

مقاله علمی-پژوهشی

ارزیابی حساسیت دو مدل کیفیت آب NSFQI و IRWQI_{SC} در رودخانه هراز

شمیم لاریجانی^۱، حسین بانژاد^{۲*}، عطاالله کاویان^۳، علی نقی ضیایی^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۳۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۰۸

چکیده

شاخص‌های کیفی آب معیاری برای طبقه‌بندی آب سطحی بر مبنای استفاده از پارامترهای استاندارد بوده و ابزاری ریاضی است که تعداد زیادی از داده‌های مورد استفاده برای توصیف ویژگی‌های آب را به یک عدد تبدیل کرده و سطح کیفی آب را بدست می‌دهد. مطالعه حاضر با هدف ارزیابی و مقایسه حساسیت دو شاخص کیفیت آب NSFQI و IRWQI_{SC} نسبت به پارامترهای کیفی با استفاده از روش‌های مبتنی بر واریانس، بر روی رودخانه هراز با نمونه‌برداری ماهانه در سال ۱۴۰۰ در ۷ ایستگاه منتخب در بازه پنجاب تا بالادست سد مخزنی هراز در استان مازندران انجام شده است. نتایج پژوهش حاضر نشان داده است که کیفیت آب در ایستگاه‌های S₁ (سراب) و S₂₋₁، در بهترین حالت نسبتاً خوب و در بدترین حالت دارای کیفیت بد می‌باشند. کیفیت آب در ایستگاه‌های S₂، S₃، S₄، S₅₋₁ و S₅ (پایاب)، در بهترین حالت متوسط و در بدترین حالت در شهریور ماه دارای کیفیت بد می‌باشند. در تحلیل عدم قطعیت و ارزیابی حساسیت شاخص NSFQI از روش SRC و برای شاخص IRWQI_{SC} از روش FAST و SOBOLE استفاده شد. نتایج آنالیز حساسیت بر اساس رویکرد رتبه‌بندی عوامل (Factor Prioritization) نشان داد در شاخص NSFQI به ترتیب پارامترهای DO، BOD، CF، T و P و در شاخص IRWQI_{SC} بعد از پارامتر DO پارامترهای BOD، P و N بیشترین تأثیر را بر روی خروجی مدل‌ها داشته‌اند. در تحلیل عدم قطعیت، نتایج حاصل از به کارگیری روش SOBOLE برای ایستگاه‌های مختلف رودخانه هراز با روش FAST مطابقت داشت اما نتایج آنالیز حساسیت حاصل از این دو روش با یکدیگر متفاوت بودند. با توجه به نتایج حاصله و علی‌رغم نزدیکی نتایج حاصل از دو روش، می‌توان گفت روش SOBOLE با توجه به همگرایی بدون قید و شرط در این مطالعه موفق‌تر از متدولوژی FAST عمل نموده است.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی، هراز، شاخص، FAST، SOBOLE

مقدمه

می‌تواند در توسعه یک استراتژی مدیریت حوضه آبریز مؤثر باشد و برای حفاظت از منابع آب با ارزش کمک کند. آلودگی رودخانه‌ها، یکی از مهم‌ترین مشکلات همه مناطقی است که در توسعه شهری به حریم کیفی رودخانه‌ها کم‌توجهی نموده‌اند. به‌طور کلی رودخانه‌ها ظرفیت پذیرش آلودگی را تا مقدار مشخص دارا می‌باشند که این مقدار بستگی به عوامل و فاکتورهای محیطی همچون دبی، شرایط اولیه، عمق رودخانه و غلظت فاضلاب‌های تخلیه شده به رودخانه و غیره دارد (امینی پور و همکاران، ۱۳۹۵). روند افزایش آلودگی‌ها، منابع آبی استان مازندران را از نظر کیفی و کمی تهدید می‌کنند. آلودگی‌های بی‌رویه و بی‌حد و حصر آب‌های سطحی نظیر آب رودخانه‌ها و تالاب‌ها، استفاده از سموم شیمیایی در مزارع کشاورزی، کارگاه‌های برداشت شن و ماسه از بستر رودخانه‌ها و ریختن زباله‌ها در داخل و حاشیه رودخانه‌ها موجب شده است که منابع آبی استان به شدت آسیب ببینند (فرامرزی اصلی و همکاران، ۱۳۹۷، اختر و همکاران، ۱۳۹۵).

رشد جمعیت و افزایش فعالیت‌های انسانی در حوضه آبریز رودخانه‌ها، تخلیه فاضلاب‌های خانگی و صنعتی، فعالیت‌های کشاورزی، رواناب و شیرابه محل‌های دفع زباله باعث کاهش کیفیت آب این منابع شده است. یک درک عمیق از نقش عوامل کیفی آب

- ۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آب- آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
 - ۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
 - ۳- استاد گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
 - ۴- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
- (*) ایمیل نویسنده مسئول : (Email: banejad@um.ac.ir)
DOR: 20.1001.1.20087942.1401.16.4.10.3

شاخص IRWQI_{SC} به بررسی آلودگی تالاب چغاخور در استان چهارمحال و بختیاری با تحلیل تأثیرات کمی و کیفی پساب‌های اراضی از دو بعد مکانی و زمانی بر کیفیت آب این تالاب پرداخت. در این تحقیق میانگین سالانه شاخص نسبتاً خوب بدست آمد در حالی که این وضعیت در ابتدای بهار در وضعیت متوسط، در انتهای بهار و ابتدای تابستان در وضعیت خوب و در انتهای تابستان و ابتدای پاییز در وضعیت نسبتاً خوب و در انتهای پاییز در وضعیت خوب قرار می‌گیرد. در همین زمان در بخش جنوب شرقی تالاب، به علت اضافه شدن رواناب مناطق مسکونی در اثر افزایش بارندگی و عدم تجزیه نیترات به علت کاهش دما، کیفیت آب تالاب متوسط ارزیابی گردید (Samadi, 2016). صادقی و همکاران با استفاده از دو شاخص NSFQI و IRWQI_{SC} به ارزیابی کیفیت آب رودخانه زرین گل در استان گلستان در دو فصل تابستان و پاییز با آماربرداری در ۹ ایستگاه پرداختند. شاخص NSFQI کیفیت آب رودخانه را متوسط ولی شاخص IRWQI_{SC} کیفیت همین رودخانه را متوسط تا نسبتاً خوب تشخیص داد. بر اساس نتایج حاصله محققین آب رودخانه را برای کشاورزی مناسب ولی برای شرب نیازمند تصفیه تشخیص دادند (Sadeghi, et al. 2015). میرزایی و همکاران با استفاده از شاخص NSFQI، IRWQI_{SC} و WQI به بررسی کیفیت آب رودخانه‌های کرج و کن با نمونه‌برداری از ۲۰ ایستگاه از مهر ۱۳۹۱ تا خرداد ۱۳۹۲ پرداختند. شاخص NSFQI کیفیت آب رودخانه‌های تحت مطالعه را بد تا متوسط، شاخص IRWQI_{SC} آنها را دارای کیفیت بسیار بد تا نسبتاً خوب و بالاخره شاخص WQI کیفیت رودخانه‌های مزبور را خوب تشخیص دادند. بر اساس برآورد محققین مزبور از نتایج حاصل، آب این دو رودخانه برای شرب و کشاورزی مناسب می‌باشد (Mirzaei et al. 2017). در شاخص‌های NSFQI، IRWQI_{SC} که چندین پارامتر روی خروجی آنها تأثیرگذار می‌باشد، لازم است دامنه حساسیت پارامترهای کیفی موجود در آنها مشخص و تأثیر دقت اندازه‌گیری‌ها بر کاهش یا افزایش عدد به‌دست‌آمده در خروجی مشخص گردد. آنالیز حساسیت که عملاً همراه تحلیل عدم قطعیت صورت می‌پذیرد روشی است که به‌وسیله آن آثار تغییرات ضرایب موجود در مدل‌ها را بر خروجی مدل می‌توان بررسی نمود (Herman et al., 2013). شکوهی و مدبری در سال ۱۳۹۷ در مطالعه‌ای باهدف ارزیابی و مقایسه حساسیت دو مدل کیفیت آب NSFQI و IRWQI_{SC} نسبت به پارامترهای کیفی با استفاده از روش‌های مبتنی بر واریانس، روی رودخانه پسیخان با نمونه‌برداری ماهانه در سال ۱۳۹۴ در ۱۳ ایستگاه، منتخب انجام شده است. نتیجه مهم این مطالعه آن بوده است که ضرایب وزنی پارامترهای کیفی در مدل IRWQI_{SC} تطابق مناسبی با اثرگذاری آنها در خروجی مدل برای نمایش وضعیت کیفی ندارد و این امر مطالعه بیشتری برای پذیرش آن به‌عنوان یک استاندارد بومی در ایران گوشزد می‌نماید.

مطالعه شرایط کیفی آب از این جهت مهم است که هرگونه تغییر در پارامترهای کیفی آب باعث تغییر در ترکیب گونه‌های گیاهی و جانوری می‌گردد. کیفیت آب‌های سطحی بر حسب پارامترهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی تعیین می‌شود. شاخص کیفی آب معیاری برای طبقه‌بندی آب سطحی بر مبنای استفاده از پارامترهای استاندارد و در واقع، ابزاری ریاضی است که تعداد زیادی از داده‌های مورد استفاده برای توصیف ویژگی‌های آب را به یک عدد تبدیل کرده و سطح کیفی آب را بدست می‌دهد (هوشمند و اکدرنژاد، ۱۴۰۰). بنیاد ملی بهداشت امریکا شاخص NSFQI^۱ را جهت طبقه‌بندی کیفیت آب‌های سطحی ارائه نموده است. استفاده از این شاخص بسیار متداول بوده و برای طبقه‌بندی کیفی آب‌های سطحی کامل و جامع محسوب می‌گردد. با به‌کارگیری این شاخص می‌توان دید مناسبی در مورد کیفیت آب رودخانه‌ها به دست آورد (کاظمی و همکاران، ۱۳۹۷؛ Sharifdini et al., 2014; Mohseni Bandpay et al., 2014; Sohrabi et al., 2015). در کشور ایران نیز باتوجه به شرایط طبیعی و مسائل و مشکلات منابع آب کشور شاخصی به نام شاخص کیفیت آب‌های سطحی ایران، IRWQI_{SC}^۲ تهیه شده است و توسعه‌دهندگان آن معتقدند که این شاخص می‌تواند چشم‌انداز و درک مناسبی از وضعیت کیفی منابع آب سطحی ایران ارائه نماید (میری، ۱۳۹۶، یوسفی و همکاران، ۱۳۹۷). زمانی و همکاران در سال ۱۴۰۰، در پژوهشی به بررسی الگوی توزیع مکانی کیفیت آب رودخانه پیر غار با استفاده از شاخص کیفیت آب NSFQI و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) پرداختند. بر اساس نتایج شاخص NSFQI کیفیت آب رودخانه پیر غار در همه ایستگاه‌ها در وضعیت‌های متوسط تا خوب قرار داشته است. در بهترین وضعیت، شاخص کیفی NSFQI مربوط به ایستگاه اول با عدد ۷۸ بوده و پایین‌ترین مقدار مربوط به ایستگاه پنجم با شاخص کیفی ۶۶ بوده است. در نتیجه، آلودگی از ایستگاه سراب به سمت ایستگاه‌های بعدی بیشتر شده و کیفیت آب کاسته شده است. ماه رویان و همکاران در سال ۱۳۹۹، به ارزیابی کیفیت آب رودخانه استان قزوین با استفاده از شاخص NSFQI جهت طبقه‌بندی کیفی آب پرداختند. نمونه‌برداری از ۷ ایستگاه طالقان، الموت، رجایی دشت، رازمیان، لوشان، پایین‌دست لوشان ۱ و ۲ بر اساس روش‌های استاندارد در دو فصل آبان‌ماه ۱۳۹۶ (زمستان) و تیرماه ۱۳۹۷ (تابستان) انجام گرفته است. آب رودخانه شاهرود کیفیت خوب و متوسط داشته و علت کاهش کیفیت آب وجود منازل، زمین‌های کشاورزی در نزدیک رودخانه و همچنین علل افزایش نیترات و فسفات در فصل زمستان به دلیل پساب‌های کشاورزی و شهری اطراف رودخانه بوده است. صمدی با استفاده از

1- National Sanitation Foundation Water Quality
2- Iran Water Quality Index for Surface Water Resources

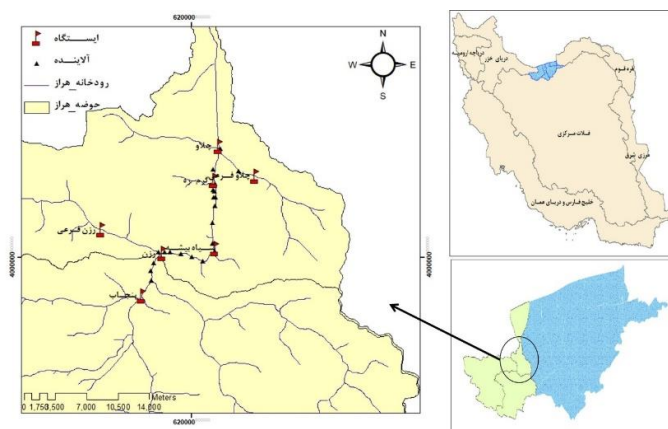
بر شاخص‌های کیفی بیانجامد.

مواد و روش

منطقه مورد مطالعه

رودخانه هراز یکی از رودخانه‌های مهم در حوضه شمالی در زیر حوضه هراز تا قره‌سو در محدوده جغرافیایی ۵۱ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۵۲ درجه و ۳۵ دقیقه طول شرقی ۳۵ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۴۵ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. رودخانه هراز به‌عنوان پرآب‌ترین رودخانه حوضه در منطقه شمال کشور از اهمیت حیاتی برای حیات اکولوژیکی حوضه آبریز و شهرستان‌های آمل، بابل، فریدون‌کنار و نور برخوردار است. رودخانه هراز از ارتفاعات شمال استان تهران در البرز مرکزی سرچشمه می‌گیرد و بعد از طی حدود ۱۰۰ کیلومتر از شهر آمل گذشته در میانه دو شهر فریدون‌کنار و محمودآباد در محل شهرک سرخ‌رود به دریا می‌ریزد. رژیم رودخانه هراز برفی و منظم و دارای دوره پربی در طول ماه‌های بهار است. از نظر اقلیمی حوضه رودخانه هراز دارای اقلیم خیلی مرطوب تا مرطوب است و از نظر دمایی یک حوضه معتدل محسوب می‌گردد. منطقه مورد بررسی در این مطالعه به طول ۳۰ کیلومتر حداثی محدود روستای نامرستاق (ایستگاه پنجاب) تا بالادست سد مخزنی هراز (چلاو) می‌باشد. در این بازه تعداد زیادی منابع آلاینده نظیر کارگاه پرورش ماهی، کارگاه‌های برداشت شن و ماسه، رستوران، دامداری محلی و نیز یک کشتارگاه قرار دارد که فاضلاب آن‌ها به طور مستقیم و غیرمستقیم به رودخانه تخلیه می‌شود. همچنین مزارع کشاورزی و باغات میوه زیادی در اطراف رودخانه هراز قرار دارد که پس از آبیاری زهاب‌های کشاورزی همراه با باقیمانده کود و سم و یا کودهای شیمیایی و سموم اضافه بر مصرف واقعی وارد رودخانه هراز می‌شود. شکل ۱ موقعیت منطقه مورد بررسی در حوضه آبریز هراز قره‌سو را نشان می‌دهد.

Zhan و همکاران در سال ۲۰۱۳ حساسیت پارامترهای مدل SWAT را بر پایه روش Sobol برای چهار تابع هدف مختلف بررسی کردند. نتایج مطالعات مختلف نشان می‌دهد که روش Sobol توانایی تحلیل حساسیت مدل‌های هیدرولوژیکی پیچیده با ۱۰ الی ۱۰۰ پارامتر را دارد. پاپنبرگر پنج روش تحلیل حساسیت مختلف شامل روش‌های Sobol، Morris، آنتروپی، رگرسیون و تحلیل حساسیت منطقه‌ای را برای بررسی حساسیت پارامترهای مدل یک‌بعدی سامانه تحلیل رودخانه مرکز مهندسی هیدرولوژیکی (HEC-RAS) در رودخانه Alzette به کار بردند. آنها دریافتند که روش‌های مختلف منجر به رتبه‌بندی کاملاً متفاوت از نظر اهمیت پارامترها می‌شوند و نتیجه‌گیری قطعی در مورد حساسیت نسبی پارامترهای مختلف ممکن نبود (Pappenberger, 2008). ماسمان و هولزمن، سه روش تحلیل حساسیت شامل؛ Sobol، رگرسیون و آنتروپی دوطرفه را در سه مقیاس زمانی، شامل روزانه، ماهانه و سالانه برای یک مدل بارش - رواناب به کار بردند. نتایج نشان داد روش‌های تحلیل حساسیت بر پایه آنتروپی و RSA به علت تغییرپذیری بالاتر در حساسیت پارامترهای محاسبه شده توسط داده‌های مختلف قوی‌تر از روش Sobol هستند (Massmann and Holzmann, 2012). هدف اصلی این تحقیق، شناسایی و ارزیابی مقایسه‌ای مکانی و زمانی حساسیت پارامترهای شاخص‌های IRWQI_{sc}، NSFQI، رودخانه دائمی هراز به منظور آگاهی از تأثیر هر پارامتر بر روی کیفیت آب رودخانه می‌باشد. برای رسیدن به این هدف لازم است به این سوالات پاسخ داد: ۱- تغییرات مکانی (ایستگاه‌ها) چه تأثیری بر حساسیت شاخص‌ها دارند؟ طول دوره زمانی مختلف (فصل‌ها) چه تأثیری بر حساسیت شاخص‌ها دارد؟ باتوجه به کاربرد گسترده این دو شاخص در ارزیابی کیفی بدنه‌های آبی و پرهزینه و زمان‌بر بودن تعیین پارامترهای کیفی، نتایج این پژوهش می‌تواند به کاهش تعداد نمونه‌برداری‌ها از پارامترهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی و یا حداقل افزایش دقت بر اندازه‌گیری مهم‌ترین پارامترهای کیفی مؤثر



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد بررسی رودخانه هراز در حوضه آبریز هراز قره‌سو

جدول ۱- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های منتخب مورد بررسی بر رودخانه هراز

ایستگاه	پنجاب (سراب)	رزن فرعی	رزن	سیاه‌بیشه	گرم ره	چلاو فرعی	چلاو (پایاب)
نماد	S ₁	S ₂₋₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅₋₁	S ₅
X	۶۱۴۶۵۶	۶۱۳۳۵۰	۶۱۶۹۶۸	۶۲۲۶۶۴	۶۲۲۹۶۰	۶۲۸۷۲۲	۶۲۳۲۰۸
Y	۳۹۹۵۵۰۶	۴۰۰۱۸۲۷	۴۰۰۵۹۳	۴۰۰۲۹۹۹	۴۰۰۸۳۵۳	۴۰۰۸۴۲۲	۴۰۱۲۰۶۴
مکان	بعد از سرشاخه نمارستاق	روی سرشاخه نور	زیر پل بلده	زیر پل منطقه حفاظت شده	منطقه گرم ره	روی سرشاخه چلاو	زیر پل چلاو

پایش میدانی

پس از بازدید میدانی، باتوجه‌به موقعیت آب‌های ورودی به رودخانه، منابع تولید آلاینده‌های منطقه، مکان ورود آلاینده‌ها و نیز امکان نمونه‌برداری، تعداد ۷ ایستگاه منتخب در طول بازه ۳۰ کیلومتری بالادست سد هراز تعیین شد. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. نمونه‌برداری‌ها در سال ۱۴۰۰ به صورت ماهانه (هفته سوم هر ماه) از بالادست به سمت پایین دست انجام شده است. برداشت و نگهداری پارامترهای موردنظر طبق روش استاندارد SMEWW¹ (APHA, 2005) و سنجش پارامترهای مورد بررسی در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری (آزمایشگاه معتمد) صورت پذیرفت.

شاخص NSFQI^۲

این شاخص معیاری برای طبقه‌بندی آب‌های سطحی بر اساس پارامترهای کیفی استاندارد شده در دسترس قرار می‌دهد. در سال ۱۹۷۰ میلادی سازمان بهداشت جهانی طرحی را به مرحله اجرا درآورد که بر اساس این طرح ۳۴۲ نفر از محققین در سراسر دنیا و از ملیت‌های مختلف انتخاب شده و بر روی ۳۵ پارامتر برای تعیین شاخص کیفیت آب آزمایش‌های متعددی انجام دادند و در نهایت ۹ پارامتر را به عنوان پارامترهای اساسی برای تعیین شاخص کیفیت آب معرفی کردند. این ۹ پارامتر عبارت‌اند از اکسیژن محلول (DO)، دما (T)، کلی‌فرم مدفوعی (CF)، کدورت (TUR)، فسفات کل (P)، نیترات (N)، کل مواد جامد (TDS)، pH و میزان اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی (BOD) است. بر اساس اهمیت پارامترها مطابق جدول ۲ به هر کدام وزن داده شده است. شاخص کیفیت آب با استفاده از رابطه ذیل به دست می‌آید (Brown et al, 1970):

$$NSFWQI = \sum_{i=1}^n I_i W_i \quad (۱)$$

در رابطه ۱، I_i مقدار مربوط به پارامتر کیفی و W_i ضریب وزنی مربوط به آن پارامتر است. در نهایت با داشتن مقدار شاخص و با

استفاده از جدول ۳ کیفیت رودخانه به صورت محدوده عالی، خوب، متوسط، بد و خیلی بد طبقه بندی می‌شود.

شاخص IRWQISC^۳

این شاخص به‌عنوان یک شاخص کیفی برای آب‌های سطحی کشور ایران به کار می‌رود. مراحل انجام کار همانند روش NSFQI می‌باشد، با این تفاوت که معادله و مقادیر وزن مربوط به پارامترهای کیفی متفاوت می‌باشد. پارامترهای اساسی برای تعیین شاخص کیفیت IRWQISC شامل کدورت (TUR)، فسفات کل (P)، نیترات (N)، اکسیژن محلول (DO)، کلی‌فرم مدفوعی (CF)، هدایت الکتریکی (EC)، pH و میزان اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی (BOD)، میزان اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD)، آمونیوم (NH₄) و سختی کل (H) است. بر اساس اهمیت پارامترها مطابق جدول ۲ به هر کدام وزن داده شده است. شاخص کیفیت آب با استفاده از رابطه ذیل به دست می‌آید (هاشمی و همکاران، ۱۳۹۱).

$$IRWQISC = \left(\prod_{i=1}^n I_i^{w_i} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (۲)$$

در رابطه ۲، I_i مقدار مربوط به پارامتر کیفی و W_i ضریب وزنی مربوط به آن پارامتر و γ مجموع وزن‌ها (برابر ۱) است. در نهایت با داشتن مقدار شاخص و با استفاده از جدول ۴ کیفیت رودخانه طبقه بندی می‌شود.

تحلیل عدم قطعیت و آنالیز حساسیت مبتنی بر واریانس

شکل ۲ یک دسته‌بندی کلی از روش‌های آنالیز حساسیت را نشان می‌دهد (رضائیان و همکاران، ۱۳۹۹). روش‌های مبتنی بر واریانس از یک نسبت واریانس برای برآورد پارامترهای مهم بر اساس تحلیل واریانس استفاده می‌کنند (Sobol et al, 1993, Satelli et al, 2012) و مبتنی بر تحلیل عدم قطعیت خروجی به‌ازای ورودی معین هستند. هدف آنها تعیین تأثیر هر پارامتر بر واریانس کلی خروجی مدل است. در این روش دو نوع اندازه‌گیری حساسیت شامل تأثیر مرتبه اول و تأثیر کل (مجموع اثرات) وجود دارد. تأثیرات مرتبه

1- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater

2- National sanitation foundation water quality index

3- Iranian water quality index of surface water

مرتبه اول و کل، تأثیر روابط متقابل بین متغیرها بر خروجی مدل را نشان می‌دهد. در تحلیل حساسیت در صورتی که هدف، ثابت نگه‌داشتن پارامترهای غیر مهم باشد تحلیل حساسیت کل محاسبه می‌شود (Tian, 2013).

اول، اثرات اصلی را برای واریانس خروجی باتوجه به ورودی‌های مدل بررسی می‌کند، حال آنکه مجموع اثرات، کل واریانس خروجی را محاسبه می‌کند که در واقع شامل تأثیرات مرتبه اول و مراتب بالاتر (ناشی از اندرکنش متقابل بین ورودی‌ها) است؛ بنابراین، تفاوت اثرات

جدول ۲- وزن بکار رفته در شاخص‌های NSFQI و IRWQI_{sc} (هاشمی و همکاران، ۱۳۹۱)

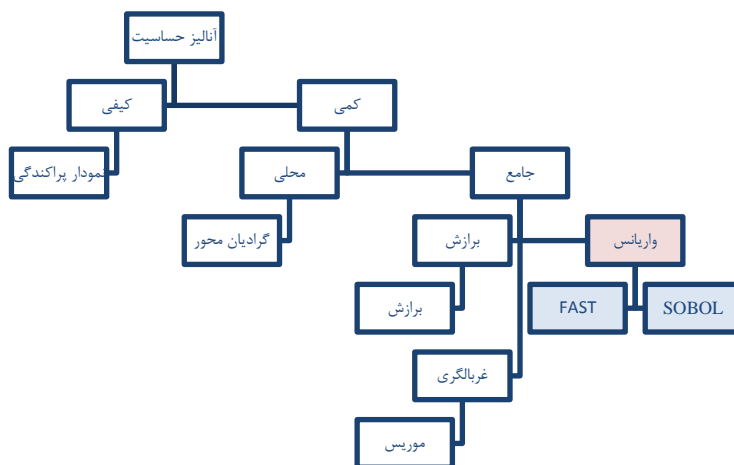
واحد	IRWQI _{sc}	NSFWQI	پارامتر
درصد اشباع	۰/۰۹۷	۰/۱۷	DO
سانتی‌گراد	-	۰/۱	T
بر حسب MPN/100ml	۰/۱۴	۰/۱۶	CF
NTU	۰/۰۶۲	۰/۰۸	TUR
mg/lit	۰/۰۸۷	۰/۱	P
mg/lit	۰/۱۰۸	۰/۱	N
mg/lit	۰/۰۵۹	۰/۰۷	TDS
واحد استاندارد	۰/۰۵۱	۰/۱۱	PH
mg/lit	۰/۱۱۷	۰/۱۱	BOD
mg/lit	۰/۰۹۳	-	COD
mho/cm	۰/۰۹۶	-	EC
mg/lit	۰/۰۹۰	-	NH ₄
mg/lit	۰/۰۵۹	-	سختی کل

جدول ۳- تفسیر آلودگی بر اساس مقدار عددی شاخص NSFQI (هاشمی و همکاران، ۱۳۹۱)

رنگ	کلاس	مقدار عددی
قرمز	خیلی بد	۰-۲۵
نارنجی	بد	۲۵-۵۰
زرد	متوسط	۵۰-۷۰
سبز	خوب	۷۰-۹۰
آبی	عالی (خیلی خوب)	۹۰-۱۰۰

جدول ۴- تفسیر آلودگی بر اساس مقدار عددی شاخص IRWQI_{sc} (هاشمی و همکاران، ۱۳۹۱)

رنگ	کلاس	مقدار عددی
قرمز	بد	۱۵-۲۹.۹
نارنجی	نسبتاً بد	۳۰-۴۴.۹
زرد	متوسط	۴۵-۵۵
سبز	نسبتاً خوب	۵۵.۱-۷۰
نیلی	خوب	۷۰.۱-۸۵
آبی	عالی (خیلی خوب)	بیشتر از ۸۵



شکل ۲- دسته‌بندی کلی روش‌های آنالیز حساسیت

تحلیل عدم قطعیت و آنالیز حساسیت معادلات NSFQI و IRWQI_{SC}

جهت تعیین عدم قطعیت و آنالیز حساسیت معادلات، ابتدا داده‌های نمونه‌برداری شده نرمال‌سازی شد و با استفاده از نرم‌افزار Easy-Fit بهترین توزیع داده‌ها انتخاب گردید و مقادیر میانگین و انحراف معیار و سایر داده‌های آماری مورد استفاده در انواع توزیع‌ها به دست آمد. سپس با استفاده از نرم‌افزار Sim-Lab و تکنیک مونت کارلو نمونه‌های تصادفی به مقدار مورد نیاز شبیه‌سازی گردید. از آنجاکه مدل NSFQI یک مدل خطی و Monotonic بود، تکنیک SRC^۲ دقت بیشتری نسبت به روش Fast(total-order) دارد (Song et al, 2014). به همین دلیل از روش SRC برای تعیین آنالیز حساسیت مدل NSFQI استفاده شد. مدل IRWQI_{SC} یک مدل غیرخطی و non-monotonic بود. برای تحلیل عدم قطعیت و آنالیز حساسیت این مدل از روش‌های FAST و Sobol استفاده گردید. در انتها با استفاده از رویکرد Factor-Priorization حساس‌ترین پارامتر مدل در هر یک از ایستگاه‌های مورد نظر در رودخانه هراز تعیین شد.

تکنیک مونت کارلو

این تکنیک در واقع یک نوع روش شبیه‌سازی می‌باشد. شبیه‌سازی مونت کارلو در واقع ایجاد یک محیط ساختگی و استفاده از یک مدل نظری است. برای تخمین رفتار یک سیستم موجود، محیط ساختگی یا مصنوعی، فضایی است که در آن تحلیلگر تلاش می‌کند تا سیستم در جهان حقیقی الگویابی گردد. در این مطالعه ابتدا توزیع هر کدام از پارامترهای مدل بررسی شده و با استفاده از مقادیر آماری

روش‌های مبتنی بر واریانس شامل دو تکنیک FAST و Sobol می‌باشند (Satelli, 2012). در روش FAST اثر اندرکنش پارامترها بر واریانس خروجی دیده نمی‌شود ولی در روش Sobol این اثرات مشاهده می‌شود. تجزیه واریانس کل خروجی به پارامترهای تشکیل دهنده و اثرات متقابل آنها را می‌توان به صورت رابطه ۳ نشان داد (Satelli et al, 2008):

$$D(f) = \sum_i D_i + \sum_{i < j} D_{ij} + \sum_{i < j < k} D_{ijk} + D_{12...p} \quad (3)$$

که در آن $D(f)$ نشاندهنده واریانس کل خروجی، D_i سهم واریانس مرتبه اول از پارامتر i ، D_{ij} و D_{ijk} به ترتیب سهم واریانس مرتبه دوم و سوم از اثرات متقابل بین پارامترهای i و j و $D_{12...p}$ شامل همه برهم کنش‌های بالاتر از مرتبه سوم است. شاخص‌های حساسیت مرتبه اول و کل، به ترتیب، به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$S_i = \frac{D_i}{D} \quad (4)$$

$$S_{Ti} = 1 - \frac{D_{\sim i}}{D} \quad (5)$$

شاخص مرتبه اول بخشی از کل واریانس خروجی تشکیل شده به وسیله پارامتر i است. شاخص مرتبه کل، یک منهای بخشی از واریانس کل منسوب به $D_{\sim i}$ که نشان دهنده تمام پارامترها به جز i است. به دلیل افزایش اثرات متقابل با افزایش تعداد پارامترها و همچنین دامنه تغییرات آنها، روش تجزیه واریانس برای مدل‌هایی که تعداد پارامترهای آنها زیاد است، روش مناسبی است هرچند کاربرد این روش در مدل‌های پیچیده با تعداد بسیار زیاد پارامتر به علت افزایش تعداد ارزیابی‌های مدل دشوار به نظر می‌رسد (Song et al, 2015). در این مطالعه از شاخص حساسیت کل هر پارامتر، یعنی اثر جداگانه هر پارامتر به اضافه برآوردی از برهمکنش‌های آن با همه پارامترهای دیگر، استفاده شده است.

شکل ۳، مقادیر شاخص‌های کیفی و جدول ۵، تفسیر آلودگی‌ها را در فصل بهار را نشان می‌دهد. بررسی بارش‌های سال ۱۴۰۰ در ایستگاه تیخیر سنجی کره سنگ نشان داد که رودخانه در ماه بهار، به علت بارانهای فراوان و در نتیجه وجود دبی زیاد، در وضعیت کیفی نسبتاً بد تا متوسط قرار دارد که دلیل آن مقادیر زیاد کلی‌فرم و فسفات (به‌خصوص در اردیبهشت ماه) موجود در کل رودخانه در این فصل سال از کیفیت آب رودخانه کاسته است. مقادیر افزایش BOD و فسفات در ایستگاه‌های پایین‌دست سبب شده است تا کیفیت آب رودخانه از متوسط تا حد نسبتاً بد تغییر یابد. مقادیر شاخص IRWQI نشان داده است که در ایستگاه‌های S₁ تا S₄ (پنجاب تا گرم ره) کیفیت آب رودخانه متوسط و در ایستگاه‌های S₅₋₁ و S₅ (چلاو) نسبتاً بد بوده است که دلیل آن می‌تواند فاضلاب روستا، وجود معادن شن و ماسه، کارگاه پرورش ماهی، زمین‌های کشاورزی و رستوران‌های حاشیه رودخانه در بالادست ایستگاه باشد. همچنین بر اساس شاخص NSFQI ایستگاه‌های پنجاب S₁ و چلاو فرعی S₅₋₁ دارای وضعیت بد و سایر ایستگاه‌ها دارای کیفیت متوسط بوده‌اند. وضعیت کیفی کل بازه، در هر دو شاخص وضعیت متوسط کیفی را نشان دادند.

مربوط به ویژگی آنها شامل میانگین، واریانس و غیره، داده‌های جدید تولید گردید. در نهایت با انتخاب نوع روش نمونه‌گیری و واردکردن پارامترها برای توزیع منتخب، آنالیز حساسیت هرکدام از پارامترها با در نظر گرفتن اثرشان روی مدل، بر اساس روش‌های Variance-based (گلوبال) انجام شد (Zeng et al, 2012).

نتایج و بحث

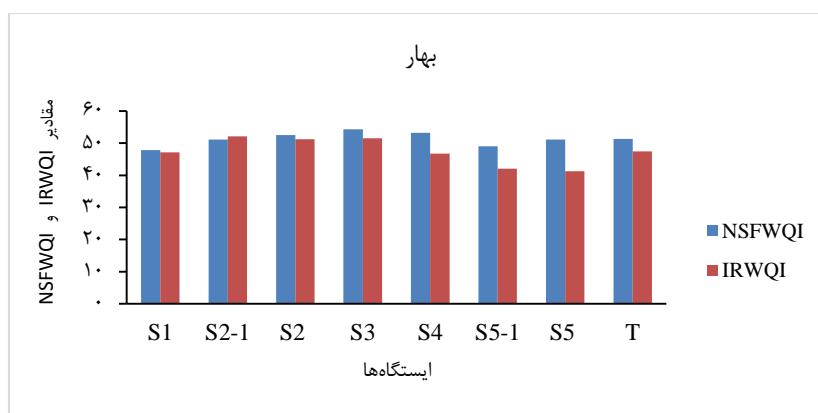
به منظور تشریح بهتر وضعیت کیفی آب رودخانه هراز، مقادیر محاسبه شده شاخص‌های کیفی NSFQI و IRWQI در فصول مختلف سال ۱۴۰۰ با هم مقایسه گردید. از این پس در سرتاسر متن منظور از نتایج کیفی آب در فصول مختلف سال اعم از بهار، تابستان، پاییز و زمستان سال ۱۴۰۰ می‌باشد. سپس تحلیل عدم قطعیت و آنالیز حساسیت مدل‌ها در هریک از ایستگاه‌های رودخانه هراز و فصول مختلف سال انجام گرفت.

مقایسه شاخص‌های کیفی آب در فصول مختلف

بر اساس مقدار عددی شاخص‌های NSFQI و IRWQI

جدول ۵- کلاس کیفیت آب رودخانه در فصل بهار بر اساس مقدار عددی شاخص‌های NSFQI و IRWQI

نماد	ایستگاه	شاخص IRWQI		شاخص NSFQI	
		مقدار عددی	وضعیت کیفی	مقدار عددی	وضعیت کیفی
S ₁	پنجاب	۴۷/۱	متوسط	۴۷/۹	بد
S ₂₋₁	رزن فرعی	۵۲/۱	متوسط	۵۱/۱	متوسط
S ₂	رزن	۵۱/۲	متوسط	۵۲/۵	متوسط
S ₃	سیاه‌بیشه	۵۱/۵	متوسط	۵۴/۲	متوسط
S ₄	گرم ره	۴۶/۷	متوسط	۵۳/۲	متوسط
S ₅₋₁	چلاو فرعی	۴۲/۱	نسبتاً بد	۴۹	بد
S ₅	چلاو	۴۱/۲	نسبتاً بد	۵۱/۱	متوسط
T	کل منطقه	۴۷/۴	متوسط	۵۱/۳	متوسط



شکل ۳- مقادیر شاخص‌های کیفی در ایستگاه‌های مختلف رودخانه هراز در فصل بهار

، بد می‌باشد. این مقادیر حدود عدد ۵۰ می‌باشد. تقسیم‌بندی کیفی آب در رودخانه بر اساس شاخص IRWQI_{sc} نشان داد که مقادیر DO کم، COD زیاد، کلی فرم بالا، سختی کل بالا و BOD زیاد، تأثیر زیادی روی مقادیر شاخص دارد به طوری که از کیفیت متوسط تا نسبتاً بد متغیر است. بررسی‌های صورت گرفته نشان داد عامل اصلی نزول کیفیت آب رودخانه هراز در ایستگاه‌های مورد مطالعه فعالیت‌های کشاورزی، کارگاه‌های شن و ماسه و تخلیه فاضلاب‌های رستوران‌های بین‌راهی بوده است. برداشت‌های بی‌رویه آب به وسیله ایستگاه‌های پمپاژ احداث شده در رودخانه (شکل ۵) تا حد زیادی از مقدار دبی جریان رودخانه در فصل تابستان کاسته بود که این امر نیز به نوبه خود باعث افزایش غلظت مواد آلاینده در رودخانه شده است.

بر اساس مقدار عددی شاخص‌های NSFQI و IRWQI_{sc} شکل ۴، مقادیر شاخص‌های کیفی و جدول ۶ تفسیر آلودگی‌ها را در فصل تابستان را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد در فصل تابستان به علت دمای بالا و کاهش دبی رودخانه، مقادیر DO کاهش و BOD افزایش یافته است. از طرفی افزایش غلظت کلی فرم مدفوعی و مقادیر جامدات معلق در آب کیفیت آب رودخانه را کاهش داده است. میزان فسفات و نیترات بر روی شاخص NSFQI تأثیر چندانی نداشت ولی بر روی شاخص IRWQI_{sc} تأثیر زیادی داشته به طوری که یکی از علل کاهش این شاخص در طول رودخانه در این فصل بود. کیفیت آب رودخانه هراز بر اساس شاخص NSFQI در ایستگاه‌های بالادست S_۱، S_۲، S_{۱-۲} و S_۳ متوسط و در ایستگاه‌های S_۴، S_{۱-۵} و S_۵

جدول ۶- کلاس کیفیت آب رودخانه در فصل تابستان بر اساس مقدار عددی شاخص‌های NSFQI و IRWQI_{sc}

نماد	ایستگاه	شاخص IRWQI		شاخص NSFQI	
		مقدار عددی	وضعیت کیفی	مقدار عددی	وضعیت کیفی
S ₁	پنجاب	۴۹/۷	متوسط	۵۱/۱	متوسط
S ₂₋₁	رزن فرعی	۴۹/۲	متوسط	۵۰/۳	متوسط
S ₂	رزن	۴۷/۵	متوسط	۵۰/۹	متوسط
S ₃	سیاه‌بیشه	۴۶/۲	متوسط	۴۹/۶	بد
S ₄	گرم ره	۴۲/۶	نسبتاً بد	۵۰/۹	متوسط
S ₅₋₁	چلاو فرعی	۴۱/۵	نسبتاً بد	۴۹/۵	بد
S ₅	چلاو	۳۹/۱	نسبتاً بد	۴۹/۹	بد
T	کل منطقه	۴۵/۰	متوسط	۵۰/۲	متوسط



شکل ۴- مقادیر شاخص‌های کیفی در ایستگاه‌های مختلف رودخانه هراز در فصل تابستان



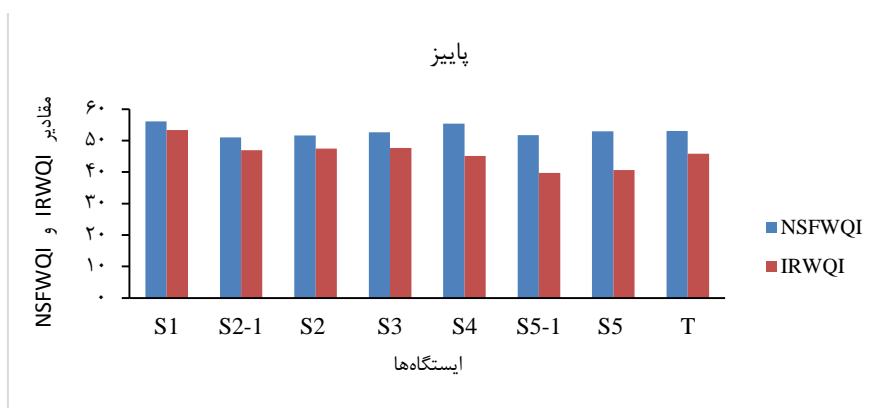
شکل ۵- نمونه پمپاژ و برداشت آب از رودخانه هراز

می‌تواند یک نقطه ضعف برای این شاخص باشد. درحالی‌که شاخص $IRWQI_{sc}$ همین بازه را به صورت متمایزتری از متوسط تا نسبتاً بد مشخص نمود. فاضلاب یکی از دلایل مهم کاهش کیفیت رودخانه در این فصل بود. اگرچه میزان فسفات و نیترات استفاده شده در استخراج پرورش ماهی و دامداری‌های محلی حاشیه رودخانه نیز عامل دیگری جهت کاهش کیفیت آب بودند.

بر اساس مقدار عددی شاخص‌های $NSFWQI$ و $IRWQI_{sc}$ شکل ۶، مقادیر شاخص‌های کیفی و جدول ۷، تفسیر آلودگی‌ها را در فصل پاییز را نشان می‌دهد. شاخص $IRWQI_{sc}$ ایستگاه‌های S_{5-1} (چلاو فرعی) و S_5 (چلاو) را نسبت به شاخص $NSFWQI$ با وضعیت کیفی نامطلوب‌تری نشان داد. با استفاده از شاخص $NSFWQI$ رودخانه هراز در فصل پاییز از ایستگاه سراب یعنی پنجاب تا ایستگاه پایاب یعنی چلاو دارای تفسیر کیفی متوسط بود که این گستردگی

جدول ۷- کلاس کیفیت آب رودخانه در فصل پاییز بر اساس مقدار عددی شاخص‌های $NSFWQI$ و $IRWQI_{sc}$

نماد	ایستگاه	شاخص $IRWQI$		شاخص $NSFWQI$	
		مقدار عددی	وضعیت کیفی	مقدار عددی	وضعیت کیفی
S_1	پنجاب	۵۲/۳	متوسط	۵۶/۱	متوسط
S_{2-1}	رزن فرعی	۴۷/۰	متوسط	۵۱/۰	متوسط
S_2	رزن	۴۷/۵	متوسط	۵۱/۶	متوسط
S_3	سیاه‌بیشه	۴۷/۶	متوسط	۵۲/۶	متوسط
S_4	گرم ره	۴۵/۱	متوسط	۵۵/۴	متوسط
S_{5-1}	چلاو فرعی	۳۹/۸	نسبتاً بد	۵۱/۷	متوسط
S_5	چلاو	۴۰/۷	نسبتاً بد	۵۳/۰	متوسط
T	کل منطقه	۴۵/۸	متوسط	۵۳/۱	متوسط



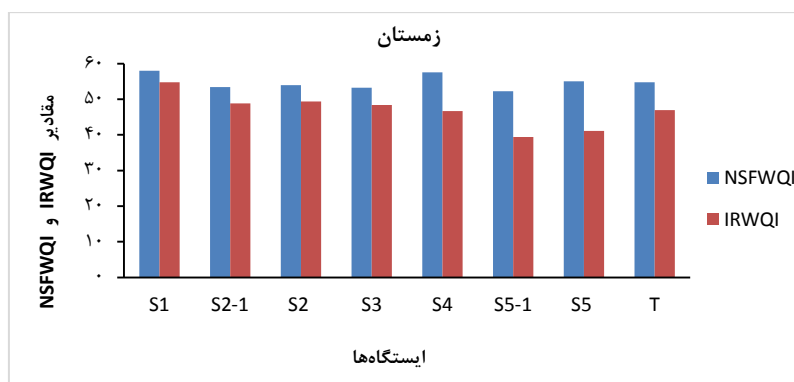
شکل ۶- مقادیر شاخص‌های کیفی در ایستگاه‌های مختلف رودخانه هراز در فصل پاییز

سبب شده است که مقادیر شاخص کیفیت آب کاهش یافته و تا حد ۴۱/۱ در ایستگاه چلاو برسد. دلیل این امر می‌تواند بی‌توجهی به ورود فاضلاب‌های انسانی به داخل رودخانه باشد. روستاهای هم‌جوار و همچنین مسافران بدون هیچ‌گونه ممانعت قانونی انواع زباله و فاضلاب‌ها را به داخل رودخانه می‌ریزند.

بر اساس مقدار عددی شاخص‌های NSFQI و IRWQI_{sc} شکل ۷، مقادیر شاخص‌های کیفی و جدول ۸، تفسیر آلودگی‌ها را در فصل زمستان را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که در فصل زمستان ایستگاه‌های بالادست به دلیل اکسیژن محلول بالا، شفافیت آب، pH مناسب و مقادیر بسیار کم فسفات و نترات دارای کیفیت متوسط نزدیک به خوب بودند. اما به تدریج بالا رفتن مقدار BOD و کلی‌فرم

جدول ۸- کلاس کیفیت آب رودخانه در فصل زمستان بر اساس مقدار عددی شاخص‌های NSFQI و IRWQI_{sc}

نماد	ایستگاه	شاخص IRWQI		شاخص NSFQI	
		مقدار عددی	وضعیت کیفی	مقدار عددی	وضعیت کیفی
S ₁	پنجاب	۵۴/۸	متوسط	۵۸/۰	متوسط
S ₂₋₁	رزن فرعی	۴۸/۸	متوسط	۵۳/۴	متوسط
S ₂	رزن	۴۹/۳	متوسط	۵۴/۰	متوسط
S ₃	سیاه‌پیشه	۴۸/۳	متوسط	۵۳/۲	متوسط
S ₄	گرم ره	۴۶/۷	متوسط	۵۷/۶	متوسط
S ₅₋₁	چلاو فرعی	۳۹/۴	نسبتاً بد	۵۲/۳	متوسط
S ₅	چلاو	۴۱/۱	نسبتاً بد	۵۵/۰	متوسط
T	کل منطقه	۴۶/۹	متوسط	۵۴/۸	متوسط



شکل ۷- مقادیر شاخص‌های کیفی در ایستگاه‌های مختلف رودخانه هراز در فصل زمستان

دهد می‌توان از رویکرد Factor-Fixing استفاده نمود. این رویکرد کمک می‌کند تا با استفاده از یک سری کارهای آماری و نظرات کارشناسی و تجربی دیگر پارامترهای کمتر مؤثر را حول یک عدد خاص ثابت کرد بدون آنکه واریانس خروجی دچار تغییرات زیادی شود (شکوهی و مدبری، ۱۳۹۷). با این رویکرد می‌توان باتوجه‌به اینکه پراکنش پارامترهای pH، N، TDS و کدورت حول مقدار میانگینشان ناچیز بوده و میزان تغییرات آنها قابل اغماض است، از میانگین سالانه یا ماهانه این پارامترها در تعیین شاخص کیفیت استفاده نمود.

نتایج آنالیز حساسیت و تحلیل عدم قطعیت مدل خطی NSFQI به صورت «مکانی» به تفکیک هر ایستگاه نتایج تحلیل عدم قطعیت و آنالیز حساسیت مدل NSFQI به صورت مکانی به تفکیک هر ایستگاه در جدول ۹ آمده است. به صورت مکانی به تفکیک هر ایستگاه در تمامی ایستگاه‌ها به ترتیب پارامترهای DO، BOD، CF، T و P بیشترین تأثیر را بر روی خروجی مدل نشان دادند. اما پارامتر DO بیشترین تأثیر را بر روی واریانس خروجی مدل دارد. در چنین مواردی که یک پارامتر مانند DO توانسته به تنهایی بیشترین واریانس خروجی را به خود اختصاص

جدول ۹- نتایج تحلیل عدم قطعیت و آنالیز حساسیت مدل NSFQI در رودخانه هراز در ایستگاه‌های مختلف (روش SRC)

نماد	ایستگاه	حساسیت مدل										عدم قطعیت
		SD	میانگین	TUR	BOD	TDS	pH	N	P	CF	T	
S ₁	پنجاب	۳/۱	۵۱/۹	-۰/۰۳	۰/۱۱	-۰/۰۹	-۰/۰۳	-۰/۰۴	-۰/۰۶	-۰/۰۶	-۰/۰۳	-۰/۴۵
S ₂₋₁	رزن فرعی	۱/۸	۵۱/۲	-۰/۰۹	۰/۰۹	-۰/۰۴	-۰/۰۵	-۰/۰۶	-۰/۱۰	-۰/۰۵	-۰/۰۴	-۰/۳۲
S ₂	رزن	۲/۰	۵۲/۰	-۰/۰۸	۰/۰۵	-۰/۰۱	-۰/۰۲	-۰/۰۸	-۰/۰۴	-۰/۰۴	-۰/۰۲	-۰/۶۸
S ₃	سیاه‌بیشه	۱/۷	۵۱/۰	-۰/۰۹	۰/۰۸	-۰/۰۸	-۰/۰۷	-۰/۰۱۰	-۰/۰۶	-۰/۰۵	-۰/۰۲	-۰/۳۲
S ₄	گرم‌ره	۲/۶	۲۵/۶	-۰/۰۶	۰/۰۴	-۰/۱۰	-۰/۰۲	-۰/۰۹	-۰/۰۵	-۰/۰۵	-۰/۰۲	-۰/۴۶
S ₅₋₁	چلاو فرعی	۲/۰	۵۰/۱	-۰/۰۶	۰/۰۷	-۰/۰۲	-۰/۰۵	-۰/۰۹	-۰/۰۴	-۰/۰۵	-۰/۰۲	-۰/۴۱
S ₅	چلاو	۱/۹	۵۱/۸	-۰/۰۹	۰/۰۶	-۰/۰۲۰	-۰/۰۵	-۰/۰۱۰	-۰/۰۴	-۰/۰۵	-۰/۰۴	-۰/۳۷

حساسیت حاصل از این دو روش با یکدیگر تفاوت داشت. در ایستگاه S₁ تأثیر پارامترهای DO و BOD بر روی واریانس خروجی مدل تقریباً با هم برابر بود. ولی در سایر ایستگاه‌ها پارامتر DO بیشترین حساسیت را نشان داد و بعد آن پارامتر BOD بالاترین حساسیت را نسبت به سایر پارامترها از خود نشان دادند.

نتایج آنالیز حساسیت و تحلیل عدم قطعیت مدل خطی NSFQI به صورت «زمانی» به تفکیک هر فصل

تغییرپذیری زمانی پارامترهای مدل NSFQI در جدول ۱۱ آمده است. در تمام ایام سال به ترتیب پارامترهای BOD، CF و DO حساسیت زیادی از خود نشان می‌دهند. BOD به عنوان حساس‌ترین پارامتر در تمام فصول سال در حوضه رودخانه هراز بود که دلیل این امر می‌تواند تجزیه بیوشیمیایی مواد آلی در آب رودخانه در اثر ورود انواع فاضلاب‌های رستوران‌ها و کشاورزی می‌باشد. حساسیت پارامترهای DO در فصول پاییز و زمستان به دلیل بارش باران و برف در حوضه رودخانه هراز کاهش می‌یابد. فعالیت‌های آبی‌پروری و نیز ورود کنترل نشده فاضلاب باعث افزایش حساسیت CF شده به طوری که حساسیت آن از ۰/۰۱ در تابستان به ۰/۲۵ در زمستان می‌رسد.

نتایج آنالیز حساسیت و تحلیل عدم قطعیت مدل غیر خطی IRWQISC به صورت «مکانی» به تفکیک هر ایستگاه

نتایج تحلیل عدم قطعیت و آنالیز حساسیت مدل IRWQISC به صورت مکانی به تفکیک هر ایستگاه در جدول ۱۰ آمده است. تحلیل عدم قطعیت مدل IRWQISC برای ایستگاه‌های مختلف رودخانه هراز نشان داد که ایستگاه‌های S₁، S₂₋₁، S₂، S₃، S₄ دارای کیفیت متوسط می‌باشند. در دو ایستگاه آخر S₅₋₁، S₅ کیفیت آب رودخانه در طول سال به صورت نسبتاً بد بود که دلیل این امر می‌تواند تفاوت در مقدار دبی جریان و فصول مختلف سال و نوع آلودگی موجود در رودخانه باشد. نتایج آنالیز حساسیت مدل IRWQISC براساس رویکرد Factor Priorization نشان داد که پارامتر DO بیشترین تأثیر را بر روی واریانس خروجی مدل در ایستگاه‌های بالادست دارد. بعد از پارامتر DO می‌توان از پارامترهای BOD، P و N به عنوان پارامترهای دارای حساسیت بالا نام برد.

تکنیک Fast در ایستگاه S₂، S₃، S₄، نتوانست جواب مشخصی را ارائه نماید لذا از تکنیک Sobol جهت تحلیل حساسیت مدل استفاده شد. نتایج حاصل از روش Sobol در جدول ۱۱ آمده است. تحلیل عدم قطعیت مدل IRWQISC در روش Sobol برای ایستگاه‌های مختلف رودخانه هراز با روش Fast مطابقت دارد. اما نتایج آنالیز

جدول ۱۰- نتایج تحلیل عدم قطعیت و آنالیز حساسیت مدل IRWQISC در رودخانه هراز در ایستگاه‌های مختلف (روش FAST)

نماد	ایستگاه	حساسیت مدل										عدم قطعیت	
		SD	میانگین	COD	سختی	EC	TUR	BOD	pH	N	P		CF
S ₁	پنجاب	۲/۴	۵۰/۳	-۰/۰۴	-۰/۰۲	-۰/۰۱	-۰/۰۷	-۰/۱۳	-۰/۰۶	-۰/۱۹	-۰/۰۹	-۰/۰۵	-۰/۵۵
S ₂₋₁	رزن فرعی	۳/۸	۴۹/۹	-۰/۰۳	-۰/۰۳	-۰/۰۱	-۰/۰۵	-۰/۰۹	-۰/۰۲	-۰/۱۳	-۰/۱۲	-۰/۰۲	-۰/۶۰
S ₂	رزن	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S ₃	سیاه‌بیشه	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S ₄	گرم‌ره	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S ₅₋₁	چلاو فرعی	۲/۷	۳۹/۵	-۰/۰۳	-۰/۰۲	-۰/۰۲	-۰/۰۲	-۰/۱۰	-۰/۱۰	-۰/۱۳	-۰/۱۱	-۰/۱۵	-۰/۶۹
S ₅	چلاو	۱/۵	۳۹/۲	-۰/۰۳	-۰/۰۸	-۰/۰۸	-۰/۰۲	-۰/۱۷	-۰/۱۴	-۰/۰۴	-۰/۰۹	-۰/۰۹	-۰/۵۳

جدول ۱۱- نتایج تحلیل عدم قطعیت و آنالیز حساسیت مدل IRWQI_{SC} در رودخانه هراز در ایستگاه‌های مختلف (روش SOBOL)

نماد	ایستگاه	حساسیت مدل										عدم قطعیت
		SD	میانگین	COD	سختی	EC	TUR	BOD	pH	N	P	
S1	پنجاب	۲/۹۶	۵۰/۳	۰/۰۲	۰/۰۷	۰/۰۲	۰/۰۹	۰/۱۹	۰/۰۹	۰/۱۱	۰/۰۵	۰/۱۹
S2-1	رزن فرعی	۱/۵۱	۴۹/۹	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۷	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۰۸
S2	رزن	۰/۰۲	۴۷/۶	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۱۰	۰/۰۳	۰/۰۹	۰/۱۴	۰/۰۴
S3	سیاه‌بیشه	۰/۷۱	۴۶/۸	۰/۰۰۴	۰/۰۳	۰/۰۹	۰/۰۵	۰/۱۹	۰/۰۳	۰/۱۰	۰/۰۹	۰/۰۶
S4	گرم ره	۰/۴۸	۴۳/۸	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۱۰	۰/۰۶	۰/۱۲	۰/۰۳	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۰۹
S5-1	چلاو فرعی	۰/۲۸	۳۹/۵	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۷	۰/۰۳	۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۱۱
S5	چلاو	۰/۷۰	۳۹/۲	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۱۱	۰/۰۰۴	۰/۲۱	۰/۰۳	۰/۱۰	۰/۰۷	۰/۰۴

جدول ۱۲- نتایج تحلیل عدم قطعیت و آنالیز حساسیت مدل NSFQI در رودخانه هراز در فصول مختلف (روش SRC)

فصل	حساسیت مدل										عدم قطعیت
	SD	میانگین	TUR	BOD	TDS	pH	N	P	CF	T	
بهار	۲/۱	۵۱/۳	۰/۰۹	۰/۵۸	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۱۵	۰/۰۷	۰/۴۸
تابستان	۱/۵	۵۰/۲	۰/۰۹	۰/۵۷	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۵۲
پاییز	۱/۸	۵۳/۱	۰/۰۸	۰/۴۳	۰/۰۴	۰/۰۹	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۱۷	۰/۰۵	۰/۳۲
زمستان	۲/۱	۵۴/۸	۰/۰۷	۰/۴۳	۰/۰۲	۰/۱۰	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۲۵	۰/۰۸	۰/۲۷

تغییرپذیری زمانی پارامترهای مدل IRWQI_{SC} در جدول ۱۳ آمده است. BOD به‌عنوان حساس‌ترین پارامتر در تمام فصول سال در حوضه رودخانه هراز بوده است. پس از این پارامتر CF و COD و DO در رتبه‌بندی بعدی قرار دارند که دلیل آن می‌تواند شکل غیرخطی معادله و ضریب وزنی بالای این پارامترها باشد. در سایر پارامترهای مدل پراکندگی در طول سال دیده نمی‌شود به طوری که می‌توان مانند مدل NSFQI از متوسط داده‌های درازمدت آنها جهت اندازه‌گیری کیفیت آب بر اساس نظرات کارشناسی و یک سری تمهیدات خاص استفاده نمود.

پارامترهای نیترژن و فسفر اگرچه نقش مهمی در فعل‌وانفعالات شیمیایی در آب دارد اما پراکندگی ناچیزی در طول فصول مختلف سال نشان داده‌اند که به همین دلیل می‌توان از متوسط یا میانگین آنها استفاده نمود. نقش پارامترهای TDS، TUR و درجه حرارت نیز به همین منوال بوده به طوری که بر اساس نظرات کارشناسی و یک سری تمهیدات می‌توان از متوسط داده‌های درازمدت آنها جهت اندازه‌گیری کیفیت آب بر اساس مدل استفاده نمود.

نتایج آنالیز حساسیت و تحلیل عدم قطعیت مدل غیرخطی IRWQI_{SC} به صورت «زمانی» به تفکیک هر فصل

جدول ۱۳- نتایج تحلیل عدم قطعیت و آنالیز حساسیت مدل IRWQI_{SC} در رودخانه هراز در فصول مختلف

فصل	حساسیت مدل										عدم قطعیت	
	SD	میانگین	COD	سختی	EC	TUR	BOD	pH	N	P		CF
بهار	۴/۱	۴۷/۴	۰/۱۸	۰/۰۴	۰/۰۹	۰/۰۰۶	۰/۶۲	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۶	۰/۱۹	۰/۱۰
تابستان	۳/۹	۴۵/۰	۰/۱۶	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۰۶	۰/۶۷	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۷	۰/۲۱	۰/۱۵
پاییز	۴/۳	۴۵/۸	۰/۱۳	۰/۰۳	۰/۰۰۶	۰/۰۰۶	۰/۴۸	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۶	۰/۴۳	۰/۱۹
زمستان	۴/۸	۴۶/۹	۰/۱۴	۰/۰۳	۰/۰۰۶	۰/۰۰۶	۰/۶۱	۰/۰۵	۰/۰۰۳	۰/۰۹	۰/۳۵	۰/۱۳

نتیجه‌گیری

مقادیر جامدات معلق در آب، کیفیت آب رودخانه را کاهش داده است. کیفیت آب در ایستگاه پنجاب یا S₁ که محل برخورد سرشاخه نامرستاق به رودخانه اصلی هراز می‌باشد و در ایستگاه فرعی رزن S₂ در سرشاخه نور، در بهترین حالت «نسبتاً خوب» و در بدترین حالت در شه‌ریورماه دارای کیفیت «بد» می‌باشند. کیفیت آب در

بر اساس نتایج بدست آمده از پژوهش حاضر، در فصل تابستان به علت دمای بالا و کاهش دبی رودخانه، مقادیر DO کاهش و BOD افزایش یافته و درعین حال افزایش غلظت کلی فرم مدفوعی و

اثر دو پارامتر DO و BOD بر نتایج حاصل از به کارگیری این شاخص در ارزیابی کیفیت رودخانه هراز در مقایسه با دیگر پارامترها از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشد.

منابع

امین‌پور شیانی، س.، محمدی، م.، خالدیان، م. و میر روشندل، الف. ۱۳۹۵. ارزیابی کیفیت آب رودخانه گازرودبار با استفاده از شاخص کیفی NSFQI و شاخص آلودگی Liou اکوبیولوژی تالاب. ۸ (۱): ۶۳-۷۴.

اختر، ف.، فضل اولی، ر.، درزی، ع. و مشهدی خلردی، ف. ۱۳۹۵. بررسی تأثیر وجود منطقه شهری بر کیفیت آب رودخانه هراز در محدوده شهرستان آمل (با استفاده از شاخصهای کیفی IRWQI، OWQI)، سومین کنگره سراسری در مسیر توسعه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، گرگان.

رضاییان، ج.، جهانبخشی، س. و جمشیدی، س. ۱۳۹۹. آنالیز حساسیت پارامترهای تولیدی یکی از میادین نفتی ایران با استفاده از روش جامع سوپول. پژوهش نفت. ۱۳ (۱): ۳۷ تا ۴۵.

زمانی، ر.، محمودی، الف.، قائد امینی، ف.، و نجفی، م. ۱۴۰۰. الگوی توزیع مکانی کیفیت آب رودخانه پیرغار با استفاده از شاخص کیفیت آب NSFQI و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS). فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط زیست. ۲۳ (۲): ۲۰ - ۳۱.

شکوهی، ر.، حسین زاده، الف.، روشنایی، ق.، علی پور، م. و حسین زاده، س. ۱۳۹۰. بررسی کیفیت آب دریاچه پشت سد آیدغوش با استفاده از شاخص کیفیت آب (NSFWQI) و بیان مواد مغذی. نشریه سلامت و محیط زیست. ۴ (۱۴): ۴۳۹ - ۴۵۰.

شکوهی، ع. و مدبری، ه. ۱۳۹۷. ارزیابی و مقایسه حساسیت مدل‌های NSFQI و IRWQI نسبت به پارامترهای کیفیت آب. تحقیقات منابع آب ایران. ۱۴ (۵): ۱۱۸ - ۱۳۲.

فرامرزی اصلی، م.، رستمی لامشکن، م. و رمضان زاده، ک. ۱۳۹۷. نقش توسعه شهری بر منابع آلودگی آب نمونه موردی استان مازندران. دومین کنفرانس سالانه ملی معماری، شهرسازی، جغرافیا و عمران - ۱۳۹۷.

کاظمی، پ.، شریفی، ف. و کشاورز شکری، ع. ۱۳۹۷. ارزیابی کیفی آب رودخانه لنگرودرودخان با استفاده از شاخص کیفی NSFQI. نشریه علوم محیطی. ۱۶ (۳): ۶۵ - ۷۸.

ماه رویان، ف.، تقوی، ل.، سرائی تبریزی، م. و بابازاده، ح. ۱۳۹۹. ارزیابی کیفیت آب رودخانه استان قزوین با استفاده از شاخص NSFQI جهت طبقه بندی کیفی آب. اکوبیولوژی تالاب. ۴۳

ایستگاه‌های رزن S₂، سیاه‌بیشه S₃، گرم ره S₄، چالو فرعی S₅₋₁ و چالو S₅، در بهترین حالت «متوسط» و در بدترین حالت در شهریورماه دارای کیفیت «بد» می‌باشد. کیفیت آب رودخانه هراز به جز ماه‌های گرم بهار و تابستان در طی ماه‌های مختلف تغییرات چندانی نداشت. در بررسی مکانی تغییرات آلودگی رودخانه از ایستگاه‌های بالادست به طرف پایین دست از کیفیت آب به نحو چشم‌گیری کاسته می‌شود. در نتیجه جهت مدیریت اصولی آب رودخانه هراز باید تمهیداتی اندیشیده شود و برنامه پایش کیفی آب در آن استمرار یابد. نتایج حاصل از این مطالعه با نتایج امین‌پور و همکاران (۱۳۹۵) مبنی بر افزایش میزان آلودگی و کاهش کیفیت آب رودخانه گاز رودبار، از ایستگاه‌های بالادست به سمت پایین دست به علت ورود انواع آلاینده‌های خانگی، روستایی، شهری و کشاورزی، مطابقت دارد. در این مطالعه به طور خاص از بررسی نتایج دو مدل موردنظر در ارزیابی کیفیت آب رودخانه هراز در تمام فصول سال مشخص گردید که در ایستگاه‌های پایین دست مقدار شاخص کیفی آب ایران IRWQI کمتر از شاخص کیفی بین‌المللی NSFQI است. علت اصلی این امر می‌تواند اولاً کمتر بودن حساسیت مدل IRWQI به DO و بعد، کمتر بودن حساسیت مدل NSFQI به غلظت فسفات و نیترژن باشد که برخلاف اکسیژن محلول به سمت پایین دست افزایش می‌یابند.

نتایج آنالیز حساسیت مدل NSFQI در ایستگاه‌های مختلف (در تحلیل مکانی) بر اساس رویکرد Factor Prioritization نشان داد که به ترتیب پارامترهای DO، BOD، CF، T و P بیشترین تأثیر را بر روی خروجی مدل نشان دادند. نتایج آنالیز حساسیت مدل IRWQI بر اساس رویکرد Factor Prioritization نشان داد که پارامتر DO بیشترین تأثیر را بر روی واریانس خروجی مدل در ایستگاه‌های بالادست دارد. بعد از پارامتر DO می‌توان از پارامترهای BOD، P و N به عنوان پارامترهای دارای حساسیت بالا نام برد. در تحلیل عدم قطعیت، نتایج حاصل از به کارگیری متدولوژی Sobol برای ایستگاه‌های مختلف رودخانه هراز با روش FAST مطابقت داشت اما نتایج آنالیز حساسیت حاصل از این دو روش با یکدیگر متفاوت بودند. باتوجه به نتایج حاصله و علی‌رغم نزدیکی نتایج حاصل از دو روش، می‌توان گفت متدولوژی Sobol باتوجه به همگرایی بدون قید و شرط در این مطالعه موفق تر از متدولوژی FAST عمل نموده است، این ارزیابی با نتایج تحقیق Zhan et al (2013) مطابقت دارد. از میان ۹ پارامتر مورد استفاده در شاخص NSFQI حساس‌ترین و در عین حال مؤثرترین پارامتر بر عدم قطعیت نتایج ارزیابی کیفیت رودخانه هراز، پارامتر DO می‌باشد. این امر که مؤید نظرات کارشناسی در تعیین ضریب وزنی این پارامتر در شاخص مزبور می‌باشد، دال بر اهمیت دقت اندازه‌گیری این پارامتر در مقابل ۸ پارامتر دیگر است. از میان ۱۱ پارامتر مورد استفاده در شاخص

- River water quality in Golestan Province using NSFQI and IRWQISC. *Journal of Health in the Field*. 3(3):27-33.
- Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M. and Tarantola, S. 2008. *Global sensitivity analysis: the primer*. John Wiley & Sons, 305p.
- Saltelli, A., Ratto, M., Tarantola, S. and Campolongo, F. 2012. Update 1 of: Sensitivity analysis for chemical models. *Chemical Reviews*. 112: PR1-PR21
- Saltelli, A., Ratto, M., Tarantola, S. and Campolongo, F. 2012. Update 1 of: Sensitivity analysis for chemical models. *Chemical Reviews*. 112: PR1-PR21.
- Saltelli, A., Tarantola, S., Campolongo, F. and Ratto, M. 2004. *Sensitivity analysis in practice: A guide to assessing scientific models*. John Wiley & Sons, Ltd. 232p.
- Samadi, J. 2015. Survey of spatial-temporal impact of quantitative and qualitative of land use wastewaters on Choghakhor Wetland pollution using IRWQI Index and statistical methods. *Iranian Water Resources Research*. 11(3): 159-171.
- Sharifdini NG, Amirnezhad R, Saeb K. 2014. Qualification zoning of the Dohezar River according to NSFQI and using GIS. *J Mazandaran Univ Med Sci*. 24(118):29-39.
- Sobol, I.M. 2001. Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates. *Mathematics and Computers in Simulation*. 55: 271-280.
- Sohrabi, N., Alizade, A., Hasoonizade, H. and Hosseinzade, S. 2015. Qualitative zoning of the Surgical River based on the NSFQI index and using the GIS. *Journal of Wetland Ecobiology*. 22: 31-40.
- Song, X., Zhang, J., Zhan, C., Xuan, Y., Ye, M. and Xu, C. 2015. Global sensitivity analysis in hydrological modeling: Review of concepts, methods, theoretical framework, and applications. *Journal of hydrology*. 523: 739-757.
- Tian, W. 2013. A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 20: 411-419.
- Zeng, X., Wang, D. and Wu, J. 2012. Sensitivity analysis of the probability distribution of groundwater level series based on information entropy. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 26: 345-356.
- Zhan, C-S., Song, X-M., Xia, J. and Tong, C. 2013. An efficient integrated approach for global sensitivity analysis of hydrological model parameters. *Environmental Modelling and Software*. 41: 39-52.
- میری، م. ۱۳۹۶. ارزیابی کیفیت آب چاه نیمه های سیستان براساس شاخص های کیفی NSFQI، IRWQI و شاخص آلودگی Liou. *نشریه اکوبیولوژی تالاب*. ۹ (۴): ۸۷ - ۱۰۰.
- هاشمی، س.، فرزام پور، ت. و خوشرو، ق. ۱۳۹۱. راهنمای محاسبه شاخص کیفیت منابع آب ایران. سازمان حفاظت محیط زیست ایران.
- هوشمند، س.، و اگدرتژاد، الف. ۱۴۰۰. ارزیابی کیفیت آب رودخانه کارون بر اساس شاخص های NSFQI و IRWQISC و تعیین وزن پارامترهای موثر در این دو شاخص با آنالیز خوشه‌ای و تحلیل سلسله مراتبی. *نشریه علمی اکوبیولوژی تالاب- دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز*. ۱۳ (۴۹): ۴۷ - ۶۰.
- یوسفی، ح.، محمدی، ع. و نورالهی، ی. ۱۳۹۷. آنالیز کیفیت آب سد باباخیدر فارسان با استفاده از روش تحلیلی NSFQI. *پژوهشنامه مدیریت حوضه آبخیز*. ۹ (۱۸): ۱ - ۱۱.
- APHA. 2005. *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 23th edition. American Public Health Association, Washington, DC. USA, 541p.
- Brown, RM., McLelland, N.J., Deininger, R.A. and Tozer, RG. 1970. A water quality index do we dare? *Water and Sewage Works*. 339-343.
- Herman, J., Reed, P. and Wagener, T. 2013. Time-varying sensitivity analysis clarifies the effects of watershed model formulation on model behavior. *Water Resources Research*. 49:1400-1414.
- Massmann, C. and Holzmann, H. 2012. Analysis of the behavior of a rainfall-runoff model using three global sensitivity analysis methods evaluated at different temporal scales. *Journal of Hydrology*. 475: 7-110.
- Mohseni-Bandpey, A., Majlesi, M. and Kazempour, A. 2014. Evaluation of Golgol river water quality in Ilam province based on the National Sanitation Foundation Water Quality Index (NSFWQI). *Journal of Health in the Field*. 1(4):1-7.
- Pappenberger, F., Beven, K.J., Ratto, M. and Matgen, P. 2008. Multi-method global sensitivity analysis of flood inundation models. *Advances in Water Resources*. 31:1-14.
- Parastar, S., Poureshgh, B., Dargahhi, A., Poresgh, Y. and Vosoughi, M. 2013. Quality assessment of Hiroo River by NSFQI and WILCOX indices in Khalkhal. *Health Journal*. 4(3):273-283.
- Sadeghi, M., Bay, A., Bay, N., Soflaie, N., Mehdinejad, M.H. and Mallah, M. 2015. The survey of Zarin-Gol

Sensitivity Assessment of Two Water Quality Models NSFWQI and IRWQISC in Haraz River

S. Larijani¹, H. Banejad^{*2}, A. Kavian³, A. N. Ziaei⁴
Received: May.21, 2022 Accepted: Jun.29, 2022

Abstract

Water quality indicators are a standard for classifying surface water based on the use of standard parameters and are a mathematical tool that converts a large amount of data used to describe water properties into a number and obtains a water quality level. This study aimed to assess and compare the sensitivity of NSFWQI and IRWQISC water quality indicators to quality parameters using variance-based methods on Haraz River with monthly sampling in 2022 in 7 selected stations in the range of Panjab to Haraz Reservoir Dam in the province Mazandaran. The results of the present study have shown that the water quality in S1 (upstream) and S2-1 stations are relatively good at best, and bad at worst. Water quality in stations of S2, S3, S4, S5-1, and S5 (downstream), in the best case, is moderate and in the worst case in September has poor quality. SRC method was used to analyze the uncertainty and sensitivity of the NSFWQI index and FAST and SOBOL methodologies were used for the IRWQISC index. The results of sensitivity analysis based on the Factor Prioritization approach showed that in NSFWQI index, DO, BOD, CF, T, and P parameters respectively and in IRWQISC index after DO parameter, BOD, P, and N parameters had the most impact on output. In the uncertainty analysis, the results of applying the SOBOL methodology for different stations of Haraz River were consistent with the FAST method, but the results of sensitivity analysis obtained from these two methods were different from each other. Considering the obtained results and despite the similarity of the results of the two methods, it can be said that the SOBOL methodology has been more successful than the FAST methodology in this study due to unconditional convergence.

Keywords: Assessment, FAST Haraz, Index, SOBOL

1- PhD Student in Water Science and Engineering - Irrigation and Drainage, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
2- Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
3- Professor, Department of Watershed Management Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran
4- Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
(*- Corresponding Author Email: banejad@um.ac.ir)