

ارزیابی راهکارهای مدیریتی در کنترل بار مواد مغذی در مقیاس حوضه ای؛ حوضه آبریز سد استقلال میناب

سمیه ایمانی^۱، حمید عبدالآبادی^{۲*}، مریم زارع رشکوئی^۳

۱ گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲ گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۳ گروه تحقیقات کاربردی شرکت آب منطقه ای هرمزگان، بندرعباس، ایران.

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۷/۰۷

تاریخ وصول مقاله: ۱۴۰۰/۰۹/۲۷

چکیده

تغذیه‌گرایی، پدیده ای است که به واسطه افزایش بار ورودی مواد مغذی به پیکره‌های آبی ایجاد شده و موجب افت شدید اکسیژن محلول، ایجاد طعم و بو، سمیت و مرگ و میر آبزیان می‌گردد. سد استقلال، منبع تامین ۵۰ درصد آب شرب بندرعباس است که با توجه به ورود مقدار زیاد بار مواد مغذی از حوضه آبریز میناب، با مشکل طعم و بوی آب ناشی از شکوفایی جلبکی مواجه است. هدف از این مطالعه، شناسایی مناطق با منابع آلاینده بحرانی و ارزیابی و اولویت‌بندی سناریوهای مدیریتی با هدف کاهش آلودگی ورودی به مخزن سد است. بدین منظور مدل SWAT به عنوان یک مدل جامع فرایندمحور برای شبیه‌سازی حوضه آبریز مورد استفاده قرار گرفت. پس از مدل‌سازی و شناسایی مناطق آلاینده بحرانی، تاثیر هر یک از سناریوهای مدیریتی در کاهش بار مواد مغذی ارزیابی شد. در نهایت، بر اساس معیارهای کاهش بار مواد مغذی و هزینه‌های اجرایی هر سناریو، راهکارهای مناسب با استفاده از رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره، با هدف صرفه‌جویی اقتصادی و قابلیت اجرایی بهتر، انتخاب شدند. نتایج حاکی از بحرانی بودن کاربری زراعی و مراتع (دام سنتی) در زیرحوضه‌های جغین و میناب و کارایی بالای راهکارهای «استفاده از فیلتراسیون گیاهی با عرض حداقل ۱۰ متر» و «کاهش کوددهی در مزارع» است. پیش‌بینی می‌شود که اجرای هر یک از راهکارها، به ترتیب سبب کاهش ۱۹/۷ و ۲۰/۲ درصدی نیتروژن کل ورودی به مخزن سد و ۲۴/۴ و ۲۴/۲ درصدی فسفر کلی ورودی به مخزن سد گردد.

کلید واژه‌ها: مدیریت کیفیت آب، شبیه‌سازی جامع حوضه آبریز، مناطق آلاینده بحرانی، بهترین روش‌های مدیریتی (BMPs)، حوضه آبریز سد استقلال

سراغاز

کشاورزی و صنعت و کاهش کیفیت آب به معضلات جدی بسیاری از کشورها تبدیل شده است. ورود آلودگی فزاینده به رودخانه‌ها و بی‌توجهی به بعد کیفی آب، بهره‌برداری از منابع آبی قابل شرب را با مشکلات عدیده‌ای همراه نموده است (Salarijazi & Ghorbani, 2019).

امروزه علاوه بر توزیع نامتقارن زمانی و مکانی آب که جزء مهم‌ترین مشکلات زندگی بشر به خصوص در مناطق خشک دنیا به شمار می‌رود، رشد جمعیت و بالا رفتن میزان تقاضا برای مصارف مختلف مثل شرب، بهداشت،

مناطق بحرانی می‌توان تأثیر آنها را بر کمیت و کیفیت آب ارزیابی و با شناسایی بهترین اقدامات مدیریتی (BMPs2) در سطح حوضه آبریز، مشکلات کیفی سدها را کاهش داد (Jamshidi et al., 2020). (Palmate & Pandey (2021). مطالعه‌ای را به منظور ارزیابی اثربخشی اجرای BMPs در حالت‌های مختلف احتمالی دبی سالانه (۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درصد دبی) انجام دادند. نتایج نشان داد که مدل SWAT یک ابزار مفید برای ارزیابی ویژگی‌های جریان یک حوضه آبریز تحت شیوه‌های مختلف مدیریتی بوده و بهترین شیوه‌های مدیریتی (BMPs) می‌توانند به عنوان عملی‌ترین راه حل برای حفظ و کاهش جریان رودخانه استفاده می‌شود. بهترین شیوه‌های مدیریتی از سال ۱۹۶۰ توسط کشورهای غربی و به ویژه ایالات متحده با هدف بهبود شرایط کیفی آب توسعه داده شده است (Tufa & Sime, 2021; Logan, 1993). در این راستا طیف متنوعی از مدل‌های شبیه‌سازی آلودگی‌های نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای، در مطالعات مختلف بکار رفته است (Malagó et al., 2017; Qing et al., 2020; Rahmati et al., 2019; Wang et al., 2019). بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که کاربرد SWAT3 برای شبیه‌سازی اثرات BMPs بر رسوب و آلودگی غیرنقطه‌ای توجه محققان را در آغاز قرن بیست و یکم به خود جلب کرده است (Santhi et al., 2001). SWAT به عنوان یک مدل جامع فرایندمحور 4 در شبیه‌سازی فرآیندهای پیچیده هیدرولوژی، فرسایش خاک و مواد مغذی در داخل حوضه؛ ابزار مناسبی در جهت شناسایی CSAs و اعمال سناریوهای مدیریتی مختلف محسوب می‌گردد (Himanshu et al., 2019; Sang & Maina, 2018; Strehmel et al., 2016; Uniyal et al., 2020). (Gashaw et al. (2021). مطالعه‌ای را به منظور ارزیابی اثربخشی بهترین شیوه‌های مدیریتی (BMPs) برای کاهش فرسایش خاک در حوضه آبریز گومارا (نیل آبی بالایی) با استفاده از مدل SWAT انجام دادند. ایشان در این مطالعه به بررسی چهار سناریو مجزا BMP شامل فیلتراسیون گیاهی (FS)، باندهای سنگ/خاک (SSB)،

تغذیه‌گرایی مخازن سدها به عنوان یکی از عوامل اصلی کاهش کیفیت آب در مخازن موجب بروز مشکلات جدی کیفی مانند افت شدید اکسیژن محلول، ایجاد طعم و بو، سمیت و مرگ و میر آبزیان می‌گردد (Gregar et al., 2019). این پدیده به واسطه افزایش بار ورود مواد مغذی شامل انواع ترکیبات نیتروژن و فسفر و رسوبات از بالادست (همانند حوضه آبریز) به منابع آب سطحی ایجاد می‌شود (Perera et al., 2015). شکوفایی سیانوباکتری‌ها و جلبک‌های سبز-آبی متداول‌ترین نوع تغذیه‌گرایی است (Zhang et al., 2021; Novotny, 2011). در حال حاضر، در اکثر پیکره‌های آبی، فسفر و ترکیبات آن عامل اصلی محدودکنندگی رشد فیتوپلانکتون‌ها هستند (Abdolabadi et al., 2016). فسفر می‌تواند از طریق دو منبع آلودگی نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای در پیکره‌های آبی افزایش یابد. میزان تولید مواد مغذی در حوضه‌های آبریز، تابع عوامل، شرایط و متغیرهای متنوعی است که از مهمترین آنها می‌توان به رژیم بارش، جنس خاک، کاربری اراضی، پوشش گیاهی، توپوگرافی و ... اشاره نمود (Zeiger et al., 2021; Abdolabadi et al., 2018).

در هر حوضه آبریز، برخی از مناطق با نوع خاصی از خاک، کاربری اراضی، پوشش گیاهی و توپوگرافی، بیشتر در معرض خطر تولید مواد مغذی و بار رسوبی بالاتر هستند که مناطق بحرانی CSAs1 نامیده می‌شوند. تاکنون، مطالعات مختلفی با هدف کاربست روش‌های مدیریتی در حوضه آبریز با تمرکز بر شناسایی منابع آلاینده بحرانی برای کنترل آلودگی نموده‌اند (Chang et al., 2021; Imani et al., 2019; Liu et al., 2016; Shrestha et al., 2021). مدل‌سازی جامع سیستم حوضه آبریز، برای شناسایی و تعیین مقدار کاهش مواد مغذی در CSAs می‌تواند نقطه عطفی در جهت اولویت‌بندی طرح‌های کاهش مواد مغذی و بهبود کیفیت آب باشد. در این رویکرد با اعمال سناریوهای مختلف کنترل آلودگی مانند مدیریت مزرعه (کوددهی، آبیاری و ..)، راهکارهای آبخیزداری و ... در

به‌عنوان یکی از چالش‌های اصلی این سد محسوب می‌گردد. بررسی‌های مختلف نشان داده است که برای دستیابی به راه‌حلی پایدار و بلند مدت برای رفع مشکل سد، لازم است که توجه اصلی به مسائل حوضه آبریز معطوف گردد (Yousefi et al., 2020).

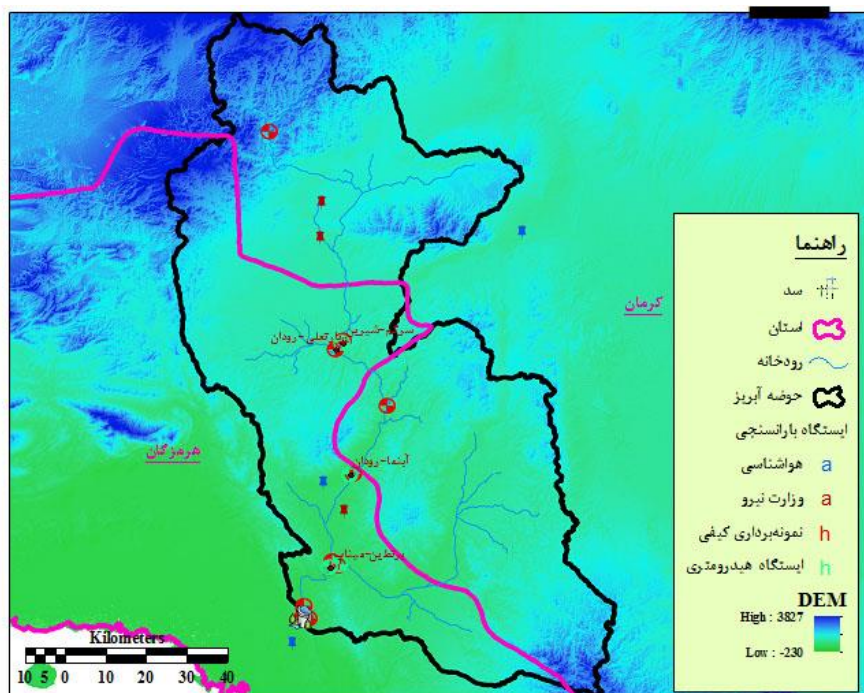
از آنجایی که بیش از ۵۰٪ آب شهر بندرعباس از آب سد استقلال تأمین می‌گردد، توجه به این موضوع ضروری می‌نماید. لذا، هدف اصلی این پژوهش، نخست، شناسایی مناطق با منابع آلاینده بحرانی در حوضه آبریز سد استقلال و سپس، بررسی، ارزیابی و اولویت‌بندی سناریوهای مدیریتی با هدف کاهش آلودگی ورودی به مخزن و به صرفه بودن از نظر اقتصادی است.

مواد و روش بررسی منطقه مورد مطالعه

سد استقلال بر روی رودخانه میناب واقع شده و نقش بسزایی در حیات اقتصادی استان دارد. حوضه آبریز سد استقلال در عرض جغرافیایی ۲۶ درجه و ۵۷ دقیقه تا ۲۸ درجه و ۲۴ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۶ درجه و ۴۹ دقیقه تا ۵۷ درجه و ۵۳ دقیقه شرقی واقع شده است (شکل ۱).

آبراه‌ها با پوشش چمن (GW) و جنگل‌کاری مجدد زمین‌های زراعی (RC)، و سه سناریو ترکیبی از BMPs پرداختند. نتایج نشان داد که میانگین بازده رسوب سالانه در شرایط پایه ۱۹/۷ تن در هکتار در سال برآورد شد که به ترتیب در سناریوهای FS، SSB، GW و RC به ترتیب در مقیاس حوضه ۱۳،۷، ۳۰،۵، ۱۶،۲ و ۲۵،۹ درصد کاهش یافت. طیف گسترده‌ای از راهکارهای سازه‌ای و غیرسازه‌ای، مانند شخم‌زنی حفاظتی، پوشش‌های حفاظتی، میزان و زمان مصرف کود، مدیریت مواد مغذی، نوارهای بافر، سازه‌های پیشگیری از سیل، آبراه‌های پوش‌شدار و ترانس‌های موازی در این مدل قابل شبیه‌سازی است (Gassman et al., 2007).

میناب پرآب‌ترین و مهم‌ترین رودخانه استان هرمزگان است که سد استقلال (واقع در شهرستان میناب) بر روی این رودخانه ساخته شده است. این سد علاوه بر مشروب کردن زمین‌های کشاورزی شهرستان میناب، آب شرب بندر عباس نیز از آن تأمین می‌شود. مخزن سد استقلال میناب به دلیل ورود منابع آلاینده دچار مشکلات کیفی مختلفی مانند شکوفایی جلبکی شده است. در حال حاضر، طعم و بو



شکل ۱. موقعیت حوضه آبریز سد استقلال

هواشناسی و شیوه‌های مدیریتی است. پس از پیکره‌بندی حوضه، واحدهای همگن هیدرولوژیکی (HRUs) با استفاده از برهم‌نهی نقشه‌های DEM با اندازه سلولی ۳۰ متر از پایگاه سازمان فضایی ملی ایالت متحده آمریکا (NASA)، لایه رقوم کاربری اراضی و نقشه‌های پوشش گیاهی سازمان جنگل‌ها و مراتع ایران با اندازه سلولی ۱۰۰۰ متر در سال ۲۰۰۶ استخراج شد. لایه خاک منطقه از نقشه خاک سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد استخراج گردید. بر این اساس، کل حوضه آبریز سد استقلال به ۲۹ زیرحوضه و ۱۳۵۰ واحد هیدرولوژیکی تقسیم شد.

بعد از تشکیل HRUها داده‌های روزانه بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۸ میلادی به مدل معرفی شدند. آمار ماهانه دبی ورودی به مخزن سد نیز در بازه مذکور در ایستگاه‌های هیدرومتری موجود در منطقه در بازه ۲۰۰۵-۲۰۱۵ جهت واسنجی و اعتبارسنجی مدل استفاده گردید. برای مطالعات کیفیت آب، از اطلاعات نمونه برداری ماهانه سال ۲۰۱۸ استفاده شد. در ادامه، پارامترهای مربوط به هریک از اجزای اصلی مدل شامل پارامترهای گیاهی (Dat)، خاکشناسی (Sol)، آب زیرزمینی (Gw)، مدیریتی (Mgt) و رودخانه (Rte) به مدل معرفی شدند. نکته حائز اهمیت در این مطالعه، نحوه تعریف برنامه‌ریزی و مدیریت‌های مختلف کشاورزی و آبیاری برای مدل است. برای این منظور و با هدف نزدیک بودن شرایط شبیه‌سازی متغیرهای هیدرولوژیکی، گیاهی و غیره در مدل به شرایط واقعی، کاربری اراضی کشاورزی اعم از زراعی و باغی به کاربری اراضی کوچکتر شکسته شد. این کار موجب گردید که اولاً بتوان الگوی کشت موجود در حوضه را برای هر کدام از زیرحوضه‌ها در مدل اعمال نمود و ثانیاً شرایط شبیه‌سازی مدل را به شرایط طبیعی هیدرولوژیکی حوضه (مقدار آب برداشتی روزانه از رودخانه‌ها، سد و آب زیرزمینی) نزدیکتر نمود. بعد از اعمال الگوی کشت منطقه، هر یک از محصولات در زیرحوضه و HRU مربوط؛ برنامه‌ریزی آبیاری، تاریخ کشت

از نظر توزیع ارتفاعی در واحد سطح حدود ۲۹ درصد از وسعت این حوضه دارای ارتفاع بین ۰ تا ۵۰۰ متر، ۵۲ درصد بین ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ متر، ۱۰ درصد بین ۱۰۰۰-۱۵۰۰ متر و مابقی دارای ارتفاعی مساوی یا بیشتر از ۱۵۰۰ متر است. رودخانه میناب از دو شاخه اصلی رودان که از ارتفاعات کرمان، و جغین که از کوه‌های بشاگرد سرچشمه می‌گیرد تشکیل شده است. رودخانه جغین با جهت شرقی- غربی و رودخانه رودان با جهت شمالی جنوبی جریان دارد. این دو رود در حوالی برنطین به هم متصل شده و رودخانه میناب را تشکیل می‌دهند. رودخانه میناب پس از الحاق شاخه‌های رودان و جغین، در جهت جنوب غربی جریان می‌یابد و پس از رسیدن به سد میناب تغییر جهت داده و به سمت غرب منحرف شده و پس از عبور از شهر میناب در جنوب بندر کوچک کلاهی وارد دریای عمان می‌گردد. مخزن سد استقلال میناب به دلیل ورود فاضلاب روستاهای بالادست، فضولات حیوانی، زهاب‌های کشاورزی و شیرابه زباله، فرسایش در سطح حوضه و موارد دیگر دچار مشکلات کیفی مختلفی مانند شکوفایی جلبکی شده است. در حال حاضر، طعم و بو به‌عنوان یکی از چالش‌های اصلی این سد محسوب می‌گردد.

پیکره‌بندی و آماده‌سازی مدل SWAT

در این بخش نحوه شبیه‌سازی سیستم منابع آبی و کشاورزی حوضه آبریز دریاچه و همچنین اندرکنش آن با تغییرات کمی و کیفی آب دریاچه از مدل SWAT بیان خواهد شد. بدین منظور، ابتدا در این بخش به نحوه پیکره‌بندی مدل و تحلیل حساسیت آن برای شناسایی پارامترهای موثر بر دبی و پارامترهای کیفی پرداخته می‌شود. سپس، در بخش بعدی نحوه واسنجی مدل جهت شبیه‌سازی متغیرهای کیفی، دبی ورودی به سد و سایر مولفه‌های لحاظ شده در این مطالعه بررسی خواهد شد.

ورودی‌های اصلی مدل SWAT عبارت‌اند از توپوگرافی، خاک، کاربری اراضی، پوشش گیاهی، اطلاعات

وجود دارد. در این مطالعه روش SUFI-2 با توجه به بهینه بودن آن، جهت واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل SWAT استفاده گردید (Yang et al., 2008). اساس کار این الگوریتم تولید تعداد زیادی مجموعه تصادفی از پارامترهای مورد نظر برای واسنجی مدل در دامنه تعریف شده برای هر پارامتر مبتنی بر روش نمونه‌گیری مربع لاتین 7 می‌باشد. سپس، این مجموعه پارامترها جداگانه در مدل قرار داده شده و مقدار تابع هدف بر اساس متغیرهای مورد نظر برای هر مجموعه پارامتر استخراج می‌گردد. ضریب تبیین (R²) و ضریب نش-ساتکلیف (NS) از متداول‌ترین توابع هدف مورد استفاده در این خصوص می‌باشند (Yang et al., 2008).

تحلیل حساسیت و واسنجی مدل در این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار SWAT-CUP انجام شد و پارامترهایی که تاثیر بیشتری روی دبی ورودی به سد و کیفیت آب داشتند، مشخص شدند (جدول ۱). هر پارامتری که مقدار قدرمطلق t-stat بیشتری داشته و همچنین مقدار p-value آن نزدیک به صفر باشد، مدل نسبت به آن پارامتر حساسیت بیشتری دارد

و برداشت و همچنین عملیات کشاورزی (مانند کوددهی و غیره) به صورت دستی و بر اساس اطلاعات موجود از منطقه مطالعاتی به مدل معرفی شد. شبیه‌سازی بار آلودگی ناشی از مراکز جمعیتی نیز با استفاده از شیوه مدیریت مناطق مسکونی کم جمعیت انجام گرفت. این انتخاب بدلیل کم جمعیت بودن شهرستان‌های موجود در حوضه بود. میزان آلودگی ناشی از مراکز جمعیتی نیز بر اساس آمار سرشماری نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵ محاسبه گردید. میزان تولید انسانی نیتروژن و فسفر نیز براساس ضوابط و معیارهای موجود در حدود ۴۰ و ۸ گرم به‌ازای هر نفر در روز در نظر گرفته شد و با ضرب این عدد در تعداد جمعیت، آلودگی ناشی از مراکز جمعیتی محاسبه گردید (Imani et al., 2017).

تحلیل حساسیت پارامترهای مدل

تحلیل حساسیت پارامترهای مدل به منظور بررسی میزان تاثیرگذاری آن‌ها بر خروجی‌های مدل از اهمیت زیادی برخوردار است. روش‌های گوناگونی به‌منظور تحلیل حساسیت، واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل SWAT

جدول ۱ نتایج تحلیل حساسیت مدل و مقادیر t-stat و p-value مربوط به هر یک از پارامترها

رتبه	پارامتر	تعریف پارامتر	p-value	t-stat
۱	CN2	شماره منحنی نفوذ در شرایط متوسط رطوبتی	۰/۰۶	۲/۱۴
۲	PLAPS	گرادیان سالانه بارش	۰/۰۶	-۲/۰۹
۳	AI2	درصدی از توده جلبک که به صورت فسفر است	۰/۱۲	۱/۷
۴	HRU_SLP	متوسط شیب	۰/۱۱	-۱/۷۶
۵	BC3	نرخ ثابت هیدرولیز نیتروژن آلی به آمونیاک	۰/۱۳	-۱/۶۷
۶	SURLAG	ضریب تاخیر رواناب سطحی	۰/۱۴	-۰/۱۶
۷	BC2	سرعت اکسیداسیون بیولوژیکی NO ₂ به NO ₃	۰/۱۸	-۱/۴۳
۸	P_UPDIS	پارامتر توزیع جذب فسفر	۰/۲	-۱/۳۷
۹	BIOMIX	ضریب اختلاط بیولوژیکی	۰/۲۴	-۱/۲۴
۱۰	SLSUBBSN	میانگین طول شیب	۰/۲۸	-۱/۱۴
۱۱	SFTMP	دمای بارش برف	۰/۲۸	۱/۱۴
۱۲	PPERCO	ضریب نفوذ فسفر	۰/۲۸	۱/۱۴
۱۳	PHOSHD	نسبت فسفر در لایه ۱۰ میلی‌متری فوقانی خاک به غلظت فسفر در رواناب سطحی	۰/۳۵	۰/۹۸
۱۴	PSP	ضریب جذب فسفر	۰/۳۶	۰/۹۷

به دبی تا واسنجی دبی تکرار می‌گردد. پس از انجام این مراحل، پارامترهای مربوط به بار مواد مغذی تا واسنجی دقیق هر یک تغییر می‌یابد. در ادامه، نتایج هر یک از مراحل ذکر شده در این بخش به تفسیر بیان می‌گردد. نتایج این بخش بر اساس دو شاخص ضریب تبیین R2 و نش-ساتکلیف (NSE) مورد ارزیابی قرار گرفت.

شناسایی مناطق بحرانی

در این مطالعه بار مواد مغذی و رواناب پیش‌بینی شده در سطح هر HRU برای شناسایی و مقایسه مکانی CSAs مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. هر HRU نماینده منطقه‌ای در زیر حوضه است که حاوی ترکیب منحصر به فردی از کاربری زمین، نوع خاک، و کلاس شیب است. بنابراین هر HRU از لحاظ کاربری اراضی، نوع خاک و شیب یکپارچه می‌باشد.

پس از استخراج بار متوسط سالانه در واحد سطح هر HRU مقادیر نیتروژن کل (TN) و فسفر کل (TP) با میانگین‌گیری وزنی در تمام کاربری‌ها و الگوهای کشت محاسبه می‌شود. با تقسیم این مقادیر بر بار کل حوضه درصد TN و TP در تمامی کاربری‌ها محاسبه می‌شود. بر این اساس کاربری‌هایی که در مجموع ۲۰٪ از TN و TP و رواناب کل حوضه را دارا باشند به‌عنوان مناطق بحرانی آلوده از منظر مواد مغذی و رواناب انتخاب می‌شوند. انتخاب حد آستانه ۲۰٪ با توجه به عدد پیشنهاد شده در مطالعه (Niraula et al., 2013) و (Imani et al., 2019) انتخاب شده است. عدد دقیق برای این حد آستانه وابسته به هزینه‌های اجرائی گزینه‌های مدیریتی و شیوه‌های مدیریتی در حوضه می‌باشد.

در این تحقیق یک شاخص ترکیبی نیز برای شناسایی زیر حوضه‌های بحرانی با هدف کاهش کلی TN و TP و رواناب در نظر گرفته شد. این شاخص به قرار زیر است (Niraula, 2010):

$$I_j = \sum_{i=1,2,3} (\omega_i Y_{i,j}) \quad \text{(رابطه ۱)} \quad j=1,2,\dots,n$$

بر اساس این جدول پارامتر شماره منحنی (CN2) بیشترین تأثیر را روی دبی خروجی از حوضه داشت. علاوه بر این پارامتر گرادیان بارش (PLAPS) و متوسط شیب حوضه (HRU_SLP) از جمله پارامترهای تأثیرگذار بر میزان دبی می‌باشند. با توجه به متنوع بودن کاربری‌های موجود در حوضه، مقدار پارامتر شماره منحنی به صورت مجزا برای تمامی کاربری‌ها بهینه شد که در این بین کاربری مرتع بدلیل گسترده بودن مساحت آن در حوضه به عنوان حساس‌ترین کاربری انتخاب شد. از بین پارامترهای موثر بر میزان مواد مغذی نیز پارامترهای درصد توده جلبک که به صورت فسفر (AI2) و پارامترهای مربوط به چرخه نیتروژن از جمله (BC3) و (BC2) از بالاترین حساسیت برخوردار می‌باشند.

واسنجی مدل SWAT

در این تحقیق شبیه‌سازی برای ۲۹ سال از ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۸ انجام شد. واسنجی و اعتبارسنجی غلظت مواد مغذی به برآورد درستی از میزان ورودی به مخزن نیازمند می‌باشد. بدین منظور واسنجی و اعتبارسنجی مدل طی یک فرآیند چند مرحله‌ای انجام گرفت. روند کار دارای سه گام اصلی می‌باشد. بدین ترتیب که در گام اول نتایج حاصله با مقادیر بارش و تبخیر در سطح حوضه و عملکرد و تبخیر و تعرق واقعی ارزیابی می‌گردد. سپس پارامترهای موثر بر دبی شناسایی شده و اقدام به واسنجی دبی در ایستگاه‌های هدف می‌گردد. در طی این مرحله با مقایسه نتایج حاصل برای دبی، سایر مولفه‌های بیلان از جمله بارش و تبخیر نیز بررسی می‌شوند. این مرحله تا جایی ادامه می‌یابد که نتایج شبیه‌سازی و مشاهداتی برای دبی ورودی و مولفه‌های بیلان، بر اساس معیارهای ارزیابی مورد استفاده اختلاف ناچیزی داشته باشد. با انجام این مرحله انتظار می‌رود که برای حجم مخزن سد نیز بتوان به اعداد مورد قبولی رسید. در صورتیکه حجم مخزن سد با مقادیر مشاهداتی دارای اختلاف زیادی باشد این مراحل از تنظیم پارامترهای مربوط

فاضلاب میناب به روش تصفیه لجن فعال، فرض می‌شود آلودگی ناشی از مراکز جمعیتی زیارتعلی، نودژ، منوجان و ده بارز به میزان ۳۰ تا ۶۰ درصد کاهش یافته و نتایج آن بر میزان مواد مغذی ورودی به مخزن سد ارزیابی می‌گردد.

• راهکارهای آبخیزداری

فیلتراسیون با نوار گیاهی (Filter Strip): این راهکار برای حذف آلودگی‌های شهری و کشاورزی قبل از رسیدن به پیکره آبی مورد استفاده قرار می‌گیرد. یک Filter Strip باریکه‌ی پوشیده از گیاهان است که با کاهش سرعت جریان و در نتیجه نشست مواد آلاینده باعث فیلتر آنها می‌شود. این مناطق مقدار انتقال رسوب، مواد مغذی و باکتری‌ها و آفت‌کش‌ها را کاهش می‌دهند اما تاثیر چندانی بر میزان رواناب سطحی ندارد. این راهکار بیشتر سبب کاهش مواد مغذی محلول و چسبیده به ذرات می‌گردد (Goel et al., 2004). با توجه به اهمیت عرض نوار گیاهی بر میزان کاهش بار مواد مغذی ورودی به مخزن سد، این راهکار در مدل SWAT با توجه به شیب ۵ تا ۲۰ درصدی غالب در زیرحوضه‌های بحرانی به عرض ۱۲ متر انتخاب گردید. انتخاب عرض بهینه بر مبنای شیب غالب و جهت انتخاب پارامترها از مطالعات (Wischmeier & Smith, 1978) استفاده شد. در این مطالعه مقادیر مختلف USLE_P و FILTERW با توجه به شیب بیان شده است. در این مطالعه با توجه به بحرانی بودن زیرحوضه میناب و نزدیکی این حوضه به مخزن سد استقلال، فیلتراسیون با استفاده از نوار گیاهی در این زیرحوضه اعمال می‌گردد. محدوده شیب این اراضی از ۲۰-۵ درصد متغیر می‌باشد که بر اساس کلاس شیب، مقادیر ۱۲ و ۰/۶ به ترتیب برای پارامترهای FILTERW و USLE_P انتخاب گردید. عرض ۱۲ متری برای نوار گیاهی از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه تر به نظر می‌رسد.

تراس‌بندی در حوضه‌های بحرانی و کاربری مرتع: تراس‌بندی یکی از انواع عملیات‌های حفاظت آب و خاک

که در آن I_j شاخص ترکیبی برای هر کاربری j ، $Y_{i,j}$ شاخصی برای رواناب ($i=1$)، نیتروژن کل ($i=2$)، فسفر کل ($i=3$) برای هر کاربری به تعداد n است و از رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$Y_{i,j} = \frac{R_{i,\min} R_{i,j}}{R_{i,\min} R_{i,\max}} \quad (\text{رابطه ۲})$$

در این رابطه $R_{i,j}$ رتبه کاربری j از عامل i و $R_{i,\min}$ و $R_{i,\max}$ به ترتیب کمترین و بیشترین رتبه عامل i می‌باشد. در این رابطه $R_{i,\max} R_{i,\min} = 1$ برابر مجموع کل کاربری‌های موجود و $0 \leq Y_{i,j} \leq 1$ است. ω وزن هر Y_i بر اساس اهمیت آن است که $\sum \omega = 1$ می‌باشد.

راهکارهای بلندمدت کنترل کیفیت آب ورودی به مخزن

• راهکارهای مدیریت مواد مغذی در مزرعه

کاهش میزان کود: با توجه به زمین‌های کشاورزی موجود در حوضه آبریز سد استقلال و شناسایی این کاربری به عنوان کاربری بحرانی از منظر تولید بار نیتروژن کل (TN)، بررسی اثرات کوددهی در کیفیت سد ضروری بنظر می‌رسد. برای اعمال این راهکارها در منطقه تاثیرات ۲۵٪ و ۵۰٪ کاهش همزمان کود ازته و فسفات مورد ارزیابی قرار گرفت. در تمامی این سناریوها میزان کود حیوانی نیز به ترتیب به میزان ۲۵٪ و ۵۰٪ کاهش یافت.

با کاهش مقادیر کود در مزارع درصد کاهش بار نیتروژن آلی (TKN)، نیتروژن کل (TN)، فسفر آلی (OrgP) و فسفر کل (TP) ورودی به سد نسبت به حالت پایه مورد ارزیابی قرار گرفت.

• راهکار مدیریت فاضلاب مراکز جمعیتی

کانون‌های جمعیتی موجود در حوضه آبریز سد استقلال عامل مهمی در انتقال مواد مغذی به شدن آلاینده‌های این مراکز به مخزن سد می‌باشد. در این سناریو با توجه به بهره‌برداری تصفیه خانه رودان و اجرای فاز اول طرح

نتایج

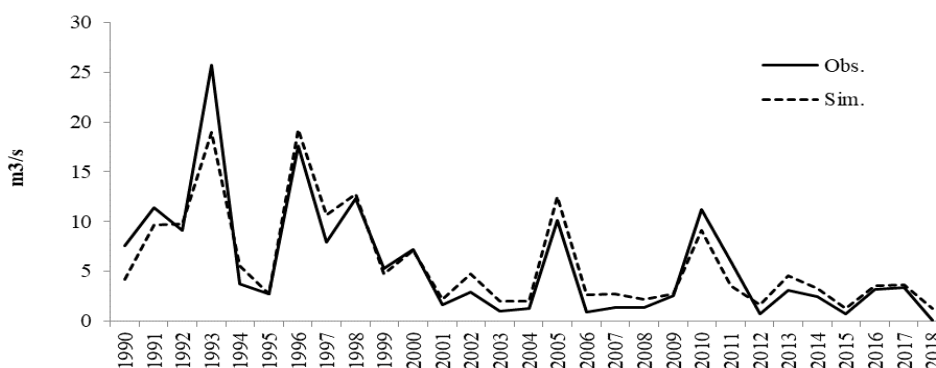
واسنجی و اعتبارسنجی

فرآیند واسنجی مدل طی چند مرحله رفت و برگشتی و بر اساس پارامترهای حاصل از آنالیز حساسیت (جدول ۱) انجام شد. واسنجی کمی در ورودی به سد، ایستگاه‌های سرگم، آبنا-رودان و برنطین-میناب در بازه زمانی ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۵ و واسنجی کیفی در بازه ۲۰۱۸ در ایستگاه‌های زیارتعلی-رودان و آبنا-رودان بصورت ماهانه انجام شد. در جدول ۲ میزان همبستگی مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده دبی ایستگاه‌ها و وروی به مخزن و غلظت نیتروژن و فسفر کل در واسنجی مدل نشان داده شده است. در شکل ۱ الی **Error! Reference source not found.** سری زمانی دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی در فرآیند واسنجی کمی نمایش داده شده است.

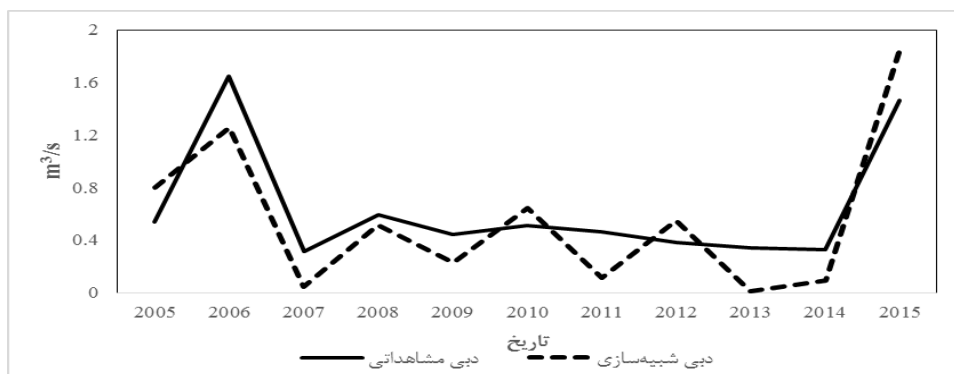
است که به دلیل هزینه بالا تنها در اراضی که از جنبه تولید اقتصادی توان بیشتری دارند طراحی و اجرا می‌شود. هدف از ترانس‌بندی کنترل اثرات تخریبی شیب زمین است و برای طراحی آن از فواصل عمودی بین آنها استفاده می‌شود. ترانس‌ها موجب حذف شیب طولی دامنه‌ها شده و تاثیرشان بر روی رواناب و کاهش فرسایش خاک از طریق حذف نمودن شیب صورت می‌گیرد. این راهکار معمولاً بر روی اراضی شیبدار با شیب ۸ تا ۱۲ درصد توصیه شده و هر چه شیب دامنه افزایش یابد حجم خاک‌برداری و خاکریزی نیز بیشتر شده و هزینه‌ی احداث ترانس بیشتر می‌شود. فاصله مناسب ترانس‌ها از یکدیگر ۱۲۰ تا ۱۸۰ سانتی‌متر است. این راهکار در مدل SWAT با تغییر در شیب متوسط حوضه، پارامتر CN (شماره منحنی رواناب) و پارامتر USLEP جهت کاهش فرسایش در مدل اعمال گردید.

جدول ۲. نتایج مدل (ماهانه) برای واسنجی کمی و کیفی حوضه آبریز سد استقلال میناب

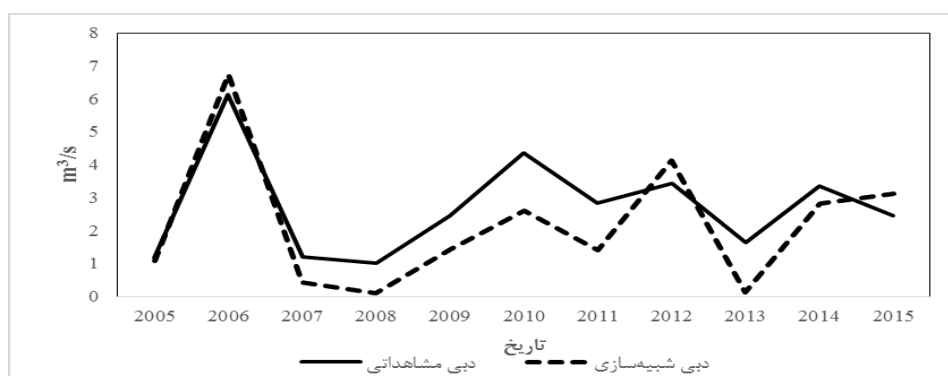
ایستگاه	دبی		نیتروژن کل		فسفر کل	
	NS	R ²	NS	R ²	NS	R ²
سرگم-شیرین	۰/۶۲	۰/۷۸	-	-	-	-
آبنا-رودان	۰/۵۲	۰/۸۱	۰/۵۹	۰/۶۱	۰/۴۸	۰/۶۶
زیارتعلی-رودان	-	-	۰/۳۹	۰/۶۶	۰/۶۶	۰/۶۶
برنطین-میناب	۰/۱۳	۰/۶۸	-	-	-	-
ورودی به مخزن	۰/۷۵	۰/۸۹	-	-	-	-



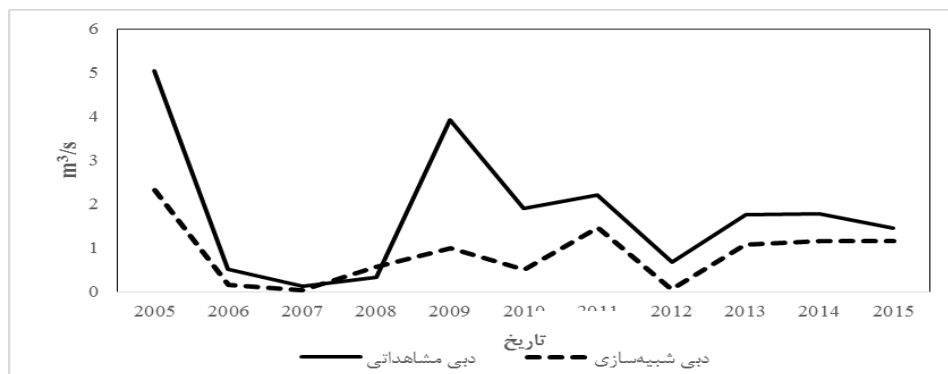
شکل ۱. مقایسه نتایج شبیه‌سازی دبی سالانه حوضه به مخزن با داده‌های مشاهداتی



شکل ۲. دبی ورودی شبیه‌سازی و مشاهداتی برای ایستگاه هیدرومتری سرگم-شیرین (m³/s)



شکل ۳. دبی ورودی شبیه‌سازی و مشاهداتی برای ایستگاه هیدرومتری آبنا-رودان (m³/s)



شکل ۴. دبی ورودی شبیه‌سازی و مشاهداتی برای ایستگاه هیدرومتری برنطین-میناب (m³/s)

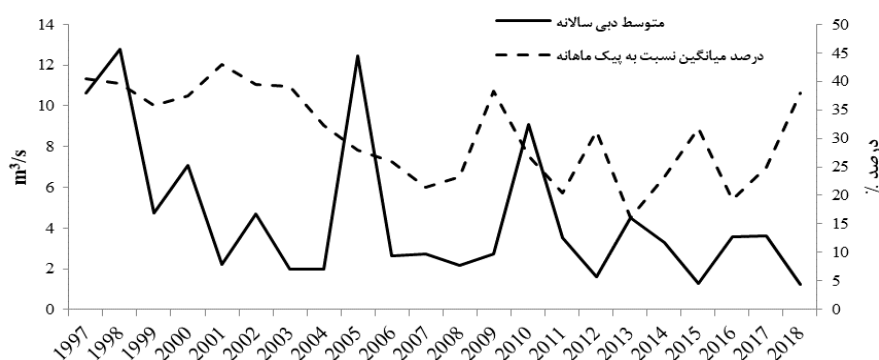
است. همانگونه که در شکل ۱ نشان داده شده است میزان آورد حوضه در طی سالیان اخیر کاهش داشته و این روند می‌تواند بر افزایش غلظت آلاینده‌ها و بازنشر آلودگی از رسوبات ته‌نشین شده اثرگذار باشد. بیشترین آورد حوضه مطابق سری زمانی حاصله در سال ۱۹۹۳ (۱۳۷۲) به مقدار متوسط ۲۵ مترمکعب بر ثانیه گزارش شده است. متوسط بلندمدت آورد حوضه به مخزن مطابق داده‌های شبیه‌سازی برابر ۵٫۸ مترمکعب بر ثانیه و برای داده‌های مشاهداتی

براساس شاخص‌های آماری و همچنین مقایسه سری زمانی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده، نتایج حاصل از مدل رضایت‌بخش بوده و حاکی از توانایی مدل در شبیه‌سازی دبی و کیفیت آب در سطح حوضه می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد میزان آورد سالانه ورودی به مخزن دریاچه (نقطه خروجی حوضه آبریز) دارای نوسانات قابل ملاحظه بوده و این تغییرات منطبق با داده‌های مشاهداتی مستخرج از اطلاعات بهره‌برداری روزانه مخزن

رسوب و کاهش کیفی آب در مخزن تاثیر زیادی داشته باشد. شکل ۵ نشان می‌دهد که متوسط سالانه شبیه‌سازی شده نسبت به مقادیر پیک ماهانه در همان سال بین ۱۵ تا حدود ۴۰ درصد نوسان دارد که در ۱۰ سال اخیر متوسط این مقدار در حدود ۲۷٪ برآورد می‌شود. عبارت دیگر پیک ماهانه در یک سال در این حوضه در حدود ۱,۳ برابر متوسط آورد سالانه شبیه‌سازی شده است.

۵,۶۵ مترمکعب بر ثانیه است. همچنین در کوتاه‌مدت (بازه ۱۰ ساله) این مقادیر به ترتیب ۳/۴ و ۳/۳ مترمکعب بر ثانیه است.

شایان ذکر است که آورد حوضه از نوسانات دوره‌ای برخوردار بوده و بیشترین دبی در فصل زمستان به‌ویژه بهمن و اسفند ماه گزارش شده است. بدیهی است جریان‌های فصلی و شدید می‌تواند بر فرسایش و انتقال

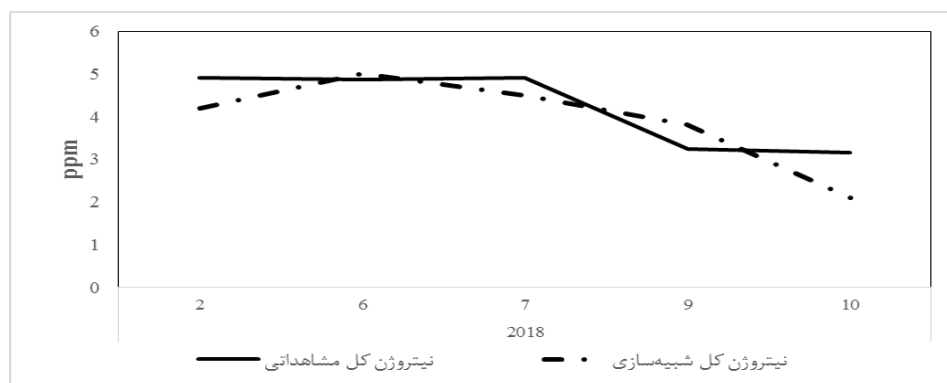


شکل ۵. متوسط شبیه‌سازی شده دبی ورودی به مخزن سد استقلال (m³/s) و نسبت آن به حداکثر دبی ماهانه (%).

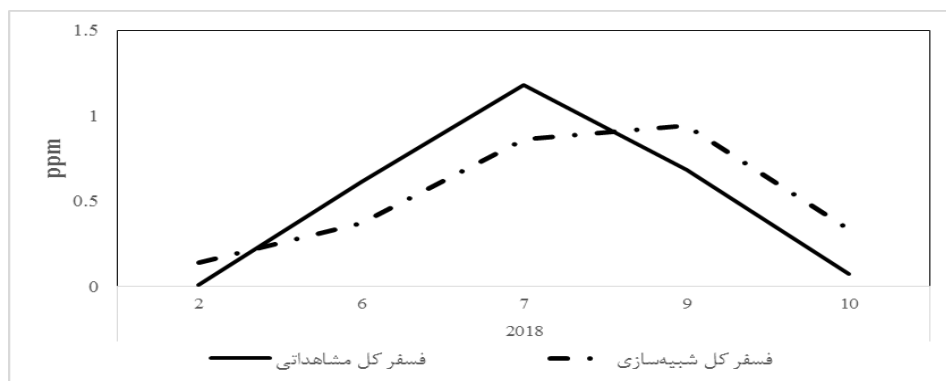
تأثیر زیادی از میزان بار رسوب دارد زیرا بخشی از آن به‌صورت فسفر آلی غیرمحلول به ذرات رسوب چسبیده و می‌تواند به مرور زمان در دریاچه از آن جدا شده و به‌صورت محلول تبدیل شود. لذا پیش‌بینی دقیق غلظت فسفر منوط به واسنجی بار رسوبات منتقل شده به مخزن سد می‌باشد که به دلیل عدم وجود چنین مطالعاتی در منطقه مطالعاتی میسر نگردید.

سری زمانی مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی غلظت نیتروژن و فسفر کل در ایستگاه‌های هیدرومتری (برداشت کیفی) زیارتعلی-رودان و آبنما-رودان در شکل‌های ۷-۱۰ نمایش داده شده است.

نتایج بیانگر تطبیق مناسب نتایج مدل واسنجی با مقادیر اندازه‌گیری شده است. در این میان، پایین‌تر بودن ضریب فسفات نسبت به نیترات از آنجا نشئت می‌گیرد که فسفات



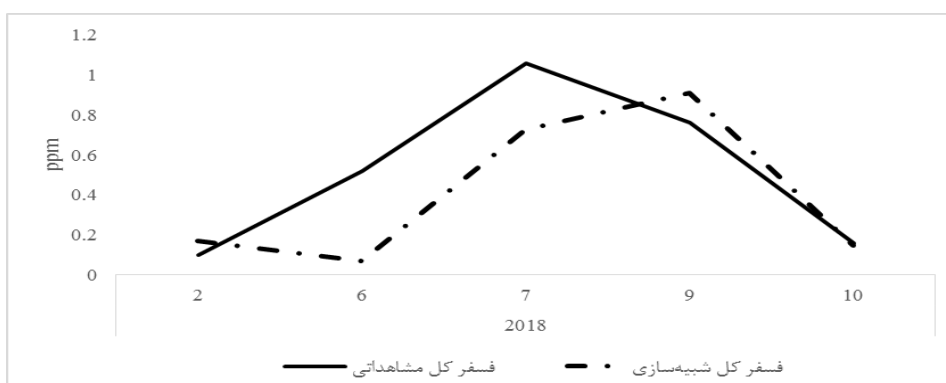
شکل ۶. غلظت نیتروژن کل شبیه‌سازی و مشاهداتی در ایستگاه هیدرومتری زیارتعلی-رودان (ppm)



شکل ۷. غلظت فسفر کل شبیه‌سازی و مشاهداتی در ایستگاه هیدرومتری زیارتعلی-رودان (ppm)



شکل ۸. غلظت نیتروژن کل شبیه‌سازی و مشاهداتی در ایستگاه هیدرومتری آبنما-رودان (ppm)



شکل ۹. غلظت فسفر کل شبیه‌سازی و مشاهداتی در ایستگاه هیدرومتری آبنما-رودان (ppm)

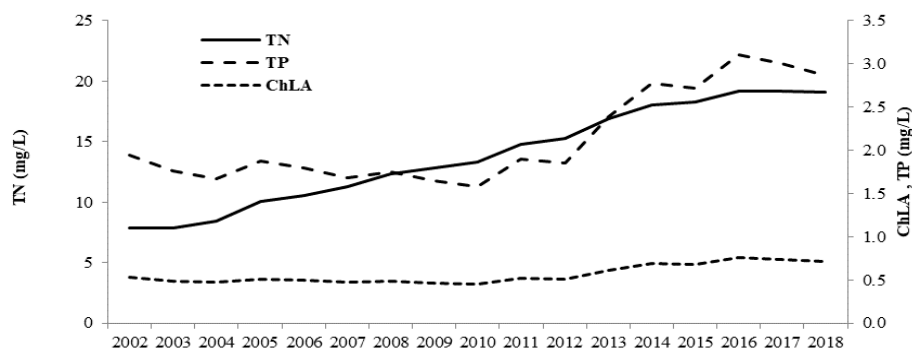
در سال ۲۰۱۰، با افزایش غلظت تا ۱٫۵ میلی‌گرم بر لیتر در سال ۲۰۱۰، با افزایش غلظت تا حدود ۳ میلی‌گرم بر لیتر در دریاچه همراه بوده است. این مقدار در حدود ۱۵٪ غلظت نیتروژن کل است درحالیکه در استانداردهای تغذیه‌گرایی فرض می‌شود این نسبت کمتر از ۱۰٪ می‌باشد. بنابراین در این حوضه میزان فسفر قابل توجه است. همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد میزان کلروفیل a (جلبک) در ورودی دریاچه نیز در بین ۰٫۵ تا ۰٫۷ میلی‌گرم بر لیتر است که در سال‌های اخیر با توجه به

در شکل ۱۱ غلظت شبیه‌سازی شده متغیرهای موثر بر سنجش پدیده تغذیه‌گرایی در سال‌های مختلف در محل ورودی دریاچه سد استقلال نشان داده شده است. براساس این نمودار می‌توان مشاهده نمود که نیتروژن کل (TN) روندی کاملاً صعودی داشته و از حدود ۸ میلی‌گرم بر لیتر در سال ۲۰۰۲ تا بیش از ۱۹ میلی‌گرم بر لیتر در سال ۲۰۱۸ رشد داشته است. همچنین فسفر کل (TP) نیز بعد از یک وقفه زمانی و کاهش از ۲ میلی‌گرم بر لیتر در سال ۲۰۰۲ تا

($R^2 > 0.99$) بطوریکه افزایش فسفر موجب افزایش غلظت کلروفیل می‌شود. همچنین بین این دو مولفه با عمق دیسک سکی (SD) نیز رابطه معکوس ($R^2 > 0.99$) وجود دارد و افزایش هرکدام با کاهش مقدار عمق سکی همراه است. اما میزان همبستگی رگرسیونی غلظت نیتروژن کل در دریاچه با عمق دیسک سکی و میزان کلروفیل A در مقایسه با فسفر کل کمتر است.

تغییرات فسفر کل روندی افزایشی داشته است. این نمودار همچنین بر این نکته تاکید دارد که برای کاهش پدیده تغذیه‌گرایی در دریاچه سد استقلال باید هر دو متغیر نیتروژن و فسفر مورد ارزیابی و تحلیل حساسیت قرار گیرند.

همچنین بررسی‌های دو به دو بین نتایج شبیه‌سازی شده ترکیبات موثر بر تغذیه‌گرایی نشان می‌دهد که بین فسفر کل و کلروفیل a رابطه مستقیم نیمه‌لگاریتمی وجود دارد



شکل ۱۰. غلظت نیتروژن کل (TN)، فسفر کل (TP) و کلروفیل a شبیه‌سازی شده در ورودی دریاچه سد استقلال (mg/L)

تصمیم‌های مدیریتی مدنظر قرار گیرد زیرا در حال حاضر نمی‌توان هیچکدام را عامل محدودکننده این پدیده معرفی نمود.

شناسایی مناطق بحرانی در حوضه آبریز سد استقلال

شناسایی مناطق بحرانی و تعیین پتانسیل کاهش مواد مغذی در آن‌ها می‌تواند نقطه عطفی جهت اولویت‌بندی طرح‌ها از لحاظ اقتصادی و رسیدن به استانداردهای کیفیت آب در پیکره‌های آبی باشد. به‌منظور تعیین مناطق بحرانی پس از استخراج بار متوسط سالانه در واحد سطح هر HRU مقادیر بار نیتروژن (TN)، فسفر کل (TP) و بار رسوبی با میانگین‌گیری وزنی (بر اساس مساحت هر HRU) در تمام کاربری‌ها و الگو کشت محاسبه شد. با تقسیم این مقادیر بر بار کل TN، TP و بار رسوبی در حوضه، سهم هر کاربری محاسبه شد. همچنین شاخص ترکیبی نیز با وزن‌دهی مختلف برای پارامترهای TN، TP و

بر اساس نتایج حاصل، می‌توان چنین استنباط کرد که حوضه آبریز سد استقلال دارای جریان‌های فصلی و دوره‌ای نسبتاً شدید است که می‌تواند موجب فرسایش خاک و انتقال بار مغذی و رسوبات کشاورزی شود. این موضوع بویژه با ارزیابی سهم آلاینده‌های نیتروژن و فسفر آلی نسبت به نیتروژن و فسفر کل قابل تایید است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بخش قابل ملاحظه‌ای از آلودگی منتهی به مخزن سد استقلال و علت پدیده تغذیه‌گرایی در این دریاچه ناشی از شستشوی کودهای آلی و فضولات دامی ناشی از آبیاری و بارش فصلی و رگباری و ته‌نشینی و بازنشر این ترکیبات در مخزن دریاچه است. همچنین، مشخص شد که غلظت نیتروژن و فسفر روندی افزایشی در دریاچه در طی سالیان اخیر داشته است و این روند با رشد جلبک نیز همخوانی دارد. بدین منظور تاکید می‌گردد؛ هر دو پارامتر نیتروژن و فسفر باید برای کاهش بار آلودگی و کاهش شدت پدیده تغذیه‌گرایی، در

است. این مقادیر برای شاخص ترکیبی دوم CI(2) به ترتیب برابر ۰/۲ برای بار رسوب، ۰/۴ برای TN و ۰/۴ برای TP می‌باشد. این وزن‌ها با استفاده از روش آنتروپی محاسبه شد.

بار رسوبی بدست آمد. در این مطالعه از دو شاخص ترکیبی با وزن‌های مختلف (ω) استفاده شد. شاخص ترکیبی اول CI(1) نشان‌دهنده مقادیری است که در آن به ترتیب بار رسوبی، TN، TP وزن‌های مساوی ۰/۳۳ انتخاب شده

جدول ۳. درصد مقادیر TP, TN, بار رسوبی و شاخص ترکیبی در کاربری‌های مختلف

کاربری اراضی	بار رسوبی (%)	TN (%)	TP (%)	CI (1)	CI (2)
کشت زراعی	۴۲.۳۰	۷۷.۷۰	۲۰.۸۱	۴۶.۹۳	۴۷.۸۶
کشت باغی	۵.۲۳	۷.۳۴	۰.۴۳	۴.۳۳	۴.۱۵
فعالیت‌های دامپروری و روستایی	۵۲.۴۷	۱۴.۹۶	۷۸.۷۶	۴۸.۷۳	۴۷.۹۹

سستی بحرانی‌ترین کاربری از منظر تولید آلودگی و رسوب است.

به منظور بررسی دقیق‌تر مناطق بحرانی، پس از تعیین سهم هر یک از محصولات در کاربری کشت زراعی و باغی، اولویت‌بندی آن‌ها در جدول ۴ آورده شد.

مطابق جدول ۳، کشت‌های زراعی نسبت به سایر کاربری‌ها بالاترین سهم را در بار نیتروژن کل دارا می‌باشند. فعالیت‌های دامپروری نیز بیشتری سهم را در تولید رسوب و بار فسفر کل دارا می‌باشد. بر اساس وزن یکسان برای هر سه پارامتر بار رسوبی، نیتروژن و فسفر کل نیز دامپروری

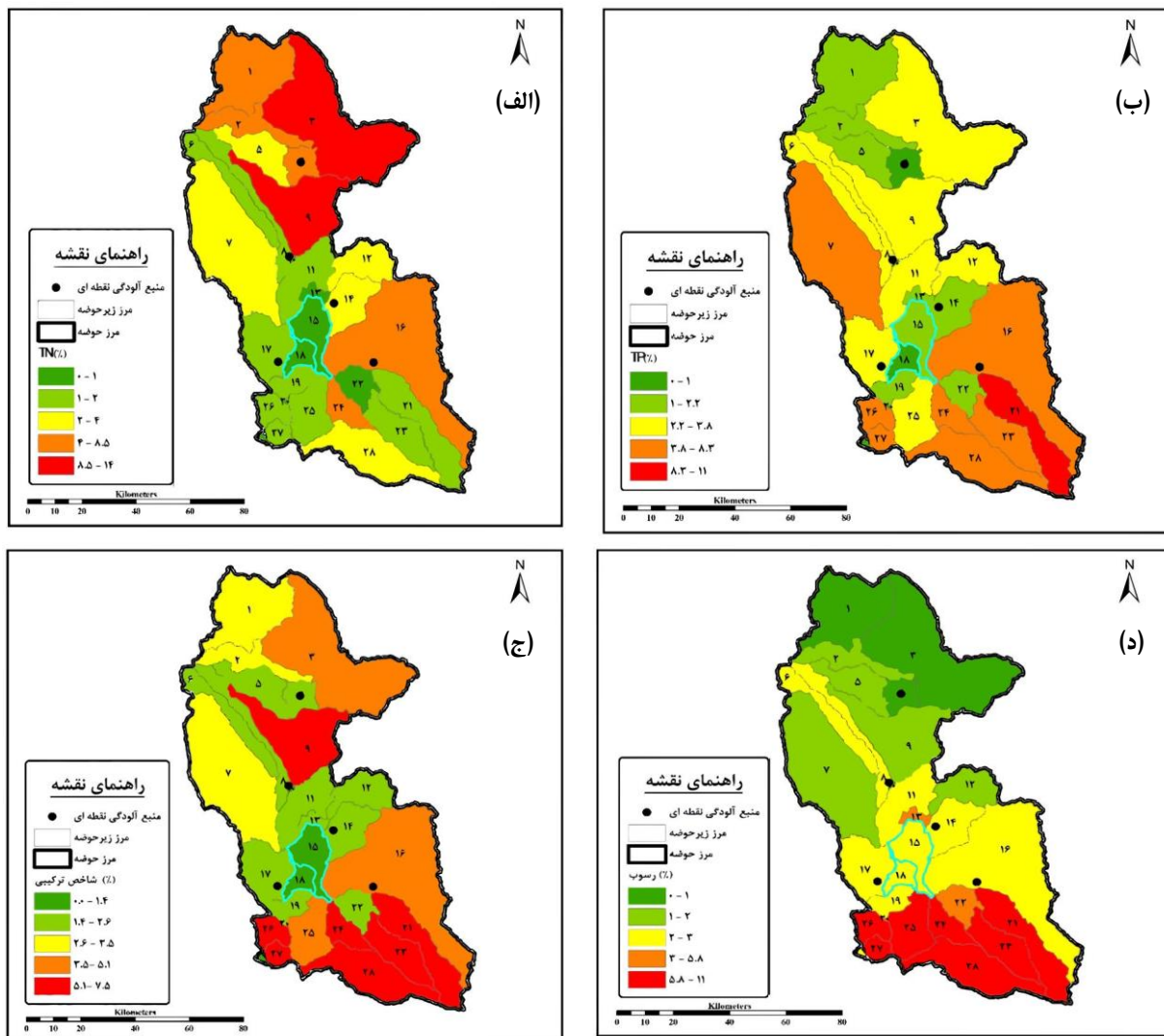
جدول ۴. اولویت‌بندی اراضی باغی و زراعی از منظر مواد مغذی، بار رسوبی و شاخص ترکیبی

کاربری اراضی	بار رسوبی (%)	TN (%)	TP (%)	CI (1)	CI (2)
نخلستان	۲.۸۹	۰.۰۳	۰.۱۰	۱.۰۱	۰.۶۳
مرکبات	۲.۳۳	۷.۳۱	۰.۳۳	۳.۳۲	۳.۵۲
خیار	۹.۷۱	۸.۶۶	۲.۸۲	۷.۰۶	۶.۵۳
پیاز	۱۱.۰۲	۲۹.۲۲	۹.۱۹	۱۶.۴۸	۱۷.۵۷
سبزیجات	۲.۴۳	۱۳.۰۱	۱.۰۸	۵.۵۱	۶.۱۲
گوجه فرنگی	۷.۱۹	۱۸.۲۱	۴.۳۷	۹.۹۲	۱۰.۴۷
هندوانه	۱۱.۹۵	۸.۶۰	۳.۳۴	۷.۹۶	۷.۱۷

همچنین قسمت‌هایی از رودخانه و حوضه که دارای بیشترین پتانسیل تولید مواد مغذی و بار رسوبی هستند در شکل ۱۲ مشخص شده است.

بر اساس نتایج، زیر حوضه جغین و میناب بیشترین پتانسیل تولید مواد مغذی و رسوب را در حوضه آبریز دارا هستند. در زیر حوضه جغین کاربری زراعی بیشترین درصد مساحت را به خود اختصاص داده و بزرگترین مرکز جمعیتی حوضه آبریز سد استقلال، شهرمنوجان در این

با توجه به نتایج حاصله در محدوده مورد مطالعه، بیشترین میزان انتشار بار مواد مغذی در واحد سطح، در کشت پیاز و گوجه‌فرنگی و بیشترین بار رسوبی در اراضی هندوانه و پیاز حاصل می‌شود. یعنی کنترل انتشار آلودگی و زهاب‌های کشاورزی از این مزارع می‌تواند بیشترین تاثیر را بر غلظت مواد مغذی در مخزن سد داشته باشد. همچنین، میزان تولید بار رسوبی و مواد مغذی در کشت باغی کمتر از کشت زراعی می‌باشد.



شکل ۱۱. زیرحوضه‌ها و بازه‌ای از رودخانه با بیشترین تولید بار مواد مغذی و رسوب؛ (الف) بار نیتروژن، (ب) بار فسفر، (ج) متوسط بار مواد مغذی و رسوبی، و (د) درصد رسوب

ارزیابی و مقایسه راهکارهای مدیریتی

پس از اعمال راهکارهای مدیریتی به تفکیک در مدل شبیه‌سازی حوضه این امکان فراهم شده است تا اثر هر یک از این راهکارها به روش تحلیل حساسیت در منطقه مورد مطالعه سنجیده شود. این راهکارها هرکدام با رویکردهای مختلف مانند آبخیزداری، رویکرد سازه‌ای، و یا مدیریت مزرعه می‌تواند بر غلظت و بار مواد مغذی منتقل شده از بالادست به دریاچه مخزن اثرگذار باشد، اما آنچه اهمیت دارد تعیین میزان اثرگذاری این راهکارها نسبت به یکدیگر و شناسایی راهکارهای موثرتر در کنترل بار مغذی به دریاچه می‌باشند. بنابراین لازم است براساس شبیه‌سازی

حوضه واقع شده است. زیر حوضه میناب نیز در پایین دست حوضه واقع شده است که می‌تواند دلیل بحرانی بودن آن باشد. با توجه به واقع شدن سد استقلال در این زیر حوضه، مدیریت کیفی و اعمال سناریوهای احیا سد در این زیرحوضه ضروری بنظر می‌رسد. بر این اساس رودخانه‌های بحرانی حوضه، میناب و جغین و سرشاخه‌های آن‌ها هستند. لذا، در راستای پایش هرچه بهتر آلودگی‌های ورودی از بالادست سد استقلال، احداث ایستگاه‌های پایش کیفی در این مناطق از اهمیت بسیاری برخوردار است.

برای کاهش نیتروژن آلی مربوط به راهکار ترانس‌بندی و کمترین امتیاز به کاهش دامداری سنتی تعلق گرفته است. هرچند امتیازات کسب شده نسبتاً به یکدیگر نزدیک است اما می‌تواند اولویت‌بندی راهکارها را بخوبی و تفکیک شده نمایش دهد. بطور مشابه، بالاترین اولویت برای کاهش نیتروژن کل، پیروی از رویکرد مدیریت مزرعه و کاهش کوددهی شیمیایی و حیوانی در مزرعه است. همچنین بالاترین اولویت در کاهش فسفر آلی و کل ورودی به دریاچه نیز اجرای نوار فیلتراسیون در مناطق بحرانی شناسایی شده است.

صورت گرفته میزان تغییرات بار مواد مغذی و غلظت آلودگی در ورودی به دریاچه به تفکیک برای هر پارامتر و راهکار مدیریتی سنجیده شود. سپس امتیاز هر راهکار نسبت به پارامتر آلاینده پس از نرمال‌سازی تعیین می‌شود. این امتیاز پس از وزن‌دهی براساس اهمیت پارامتر آلاینده و میانگین‌گیری وزنی نهایی شده و براساس امتیاز نهایی رتبه‌بندی مورد نظر صورت می‌پذیرد.

جدول ۵ امتیاز هریک از راهکارهای مدیریتی در کاهش پارامترهای آلاینده، یعنی نیتروژن آلی (TKN)، نیتروژن کل (TN)، فسفر آلی (OrgP) و فسفر کل (TP) را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، بیشترین امتیاز

جدول ۵ امتیاز نرمال‌شده هریک از راهکارهای مدیریتی برای کاهش بار مواد مغذی در حوضه در هر پارامتر

راهکار مدیریتی	محل پیشنهادی	رویکرد	نیتروژن آلی (%)	نیتروژن کل (%)	فسفر آلی (%)	فسفر کل (%)
اجرای نوار فیلتراسیون	مناطق بحرانی	آبخیزداری	۲۲٫۸	۱۹٫۷	۲۷٫۸	۲۴٫۴
ترانس‌بندی	مناطق بحرانی	آبخیزداری	۲۵٫۶	۲۰٫۲	۲۱٫۶	۲۴٫۲
احداث تصفیه‌خانه	رودان و میناب	سازه‌ای	۲۲٫۷	۲۰٫۱	۱۷٫۷	۲۱
کاهش کوددهی مزارع	باغات - مزارع	مدیریت مزرعه	۱۶٫۲	۲۰٫۹	۱۸٫۷	۱۷٫۱
کاهش دامداری سنتی	مناطق بحرانی	آبخیزداری	۱۲٫۶	۱۹٫۱	۱۴٫۳	۱۳٫۲
حاصل جمع						
			۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰

اذعان نمود که فسفر نسبت به نیتروژن در توسعه تغذیه‌گرایی دریاچه موثرتر بوده و باید در محوریت تصمیم‌گیری برای تعیین اولویت راهکارهای مدیریتی قرار گیرد. لذا در اینجا وزن امتیازهای کسب شده برای هر راهکار در پارامترهای مربوط به فسفر بالاتر از نیتروژن لحاظ شده است. در اینجا مجموعاً فسفر ۶۰٪ و نیتروژن ۴۰٪ وزن دارند که برای فسفر این امتیاز بطور مساوی برای فسفر آلی (منتقل شده با رسوبات) و فسفر کل مقدار ۳۰٪ در نظر گرفته شده و برای نیتروژن آلی و کل به ترتیب ۲۵ و ۱۵٪ در نظر گرفته شده است. علت تفاوت وزن در پارامترهای نیتروژنی نسبت بالای TKN به TN در مطالعات شبیه‌سازی دریاچه مخزن بوده است که بر میزان اکسیژن محلول و اکوسیستم آبی اثرگذاری نامطلوبی دارد.

براساس نتایج **Error! Reference source not found.** و **Error! Reference source not found.** می‌توان راهکارهای مدیریتی را نسبت به هر آلاینده رتبه‌بندی نمود. کاهش دامداری سنتی در کلیه پارامترها از کمترین اولویت نسبت به سایر راهکارها برخوردار است. همچنین ترانس‌بندی و اجرای نوار فیلتراسیون با رویکرد آبخیزداری بویژه در کنترل بار فسفر اثرگذاری بیشتری دارند درحالی‌که کوددهی در کنترل بار نیتروژن موثرتر است. احداث و بهره‌برداری از تصفیه‌خانه نیز بعنوان یک گزینه با امتیاز متوسط در کنترل بار مواد مغذی شناخته می‌شود. توجه به این نکته ضروری است که حسب بررسی‌های بعمل آمده و نتایج خروجی از مدل شبیه‌سازی می‌توان

مغذی امتیازبندی شده است (امتیاز کل ۲۳,۲). اولویت این دو راهکار مدیریتی نشان می‌دهد که آبخیزداری و جلوگیری از فرسایش خاک و انتقال رسوب به دریاچه از حوضه بالادست مهمترین رویکردی است که می‌بایست مدیران در کنترل تولید و انتشار مواد مغذی و جلوگیری از توسعه پدیده تغذیه‌گرایی در دریاچه سد استقلال مدنظر قرار دهند. بنابراین راهکار اجرایی که می‌تواند در کوتاه‌مدت بیشترین اثرگذاری را داشته باشد حفاظت از منابع طبیعی با روش‌هایی نظیر اجرای نوار فیلتراسیون و ترانس‌بندی در مناطق بحرانی است. همچنین این اولویت‌بندی بطور ضمنی بر اهمیت پایش و سنجش مستمر رسوبات ورودی به دریاچه نیز تاکید دارد.

بنابراین حسب وزن‌دهی انجام شده، امتیاز کل راهکارهای مدیریتی تعیین و براین اساس رتبه‌بندی این راهکارهای از نظر فنی صورت گرفت. همانگونه که مشاهده می‌شود، اجرای نوار فیلتراسیون (با حداقل ضخامت ۱۰ متر در مناطق بحرانی) از بیشترین اولویت و بالاترین قابلیت در کاهش بار مواد مغذی و کنترل پدیده تغذیه‌گرایی برخوردار است (امتیاز کل ۲۴,۳). این روش می‌تواند ضمن به‌دام انداختن رسوبات و تثبیت خاک، بخشی از بار مواد مغذی منتقل شده توسط رواناب را نیز کاهش دهد. بطور مشابه، ترانس‌بندی مراتع و مزارع در شیب‌های تند با رویکرد آبخیزداری بعنوان اولویت و راهکار شماره ۲ جهت کنترل فرسایش و انتشار بار مواد

جدول ۶. امتیاز وزنی دهی شده و نهایی هریک از راهکارهای مدیریتی برای کاهش بار مواد مغذی

رتبه نهایی	امتیاز نهایی	رویکرد	محل پیشنهادی	شرط اجرایی	راهکار مدیریتی
۱	۲۴,۳	آبخیزداری	مناطق بحرانی (زیرحوضه میناب)	حداقل ضخامت ۱۰ متر	اجرای نوار فیلتراسیون
۲	۲۳,۲	آبخیزداری	مناطق بحرانی (مراتع)	در مراتع و مزارع با شیب تند	ترانس‌بندی
۳	۲۰,۳	سازه‌ای	رودان و میناب	با قابلیت حذف مواد مغذی از ۳۰ تا ۶۰٪	احداث تصفیه‌خانه
۴	۱۷,۹	مدیریت مزرعه	باغات - مزارع	کاهش حداقل ۲۵٪ کود شیمیایی و حیوانی مصرفی	کاهش کوددهی مزارع
۵	۱۴,۳	آبخیزداری	مناطق بحرانی (مراتع)	جایگزینی با دامداری صنعتی	کاهش دامداری سنتی

زیرا احداث تصفیه‌خانه نسبت به راهکارهای مبتنی بر آبخیزداری در اولویت بعدی قرار دارد.

نهایتاً در بلندمدت پیشنهاد می‌شود با آموزش و ترویج الگوی کشت مناسب و البته اعمال اهرم‌های تشویقی-توییحی کشاورزان و باغداران منطقه را از مصرف زیاد کود شیمیایی و حیوانی بازداشت و موجب کاهش حداقل ۲۵٪ مصرف کود در منطقه شد. دامداران نیز می‌توانند با جلب حمایت‌های دولتی بجای روش‌های سنتی به دامداری صنعتی روی آورند.

انتخاب بهترین و ایده‌آل‌ترین راهکار از بین راهکارهای پیشنهادی مستلزم در نظر گرفتن اهداف و عوامل متعدد، نظر محققین و دیدگاه تصمیم‌گیرندگان می‌باشد در راستای انتخاب بهینه و اقتصادی می‌باشد. در این راستا جهت

پس از راهکارهای آبخیزداری، رتبه سوم به احداث تصفیه‌خانه فاضلاب شهری برای مناطق رودان و میناب اختصاص دارد (امتیاز کل ۲۰,۳). البته این امتیاز بشرطی است که فرآیند مورد استفاده در تصفیه‌خانه بتواند با بهره‌گیری از روش‌های تصفیه تکمیلی مناسب با قابلیت حذف مواد نیتروژنی و فسفر حداقل ۳۰ تا ۶۰٪ بار مواد مغذی را از فاضلاب خام کم نماید. بدیهی است احداث تصفیه‌خانه متعارف براساس لجن فعال می‌تواند موجب کاهش بار BOD شده و نیتروژن و فسفر را کاهش نخواهد داد که در این شرایط احداث تصفیه‌خانه در اولویت نخواهد بود. بنابراین احداث و بهره‌برداری مناسب از تصفیه‌خانه بعنوان یک راهکار در میان‌مدت پیشنهاد می‌شود

گزینه‌هایی هستند که حداقل فاصله را نسبت به راه‌حل ایده‌آل مثبت (بهترین حالت ممکن) و دورترین فاصله را نسبت به راه‌حل ایده‌آل منفی (بدترین حالت ممکن) داشته است. با انتخاب ۳ معیار معرفی شده (بار نیتروژن و فسفر ورودی به دریاچه و هزینه اجرای هر سناریو) در مقابل راهکارها ارزیابی شده ماتریس تصمیم‌گیری ایجاد شد (جدول ۷).

رسیدن به یک اولویت‌دهی صحیح و منطقی، آنالیز و حل مسئله توسط روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه (MADM) صورت می‌پذیرد.

در این راستا به منظور اولویت‌دهی راهکارهای پیشنهادی و انتخاب برترین راهکار از بین راهکارهای پیشنهادی از روش TOPSIS استفاده شد. این روش بر اساس این مفهوم ایجاد شده است که گزینه‌های مناسب

جدول ۷. ماتریس تصمیم‌گیری سناریوهای پیشنهادی بر اساس معیارهای پیشنهادی (Imani et al., 2017)

راهکار مدیریتی	قیمت (میلیون تومان)	TP (%)	TN (%)
اجرای نوار فیلتراسیون	۲۲۰	۲۴,۴	۱۹,۷
تراس‌بندی	۱۷,۰۰۰	۲۴,۲	۲۰,۲
احداث تصفیه‌خانه	۸۰,۰۰۰	۲۱	۲۰,۱
کاهش کوددهی مزارع	۲۵۰	۱۷,۱	۲۰,۹
کاهش دامداری سنتی	۸۶,۰۰۰	۱۹,۱	۱۳,۲

بحث و نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش، ارزیابی راهکارهای مناسب مدیریتی در کنترل بار مواد مغذی ورودی به سد استقلال با استفاده از مدل‌سازی جامع کمی و کیفی حوضه آبریز با مدل SWAT می‌باشد. نتایج حاکی از عملکرد مناسب این مدل در شبیه‌سازی مؤلفه‌های کمی و کیفی حوضه و همچنین ارزیابی اثرات راهکارهای مدیریتی برای کاهش آلودگی از منابع آلاینده می‌باشد.

همچنین نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که شناسایی مناطق آلاینده بحرانی با هدف صرفه‌جویی اقتصادی و قابلیت اجرایی بالاتر راهکارهای کنترلی و مدیریتی، از اهمیت بسیاری برخوردار است. بنابراین استفاده از یک مدل شبیه‌سازی حوضه‌ای در کنار تصمیم‌گیری‌های چندجانبه می‌تواند ابزار مناسبی جهت تصمیم‌گیری باشد. بر اساس نتایج، زیر حوضه جغین و میناب بیشترین پتانسیل تولید مواد مغذی و رسوب را در حوضه آبریز دارا هستند. در زیر حوضه جغین، کاربری زراعی بیشترین

در این مطالعه به منظور ارزیابی راهکارها، وزن یکسانی برای درصد کاهش بار نیتروژن و فسفر ورودی به دریاچه و هزینه اجرای راهکار در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن این وزن‌ها و انجام سایر مراحل روش در محیط نرم‌افزار اکسل نتایج جدول ۸ حاصل گردید.

جدول ۸. اولویت‌بندی راهکارهای سازه‌ای و مدیریتی

راهکار	رتبه	مقدار
اجرای نوار فیلتراسیون	۱	۰/۹۹
کاهش کوددهی مزارع	۲	۰/۹۶
تراس‌بندی	۳	۰/۷۹
احداث تصفیه‌خانه	۴	۰/۳۸
کاهش دامداری سنتی	۵	۰/۳۷

همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود به ترتیب راهکار فیلتراسیون گیاهی با عرض حداقل ۱۰ متری و کاهش کوددهی مزارع به عنوان راهکار برتر شناسایی شدند. این نتایج با در نظر گرفتن اهمیت یکسان هر سه پارامتر در نظر گرفته شده است.

درصد مساحت را به خود اختصاص داده و بزرگترین مرکز جمعیتی حوضه آبریز سد استقلال، شهرمنوجان در این حوضه واقع شده است. زیر حوضه میناب نیز در پایین دست حوضه واقع شده که می‌تواند دلیل بحرانی بودن آن باشد. با توجه به واقع شدن سد استقلال در این زیر حوضه، مدیریت کیفی و اعمال سناریوهای کاهش بار ورودی مواد مغذی در این زیر حوضه ضروری است. بر اساس پیاده‌سازی راهکارهای مدیریتی در این مناطق، به ترتیب راهکار فیلتراسیون گیاهی با عرض حداقل ۱۰ متری و کاهش کوددهی مزارع به عنوان راهکار برتر شناسایی شدند. این نتایج با در نظر گرفتن اهمیت یکسان هر سه پارامتر در نظر گرفته شده است که بسته به اینکه از نظر تصمیم‌گیران کدام پارامتر از اهمیت بیشتری برخوردار باشد، اولویت‌بندی بین راهکارها متفاوت خواهد بود. انتخاب مناسب وزن پارامترها مستلزم مشورت با تمامی مدیران مسئول در منطقه می‌باشد که پیشنهاد می‌گردد در مطالعات بعدی و با در نظر گرفتن نظر کارشناسان، وزن متناسب برای هر شاخص تعیین شود تا بدین وسیله بهترین راهکار ممکن در منطقه شناسایی گردد.

فهرست منابع

- Abdolabadi, H., Sarang, A., Ardestani, M., & Little, J. (2018). Estimating the Available Water in the Watershed using System Dynamics Hydrological Model (Case Study: Ilam Watershed). *Environmental Energy and Economic Research*, 2(4), 265-280.
- Abdolabadi, H., Sarang, A., Ardestani, M., & Mahjoobi, E. (2016). Eutrophication Modeling Using Variable Chlorophyll Approach, *International Journal of Environmental Research*, 10(2), 273-290.
- Chang, D., Lai, Z., Li, S., Li, D., & Zhou, J. (2021). Critical source areas' identification for non-point source pollution related to nitrogen and phosphorus in an agricultural watershed based on SWAT model. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-20.
- Gashaw, T., Dile, Y. T., Worqlul, A. W., Bantider, A., Zeleke, G., Bewket, W., & Alamirew, T. (2021). Evaluating the effectiveness of best management practices on soil erosion reduction using the SWAT Model: for the case of Gumara watershed, Abbay (Upper Blue Nile) Basin. *Environmental Management*, 68(2), 240-261.
- Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, C. H., & Arnold, J. G. (2007). The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. *Transactions of the ASABE*, 50(4), 1211-1250.
- Goel, P. K., Rudra, R. P., Khan, J., Gharabaghi, B., Das, S., & Gupta, N. (2004). Pollutants removal by vegetative filter strips planted with different grasses. *2004 ASAE Annual Meeting*, 1.

تشکر و قدردانی

تحقیق حاضر برگرفته از نتایج پروژه «مطالعه و بررسی علل طعم و بوی مخزن سد استقلال میناب تا خروجی تصفیه‌خانه بندرعباس و ارائه راهکارهای عملی جهت رفع آن» می‌باشد. بدینوسیله نویسندگان مقاله از شرکت سهامی آب منطقه‌ای هرمزگان به عنوان حامی مالی پروژه قدردانی می‌نمایند.

یادداشت‌ها

1. Critical Source Areas
2. Best Management Practices
3. Soil and Water Assessment Tool
4. Process- based
5. National Aeronautics and Space Agency
6. Food and Agriculture Organization (FAO)
7. Latin hypercube sampling (LHS)

- Gregar, J., Petru, J., & Novotná, J. (2019). Evaluation of the SWAT model as an integrated management tool in the Švihov drinking water supply catchment. *Soil and Water Research*, 14(2), 76–83. <https://doi.org/10.17221/46/2018-SWR>
- Himanshu, S. K., Pandey, A., Yadav, B., & Gupta, A. (2019). Evaluation of best management practices for sediment and nutrient loss control using SWAT model. *Soil and Tillage Research*, 192, 42–58.
- Imani, S., Delavar, M., & Niksokhan, M. H. (2019). Identification of nutrients critical source areas with swat model under limited data condition. *Water Resour*, 46, 128–137.
- Imani, S., Delavar, M., & Niksokhan, M. (2017). Simulation and Assessment of Management Practices for Reduction of Nutrients Discharge to the Zrebar Lake Using SWAT Model. *Iran-Water Resources Research*, 13(1), (In Farsi).
- Jamshidi, S., Imani, S., & Delavar, M. (2020). Impact Assessment of Best Management Practices (BMPs) on the Water Footprint of Agricultural Productions. *International Journal of Environmental Research*, 14(6), 641–652.
- Liu, R., Xu, F., Zhang, P., Yu, W., & Men, C. (2016). Identifying non-point source critical source areas based on multi-factors at a basin scale with SWAT. *Journal of Hydrology*, 533, 379–388. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.12.024>
- Logan, T. J. (1993). Agricultural best management practices for water pollution control: current issues. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 46(1–4), 223–231.
- Malagó, A., Bouraoui, F., Vigiak, O., Grizzetti, B., & Pastori, M. (2017). Modelling water and nutrient fluxes in the Danube River Basin with SWAT. *Science of the Total Environment*, 603, 196–218.
- Niraula, R. (2010). Identifying Critical Source Areas of Sediment, Nitrogen and Phosphorus: A Modeling Approach (*Doctoral dissertation*).
- Niraula, R., Kalin, L., Srivastava, P., & Anderson, C. J. (2013). Identifying critical source areas of nonpoint source pollution with SWAT and GWLF. *Ecological Modelling*, 268, 123–133.
- Novotny, V. (2011). The danger of hypertrophic status of water supply impoundments resulting from excessive nutrient loads from agricultural and other sources. *Journal of Water Sustainability*, 1(1), 1–22.
- Palmate, S. S., & Pandey, A. (2021). Effectiveness of Best Management Practices on Dependable Flows in a River Basin Using Hydrological SWAT Model. In *Water Management and Water Governance* (pp. 335-348). Springer, Cham.
- Perera, E. D. P., Iwami, Y., & Fukami, K. (2015). Point and non-point source nutrient loading simulation for the Takasaki River Basin, Chiba–Japan. *Water Practice and Technology*, 10(2), 328–336.
- Qing, X., Haojie, H., Zhiliang, Z., Caixia, Z., & Qin, Z. (2020). Research progress of two typical watershed-scale non-point source pollution distributed models. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 619(1), 12033.
- Rahmati, O., Choubin, B., Fathabadi, A., Coulon, F., Soltani, E., Shahabi, H., Mollaeifar, E., Tiefenbacher, J., Cipullo, S., & Ahmad, B. Bin. (2019). Predicting uncertainty of machine learning models for modelling nitrate pollution of groundwater using quantile regression and UNEEC methods. *Science of the Total Environment*, 688, 855–866.
- Salarijazi, M., & Ghorbani, K. (2019). Improvement of the simple regression model for river'EC estimation. *Arabian Journal of Geosciences*, 12(7), 1-14.

- Sang, J. K., & Maina, C. W. (2018). Modelling the impacts of structural conservation measures on sediment and water yield in Thika-Chania catchment, Kenya. *International Soil and Water Conservation Research*, 6(2), 165–174.
- Santhi, C., Arnold, J. G., Williams, J. R., Hauck, L. M., & Dugas, W. A. (2001). Application of a watershed model to evaluate management effects on point and nonpoint source pollution. *Transactions of the ASAE*, 44(6), 1559.
- Shrestha, N. K., Rudra, R. P., Daggupati, P., Goel, P. K., & Shukla, R. (2021). A comparative evaluation of the continuous and event-based modelling approaches for identifying critical source areas for sediment and phosphorus losses. *Journal of Environmental Management*, 277, 111427.
- Strehmel, A., Schmalz, B., & Fohrer, N. (2016). Evaluation of land use, land management and soil conservation strategies to reduce non-point source pollution loads in the three gorges region, China. *Environmental Management*, 58(5), 906–921.
- Tirabadi, M. S. M., Banihabib, M. E., & Randhir, T. O. (2022). SWAT-SF: A flexible SWAT-based model for watershed-scale water and soil salinity modeling. *Journal of Contaminant Hydrology*, 244, 103893.
- Tufa, F. G., & Sime, C. H. (2021). Stream flow modeling using SWAT model and the model performance evaluation in Toba sub-watershed, Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 7(4), 2653-2665.
- Uniyal, B., Jha, M. K., Verma, A. K., & Anebagilu, P. K. (2020). Identification of critical areas and evaluation of best management practices using SWAT for sustainable watershed management. *Science of the Total Environment*, 744, 140737. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140737>
- Wang, G., Li, J., Sun, W., Xue, B., Yinglan, A., & Liu, T. (2019). Non-point source pollution risks in a drinking water protection zone based on remote sensing data embedded within a nutrient budget model. *Water Research*, 157, 238–246.
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning* (Issue 537). Department of Agriculture, Science and Education Administration.
- Yousefi, H., Moridi, A., Yazdi, J., Khazaei, P. A., & Kazaeipoul, A. (2020). Investigating the effect of climate change on discharge, NO₃ load, and agricultural products yield upstream of Esteghlal dam. *Iran-Water Resources Research*, 16(2), 35-49. (In Farsi).
- Yang, j., Abbaspour K. C., Reichert P. & Yang H. (2008). Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to Chaohe Basin in China. In review. *Journal of Hydrology*. 358(1-2):1-23.
- Zhang, Y., Li, M., Dong, J., Yang, H., Van Zwieten, L., Lu, H. & Wang, H. (2021). A critical review of methods for analyzing freshwater eutrophication. *Water*, 13(2), 225.
- Zeiger, S. J., Owen, M. R., & Pavlowsky, R. T. (2021). Simulating nonpoint source pollutant loading in a karst basin: A swat modeling application. *Science of the Total Environment*, 785, 147295.