

ارزیابی روش‌های مدیریت منابع آلاینده غیرنقطه‌ای کشاورزی حاشیه رودخانه ارس (محدوده مکانی اصلاندوز تا پارس آباد، بازه زمانی ۱۳۷۲ تا ۱۳۸۶)

نسرین بدرزاده^۱، جمال محمدولی سامانی^۲، مهدی مظاهری^{۳*}

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

n.badrzadeh@modares.ac.ir

samani_j@modares.ac.ir

۲. استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳. استادیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۰۸

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۸/۰۶/۰۳

چکیده

رودخانه ارس علاوه بر اهمیت زیست‌محیطی، نقش مهمی در زندگی مردم مجاور خود ایفا می‌کند. در سال‌های اخیر با افزایش سطح اراضی کشاورزی مجاور و کاهش نرخ جریان مطرح شده، بارگذاری منابع آلاینده غیرنقطه‌ای کشاورزی یکی از عوامل اصلی آلودگی رودخانه ارس شناخته شده است. در این تحقیق اقدامات مدیریتی به‌منظور کاهش آلودگی آب رودخانه از طریق تجزیه و تحلیل چندین گزینه توسط مدل عددی در بازه زمانی ۱۳۷۲ تا ۱۳۸۶ انجام گرفت. نتایج گزینه مدیریت کاربری اراضی نشان داد که با کاهش اراضی تحت کشت، بارهای آلودگی غیرنقطه‌ای در مقایسه با وضع موجود روند نزولی داشته، و حداکثر بار آلودگی با ۳۴ درصد و ۱۶/۸ درصد به ترتیب در نیترا و فسفات کاهش می‌یابد. با تغییرات کاربرد کود نسبت به وضع موجود، تغییر کمتری در رواناب و بار آلودگی مواد مغذی مشاهده می‌شود. بار آلودگی غیرنقطه‌ای کشاورزی در اشکال مختلف به‌طور مستقیم با مقدار کود شیمیایی استفاده شده متناسب است. به‌طوری که با کاهش ۵۰ درصد کود مصرفی نسبت به وضع موجود، نیترا با بیشترین تغییر به میزان ۱۸/۰۹ درصد و فسفات به میزان ۸/۳۵ درصد کاهش می‌یابد. در محدوده مطالعاتی کاربری اراضی و کود مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر آلودگی غیرنقطه‌ای کشاورزی شناخته شد. به‌طور کلی نتایج نشان داد که مدیریت کاربری اراضی اثر بیشتری در کنترل تلفات آب و مواد مغذی نسبت به مدیریت کاربرد کود دارد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد، تنظیم مقادیر معقول در استفاده از اراضی تحت کشت و کود مصرفی در محدودیت‌های قانونی و عملی در این مطالعه، به بهبود قابل ملاحظه‌ای در کیفیت آب و تولیدات کشاورزی می‌انجامد.

کلیدواژه

رودخانه ارس، روش‌های مدیریت کشاورزی، منبع آلودگی غیر نقطه‌ای کشاورزی.

۱. مقدمه

فاضلاب‌های شهری، فاضلاب‌های صنعتی و رواناب‌های شهری را نام برد. منابع آلودگی غیر نقطه‌ای نیز عمدتاً از فعالیت‌های کشاورزی، رواناب‌های سطحی حاصل از بارش باران یا ذوب برف که بر سطح زمین جاری شده و سپس وارد رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و آب‌های ساحلی می‌شوند (Carpenter et al., 1998; Shen et al., 2012). امروزه بیشترین سهم آلودگی آب‌های سطحی را

در بسیاری از نقاط جهان آب‌های سطحی تنها منبع آب موجود برای مصارف شرب و بهداشتی هستند که کیفیت آن‌ها تحت تأثیر منابع آلودگی نقطه‌ای (PSP) و غیرنقطه‌ای (NPSP) قرار می‌گیرد و زیست‌بوم‌های آبی و کیفیت آب عرضه شده را تهدید می‌کند (Wu & Chen, 2013). از عمده منابع آلودگی نقطه‌ای می‌توان

گزینه‌های مدیریتی شبیه‌سازی‌شده و کارایی آن بررسی شده است (Tri et al., 2013). در این راستا مطالعات بسیاری در زمینه بررسی تأثیر شیوه‌های مدیریتی انجام شده است. در ادامه به برخی از تحقیقات مدیریت کیفی در آب‌های سطحی پرداخته می‌شود.

Leo و همکاران (۲۰۱۳) در تحقیقی به بررسی اثربخشی بهترین راه‌کارهای مدیریتی به منظور کاهش آلودگی رودخانه ژانکسی ۶، از طریق تجزیه و تحلیل چندین گزینه با مدل عددی پرداختند. نتایج پژوهش نشان داد که تغییر در کاربری اراضی، مدیریت کود مصرفی و مدیریت خاکورزی عوامل اصلی تأثیرگذار بر آلودگی رودخانه هستند. نتایج این تحقیق نشان داد که با اعمال گزینه تغییر کاربری اراضی، رواناب و بارهای آلودگی غیرنقطه‌ای به میزان ۲۰ درصد یا بیشتر کاهش یافت. همچنین تغییر در کاربرد کود باعث تغییر کمتری در رواناب محلی می‌شود. Ji Han-jae و همکاران (۲۰۱۴) نیز در مطالعه‌ای، آلودگی غیر نقطه‌ای را با استفاده از مدل عددی برای حوضه رودخانه لیوشیه ۷ شبیه‌سازی کردند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که تغییر شیوه خاکورزی مرسوم و میزان کوددهی تجربی نسبت به خاکورزی حفاظتی و کوددهی بهینه در کاهش آلودگی غیرنقطه‌ای مؤثر بوده است. در تحقیقی با استفاده از مدل عددی به منظور کاهش قابلیت هدایت الکتریکی رودخانه کارون از سه گزینه مدیریتی (حذف، کاهش و ترکیبی) استفاده کردند. نتایج شبیه‌سازی گزینه‌های ترکیبی نشان داد که، گزینه کاهش ۵۲ درصد شوری از مرز بالادست همراه کاهش ۳۰ درصد از منابع نقطه‌ای در دو فصل تر و خشک بهترین عملکرد را نسبت به گزینه‌های دیگر در کاهش قابلیت هدایت الکتریکی رودخانه دارد (Fakouri et al., 2018). در مطالعه‌ای از روش‌های آماری رج‌بندی مستقیم برای ارزیابی ارتباط بین الگوی سیمای سرزمین و آلودگی‌های غیر نقطه‌ای با اهداف شناسایی روش‌های بهبود کیفیت آب حوضه آبخیز

آلودگی‌های غیرنقطه‌ای کشاورزی ۳ (ANSP) تشکیل داده و بزرگ‌ترین عامل تهدید کیفیت آب‌های سطحی شناخته شده است (Arhonditsis et al., 2000; Ongley et al., 2010). امروزه برای کنترل آثار نامطلوب شیوه‌های مدیریت کشاورزی بر کیفیت آب‌های سطحی، شناسایی عوامل تأثیرگذار بر آلودگی غیرنقطه‌ای کشاورزی مهم و ضروری است (Liu et al., 2013). مطالعات نشان می‌دهد که میزان آلودگی غیرنقطه‌ای کشاورزی ارتباط نزدیکی با تغییر کاربری اراضی تحت کشت در حوضه‌های آبریز دارد (Zhang et al., 2011; Ding, 2010). همچنین استفاده غیرمنطقی از زمین و مدیریت نادرست کشاورزی منجر به فرسایش خاک، تلفات بیش از حد نیتروژن (N) و فسفر (P) با ایجاد رواناب سطحی و تشکیل آلودگی غیرنقطه‌ای کشاورزی در یک حوزه آبریز می‌شود (Hao et al., 2004). علاوه بر این استفاده بی‌رویه از کود شیمیایی نیز اثر فراوانی روی خروجی‌های ۴ TN و ۵ TP دارد (Cloern, 2001). بنابراین مدیریت منابع آلودگی غیر نقطه‌ای کشاورزی و جلوگیری از انتقال آلودگی غیرنقطه‌ای، یکی از راه‌های مهم برای کاهش آلودگی آب‌های سطحی به‌ویژه رودخانه‌ها است (Carpenter et al., 1998; Chen et al., 2014). از طرفی افزایش کیفیت و کاهش آلودگی آب رودخانه‌ها نیازمند به کارگیری روش‌های مدیریتی برای کنترل منابع آلاینده است (Somlyody et al., 1998; Tri et al., 2013). به دلیل هزینه‌بر بودن بررسی اثربخشی روش‌های مدیریتی در بهبود کیفیت آب در حوضه، مدیران حوضه برای شبیه‌سازی گزینه‌های مختلف مدیریتی و ارزیابی اثربخشی آن‌ها متکی به مدل‌سازی هستند. لذا مدل‌سازی جامع سیستم آب‌های سطحی، رویکرد مناسبی برای شناسایی و تعیین مقدار کاهش مواد مغذی در اثر اعمال گزینه‌های مدیریتی است و می‌تواند ابزار مفیدی برای اولویت‌بندی طرح‌ها به منظور بهبود شرایط کیفی و رسیدن به استانداردهای کیفیت آب در پیکره آبی باشد. بنابراین هر راه‌کار مدیریتی قبل از اجرا بایستی در قالب

شناسایی فاکتورهای مؤثر بر آلودگی غیر نقطه‌ای کشاورزی و ارائه راهکارهای مدیریتی و توسعه گزینه‌ها اشاره می‌شود.

۱.۲. محدوده مطالعاتی

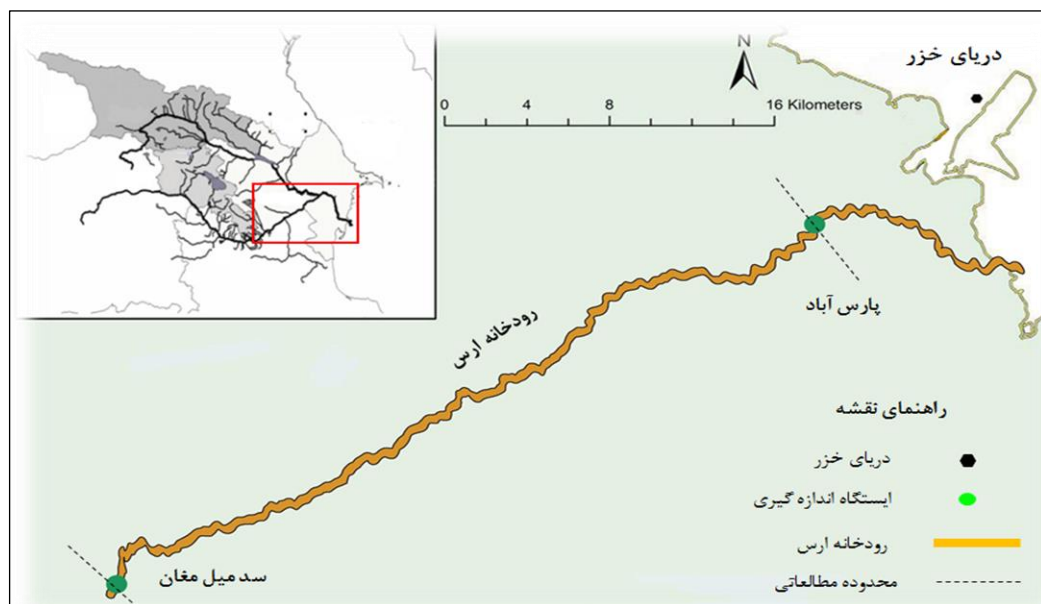
رودخانه ارس، بزرگ‌ترین رودخانه شمالی ایران به‌عنوان مطالعه موردی در این پژوهش انتخاب شد. این رود که در نزدیکی کوه‌های مین گون داغ ۹ کیلومتر مربع مساحتی در حدود ۲۲۰۱۰۰ کیلومتر مربع است دارای طول تقریبی ۱۰۷۲ کیلومتر، و از جنوب کشور ترکیه سرچشمه می‌گیرد که در ادامه تقریباً ۴۷۰ کیلومتر از طول رودخانه با گذر از مرز سه کشور ایران، ارمنستان و آذربایجان در نهایت به دریای خزر می‌ریزد (Karbassi et al., 2014; Nasehi et al., 2013). ۳۹/۳ درصد از مساحت حوضه آبریز آن در خاک ایران قرار گرفته (Karbassi et al., 2014) که تقریباً ۱۶ درصد از آب رودخانه را تأمین می‌کند. حداکثر جریان در منطقه مورد مطالعه ۱۱۰۰ مترمکعب در ثانیه در محل سد ارس و ۲۶۰۰ مترمکعب بر ثانیه در محل سد مغان است. با این حال، مقادیر ذکر شده ممکن است در فصل‌های خشک به ترتیب به ۳۲ و ۱۸۰ مترمکعب در ثانیه برسد (Nasehi et al., 2013). این رودخانه آب شرب ده‌ها شهر و روستا، آب آبیاری هزاران هکتار زمین‌های کشاورزی، پروژه‌های آماده سازی برای پرورش ماهی و واحدهای صنعتی متعدد را تأمین می‌کند. بر این اساس، کیفیت آب رودخانه در معرض تهدید بالقوه ناشی از آلودگی اراضی کشاورزی، صنعتی و مسکونی قرار گرفته است (Nasrabadi et al., 2009). در سال‌های اخیر با افزایش اراضی کشاورزی مجاور و نرخ جریان کم مطرح شده، بارگذاری منابع آلاینده غیر نقطه‌ای کشاورزی به‌عنوان یکی از عوامل اصلی آلودگی رودخانه ارس شناخته شده است (آمار و اطلاعات دفتر مطالعات آب منطقه‌ای استان اردبیل). که این امر بررسی کیفیت آن را ضروری می‌سازد.

در زمان حاضر استفاده کردند. نتایج تحقیق ارتباط بین کاربری اراضی و سیمای سرزمین با آلودگی‌های غیر نقطه‌ای را نشان داد. در این تحقیق آرایش کاربری اراضی فاکتور مهمی در آلودگی‌های غیر نقطه‌ای شناخته شد (Hao et al., 2012). در مطالعه‌ای که بر کیفیت آب رودخانه کاپینگ ۸ در کشور تایوان با هدف بررسی منابع آلودگی غیر نقطه‌ای انجام دادند، به این نتیجه رسیدند که رابطه مستقیمی بین تغییرات کاربری اراضی و کیفیت آب پایین دست وجود دارد و الگوی کاربری اراضی مثل باغ‌ها و زمین‌های زراعی از علل عمده آلودگی غیر نقطه‌ای هستند و باید به‌طور مؤثر کنترل شوند (Lai et al., 2011).

با توجه به مرور مطالعات گذشته در زمینه شبیه‌سازی و مدیریت بارگذاری منابع آلاینده در رودخانه‌های مختلف نشان می‌دهد که راه کارهای مدیریتی مختلفی بسته به شرایط هر رودخانه برای بهبود کیفیت آب رودخانه‌ها قابل ارائه است. هدف اصلی تحقیق حاضر، شبیه‌سازی و ارزیابی فاکتورهای مؤثر بر آلودگی غیر نقطه‌ای کشاورزی و تأثیر روش‌های مدیریتی همچون مدیریت کاربری اراضی و مدیریت مصرف کود شیمیایی تحت گزینه‌های مختلف، روی کاهش بار آلودگی غیر نقطه‌ای و بهبود کیفیت آب بر این رودخانه در بازه ۶۰ کیلومتری با استفاده از مدل عددی MIKE11 و ارزیابی تأثیر آن‌ها در کاهش بار مواد مغذی است. در این تحقیق نویسندگان سعی دارند برای دستیابی به نتایج دقیق، با استفاده از داده‌ها و شرایط واقعی به بررسی و ارزیابی اثر هر یک از گزینه‌های مدیریتی بعد از شبیه‌سازی در مدل هیدرودینامیکی، به‌صورت تغییرات زمانی و مکانی و نرخ تغییرات آلودگی رودخانه نسبت به وضع موجود پردازند.

۲. مبانی و روش‌ها

در این بخش از تحقیق ضمن معرفی محدوده مطالعاتی و منابع آلاینده، به تفصیل راه‌اندازی، واسنجی و صحت‌سنجی مدل پرداخته شده است. همچنین در انتها به



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی رودخانه ارس و محدوده مطالعاتی

منابع داده‌ها و روند پردازش آن آورده شده است. شبکه آبیاری و زهکشی مغان با در بر گرفتن ۹۰۰۰۰ هکتار مساحت ناخالص از اراضی دشت مغان در شمال استان اردبیل، به منظور آبیاری ۷۰۰۰۰ هکتار اراضی خالص کشاورزی احداث شده است. کانال اصلی این شبکه، خاکی و دارای ظرفیت ۸۰ مترمکعب بر ثانیه است. شبکه گسترده زهکش‌های فرعی در این شبکه نهایتاً به ۸ شاخه زهکش اصلی منتهی می‌شود که در نهایت به رود ارس تخلیه می‌شوند (جدول ۲). نتایج آماری روزانه نشان می‌دهد، تقریباً در تمام طول سال در این زهکش‌ها جریان آب وجود دارد و میزان آن فقط در زمان‌های مختلف دارای نوسان بوده و متغیر است. جدول ۲ مشخصات زهکش‌های اصلی در محدوده مطالعاتی را نشان می‌دهد.

۲.۲. داده‌ها و منابع آلاینده

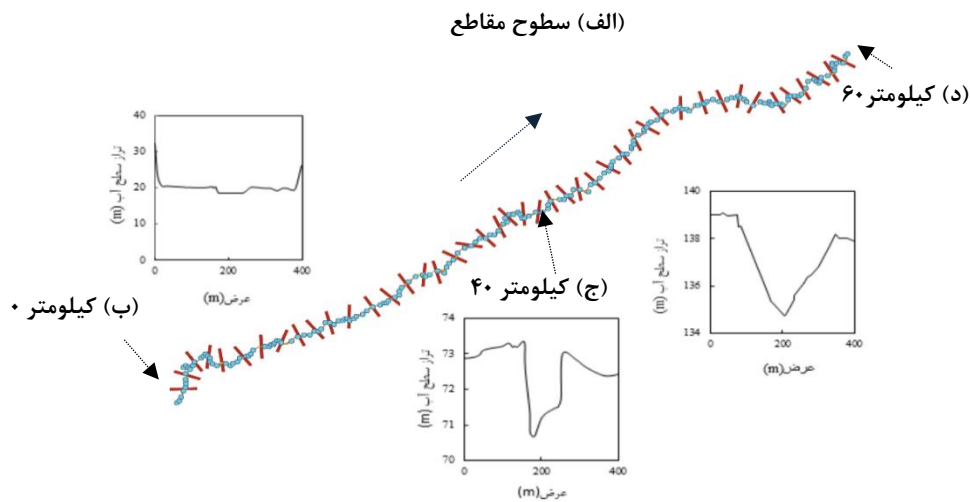
سازمان آب منطقه‌ای و اداره جهاد کشاورزی استان اردبیل، از متولیان اصلی پایش و نظارت بر کمیت و کیفیت آب رودخانه ارس است. سازمان آب منطقه‌ای اردبیل در دهه‌های گذشته به طور مستمر در ایستگاه‌های هیدرومتری به نمونه‌برداری کمیت و کیفیت آب رودخانه پرداخته است. داده‌های اصلی برای شبیه‌سازی هیدرودینامیک و کیفیت رودخانه ارس عبارت‌اند از نقشه‌های توپوگرافی، شبکه نامنظم مثلثی^۱ (TIN)، نقشه‌های کاربری اراضی، داده‌های هیدرومتری و کیفی منطقه مطالعاتی (جدول ۱). اطلاعات هیدرومتری، کیفی و داده‌های دبی پساب و آلاینده‌های خروجی منابع نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای دو ایستگاه میل مغان و پارس‌آباد از سازمان آب منطقه‌ای و نقشه کاربری اراضی و کاربرد کود مزارع کشاورزی نیز از اداره جهاد کشاورزی استان اردبیل دریافت شد. در جدول ۱،

جدول ۱. منابع داده‌ها و روند پردازش

منابع داده‌ها	داده	پردازش
نقشه ایران با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰	داده‌های برداری از منطقه مطالعاتی	رقومی‌سازی
داده‌های شبکه نامنظم مثلثی	داده‌های برداری از رودخانه و شبکه جریان	تجزیه و تحلیل مدل هیدرودینامیکی
داده‌های هیدرولوژیکی رودخانه ارس (۱۳۸۶-۱۳۷۱)	داده‌های روزانه سطح آب	جمع‌آوری شده از ایستگاه هیدرولوژیکی اصلاندوز و پارس‌آباد
داده‌های کیفیت آب رودخانه ارس (۱۳۷۱-۱۳۸۶)	داده‌های ماهانه کیفیت آب (NO ₃ -N, PO ₄ -P)	جمع‌آوری شده از شرکت آب منطقه‌ای اردبیل
داده‌های مدیریت اراضی (۱۳۷۱-۱۳۸۶)	دوره‌رشد محصول و شرایط کوددهی	جمع‌آوری شده از شرکت جهاد کشاورزی اردبیل

جدول ۲. مشخصات میانگین سالانه زه آب‌های ورودی به رودخانه در محدوده مطالعاتی

Total	DR ₈	DR ₇	DR ₆	DR ₅	DR ₄	DR ₃	DR ₂	DR ₁	منابع آلاینده (زهکش)
۶۰۰۰۰	۳/۵	۵,۵	۱۵,۵	۲۱	۳۲,۵	۴۲,۵	۵۲,۵	۵۸,۲	کیلومتر (km)
۸۶۳۳۶	۹۵۴۰	۲۰۱۹۶	۹۹۷۹	۵۴۰۲	۵۴۵۲	۳۳۶۲	۱۳۰۸	۱۰۳۵	مساحت (ha)
۲/۷۵	۰/۱۱	۶/۱	۰/۷۸	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۴	۰,۰۳	دبی (m ³ s ⁻¹)
۸۶/۲۸	۳/۶	۵۰/۳۱	۲۴/۴۵	۲/۱۹	۱/۹۴	۱/۷۴	۱/۲۴	۰/۸	حجم (MCM)



شکل ۲. الف) کانال اصلی رودخانه در محدوده مطالعاتی، (ب) مقطع عرضی در فاصله ۰ کیلومتر، (ج) مقطع عرضی در فاصله ۴۰ کیلومتر، (د) مقطع عرضی در فاصله ۶۰ کیلومتر

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha \frac{Q^2}{A})}{\partial x} + g A \frac{\partial h}{\partial x} + g A I_f = \frac{f}{\rho_w} \quad (2)$$

که Q جریان رودخانه، A مساحت سطح مقطع، q جریان جانبی، h نشان‌دهنده سطح آب، I_f بیان‌کننده ترم مقاومت، f نیروی ممتوم، ρ_w چگالی آب، g شتاب ثقل و α ضریب تصحیح ممتوم است (DHI, 2009). اساس ماژول AD، معادله یک‌بعدی بقاء جرم برای مادهٔ محلول یا معلق است. معادله به صورت (معادله ۳) تعریف شده است؛

$$\frac{\partial AC}{\partial t} + \frac{\partial QC}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(AD \frac{\partial C}{\partial x} \right) = -AKC + C_2q \quad (3)$$

که C غلظت ماده، D ضریب پراکنندگی طولی، K ضریب زوال خطی، C_2 نشان‌دهنده غلظت ماده در جریان جانبی است.

کانال اصلی رودخانه در محدوده مطالعاتی از سد مغان (کیلومتر صفر) تا ایستگاه پارس‌آباد (به طول ۶۰ کیلومتر)

۳.۲. مدل عددی

مدل‌های کیفی زیادی برای شبیه‌سازی انتقال آلودگی در رودخانه‌ها توسعه یافته است. مدل MIKE11، ابزار یک‌بعدی و با هیدرودینامیک قوی برای مدیریت و ارزیابی عملکرد سامانه‌های رودخانه‌ای، مصب‌ها، کانال‌های آبیاری و... که توسط مؤسسه هیدرولیک دانمارک^{۱۱} (DHI) توسعه یافته است (DHI, 2009). در این تحقیق برای ارزیابی فاکتورهای مؤثر بر آلودگی غیرنقطه‌ای کشاورزی و همچنین شبیه‌سازی گزینه‌های مختلف مدیریتی کاهش آلودگی رودخانه در طول محدوده مطالعه از ماژول هیدرودینامیک (HD) به همراه ماژول انتقال-انتشار (AD) استفاده شده است. ماژول HD بر اساس معادله پیوستگی (معادله ۱) و ممتوم (معادله ۲) به صورت موج دینامیکی است.

شاخص‌های کیفیت آب برای واسنجی انتخاب شدند. به‌منظور واسنجی از داده‌های خرداد سال ۱۳۸۶ تا اردیبهشت ۱۳۸۷، در ایستگاه پارس‌آباد استفاده شد. در این تحقیق، برای مقاومت بستر از ضریب زبری مایننگ n^{13} استفاده شد. به‌منظور بررسی کیفیت آب و شبیه‌سازی کیفی و برآورد بار آلودگی نیترات و فسفات رودخانه، پارامترهای کیفی به‌طور ماهانه در مقطع رودخانه و یک نهر ورودی زهکش به رودخانه (شکل ۳) با استفاده از رابطه (۵) محاسبه شدند. با توجه به نقشه‌های کاربری اراضی و تصاویر ماهواره‌ای مساحت اراضی تحت تخلیه هر یک از کانال‌های زهکش محاسبه شد. در ادامه متوسط کود مصرفی سالیانه در هر هکتار اراضی با توجه به کشت غالب منطقه از سالنامه آماری جهاد کشاورزی استخراج شد. پس از انجام محاسبات بارگذاری کود مصرفی سالانه در هر یک از موقعیت نهرهای زهکش و با استفاده از دبی زهکش، غلظت هر یک از پارامترهای کیفی با استفاده از رابطه (۵) محاسبه شد.

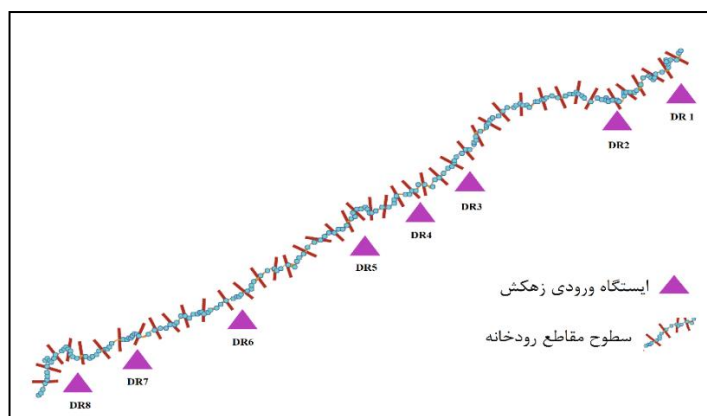
بر اساس فرایندهای حاکم بر نیترات و فسفات و نتایج آنالیز حساسیت در رودخانه مورد بررسی، پارامتر ضرایب تبدیل کود بارگذاری شده به رواناب ورودی زهکش به عنوان ضریب واسنجی با استفاده از روش بیلان جرمی مواد محلول در رودخانه تخمین زده شد.

در شکل ۲ (الف) توسط خط‌چین نشان داده شده است. در طول محدوده مطالعه، ۱۴۴ سطح مقطع با فواصل تقریبی ۵۰۰ متر برای معرفی بخش عرضی رودخانه به مدل معرفی شد. برای نمونه برخی از مقاطع در شکل (ب تا د) نمایش داده شده است.

برای شرایط مرزی در بالادست رودخانه، دبی متوسط روزانه و غلظت متوسط ماهانه نیترات ($\text{NO}_3\text{-N}$) و فسفات ($\text{PO}_4\text{-P}$) به صورت شرایط مرزی باز در کیلومتر صفر استفاده شد و برای شرایط مرزی در پایین‌دست، متوسط روزانه تراز سطح آب به صورت شرایط باز و غلظت آلاینده‌ها به صورت گرادیان صفر^{۱۲} در کیلومتر ۶۰ وارد مدل شد. همچنین زه آب‌های ورودی در مسیر به صورت منابع نقطه‌ای و متوسط ماهانه معرفی شدند.

۴.۲. واسنجی مدل

هدف از واسنجی مدل، حداقل کردن خطای خروجی مدل است (Rafiee et al., 2014). در ماژول HD مقاومت بستر، پارامتری حیاتی است که تا حد زیادی رفتار جریان رودخانه را تعیین می‌کند (Lemckert et al., 2011). برای واسنجی هیدرودینامیک از داده‌های تراز سطح آب و همچنین بر اساس اهداف تحقیق و داده‌های نظارت بر کیفیت آب موجود، با توجه به در دسترس بودن داده‌های کیفیت آب، در این مطالعه نیترات و فسفات به‌عنوان



شکل ۳. بازه مورد مطالعه و ایستگاه‌های ورودی زهکش به رودخانه ارس

ضریب تبیین^{۱۵} (R^2) ۰/۹۳ تطبیق داشت. ریشه میانگین مربعات خطا^{۱۶} (RMSE) و ریشه میانگین مربعات خطا نرمال شده^{۱۷} (NRMSE) بین تراز سطح آب شبیه‌سازی شده و تراز سطح آب اندازه‌گیری شده به ترتیب برابر ۰/۱۴ متر و ۷/۵ درصد به دست آمد.

نتایج واسنجی ضریب پراکندگی، بر اساس مقایسه غلظت نیترات و فسفات شبیه‌سازی با مقدار اندازه‌گیری در ایستگاه پارس‌آباد نشان داد، بر اساس رابطه فیشر ($D_x =$ m^2/s) در حالت $a=66.2$ و $b=0.52$ با RMSE برابر با 0.08 mg/l و 0.08 mg/l به ترتیب برای نیترات و فسفات، شبیه‌سازی بهتری را انجام می‌دهد. همچنین مقدار R^2 برای تطبیق متوسط نیترات و فسفات شبیه‌سازی شده با اندازه‌گیری شده در بهترین حالت به ترتیب، ۰/۹۳ و ۰/۸۷ به دست آمد و نشان دهنده قابل اعتماد بودن نتایج مدل در برآورد بار نیتروژن و فسفر ماهانه در رودخانه است (جدول ۳). به طور کلی متوسط رواناب زمین‌های کشاورزی منطقه، ۱۰/۲ درصد و ۳/۷ درصد از کود نیترات و فسفات ورودی به زمین محاسبه شد که این مقدار بار آلودگی ناشی از زهاب اراضی، در سال معادل ۵۱ کیلوگرم بر هکتار نیترات و ۴/۴ کیلوگرم بر هکتار فسفات به داخل رودخانه منتقل می‌کند.

با توجه به شکل ۵ در طول فصل تابستان و ماه‌های گرم مدل به خوبی توانست بار نیترات و فسفات در رودخانه را شبیه‌سازی کند.

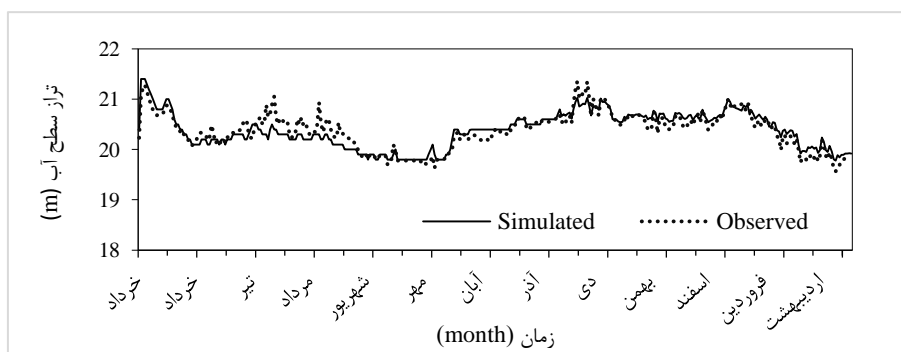
با توجه به اینکه در ماژول AD، ضریب پراکندگی تا حد زیادی به گرادیان غلظت ماده آلاینده مرتبط می‌شود، این ضریب از رابطه تجربی فیشر^{۱۴} (رابطه ۶) محاسبه شد (Fischer et al., 1979). سپس در مدل MIKE11 به صورت رابطه (۷) برای a و b مختلف واسنجی شد.

$$W_s = q_s c_s \quad (5)$$

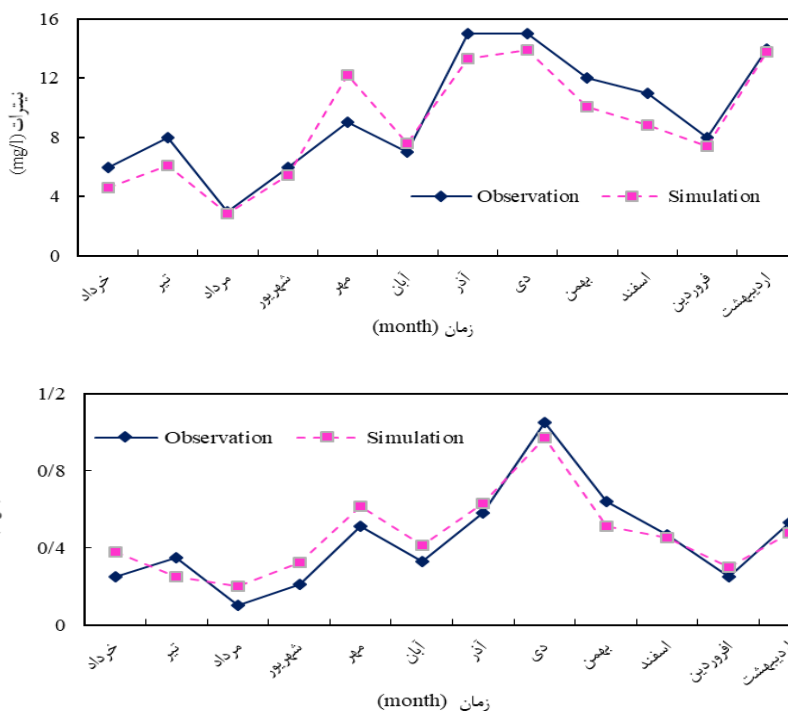
$$D_x = 0.011 \frac{U^2 B^2}{HU^*} \quad (6)$$

$$D = aU^b \quad (7)$$

در این روابط، q_s دبی منابع آلاینده نقطه‌ای، w_s بارگذاری منابع آلاینده نقطه‌ای، C_s غلظت منابع آلاینده نقطه‌ای، D_x ضریب پراکندگی (m^2/s)، H عمق متوسط (m)، B عرض کف (m)، U سرعت متوسط (m/s)، U^* سرعت برشی (m/s) و S شیب متوسط هستند. شایان ذکر است برای ارزیابی دقت هر یک مراحل واسنجی و صحت سنجی از تحلیل‌های آماری و گرافیکی استفاده شده است. با توجه به وضعیت بستر و جداره رودخانه بر اساس بازدیدهای صحرایی از منطقه و همچنین با مقایسه عکس‌های رودخانه با عکس‌های مرجع زبری مانینگ بین ۰/۲۸ تا ۰/۳۵ برای ارزیابی عملکرد مدول HD انتخاب شد. نتایج واسنجی نشان داد که مدل همراه ضریب زبری مانینگ ۰/۳۵ در مقایسه با دیگر ضرایب نتایج بهتری ارائه می‌دهد. تراز سطح آب شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در کیلومتر ۶۰ (ایستگاه پارس‌آباد) با ضریب زبری ۰/۳۵ مقایسه شد (به طور کلی تراز سطح آب شبیه‌سازی شده با تراز سطح آب اندازه‌گیری شده در ایستگاه پارس‌آباد با



شکل ۴. مقایسه تراز سطح آب شبیه‌سازی شده با اندازه‌گیری شده در ایستگاه پارس‌آباد



شکل ۵. مقایسه شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده نیترات و فسفات حوضه رودخانه ارس

جدول ۳. نتایج واسنجی ضریب پراکنندگی و درصد بارگذاری کود نیترات و فسفات

معادله	D = aU ^b	b و a	NO ₃ -N				PO ₄ -P			
			تغییرات درصد بارگذاری (%)	R ²	RMSE (mg/l)	NRMSE (%)	تغییرات درصد بارگذاری (%)	R ²	RMSE (mg/l)	NRMSE (%)
$D_x = 0$	19/58	a=66.2 b=0.52	# ۷/۸	۰/۷۸	۱/۹۴	۱۵/۹۸	۲/۴۵#	۰/۷۱	۰/۱۷	۱۷/۸
$\frac{U^2 B^2}{HU^*}$			# ۱۰/۲	۰/۹۳	۰/۸۱	۶/۲۵	۳/۳ #	۰/۷۳	۰/۱۸	۱۸
$W_s = q_s c_s$			۱۱/۷#	۰/۸۱	۱/۶۶	۱۳/۵۱	# ۳/۷	۰/۸۷	۰/۱۰	۸/۹
			۱۵/۷#	۰/۶۹	۲/۸۶	۱۷/۲۲	۴/۱ #	۰/۶۹	۰/۱۹	۱۸/۷۶

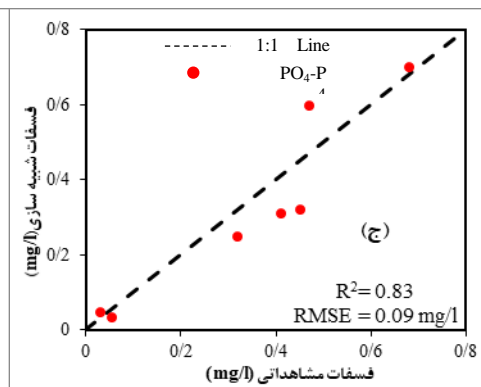
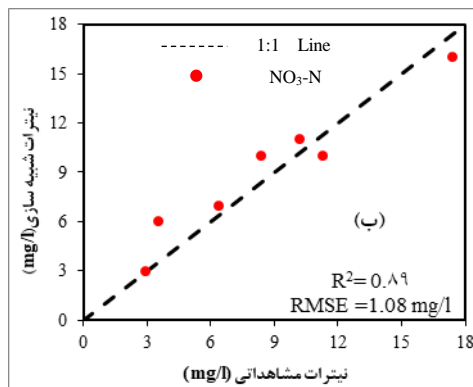
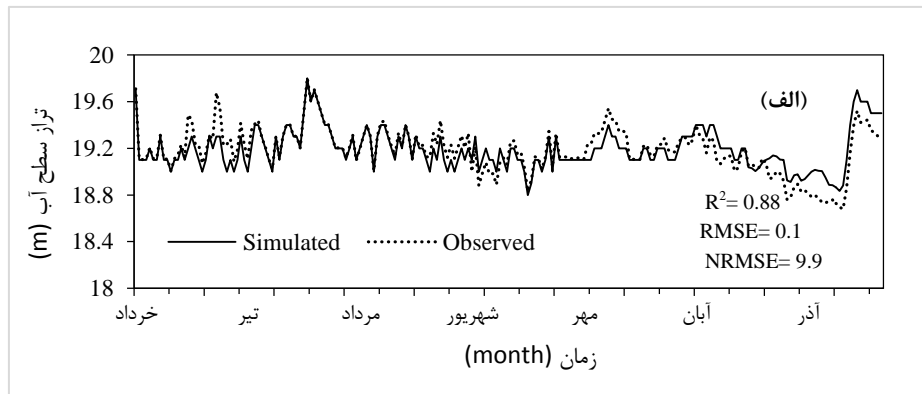
پارس‌آباد دقت مناسبی دارد و نشان دهنده قابل اعتماد بودن نتایج مدل در برآورد بار فسفر ماهانه در رودخانه است. بیشترین بار فسفر خروجی در حوضه عمدتاً مربوط به دوره پرآبی رودخانه (آذر تا بهمن) است و از ماه اسفند تا آبان بار فسفر خروجی کاهش می‌یابد. بنابراین در فصل مرطوب به‌ویژه دی مقدار بار فسفات افزایش می‌یابد و در فصل خشک به دلیل کاهش جریان رودخانه مقدار آن کاهش می‌یابد.

کاهش بار نیترات در دوره‌های کم آبی ناشی از کاهش جریان سطحی در رودخانه ارس و کاهش ورود بار مواد مغذی، افزایش دما، افزایش زوال، مصرف مواد مغذی و افزایش مصارف آب در پایین دست است. در زمستان بار نیترات کمتر برآورد شده است که دلیل آن می‌تواند برآورد کمتر برخی نقاط پیک جریان باشد که به کمتر برآورده شدن نقاط پیک نیترات نیز می‌انجامد. نتایج ضریب R² و RMSE برای بار فسفر در ایستگاه

آب رودخانه را در محدوده مطالعاتی تعیین می‌کند. نتایج صحت سنجی نشان می‌دهد که ضرایب منتخب برای شبیه‌سازی رودخانه ارس قابل اعتماد است. با توجه به شکل ۶ (الف)، در هنگام افزایش تراز سطح آب مقادیر شبیه‌سازی برآورد کمتری نشان می‌دهد؛ این برآورد کم ممکن است به علت عدم در نظر گرفتن آثار باد در شبیه‌سازی باشد (Hughes et al., 1998).

۵.۲. صحت سنجی مدل

به منظور حداقل کردن خطای خروجی مدل از صحت سنجی پارامترهای تأثیرگذار مدل نظیر، مقاومت بستر، ضرایب رواناب صحت‌سنجی شدند. بر اساس نتایج صحت سنجی، عملکرد مدل با ضرایب زیری مانینگ n و ضرایب رواناب، ترم‌های سطح آب و نیترات و فسفات از خرداد تا آذر سال ۱۳۸۷ مورد تأیید است (شکل ۶). بنابراین مدل با دقت بالایی ویژگی‌های جریان و کیفیت



شکل ۶. مقایسه شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده (الف) تراز سطح آب، (ب) نیترات، (ج) فسفات حوضه رودخانه ارس

معقول، نخست لازم است عوامل تأثیرگذار بر آلودگی غیرنقطه‌ای کشاورزی را شناسایی و اثربخشی آن را ارزیابی کرد. در این مطالعه با توجه به داده‌های موجود، کاربری اراضی و کود به‌عنوان فاکتورهای مؤثر بر آلودگی غیرنقطه‌ای کشاورزی ارزیابی شد. پس از شناسایی گزینه‌های مناسب مدیریتی در منطقه، تأثیر هر کدام از

۶.۲. ارائه راه کارهای مدیریتی

بر اساس پژوهش‌های قبلی، گزینه‌های مدیریتی، روش مؤثری برای کنترل آلودگی غیرنقطه‌ای کشاورزی بوده‌اند که به‌طور گسترده اقدامات میدانی به منظور کاهش تأثیر منفی یک فعالیت در محیط استفاده می‌شود (Liu et al., 2013). برای به دست آوردن گزینه مدیریتی

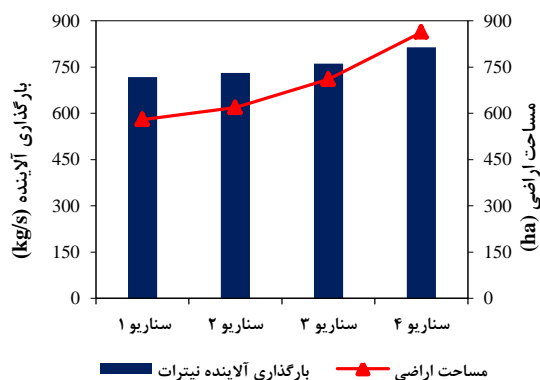
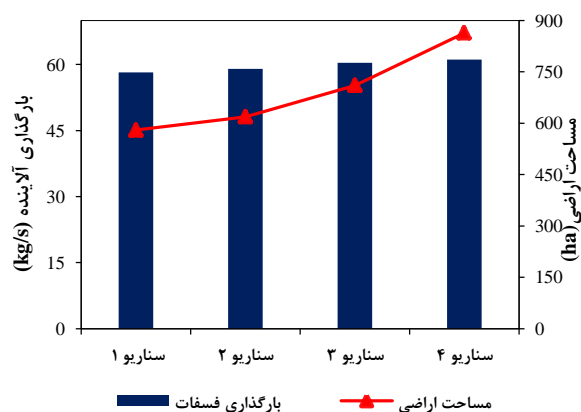
الف: تأثیر کاربری اراضی: به منظور ارزیابی آثار اراضی تحت کشت بر رفتار بار مواد مغذی در خروجی رودخانه، گزینه تغییرات کاربری اراضی بر اساس داده‌های مشاهداتی مربوط به سال‌های مختلف تعریف شد (فرض می‌شود میزان کود مصرفی در زمین و سایر داده‌ها ثابت است). در این راستا با توجه به مساحت اراضی تحت کشت از سال‌های ۱۳۷۲ تا ۱۳۸۶ در قالب چهار گزینه، شبیه‌سازی انجام شد. میزان بار آلاینده محاسبه شده از کاربری اراضی به عنوان داده‌های ورودی مربوط به هر گزینه استفاده شد. با توجه به جدول ۵ از سال ۱۳۷۲ تا ۱۳۸۶ اراضی سطح زیر کشت در منطقه افزایش یافته است (شکل ۷).

هنگامی که اراضی سطح زیر کشت از گزینه ۱ به گزینه ۴ تغییر می‌کند، سطح اراضی کشت شده به میزان ۴۸/۸۶ درصد افزایش یافته و به افزایش بار آلودگی غیرنقطه‌ای کشاورزی، ۱۳/۵۳ درصد و ۴/۹۳ درصد به ترتیب در نیترا و فسفات می‌انجامد. در کل هنگامی که سطح برداشت شده در منطقه افزایش می‌یابد، میزان رواناب ورودی به رودخانه و در نتیجه بارهای آلودگی غیرنقطه‌ای نیز افزایش می‌یابند. بنابراین نتایج این گزینه نشان می‌دهد که بارهای آلودگی غیرنقطه‌ای کشاورزی عمدتاً از طریق فعالیت کشاورزی در حاشیه رودخانه ارس تولید می‌شوند.

راهکارها در قالب گزینه‌های مدیریتی با سیاست کاهش احتمالی در آلودگی رودخانه، شبیه‌سازی شده و اثر آن بر تغییرات آلودگی رودخانه ارزیابی می‌شود. در ادامه اقدامات مدیریتی از جمله مدیریت اراضی کشاورزی و مدیریت مصرف کودهای شیمیایی به منظور کاهش بار مواد مغذی رودخانه ارس انتخاب شد. شایان ذکر است بازه مطالعاتی در پایین دست سد ارس واقع شده و جریان همواره در پایین دست این سد کنترل شده است (به دلیل تأمین حقابه کشور آذربایجان). همچنین با توجه به اینکه مساحت اراضی تحت کشت آب‌خور پایین دست سد ارس در طول یک دهه اخیر کمتر از ۱۰ درصد افزایش پیدا کرده است، به منظور شبیه‌سازی گزینه‌های مدیریتی از داده‌های موجود در سال ۱۳۷۲ تا ۱۳۸۶ استفاده شده است.

۷.۲. تجزیه و تحلیل عوامل تأثیرگذار بر منابع آلودگی غیرنقطه‌ای کشاورزی

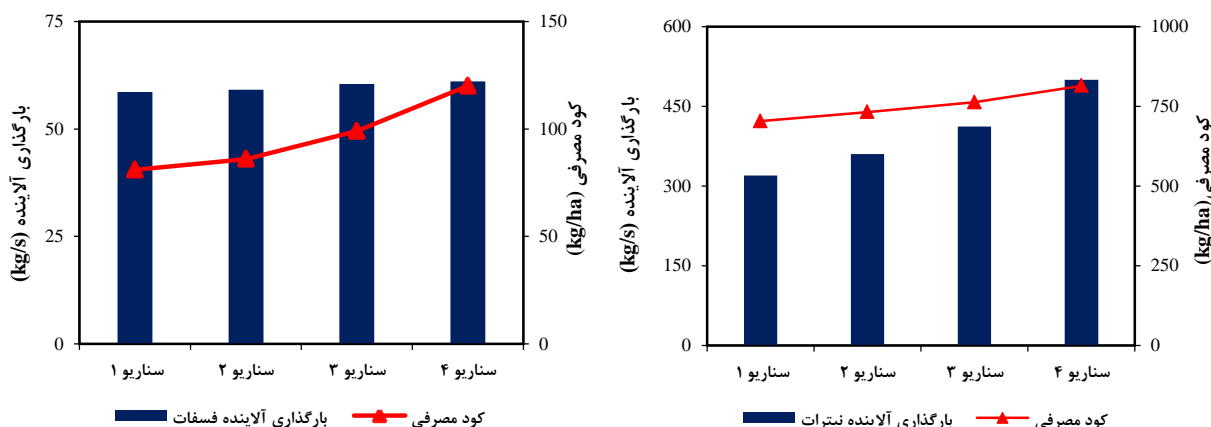
در این بخش از تحقیق به منظور تعیین عوامل تأثیرگذار بر منابع آلودگی غیرنقطه‌ای کشاورزی، از داده‌های مشاهداتی کاربری اراضی و کاربرد کود استفاده می‌شود. زمین‌های کشاورزی و کود مصرفی به عنوان عوامل تأثیرگذار بر منابع آلودگی غیرنقطه‌ای کشاورزی در قالب چهار گزینه در سال ۱۳۷۲ (گزینه ۱)، ۱۳۷۶ (گزینه ۲)، ۱۳۸۲ (گزینه ۳) و ۱۳۸۶ (گزینه ۴) انجام شد.



شکل ۷. رابطه بین بار آلودگی غیرنقطه‌ای کشاورزی و کاربری اراضی در گزینه‌های اجرایی

جدول ۴. نتایج شبیه‌سازی بار آلودگی غیرنقطه‌ای کشاورزی در گزینه تأثیر کاربری اراضی

گزینه کاربری اراضی	نتایج شبیه‌سازی				نرخ تغییرات بارگذاری (%)		
	جریان (km ²)	جریان (m ³ s ⁻¹)	NO ₃ -N (kg s ⁻¹)	PO ₄ -P (kg s ⁻¹)	جریان (m ³ s ⁻¹)	NO ₃ -N	PO ₄ -P
گزینه ۱ (۱۳۷۲)	۵۸۰/۰۰	۹۲/۴۳	۷۱۷/۲۵	۵۸/۲۳	گزینه ۲-۱	۱/۹۳	۱/۲۷
گزینه ۲ (۱۳۷۶)	۶۱۸/۵۹	۹۲/۴۳	۷۳۱/۱۲	۵۸/۹۷	گزینه ۳-۲	۴/۰۴	۲/۳۵
گزینه ۳ (۱۳۸۲)	۷۱۰/۱۱	۹۲/۴۳	۷۶۰/۷	۶۰/۳۵	گزینه ۴-۳	۷/۰۵	۱/۲۳
گزینه ۴ (۱۳۸۶)	۸۳۶/۳۸	۹۲/۴۳	۸۱۴/۳۰	۶۱/۱	گزینه ۴-۱	۱۳/۵۳	۴/۹۳



شکل ۸. رابطه بین بار آلودگی غیرنقطه‌ای کشاورزی و کاربرد کود در گزینه‌های اجرایی

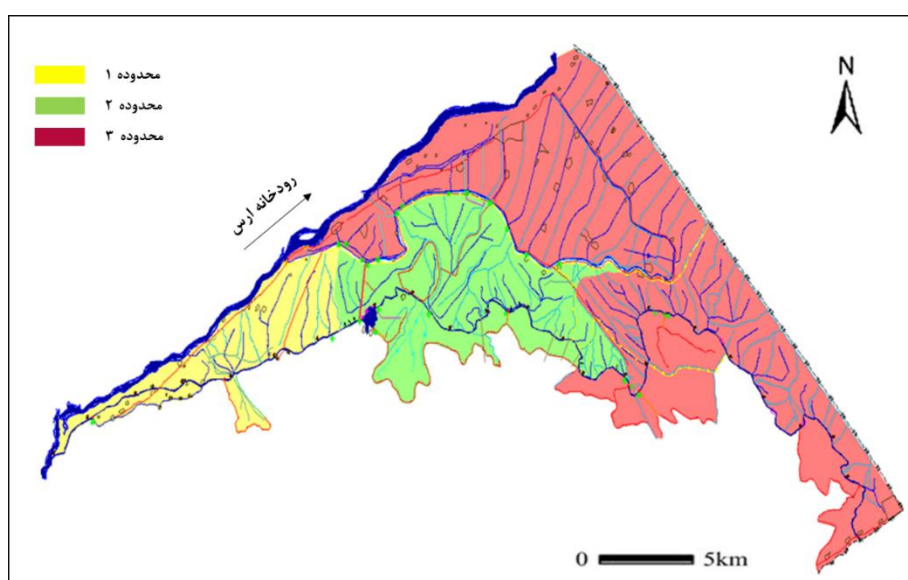
موجود) میزان کود مصرفی نیتروژن و فسفر از ۳۲۰ kg/ha و ۸۱ kg/ha در سال ۱۳۷۲ به ۵۰۰ kg/ha و ۱۲۰ kg/ha در سال ۱۳۸۶ رسیده است (جدول ۵).

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که بارهای نیترات و فسفات در خروجی رودخانه ارس از ۷۳۰/۴ kg/s و ۶۱/۱ kg/s در سال ۱۳۷۲ به ۸۱۴/۳ kg/s و ۶۱/۱ kg/s در سال ۱۳۸۶ افزایش یافته است. همچنین میزان افزایش نیترات و فسفات به ترتیب ۱۵/۷۷ درصد و ۴/۲۶ درصد است (جدول ۵)؛ بنابراین، میزان کاربرد کود شیمیایی یکی دیگر از عوامل تولید آلودگی غیرنقطه‌ای است. بر این اساس، کاهش میزان مصرف مواد مغذی، روشی مؤثر برای کاهش آلودگی غیرنقطه‌ای در منطقه مورد مطالعه خواهد بود.

ب: تأثیر کاربرد کود: برای بررسی تأثیر کاربرد کود شیمیایی روی آلودگی غیرنقطه‌ای کشاورزی، میزان مصرف کود در سال‌های ۱۳۷۲، ۱۳۷۶، ۱۳۸۲ و ۱۳۸۶ به ترتیب به‌عنوان گزینه ۱، گزینه ۲، گزینه ۳ و گزینه ۴ استفاده شد. سایر پارامترهای دیگر مدل (داده‌های استفاده از زمین، داده‌های هیدرومتری) همچنان ثابت باقی می‌ماند و برنامه‌های کاربردی مختلف کود برای ورود به مدل اجرا می‌شوند (کاربرد کود از سال‌های ۱۳۷۲ تا ۱۳۸۶ نشان داده شده در جدول ۵ در سالنامه آماری جهاد کشاورزی اردبیل گزارش شده است). نتایج شبیه‌سازی تحت گزینه‌های مختلف کاربرد کود به تولید آلودگی غیرنقطه‌ای انجامید. با توجه به افزایش میزان کود مصرفی، بارها آلودگی غیرنقطه‌ای کشاورزی در منطقه به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. به‌طوری‌که از سال ۱۳۷۲ تا ۱۳۸۶ (وضع

جدول ۵. نتایج شبیه‌سازی بارآلودگی غیرنقطه‌ای کشاورزی تحت گزینه تأثیر کاربرد کود

کاربرد کود (kg/h)	نتایج شبیه‌سازی			نرخ تغییرات بارگذاری (%)					
	N	P	جریان ($m^3 s^{-1}$)	NO ₃ -N ($kg s^{-1}$)	PO ₄ -P ($kg s^{-1}$)	جریان ($m^3 s^{-1}$)	NO ₃ -N	PO ₄ -P	
گزینه ۱ (۱۳۷۲)	۳۲۰	۸۱	۹۲/۴۳	۷۰۳/۴	۵۸/۶	گزینه ۲-۱	۰/۰۰	۴/۰۷	۰/۹
گزینه ۲ (۱۳۷۶)	۳۶۰	۸۶	۹۲/۴۳	۷۳۲/۰۴	۵۹/۱۵	گزینه ۳-۲	۰/۰۰	۴/۱۶	۲/۲۰
گزینه ۳ (۱۳۸۲)	۴۱۲	۹۹	۹۲/۴۳	۷۶۲/۵۵	۶۰/۴۵	گزینه ۴-۳	۰/۰۰	۶/۷۹	۱/۰۷
گزینه ۴ (۱۳۸۶)	۵۰۰	۱۲۰	۹۲/۴۳	۸۱۴/۳	۶۱/۱	گزینه ۴-۱	۰/۰۰	۱۵/۷۷	۴/۲۶



شکل ۹. تقسیم‌بندی اراضی تحت کشت در مدل MIKE11 در حاشیه رودخانه ارس

(محدوده ۱ اراضی مورد استفاده در گزینه ۱؛ محدوده ۲ اراضی مورد استفاده در گزینه ۲؛ محدوده ۳ اراضی مورد استفاده در گزینه ۳)

کشت و صنعت) و گزینه ۳ زمین‌هایی با تراکم کشت بالا (محدوده ۳، پارس‌آباد). در این گزینه فرض می‌شود که در هر گزینه بارگذاری تنها از محدوده مورد نظر به رودخانه انجام می‌گیرد. این گزینه در شرایط مختلف بارگذاری آلاینده‌های غیرنقطه‌ای از بالادست، میانه و پایین دست انجام می‌شود.

ب: مدیریت کود مصرفی: در این گزینه با تغییر در میزان کود مصرفی در وضع موجود در منطقه تحت مطالعه، مدیریت کود انجام می‌شود. بنابراین کودهای مصرفی در هر هکتار از زمین زراعی به صورت میانگینی از مقدار کل کود مصرفی در نظر گرفته شدند مقدار کود مصرفی در

با توجه به نتایج فوق، کاربری اراضی و کود، تأثیر قابل توجهی بر بار آلودگی غیرنقطه‌ای کشاورزی دارد؛ بنابراین در گام بعدی به اجرای اقدامات مدیریت کاربری اراضی و کود پرداخته می‌شود.

الف: مدیریت کاربری اراضی: با توجه به اینکه رودخانه ارس تأمین‌کننده آب کشاورزی ۳ محدوده (اصلاندوز، کشت و صنعت و پارس‌آباد) است، کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه به ۳ محدوده تقسیم‌بندی شد. این راهکار در قالب ۳ گزینه اجرا می‌شود. گزینه ۱: زمین‌هایی با تراکم کشت پایین (محدوده ۱، اصلاندوز)، گزینه ۲ زمین‌هایی با تراکم کشت متوسط (محدوده ۲،

موجود، شبیه‌سازی شد. نتایج عددی نشان داد که در اثر بارگذاری منابع آلاینده در سرتاسر محدوده مطالعاتی، در مکان بارگذاری منابع آلاینده، پروفیل طولی غلظت آلاینده‌ها (نیتрат و فسفات) به صورت پله‌ای افزایش یافته است (شکل ۱۰). اثر منابع آلاینده نقطه‌ای در هر نقطه از رودخانه، به دلیل تفاوت در مقدار دبی و غلظت پارامترهای بارگذاری، متفاوت است. به طور کلی، مقدار پارامترها از ابتدا تا انتها محدوده مورد مطالعه به طور پیوسته در حال افزایش است. این افزایش ناشی از ورود نیترات و فسفات از مرز بالادست و بارگذاری منابع آلاینده از در محدوده مورد مطالعه است.

در این بخش پس از شبیه‌سازی هریک از گزینه‌های مدیریتی، نتایج در مقایسه با وضع موجود (آلودگی در سال ۱۳۸۶) به صورت درصد کاهش و یا افزایش آلاینده رودخانه ارزیابی می‌شود.

۲.۳. اقدام مدیریتی کاربری اراضی

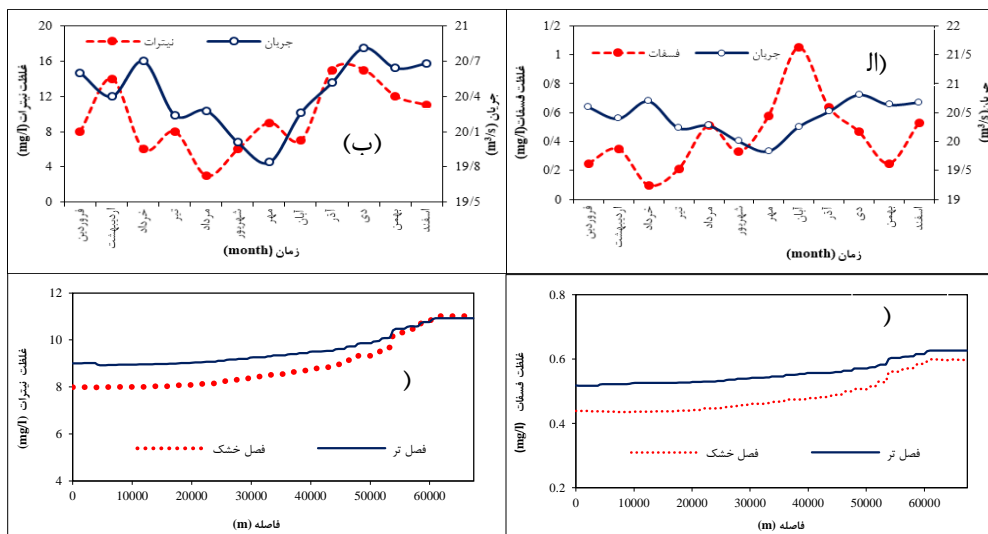
در جدول ۶ درصد تغییرات آلودگی رودخانه در اثر اعمال مدیریت کاربری اراضی نسبت به وضع موجود نشان داده شده است.

قالب چهار گزینه بر اساس بررسی‌های واقعی و داده‌های آماری تولید شده در منطقه مورد مطالعه در سال ۱۳۸۶ انجام شد. که عبارت‌اند از: الف. گزینه ۱ (۰/۵ برابر کود مصرفی)؛ ب. گزینه ۲ (۰/۸ برابر کود مصرفی)؛ ج. گزینه ۳ (۱/۳ برابر کود مصرفی) و د. گزینه ۴ (۱/۵ برابر کود مصرفی). بنا به استناد به مطالعات مشابه (Lam et al., 2010; Behera & Panda, 2006; Pandey et al., 2009) نتیجه‌گیری می‌شود، مدیریت کشت نیز به شدت با آلودگی غیرنقطه‌ای کشاورزی ارتباط دارد؛ اما در سال‌های اخیر شیوه‌های مدیریت کشت محلی تغییرات کمی داشته است، بدین ترتیب اعمال کشت به صورت مستقیم به عنوان گزینه‌های مدیریتی بدون بحث در مورد تأثیر آن در آلودگی غیرنقطه‌ای کشاورزی انتخاب خواهند شد. در ادامه با شناسایی عوامل تأثیرگذار، گزینه‌های هر عامل مشخص شده براساس وضع موجود (سال ۱۳۸۶) برای اقدامات مدیریتی تنظیم می‌شود.

۳. نتایج و بحث

۱.۳. بررسی کیفی وضع موجود رودخانه

در این بخش قبل از بررسی اثر گزینه‌های مدیریتی، جریان و غلظت رودخانه برای سال ۱۳۸۶ به صورت شرایط



شکل ۱۰. بررسی جریان و غلظت (الف) فسفات و (ب) نیترات آب رودخانه در شرایط وضع موجود، پروفیل طولی (ج) فسفات (د) نیترات در طول رودخانه در فصل تر و خشک

جدول ۶. نتایج شبیه‌سازی بار آلودگی غیرنقطه‌ای کشاورزی تحت گزینه‌های مدیریت کاربری اراضی

	تغییرات کاربری اراضی			نتایج شبیه‌سازی		نرخ تغییرات (%)			
	گزینه ۱	گزینه ۲	گزینه ۳	NO ₃ -N (kg s ⁻¹)	PO ₄ -P (kg s ⁻¹)	NO ₃ -N	PO ₄ -P		
مساحت اراضی وضع موجود (km ²)	۸۶۳/۳۸	۸۶۳/۳۸	۸۶۳/۳۸	گزینه ۱	۵۴۰/۷۲	۵۰/۸۳	وضع موجود - گزینه ۱	۳۳/۶	۱۶/۸۰
ارضی هر گزینه مساحت (km ²)	۵۷/۳۷۷	۱۹/۸۳۶	۶۰/۱۶۶	گزینه ۲	۵۹۰/۶۳	۵۳/۶۰	وضع موجود - گزینه ۲	۲۷/۴۷	۱۲/۲۷
مساحت شب اراضی (%)	۰/۵-۱/۴	۰/۴-۱/۵	۰/۳-۰/۵	گزینه ۳	۷۲۷/۵	۵۸/۲۳	وضع موجود - گزینه ۳	۱۰/۶۵	۴/۶۹

الگوی کاربری اراضی مثل باغ‌ها و زمین‌های زراعی از علل عمده آلودگی غیرنقطه‌ای هستند و باید به‌طور مؤثر کنترل شوند (Lai et al., 2011).

۳.۳. اقدام مدیریت کاربرد کود

در رابطه با نتایج شبیه‌سازی مدیریت کود، طبق مطالعات انجام‌شده مشخص شد، کاهش کوددهی تا ۳۰ درصد در شرایطی که مازاد کود در زمین وجود دارد در تولید محصول تأثیرگذار نیست (Xing & Zhu, 2002). برای اجرای اقدامات مدیریت کود ۴ گزینه شبیه‌سازی شد. در جدول ۷ نتایج تغییرات بار مواد مغذی رودخانه در اثر هر یک از گزینه‌های اجرایی آورده شده است. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از آن است که در شرایط مختلف شبیه‌سازی بارهای آلودگی غیرنقطه‌ای، مقادیر مختلف نیترات و فسفات متناسب با مقدار کود شیمیایی مصرف‌شده است. به‌طوری‌که در گزینه‌های ۱ و ۲ بارهای آلودگی غیرنقطه‌ای در مقایسه با شرایط وضع موجود به دلیل کاهش مقدار کود مصرفی کاهش می‌یابد. در حالتی که مقدار کود ۰/۵ برابر وضع موجود می‌رسد (گزینه ۱)، بارهای نیترات و فسفات از آلودگی غیرنقطه‌ای کشاورزی به ۱۸/۰۹ درصد و ۸/۳۵ درصد نسبت به وضع موجود کاهش یافت. با این حال، در گزینه‌های ۳ و ۴، با افزایش بارگذاری، بار آلودگی غیرنقطه‌ای کشاورزی به‌طور قابل توجهی افزایش یافت.

در مقایسه با کاربری اراضی در وضع موجود، بار مواد مغذی و رواناب تحت شرایط کاربری اراضی در گزینه‌های اجرایی متفاوت بود. در گزینه مدیریت کاربری اراضی، هنگامی که کشت زراعی منطقه کاهش می‌یابد بارهای نیترات و فسفات کاهش زیادی در خروجی رودخانه ارس داشته است. به‌طوری‌که در گزینه نخست بارهای نیتروژن و فسفر تحت تغییر کاربری اراضی به ترتیب ۵۴۰/۷۲ kg/s و ۵۰/۸۳ kg/s برآورد شده است. همچنین بارهای نیترات و فسفات در مقایسه با وضع موجود به ترتیب ۳۳/۶ درصد و ۱۶/۸٪ کاهش یافته است، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که کاهش بار آلودگی غیرنقطه‌ای کشاورزی به علت کاهش سطح زیر کشت اراضی زراعی است.

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که ۱. برای زمین‌های زراعی شیب‌دار (< ۰/۵ درصد) بارهای آلودگی غیرنقطه‌ای، در خروجی رودخانه تغییر یافته و روند کاهش داشته است. این کاهش ممکن است به دلایل مختلفی الف. کاهش رواناب خروجی از اراضی کشاورزی به کاهش بار مواد مغذی می‌انجامد. ب. کاهش اراضی تحت کشت که به کاهش مقدار کود مصرفی نیز می‌انجامد، می‌تواند دلیل اصلی کاهش بارهای نیتروژن و فسفر در خروجی رودخانه ارس باشد. ۲. محدوده ۳ در منطقه مطالعاتی بیشترین سهم آلودگی رودخانه ارس را دارد. در نهایت نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که رابطه مستقیمی بین تغییرات کاربری اراضی و کیفیت آب پایین دست رودخانه وجود دارد و

جدول ۷. نتایج شبیه‌سازی بار آلودگی غیرنقطه‌ای کشاورزی تحت گزینه مدیریت کود

	وضع موجود (kgs ⁻¹)	گزینه ۱	گزینه ۲	گزینه ۳	گزینه ۴	نرخ تغییرات (%)		
						NO ₃ -N	PO ₄ -P	
NO ₃ -N	۸۱۴/۳	۶۶۷	۷۵۶	۹۰۳	۹۶۱	وضع موجود - گزینه ۱	۱۸/۰۹	۸/۳۵
PO ₄ -P	۶۱/۱۰	۵۶	۵۹	۶۴	۶۶/۳	وضع موجود - گزینه ۲	۷/۱۵	۳/۴۳
جریان (m ³ s ⁻¹)	۹۲/۴۳	۹۲/۴۳	۹۲/۴۳	۹۲/۴۳	۹۲/۴۳	وضع موجود - گزینه ۳	۱۰/۸۹	۴/۷۴
نرخ تغییرات جریان (%)	-	-	-	-	-	وضع موجود - گزینه ۴	۱۸/۰۲	۸/۵۱

غیرنقطه‌ای روند نزولی داشته و حداکثر بار آلودگی غیرنقطه‌ای با ۳۴ درصد در نیترات کاهش یافت. همچنین با افزایش ۱/۵ برابر کود مصرفی نسبت به وضع موجود، نیترات با بیشترین تغییر به میزان ۱۸/۰۲ درصد افزایش یافته است. بنابراین با مدیریت و کاهش مقادیر کوددهی و جلوگیری از کوددهی بی‌رویه به وسیله کشاورزان، به میزان زیادی می‌توان مانع آلودگی منابع آب‌های سطحی شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد پیش‌بینی و شبیه‌سازی بار مواد مغذی و شناسایی عوامل تأثیرگذار بر آلودگی غیرنقطه‌ای کشاورزی نقش مهمی در ارزیابی بار مواد مغذی و همچنین کیفیت آب در کل رودخانه دارد و این امکان را برای مدیران اجرایی و پژوهشگران فراهم می‌کند تا سناریوهای مختلف مدیریتی را مورد ارزیابی قرار دهند و تصمیمات مقتضی را برای دستیابی به اهداف مدیریت پایدار اتخاذ نمایند.

به‌طور کلی نتایج این مطالعه نشان می‌دهد، تنظیم مقادیر معقول در اراضی تحت کشت و کود مصرفی در محدودیت‌های قانونی و عملی در این مطالعه، به بهبود قابل ملاحظه‌ای از کیفیت آب و تولید کشاورزی در حوضه آبریز رودخانه ارس می‌شود. همچنین یافته‌ها نشان می‌دهد که اجرای یک برنامه مناسب، به‌منظور کشت زراعی و کود مصرفی می‌تواند به‌طور مؤثر آلودگی غیرنقطه‌ای را در محدوده مطالعاتی کنترل کرده و مواد مغذی رودخانه را کاهش دهد.

در گزینه ۴ نیز با توجه به این که مقدار کود به ۱/۵ برابر افزایش یافته است، بارهای نیترات و فسفات نیز به ۱۸/۰۲ و ۸/۵۱ برابر نسبت به وضع موجود افزایش داشتند. بنابراین با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که افزایش مقدار کود شیمیایی به از دست دادن مواد مغذی بیشتری می‌انجامد. بر این اساس با کنترل مقدار کود شیمیایی و بهبود بهره‌وری کاربرد کود، می‌توان اقدامات مفید بی‌قاعده‌ای برای کاهش آلودگی غیرنقطه‌ای کشاورزی باشد.

۴. نتیجه‌گیری

این تحقیق به منظور بررسی اثر راهکارهای مدیریتی برای کاهش آلودگی آب رودخانه ارس در محدوده اصلاندوز تا پارس‌آباد، تحت گزینه‌های مختلف انجام شد. در این تحقیق نخست عوامل تأثیرگذار بر آلودگی غیرنقطه‌ای کشاورزی را در محدوده مطالعاتی شناسایی سپس اثربخشی اقدامات مدیریتی را برای کنترل آلودگی غیرنقطه‌ای کشاورزی با مدل MIKE11 شبیه‌سازی شد. اقدامات مدیریتی در قالب گزینه‌های مدیریت زمین و کود اجرا شد. مقادیر مختلف نیترات و فسفات از آلودگی غیرنقطه‌ای کشاورزی، به‌طور مستقیم با میزان کاربری اراضی و کود مصرفی متناسب بود. نتایج شبیه‌سازی اقدامات مدیریتی نشان داد که تأثیر گزینه‌های مختلف کود و زمین در کاهش بار مواد مغذی رودخانه مشابه است. به‌طوری‌که با کاهش اراضی تحت کشت، بارهای آلودگی

یادداشت‌ها

1. Point source pollution (PSP)
2. Nonpoint source (NPS) pollution
3. Agriculture non-point source pollution
4. Total nitrogen
5. Total phosphorus
6. Xiangxi
7. Liuxihe
8. Kaoping
9. Binaguldaq
10. Triangulated irregular network
11. Danish Hydraulic Institute (DHI)
12. Zero Gradient
13. Manning roughness coefficient
14. Fischer
15. Coefficient of Determination (R^2)
16. Root Mean Square Error (RMSE)
17. Normalized Root Mean Square Error (NRMSE)

منابع

- Arhonditsis, G., Giourga, C. and Loumou, A. 2000. Ecological patterns and comparative nutrient dynamics of natural and agricultural Mediterranean-type ecosystems. *Environmental Management*. 26(5): 527-537.
- Behera, S., and Panda, R.K. 2006. Evaluation of management alternatives for an agricultural watershed in a sub-humid subtropical region using a physical process based model. *Agriculture Ecosystems & Environment* 113: 62-72.
- Carpenter, Stephen R. and et al. "Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen." *Ecological applications* 8.3 (1998): 559-568.
- Chen, Yi. and et al. Simulating the impact of watershed management for surface water quality protection: a case study on reducing inorganic nitrogen load at a watershed scale. *Ecological Engineering*, 62 (2014): 61-70.
- Cloern, J.E. 2001. Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem. *Marine Ecology Progress Series*, 210: 223-253.
- DHI Water and Environment (2009) MIKE11, a modeling system for rivers and channels. Reference Manual, 516p.
- Ding, X.W. 2010. The simulation research on agricultural non-point source pollution in Yongding River in Hebei Province. *Procedia Environmental Sciences* 2, 1770-1774.
- Fakouri, B., Mazaherim M. and Samani, J.M. Management scenarios methodology for salinity control in rivers (case study: Karoon River, Iran). *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA* 68.1 (2018): 74-86.
- Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C.J. Imberger, J. and Brooks, N.H. 1979. *Mixing in Inland and Coastal Waters*. Academic Press Inc. San Diego, 483.
- Hao, F., Zhang, X., Ouyang, W., Skidmore, A. K. and Toxopeus, A.G. 2012. Vegetation NDVI linked to temperature and precipitation in the upper catchments of Yellow River. *Environmental Modeling & Assessment*, 17(4): 389-398.
- Hao, F.H., Chen, L.Q., Liu, C.M., Dai, D. 2004. Impact of land use change on runoff and sediment yield. *Journal of Soil Water Conservation* 8, 5-8 (in Chinese).
- Hughes, M.G., Harris, P.T. and Hubble, T.C.T. Dynamics of the turbidity maximum zone in a micro-tidal estuary: Hawkesbury River, Australia. *Sedimentology*, 45.2 (1998): 397-410.
- Jiang, J., Li, Sh. Hu, J., Huang, J. 2014. A modeling approach to evaluating the impacts of policy-induced land management practices on non-point source pollution, A case study of the Liuxi River watershed, China. *Agricultural Water Management*, 131:1-16
- Karbassi, A.R., Heidari, M., Vaezi, A.R., Samani, A.R.V., Fakhraee, M. and Heidari, F. 2014. Effect of pH and salinity on flocculation process of heavy metals during mixing of Aras River water with Caspian Sea water. *Environ. Earth Sci.* 72: 457-465.
- Lai, Y.C. and et al. Evaluation of non-point source pollution and river water quality using a multimedia two-model system. *Journal of Hydrology*, 409.3-4 (2011): 583-595.

- Lam, Q.D., Schmalz, B., and Fohrer, N. 2010. Modelling point and diffuse source pollution of nitrate in a rural lowland catchment using the SWAT model. *Agricultural Water Management*, 97(2): 317-325.
- Lemckert, C.J., Campbell, P.G. and Jenkins, G.A. Turbulence in the bottom boundary layer of Moreton Bay, Queensland, Australia. *Journal of Coastal Research* (2011): 1091-1094.
- Liu, Ruimin. and et al. Assessment of effects of best management practices on agricultural non-point source pollution in Xiangxi River watershed. *Agricultural Water Management*, 117 (2013): 9-18
- Nasehi, F., Hassani, AH., Monavari, SM., Karbassi, AR., Khorasani, N. 2013. Evaluating the metallic pollution of riverine water and sediments: a case study of Aras River. *Environ Monit Assess* 185:197–203.
- Nasrabadi. T., Nabi Bidhendi, GHR., Karbassi, A.R., Hoveidi, H., Nasrabadi, I., Pezeshk, H., Rashidinejad, F. 2009. Influence of Sungun copper mine on groundwater quality, NW Iran. *Environ Geol* 58:693–700
- Ongley, E.D., Xiaolan, Z. and Tao, Y. 2010. Current status of agricultural and rural non-point source pollution assessment in China. *Environmental Pollution*, 158(5), 1159-1168.
- Pandey, V.K., Panda, S.N., Pandey, A., Sudhakar, S., 2009. Evaluation of effective management plan for an agricultural watershed using AVSWAT model, remote sensing and GIS. *Environmental Geology* 56, 993–1008
- Rafiee, M. 2014. A case study of water quality modeling of the gargar river, Iran." *Journal of Hydraulic Structures* 1.2: 10-22.
- Shen, Z.Y., Liao, Q., Hong, Q. and Gong, Y.W. 2012. An overview of research on agriculture non-point source pollution modeling in china. *Purif. Journal of Technology* ,84, 104-111.
- Somlyody, L., Henze, M., Koncsos, L., Rauch, W., Reichert, P., Shanahan, P. and Vanrolleghem P. 1998. River water quality modeling III, Future of the Art. *Water Science and Technology*. 38(11): 253-260.
- Tri.D. Q., Ching. C.Y. and P. K. Mishra. 2013. Numerical modeling in water quality management for rivers case study of the day/ nhue river sub-basin, Vietnam. *Journal of Earth Sciences and Engineering*. 6. 5(1): 1111-1119.
- Wu, Y. and Chen, J. 2013. Investigating the effects of point source and nonpoint source pollution on the water quality of the East River (Dongjiang) in South China. *Journal of Ecological Indicators*, 32, 294– 304
- Xing, G.X. and Zhu, Z.L., 2002. Regional nitrogen budgets for China and its major watersheds. *Biogeochemistry* 57–58 405–427. <https://doi.org/10.1023/A:1016508323200>
- Zhang, X. and Zhang, M. 2011. Modeling effectiveness of agricultural bmps to reduce sediment load and organophosphate pesticides in surface runoff. *Journal of Science of the Total Environment*, 409(10):1949-58.