌شده در کشاورزی و حرکت به‌سوی توسعه پایدار منابع آب منطقه تدوین شده‌اند:

الف) پیشنهادهای فنی و زیرساختی:

توسعه و به‌روزرسانی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب زابل و حومه

طراحی و اجرای سامانه‌های مدرن تصفیه با قابلیت کنترل دقیق پارامترهای بهداشتی (COD, BOD, نیترات، فلزات سنگین) با هدف ارتقاء کیفیت پساب تا سطح قابل استفاده در کشاورزی.

ایجاد شبکه‌های انتقال، ذخیره‌سازی و توزیع پساب برای اراضی کشاورزی

طراحی خطوط انتقال پساب از تصفیه‌خانه‌ها به دشت‌های کشاورزی پیرامون زابل با استفاده از لوله‌گذاری بهداشتی، پمپاژ ایمن، و احداث استخرهای ذخیره استاندارد.

استفاده از سیستم‌های پایش لحظه‌ای (online monitoring)

نصب تجهیزات دیجیتال در خروجی تصفیه‌خانه‌ها جهت پایش مداوم کیفیت پساب و ارائه گزارش شفاف به بهره‌برداران.

ب) پیشنهادهای آموزشی و اجتماعی:

برگزاری دوره‌های آموزشی و ترویجی برای کشاورزان و بهره‌برداران

طراحی محتوای آموزشی با موضوعاتی مانند: مزایای استفاده از پساب، روش‌های ایمن آبیاری با پساب، مدیریت بهداشت محصول، توسط جهاد کشاورزی و دانشگاه زابل.

افزایش شفافیت اطلاعاتی و اعتمادسازی عمومی

ارائه گزارش‌های ماهانه کیفیت پساب به‌صورت عمومی، نصب تابلوهای اطلاع‌رسانی در تصفیه‌خانه‌ها، دعوت از کشاورزان برای بازدیدهای میدانی.

تشکیل شبکه‌های بهره‌برداران پساب در سطح روستاها و مناطق کشاورزی

با هدف ارتقاء مشارکت محلی، تبادل تجربه و انسجام اجتماعی در استفاده از منابع آب جایگزین.

ج) پیشنهادهای مدیریتی و سیاست‌گذاری:

تدوین سند منطقه‌ای «راهبرد بهره‌برداری از پساب در سیستان»

تهیه و تصویب یک سند بالادستی مشترک بین اداره کل محیط‌زیست، شرکت آب و فاضلاب، جهاد کشاورزی و دانشگاه زابل، با اهداف، اقدامات، منابع مالی و شاخص‌های پایش.

تخصیص بودجه عمرانی مستقل برای پروژه‌های استفاده از پساب در کشاورزی

گنجاندن ردیف بودجه مشخص در برنامه‌های استانی و ملی برای توسعه زیرساخت‌ها و اجرای پایلوت‌ها در زابل.

اعطای تسهیلات ویژه به کشاورزان استفاده‌کننده از پساب

شامل کاهش هزینه‌های آب‌بها، معافیت‌های مالیاتی، و وام‌های سبز برای تجهیز مزارع به سامانه آبیاری ایمن با پساب.

ایجاد «نهاد راهبری بهره‌برداری از پساب در زابل» به‌صورت بین‌بخشی

با حضور نمایندگان دانشگاه، شوراهای روستایی، فرمانداری، شرکت آبفا و جهاد کشاورزی جهت هماهنگی پروژه‌ها، سیاست‌گذاری اجرایی و نظارت یکپارچه.

با اجرای هم‌زمان این پیشنهادات، می‌توان مسیر بهره‌برداری علمی، ایمن و پایدار از پساب تصفیه‌شده را در منطقه سیستان هموار ساخت. زابل با دارا بودن چالش‌های حاد منابع آبی و ساختار اجتماعی-کشاورزی وابسته، ظرفیت آن را دارد که به الگوی ملی استفاده از پساب در کشاورزی مناطق خشک تبدیل شود.



همایش ملی فناوری و نوآوری در آبرزی پروری

امنیت غذایی و حفاظت از محیط زیست



National Conference Technology and Innovation in Aquaculture Food Security and Environmental Protection

زمان برگزاری: ۱۷ اردیبهشت ۱۴۰۴

مراجع

- [1] مدنی، ک. (۱۳۹۳). "تحلیل اقتصاد آب در ایران". فصلنامه اقتصاد کشاورزی.
- [2] ابراهیمزاده، ر. و محمدی، ع. (۱۴۰۰). "بررسی نگرش کشاورزان به پساب تصفیه شده در سیستان". مجله تحقیقات آب.
- [3] توز، س. (۱۳۸۵). "تدوین استانداردهای دقیق برای پایش کیفیت پساب". نشریه محیط زیست استرالیا.
- [4] قلمی، ن. و همکاران. (۱۴۰۲). "کاربرد پساب در کشاورزی در مناطق خشک ایران". نشریه مدیریت منابع آب.
- [5] سلیمانی، ف. و همکاران. (۱۴۰۰). "کاربرد مدل های خاکستری در مدیریت منابع آب". مجله پژوهش های اقتصادی کشاورزی.
- [6] رحیمی، م. و رخشانی، ن. (۱۴۰۲). "ارزیابی عملکرد تصفیه خانه زابل در تأمین آب کشاورزی". مجله مدیریت محیط زیست.
- [7] Zhang, Y. et al. (2022). "Grey-DEMATEL for sustainable decision-making in water reuse." Sustainability.
- [8] Ghorbani, M. & Momeni, A. (2021). "Strategic decision-making in water management using DEMATEL." Journal of Cleaner Production.
- [9] عباسی، م. و یزدی، ر. (۱۳۹۹). "تحلیل ساختار راهبردی بهره برداری از پساب". نشریه سیاست گذاری محیط زیست.