

تدوین مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی مدیریت تغذیه‌گرایی در مخازن آب سطحی با رویکرد پویایی سیستمها

فریبرز معصومی^{۱*}

تاریخ دریافت: ۹۸/۳/۳ تاریخ اولین بازنگری: ۹۸/۹/۱۳ تاریخ پذیرش: ۹۹/۴/۱ صص: ۴۳-۶۰

چکیده

در این تحقیق برای نخستین بار یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی بر پایه پویایی سیستم با نرم‌افزار Anylogic برای مدیریت تغذیه‌گرایی در مخازن سدها ارائه شده است. بدین منظور روابط عناصر مرتبط با تغذیه‌گرایی در لایه‌های مختلف سد کرخه و در ارتباط با هم در قالب یک مدل پویایی سیستم فرموله شدند. مقایسه نتایج مدل شبیه‌سازی تدوین شده با نتایج مدل‌های شبیه‌سازی CE-QUAL-W2 و Vensim در یک بازه زمانی یکساله نشان داد که مقدار ضریب همبستگی (r^2) برای متغیرهای فسفات، آمونیوم، نترات، اکسیژن محلول و کلروفیل آ بین دو مدل Anylogic و CE-QUAL-W2 به ترتیب برابر ۰/۸۹، ۰/۸۱، ۰/۷۸، ۰/۷۵ و ۰/۸۶ و مقدار این ضریب برای متغیرهای یاد شده بین نتایج دو مدل Anylogic و Vensim برابر ۰/۹۸، ۰/۹۴، ۰/۹۰، ۰/۹۳ و ۰/۹۷ می‌باشند که همبستگی بالای بین نتایج مدل Anylogic را با دو مدل یاد شده نشان می‌دهد.

سپس با ترکیب مدل شبیه‌سازی تدوین شده با مدل بهینه‌سازی بازپخت فلزات، یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی برای تعیین مقادیر بهینه خروجی آب از مخزن، با لحاظ اهداف کمی و کیفی بدست آمد. در اینجا مقدار میانگین مربعات خطاها بین نتایج دو مدل برای لایه‌های پایینی، میانی و بالایی مخزن به ترتیب برابر با ۰/۰۰۴، ۰/۰۰۷ و ۰/۰۱۰ و مقدار ضریب همبستگی (r^2) به ترتیب برابر با ۰/۹۱، ۰/۹ و ۰/۷۹ بودند که حکایت از نزدیک بودن نتایج دو مدل دارد. این درحالی است که زمان اجرای مدل SA-Anylogic به مراتب کم‌تر از مدل SA-CE_QUAL_W2 می‌باشد. بدین ترتیب مطالعه حاضر کارآیی مدل پیشنهادی را در مدیریت تغذیه‌گرایی مخازن سدها نشان داد.

واژه‌های کلیدی: تغذیه‌گرایی، شبیه‌سازی-بهینه‌سازی، پویایی سیستم، مخزن سد کرخه، شبیه‌سازی بازپخت، مدل شبیه‌سازی Anylogic

^۱ استادیار گروه مهندسی عمران دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه محقق اردبیلی

* نویسنده مسؤل مقاله: f_masoumi@uma.ac.ir

مقدمه

یکی از بزرگترین مشکلات کیفی که در نتیجه احداث سد در آب سطحی ایجاد می‌شود، تغذیه‌گرایی هست. پدیده تغذیه‌گرایی به معنای رسیدن مواد مغذی^۱ به رسوبات و پیکره آب مخزن سدها یا دریاچه‌ها و به تبع آن رشد بی‌رویه گیاهان آبی تا حدی است که کیفیت آب مخزن را تا حد نامطلوبی کاهش دهد (افشار و معصومی (۲۰۱۶)). مخازن سدها با ذخیره منابع آب شیرین، باعث سکون و تجمع حجم آب جاری جریان طبیعی رودخانه شده و بدین ترتیب با تغییر در الگوی جریان طبیعی رودخانه باعث ایجاد تغییر در کیفیت آب بالادست، داخل و پائین‌دست سد می‌شوند (فریدل و ووست (۲۰۰۲)). همچنین بالا رفتن زمان ماند آب در اثر احداث سد، تغییر در دمای آب و ایجاد لایه‌بندی حرارتی نیز باعث تغییرات شدید کیفیت آب پس از احداث مخزن می‌گردند (هارمون (۲۰۱۴)).

فعالیت‌های مرتبط با مدیریت کیفیت آب در مخازن را به طور کلی می‌توان به سه دسته ۱- اعمال کنترل بر کیفیت آب ورودی با کارهایی همچون پیش‌تصفیه جریانهای ورودی، ۲- مدیریت درون مخزن با اعمالی همچون هوادهی و تریق و ۳- مدیریت جریان آب خروجی از مخزن با اعمالی همچون برداشت انتخابی از لایه‌های مختلف تقسیم نمود (معصومی (۱۳۹۴)، سعادتپور (۱۳۹۱)). در این مقاله اعمال مدیریت از نوع سوم مدنظر می‌باشد. تلاش‌های اولیه انجام شده در زمینه مدیریت کیفیت آب در مخازن با رویکرد مدیریت جریان آب خروجی عمدتاً مبتنی بر تدوین سناریوها و استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی استوار بود. در این زمینه می‌توان مطالعات ارزشمند انجام شده توسط وورب و کاراما (۱۹۹۵)، نیومن و همکاران (۲۰۰۶)، استامو و همکاران (۲۰۰۷) و افشار و همکاران (۲۰۱۲) را نام برد. از مهم‌ترین تحقیقات منتشر شده داخلی هم می‌توان به سلیمانی و همکاران (۲۰۱۹) اشاره کرد که با ترکیب مدل شبیه‌سازی کیفی CE_QUAL_W2 و فرامدل SVR^۲ به مدیریت کیفیت آب مخزن کرخه اقدام کردند.

اشکال عمده تحقیقات اشاره شده را می‌توان در بهینه نبودن نتایج سیاست‌های استخراجی آنها به دلیل محدودیت در تعداد سناریوهای قابل بررسی در هر تحقیق عنوان کرد. جهت غلبه بر مشکل یاد شده محققان در پی تدوین مدل‌های شبیه‌سازی-بهینه‌سازی برای مدیریت کمی-کیفی مخازن برآمدند. از مهم‌ترین تحقیقات انجام شده در این زمینه می‌توان به تحقیق انجام شده توسط چاوز و همکاران (۲۰۰۴) اشاره کرد که با استفاده از برنامه‌ریزی پویای احتمالاتی، قوانین بهره‌برداری از مخزن را با اهداف کمی و کیفی استخراج نمودند. اهداف کمی تحقیق آنها شامل مواردی همچون پایداری میزان دبی خروجی و نیز تولید انرژی برقی و اهداف کیفی شامل تنظیم غلظت متغیرهای کیفی آب خروجی از سد شامل متغیرهایی همچون ازت، غلظت فسفر، غلظت اکسیژن محلول، غلظت BOD^۳ و غلظت کلروفیل آ بودند.

در یک کار تحقیقاتی دیگر ژانگ و همکاران (۲۰۱۱)، به استخراج سیاست‌های بهره‌برداری بهینه از مخازن در یک حوضه آبریز با رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی اقدام نمودند. آنها در این تحقیق از مدل شبیه‌سازی SWAT^۴ و مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک استفاده کردند. حداکثر نمودن حجم آب موجود در مخازن و بهبود شرایط کیفیت در مخازن برای پارامتر کیفی COD^۵ اهداف آنها در تحقیق مورد اشاره بود.

از دیگر تحقیقات انجام شده در زمینه استفاده از رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی می‌توان تحقیق انجام شده توسط کراچیان و کارآموز (۲۰۰۷) را نام برد که یک مدل غیرقطعی حل اختلاف را به منظور مدیریت کیفی و کمی در یک سیستم مخزن-رودخانه با هدف تامین نیازهای کمی و رعایت پارامترهای کیفی ارائه کردند. متغیرهای تصمیم در مساله مورد تحقیق آنها، تعیین مقادیر رهاسازی جریان از هر یک از آبگیرهای مخزن و نیز مقادیر مورد لزوم برای حذف آلاینده‌های نقطه‌ای در پایین‌دست بوده است. از تحقیقات مشابه انجام شده در ادامه این کار تحقیقاتی یاد شده می‌توان به شیرنگی و همکاران (۲۰۰۸)، کارآموز و همکاران (۲۰۰۸) و (۲۰۰۹)، و سلطانی و همکاران (۲۰۱۰) اشاره کرد. در تحقیقات مورد اشاره، یا از

⁴ Soil and Water Assessment Tool

⁵ Chemical Oxygen Demand

¹ Nutrients

² Support Vector Regression

³ Biochemical Oxygen Demand

سلیمانی و همکاران (۲۰۱۶)، جواهری و سعادت پور (۱۳۹۶) و سعادت پور و همکاران (۲۰۲۰) اشاره کرد. این تحقیقات نیز اگر چه توانسته بودند تا حدود زیادی زمان اجرای مدل ها را کاهش دهند، لکن همین زمان اجرای باقیمانده نیز مشکل ساز و نامطلوب به شمار می رود.

همانطور که مشاهده می شود در استفاده از رویکرد شبیه سازی-بهینه سازی با شبیه سازی های پارامتر گسترده، (چه یکبعدی و چه دو بعدی) زمان قابل توجهی است. رویکرد پویایی سیستم پاسخی به این مشکل می باشد. در رویکرد پویایی سیستم، مساله به صورت دینامیک و با در نظر گرفتن اندرکنش عوامل مختلف تاثیرگذار بر روی هم مدل می شود (استرمن (۲۰۰۰)، فورستر (۱۹۶۱)). در تحقیقات مختلف کارآیی رویکرد پویایی سیستم در مدیریت سیستم های منابع آب گزارش شده است (وزجاک و همکاران (۱۹۹۸)، المهدی و همکاران (۲۰۰۷)، احمد و سیمونویچ (۲۰۰۴)، سیمونویچ و فهمی (۱۹۹۹)، اوهب یزدی و احمدی (۱۳۹۷)، نظری شرابیان و همکاران (۲۰۱۹)). ماشالی و فرنال (۲۰۲۰) در یک مطالعه جامع به مرور استفاده از رویکرد پویایی سیستم ها در مباحث مختلف مرتبط با مهندسی آب پرداختند.

اوهب یزدی و همکاران (۱۳۹۷) به شبیه سازی و ارزیابی رفتار و تعاملات ذینفعان و شرکت آب منطقه ای تحت چارچوب مدل سازی عامل بنیان در محدوده نجانان حوضه زاینده رود پرداختند. مطالعه آنها نشان داد که رویکرد پویایی سیستم ها و شبیه ساز Anylogic ابزارهای مناسبی برای شبیه سازی سیستم هایی که دارای اجزای متعددی که در تعامل با یکدیگر هستند، می باشد.

در زمینه شبیه سازی تغذیه گرای مخزن با رویکرد پویایی سیستم نیز گزارشهای مختلفی منتشر شده است (افشار و همکاران (۲۰۱۲)، افشار و سعادت پور (۲۰۰۹)). تحقیق انجام شده توسط افشار و همکاران (۲۰۱۲) توانسته با تقسیم مخزن به سه لایه؛ رولایه، لایه میانی و زیر لایه؛ و با لحاظ کردن اندرکنش بین موادی همچون فسفر محلول، فرمهای مختلف نیتروژن، اکسیژن محلول (DO^3)، مقدار کلروفیل آ و غیره، به شبیه سازی دقیق تغذیه گرای در مخزن در محیط ونسیم^۴ پردازد. در تحقیق یاد شده، مقایسه نتایج مدل

مدل شبیه سازی یکبعدی همچون WQRSS یا از فرامدلهایی همچون ANN^۱ و ANFIS^۲ در ترکیب با مدل بهینه سازی استفاده شده بود.

در زمینه استفاده از مدل های شبیه سازی دو بعدی در ترکیب با مدل های بهینه سازی نیز تحقیقات چندی منتشر شده است. دهار و داتا (۲۰۰۸) از ترکیب الگوریتم ژنتیک به عنوان مدل بهینه سازی و CE-QUAL-W2 به منظور رسیدن به اهداف گوناگون کمی-کیفی از قبیل افزایش حجم آب موجود در مخزن، تامین نیازهای کمی پایین دست و بهبود شرایط کیفی آب استفاده کردند. به دلیل زمان اجرای فوق العاده زیاد مدل پیشنهادی در تحقیق یاد شده، مدل صرفاً برای یک دوره زمانی هیدرولوژیکی ۱۰ روزه اجرا شده بود. در تحقیقات دیگر، سعادت پور و افشار (۲۰۱۱) با استفاده از رویکرد شبیه سازی-بهینه سازی به تعیین مقادیر بهینه رهاسازی جریان با سیاست برداشت انتخابی از آبگیرهای مخزن سد ایلام در شرایط مواجهه با آلودگی ناگهانی پرداختند. مدل شبیه سازی آنها در این تحقیقات مدل CE-QUAL-W2 و مدل بهینه سازی آنها مدل PSO بود. در این تحقیقات نیز به دلیل زمان اجرای بالای مدلها، صرفاً برای یک دوره هیدرولوژیکی ۴۵ روزه، مدلها اجرا شدند. جهت غلبه بر این محدودیت زمانی اجرای مدل های شبیه سازی دوبعدی-بهینه سازی و حجم و زمان بالای محاسبات در مساله مدیریت کمی-کیفی مخازن، محققان تلاش نمودند از ترکیب شبیه ساز دوبعدی-بهینه ساز-فرامدل استفاده نموده و بدین ترتیب حجم و زمان محاسبات را به مقدار بسیار زیادی کاهش دهند. در دو تحقیق مجزا افشار و معصومی (۱۳۹۴) و معصومی و همکاران (۲۰۱۶) با تدوین مدل PSO-CE_QUAL_W2-ANN موفق به مدیریت کمی-کیفی مخزن سد کرخه برای حل مشکل تغذیه گرای سد در یک بازه زمانی ۱۵ ساله شدند. از مهم ترین تحقیقات انجام شده دیگر در این زمینه می توان به تحقیق افشار و همکاران (۲۰۱۸) اشاره کرد که با تلفیق مدل های بهینه سازی، شبیه سازی و فرامدل به مدیریت کمی-کیفی آب در یک سیستم رودخانه-مخزن با در نظر گرفتن شاخص اطمینان پذیری پرداختند. از تحقیقات مشابه انجام شده در این زمینه می توان به سعادت پور (۲۰۱۷)،

³ Dissolved Oxygen

⁴ Vensim

¹ Artificial Neural Network

² Adaptive Network-based Fuzzy Inference System

ساخته شده با رویکرد پویایی سیستم با نتایج مدل پارامتر گسترده دو بعدی CE-QUAL-W2 نشان‌دهنده دقت مناسب و کارایی قابل قبول رویکرد پویایی سیستم بود. از دیگر تحقیقات انجام شده برای مدیریت تغذیه‌گرایی در مخازن می‌توان تحقیقات انجام شده توسط کارآموز و همکاران (۲۰۱۰) و کارآموز و طاهرپور (۲۰۱۰) را نام برد. هرچند در این تحقیقات از رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی با شبیه‌سازی پویایی سیستم استفاده شده بود، لکن مدل تغذیه‌گرایی ساخته شده به صورت توده‌ای (صفربعدی) ساخته شده بود که بالطبع فرض اختلاط کامل در مخزن، بالاخص برای مخازن بزرگ از دقت مناسب برخوردار نیست.

تحقیق حاضر تلاش نموده که برخی از کاستی‌های تحقیقات قبلی را پوشش دهد. به این ترتیب ضمن ساخت مدل شبیه‌سازی با در نظر گرفتن پارامترهای موثر تغذیه‌گرایی در لایه‌های مختلف مخزن در محیط شبیه‌سازی Anylogic و مقایسه نتایج شبیه‌سازی جدید با نتایج مدل CE-QUAL-W2 و نیز Vensim، با لینک شبیه‌سازی ایجاد شده به بهینه‌سازی بازپخت فلزات (SA¹)، یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی تهیه نموده است. ساخت مدل شبیه‌سازی با نرم‌افزار Anylogic و نیز تدوین مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی با رویکرد پویایی سیستم برای تغذیه‌گرایی مخازن را می‌توان جزء نوآوری‌های اصلی این تحقیق برشمرد.

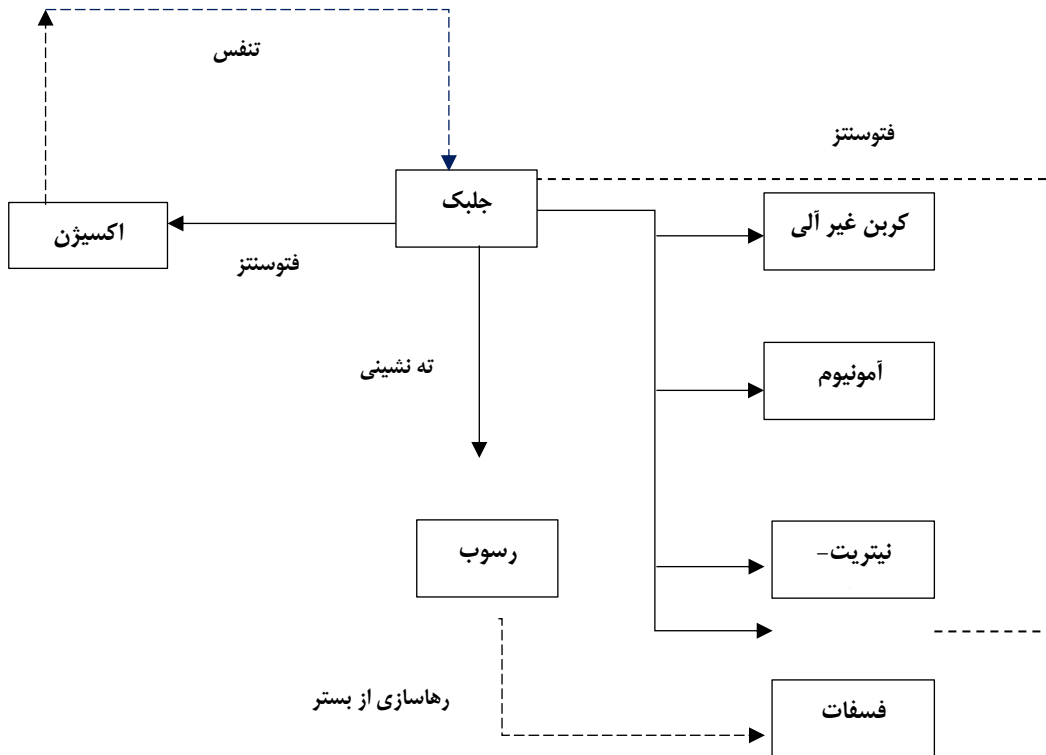
روش انجام تحقیق

تغذیه‌گرایی در مخازن

یکی از بزرگترین مشکلات کیفی که در نتیجه احداث سد در رودخانه‌ها ایجاد می‌شود، مشکل تغذیه‌گرایی می‌باشد. از مهمترین علائم تغذیه‌گرایی مخازن می‌توان به رشد بی‌رویه و زیاده از حد جلبکها، گیاهان و علفها در پیکره‌های آبی اشاره کرد که باعث کاهش شفافیت و تغییر رنگ آب به سبز، قرمز یا قهوه‌ای، کاهش میزان اکسیژن محلول و حتی حذف کامل آن از لایه‌های پائینی مخزن در فصل تابستان

می‌شود که این امر باعث سمی، بدبو و بدمزه شدن آب می‌گردد (معصومی (۱۳۹۴)، سعادتپور (۱۳۹۱)، بووی (۲۰۰۰)). مواد مغذی اصلی موثر در فرآیند تغذیه‌گرایی، کربن، نیتروژن، فسفر و سیلیسیم می‌باشند. البته سیلیسیم فقط برای رشد دیاتومه‌ها که گروهی از جمعیت جلبکی هستند دارای اهمیت می‌باشد. هرچند برخی مواد ریزمغذی دیگر مانند آهن، منگنز، گوگرد، روی، مس، کبالت و مولیبدن نیز در فرآیند تغذیه‌گرایی مخازن موثر می‌باشند ولی آن‌ها را در مدلسازی کیفی آب مدنظر قرار نمی‌دهند، چرا که فقط به مقدار ناچیزی مورد نیاز هستند و اغلب به مقدار کافی در دسترس ارگانیزم‌ها هستند (معصومی (۱۳۹۴)). نکته دیگری که باید در نظر گرفت این است که هرچند مواد مغذی به شکل‌های مختلفی در سیستم‌های آبی وجود دارند، لکن فقط شکل‌های معدنی محلول برای رشد جلبک قابل استفاده‌اند.

در طی فرآیند فتوسنتز، جلبک‌ها و گیاهان آبی، مواد معدنی محلول در آب را مصرف می‌کنند. سپس این مواد مغذی معدنی محلول از طریق مدفوع محلول ارگانیزم-ها، تجزیه رده‌های آلی و مواد رسوبی و هیدرولیز مواد مغذی آلی محلول، دوباره به آب بر می‌گردند. مواد مغذی ذره‌ای معلق نیز از طریق مدفوع ذره‌ای جانوران آبی و مرگ و میر ارگانیزم‌های پلانکتونی تولید می‌گردند. همچنین مواد مغذی در ریزه‌های آلی و فیتوپلانکتون رسوبی نیز وجود دارند و تجزیه ریزه‌های آلی معلق و رسوبات آلی موجب رها شدن مواد مغذی محلول در آب می‌شود (معصومی (۱۳۹۴)). بدین ترتیب مشاهده می‌شود که بسیاری از موارد موثر در فرآیند تغذیه‌گرایی در آب حالت چرخه‌ای و پویا دارند. از این رو، رویکرد پویایی سیستم ابزار مناسبی برای بیان این فرآیند می‌باشد (افشار و همکاران (۲۰۱۲)). در شکل شماره (۱)، رابطه کلی عناصر موثر بر تغذیه‌گرایی در مخازن سدها به صورت شماتیک آورده شده است.

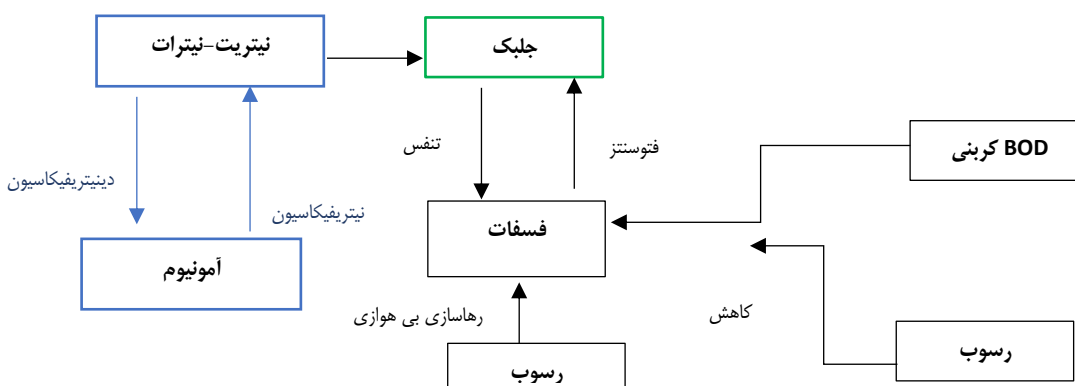


شکل ۱- رابطه کلی عناصر موثر بر تغذیه‌گرایی در سیستم‌های منابع آب سطحی (چپرا (۲۰۰۰)، بووی (۲۰۰۰))

می‌شود لکن به طور وسیعی نیز از طریق کودهای شیمیایی در زمین‌های زراعی مصرف می‌گردد. منبع دیگر ورود فسفات به منابع آب و خاک، ورود از طریق فضولات حیوانی است. یکی دیگر از عناصری که در تغذیه‌گرایی مخازن نقش اساسی ایفا می‌کند، نیتروژن (ازت) می‌باشد. ازت برای موجودات زنده جهت ساخت پروتئین‌ها و مواد ژنتیکی مورد نیاز است. گیاهان و میکروارگانیسم‌ها ازت غیرآلی را به شکل آلی تبدیل می‌کنند. ازت به اشکال مختلفی در آبها یافت می‌شود که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از: ازت آزاد N_2 آمونیاک NH_3 - آمونیم NH_4^+ ، نیترات (NO_3^-) ، نیتريت (NO_2^-) ازت آلی. شکل شماره (۲) نقش شماتیک حالات مختلف فسفر ازت در تغذیه‌گرایی را نشان می‌دهد.

مدل مفهومی تغذیه‌گرایی

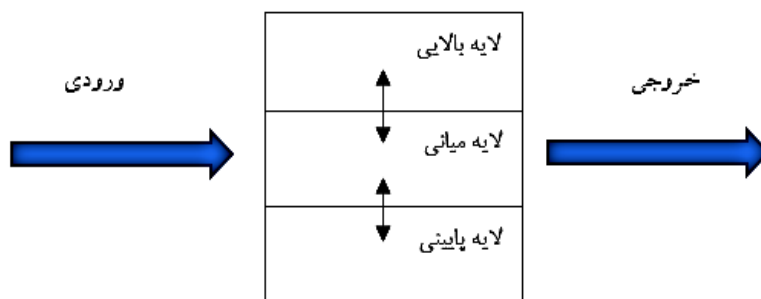
هر کدام از عناصر موثر در تغذیه‌گرایی، دارای چرخه درونی با ساختارهای متعدد تشکیل دهنده خود و نیز دیگر عناصر هستند. در بسیاری از تحقیقات انجام شده همچون معصومی و همکاران (۲۰۱۶) فسفر به عنوان کنترل کننده تغذیه‌گرایی در مخازن معرفی شده است. دلیل این امر به مقدار بسیار اندک و ناچیز بودن این ماده نسبت به مواد دیگر در پیکره‌های آبی برمی‌گردد. به همین دلیل در تحقیقات بسیاری کنترل بار فسفر مخزن را مساوی با کنترل مغزی شدن آن می‌دانند. فسفر در محیط‌های آبی به صورت ارتوفسفات‌ها (HPO_4^{2-} ، PO_4^{3-})، پلی‌فسفات‌ها و فسفات‌های آلی وجود دارد. فسفات نیز هرچند به طور طبیعی در خاک‌ها یافت



شکل ۲- رابطه کلی فسفر و ازت با دیگر عناصر مغزی در سیستم آبی

حرارتی روی می‌دهد، لایه میانی (ترموکلاین^۱) ارتباط میان لایه بالایی^۲ و لایه پایینی^۳ را با مانع و سختی مواجه می‌سازد. لایه میانی لایه‌ای کم عمق با تغییرات شدید دمایی است (شکل ۳).

همانطور که گفته شد برای مطالعه تغذیه‌گرایی در این تحقیق، مخزن به سه لایه تقسیم‌بندی می‌شود. دلیل این امر وجود لایه‌بندی حرارتی در مخازن بزرگ از جمله در سد کرخه هست. در مخازنی که رخداد لایه‌بندی



شکل ۳- تقسیم‌بندی فیزیکی و انتقال جرم بین لایه‌ها

آنها به دلیل مرگ و میر، ته‌نشینی و نیز رشد زئوپلانکتونهای گیاه‌خوار است (چیرا (۲۰۰۰)، بووی (۲۰۰۰))، به دلیل فراوانی کربن غیر معدنی، این عنصر در معادلات لحاظ نشده است. روابط حاکم در چرخه فیتوپلانکتون‌ها به صورت زیر است:

$$AG(T, n_t, p_s, I) = AG_{20^\circ C} \text{Min} \left(\frac{n_t}{n_t + K_{sn}}, \frac{p_s}{p_s + K_{sp}} \right) \times 2.718 \times f \times (e^{-\alpha_1} - e^{-\alpha_0}) / (K_e H) \quad (4)$$

$$\alpha_1 = \frac{I_a}{I_s} e^{-H_1} \quad (5)$$

$$\alpha_0 = \frac{I_a}{I_s} e^{-H_2} \quad (6)$$

$$H = H_1 - H_2 \quad (7)$$

$$K_e = K'_e + 0.0088a + 0.054a^{2/3} \quad (8)$$

در این روابط $AG(T, n_t, p_s, I)$ عبارتست از سرعت رشد جلبک در دمای T ، غلظت نیتروژن n_t ، غلظت فسفر p_s و شدت نور I . همچنین در این روابط، K_e ضریب کاهش یا انقراض نور، α_0 و α_1 : فاکتور میرایی نور در لایه بالا و پایین، H_1 و H_2 : عمق در بالا و پایین یک لایه، I_a و I_s به ترتیب شدت نور متوسط روزانه و سطح روشنایی بهینه می‌باشد. K'_e نیز ضریب کاهش نور در ارتباط با فاکتورهای غیر از فاکتور فیتوپلانکتون‌هاست. سرعت تغییر

اگر شکل ساده تقسیم‌بندی عمقی را در مخزن در نظر بگیریم معادلات تعادل جرمی بین لایه‌های مختلف به صورت زیر خواهد بود (افشار و همکاران (۲۰۱۲)):

$$V_1 \frac{\partial c_1}{\partial t} = W_1(t) - Q_1 c_1 + v_{1-2t} A_{2t} (c_2 - c_1) + S_1 \quad (1)$$

$$V_2 \frac{\partial c_2}{\partial t} = W_2(t) - Q_2 c_2 + v_{1-2t} A_{2t} (c_1 - c_2) + v_{2-3t} A_{3t} (c_3 - c_2) + S_2 \quad (2)$$

$$V_3 \frac{\partial c_3}{\partial t} = W_3(t) - Q_3 c_3 + v_{2-3t} A_{3t} (c_2 - c_3) + S_3 \quad (3)$$

در روابط فوق V, c و t به ترتیب حجم المان محاسباتی، غلظت و زمان می‌باشند. $W(t), Q, A_{jt}, \theta_t$ نیز به ترتیب بار آلودگی، دبی خروجی، ضریب انتقال بین لایه‌ای (ضریب پخشیدگی)، سطح مقطع لایه z ، و نیز منبع تغذیه یا تخلیه در لایه z است. θ_{k-t} نیز بیانگر ضریب پخشیدگی میان لایه k و l در زمان t است.

در چرخه غذایی فیتوپلانکتونها، رشد جلبک تابعی از دما، مواد مغذی و تابش خورشید است. معادله حاکم برای رشد جرم جلبک شامل رشد فیتوپلانکتونها و نیز کاهش

³ Hypolimnion

¹ Thermocline

² Epilimnion

شبیه‌ساز به عنوان یک ماجول در دل بهینه‌ساز فراکاووشی قرار می‌گیرد.

همانطور که در بخش‌های پیشین نیز گفته شد، در این مقاله بهینه‌ساز برداشت از لایه‌های مختلف مخزن برای کنترل تغذیه-گرایی مدنظر است. شاخص‌های مختلفی برای بررسی تغذیه‌گرایی مخازن مطرح شده است. در این مطالعه از شاخص ارائه شده توسط کارلسون^۱ در سال (۱۹۷۷) استفاده شده است:

$$TSI(TP) = 14.42 \ln(TP) + 4.15 \quad (11)$$

در این رابطه، TSI شاخص تغذیه‌گرایی و TP مقدار فسفر کل بر حسب ($\mu g/litre$) می‌باشد. در این مطالعه فرض شده است که تغذیه‌گرایی زمانی رخ می‌دهد که $TSI > 50$ (معصومی و همکاران (۲۰۱۶)). در این مساله می‌توان تابع هدف را حداقل کردن حجم کمبود آب نسبت به نیازهای آبی تعریف نمود. بدین ترتیب متغیرهای تصمیم نیز عبارت خواهند بود از حجم آب قابل برداشت در ماههای مختلف از لایه بالایی و نیز لایه میانی مخزن. روابط مربوط به تابع هدف به صورت زیر خواهد بود:

$$Objectivefunction = \min (Deficit) \quad (12)$$

$$Deficit = \sum_{k=1}^{NDS} \sum_{t=1}^T \left(1 - \frac{R_k(t)}{R_k(t)}\right)^2 \quad (13)$$

محدودیت‌های مساله فوق عبارتند از:

$$S(t+1) = S(t) + I(t) - E(t) - R_k(t) - R_s(t) \quad (14)$$

$$R_k(t) = \sum_{w=1}^W R_k^w(t) \quad (15)$$

$$R_s(t) \geq R_E(t) \quad (16)$$

$$S_{min} \leq S(t) \leq cap \quad (17)$$

$$Area(t) = a \times \frac{S(t) + S(t+1)}{2} + b \quad (18)$$

$$E(t) = he(t) \times \frac{Area(t) + Area(t+1)}{2} \quad (19)$$

$$C_j(t) = f(x) \quad (20)$$

$$TSI(t) = f(C_j(t)) \quad (21)$$

غلظت جلبک در لایه هیپولیمینیون از رابطه زیر تخمین زده می‌شود (چپرا (۲۰۰۰)، بووی (۲۰۰۰)):

$$V \frac{\partial a}{\partial t} = AG(T, n_t, p_s, I) V_a - k_{ra}(T) V_a - C_{gh}(T, a, z_h) V_a + v_a A_t a_u - v_a A_t a \quad (9)$$

$$C_{gh}(T, a, z_h) = \frac{a}{a+k_{sa}} C_{gh} \theta^{T-20} z_h \quad (10)$$

در این روابط نیز V برابر با حجم، A_a برابر با حجم کلروفیل آ، $k_{ra}(T)$ برابر با میزان تنفس/میزان دفع جلبک، C_{gh} برابر با ضریب میرایی ژئوپلانکتون گیاهی و z_h نیز برابر با غلظت ژئوپلانکتون گیاهی می‌باشد. معادلات متعدد دیگری نیز برای شبیه‌سازی چرخه تغذیه‌گرایی وجود دارد که در این تحقیق و در ساخت مدل شبیه‌ساز مورد استفاده قرار گرفتند که بیان آنها در این مقاله باعث افزایش حجم مقاله می‌شود. از این رو جهت مطالعه چرخه سایر عوامل تاثیرگذار و نیز فرمولاسیون روابط فیما بین به معصومی (۱۳۹۴)، چپرا (۲۰۰۰) و بووی (۲۰۰۰) مراجعه شود.

فرمولاسیون مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی

همانطور که گفته شد یکی از نوآوری‌های اصلی این مقاله ایجاد ارتباط بین بهینه‌ساز و شبیه‌ساز پویایی سیستم برای مدیریت تغذیه‌گرایی در مخازن است. واضح و مبهرن است که به دلیل پیچیدگی‌های فراوان و غیرخطی بودن مدل شبیه‌ساز، ارتباط آن با مدل‌های بهینه‌ساز ریاضیاتی کلاسیک و استفاده از آنها همچون مدل برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی غیرخطی و برنامه‌ریزی پویا غیرممکن و در حالت خوشبینانه بسیار سخت به نظر می‌رسد. مدل‌های بهینه‌ساز فراکاووشی همچون مدل الگوریتم ژنتیک، الگوریتم هوش جمععی ذرات، الگوریتم تبرید فلزات و امثال آن، ابزار خوبی برای غلبه بر مشکل یاد شده و استفاده در قالب هیبرید شبیه‌سازی-بهینه‌سازی برای مساله مدیریت تغذیه‌گرایی هستند. بهینه‌سازهای فراکاووشی برای رسیدن به جواب بهینه نیازمند فراخوانی مدل شبیه‌ساز به تعداد دفعات بسیار زیاد هستند. به عبارت دیگر می‌توان چنین تصور کرد که

¹ Carlson

مسائل بهینه‌سازی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. برای کسب اطلاعات بیش‌تر درباره این الگوریتم به کیرک پاتریک (۱۹۸۳) مراجعه شود.

معرفی نرم‌افزار شبیه‌سازی ANYLOGIC

نرم‌افزار شبیه‌سازی Anylogic، محصول شرکت XJ technologies، به عنوان یکی از مهم‌ترین نرم‌افزارهای شبیه‌سازی پویا است که توانسته به طور همزمان امکان شبیه‌سازی سیستم‌های پویا، شبیه‌سازی گسسته پیشامد^۱ و شبیه‌سازی عامل بنیان^۲ را برای کاربران فراهم نماید تا آن‌ها بتوانند در یک محیط نرم‌افزاری به طور همزمان مدل خود را با استفاده از روش‌های فوق‌العاده، بسط و توسعه دهند. نرم‌افزار AnyLogic هم دارای زبان مدلسازی به صورت گرافیکی و هم دارای امکان استفاده از زبان Java برای توسعه این مدل است. استفاده از Java این امکان را برای کاربران فراهم می‌سازد تا بدون محدودیت و با استفاده از کدنویسی، مدل شبیه‌سازی سیستم مورد نظر خود را به صورت کاملاً منعطف بسازند. همچنین امکان استفاده از هر نوع مدل بهینه‌ساز فراکاوچی با استفاده از کدنویسی در محیط Java فراهم است.

نتایج و بحث

همانطور که گفته شد سد مخزنی کرخه به عنوان یک مطالعه موردی در این تحقیق انتخاب شده است. رودخانه کرخه به عنوان یکی از بزرگترین رودخانه‌های کشور است که بخش انتهایی آن در استان خوزستان واقع شده است. حوضه آبریز کرخه به لحاظ تقسیم‌بندی کلی هیدرولوژی ایران جزئی از حوضه آبریز خلیج فارس می‌باشد. این رودخانه از به هم پیوستن رودخانه‌های کوچک و بزرگ متعددی، از جمله سه رودخانه بزرگ گاماسیاب، قره‌سو و کشکان تشکیل شده و در نهایت به هورالعظیم می‌ریزد. یکی از بزرگترین دلایل اهمیت رودخانه کرخه، حوضه آبریز بسیار وسیع آن با داشتن مساحتی حدود ۵ میلیون هکتار و وجود بزرگترین سد خاکی خاورمیانه بر روی آن است. این حوضه آبریز در غرب کشور و در مناطق میانی و جنوب غربی رشته کوه‌های زاگرس قرار داشته و از نظر مختصات جغرافیایی بین 30° تا 36° و 46° تا 49° عرض شمالی واقع شرقی و بین 58° تا 30° و 56° تا 34° عرض شمالی واقع گشته است. میانگین بارندگی در حوزه کرخه از حدود ۱۵۰ میلی‌متر در سال در مناطق جنوبی تا فترات از ۱۰۰۰ میلی‌متر در سال در ارتفاعات شمالی و مناطق شرقی کرخه علیا

$$TSI \leq 50 \quad (22)$$

در روابط فوق $G_j(t)$ غلظت متغیر کیفی در زمان t در لایه Z می‌باشد که توسط مدل شبیه‌ساز برآورد می‌گردد. T تعداد ماههای دوره شبیه‌سازی، $S(t)$ حجم آب در مخزن در ماه t ، $I(t)$ ورودی آب به سیستم رودخانه-مخزن در ماه t ، $E(t)$ تبخیر آب از مخزن در ماه t ، $he(t)$ تبخیر از سطح آزاد آب در ماه t برحسب Cap ، mm برابر با حجم کل مخزن، S_{min} برابر با حجم مرده یا غیرفعال مخزن، $Area(t)$ برابر با مساحت سطح آب در مخزن در ماه t ، $R_k^w(t)$ برابر با حجم آب خروجی از دریچه شماره w برای تامین نیازهای آبی پایین دست در ماه t ، $R_E(t)$ برابر با نیاز زیست‌محیطی پایین دست مخزن در ماه t ، $R_s(t)$ برابر با سرریز آب از مخزن در ماه t می‌باشد. w برابر با تعداد دریچه‌های سد می‌باشد. در مطالعه موردی بر روی سیستم رودخانه-مخزن کرخه، تعداد دریچه‌های بهره-برداری دو دریچه می‌باشد.

معرفی الگوریتم بهینه‌ساز تبرید فلزات

الگوریتم تبرید یا شبیه‌سازی حرارتی فلزات، یکی از الگوریتم‌های معروف و پرکاربرد فراکاوچی است. این الگوریتم در سال ۱۹۸۳ و توسط کیرک پاتریک و گلات ابداع و معرفی شده است. اغلب الگوریتم‌های فراکاوچی با الگوگیری و شبیه‌سازی یکی از قوانین یا روابط موجود در طبیعت بنا نهاده و معرفی و فرموله شده‌اند. اساس و منطق الگوریتم شبیه‌ساز تبرید نیز بر مبنای فرآیند تبرید یا بازپخت فلزات می‌باشد.

فرآیند تبرید فلزات به این صورت است که در ابتدا با افزایش حرارت، دمای فلزات را تا مقدار بسیار بالایی افزایش می‌دهند و بعد از آن طی یک فرآیند کنترل شده، عمل سردسازی و کاهش دمای تدریجی را بر روی آنها انجام می‌دهند. بدیهی است که در هنگام افزایش حرارت و ازدیاد دمای فلز، سرعت حرکت و جنبش اتمهای آن به مقدار بسیار زیادی افزایش می‌یابد. بدین ترتیب در مرحله بعد با کاهش تدریجی دما، امکان بوجود آمدن الگوهای خاصی در جای‌گیری اتم‌های فلز فراهم می‌شود. از این رو و طی مکانیسم یاد شده، با تغییر در الگوی اتمها، خواص ارزشمندی در فلز تبرید شده ایجاد می‌شود (به طور مثال افزایش استحکام فلز). به طور کلی می‌توان گفت که اساس الگوریتم تبرید فلزات بر مبنای جستجوی محلی می‌باشد. از این رو در این الگوریتم، طراحی روشهای جستجوی محلی مناسب با توجه به شرایط و قیدها و محدودیتهای

² Agent-based Simulation

¹ Discrete Event Simulation

مطالعات مختلف نشان می‌دهد که سد مخزنی کرخه از مشکل تغذیه‌گرایی رنج می‌برد. همانطور که گفته شد مطالعه حاضر مشتمل بر دو بخش است. در بخش اول با استفاده از داده‌های روزانه، مدل شبیه‌سازی تغذیه‌گرایی در محیط Anylogic برای یک دوره یکساله ساخته شده و نتایج با نتایج مدل Vensim تحقیق افشار و همکاران (۲۰۱۲) و نیز مدل CE-QUAL-W2 ساخته شده توسط محققین مقایسه شده است. در هر سه مدل یاد شده، مخزن از نظر عمقی به سه لایه تقسیم شده است. همچنین سعی شده است که ضرایب کالیبراسیون در هر سه مدل یکسان باشد (جدول شماره ۲). در کالیبراسیون از نتایج تحقیقات قبلی همچون (سعادتپور (۱۳۹۱)، افشار و همکاران (۲۰۱۲)) استفاده شده است.

متغیر بوده و رژیم بارش آن اغلب مدیترانه‌ای می‌باشد (معصومی (۱۳۹۴)). در جدول شماره (۱) مشخصات سد کرخه آورده شده است:

جدول ۱- مشخصات کلی سد مخزنی کرخه

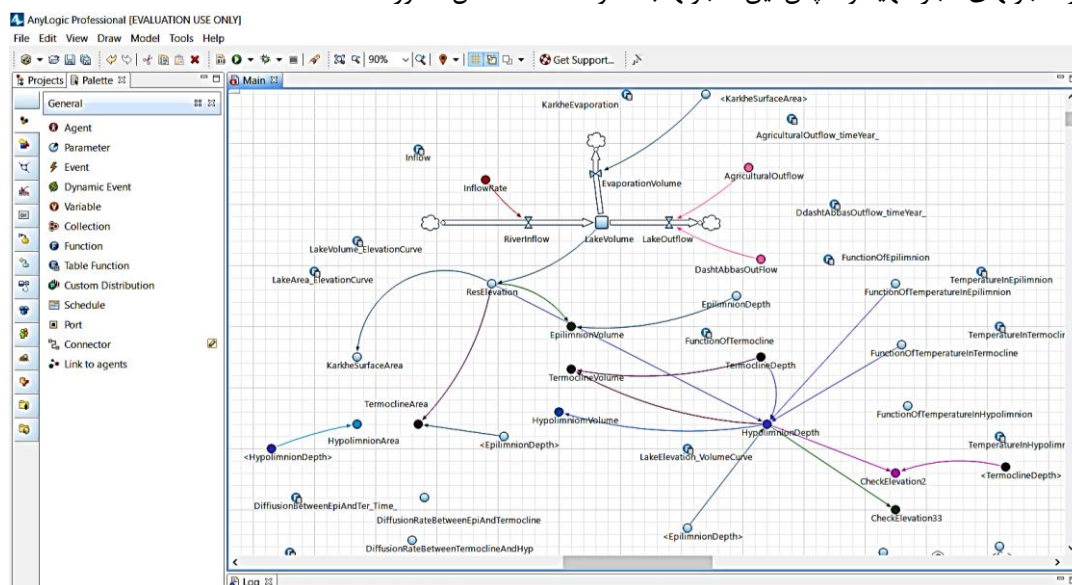
نوع سد	سد خاک رس با هسته خاکی
ارتفاع سد	۱۲۷ متر
طول تاج سد	۳۰۳۰ متر
عرض تاج سد	۱۲ متر
عرض پی	۱۰۰ متر
حجم کل مخزن	۵۳۴۰ میلیون مترمکعب
حجم مفید مخزن	۴۴۰ میلیون مترمکعب
حجم مرده	۳۹۰۰ میلیون مترمکعب
طول دریاچه در تراز نرمال	۶۵ کیلومتر
ظرفیت تخلیه سرریزها	۱۸۲۶۰ متر مکعب بر ثانیه

جدول ۲- پارامترهای کالیبراسیون در مدل‌های مورد استفاده (سعادتپور (۱۳۹۱)، افشار و همکاران (۲۰۱۲))

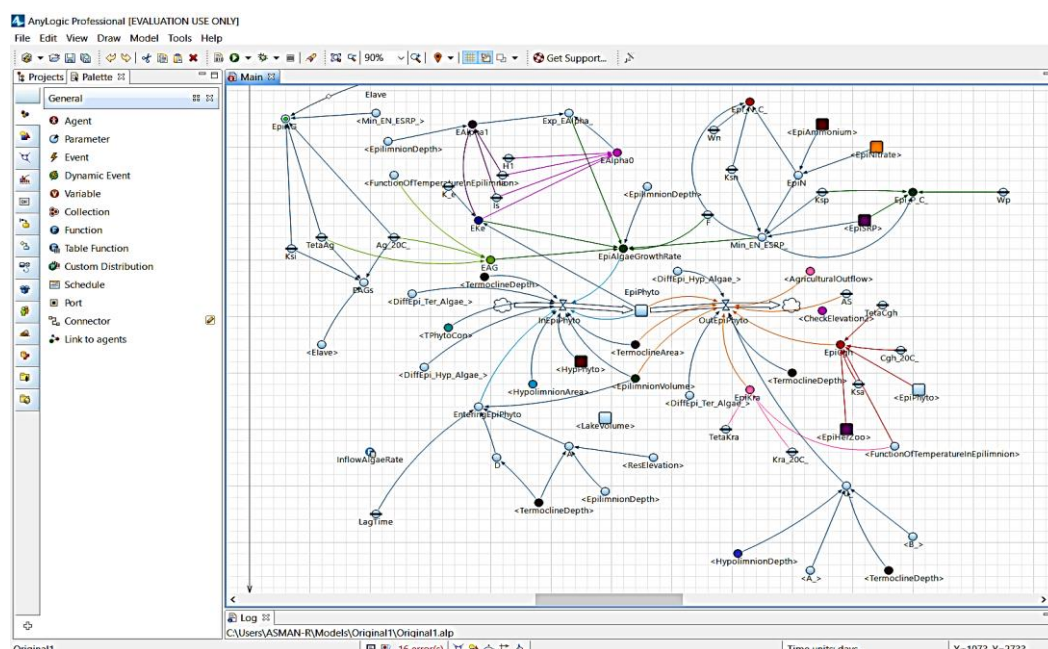
نام پارامتر	نتیجه کالیبراسیون مخزن	نام پارامتر	نتیجه کالیبراسیون مخزن
ضریب جذب نور در سطح آب	۰/۳۵	حداکثر رشد جلبک	day^{-1} ۰/۳۵
ضریب محو شدن نور در آب	m^{-1} ۰/۳	نسبت نرخ رشد جلبک در کم‌ترین دما به رشد جلبک	۰/۷۷
ضریب پوشش باد در اولین و آخرین روز شبیه‌سازی	۰/۸ و ۰/۸۵	نسبت نرخ حداکثر رشد جلبک در کم‌ترین دما به حداکثر رشد جلبک	۰/۹
ضریب A در فرمول سرعت باد	۹/۵	نسبت نرخ حداکثر رشد جلبک در بالاترین دما به حداکثر رشد جلبک	۰/۹
ضریب B در فرمول سرعت باد	۰/۷	نسبت نرخ رشد جلبک در بالاترین دما به رشد جلبک	۰/۸
ضریب C در فرمول سرعت باد	۱/۷	ضریب نیمه اشباع فسفر	$g.m^{-3}$ ۰/۳۴
ضریب پخش طولی ادی	$m^2.S^{-1}$ ۵/۵	ضریب نیمه اشباع نیتروژن	$g.m^{-3}$ ۰/۰۵
ویسکوزیته طولی ادی	$m^2.S^{-1}$ ۵/۵	حداکثر نرخ مرگ و میر جلبک	day^{-1} ۰/۰۲۷
ضریب شزی یا مانینگ	$m^2.S^{-1}$ ۷۶	نرخ نیتروژن زدایی از رسوبات	۰/۱۸
نسبت نرخ نیتریفیکاسیون به نرخ کاهش آمونیوم در کم‌ترین دما	۰/۱۵	نرخ رهاسازی فسفر از رسوب	۰/۰۱۵
نسبت نرخ نیتریفیکاسیون به نرخ کاهش آمونیوم در کم‌ترین دما	۰/۸۹	نرخ اکسیژن مورد نیاز رسوب	۰/۹۵
نرخ رهاسازی آمونیوم از رسوب	۰/۰۱۵	نسبت اکسیژن مورد نیاز رسوب با نرخ کاهش رسوب در کم‌ترین دما	۰/۰۰۲
نرخ کاهش آمونیوم	۰/۰۱۵	نسبت اکسیژن مورد نیاز رسوب با نرخ کاهش رسوب در بالاترین دما	۰/۰۸
نرخ کاهش نیترات	۰/۰۷۸	نرخ کاهش رسوب	۰/۲
نسبت توده حیاتی جلبک به کلروفیل آ	۱۳۵		

همانطور که گفته شد، پارامترهای دخیل در تغذیه-گرایی مخازن در یک ارتباط حلقه‌علی-معلولی با یکدیگر هستند. از این رو رویکرد پویایی سیستم ابزار مناسبی برای مدلسازی تغذیه‌گرایی می‌باشد. برای ساختن مدل در محیط نرم‌افزار Anylogic ابتدا باید کلیه عناصر تاثیرگذار در تغذیه‌گرایی در فرم‌های مربوطه‌شان در لایه‌های مختلف مخزن در ماجولهای مجزا تهیه و سپس این ماجولها به نحو

مناسب به یکدیگر ارتباط داده شوند. به دلیل تعدد ماجولها در لایه‌های گوناگون مخزن و تعدد روابط بین عناصر، نمایش تمامی اجزاء مدل در مقاله امکان پذیر نیست. بنابراین در اینجا صرفاً فرم شماتیک ماجول مربوط به بیلان مخزن در شکل شماره ۴ و فرم شماتیک ماجول محاسبه فیتوپلانکتون در لایه اپیلمینیون در محیط Anylogic در شکل ۵ آورده شده است.



شکل ۴- فرم شماتیک ماجول محاسبه بیلان آب در مخزن در محیط شبیه‌ساز Anylogic



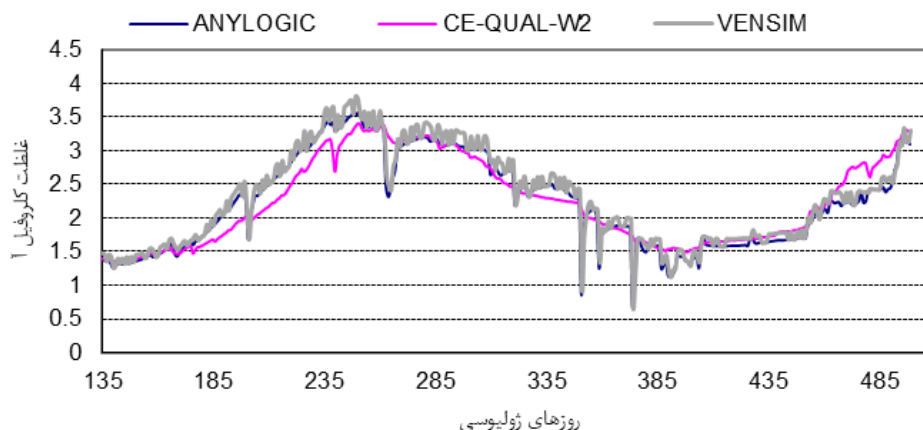
شکل ۵- فرم شماتیک ماجول محاسبه فیتوپلانکتون در لایه اپیلمینیون در مخزن در محیط شبیه‌ساز Anylogic

جلبک و تغذیه‌گرایی در مخزن است ارائه شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، سری زمانی تولید شده توسط Anylogic و Vensim بسیار شبیه به هم

بعد از ساخت مدل، نوبت به اجرای آن و آنالیز خروجی‌ها می‌رسد. در شکل شماره ۶، سری زمانی شبیه‌سازی شده برای غلظت کلروفیل آ که یک شاخص از رشد

Vensim برابر با ۰/۹۷ و مقدار RMSE این متغیرها برابر ۰/۱۶۹ است. مقادیر محاسباتی توسط این دو شبیه‌ساز هرچند کمی متفاوتند، لکن این تفاوت‌ها به دلایلی همچون تفاوت در ماهیت و مکانیزم حل مسائل در دو مدل شبیه‌سازی طبیعی به نظر می‌رسد.

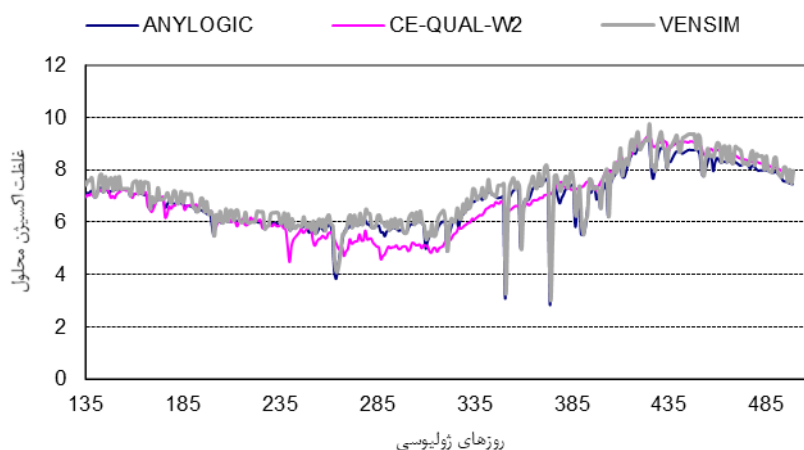
می‌باشند. مقدار ضریب همبستگی (r^2) بین غلظت کلروفیل آ بین Anylogic و CE-QUAL-W2 برابر با ۰/۸۶ و مقدار مجذور میانگین مربعات خطاها (RMSE) این متغیرها برابر ۰/۳۸۲ می‌باشد. همچنین مقدار ضریب همبستگی (r^2) بین غلظت این متغیر بین Anylogic و



شکل ۶- سری زمانی غلظت کلروفیل آ، شبیه‌سازی شده توسط سه مدل مختلف

بسیار اندک است. در اینجا نیز مقدار r^2 بین اکسیژن محلول بین مدل‌های Anylogic و CE-QUAL-W2 برابر با ۰/۷۵ و مقدار RMSE این متغیرها برابر ۱/۲۶۸ می‌باشد. همچنین مقدار r^2 بین غلظت این متغیر بین Anylogic و Vensim برابر با ۰/۹۳ و مقدار RMSE این متغیرها برابر ۰/۵ است.

در شکل شماره ۷ نیز سری زمانی غلظت اکسیژن محلول در خروجی مخزن (برحسب میلی گرم بر لیتر) آورده شده است. همانطور که از این شکل نیز مشاهده می‌شود، سری زمانی غلظت اکسیژن محلول نیز توسط سه مدل شبیه‌سازی اختلاف نسبتاً کمی با همدیگر دارند. این اختلاف کم در مورد دو مدل ANYLOGIC و VENSIM

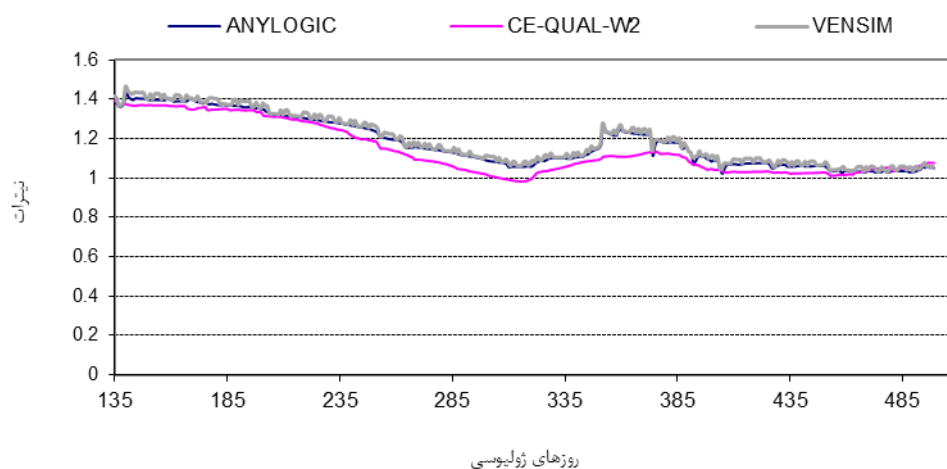


شکل ۷- سری زمانی غلظت اکسیژن محلول (میلی گرم بر لیتر)، شبیه‌سازی شده توسط سه مدل مختلف

نیترات نیز توسط سه مدل شبیه‌سازی اختلاف نسبتاً کمی با همدیگر دارند. این اختلاف کم در مورد نتایج حاصل از دو مدل Anylogic و Vensim نیز وجود دارد که البته بسیار کم است. در اینجا نیز مقدار r^2 بین غلظت نیترات محاسبه شده بین مدل‌های Anylogic و CE-QUAL-W2 برابر با

در شکل شماره ۸، سری زمانی غلظت نیترات (برحسب میلی گرم بر لیتر) که یکی از مهم‌ترین فاکتورهای تغذیه‌گرایی هست، شبیه‌سازی شده توسط سه مدل مختلف مورد اشاره نشان داده شده است. در این شکل نیز مطابق اشکال ۶ و ۷، مشاهده می‌شود که سری زمانی غلظت

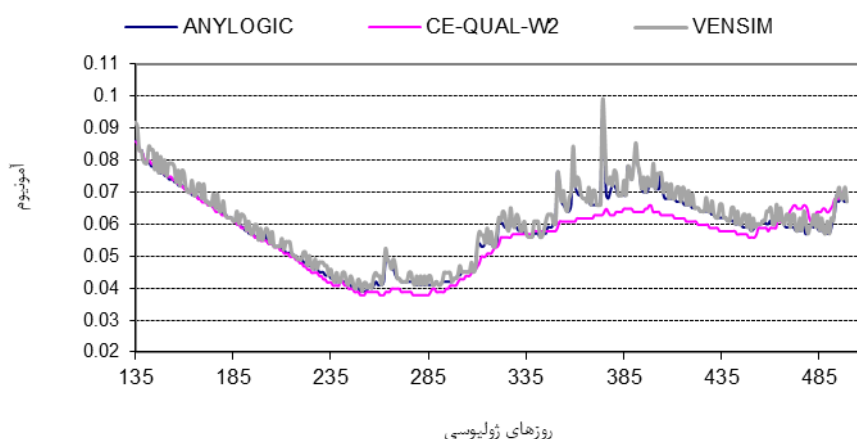
۰/۷۸ و مقدار RMSE این متغیرها برابر ۰/۲۰۳ است. همچنین مقدار r^2 بین غلظت این متغیر بین Anylogic و Vensim برابر با ۰/۹ و مقدار RMSE این متغیرها برابر ۰/۰۸۶ می‌باشد.



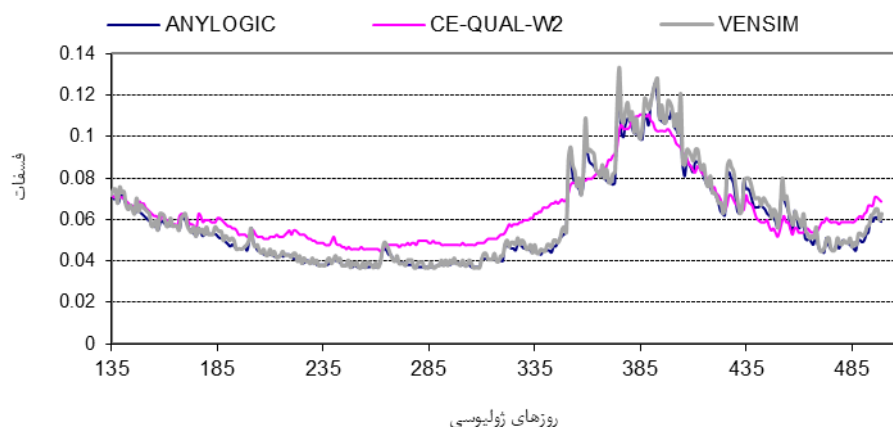
شکل ۸- سری زمانی غلظت نیترات (میلی‌گرم بر لیتر)، شبیه‌سازی شده توسط سه مدل مختلف

مدلهای Anylogic و CE-QUAL-W2 برابر با ۰/۸۹ و مقدار RMSE این متغیرها برابر ۰/۰۱ است. همچنین مقدار r^2 بین غلظت این متغیر بین Anylogic و Vensim برابر با ۰/۹۸ و مقدار RMSE این متغیرها برابر ۰/۰۵ می‌باشد. در این جا نیز مشاهده می‌شود که سری زمانی غلظت پارامترهای کیفی مورد اشاره نیز توسط سه مدل شبیه‌سازی اختلاف نسبتاً کمی با همدیگر دارند. این اختلاف کم در مورد دو مدل Anylogic و Vensim نیز وجود دارد که در مورد این دو پارامتر کیفی نیز، مانند پارامترهای کیفی قبلی، بسیار ناچیز است.

در اشکال شماره ۹ و ۱۰ نیز سری زمانی غلظت آمونیوم و فسفات که توسط سه مدل مختلف مورد اشاره شبیه‌سازی شده‌اند آورده شده است. این دو عنصر نیز جزء عناصر مهم در تغذیه‌گرایی هستند. همانطور که مشاهده می‌شود مقدار r^2 بین غلظت آمونیوم محاسبه شده بین مدل‌های Anylogic و CE-QUAL-W2 برابر با ۰/۸۱ و مقدار RMSE این متغیرها برابر ۰/۰۱ است. همچنین مقدار r^2 بین غلظت این متغیر بین Anylogic و Vensim برابر با ۰/۹۴ و مقدار RMSE این متغیرها برابر ۰/۰۰۴ می‌باشد. همچنین در مورد غلظت فسفات نیز مشاهده می‌شود که مقدار r^2 بین غلظت این متغیر کیفی محاسبه شده بین



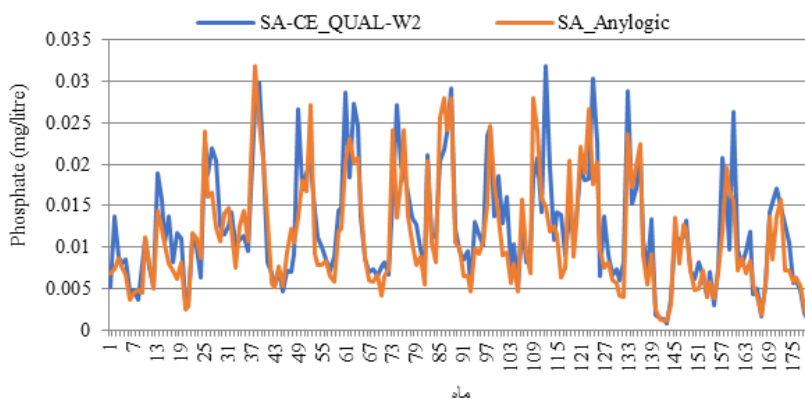
شکل ۹- سری زمانی غلظت آمونیوم (میلی‌گرم بر لیتر)، شبیه‌سازی شده توسط سه مدل مختلف



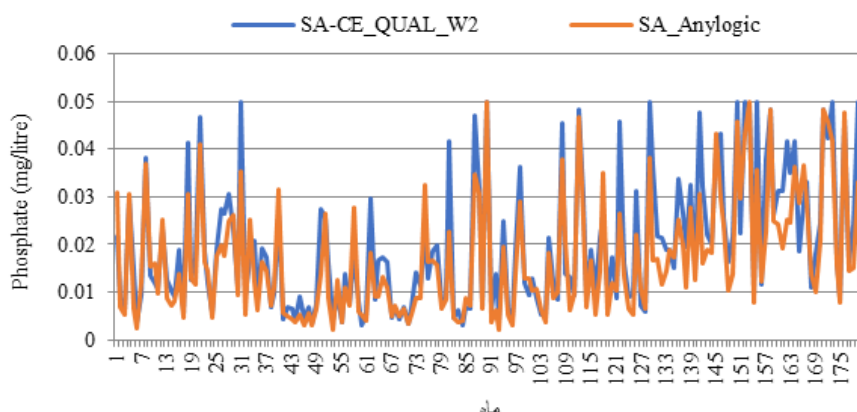
شکل ۱۰- سری زمانی غلظت فسفات، شبیه‌سازی شده توسط سه مدل مختلف (برحسب میلی‌گرم بر لیتر)

در گام دوم در این تحقیق، با استفاده از مدل بهینه‌سازی تبرید فلزات (SA)، دو مدل هیبریدی Anylogic با SA و CE-QUAL-W2 با SA به طور مجزا تشکیل و برای روابط فرمولاسیون شماره (۱۲) الی (۲۲) و برای یک دوره ۱۵ ساله با گامهای زمانی ماهانه اجرا شدند. در اینجا برداشت آب از لایه بالایی و لایه میانی مخزن مدنظر است. بنابراین تعداد متغیرهای تصمیم برابر با ۳۶۰ می‌شود. در واقعیت نیز دو دریچه برداشت آب در بدنه سد کرخه وجود دارد که دریچه بالایی در ناحیه بالای لایه‌بندی و دریچه پایینی در ناحیه میانی لایه‌بندی قرار می‌گیرد. دریچه بالایی برای برداشت آب جهت استفاده از نیروگاه برقآبی مخزن نیز به کار می‌رود. اشکال شماره (۱۱) الی (۱۳)، سری زمانی مقدار فسفات با دو مدل هیبریدی یادشده را در لایه بالایی، لایه میانی و لایه پایینی مخزن نشان می‌دهند.

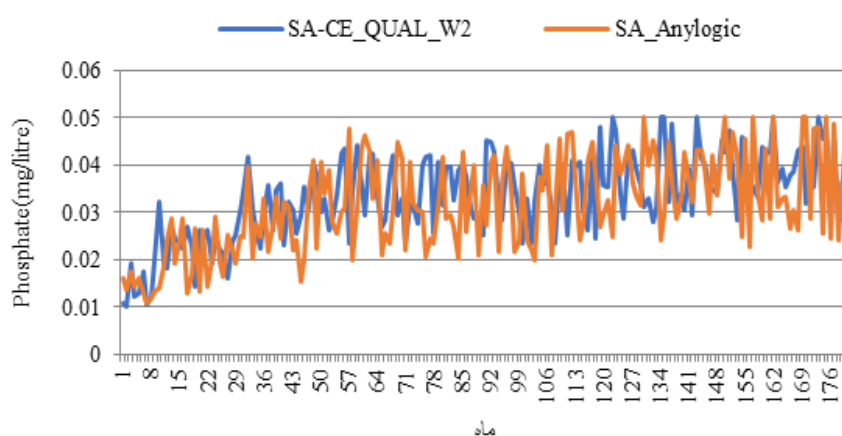
با توجه به نمودارهای اشکال پیشین، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که نرم‌افزار Anylogic ابزار مناسبی برای شبیه‌سازی پارامترهای موثر بر تغذیه‌گرایی است. واضح است که در مقایسه کارآیی این نرم‌افزار یا مدل با نرم‌افزارها یا مدل‌های دیگر، علاوه بر دقت محاسبات باید شاخص زمان اجرای مدل را نیز مدنظر داشت. نرم‌افزار Anylogic حدود ۱ ثانیه، نرم‌افزار Vensim حدود ۱ ثانیه و نرم‌افزار CE-QUAL-W2 نیز حدود ۶۰ ثانیه برای اجرا زمان نیاز دارند. بدین ترتیب مشاهده می‌شود که نرم‌افزار Anylogic هرچند با زمان اجرای تقریباً برابر نسبت به نرم‌افزار Vensim، توانسته نسبت به حل مدل شبیه‌سازی تغذیه‌گرایی با جوابهای تقریباً برابر اقدام کند. یکی از نقاط قوت مدل Anylogic در توانایی اتصال به مدل‌های بهینه‌ساز فراکوشی است که متأسفانه در نرم‌افزار Vensim این امکان اتصال وجود ندارد.



شکل ۱۱- سری زمانی غلظت فسفات، شبیه‌سازی شده توسط دو مدل مختلف (میلی‌گرم بر لیتر) در لایه بالایی مخزن



شکل ۱۲- سری زمانی غلظت فسفات، شبیه‌سازی شده توسط دو مدل مختلف (میلی‌گرم بر لیتر) در لایه میانی مخزن



شکل ۱۳- سری زمانی غلظت فسفات، شبیه‌سازی شده توسط دو مدل مختلف (میلی‌گرم بر لیتر) در لایه پایینی مخزن

می‌توان بررسی کرد. در شکل شماره ۱۱ که متعلق به لایه بالایی است، روند خاصی در مقدار فسفات دیده نمی‌شود و به نظر می‌رسد که غلظت آلاینده متأثر از دبی جریانهای ورودی و خروجی است. در شکل شماره ۱۲، لایه میانی، نیز هرچند به نظر می‌رسد غلظت آلاینده متأثر از دبی ورودی و خروجی باشد، لکن به دلیل تبادلات جرمی بین این لایه و لایه پایینی، کمی روند افزایشی را در غلظت آلاینده شاهد هستیم. در شکل شماره ۱۳ که متعلق به لایه زیرین هست، تجمع آلاینده‌ها در طول زمان حالت مشهود دارد.

نتیجه‌گیری

هدف اصلی در این تحقیق ارائه یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی بر پایه پویایی سیستم با نرم‌افزار Anylogic برای مدیریت تغذیه‌گرایی در مخازن بوده است. سد مخزنی کرخه به عنوان یکی از سدهای مهم کشور که از مشکل تغذیه‌گرایی نیز رنج می‌برد به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده بود. یکی از اولین قدم‌ها در این تحقیق استخراج

همانطور که از این اشکال دیده می‌شود هر دو مدل تقریباً به جوابهای یکسان رسیده‌اند. در لایه بالایی، ضریب همبستگی بین دو مدل برابر با $0/91$ (r^2)، در لایه میانی برابر با $0/90$ و در لایه پایینی برابر با $0/79$ می‌باشد. همچنین مقدار RMSE محاسباتی دو مدل در لایه‌های یاد شده به ترتیب برابر با $0/004$ ، $0/007$ و $0/010$ می‌باشد. البته با توجه به ماهیت همه الگوریتم‌های فراکاوشی، رسیدن به جواب‌های مختلف (در بازه قابل قبول) غیرعادی نیست. مقایسه تابع هدف دو مدل یاد شده نشان می‌دهد که به ازای 10000 بار فراخوانی تابع هدف، مدل SA-Anylogic توانسته به متوسط جواب بهینه $32/38$ و مدل SA-CE_QUAL_W2 به مقدار $33/96$ دست پیدا کند. هرچند این اختلافات در حدی نیست که بتوان حکم به برتری یکی از الگوریتم‌ها داد، لکن مدل SA-Anylogic توانسته با زمانی بسیار کم‌تر (حدود ۴۸ برابر کم‌تر) به این مهم نایل آید که یک مزیت و قابلیت مهم برای این مدل به شمار می‌رود. اشکال ۱۱ الی ۱۳ را از یک منظر دیگر نیز

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از قرارداد تحقیقاتی با عنوان "توسعه مدل پیچیده تغذیه‌گرایی مخازن با رویکرد پویایی سیستم‌ها با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی Anylogic" می‌باشد که با معاونت پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی منعقد شده است. بدین‌وسیله از حمایت‌های این نهاد تقدیر و تشکر می‌شود. همچنین از راهنمایی‌ها و حمایت‌های خانم دکتر مطهره سعادت‌پور، استادیار دانشگاه علم و صنعت نیز سپاسگزاری صمیمانه به عمل می‌آید.

منابع

- ۱) اوهب یزدی س ی، احمدی آ، ۱۳۹۷، شبیه‌سازی رفتار عامل‌های مؤثر در مدیریت منابع آب جهت ارزیابی تعاملات آنها تحت چارچوب مدلسازی عامل‌بنیان در محدوده لجنانات حوضه زاینده‌رود، تحقیقات منابع آب ایران، سال ۱۴، شماره ۲، صفحات ۱۳۱ الی ۱۴۹.
- ۲) بووی ج، ۲۰۰۰، مدلسازی کیفی آبهای سطحی: سینتیک، ثوابت و نرخ‌ها، ترجمه سیدحسین هاشمی و علی ترابیان، انتشارات دانشگاه تهران، جلد دوم.
- ۳) جواهری ش، سعادت‌پور م، ۱۳۹۶. استخراج قوانین بهره‌برداری از مخزن برقایی در ساختار برداشت انتخابی با در نظر گرفتن اهداف کمی و کیفی؛ رویکرد شبیه‌سازی-بهینه سازی مبتنی بر فرامدل. تحقیقات منابع آب ایران، جلد ۳:۱۳، صفحات ۱۲۸ الی ۱۴۲
- ۴) سعادت‌پور م، ۱۳۹۱، تعیین سیاست‌های بهینه بهره‌برداری از مخزن با در نظر گرفتن اهداف کمی و کیفی، رساله برای دریافت درجه دکتری در رشته مهندسی عمران گرایش مهندسی آب، دانشگاه علم و صنعت ایران
- ۵) معصومی ف، ۱۳۹۴، تدوین مدل چندهدفه غیرقطعی تخصیص بار چندآلاینده در سیستم رودخانه-مخزن؛ رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی، رساله برای دریافت درجه دکتری در رشته مهندسی عمران گرایش مهندسی آب، دانشگاه علم و صنعت ایران
- 6) Afshar A, Feizi F, Moghadam A.Y, & Saadatpour M. 2017. Enhanced CE-QUAL-W2 model to predict the fate and transport of volatile organic compounds in water body: Gheshlagh reservoir as case study. Environmental earth sciences. 76(23):803.
- 7) Afshar A, Saadatpour M. 2009. Reservoir Eutrophication Modelling, Sensitivity Analysis, and

روابط عناصر مرتبط با تغذیه‌گرایی همچون اشکال مختلف فسفر و نیتروژن، اکسیژن محلول و غیره در لایه‌های مختلف و در ارتباط با هم در قالب یک مدل پویایی سیستم و فرموله کردن آنها بود. بعد از تهیه مدل، نتایج برای پیش‌بینی غلظت متغیرهای کیفی مؤثر در تغذیه‌گرایی در نرم‌افزار Anylogic با نتایج ناشی از مدل پویایی سیستم Vensim و نیز مدل CE-QUAL-W2 برای یک دوره آماری روزانه یکساله مقایسه شدند که همخوانی بالایی نتایج مدلها، قابلیت الگوریتم Anylogic را به خوبی نشان داد. در اینجا مقدار ضریب همبستگی (r^2) برای متغیرهای فسفات، آمونیوم، نیترات، اکسیژن محلول و کلروفیل آ بین دو مدل Anylogic و CE-QUAL-W2 به ترتیب برابر ۰/۸۱، ۰/۷۸، ۰/۷۵ و ۰/۸۶ و مقدار این ضریب برای متغیرهای یاد شده بین نتایج دو مدل Anylogic و Vensim برابر با ۰/۹۸، ۰/۹۴، ۰/۹۰، ۰/۹۳ و ۰/۹۷ می‌باشند. سپس با ترکیب مدل تدوین شده شبیه‌سازی تغذیه‌گرایی در محیط Anylogic با مدل بهینه‌سازی بازپخت فلزات، یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی به نحوی ایجاد گردید که بتوان با تعیین مقادیر بهینه خروجی آب از لایه‌های مختلف مخزن در یک افق ۱۵ ساله، اهداف کمی و کیفی مورد نظر را برآورده نمود.

در اینجا مقدار میانگین مربعات خطاها بین نتایج مدل SA-Anylogic و SA-CE_QUAL_W2 برای لایه‌های پایینی، میانی و بالایی مخزن به ترتیب برابر با ۰/۰۰۴، ۰/۰۰۷ و ۰/۰۱۰ و مقدار ضریب همبستگی (r^2) به ترتیب برابر با ۰/۹۱، ۰/۹ و ۰/۷۹ بودند که حکایت از نزدیک بودن نتایج دو مدل دارد. نتایج تابع هدف محاسباتی نیز نشان دهنده تدوین شده کارایی مناسب‌تر مدل تدوین شده نسبت به مدل شبیه‌سازی-بهینه سازی SA-CE_QUAL_W2 بود. بالاخص از نظر زمان اجرا، مدل تدوین شده نسبت به مدل SA-CE_QUAL_W2 بسیار برتری دارد. بدین ترتیب نرم‌افزار شبیه‌ساز Anylogic به خوبی قابلیت خود را در حل مسأله مدیریت تغذیه‌گرایی مخازن نشان داد. در تحقیقات آتی می‌توان از قابلیت مدل تدوین شده در ارتباط با دیگر ابزارهای Anylogic همچون ابزار مدلسازی عامل بنیان در حل مسائل پیچیده‌تر مدیریت کیفی مخازن استفاده کرد.

- 22) Karamouz M, Taheriyoun M, Baghvand A, Tavakolifar H, & Emami F. 2010. Optimization of watershed control strategies for reservoir eutrophication management. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 136(12): 847-861.
- 23) Kerachian R. & Karamouz M. 2007. A Stochastic Conflict Resolution Model for Water Quality Management in Reservoir-River Systems. *Advances in Water Resources*. 30:866-882.
- 24) Kirkpatrick S., Gelatt C. D., & Vecchi M. P. 1983. Optimization by simulated annealing, *Science*. 220: 671-680.
- 25) Mashaly A.F., & Fernald A.G. Identifying Capabilities and Potentials of System Dynamics in Hydrology and Water Resource as a Promising Modeling Approach for Water Management. *Water*, 12, 1432; doi:10.3390/w12051432
- 26) Masoumi F, Afshar A, & Palatkaleh S.T. 2016. Selective withdrawal optimization in river-reservoir systems; trade-offs between maximum allowable receiving waste load and water quality criteria enhancement. *Environmental Monitoring and Assessment*. Vol. 188, DOI 10.1007/s10661-016-5386-0.
- 27) Neumann D.W, Zagona E.A. & Rajagopalan B. 2006. A Decision Support System to Manage Summer Stream Temperatures. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*. 42:1275-1284. doi:10.1111/j.1752 1688. 2006. tb05300.x
- 28) Nazari-Sharabian M, Taheriyoun M, Ahmad S, Karakouzian M, & Ahmadi A. 2019. Water Quality Modeling of Mahabad Dam Watershed-Reservoir System under Climate Change Conditions, using SWAT and System Dynamics. *Water*. 11(2), 394; <https://doi.org/10.3390/w11020394>
- 29) Saadatpour M, and Afshar A. 2011a. MultiObjective Simulation-Optimization Approach in Pollution Spill Response Management Model in Reservoirs. *Proceeding of the Water Engineering and Management in a Changing Environment, Italy, Catania, June 29, July 2.*
- 30) Saadatpour M. and Afshar A. 2011b. Emergency Reservoir Operation for Pollution Spill Response Management”, *Proceeding of the 64th CWRA National Conference, “Our Water-Our Life-The Most Valuable Resource”, St. John’s NL Canada, June 27-30.*
- 31) Saadatpour M, Afshar A, & Edinger J.E. 2017. Meta-model assisted 2D hydrodynamic and thermal simulation model (CE-QUAL-W2) in deriving optimal reservoir operational strategy in selective withdrawal scheme. *Water Resources Management*. 31(9):2729-2744.
- 32) Saadatpour S, Afshar A, & Sandoval Solis A. 2020. Surrogate-based Multi-Period, Multi-Objective Reservoir Optimization for Quality and Quantity Management. *Journal of Water Resource Planning and Management*. 146(8), 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001252
- Assessment; Application to Karkheh Reservoir, Iran. *Journal of Environmental Engineering Science*. 26 (7):1227-1238.
- 8) Afshar A, Saadatpour M, & Marino M.A. 2012. Development of a Complex System Dynamic Eutrophication Model: Application to Karkheh Reservoir. *Journal of Environmental Engineering Science*. 29(6):373-385.
- 9) Afshar A, Masoumi F. 2016. Waste Load Reallocation in River-Reservoir Systems; Simulation- Optimization Approach. *Environmental Earth Science*. Vol. 75. DOI 10.1007/s12665-015-4812-x.
- 10) Afshar, A., Masoumi, F. and Sandoval Solis, S., 2018. Developing a Reliability-Based Waste Load Allocation Strategy for River-Reservoir Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 144(9), p.04018052
- 11) Ahmad S, Simonovic S.P. 2004. Spatial system dynamics: new approach for simulation of water resources systems. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 18(4):331-340.
- 12) Chapra S.D. 2000. *Surface Water Quality Modeling*, 1th Eds. Mc Graw-Hill, Inc, New York.
- 13) Chaves P, Tsukatani T, & Kojiri, T. 2004. Operation of Storage Reservoir for Water Quality by Using Optimization and Artificial Intelligence Techniques. *Mathematics and Computers in Simulation*. 67:419-432.
- 14) Dhar A, & Datta B. 2008. Optimal operation of reservoirs for downstream water quality control using linked simulation optimization. *Hydrological Processes*. 22(6):842-853.
- 15) Elmahdi A, Malano H, & Etchells T. 2007. Using system dynamics to model water-reallocation. *The Environmentalist*. 27(1):3-12.
- 16) Forrester J.W. 1961. *Industrial Dynamics*. Cambridge, MA: MIT Press; currently available from Pegasus Communications, Waltham, MA.
- 17) Friedl G, Wuest A. 2002. Disrupting biogeochemical cycles- Consequences of Damming. *Aquatic Science*. 64:55-65.
- 18) Harmon TS. 2014. Hydrologic fragmentation induced eutrophication in Dove Sound, Upper Florida Keys, USA. *Environ Earth Sci*. 71:4387-4395.
- 19) Karamouz M, Ahmadi A, & Moridi A. 2009. Probabilistic Reservoir Operation using Bayesian Stochastic Model and Support Vector Machine. *Advances in Water Resources*. 32:1588-1600.
- 20) Karamouz M, Moridi A, & Fayazi, H. 2008. Dealing with Conflict over Water Quality and Quantity Allocation: A Case Study. *Scientia*. 15(1):34-49.
- 21) Karamouz M, & Taheriyoun M. 2010. Developing a system dynamics model for phosphorous TMDL in reservoir: a case study. In *Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress*. P. 1495-1502.

- 33) Shirangi E, Kerachian R, & Bajestan M.S. 2008. A Simplified Model for Reservoir Operation Considering the Water Quality Issues: Application of the Young Conflict Resolution Theory. *Environmental Monitoring and Assessment*. 146:77–89.
- 34) Simonovic S.P, Fahmy H. 1999. A new modeling approach for water resources policy analysis, *Water resources research*. 35(1):295-304.
- 35) Soltani F., Kerachian R, & Shirangi E. Developing Operating Rules for Reservoirs Considering the Water Quality Issues: Application of ANFIS-Based Surrogate Models. 2010. *Expert Systems with Applications*. 37: 6639–6645.
- 36) Soleimani S, Bozorg-Haddad O, Saadatpour M, & Loáiciga H.A. 2016. Optimal selective withdrawal rules using a coupled data mining model and genetic algorithm. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 142(12), 04016064.
- 37) Soleimani S, Bozorg-Haddad O, Saadatpour M, & Loáiciga H. A. 2019. Simulating thermal stratification and modeling outlet water temperature in reservoirs with a data-mining method. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*. 68(1):7-19.
- 38) Stamou A.I, Hadjibiros K, Andreadakis A. et al. 2007. Establishing Minimum Water Level for Plastiras Reservoir (Greece) Combining Water Quality Modeling with Landscape Aesthetics. *Environmental Modelling and Assessment*. 12:157–170.
- 39) Sterman J.D. 2000. *Business Dynamics: System Thinking and Modeling for a Complex World*. Irwin, McGraw-Hill.
- 40) Vezjak, M., Savsek, T., & Stuhler, E. A. 1998. System dynamics of eutrophication processes in lakes. *European Journal of Operational Research*. 109(2):442-451.
- 41) Wurbs R.A., Karama A.S. 1995. Salinity and Water-Supply Reliability. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 121 (5): 352-358.
- 42) Zhang Y, Xia J, Chen J & Zhang M. 2011. Water Quantity and Quality Optimization Modeling of Dams Operation Based on SWAT in Wenyu River Catchment, China. *Environmental Monitoring and Assessment*. 173: 409–430.

