تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۰، شماره ۴، شهریور ۱۳۹۸ (ص ۹۹۰-۹۷۷) DOI: 10.22059/ijswr.2018.264038.667993

Optimization of Type and Location of the Management Practises to Contorol Nutrient Loads into the Water Bodies, Case Study: Lake Zrebar Basin

YAGHOUB MAHMOUDI[1], MAJID DELAVAR[2*], SOMAYE IMANI[3], AMIR MOHAMMADI[4]

1. M. Sc. of Water Resources Engineering, Tarbiat modares university, Tehran, Iran
2. Assistant Professor of water Resources Engineering, Tarbiat modares university, Tehran, Iran
3. M. Sc. of Water Resources Engineering, Tarbiat Modares University and PhD Student of Environmental Engeenering-Water resource, University of Tehran
4. M. Sc. of Water Resources Engineering, Kordestan provincial government, Sanandaj, Iran

(Received: Sep. 9, 2018- Revised: Dec. 4, 2018- Accepted: Dec. 23, 2018)

ABSTRACT

The main objective of this research is to optimize the type and location of Best Management Practices (BMPs) to reduce the amount of nutrients entering the lake Zrebar in order to improve lake conditions. In this regard, Simulation-Optimization approach derived from the integration of the SWAT model and a spatial optimization model of BMPs based on multi-objective genetic algorithm (NSGA-II) was used. In this approach, the optimal model of management practices was determined with respect to three objectives: maximizing the net profit of the agricultural sector, minimizing the nitrogen loads and minimizing the phosphor loads. In this research, a wide range of BMPs was investigated and the optimal spatial pattern of the management practices such as fertilizer, irrigation and tillage managements were determined. Results showed that by applying the selected management practices with the optimal spatial pattern, the total amount of phosphorus and nitrogen in the basin outlet decreased by 2.8% and 22.1% respectively and consequently the concentration of nitrate in the lake will be greatly reduced. Also the net income of the agricultural sector decreased by 16.4%. The results indicated that applying the selected management practices with the optimal spatial pattern can help to improve the environmental condition of the lake.

Keywords: Nonpoint source pollutions, SWAT Model, Simulation, NSGA-II

* Corresponding Author's Email: m.delavar@modares.ac.ir

بهینه‌سازی نوع و موقعیت مکانی اقدامات مدیریتی به‌منظور کنترل بار موادمغذی ورودی به پیکره‌های آبی مطالعه موردی: حوضه دریاچه زریبار

یعقوب محمودی[۱]، مجید دلاور[۲*]، سمیه ایمانی[۳]، امیر محمدی[۴]

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲. استادیار گروه مهندسی منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳. دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب دانشگاه تربیت مدرس و دانشجوی دکتری مهندسی محیط‌زیست- منابع آب دانشگاه تهران

۴. کارشناسی ارشد منابع آب، استانداری کردستان، سنندج، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۶/۱۲- تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۹/۱۳- تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۱۰/۲)

چکیده

هدف اصلی در این تحقیق، بهینه‌سازی نوع و موقعیت مکانی بهترین اقدامات مدیریتی (BMPs) برای کاهش بار مواد مغذی ورودی به دریاچه زریبار به‌منظور بهبود شرایط دریاچه می‌باشد. در این راستا از رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی (S-O) حاصل از تلفیق مدل SWAT به‌منظور شبیه‌سازی بار مواد مغذی ورودی به دریاچه و مدل بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک چندهدفه (NSGA-II) برای تعیین الگوی مکانی BMPها، استفاده شد. الگوی بهینه اقدامات مدیریتی با توجه به اهداف سه‌گانه حداکثرسازی سود خالص بخش کشاورزی، حداقل‌سازی بار نیتروژن و حداقل‌سازی بار فسفر ورودی به دریاچه تعیین شد. در این تحقیق طیف متنوعی از BMPها بررسی شد و در نهایت به بهینه‌سازی الگوی مکانی اقداماتی مدیریتی از قبیل مدیریت انواع کود، مدیریت آبیاری و تعیین نوع شخم‌زنی مناسب پرداخته شد. نتایج حاصل از مدل نشان داد که با اعمال اقدامات مدیریتی منتخب با الگوی مکانی بهینه مجموع بار کل فسفر و نیتروژن در خروجی حوضه به ترتیب ۲/۸ و ۲۲/۱ درصد کاهش می‌یابند و به سبب آن غلظت نیترات دریاچه به‌شدت کاهش پیدا خواهد کرد و درآمد خالص بخش کشاورزی با کاهش ۱۶/۴ درصدی روبه‌رو خواهد شد. نتایج نشان می‌دهد با اعمال اقدامات مدیریتی منتخب با الگوی مکانی بهینه می‌توان وضعیت کیفی دریاچه را بهبود بخشید.

واژه‌های کلیدی: آلاینده‌های غیر نقطه‌ای، مدل SWAT، شبیه‌سازی،NSGA-II

مقدمه

آلودگی منابع آب، مشکلات روزافزون کیفی سیستم‌های آبی و ورود حجم زیاد مواد مغذی و آلاینده‌ها به‌سبب فعالیت‌های بیش از حد کشاورزی، دامداری و صنعتی، از جمله مهم‌ترین مسائل در مدیریت و بهره‌برداری از منابع آبی حوزه‌های آبخیز محسوب می‌شود. دریاچه زریبار نمونه‌ای از دریاچه‌های آب شیرین ایران است که با پتانسیل بالای تغذیه‌گرایی در آن مواجه می‌باشد. چنان‌چه این امر سبب رشد فراوان جلبک و ایجاد نیزار در سطح آن شده است و موجب کاهش شدید کیفیت آب دریاچه شده است و وسعت نیزارها در آن نسبت به گذشته افزایش چشم‌گیری داشته است (Imani *et al.*, 2016).

آلودگی‌های غیرنقطه‌ای جزو مهم‌ترین عوامل در افزایش بار مواد مغذی ورودی به دریاچه‌ها محسوب می‌شوند (Diaz and Rosenberg 2008). لذا شناسایی و کنترل هدفمند و بهینه منابع آلاینده در حوزه آبخیز دریاچه زریبار با استفاده از بهترین اقدامات مدیریتی (BMPs)[۱] می‌تواند نقش مهمی در بهبود کیفیت آب و همچنین حفظ اکوسیستم آن داشته باشد. از طرفی در انتخاب BMPها هزینه‌های اجرایی غالباً به‌عنوان یک عامل مهم تلقی می‌شود و در نظر گرفتن ابعاد اقتصادی اقدامات در کنار مسائل کیفی و زیست‌محیطی در اتخاذ تصمیمات واقع‌بینانه، دارای اهمیت زیادی است (Gitau *et al.*, 2014). شناسایی مناطق آلاینده بحرانی (CSAs)[۲] و بررسی کارآیی آن‌ها در این مناطق به لحاظ کاهش بار مواد مغذی و هزینه‌های اجرایی آن‌ها از جمله رویکردهای مطرح در زمینه انتخاب و به‌کارگیری BMPها می‌باشد (Imani, 2015). در این راستا انتخاب و مکان‌یابی بهینه اقدامات در مناطق بحرانی با توجه به اهداف اقتصادی، اجتماعی

*نویسنده مسئول: m.delavar@modares.ac.ir

1. Best Management Practices
2. Critical Source Areas

و محیط‌زیستی می‌تواند به‌عنوان یک رکن کلیدی در کنترل آلاینده‌های پیکره‌های آبی مطرح کرد (Gitau *et al.*, 2002; Yang, 2011; Ayele *et al.*, 2017).

تأثیر فعالیت‌های بالادست بر پیکره‌های آبی باعث اهمیت رویکرد حوضه‌ای در مدیریت مسائل کیفی منابع آبی شده است. بدین منظور محققین زیادی به‌منظور شبیه‌سازی بار مواد مغذی و آلاینده‌ها از مدل‌های مفهومی برای شبیه‌سازی حوضه‌های آبریز استفاده کرده‌اند. از این میان به عنوان مثال Yuan and Bingner (2002) از مدل سالانه آلودگی غیر نقطه‌ای (AnnAGNPS)[1] در حوضه رودخانه Mississippi به‌منظور بررسی امکان بهبود کیفیت آب دریاچه واقع در حوضه، استفاده کردند. نتایج حاصل حاکی از قابلیت مدل AnnAGNPS در تعیین CSAs مختلف بدون نیاز به واسنجی بسیار مطلوب در این حوضه است. همچنین در مطالعه‌ای دیگر در حوضه بالادست مخزن Miyun در چین، برای کنترل آلودگی غیر نقطه‌ای با استفاده از تلفیق مدل CLUE-S[2] و مدل SWAT[3] برای کاهش بار نیتروژن و فسفر ورودی به مخزن از حوضه، تأثیر BMPهایی مانند نوارهای بافر و بازگرداندن اراضی به پوشش جنگلی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد کاربری اراضی مختلف به‌طور قابل‌توجهی بار مواد آلاینده را در حوضه تحت تأثیر قرار می‌دهند (Zhang *et al.*, 2013). در زمینه انتخاب BMPها نیز محققین مختلفی از رویکردهای مختلفی شامل رویکرد آنالیز سناریو با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی (Gitau, 2004; Zhang, 2013; Chiang, 2014; Imani *et al.*, 2016) و رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی (Srivastava *et al.*, 2002; Maringanti *et al.*, 2009; Dong *et al.*, 2015; Joen *et al.*, 2018) استفاده کرده‌اند. در زمینه استفاده از رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی به عنوان مثال در حوزه آبخیز یک مخزن در ایالات‌متحده امریکا با هدف دست‌یابی به کاهش ۶۰ درصدی بار فسفر در خروجی حوزه آبخیز آن از الگوریتم ژنتیک اصلاح‌شده، مدل SWAT و یک ابزار بهترین اقدامات مدیریتی (BMP Tool) برای تعیین BMPهای مؤثر و اولویت‌بندی آن‌ها استفاده گردید. محققین در این مطالعه از الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای انتخاب بهینه BMPها استفاده کردند. نتایج حاصل نشان داد این روش برای تعیین بهینه و مقرون به‌صرفه‌تر BMPها مناسب است (Gitau *et al.*, 2004). نتایج حاصل از تحقیقات نشان می‌دهد استفاده از نوارهای بافر، مدیریت چرا و برنامه‌های مدیریت مواد مغذی (مدیریت آبیاری، خاک‌ورزی و کوددهی) در کاهش بار آلودگی بیش از بقیه اقدامات در کاهش بار مواد مغذی مؤثرتر بوده است (Zhang *et al.*, 2013; Dong *et al.*, 2015; Singh *et al.*, 2018).

در مطالعه حاضر تلاش شده است تا با تلفیق یک مدل بهینه‌سازی با یک مدل شبیه‌سازی پیوسته آلودگی‌های غیرنقطه‌ای مناسب‌ترین نوع BMPها و موقعیت مکانی آن‌ها به منظور کنترل بار آلودگی در پیکره‌های آبی تعیین گردد. در این راستا از یک رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی (S-O) حاصل از ترکیب مدل شبیه‌سازی SWAT به‌منظور شبیه‌سازی بار مواد مغذی و تأثیر اقدامات مدیریتی و یک مدل بهینه‌سازی الگوی مکانی BMPها مبتنی بر الگوریتم ژنتیک چندهدفه (NSGA-II)، استفاده شد. در این رویکرد الگوی بهینه اقدامات مدیریتی با توجه به اهداف حداکثرسازی سود خالص بخش کشاورزی و حداقل-سازی بار مواد مغذی مدنظر قرار گرفت. به منظور ارزیابی روش‌شناسی مطالعه نیز حوضه آبریز دریاچه زریبار به دلیل وجود مشکلات کیفی ناشی از آلودگی‌های غیرنقطه‌ای (کشاورزی)، نیاز به احیای دریاچه با اعمال گزینه‌های مدیریتی و در دسترس بودن اطلاعات کیفی مناسب، به عنوان منطقه مطالعاتی مد نظر قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

دریاچه زریبار یا زریوار در فاصله ۳ کیلومتری غرب مریوان، از شهرهای کردستان و از مکان‌های گردشگری منطقه می‌باشد. مساحت این دریاچه در حدود ۲۰۰۰ هکتار بوده و حوزه آبخیز این دریاچه با مساحتی حدود ۸۹۰۰ هکتار در مختصات جغرافیایی ″31 ′30 °35 تا ″06 ′37 °35 عرض شمالی و ″52 ′03 °46 تا ″47 ′10 °46 طول شرقی واقع است. شکل (۱) نمایی از حوضه مورد مطالعه و نیز کاربری‌های اراضی موجود در حوضه زریبار را نشان می‌دهد.

منابع تأمین آب دریاچه زریبار از ۳ منبع عمده تشکیل می‌شود (Asarab ،2007) که شامل:

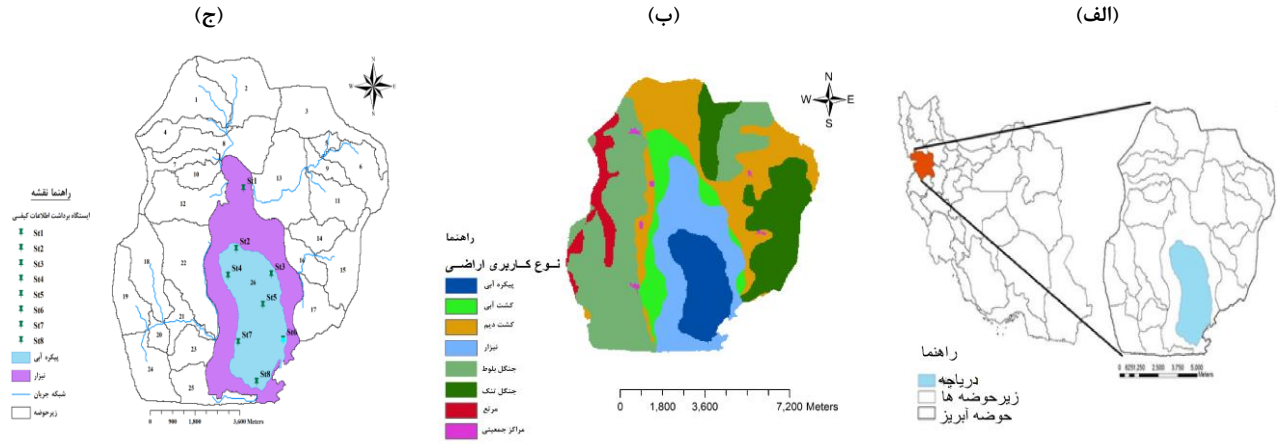
۱-ریزش‌های جوی که سالانه در حدود ۲۰ میلیون مترمکعب (سال ۱۳۹۲-۱۳۸۴) آب دریاچه را تأمین می‌کنند

۲- چشمه‌های کف جوش بستر دریاچه که به سفره‌های زیرزمینی مرتبط است و برآورد شده است سالانه ۱۱ میلیون مترمکعب از این منابع آب به دریاچه وارد می‌شود.

۳- آب‌های ورودی به دریاچه با رقمی معادل ۳۳ میلیون

1. Annualized Agricultural Non-Point Source
2. Conversion of Land Use and its Effect-Scanner
3. Soil and Water Assessment Tool

مترمکعب در سال (سال ۱۳۹۲-۱۳۸۴) ، که از منابع تأمین آب موقتی دریاچه محسوب می‌شوند و پس از بارش باران یا برف، از طریق آبراهه‌های جاری بر دامنه‌های غربی، شرقی و حوضه آبخیز دریاچه به آن می‌ریزد



شکل ۱- (الف) منطقه مطالعاتی (ب) کاربری‌های اراضی موجود در منطقه (ج) محل‌های ورود بار آلودگی به دریاچه

همچنین رودخانه قزلچه‌سو که از بلندی‌های شمال مریوان سرچشمه می‌گیرد، از سال ۱۳۸۳ تاکنون به‌وسیله یک بند انحرافی به دریاچه زریبار اتصال یافته است. هدف کلی از احداث این سد، جلوگیری از خروج آب از مرزهای بین‌المللی به میزان متوسط سالیانه ۲۰ میلیون مترمکعب، تأمین آب ۲۱۰۰ هکتار اراضی جنوب دریاچه در سال‌های خشک و کم‌باران، اشتغال‌زائی، تثبیت بستر رودخانه و حفظ اکوسیستم محیط‌زی‌ست دریاچه زریبار در سال‌های خشک و کم باران می‌باشد.

عمده منابع آلودگی حوضه شامل مراکز جمعیتی (شامل آلودگی ناشی از کانون‌های جمعیتی مشرف به دریاچه و آلودگی ناشی از ورود گردشگران به منطقه)، فعالیت‌های کشاورزی (شامل گسترش وسعت اراضی، وفور نسبی آب حوضه و استفاده بیش از حد از چاه‌های اطراف دریاچه)، فعالیت‌های دامداری (چرای بیش از حد دام‌ها و وارد شدن فضولات حیوانی به دریاچه) می‌باشند که خلاصه اطلاعات مربوط به هریک در جدول (۱) آمده است. بر اساس اطلاعات حاصله از آمار سازمان گردشگری شهرستان مریوان نیز به‌طور متوسط، سالانه یک میلیون گردشگر وارد این شهر می‌شوند.

جدول ۱- جمعیت مراکز روستایی و تعداد دام سنتی به تفکیک روستاهای اطراف دریاچه زریبار بر اساس آمار مرکز آمار و کشاورزی سال ۱۳۹۰

نام روستا	جمعیت (نفر)	گاو و گوساله (رأس)	گوسفند و بز (رأس)	طیور بومی (قطعه)
برده رشه	۱۰۹۴	۴۵۰	۵۴۵	۶۰۰
پیرصفا	۳۰۷	۱۹۵	۳۴۰	۳۲۰
دره‌تفی	۹۲۴	۴۵۰	۸۵۰	۷۰۰
سیف	۵۲۲	۳۷۰	۱۷۵۰	۶۷۰
کولان	۶۵۰	۲۵۰	۷۰۰	۵۰۰
ینگیجه	۳۶۲	۳۵۵	۳۷۰	۴۵۰

مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی نوع و موقعیت مکانی بهترین اقدامات مدیریتی

به‌منظور تعیین الگوی بهینه BMPها در سطح حوضه به‌منظور کاهش بار مواد مغذی در ورودی دریاچه زریبار از یک رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی مبتنی بر تلفیق الگوریتم ژنتیک چندهدفه با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II)[1] با مدل SWAT استفاده شد. در مدل بهینه‌سازی NSGA-II، اجزای مهم و اصلی شامل تولید جمعیت تصادفی، اعمال تغییرات مربوطه در فایل‌های ورودی SWAT و سپس اجرای مدل شبیه‌سازی بار مواد مغذی و در نهایت محاسبات مربوط به توابع هدف از روی خروجی‌های مدل SWAT، وجود دارند. پس از این محاسبات میزان مطلوبیت نتایج ارائه شده توسط الگوریتم مورد بررسی قرار گرفت. شکل

1. Nondominated Sorting Genetic Algorithm

(۲) نحوه ارتباط الگوریتم ژنتیک چندهدفه با مدل SWAT را نشان می‌دهد.

مدل شبیه‌ساز جامع حوزه آبخیز دریاچه زریبار

در این مطالعه به‌منظور شبیه‌سازی حوزه آبخیز از مدل SWAT، استفاده شد. مدل SWAT در دپارتمان کشاورزی امریکا (USDA) تهیه شده است. در این مدل بیلان آبی اساس شبیه-سازی هر پدیده‌ای است که در سطح حوضه روی می‌دهد این مدل برای پیش‌بینی تأثیر روش‌های مختلف مدیریت بر مقادیر آب، رسوب و مواد شیمیایی کشاورزی در سطح حوزه‌های آبخیز پیچیده و بزرگ با خاک، کاربری اراضی و شرایط مختلف مدیریتی در درازمدت طراحی شده است. تفکیک حوضه به زیر حوضه‌ها و HRUها مدل را قادر می‌سازد که تفاوت در مقدار پارامترهای هیدرولوژیکی حوضه را برای گیاهان و خاک‌های مختلف منعکس کند. این روش دقت محاسبات را افزایش داده و توصیف فیزیکی بسیار بهتری از بیلان آبی حوضه به دست می‌دهد. مدل توانایی خوبی در شبیه‌سازی عملکرد گیاهی، انتقال مواد مغذی و رواناب دارد. در این مدل تأثیر نسبی داده‌های ورودی (تغییر در روش‌های مدیریتی، آب و هوا، پوشش گیاهی و غیره) بر روی کیفیت آب و دیگر متغیرها قابل‌بررسی هستند.

این مدل نیازمند اطلاعاتی در مورد آب و هوا، مشخصات خاک، توپوگرافی، پوشش گیاهی و روش‌های مدیریت و کاربری اراضی در سطح حوزه آبخیز می‌باشد. در این مطالعه اطلاعات مرتبط با الگوی کشت غالب و مدیریت زراعی شامل شیوه‌های مدیریت کشت، آبیاری، کوددهی و غیره برای تهیه مدل SWAT حوزه آبخیز دریاچه زریبار از آمار سازمان جهاد کشاورزی استان کردستان اخذ و در فایل های mgt. مدل مورد استفاده قرار گرفته است (جدول ۲). لازم به توضیح است راندمان کل آبیاری در مدل بر اساس مطالعات صورت گرفته در منطقه (توان‌آب، ۱۳۸۶۳) برابر با ۳۵ درصد در نظر گرفته شد.

جدول ۲-محصولات عمده در حوضه دریاچه زریبار، تاریخ کشت و برداشت (میلادی)، میزان کود مصرفی سالانه (کیلوگرم در هکتار) و نوع شخم و میزان آبیاری (میلی‌متر)

الگوی کشت	تاریخ کشت	تاریخ برداشت	نوع شخم	نیاز خالص آبیاری	میزان کود مصرفی در طی دوره کشت		
					کود حیوانی	کود ازته	کود فسفاته
یونجه (۵ چین)	هفته دوم فروردین تا آخر اردیبهشت	اواسط خرداد تا اواسط آذر	دیسک	۹۶۷	۲۵۰۰۰	۱۰۰	۱۰۰
گندم آبی	هفته دوم مهر تا آخر آبان	اواخر خرداد تا اواخر تیر	دیسک	۲۶۴	۱۵۰۰۰	۲۰۰	۱۰۰
جو آبی	هفته دوم مهر تا آخر آبان	اواخر اردیبهشت تا اواخر خرداد	دیسک	۲۰۴	۱۵۰۰۰	۲۰۰	۱۰۰
گوجه‌فرنگی	هفته دوم اردیبهشت تا آخر خرداد	اوایل شهریور تا اواخر مهر	دیسک	۸۵۴	۱۰۰۰۰	۱۰۰	۱۰۰
توتون	هفته دوم اردیبهشت تا آخر خرداد	اواخر شهریور تا اواخر مهر	دیسک	۴۹۴	۱۵۰۰۰	۳۰۰	۵۰
نخود دیم	هفته اول فروردین تا هفته اردیبهشت و آذر	اواسط خرداد تا شهریور	دیسک	--	--	۱۰۰	--
سیب	اوایل فروردین	اواخر شهریور تا اواخر آبان	--	۱۰۰۶	۲۵۰۰۰	۲۰۰	۱۵۰
انگور دیم	اوایل فروردین	اواخر شهریور تا اواخر آبان	--	--	۲۵۰۰۰	--	--
گندم دیم	اوایل مهر تا آخر آبان	اواسط خرداد تا اواخر تیر	دیسک	--	۱۵۰۰۰	۲۰۰	۱۰۰
جو دیم	اوایل مهر تا آخر آبان	اواسط خرداد تا اواخر تیر	دیسک	--	۱۵۰۰۰	۲۰۰	۱۰۰

لایه DEM[۱] با اندازه سلولی ۳۰ متر از پایگاه سازمان فضایی ملی ایالت متحده آمریکا و خاک منطقه از نقشه خاک سازمان خوار و بار کشاورزی ملل متحد استخراج شد. برای لایه رقومی کاربری اراضی، از نقشه‌های پوشش گیاهی تهیه‌شده توسط سازمان جنگل‌ها و مراتع کشور (۱۳۸۵) استفاده شد. اصلاحات انجام‌شده در این لایه شامل تفکیک کاربری اراضی کشت آبی و کشت دیم و مشخص نمودن محدوده مراکز جمعیتی روستایی بودند. از اطلاعات روزانه دمای ایستگاه سینوپتیک مریوان و ایستگاه اقلیم‌سنجی سروآباد و اطلاعات بارندگی ایستگاه سینوپتیک مریوان و ایستگاه باران‌سنجی دریاچه زریبار، چناره، دزیل و ساوجی برای تهیه داده‌های هواشناسی استفاده شده است. همچنین آمار ماهانه برآورد شده دبی ورودی به دریاچه و تراز آب دریاچه از ایستگاه دریاچه زریبار از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۳ برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل استفاده گردید .برای مطالعات

۱. Digital Elevation Model

کیفیت آب نیز از اطلاعات حاصله از نمونه‌برداری‌های دسامبر ۲۰۰۶ و ژانویه ۲۰۰۷ و آوریل تا ژوئن سال ۲۰۰۷ و همچنین اطلاعات ایستگاه آنلاین سازمان حفاظت محیط زیست کردستان از اوت تا دسامبر سال ۲۰۱۳ با گام زمانی ۳ ساعته استفاده شد (Imani *et al.*, 2016).

معیار انتخاب این ایستگاه‌ها نزدیک‌ترین فاصله با منطقه مورد مطالعه بوده است. برای شبیه‌سازی فرآیندهای موردنظر این اطلاعات از دوره ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۳ تهیه شد.

شکل ۲- فلوچارت الگوریتم NSGA-II و نحوه ارتباط آن با مدل SWAT

مدل بهینه‌سازی نوع و موقعیت مکانی بهترین اقدامات مدیریتی

الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه یکی از اجزاء کلیدی مدل شبیه-سازی-بهینه‌سازی در این مطالعه محسوب می‌شود. توابع هدف در نظر گرفته‌شده در مدل بهینه‌سازی عبارت هستند از: ۱) به حداقل رساندن هزینه اعمال BMPها (حداقل‌سازی سطح پیاده-سازی اقدامات مدیریتی) و به حداکثر رساندن عملکرد محصولات و یا به عبارتی حداکثر کردن سود خالص حاصل از بخش کشاورزی، ۲) حداقل‌سازی بار کل نیتروژن و ۳) حداقل‌سازی بار کل فسفر ورودی به دریاچه. از جمله محدودیت‌های مسئله نیز می‌توان به محدودیت سطح اعمال هرکدام از BMPها با توجه به محدودیت سطح پیاده‌سازی اقدامات مدیریتی از نظر مکانی و محدودیت‌های فنی اشاره نمود. توابع هدف استفاده شده در بهینه‌سازی به صورت رابطه (۱) می‌باشد:

$$Minimize\begin{Bmatrix} Z_1 = -TotalB_s \\ Z_2 = TotalP_s \\ Z_3 = TotalN_s \end{Bmatrix} \quad \text{(رابطه ۱)}$$

که در آن، Z_1 تابع هدف اول، $TotalB_s$ درآمد خالص بخش کشاورزی ($TotalB_s \in [0,1]$)، Z_2 تابع هدف دوم، $TotalP_s$ متوسط بار فسفر ورودی استانداردشده به دریاچه، Z_3 تابع هدف سوم TotalNمتوسط بار نیتروژن ورودی به دریاچه می‌باشد.

به‌منظور محاسبه مقدار استانداردشده درآمد خالص از

رابطه (۲) استفاده شد (اجزای رابطه ۲ بر حسب میلیون ریال است).

$$TotalB_s = \frac{B_{average} - C_{constant} - C_{BMPs}}{B_{max} - C_{constant}} \quad \text{(رابطه ۲)}$$

که در آن، $B_{average}$ متوسط درآمد ناخالص حاصل از کشت محصولات کشاورزی است که محاسبات آن طبق رابطه (۳) می‌باشد. $C_{constant}$ نیز هزینه‌های ثابت نهاده‌های مختلف کود، شخم، آبیاری و نگهداری است که مقادیر آن بر اساس رابطه (۴) محاسبه می‌شود. B_{max} که از رابطه (۵) به‌دست می‌آید، نشان‌دهنده حداکثر سود ناخالص بخش کشاورزی می‌باشد. C_{BMPS}هزینه اعمال اقدامات مدیریتی بوده و بر اساس رابطه (۶) می‌باشد.

$$B_{average} = \sum_{i=1}^{12} Y_{average\,j} \times P_j \times A_j \quad \text{(رابطه ۳)}$$

$$C_{constant} = \sum_{j=1}^{12} C_j \times A_j \quad \text{(رابطه ۴)}$$

$$B_{max} = \sum_{j=1}^{12} Y_{max\,j} \times P_j \times A_j \quad \text{(رابطه ۵)}$$

$$C_{BMPs} = \sum_{l=1}^{n} a_l \times C_{BMP\,l} \quad \text{(رابطه ۶)}$$

در این روابط $Y_{average\,j}$ متوسط عملکرد محصول زأم در طول دوره (تن در هکتار در سال است)، P_j قیمت محصول زأم (میلیون ریال)، A_j مساحت زیر کشت محصول زأم در حوضه (هکتار) می‌باشد. C_j مجموع هزینه نهاده‌های تولید محصول زأم (میلیون ریال در هکتار)، $Y_{max\,j}$ حداکثر عملکرد محصول زأم در حوضه در واحد کیلوگرم در هکتار (جدول ۳)، a_l مقدار متغیر تصمیم lأم است. برای محاسبه C_{BMPS} ماتریس a در ماتریس هزینه‌های BMP (C_{BMP}) ضرب شده و مقادیر آن با هم جمع می‌گردند. a و C_{BMP} یک ماتریس $1\times n$ می‌باشند که n تعداد متغیرهای تصمیم است.

جدول ۳- حداکثر عملکرد محصولات کشاورزی در حوضه دریاچه زریبار (تن در هکتار)

سیب	جوآبی	جودیم	پیاز	انگور	تنباکو	گوجه‌فرنگی	گندم آبی	گندم دیم	یونجه	شبدر	نخود
۱۲	۲/۵	۱	۱۵/۵	۵	۲/۵	۱۵/۵	۳	۱/۵	۸	۸	۰/۷۵

مقادیر $Y_{average}$ از خروجی مدل SWAT در هر بار اجرا می‌باشد (Output.hru). به‌منظور محاسبه مقادیر استاندارد شده، بار نیتروژن و فسفر و متوسط بار ورودی به دریاچه در محل ورودی به آن بر حداکثر بار فسفر یا نیتروژن ورودی تقسیم شد (رابطه‌های ۷ و ۸).

(رابطه ۷)

$$TotalN_{standard} = \frac{\sum TN_i}{TN_{max}}, \quad for\ i = 10,12,13,16,17,23,25$$

(رابطه ۸)

$$TotalP_{standard} = \frac{\sum TP_i}{TP_{max}}, \quad for\ i = 10,12,13,16,17,23,25$$

در رابطه (۷)، TN_i بار نیتروژن ورودی سالانه به دریاچه از زیر حوضه iأم، TN_{max} حداکثر بار نیتروژن سالانه ورودی به دریاچه و در رابطه (۸) ، TP_i بار فسفر ورودی سالانه به دریاچه از زیر حوضه iأم، TP_{max} حداکثر بار فسفر ورودی سالانه به دریاچه می‌باشد. مقادیر TP و TN از فایل خروجی مدل SWAT با نام Output.rch در هر بار اجرای مدل استخراج می‌گردند.

متغیر تصمیم موجود در مسئله، ماتریس $a_{m\times n}$ (تعیین نوع و موقعیت مکانی m اقدام مدیریتی (BMP) در n مکان (کشت) در حوضه) می‌باشد که در آن مقادیر ماتریس می‌توانند صفر و یا یک باشند به صورتی که اگر a_{ij} برابر با صفر شود، آنگاه iأم BMP در کشت زأم اعمال نمی‌شود. در غیر این‌صورت iأم BMP اعمال می‌شود. از مقادیر به‌دست آمده ماتریس $a_{m\times n}$ که در هر تکرار تولید می‌شود، برای محاسبه مقادیر درصد کاهش کود و آبیاری استفاده می‌شود (رابطه ۹).

$$R_Value_{m\times n} = a_{m\times n} .* r_Value_{m\times n} \quad \text{(رابطه ۹)}$$

در این رابطه $R_Value_{m\times n}$ مقادیر نهایی تصادفی، درصد تغییر مقدار انواع کود و مقدار آبیاری از پیش تعیین‌شده و $r_value_{m\times n}$

مقادیر از پیش تعیین‌شده مربوط به درصد تغییر پارامترهای پیش تعیین‌شده (مقدار انواع کود و مقدار آبیاری) است که مقدار آن در هر تکرار ثابت می‌باشد. اما با متغیر بودن a_{ij} مقادیر R_Value_{ij} یا صفر و یا برابر r_Value_{ij} خواهد بود.

محدودیت‌های مسئله شامل الف) اقدامات مدیریتی تنها در آن دسته از اراضی قابل اعمال هستند که در آن‌ها کشاورزی آبی و دیم اعم از زراعی و باغی صورت می‌گیرد. لذا محدودیت ذکر شده به صورت رابطه (۱۰) در مدل بهینه‌سازی مدنظر قرار گرفت.

$$\sum_{i=1}^{n} A_i \le A_{agri} \quad \text{(رابطه ۱۰)}$$

ب) با توجه به اینکه برخی از BMPها در بعضی از اراضی قابل اعمال نیستند و یا اینکه تعریف نشده‌اند، در بعضی موارد مقدار a_{ij} به صورت پیش‌فرض صفر در نظر گرفته شده است. به

عنوان مثال مدیریت شخم در حوضه مربوط به کشت‌های زراعی و باغی است اما در باغات سیب و انگور هر نوع شخم‌زنی به عنوان مثال استفاده از کولتیواتر انجام نمی‌گیرد و یا کاهش آبیاری برای محصولات دیم تعریف نمی‌شود و نیز مدیریت کود در کشت‌هایی انجام می‌پذیرد که کود مورد نظر مورد استفاده قرار بگیرد:

(رابطه ۱۱)

$$a_{ij} = \begin{cases} 0 & if\ BMP_{ij}\ in\ PLC_{ij}\ is\ Undefined \\ X & if\ BMP_{ij}\ in\ PLC_{ij}\ is\ Defined \end{cases}$$

نتایج و بحث

اجرای مدل SWAT حوزه آبخیز دریاچه زریبار

مدل شبیه‌سازی حوضه با تفکیک حوزه آبخیز دریاچه به ۱۱۰۰ HRUو ۲۶ زیر حوضه انجام شد. واسنجی مدل SWAT به‌صورت جامع و طی یک فرایند چندمرحله‌ای شامل واسنجی شبیه‌سازی هیدرولوژیکی، رشد گیاهی و مواد مغذی و با استفاده از داده‌های مشاهداتی شامل دبی ورودی به دریاچه، حجم دریاچه، غلظت فسفات و نیترات دریاچه، تبخیر-تعرق و نیز عملکرد محصولات کشاورزی انجام گرفته است که نتایج حاکی از مطلوبیت نتایج مدل شبیه‌سازی می‌باشد. خلاصه نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل برای دبی ورودی، نیترات و فسفات دریاچه در جدول (۴)آورده شده است. شرح کامل نتایج واسنجی و اعتبار سنجی مدل در مطالعه .Imani et al (2017) در دسترس می‌باشد.

جدول ۴- نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل برای دبی ورودی، نیترات و فسفات دریاچه (۳)

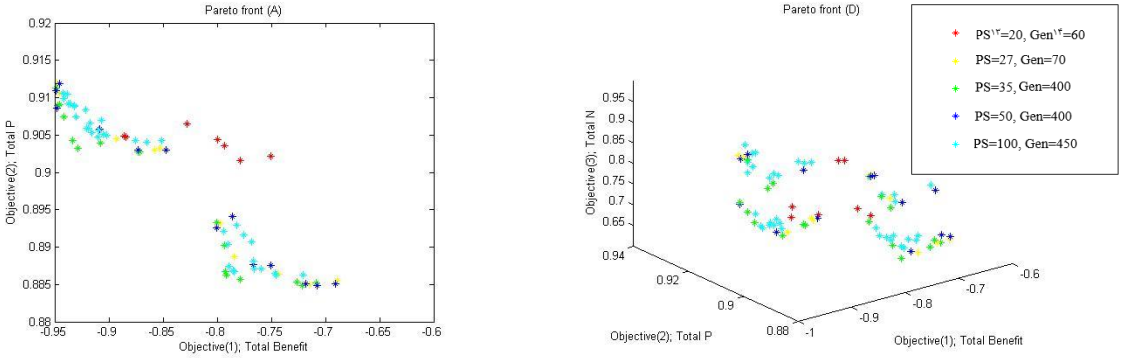
پارامتر	واسنجی		اعتبارسنجی	
	R^2	RMSE	R^2	RMSE
دبی (m3/sec)	۰/۶۵	۰/۶۴	۰/۸۰	۰/۵۲
غلظت نیترات (ppm)	۰/۸۹	۰/۷۰	۰/۸۲	۱/۸۷
غلظت فسفات (ppm)	۰/۵۶	۰/۸۷	۰/۵۲	۰/۹۶
حجم مخزن (MCM)	۰/۷۹	۰/۲۴	۰/۳۳	۰/۳۴

توسعه و تحلیل حساسیت مدل بهینه‌سازی

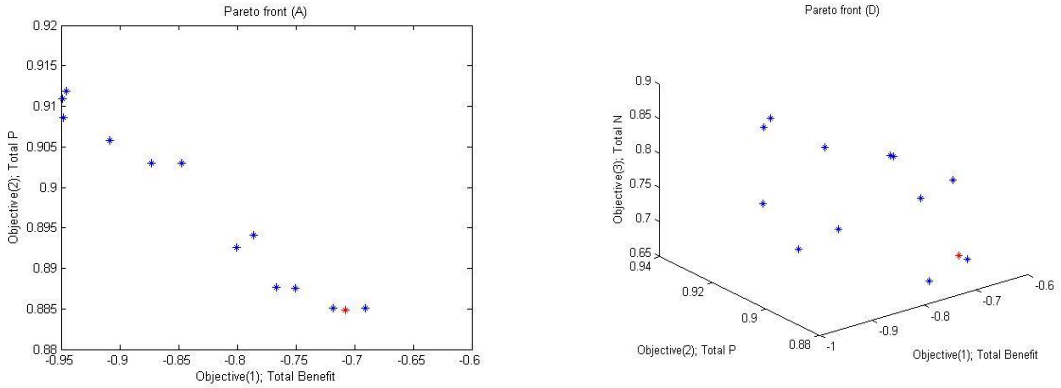
به‌منظور به‌کارگیری مدل بهینه‌سازی نوع و موقعیت مکانی اقدامات مدیریتی در سطح حوضه آبریز، ابتدا آنالیز حساسیت پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی انجام شد. بر طبق نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل آنالیز حساسیت‌های مختلف روی توابع و پارامترها، نتایج نشان داد که با انتخاب تابع جهش Uniform، میزان تابع جهش برای متغیرهای تصمیم دودویی (Bit String)، بین ۰/۰۴ تا ۰/۰۸ مناسب خواهد بود و با اندازه جمعیت برابر با ۵۰ تا ۶۰ بهترین نتایج حاصل شد. همچنین برای تعیین حداکثر تعداد تولید نسل در طول اجرای الگوریتم، ارزیابی اولیه‌ای با استفاده از حل الگوریتم بهینه‌سازی صورت پذیرفت. نتایج حاصل از اجرای الگوریتم و نحوه همگرائی توابع هدف اول (Z_1) و دوم (Z_2) و نیز همه توابع با هم در شکل (۳) ارائه شده است. نتایج بیانگر کافی بودن تعداد تولید نسل برابر با ۴۰۰ برای تعیین منحنی پارتوی بهینه است. البته نتایج حاصل از اجرای الگوریتم با تعداد تولید نسل بیش از ۴۰۰، به طور مثال ۵۰۰ به نسبت کمی بهتر است اما زمان اجرای مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بسیار بزرگ‌تر می‌شود، به‌طوری‌که زمان اجرای الگوریتم با جمعیت ۱۰۰ و تعداد تولید ۴۵۰، در یک کامپیوتر با پردازشگر Cotrei16 و 8GBps RAM حدود ۲۶ روز و بیشتر طول خواهد کشید. همچنین به‌منظور بررسی دقیق‌تر تعداد تولید نسل ۵۰۰ نیز بررسی شد و تفاوت محسوسی در نتایج حاصل مشاهده نشد لذا نتایج حاصل از اجرای مدل با جمعیت ۵۰ و تعداد تولید ۴۰۰ پذیرفته شد.

الگوی بهینه اقدامات مدیریتی در سطح حوزه آبخیز

در شکل (۴) رویه پرتو سطح ۱ حاصل از بهینه‌سازی موقعیت مکانی بهترین اقدامات مدیریتی در سطح حوضه با استفاده از الگوریتم NSGA-II برای توابع هدف نشان داده شده است. در نهایت از میان مجموعه جواب به‌دست‌آمده یکی از جواب‌ها با استفاده از روش وزنی انتخاب شد. با توجه به بررسی‌های انجام-شده در خصوص اثرپذیری هرکدام از توابع هدف مسئله و نیز اهمیت نسبی کاهش بار کل فسفر نسبت به بار کل نیتروژن در پدیده تغذیه‌گرایی این دریاچه، وزن‌ها به ترتیب برای درآمد خالص کشاورزی، بار کل فسفر و بار کل نیتروژن برابر ۰/۲، ۰/۵ و ۰/۳ انتخاب شد و در نهایت مقادیر تابع هدف برای نقطه انتخابی به ترتیب برابر با ۳۹۵۴۵/۲ میلیون ریال، ۳۸۰۰۹/۴ کیلوگرم و ۱۳۵۳۶۹/۸ کیلوگرم در سال می‌باشند



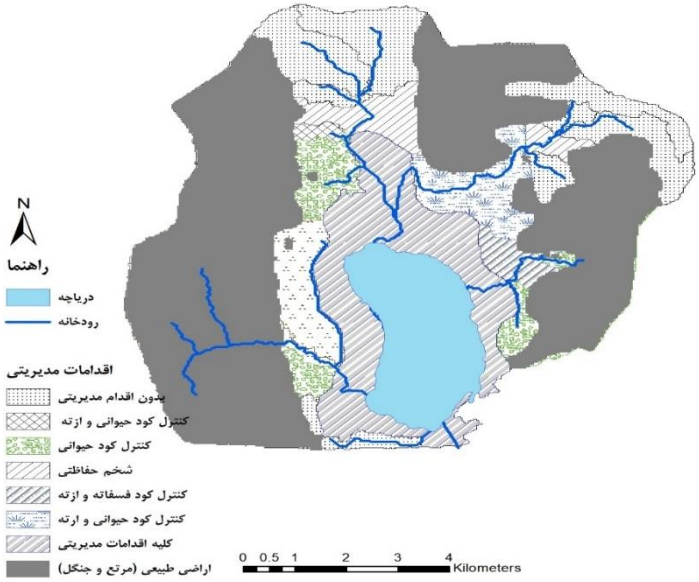
شکل ۳- منحنی‌های پارتوی الگوریتم به‌ازای تعداد تولید مختلف (PS = اندازه جمعیت؛ Gen = تعداد تولید)



شکل ۴- رویه‌های پرتو به‌دست آمده از بهینه‌سازی نوع و موقعیت مکانی بهترین اقدامات مدیریتی در سطح حوضه

پس از اجرای مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی، مقادیر موقعیت و الگوی مکانی بهینه اقدامات مدیریتی برای نقطه مشخص‌شده در شکل (۵) و الگوی بهینه آن‌ها برای نوع محصولات در جدول (۵) نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌گردد با توجه به نقش قابل‌توجه اراضی کشاورزی حاشیه دریاچه در تولید و انتقال آلودگی به دریاچه، عمده اقدامات مدیریتی در اراضی حاشیه دریاچه پیشنهاد می‌گردد. با افزایش فاصله از دریاچه و در اراضی دیم حوضه عمده اقدامات مدیریتی مختص به کنترل کود حیوانی و شخم حفاظتی می‌باشد.

بر اساس جدول (۵) در اراضی کشاورزی آبی کنترل آلودگی از طریق طیف متوعی از اقدامات و عمدتاً به‌واسطه کم آبیاری و کنترل کودهای شیمایی و حیوانی توصیه می‌گردد.



شکل ۵- موقعیت مکانی بهترین اقدامات مدیریتی در سطح حوضه

جدول ۵- الگوی بهینه BMPها برای محصولات مختلف (تعیین درصد کاهش آبیاری و کوددهی و تعیین نوع شخم‌زنی)

کاربری اراضی	محصول	نوع شخم‌زنی	آبیاری	کود فسفاته	کود نیتراته	کود حیوانی
آبی	یونجه	کولتیواتر	-	۵۰	۳۰	-
	گندم آبی	دیسک	۶۰	۵۰	۵۰	۶۰
	جو آبی	کولتیواتر	۴۰	۵۰	۳۰	-
	گوجه‌فرنگی	عدم شخم‌زنی	-	۲۰	۰	-
	تنباکو	عدم شخم‌زنی	۲۰	۵۰	۵۰	۲۰
	سیب	دیسک	-	۲۰	۵۰	۶۰
	شبدر	دیسک	۶۰	۵۰	۵۰	۶۰
	پیاز	عدم شخم‌زنی	۶۰	۵۰	۵۰	۲۰
دیم	گندم دیم	کولتیواتر	*	۵۰	-	۶۰
	جو دیم	دیسک	*	-	-	۶۰
	نخود دیم	دیسک	*	*	*	۶۰
	باغ انگور	دیسک	*	-	۳۰	-

بررسی وضعیت حوزه آبخیز دریاچه زریبار در شرایط بهینه

بررسی میزان بار آلاینده ورودی به دریاچه زریبار و تغذیه‌گرایی آن

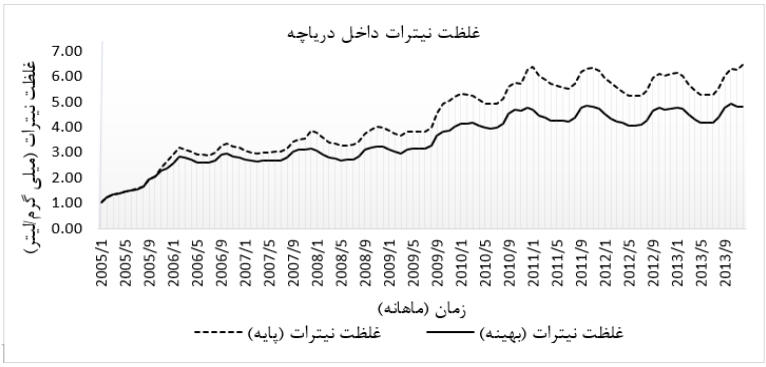
پس از اعمال BMPها در مکان‌های بهینه، انتظار می‌رود شرایط دریاچه بهبود یابد و از میزان بار کل آلاینده ورودی به دریاچه کاسته شود. باتوجه به اهمیت بارکل نیتروژن و فسفر در پدیده تغذیه‌گرایی، میانگین سالانه بار کل فسفر و نیتروژن ورودی به دریاچه شبیه‌سازی شد. نتایج حاصل در جدول (۶) ارائه شده است.

جدول ۶- میانگین سالانه و درصد تغییرات بار کل فسفر (TP) و نیتروژن (TN) در خروجی زیرحوضه‌های منتهی به دریاچه (کیلوگرم)

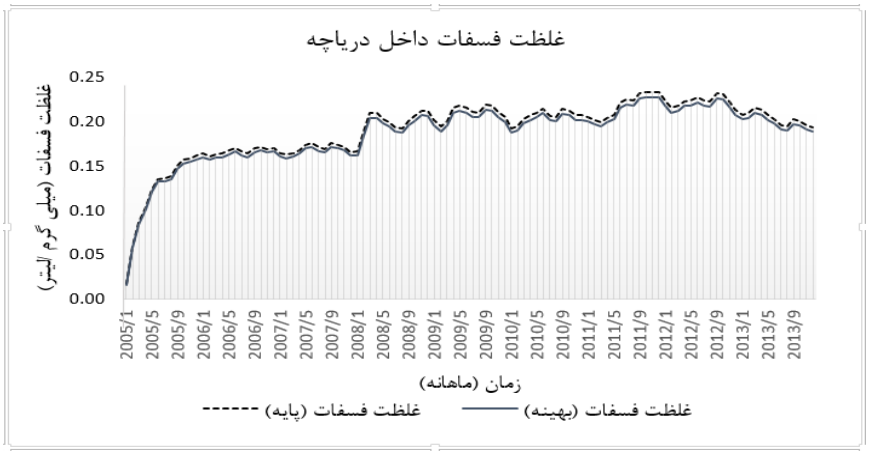
نوع آلاینده		زیرحوضه۱۰	زیرحوضه۱۲	زیرحوضه۱۳	زیرحوضه۱۶	زیرحوضه۱۷	زیرحوضه۲۳	زیرحوضه۲۵	کل
حالت پایه	TN	۳۹۵۴۲/۲	۵۸۱۲/۸	۵۵۷۹۷/۸	۳۳۸۵۸/۹	۷۱۰۳	۳۰۶۷۲/۲	۱۰۰۹/۳	۱۷۳۷۹۶/۲
	TP	۶۹۴۶/۳	۱۶۳۶/۹	۱۵۲۵۷/۸	۸۱۱۰/۱	۵۶۲/۶	۶۰۹۰	۴۹۷/۳	۳۹۱۰۱/۱
حالت بهینه	TN	۲۶۹۳۷/۸	۴۵۹۹/۹	۴۷۴۳۷/۸	۳۱۹۰۱/۱	۶۰۶۹/۶	۱۷۷۳۹/۱	۷۱۱/۶	۱۳۵۳۹۶/۸
	TP	۶۷۵۹/۷	۱۵۹۰/۳	۱۵۱۵۵/۶	۸۰۹۵/۹	۵۴۲/۷	۵۳۷۷/۴	۴۸۷/۹	۳۸۰۰۹/۴
درصد تغییر	TN	۳۱/۹	۲۰/۹	۱۵/۰	۵/۸	۱۴/۵	۴۲/۲	۲۹/۵	۲۲/۱
	TP	۲/۷	۲/۸	۰/۷	۰/۲	۳/۵	۱۱/۷	۱/۹	۲/۸

در شرایط پایه بیشترین بار فسفر و نیتروژن به‌طور میانگین به ترتیب ۱۵۲۵۷/۸ و ۵۵۷۹۷/۸ کیلوگرم در سال از خروجی زیرحوضه ۱۳اُم در شمال شرق دریاچه اتفاق می‌افتد و کم‌ترین بار فسفر و نیتروژن به‌طور میانگین به ترتیب ۴۹۷/۳ و ۱۰۰۹/۳ کیلوگرم در سال از خروجی زیرحوضه ۲۵اُم از جنوب دریاچه وارد می‌شوند. در شرایط اعمال اقدامات مدیریتی بهینه، کاهش ۱۵ درصدی بار نیتروژن در خروجی ۱۳اُم انتظار می‌رود و بیشترین کاهش نسبی بار نیتروژن و فسفر مربوط به خروجی ۲۳اُم به ترتیب به میزان ۱۱/۷ درصد و ۴۲/۲ درصد می‌باشد. نتایج کاهش بار کل نیتروژن و فسفر را به ترتیب ۲۲/۱ و ۲/۸ درصد نشان می‌دهد.

در اثر اعمال اقدامات مدیریتی با الگوی مکانی بهینه، میزان غلظت نیترات و فسفات داخل دریاچه نیز کاهش خواهد داشت، چنانچه در شکل (۶) و (۷) مشاهده می‌شود، غلظت نیترات کاهش محسوسی پیدا کرده است به‌طوری‌که میانگین تغییرات نسبت به حالت پایه ۰/۸۶۱ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد و در پایان دوره نیز نسبت به حالت پایه ۱/۶۴۶ میلی‌گرم در لیتر کاهش مشاهده شده است. غلظت فسفات نیز در طول دوره به‌طور متوسط $۲/۶۵\times۱۰^{-۳}$ میلی‌گرم در لیتر نسبت به حالت پایه کاهش پیدا کرده است. دو مؤلفه نیتروژن و فسفر، هرچند مؤلفه‌های زیست‌محیطی و کیفی محسوب می‌شوند و هردو مسبب پدیده تغذیه‌گرایی هستند، اما بیانگر دو رفتار متفاوت از حوضه آبریز می‌باشند. به‌عنوان مثال، توزیع نیتروژن و افزایش غلظت آن در دریاچه عموماً ناشی از آبشویی بوده اما فسفر تماماً از انتقال رسوب می‌باشد. اینکه در جریان فسفر ورودی به دریاچه تغییر مصرف کود کم‌اثر بوده، می‌تواند ناشی از انتقال فسفات به شکل رسوب به داخل دریاچه باشد لذا در این مقاله با توجه به اعمال گزینه‌های مدیریتی در بخش کشاورزی تفاوت چندانی در میزان غلظت فسفات ورودی به دریاچه حاصل نگردید.



شکل ۶- غلظت نیترات داخل دریاچه (میلی‌گرم/ لیتر)، در شرایط بهینه مدل قطعی نسبت به حالت پایه



شکل ۷- غلظت فسفات داخل دریاچه (میلی‌گرم/ لیتر)، در شرایط بهینه مدل قطعی نسبت به حالت پایه

بررسی میزان بار آلاینده‌ها در کاربری‌های اراضی کشاورزی در حوزه آبخیز

در نتیجه اعمال بهترین اقدامات مدیریتی با الگوی مکانی بهینه و با توجه به اینکه کاربری‌های کشاورزی از اهمیت بیشتری نسبت به کاربری‌های دیگر برخوردار هستند، لذا میزان کاهش بار نیتروژن و فسفر کل به تفکیک کاربری‌های آبی و دیم در کشاورزی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل در جدول (۷) نشان داده شده است.

جدول ۷- درصد کاهش بار نیتروژن کل، فسفر کل خروجی از کاربری‌های کشت آبی و دیم

کاربری اراضی	کشاورزی آبی	کشاورزی دیم
بار کل نیتروژن	۲/۹	<۰/۰۱
بار کل فسفر	۳۵/۸	<۰/۰۱

چنانچه نتایج نیز نشان می‌دهد، با اعمال اقدامات مدیریتی با الگوی مکانی بهینه، بیشترین تأثیر بین اراضی کشاورزی دیم و آبی روی مناطقی است که کشاورزی آبی صورت می‌گیرد. این امر می‌تواند به این دلیل باشد که پساب حاصل از کشت محصولات کشاورزی یکی از اصلی‌ترین عوامل انتقال بار مواد مغذی به سمت دریاچه است. از طرفی نیز با کاهش آب آبیاری و میزان کودهای مصرفی در حوضه، بیشترین کاهش بار آلاینده متوجه اراضی کشاورزی آبی می‌شود. زیرا که در زمین‌های دیم تنها عامل آبشویی آلاینده‌ها و انتقال رسوبات آب باران بوده و با اقدامات مدیریتی انتخاب‌شده در این تحقیق کاهش چشم‌گیر بار مواد مغذی در اراضی کشاورزی دیم انتظار نمی‌رود. چنانچه نتایج به‌دست‌آمده نیز این مسئله را به‌خوبی نشان می‌دهد. به‌منظور بررسی دقیق‌تر تغییرات بار مواد مغذی خروجی از اراضی کشاورزی، جریان کل و شاخص‌های ترکیبی به تفکیک الگوی کشت منطقه در جدول (۸) نشان داده شده است. شاخص ترکیبی اول CI(1) نشان‌دهنده مقادیری است که در آن به‌ترتیب جریان، TN، TP وزن‌های مساوی ۰/۳۳ را دارا است. این مقادیر برای شاخص ترکیبی دوم CI(2) به‌ترتیب برابر ۰/۲ برای جریان، ۰/۳ برای TN و ۰/۵ برای TP می‌باشد. این وزن‌ها با استفاده از روش آنتروپی محاسبه شده‌اند (۳).

جدول ۸- درصد کاهش جریان کل، نیتروژن کل و فسفر کل و شاخص‌های ترکیبی در کاربری کشاورزی

کاربری	محصولات	جریان کل	TN	TP	CI(1)	CI(2)
آبی	سیب	۰	<۰/۰۱	<۰/۰۱	۰	۰
	جو آبی	۱۵/۱	۰/۰۲	۰/۰۴	۱۴	۱۳/۴
	یونجه	۰	<۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱
	شبدر	۳۳/۲	+۰/۵	۱/۸	۲۹/۵	۲۷/۶
	پیاز	۳۷/۲	۴۹/۵	۹۵	۴۳/۵	۵۰/۳
	گندم آبی	۲۷/۲	۱۳/۲	۱۱/۵	۲۴/۶	۲۳/۵
	تنباکو	۱۴/۲	۱۹/۴	۱۷/۱	۱۴/۹	۱۵/۲
	گوجه‌فرنگی	۰	۰	<۰/۰۱	۰	۰
دیم	گندم دیم	-	<۰/۰۱	<۰/۰۱	۰	۰
	باغ انگور	-	۰/۲	۰	<۰/۰۱	<۰/۰۱
	نخود دیم	-	<۰/۰۱	۰	۰	۰
	جو دیم	-	۰	۰	۰	۰

بیشترین کاهش بار نیتروژن و فسفر متوجه کشت‌های پیاز، تنباکو، شبدر و گندم آبی شده است. در کاربری کشت دیم نیز، با اعمال اقدامات مدیریتی با الگوی مکانی بهینه، محصولات تقریباً به مقدار خیلی ناچیز از میزان انتشار بار نیتروژن و فسفر کاسته شده است. با اعمال اقدامات مدیریتی با الگوی مکانی بهینه بار فسفر در کشت پیاز ۹۵ درصد کاهش پیدا کرده و بار نیتروژن نیز ۴۹/۵ درصد کاهش را به‌دنبال خواهد داشت. این در حالی است که جریان کل از این کشت نیز ۳۷/۲ درصد کاهش خواهد یافت و این در اثر کاهش میزان آب آبیاری در این کشت‌ها نیز می‌باشد و تأثیر زیادی نیز روی عملکرد این محصولات خواهد داشت.

نتایج حاصل از بهینه‌سازی نشان‌دهنده این است که کاهش ۶۰ درصدی میزان آب آبیاری محصولات گندم آبی، شبدر و پیاز بیشترین تأثیر را روی بار کل فسفر و نیتروژن خروجی از حوضه دارد. بر اساس نتایج کاهش ۵۰ درصدی کود فسفاته برای اغلب محصولات و کاهش ۶۰ درصدی کود حیوانی در اراضی دیم، باغات سیب، شبدر و گندم آبی تأثیر چشم‌گیری روی کاهش بار کل فسفر نداشته اما تأثیر زیادی روی بار کل نیتروژن خواهد داشت.

ارزیابی عملکرد و درآمد خالص محصولات در منطقه

مدیریت‌هایی که به منظور کاهش بار آلاینده‌ها در سطح حوضه به کار می‌روند، به‌طور مستقیم بر عملکرد محصولات تأثیرگذار هستند، لذا میزان تأثیر این اقدامات بر روی عملکرد محصولات محاسبه شد (شکل ۸). عملکرد محصولات کشاورزی در اغلب محصولات بدون تغییر و یا تغییرات آن ناچیز بوده است. بیشترین تأثیر اعمال اقدامات مدیریتی روی عملکرد پیاز حدود ۳۶- درصد بوده است و پس از آن روی عملکرد تنباکو و گندم آبی به ترتیب ۶/۱- و ۰/۵- درصد تأثیر خواهند گذاشت.

شکل ۸- عملکرد محصولات کشاورزی در شرایط پایه و بهینه (تن/هکتار)

بر اساس جدول ۹ در حالت پایه کل درآمد برابر با ۱۸۲۰۶۲/۶ میلیون‌ریال می‌باشد و از این مقدار ۱۳۴۷۳۳/۲ میلیون‌ریال متعلق به هزینه کاشت و یا داشت این محصولات در طی هرسال است. در حالت بهینه نیز کل درآمد ناخالص متأثر از این اقدامات مدیریتی به میزان ۴/۲ درصد و درآمد خالص کشاورزی ۱۶/۴ درصد کاهش خواهد یافت. این مقدار کاهش برابر است با کاهش ۷۷۸۰/۲ میلیون‌ریال درآمد حاصل از بخش کشاورزی و معادل ۵۱/۹ درصد از بودجه اختصاص داده شده برای احیای دریاچه زریبار می‌باشد (طبق آخرین اخبار از خبرگزاری کشاورزی ایران (ایانا) برای احیاء دریاچه زریبار که سال‌ها است با مشکلات بسیاری روبه‌رو بوده، ۱۵۰۰۰ میلیون‌ریال اعتبار مصوب و نهایی شده است). این مهم حاکی از امکان عملیاتی شدن گزینه‌های مدیریتی پیشنهاد شده از منظر بودجه می‌باشد.

جدول ۹- هزینه، درآمد ناخالص و درآمد خالص بخش کشاورزی (میلیون ریال)

	کل درآمد ناخالص	هزینه‌های ثابت	هزینه BMPها	درآمد
پایه	۱۸۲۰۶۲/۶	۱۳۴۷۳۳/۲	۰	۴۷۳۲۹/۴
بهینه	۱۷۴۳۸۶/۸	۱۳۴۷۳۳/۲	۱۰۸/۵	۳۹۵۴۵/۲
تغییرات(٪)	-۴/۲	۰	-	-۱۶/۴

بررسی و ارزیابی سطح پیاده‌سازی اقدامات مدیریتی

ازنظر عملیاتی اجرای BMPها بستگی به سطح پیاده‌سازی آن‌ها در حوضه دارد. کل مساحت کشاورزی آبی و دیم در حوزه آبخیز دریاچه زریبار برابر ۲۳۰۳/۴ هکتار می‌باشد. در جدول ۱۰ به تفکیک نوع BMP، مساحتی از حوضه که تحت مدیریت قرار خواهد گرفت، ارائه‌شده است. بیشترین سطح پیاده‌سازی مربوط به مدیریت کود حیوانی می‌باشد که در سطحی معادل ۸۶ درصد مساحت اراضی کشاورزی می‌بایست اعمال شود. سطح پیاده‌سازی اقدام خاک‌ورزی با توجه به هزینه تحمیلی آن بر بخش کشاورزی کمترین مساحت را به خود اختصاص داده است.

جدول ۱۰- سطح پیاده‌سازی BMPهای مدیریت کود، مدیریت آبیاری و خاک‌ورزی

نوع BMP / سطح اعمال BMP	خاک‌ورزی (ha)	مدیریت کود دهی (ha)			مدیریت آبیاری (ha)
		کود حیوانی	کود نیتراته	کود فسفاته	
مساحت اعمال BMP	۲۹۶/۱	۱۹۷۵/۵	۸۵۳/۴	۸۶۶/۹	۴۹۱/۹
نسبت به کل اراضی کشاورزی(٪)	۱۲/۹	۸۵/۸	۳۷/۱	۳۷/۶	۲۱/۴

نتیجه‌گیری کلی

هدف اصلی در این تحقیق بهینه‌سازی نوع و موقعیت مکانی بهترین اقدامات مدیریتی برای رسیدن به اهداف کاهش بار فسفر و نیتروژن، حداکثر کردن عملکرد محصولات کشاورزی و حداقل کردن هزینه اجرایی اقدامات مدیریتی بود. لذا به‌طور خلاصه نتایج به‌دست آمده در این تحقیق به شرح زیر است:

کشت‌های آبی نسبت به سایر کاربری‌ها نظیر فعالیت‌های دام‌پروری و روستایی بالاترین سهم را در آلودگی‌های غیر نقطه‌ای (TN و TP) و رواناب دارا می‌باشد. در این کاربری کشت یونجه و پیاز بیشترین سهم انتشار بار نیتروژن را دارا هستند و پس از آن گوجه‌فرنگی و تنباکو به نسبت دیگر محصولات بیشترین سهم را در انتشار بار آلودگی به خود اختصاص داده‌اند. همچنین کشت‌های یونجه، پیاز، گوجه‌فرنگی و تنباکو به ترتیب دارای بیشترین بار فسفر می‌باشند.

بر اساس نتایج حاصل از مدل بهینه‌سازی، در شرایط اعمال اقدامات مدیریتی بهینه کاهش ۱۵ درصدی بار نیتروژن از سمت شمال شرقی دریاچه انتظار می‌رود. همچنین از سمت جنوب دریاچه کاهش بار فسفر به میزان ۱۱/۷ درصد مشاهده می‌شود.

بر اساس نتایج تحقیق میزان کاهش بار کل نیتروژن و فسفر به ترتیب ۲۲/۱ و ۲/۸ درصد به دست آمد. بیشترین میزان کاهش بار نیتروژن کل، فسفر کل، جریان کل و شاخص‌های ترکیبی در اثر اعمال الگوی بهینه اقدامات مدیریتی در کشاورزی آبی صورت می‌گیرد. این امر به دلیل پساب حاصل از کشت محصولات کشاورزی به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین عوامل انتقال بار آلاینده‌ها به سمت دریاچه است. در کاربری کشت دیم نیز، با اعمال اقدامات مدیریتی با الگوی مکانی بهینه، تقریباً به مقدار خیلی ناچیز از میزان انتشار بار نیتروژن و فسفر کاسته خواهد شد.

در شرایط پایه غلظت نیترات داخل دریاچه از ۱ میلی‌گرم در لیتر در اوایل دوره شبیه‌سازی (سال ۲۰۰۵) به حدود ۶/۸ میلی‌گرم در لیتر در انتهای دوره (سال ۲۰۱۳) رسیده است و

غلظت فسفات داخل دریاچه نیز افزایش قابل‌توجهی داشته است چنانچه بر اثر اعمال الگوی بهینه اقدامات مدیریتی در سطح حوضه، غلظت نیترات دریاچه به‌شدت کاهش پیدا خواهد کرد هرچند که غلظت فسفات داخل آن تغییر چشم‌گیری نداشته است، اما با توجه به آستانه‌های مربوط به دریاچه‌های تغذیه‌گرا و نقش کلیدی فسفر در آن کاهش نیتروژن و اعمال گزینه‌های مدیریتی در منطقه به‌تنهایی نتوانست به‌طور قابل توجهی از تغذیه‌گرایی دریاچه بکاهد.

عملکرد محصولات کشاورزی در اغلب محصولات بدون تغییر و یا تغییرات آن ناچیز بود. بیشترین تأثیر اعمال اقدامات مدیریتی روی عملکرد پیاز حدود ٪۳۶- و پس‌ازآن ٪۶/۱- روی عملکرد تنباکو بود.

برای رسیدن به اهداف کاهش بار مواد مغذی در حوضه، حدود ۱۳درصد از اراضی کشاورزی به مدیریت خاک‌ورزی نیاز دارند. همچنین در ۵۹ درصد از اراضی کشاورزی مدیریت کود حیوانی و در ۳۷ درصد از اراضی کشاورزی مدیریت کود فسفاته و نیتراته الزامی خواهد بود. در این راستا حدود ۴۹۲ هکتار از اراضی معادل ۲۱/۴ درصد از اراضی کشاورزی نیازمند مدیریت آبیاری (کاهش آب آبیاری) هستند.

با اعمال اقدامات مدیریتی با الگوی مکانی بهینه در سطح حوضه، درآمد خالص کشاورزی ۱۶/۴ درصد کاهش خواهد یافت. این مقدار کاهش برابر است با کاهش ۷۷۸۰/۲ میلیون‌ریال درآمد حاصل از بخش کشاورزی و معادل ۵۱/۹ درصد از بودجه اختصاص داده شده برای احیای دریاچه زریبار می‌باشد.

PEFERENCES

Asarab Consulting Engineers Co. (2007). Environmental, limnological and ecological balance of Zrebar Lake, Kurdistan Provincial Government.

Ayele, G. T., Teshale, E. Z., Yu, B., Rutherfurd, I. D., Jeong, J. (2017). Streamflow and sediment yield prediction for watershed prioritization in the Upper Blue Nile River Basin, Ethiopia. *Water*, 9(10), 782.

Chiang, L. C., Chaubey, I., Maringanti, C., and Huang, T. (2014). Comparing the selection and placement of best management practices in improving water quality using a multiobjective optimization and targeting method. *International journal of environmental research and public health*, *11*(3), 2992-3014.

Diaz, R. J. and Rosenberg, R. (2008). Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science*, *321*(5891), 926-929.

Dong, F., Liu, Y., Su, H., Zou, R., and Guo, H. (2015). Reliability-oriented multi-objective optimal decision-making approach for uncertainty-based watershed load reduction. *Science of the Total Environment*, *515*, 39-48.

Gitau, M. W., Gburek, W. J., and Jarrett, A. R. (2002, July). Estimating best management practice effects on water quality in the Town Brook watershed, New York. In *Proc. Interagency Federal Modeling Meeting Las Vegas* (Vol. 2, pp. 1-12).

Gitau, M. W., Veith, T. L., and Gburek, W. J. (2004). Farm-level optimization of BMP placement for cost-effective pollution reduction. *Transactions of the ASAE*, *47*(6), 1923-1931.

Imani, S. (2015). Identification of critical source areas (CSAs) based on nutrients concentration in Zrebar Lake and assessment of best management practices (BMPs) using SWAT. Thesis of Master of Science, Faculty of Agriculture, Water Resources Engineering Department, Tarbiat Modares University (TMU), Iran. In Persian.

Imani S., Delavar M., Niksokhan M.H. (2016). Simulation and assessment of management practices for reduction of nutrients discharge to the Zrebar Lake using SWAT model, *Iran - Water Resources Research*, In Persian.

Imani, S., Niksokhan, M. H., Jamshidi, S., & Abbaspour, K. C. (2017). Discharge permit market and farm management nexus: an approach for eutrophication control in small basins with low-income farmers. Environmental monitoring and assessment, 189(7), 346.

Maringanti, C., Chaubey, I., and Popp, J. (2009). Development of a multiobjective optimization tool for the selection and placement of best management practices for nonpoint source pollution control. *Water Resources Research*,*45*(6).

Singh, G., Saraswat, D., Sharpley, A. (2018). A Sensitivity Analysis of Impacts of Conservation Practices on Water Quality in L'Anguille River Watershed, Arkansas. *Water*, 10(4), 443.

Srivastava, P., Hamlett, J. M., Robillard, P. D., and Day, R. L. (2002). Watershed optimization of best management practices using AnnAGNPS and a genetic algorithm. *Water Resources Research*, *38*(3), 3-1.

Yang, W. (2011). A multi-objective optimization approach to allocate environmental flows to the artificially restored wetlands of China's Yellow River Delta. *Ecological modelling*, *222*(2), 261-267.

Yuan, Y. and Bingner, R. L. (2002). Assessment of best management practices for water quality improvement for the Deep Hollow Watershed in Mississippi Delta MSEA project using AGNPS. *Research Rep*, *28*.

Zhang, P., Liu, Y., Pan, Y., and Yu, Z. (2013). Land use pattern optimization based on CLUE-S and SWAT models for agricultural non-point source pollution control. *Mathematical and Computer Modelling*, *58*(3), 588-595.