

ارزیابی راه کارهای کاهش شوری آب رودخانه کارون با استفاده از سناریوهای مدیریتی

بهمن فکوری دکاهی، مهدی مظاهری*، جمال محمودولی سامانی

گروه مهندسی سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۷ آبان ۱۳۹۵
بازنگری: ۱۱ اردیبهشت ۱۳۹۶
پذیرش: ۳ خرداد ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۱۷ خرداد ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

رودخانه کارون
راه کارهای مدیریتی
حذف بارگذاری
کاهش بارگذاری
مدل MIKE11

چکیده: رودخانه کارون بزرگ‌ترین و طولانی‌ترین رودخانه ایران است که در سال‌های اخیر بارگذاری منابع آلاینده موجب افزایش شوری آب رودخانه شده است. هدف از این تحقیق، بررسی راه کارهای مدیریتی برای کاهش شوری رودخانه بصورت سناریوهای حذف و کاهش بارگذاری منابع آلاینده نقطه‌ای در محدوده ملاثانی تا فارسیات (مهم‌ترین بازه تراکم جمعیتی، صنعتی و کشاورزی) با مدل MIKE11 است. نتایج سناریوی حذف منابع آلاینده نشان داد، حذف منابع کشاورزی در فصل خشک و حذف منابع صنعتی و شهری در فصل تر به ترتیب در بالادست و پایین‌دست شهر اهواز تاثیر زیادی در کاهش شوری رودخانه دارد. نتایج سناریوی کاهش نشان داد، کاهش از مرز بالادست در انتهای محدوده مطالعاتی در فصل تر و خشک به ترتیب با متوسط کاهش ۳۵/۱۰ و ۲۶/۱۰ درصد شوری رودخانه مؤثر است. نتایج شبیه‌سازی گزینه‌های ترکیبی نشان داد که، سناریوی کاهش ۵۲٪ شوری از مرز بالادست همراه کاهش ۳۰٪ از منابع نقطه‌ای در دو فصل تر و خشک به ترتیب با متوسط ۶۰ و ۴۶ درصد کاهش شوری عملکرد بهتری نسبت به سایر گزینه‌ها در کاهش شوری رودخانه دارد. مقایسه نتایج سناریوهای برتر با حدود مجاز استاندارد شوری آب نشان داد که در هر دو فصل تر و خشک، شرایط حد مجاز آب شرب و کشاورزی قابل تأمین است.

۱- مقدمه

از منابع آب است. افزایش کیفیت و کاهش شوری آب رودخانه‌ها مستلزم به کارگیری راه کارهای مدیریتی برای کنترل منابع آلاینده است. مدیریت کیفی آب‌ها تلاشی برای حفاظت و بهره‌برداری درست از پیکره‌های آبی در معرض تهدید و آلودگی است [۳-۵]. مدیریت آلودگی در رودخانه‌ها در درجه اول، نیازمند رعایت استاندارد تخلیه از سوی منابع آلاینده است. در مرحله بعد لازم است تا نظارت‌های کافی توسط سازمان‌های مسئول صورت گیرد. مدیریت کیفی یک رودخانه نیاز به یک درک علمی و جامع از فرآیندهای مؤثر در تغییرات کیفیت رودخانه و آگاهی کامل از وضعیت مصرف و بارگذاری منابع آلاینده به رودخانه دارد. شبیه‌سازی کیفی آب رودخانه‌ها تحت سناریوهای مختلف مدیریتی علاوه بر کمک به گرفتن تصمیمات عملیاتی و پروژه‌های کنترل شوری، رساندن کیفیت آب رودخانه به استانداردهای لازم را تسهیل می‌کند. بنابراین هر راه کار مدیریتی قبل از اجرا بایستی در قالب سناریوهای مدیریتی^۱ شبیه‌سازی شده و کارایی آن بررسی گردد [۶]. در ادامه به برخی از تحقیقات مدیریتی کیفی به ویژه کنترل شوری در رودخانه‌ها پرداخته می‌شود. باقریان مرزونی [۷]، به منظور مدیریت کیفی آب رودخانه کارون، به شبیه‌سازی سناریوهای مدیریتی با استفاده از مدل QUAL2K بر اساس

در قرن اخیر، با افزایش جمعیت انسان و نیاز به تولید غذای بیشتر، فشار بیشتری به منابع آبی، به ویژه رودخانه‌ها آمده است. به طوری که برخی رودخانه‌ها نمی‌توانند هر دو نقش تأمین آب و خودپالایی را ایفا کنند. علاوه بر کاهش جریان، کاهش کیفیت آب نیز عامل محدود کننده در بهره‌برداری از آب رودخانه‌هاست. به دلیل عدم نظارت کافی، اندازه‌گیری دقیق، بارگذاری منابع آلاینده نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای، پروژه‌های ساخته بشر، کیفیت بسیاری از رودخانه‌ها بین‌المللی در دهه‌های گذشته به طور قابل توجهی کاهش یافته است [۱]. افزایش بارگذاری منابع آلاینده به رودخانه‌ها از طریق توسعه فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی و شهری پارامترهای کیفی آب رودخانه‌ها را تغییر داده است. شوری یکی از پارامترهای اولیه اندازه‌گیری کیفیت آب رودخانه‌ها است که غلظت نمک‌های محلول در آب را نشان می‌دهد و از طریق بارگذاری منابع آلاینده نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای به رودخانه، مقدار آن افزایش می‌یابد [۲].

مدیریت آلودگی رودخانه‌ها یک وظیفه مهم در برنامه‌ریزی و بهره‌برداری

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m.mazaheri@modares.ac.ir

دو پارامتر DO و BOD در محدوده ملاثانی تا جنوب اهواز پرداختند. نتایج شبیه‌سازی سناریوها نشان داد که: (۱) افزایش جریان برای کاهش آلودگی رودخانه مؤثر نیست. (۲) جابجایی مکان منبع آلاینده با کاهش جریان در وضعیت کیفی آینده رودخانه می‌تواند مؤثر باشد. (۳) با پرداخت ۵۰٪ هزینه تصفیه می‌توان به اهداف زیست‌محیطی رسید. در تحقیقی فاربر^۱ و همکاران [۸]، بحران شوری در رودخانه اردن تحت سناریوهای مدیریتی شامل ترکیبی از حذف هرکدام از منابع آلاینده (پساب ورودی منابع شهری و خانگی، چشمه‌های شور، جریان‌های زیرزمینی) و حذف دیفرانسیلی منابع آلاینده با روش محاسبات بیان جرمی مورد بررسی قرار دادند. نتایج اجرای سناریوها نشان داد که در بخش شمالی رودخانه با حذف پساب ورودی، شوری در پایین دست رودخانه به میزان ۴۴۰۰ میلی‌گرم بر لیتر افزایش می‌یابد؛ در حالی که با حذف منابع چشمه‌های شور ورودی در مسیر، شوری رودخانه ۴۵۰ میلی‌گرم بر لیتر کاهش می‌یابد. با اعمال کاهش ورود ۲۰ تا ۸۰ درصدی آب زیرزمینی به رودخانه به ترتیب شوری رودخانه ۲۰۰۰ تا ۲۳۶۰ میلی‌گرم بر لیتر کاهش می‌یابد. در بخش جنوبی رودخانه حذف پساب ورودی باعث افزایش شوری ۳۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و حذف منابع شور باعث کاهش ۶۶۵ میلی‌گرم بر لیتر می‌شود. بنابراین نتایج نشان داد که بخش شمالی رود اردن می‌تواند به عنوان یک رودخانه کم شور مناسب هر نوع برنامه کشاورزی باشد. اما بخش جنوبی برای برخی از محصولات کشاورزی با محدودیت روبه‌رو است. در تحقیقی کراچیان و کارآموز [۹]، برای مدیریت کیفیت و شوری آب رودخانه کارون روش بهینه‌سازی در حذف یا کاهش بار آلاینده فصلی برای رسیدن به استانداردهای کیفی، استفاده از حوضچه‌های تبخیری با مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک پویایی ترتیبی^۲ (SDGA) را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل ارائه شده می‌تواند در بهینه‌سازی سیاست‌های کاهش بارگذاری آلاینده‌های فصلی و مدیریت سیستم رودخانه‌ای به کار گرفته شود. همچنین در یک سیستم رودخانه‌ای حذف (تصفیه کامل) تمامی منابع آلاینده امکان‌پذیر نیست زیرا بسیاری از منابع آلاینده (نظیر تبادل آب زیرزمینی شور با جریان رودخانه) خارج از کنترل مدیریتی است. در تحقیقی کت^۳ [۱۰]، با استفاده از مدل MIKE11 به شبیه‌سازی سناریوهای مختلف جریان و نیاز آبی در آینده بر اساس نفوذ شوری به مصب رودخانه هوانگ^۴ پرداختند. چهار سناریو را برای وضعیت موجود و نیاز به آب با وضعیت احتمالی در سال ۲۰۲۰ با توجه به نیاز آبی بخش‌های مختلف (شرب، صنعت، کشاورزی و محیط‌زیست) در مسیر رودخانه تعریف نمودند. نتایج نشان داد اگر هیچ آبی وارد رودخانه نشود، آب شور با مقدار ۰/۰۴ کیلوگرم در مترمکعب به مقدار ۸ کیلومتر توسط یک جزر و مد کوتاه و به مقدار ۲۰ کیلومتر توسط جزر و مد کامل وارد رودخانه می‌شود. همچنین پیشنهاد شد، در فصول خشک سال ضمن برداشت کمتر

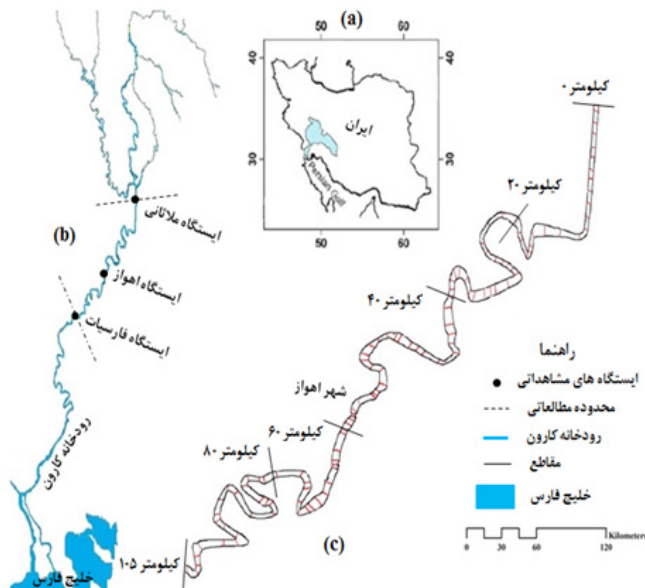
آب رودخانه جهت فعالیت‌های اقتصادی و صنعتی، با احداث سد در بالادست، جریان یکنواختی در رودخانه برقرار گردد. یوه^۵ و همکاران [۱۱]، با استفاده از داده‌های ده ساله از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۱ توزیع شوری در رودخانه بریزین^۶ استرالیا را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که ورود جریان شور در شرایط جزر و مد‌های ضعیف و قوی، به ترتیب شوری در طول رودخانه بین ۰/۴۵ تا ۰/۶ پی اس یو^۷ بر ساعت افزایش می‌یابد. آن‌ها نشان دادند که، تقاطع آب شور و شیرین در وضعیت سیلابی رودخانه در پنج کیلومتر پایین‌تر از شرایط غیر سیلابی رخ می‌دهد. در تحقیقی تری^۸ و همکاران [۱۲]، به بررسی نفوذ شوری در مصب رودخانه مکنگ^۹ در جنوب ویتنام با استفاده از مدل MIKE11 به شبیه‌سازی دو سناریو شامل تأثیر سیلاب‌ها و حداقل جریان از بالادست در شرایط لایروبی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که در مواقع سیلابی شوری رودخانه کاهش یافته اما در هنگام کاهش جریان از بالادست، شوری به شدت در مصب تغییر می‌یابد. با لایروبی، حداکثر جریان ورودی به مصب تغییری نمی‌کند اما با تغییر در شیب کف و در نتیجه در وضعیت امواج جزر و مدی، میزان نفوذ شوری کاهش می‌یابد. بیشترین اثر لایروبی در کاهش نفوذ شوری در مصب رودخانه در فصول خشک اتفاق می‌افتد.

شوری رودخانه کارون در سال‌های اخیر به دلیل بارگذاری منابع آلاینده مختلف افزایش یافته، به طوری که مسئله شوری رودخانه تبدیل به یک معضل زیست‌محیطی شده است. تحقیقات نشان داد که، عامل افزایش شوری رودخانه، کاهش جریان بر اثر خشکسالی‌های اخیر، برداشت‌های بی‌رویه در بالادست، ساخت سدهای متعدد، زه‌آب‌های کشاورزی، پساب‌های صنعتی و خانگی و سازندهای بی‌کیفیت مسیر رودخانه است [۱۳]. در راستای بهبود کیفیت و کاهش شوری آب رودخانه طرح‌های علاج بخشی متعددی توسط متولیان آب کشور ارائه شده است. نظیر ساماندهی پساب‌های ورودی، تکمیل تصفیه خانه شرق اهواز، انتقال زه‌آب‌های کشت و صنعت‌ها و مزارع کشاورزی به مخزن شماره پنج هورالعظیم و مدیریت شوری مخزن سد گنوند می‌توان اشاره نمود [۱۴]. اما کمتر به نحوه مدیریت منابع آلاینده در شرایط و فصول مختلف بر کاهش شوری رودخانه پرداخته شده است.

مروری بر تحقیقات انجام شده در حوزه شبیه‌سازی و مدیریت بارگذاری منابع آلاینده در رودخانه‌های مختلف نشان داد که راه‌کارهای مدیریتی مختلفی بسته به شرایط هر رودخانه برای بهبود کیفیت آب رودخانه‌ها قابل ارائه است. هدف از این تحقیق بررسی راه‌کارهای مدیریتی برای کاهش شوری رودخانه کارون تحت سناریوهای مختلف حذف و کاهش بارگذاری منابع آلاینده نقطه‌ای در محدوده ملاثانی تا فارسیات با استفاده از مدل MIKE11 است. در این تحقیق نویسندگان سعی کردند برای دستیابی به نتایج دقیق، با استفاده از داده‌ها و شرایط واقعی به بررسی و ارزیابی اثر هر

5 Yu
6 Brisbane River
7 Practical Salinity Unit (PSU)
8 Tri
9 Mekong River

1 Farber
2 Sequential Dynamics Genetic Algorithm (SDGA)
3 Cat
4 Huong River



شکل ۱: الف) موقعیت رودخانه کارون، ب) محدوده مطالعاتی، ج) طول محدوده و موقعیت شهرها [۱۹]

Fig. 1. (a) Location of Karun River, (b) study area and (c) the Chainages and location of cities [19]

۲-۲- داده‌ها و منابع آلاینده

سازمان آب و برق و اداره محیط‌زیست استان خوزستان، از متولیان اصلی پایش و نظارت بر کیفیت آب رودخانه کارون است. سازمان آب و برق خوزستان در ده‌های گذشته به طور مستمر در ایستگاه‌های هیدرومتری به نمونه برداری کمیت و کیفیت آب رودخانه پرداخته است [۱۸]. اداره محیط‌زیست استان خوزستان نیز برای صدور مجوز و نظارت بر منابع آلاینده ورودی به رودخانه به پایش کیفی پساب‌های ورودی می‌پردازد. اطلاعات هیدرومتری و کیفی سه ایستگاه ملاثانی، اهواز و فارسیات از سازمان آب و برق و داده‌های دبی پساب و شوری خروجی منابع نقطه‌ای از اداره محیط‌زیست استان خوزستان دریافت شد. در جدول ۱، مشخصات کمی و کیفی مهم‌ترین منابع آلاینده در محدوده مطالعاتی که موجب افزایش شوری آب رودخانه شده است، آورده شده است.

بر اساس کار بسیاری از محققان [۸ و ۲۰] برای تعیین سهم بارگذاری منابع آلاینده در پیکره‌های آبی از روش بیلان جرمی مواد به صورت سالانه استفاده شده است. در این تحقیق نیز از روش بیلان جرمی مواد محلول سهم بارگذاری منابع آلاینده تعیین شد. به این منظور محدوده مطالعاتی با داشتن ورودی‌ها و خروجی‌ها به دو بازه بالا دست و پایین دست اهواز تقسیم شد و سهم بارگذاری هر یک از منابع آلاینده در هر بازه به صورت مجزا بر اساس بیلان جرمی مواد محلول محاسبه شد. محاسبات نشان داد که پساب شبکه آبیاری شمال شرق اهواز (۶۰٪) و نیروگاه رامین (۱۶٪) در بازه بالادست اهواز و پساب شهر اهواز (۴۱/۵٪) و مزارع کشاورزی (۵۲٪) در پایین دست اهواز، بیش‌ترین جرم بارگذاری را شامل می‌شود (جدول ۱).

یک از سناریوهای مدیریتی بعد از شبیه‌سازی در مدل هیدرودینامیکی، به صورت تغییرات زمانی و مکانی و درصد کاهش شوری رودخانه نسبت به وضع موجود، در ایستگاه‌های منتخب پیردازند.

۲- مبانی و روش‌ها

در این بخش از تحقیق ضمن معرفی محدوده مطالعاتی و منابع آلاینده، به تفصیل راه‌اندازی، واسنجی و صحت سنجی مدل پرداخته شده است. همچنین در انتها به راه کارهای مدیریتی و توسعه سناریوها اشاره می‌شود.

۲-۱- محدوده مطالعاتی

رودخانه کارون پرآب‌ترین و طولانی‌ترین رودخانه کشور ایران با طولی حدود ۹۰۰ کیلومتر در جنوب غرب ایران واقع شده است. حوضه آبریز این رودخانه با مساحتی بالغ بر ۶۷۰۰۰ کیلومتر مربع در $30^{\circ} 17'$ تا $33^{\circ} 49'$ شمالی قرار دارد (شکل ۱- الف). شاخه‌های آن از کوه‌های زاگرس سرچشمه گرفته و پس از گذر از دشت خوزستان وارد خلیج فارس می‌شود (شکل ۱- ب) [۱۵ و ۱۶]. این رودخانه تأمین‌کننده آب شرب چندین شهر و روستا، مزارع کشاورزی و صنایع متعددی می‌باشد [۱۷]. ورود پساب‌های کشاورزی و شهری و صنعتی موجب افزایش شوری رودخانه شده است. محدوده مطالعاتی، ۱۰۵ کیلومتر از این رودخانه، حدفاصل بین ایستگاه ملاثانی تا فارسیات است که در مجاورت آن شهرهای مهمی نظیر ملاثانی، ویس، شبیان، اهواز و در انتهای آن محل برداشت آب صدها هکتار زمین کشاورزی و کشت و صنعت‌های نیشکر قرار دارد (شکل ۱- ج). این محدوده به دو بازه بالادست و پایین دست شهر اهواز قابل تقسیم است. محدوده مورد نظر به دلیل تراکم بالای جمعیتی، مزارع و صنایع، یکی از بازه‌های مهم و بحرانی رودخانه می‌باشد [۹].

متوسط جریان ده ساله رودخانه (۱۳۹۳-۱۳۸۴) در طی فصول تر (آذر تا اردیبهشت) در ایستگاه هیدرومتری اهواز به ۵۴۳ مترمکعب بر ثانیه می‌رسد و در مقابل، در فصول خشک (خرداد تا آبان) متوسط جریان رودخانه به ۳۳۰ مترمکعب بر ثانیه کاهش می‌یابد. در سال‌های اخیر علاوه بر کاهش جریان، سیلاب‌هایی سنگین در رودخانه اتفاق افتاده است.

جدول ۱: متوسط دبی و شوری پساب سالانه منابع آلاینده نقطه‌ای در محدوده ملاتانی تا فارسیات

Table 1. Average discharge and annual wastewater salinity of point-source pollutants within Molasani to Farsiat

| منبع آلاینده | نماد | کیلومتر (m) | دبی پساب (m ³ /s) | شوری (μS/cm) | مواد محلول (mg/L) | بارگذاری سالانه (۱۰ ^۶ kg) | سهم نسبی (%) |
|-------------------------------|-----------------|-------------|------------------------------|--------------|-------------------|--------------------------------------|--------------|
| ایستگاه ملاتانی (کیلومتر ۰) | | | | | | | |
| شهر ملاتانی | P ₁ | ۱۲۰ | ۱۲/۰ | ۲/۲۵۱۷ | ۸۸/۱۶۱۰ | ۰/۱۶ | ۱/۵ |
| شبکه آبیاری شمال شرق اهواز ۱ | P ₂ | ۳۸۰۰ | ۲/۱ | ۸/۲۳۶۹ | ۱۶/۱۵۱۶ | ۳۶۰۹۵/۵۷ | ۱۴/۱۲ |
| شبکه آبیاری شمال شرق اهواز ۲ | P _۳ | ۶۰۰۰ | ۷۲/۰ | ۴/۱۷۲۵ | ۱۱۰۴ | ۰۶۰۳۷/۲۵ | ۶/۱۷ |
| نیروگاه رامین | P ₄ | ۹۵۰۰ | ۷۵/۰ | ۸/۴۲۸۷ | ۶۸/۲۷۴۳ | ۸۹۳۵۲/۶۴ | ۱۵/۹۷ |
| شهر ویس | P ₅ | ۱۱۵۰۰ | ۲۲/۰ | ۱۸۲۵ | ۱۱۶۸ | ۱۰۳۴۹/۸ | ۱/۹۹ |
| شبکه آبیاری شمال شرق اهواز ۳ | P ₆ | ۱۸۷۰۰ | ۴/۲ | ۲۶۷۱٫۶ | ۴۴/۱۷۰۹ | ۳۲۷۴۵/۱۲۹ | ۳۱/۸۳ |
| شبکه آبیاری شمال شرق اهواز ۴ | P ₇ | ۳۴۶۰۰ | ۴۸/۰ | ۸۳۲۸۶ | ۴/۲۱۰۳ | ۸۲۱۰۴/۳۱ | ۷/۸۴ |
| شهر شیبان | P ₈ | ۳۷۹۰۰ | ۱/۰ | ۱۷۳۴٫۴ | ۷۶/۱۱۰۹ | ۳۵۹۷۵/۳ | ۸۳/۰ |
| کشت و صنعت نیشکر دهخدا | P ₉ | ۴۲۱۰۰ | ۱/۰ | ۱۹۲۱۰ | ۴/۱۲۲۹۴ | ۸۷۷۱۶/۳ | ۰/۹۵ |
| کارخانه شکر اهواز | P ₁₀ | ۴۷۲۰۰ | ۳۱/۰ | ۱۵۶۰٫۴ | ۸۸/۱۰۰۲ | ۷۰۹۴۳/۹ | ۲/۳۹ |
| نیروگاه زرگان | P ₁₁ | ۴۸۶۰۰ | ۱/۰ | ۳۶۰۶٫۲ | ۸۴/۲۳۰۷ | ۴۲۳۵۶/۷ | ۱/۸۳ |
| پساب شهر اهواز ۱ | P ₁₂ | ۵۸۱۰۰ | ۱۳/۱ | ۲۶۱۰٫۲ | ۶۸/۱۶۷۱ | ۳۰۷۸۶/۵۹ | ۱۴/۶۰ |
| ایستگاه اهواز (کیلومتر ۶۰) | | | | | | | |
| پساب شهر اهواز ۲ | P ₁₃ | ۶۴۷۰۰ | ۸۰/۱ | ۴۲۳۶ | ۰۴/۲۷۱۱ | ۸۹۱۶۴/۱۵۳ | ۸۲/۱۶ |
| پساب شهر اهواز ۳ | P ₁₄ | ۶۸۶۰۰ | ۹۰/۰ | ۲/۶۱۷۲ | ۰۸/۳۹۵۰ | ۱۱۲۷۵/۱۱۲ | ۲۵/۱۲ |
| پساب شهر اهواز ۴ | P ₁₅ | ۷۲۰۰۰ | ۶۸/۰ | ۲/۳۲۷۰ | ۹۲/۲۰۹۷ | ۶۵۸۰۰/۴۴ | ۸۸/۴ |
| تصفیه خانه شهر اهواز | P ₁₆ | ۸۱۰۰۰ | ۶۹/۰ | ۲/۴۶۸۱ | ۹۲/۲۹۹۳ | ۱۴۷۲۲/۶۵ | ۱۲/۷ |
| مجتمع صنعتی | P ₁₇ | ۸۳۱۰۰ | ۶۹/۰ | ۸/۳۸۷۷ | ۹۷/۲۴۷۷ | ۲۰۹۳۹/۵۴ | ۹۲/۵ |
| زهکش مزارع کشاورزی ۱ | P ₁₈ | ۹۲۰۰۰ | ۰۴/۵ | ۲۷۴۱ | ۲۴/۱۷۵۲ | ۶۰۰۱۴/۲۷۸ | ۴۵/۳۰ |
| زهکش مزارع کشاورزی ۲ | P ₁₉ | ۹۷۵۰۰ | ۷۳/۳ | ۲۷۳۹ | ۲۴/۱۷۵۴ | ۳۴۹/۲۰۶ | ۵۵/۲۲ |
| ایستگاه فارسیات (کیلومتر ۱۰۵) | | | | | | | |
| | | | | | | ۹۷/۹۱۴ | ۱۰۰ |

یافته است [۹].

در این تحقیق برای شبیه‌سازی سناریوهای مختلف مدیریتی کاهش شوری رودخانه در طول محدوده مطالعه از ماژول هیدرودینامیک (HD) همراه ماژول جابجایی-پراکنندگی (AD) استفاده شده است. خروجی ماژول HD، در زمان و مکان مانند سرعت و تراز سطح آب جزء ورودی‌های ماژول AD محسوب می‌شوند. ماژول HD بر اساس، معادلات پیوستگی معادله ۱

۲-۳ مدل عددی

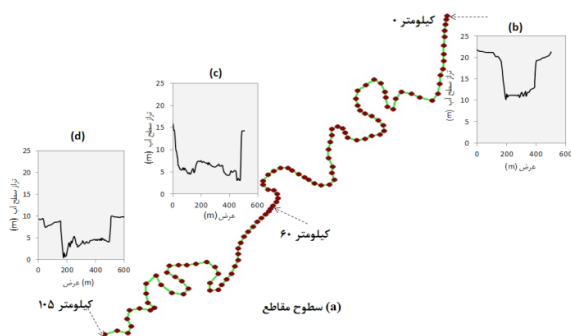
مدل‌های کیفی زیادی برای شبیه‌سازی انتقال آلودگی در رودخانه‌ها توسعه یافته است. مدل MIKE11، یک ابزار یک بعدی و با هیدرودینامیک قوی برای مدیریت و ارزیابی عملکرد سامانه‌های رودخانه‌ای، مصب‌ها، کانال‌های آبیاری که توسط موسسه هیدرولیک دانمارک^۱ (DHI) توسعه

¹ Danish Hydraulic Institute (DHI)

این تحقیق در نظر گرفته نشد. در این تحقیق فواصل مکانی و گام‌های زمانی به ترتیب ۳۵۰ متر و ۲۰ ثانیه در نظر گرفته شد. برای اطمینان از پایداری شبیه‌سازی عددی، از معادله ۴ استفاده شد. برای افزایش دقت شبیه‌سازی عددی و رسیدن مدل به یک حالت دینامیکی پایدار، ابتدا مدل برای دوره یک ساله اجرا شد تا از صحت نتایج خروجی اطمینان حاصل گردد.

$$\frac{V \Delta t}{\Delta x} \leq 2 \text{ to } 1 \quad (4)$$

در معادله ۴، V سرعت جریان، Δt گام زمانی، Δx فواصل مکانی می‌باشد.



شکل ۲: (الف) کانال اصلی رودخانه در محدوده مطالعاتی، (ب) در کیلومتر صفر، (ج) در کیلومتر ۶۰، (د) در کیلومتر ۱۰۵

Fig. 2. (a) The cross-sections along the Karun river, (b) at chainage 0 km, (c) at chainage 60 km and (d) at chainage 105 km

۲-۴- واسنجی مدل

در ماژول HD مقاومت بستر، پارامتری حیاتی است که تا حد زیادی رفتار جریان رودخانه را تعیین می‌کند [۲۲]. در این تحقیق، برای مقاومت بستر از ضریب زبری مانیگ n استفاده شد. این ضریب براساس تحقیقات گذشته با تقسیم طول رودخانه به سه بازه (۰ تا ۳۰، ۳۰ تا ۷۰ و ۷۰ تا ۱۰۵ کیلومتر) مقداری از ۰/۰۲۵ تا ۰/۰۵ با گام ۰/۰۰۵ واسنجی شد [۲۳ و ۲۴] علاوه بر این، در ماژول AD، ضریب پراکندگی تا حد زیادی به گرادیان غلظت ماده آلاینده مرتبط می‌شود، در مدل MIKE11 به صورت معادله ۵ تعریف می‌شود.

$$D = aV^b \quad (5)$$

که V ، سرعت متوسط جریان (متر بر ثانیه)، a و b به ترتیب عامل و توان پراکندگی^۳ است [۲۱].

ابتدا ضریب پراکندگی از روابط تجربی محاسبه گردید و سپس در مدل در دو حالت b برابر با صفر و یک، واسنجی شد (جدول ۲). در صورتی که b برابر صفر باشد، ضریب پراکندگی در طول محاسبات مستقل از سرعت است

و ممنتوم معادله ۲ به صورت موج دینامیکی است.

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

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + gAI_f = \frac{f}{w} \quad (2)$$

که Q جریان رودخانه، A مساحت سطح مقطع، q جریان جانبی، h سطح آب، I_f بیان‌کننده ترم مقاومت، f نیروی ممنتوم، ρw چگالی آب، g شتاب ثقل و α ضریب تصحیح ممنتوم است [۲۱]. اساس ماژول AD، معادله یک بعدی بقاء جرم برای یک ماده محلول یا معلق نظیر شوری و رسوب است. معادله به صورت رابطه ۳ تعریف می‌شود.

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

که C غلظت ماده آلاینده، D ضریب پراکندگی طولی، K ضریب زوال، C_2 نشان دهنده غلظت ماده در جریان جانبی است. معادله ۳ با فرض اختلاط کامل ماده آلاینده در سطح مقطع، نشان دهنده دو مکانیسم است: (۱) جابجایی افقی ماده آلاینده توسط جریان و (۲) پراکندگی ماده آلاینده تحت اثر گرادیان غلظت [۲۱].

حل عددی معادلات دیفرانسیلی ۱ تا ۳ با روش تفاضل محدود به صورت ضمنی^۱ انجام می‌شود.

کانال اصلی رودخانه در محدوده مطالعاتی از ملاثاتی (کیلومتر صفر، که در مختصات ۴۷/۸۷ شرقی و ۳۱/۵۲ شمالی قرار گرفته است) تا فارسیات (کیلومتر ۱۰۵، که در مختصات ۴۷/۵۱ شرقی و ۳۱/۱۷ شمالی قرار گرفته است) در شکل ۲ (الف) توسط خط‌چین نشان داده شده است. در طول محدوده مطالعه، ۲۱۵ سطح مقطع با فواصل تقریبی ۵۰۰ متر برای معرفی بخش عرضی رودخانه به مدل معرفی شد. برای نمونه برخی از مقاطع در شکل ۲ (ب تا د) نمایش داده شده است. در بالادست رودخانه، برای مثال، در سطح مقطع کیلومتر صفر، مقاطع معمولاً عمیق و باریک‌اند شکل ۲ (ب). مقاطع میانی رودخانه، مانند سطح مقطع کیلومتر ۶۰، ضمن عمیق بودن، عریض می‌شوند شکل ۲ (ج). مقاطع پایین دست، کاملاً متفاوت از برای شرایط مرزی در بالادست، متوسط دبی روزانه و متوسط شوری بالادست رودخانه، عمق و عرض آن‌ها کاهش می‌یابد؛ برای مثال، سطح مقطع کیلومتر ۱۰۵ که در شکل ۲ (د) مشاهده می‌شود.

برای شرایط مرزی در بالادست، دبی روزانه و شوری ماهانه به صورت شرایط مرزی باز و برای شرایط مرزی در پایین دست، تراز سطح آب روزانه به صورت شرایط باز و شوری به صورت گرادیان صفر^۲ وارد مدل شد. همچنین منابع آلاینده ورودی در مسیر به صورت منابع نقطه‌ای و متوسط ماهانه معرفی شدند. با توجه به عدم وجود اطلاعات باد در امتداد رودخانه، اثر آن در

1 Implicit Finite Difference

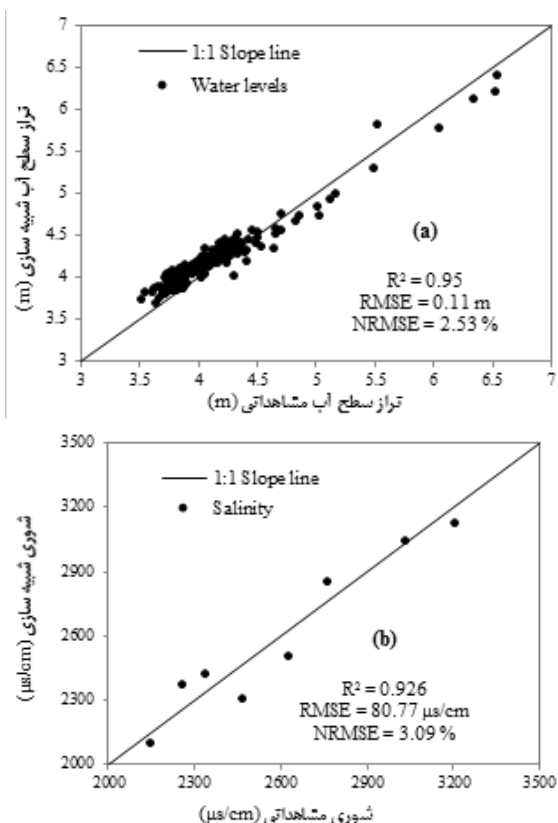
2 Zero Gradient

3 Dispersion factor and exponent

نتایج واسنجی ضریب پراکندگی، براساس غلظت شوری شبیه‌سازی با مقدار اندازه‌گیری شده سال ۱۳۹۱ در ایستگاه فارسیات نشان داد که، رابطه Kashefipour and Falconer در حالت $a=179.22$ و $b=1$ با RMSE و NRMSE به ترتیب $32/14$ میکروزیمنس بر سانتی‌متر و $8/93\%$ شبیه‌سازی بهتری انجام می‌دهد. همچنین مقدار R^2 برای تطبیق متوسط شوری شبیه‌سازی شده با اندازه‌گیری شده، $0/93$ بدست آمد (جدول ۲).

۲-۵- صحت سنجی مدل

بر اساس نتایج صحت سنجی، عملکرد مدل با ضرایب زبری مانینگ (n) و پراکندگی (D) در ترم‌های سطح آب و شوری بهمن تا شهریور سال ۱۳۹۲ مورد تایید است (شکل ۵). بنابراین مدل با دقت بالایی ویژگی‌های جریان و شوری آب رودخانه را در محدوده مطالعاتی تعیین می‌کند. نتایج صحت سنجی نشان می‌دهد که ضرایب منتخب برای شبیه‌سازی رودخانه کارون قابل اعتماد است. با توجه به شکل ۵(الف)، در هنگام افزایش تراز سطح آب مقادیر شبیه‌سازی برآورد کمتری نشان می‌دهد؛ این برآورد کم ممکن است به علت عدم در نظرگرفتن اثرات باد در شبیه‌سازی باشد [۳۰].

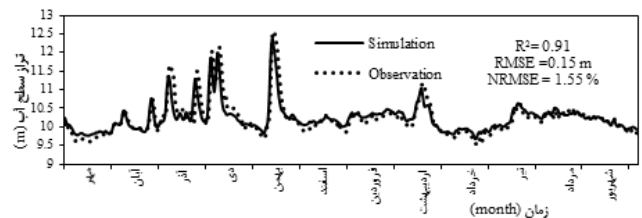


شکل ۵: مقایسه شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده (الف) تراز سطح آب و (ب) متوسط شوری در ایستگاه فارسیات

Fig. 5. Comparison of the simulated and observed (a) water level and (b) salinity within the Farsiyat station

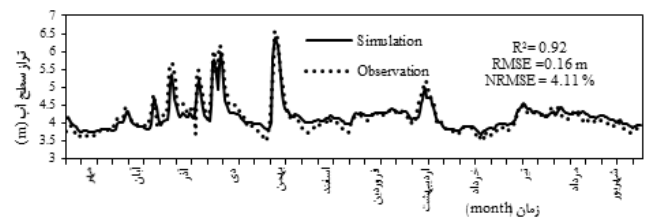
و برابر فاکتور پخش می‌شود. اگر b غیر صفر باشد، ضریب پراکندگی در طول محاسبات وابسته به سرعت بوده و مقداری متغیر خواهد بود. قابل ذکر است که شوری به عنوان یک آلاینده پایستار^۱ بوده و ضریب زوال ($k=0$) در مدل صفر وارد شد [۲۵].

برای واسنجی از داده‌های دبی، تراز سطح آب و شوری سال ۱۳۹۱، در دو ایستگاه ملاثانی و فارسیات استفاده شد. نتایج واسنجی نشان داد که مدل همراه ضرایب زبری مانینگ^۲ $0/032$ ، $0/037$ و $0/035$ به ترتیب در بازه‌های ۰ تا ۳۰، ۳۰ تا ۷۰ و ۷۰ تا ۱۰۵ کیلومتر در مقایسه با سایر ضرایب نتایج بهتری ارائه می‌دهد. تراز سطح آب شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در کیلومتر ۶۰ (ایستگاه اهواز) و کیلومتر ۱۰۵ (ایستگاه فارسیات) با ضرایب زبری $0/032$ ، $0/037$ و $0/035$ مقایسه شد شکل ۳ و ۴. به طور کلی تراز سطح آب شبیه‌سازی شده با تراز سطح آب اندازه‌گیری شده در ایستگاه فارسیات با ضریب تبیین^۳ $0/92$ (R²) تطبیق داشت. ریشه میانگین مربعات خطا^۴ (RMSE) و ریشه میانگین مربعات خطا نرمال شده^۵ (NRMSE) بین تراز سطح آب شبیه‌سازی شده و تراز سطح آب اندازه‌گیری شده به ترتیب برابر $0/16$ متر و $4/11\%$ بدست آمد.



شکل ۳: مقایسه تراز سطح آب شبیه‌سازی شده با اندازه‌گیری شده در ایستگاه اهواز

Fig.3. Comparison of the simulated and measured water levels at Ahvaz Station



شکل ۴: مقایسه تراز سطح آب شبیه‌سازی شده با اندازه‌گیری شده در ایستگاه فارسیات

Fig. 4. Comparison of the simulated and measured water levels at Farsiyat Station

- 1 Conservative pollutant
- 2 Manning roughness coefficient
- 3 Coefficient of Determination (R²)
- 4 Root Mean Square Error (RMSE)
- 5 Normalized Root Mean Square Error (NRMSE)

جدول ۲: نتایج واسنجی ضریب پراکندگی در محدوده مطالعاتی

Table 2. Results of dispersion coefficients calibrated within the study area

| اجرا | معادلات | D (m ² /s) | D=aV ^b | R ² | RMSE (μs/cm) | NRMSE (%) |
|------|-------------------------------------|--------------------------|-------------------|----------------|-----------------|--------------|
| ۱# | Fischer et al [۲۶] | ۳۰۱/۱۹ | a=19/301 b=0 | ۰/۵۲ | ۷۶/۴۴ | ۲۸/۰۶ |
| ۲# | | | a=03/814 b=1 | ۰/۶۱ | ۶۹/۳۷ | ۲۳/۵۹ |
| ۳# | Seo and Cheong [۲۷] | ۲۶۳/۷۲ | a=72/263 b=0 | ۰/۶۸ | ۵۴/۲۳ | ۱۴/۶۷ |
| ۴# | | | a=76/712 b=1 | ۰/۷۳ | ۴۴/۱۶ | ۱۰/۲۰ |
| ۵# | Deng et al [۲۸] | ۲۷۶/۸۳ | a=83/276 b=0 | ۰/۸۴ | ۶۱/۳۱ | ۱۹/۷۷ |
| ۶# | | | a=19/748 b=1 | ۰/۸۹ | ۵۲/۲۵ | ۱۵/۹۴ |
| ۷# | Kashefipour and Falconer [۲۹] | ۱۰۳/۳۱ | a=31/103 b=0 | ۰/۸۵ | ۴۸/۲۰ | ۱۲/۷۵ |
| ۸# | | | a=22/179 b=1 | ۰/۹۳ | ۳۲/۱۴ | ۸/۹۳ |

۲-۶- راه کارهای مدیریتی

گندم و جو، حد مجاز شوری آب آبیاری به ۳۰۰۰ میکرو زیمنس بر سانتی متر نیز می‌رسد [۳۳].

در ادامه به راه کارهای مدیریتی نظیر حذف و کاهش بارگذاری منابع آلاینده به صورت سناریوهای شبیه‌سازی پرداخته شده است.

سناریوی حذف: در این سناریو فرض می‌شود که تمامی و یا بخشی از منابع آلاینده نقطه‌ای حذف شده و هیچ‌گونه بارگذاری به رودخانه صورت نمی‌گیرد. این سناریو در شرایط مختلف حذف همه، حذف منابع کشاورزی، حذف منابع صنعتی و حذف منابع شهری انجام شد.

سناریوی کاهش: این سناریو در قالب دو حالت، کاهش شوری از مرز ورودی بالادست و کاهش منابع آلاینده نقطه‌ای انجام شد. در حالت کاهش از بالادست با توجه به توصیه کارشناسان محترم سازمان آب و برق و منابع آلاینده بالادست، گزینه‌های کاهش ۲۰۰، ۶۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۴۰۰ واحدی شوری انجام شد. هریک از این گزینه‌ها با توجه به متوسط شوری در مرز ورودی (۲۳۳۲/۲ میکروزیمنس بر سانتی‌متر) به صورت کاهش ۸، ۲۵، ۴۳ و ۶۰ درصدی بیان شد. در حالت کاهش منابع نقطه‌ای نیز، دو گزینه کاهش ۳۰٪ و ۵۰٪ انجام شد.

سناریوی ترکیبی: پس از مشاهده اثر هر یک از سناریوهای حذف و کاهش شوری، ترکیبی از گزینه‌های حذف و کاهش، شبیه‌سازی شد و کارایی آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. در جدول ۳، گزینه‌های مختلف سناریوهای مدیریتی آورده شده است.

آلاینده‌هایی (یون‌های محلول) که عامل افزایش شوری رودخانه‌ها هستند، معمولاً از نوع پایستار بوده و فرآیندهای خودپالایی رودخانه، نظیر واکنش و نشست تأثیر چندانی در کاهش جرم آن‌ها ندارد [۳۱] بنابراین برای کاهش شوری رودخانه‌ها راه کارهای مدیریتی نظیر حذف و کاهش بارگذاری منابع آلاینده توصیه می‌شود [۸] برای بررسی اثر راه کارهای مدیریتی لازم است تا هر راه کار به صورت یک سناریوی مدیریتی با سیاست کاهش احتمالی در شوری رودخانه، شبیه‌سازی شده و اثر آن بر تغییرات شوری رودخانه ارزیابی گردد.

شوری آب رودخانه کارون در محدوده مطالعاتی از دو نظر حائز اهمیت است؛ ۱) تأمین آب شرب با کیفیت مناسب برای شهرهای مجاور نظیر شهر اهواز و ملاتانی (۲) تأمین آب آبیاری

با کیفیت مناسب برای آبگیرهای پایین دست ایستگاه فارسیات. بر اساس استاندارد سازمان بهداشت جهانی (WHO)، شوری آب در حد مطلوب^۱ و حداکثر مطلوب^۲ برای مصرف شرب به ترتیب، ۸۰۰ و ۱۵۶۰ میکرو زیمنس بر سانتی‌متر [۳۲] و حد مجاز شوری^۳ آب آبیاری، ۲۰۰۰ میکرو زیمنس بر سانتی‌متر است. البته حد مجاز شوری برای آب آبیاری بسته به نوع و میزان کاهش عملکرد محصول متفاوت است. به طوری که برای گیاهانی نظیر

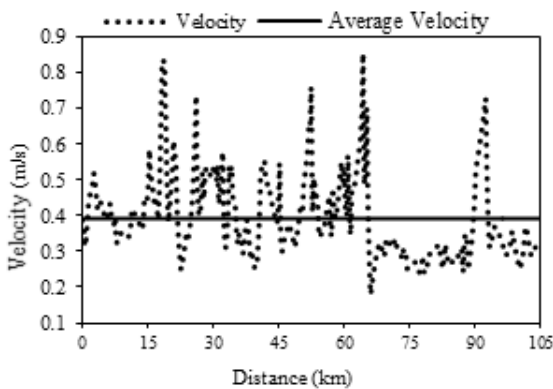
- 1 Admissible Limit
- 2 Maximum Admissibility
- 3 Allowable Salinity Level

جدول ۳: گزینه‌های مختلف سناریوهای مدیریتی

Table 3. Different options of management scenarios

| نماد | گزینه‌های مختلف | شرایط مدیریتی | سناریو مدیریتی |
|----------|---|--------------------------------------|--------------------|
| R1 | حذف منابع نقطه‌ای | | |
| R2 | حذف کشاورزی | | |
| R3 | حذف صنعتی | حذف منابع آلاینده | حذف منابع آلاینده |
| R4 | حذف شهری | | |
| DU1 | کاهش ۸٪ | کاهش از بالادست | |
| DU2 | کاهش ۲۵٪ | | |
| DU3 | کاهش ۴۳٪ | | |
| DU4 | کاهش ۶۰٪ | | کاهش منابع آلاینده |
| DP1 | کاهش ۳۰٪ | کاهش منابع نقطه‌ای | |
| DP2 | کاهش ۵۰٪ | | |
| DU3+ DP2 | کاهش ۴۳٪ از بالادست + کاهش ۵۰٪ از منابع نقطه‌ای (گزینه a) | | |
| DU4+ DP1 | کاهش ۶۰٪ از بالادست + کاهش ۳۰٪ از منابع نقطه‌ای (گزینه b) | کاهش از بالادست + کاهش منابع نقطه‌ای | ترکیبی |

یکی از عوامل هیدرودینامیکی مؤثر در جابجایی و پراکندگی شوری، سرعت جریان رودخانه است. در شکل ۷ پروفیل سرعت در طول رودخانه نشان داده شده است. تغییرات سرعت بسته به شرایط مقاطع عرضی و فعالیت‌های مهندسی رودخانه، در طول محدوده مطالعاتی بین ۰/۱۸ تا ۰/۸۵ متر بر ثانیه متغیر است. سرعت متوسط رودخانه در محدوده مطالعاتی نیز ۰/۳۹ متر بر ثانیه است.



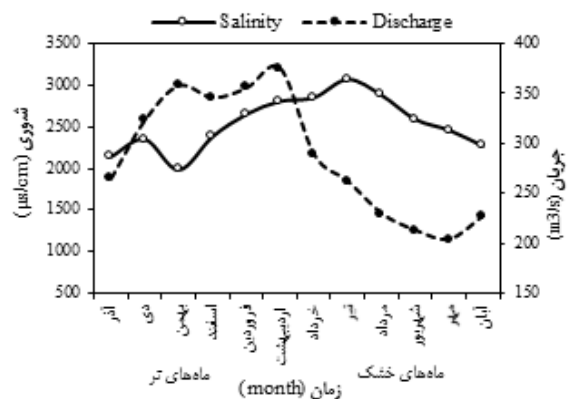
شکل ۷: پروفیل سرعت و سرعت متوسط در طول محدوده مطالعاتی

Fig. 7. Velocity and average velocity profile along the Karun river

بعد از شبیه‌سازی هریک از سناریوهای مدیریتی نتایج در مقایسه با وضع موجود (شوری در سال ۱۳۹۳) به صورت درصد کاهش شوری رودخانه ارزیابی شد.

۳- نتایج و بحث

ارزیابی هر یک از سناریوهای مدیریتی در کاهش شوری آب رودخانه در محدوده مطالعاتی، به دلیل اهمیت وضعیت هیدرولوژیکی، در دو فصل تر و خشک بررسی شد. قبل از بررسی اثر سناریوها مدیریتی، جریان و شوری رودخانه در شرایط موجود (سال ۱۳۹۳) در ایستگاه اهواز بررسی قرار گرفته است (شکل ۶). در ماه‌های تر، جریان رودخانه زیاد و متناسب با آن شوری کم می‌باشد و در ماه‌های خشک جریان کاهش یافته و در مقابل شوری افزایش می‌یابد. علت تغییرات شوری در ماه‌های مختلف، علاوه بر اثر تغییرات جریان، تغییرات بارگذاری منابع آلاینده است [۱۳].



شکل ۶: بررسی جریان و شوری آب رودخانه در شرایط موجود

Fig. 6. River discharge and salinity in existing condition

۳-۱- حذف منابع آلاینده

در جدول ۴ درصد کاهش شوری رودخانه در اثر حذف منابع آلاینده نسبت به وضع موجود (۱۳۹۳) نشان داده شده است. درصد کاهش شوری آب رودخانه در اثر اعمال سناریو حذف همه منابع آلاینده، در کیلومتر ۶۰ (ایستگاه اهواز) برای دو فصل تر و خشک به ترتیب ۶/۷۹ و ۸/۲۵ درصد است. درحالی که در انتها محدوده مطالعاتی (ایستگاه فارسیات) با افزایش منابع آلاینده نقطه‌ای، برای دو فصل تر و خشک به ترتیب به ۱۶/۲۷ و ۲۰/۱۲ درصد می‌رسد. به هر حال در فصل خشک، حذف همه منابع آلاینده نسبت به فصل تر، اثر بیشتری در کاهش شوری رودخانه دارد. در فصول خشک، (۱) جریان آب رودخانه کاهش می‌یابد. (۲) بارگذاری منابع آلاینده به ویژه زه‌آب خروجی از مزارع افزایش می‌یابد. بنابراین با حذف آن‌ها کیفیت آب رودخانه بهبود می‌یابد [۸].

در فصل خشک، حذف منابع آلاینده کشاورزی، اثر بیشتری در کاهش شوری رودخانه دارد. در حالی که در فصل تر، در بالادست ایستگاه اهواز حذف منابع صنعتی و در پایین دست ایستگاه اهواز حذف منابع شهری اثر بیشتری دارد. در فصل تر زه‌آب برگشتی از مزارع کشاورزی کاهش می‌یابد و حذف آن‌ها تأثیر کمتری در کاهش شوری آب رودخانه دارد. در مقابل اثر پساب صنایع متعدد نظیر نیروگاه رامین و زرگان و شهر اهواز با جمعیتی بالغ بر یک میلیون و چهارصد هزار نفری تأثیر بیشتری در تغییرات شوری رودخانه می‌گذارد.

با توجه به نتایج سناریوی حذف منابع آلاینده، این سناریو اثر نسبتاً کمی در کاهش شوری رودخانه دارد و در یک سیستم رودخانه‌ای حذف تمامی منابع آلاینده امکان پذیر نیست. زیرا برای بسیاری از منابع آلاینده، رودخانه تنها محل تخلیه به شمار می‌آید و برخی از منابع آلاینده به صورت غیر نقطه‌ای بوده و خارج از کنترل مدیریتی است [۹]. بنابراین در سناریوهای بعدی اثر کاهش منابع آلاینده پرداخته شد.

جدول ۴: درصد کاهش شوری رودخانه در اثر سناریوی حذف منابع آلاینده

Table 4. The percentage of river salinity reduction caused by removing pollutant sources scenario

| درصد کاهش شوری نسبت به شرایط موجود (%) | | | | |
|--|---------------|---------|-----------------|---------|
| سناریوها | ایستگاه اهواز | | ایستگاه فارسیات | |
| | فصل تر | فصل خشک | فصل تر | فصل خشک |
| حذف همه | ۶/۷۹ | ۸/۲۵ | ۱۶/۲۷ | ۲۰/۱۲ |
| حذف کشاورزی | ۳/۰۶ | ۴/۹۷ | ۵/۶۱ | ۱۰/۶۶ |
| منابع شهری نقطه‌ای | ۲/۴۸ | ۱/۰۵ | ۶/۹۹ | ۶/۶۵ |
| صنعتی | ۳/۷۹ | ۱/۶۰ | ۳/۷۲ | ۱/۶۴ |
| میانگین | ۳/۹۷ | ۳/۹۷ | ۸/۱۵ | ۹/۷۷ |

۳-۲- کاهش منابع آلاینده

برای اجرای سناریوی کاهش منابع آلاینده دو حالت کاهش منابع آلاینده نقطه‌ای و کاهش شوری ورودی از مرز بالادست شبیه‌سازی شد. در جدول ۵ نتایج کاهش شوری رودخانه در اثر هر یک از گزینه‌های کاهش آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که اثر هر دو گزینه کاهش منابع نقطه‌ای و کاهش از بالادست در کاهش شوری آب رودخانه، در فصل تر نسبت به فصل خشک بیشتر است. به طوری که حداکثر متوسط کاهش شوری، در ایستگاه اهواز (کیلومتر ۶۰) در فصل تر برابر ۳۹/۱۲ درصد اتفاق می‌افتد. در حالی که در فصل خشک این مقدار به ۲۸/۷۰ درصد می‌رسد.

جدول ۵: درصد کاهش شوری رودخانه در اثر سناریوی کاهش منابع آلاینده

Table 5. The percentage of river salinity reduction due to pollutant sources reduction scenario

| درصد کاهش شوری نسبت به شرایط موجود (%) | | | | |
|--|---------------|---------|-----------------|---------|
| سناریوها | ایستگاه اهواز | | ایستگاه فارسیات | |
| | فصل تر | فصل خشک | فصل تر | فصل خشک |
| کاهش منابع نقطه‌ای | ۴/۱۱ | ۳/۲۱ | ۱۰/۴۰ | ۹/۴۱ |
| میانگین | ۴/۹۸ | ۴/۴۴ | ۱۲/۲۶ | ۱۲/۱۹ |
| کاهش از بالادست | ۳۱/۸۹ | ۲۳/۲۲ | ۲۹/۱۸ | ۲۱/۱۲ |
| میانگین | ۴۷/۸۵ | ۳۵/۲۴ | ۴۳/۸۲ | ۳۲/۰۴ |
| | ۶۶/۷۹ | ۴۹/۳۹ | ۶۱/۲۰ | ۴۴/۹۰ |
| میانگین | ۳۹/۱۲ | ۲۸/۷۰ | ۳۵/۸۳ | ۲۶/۱۰ |

کاهش شوری آب رودخانه بسته به شرایط هر سناریو متفاوت است. به طوری که در سناریو کاهش منابع آلاینده نقطه‌ای، حداکثر متوسط کاهش شوری آب رودخانه در بخش انتهایی (ایستگاه فارسیات)، در حالی که در سناریو کاهش از مرز بالادست، حداکثر متوسط کاهش شوری در بخش ابتدایی (ایستگاه اهواز) اتفاق می‌افتد. در واقع در سناریو کاهش منابع نقطه‌ای، با افزایش طول مسیر رودخانه از بارگذاری جرم شوری کاسته می‌شود. بنابراین در انتهای محدوده بیش‌ترین درصد کاهش شوری مشاهده شد. در حالی که در گزینه کاهش از مرز بالادست در ابتدای بازه ضمن بالا بودن سرعت جریان و تأثیر شدید پخش ماده آلاینده، در طول محدوده بارگذاری منابع آلاینده نیز انجام می‌شود.

در سناریو کاهش بارگذاری منابع آلاینده نقطه‌ای مانند سناریو حذف اثر کاهش منابع نقطه‌ای در کاهش شوری رودخانه کم بوده در حالی که اثر

و آب آبیاری مقایسه شد (شکل ۸). نتایج نشان داد که در فصل تر با اعمال همه گزینه‌های برتر، شوری آب رودخانه دارای حداکثر مطلوب شرب است و در سناریو DU4 + DP1 و DU4 دارای کیفیت حد مطلوب برای شرب است (شکل ۸ الف)). در حالی که در فصل خشک شوری آب رودخانه در دو سناریوی مورد نظر از حد مطلوب خارج شده و در مرز حداکثر مطلوب قرار می‌گیرند. بقیه سناریوها نیز غیر قابل شرب بوده و فقط برای مصرف آبیاری مناسب‌اند. در فصل تر (۱ افزایش جریان ۲) کاهش بارگذاری منابع آلاینده به ویژه منابع کشاورزی (۳) افزایش سرعت و فرآیندهای پخش و انتقال، موجب افزایش کارایی سناریوهای مدیریتی می‌شود [۱۱].

سناریو کاهش از مرز بالادست با متوسط کاهش ۳۵/۸۳ و ۲۶/۱۰ به ترتیب در فصل تر و خشک در انتهای محدوده مطالعاتی (ایستگاه فارسیات) بهتر بوده است. بنابراین لازم است تا مدیریت منابع آلاینده بیشتر در بالادست مرز ورودی نظیر مدیریت بر شوری مخزن سد گتوند، زه‌آب شبکه‌های آبیاری و کشت و صنعت‌ها صورت گیرد.

مقایسه گزینه‌های مختلف از سناریوی کاهش نشان می‌دهد که گزینه‌های کاهش ۵۰ درصدی از منابع آلاینده نقطه‌ای و کاهش ۴۳٪ و ۶۰٪ از مرز بالادست در کاهش شوری رودخانه بیش‌ترین تاثیر در کاهش شوری رودخانه دارند. بنابراین این سه گزینه می‌توانند به عنوان گزینه‌های برتر برای اجرای سناریوهای ترکیبی معرفی شوند.

۳-۳- سناریو ترکیبی

بعد از مقایسه نتایج شبیه‌سازی گزینه‌های مختلف سناریوهای مدیریتی حذف و کاهش، ترکیبی از چند گزینه برتر برای کاهش شوری رودخانه پیشنهاد شد. در جدول ۶ نتایج دو سناریوهای ترکیبی آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که تأثیر هر یک از سناریوهای ترکیبی مانند سناریو کاهش، در فصل تر نسبت به فصل خشک بهتر است.

جدول ۶: درصد کاهش شوری رودخانه در اثر سناریوی ترکیبی

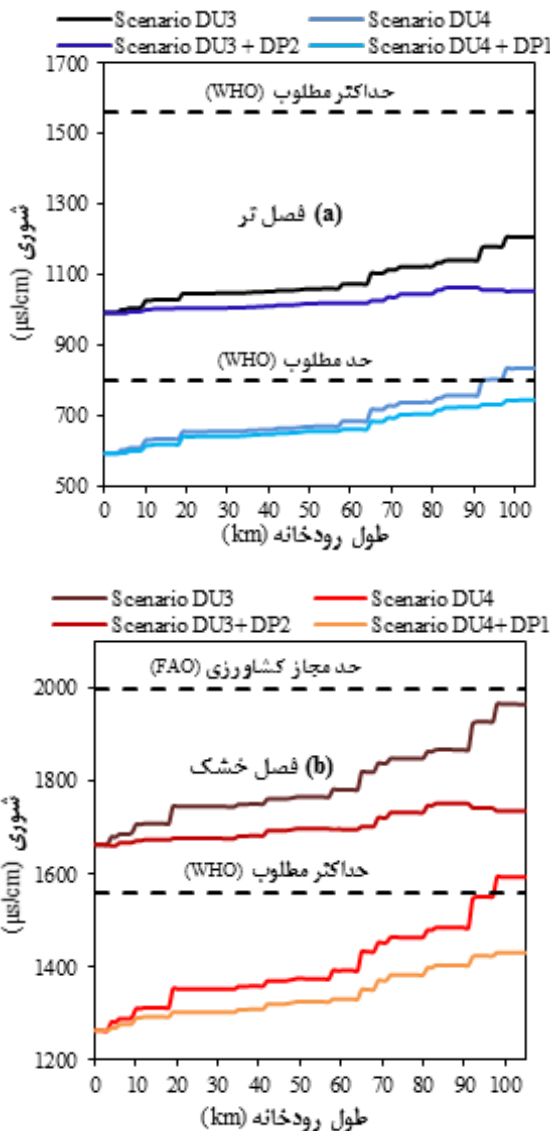
Table 6. The percentage of river salinity reduction due to combined scenario

| درصد کاهش شوری نسبت به شرایط موجود (%) | | سناریوها | | |
|--|---------------|---------------|-----------------|-----------|
| ایستگاه فارسیات | ایستگاه اهواز | ایستگاه اهواز | ایستگاه فارسیات | |
| فصل خشک | فصل تر | فصل خشک | فصل تر | |
| ۴۱/۹۸ | ۵۴/۹۷ | ۳۹/۳۵ | ۵۱/۴۹ | DU3 + DP2 |
| ۵۲/۵۱ | ۶۷/۴۱ | ۵۱/۶۱ | ۶۷/۹۲ | DU4 + DP1 |
| ۴۷/۲۵ | ۶۱/۱۹ | ۴۵/۴۸ | ۵۹/۷۱ | میانگین |

نتایج شبیه‌سازی هر یک از گزینه‌های ترکیبی نشان داد که در هر دو فصل تر و خشک، سناریو DU4 + DP1 (کاهش ۶۰٪ شوری بالادست + کاهش ۳۰٪ از منابع نقطه‌ای) عملکرد بهتری در کاهش شوری رودخانه دارد. به طوری که این سناریو به طور متوسط در دو فصل تر و خشک به ترتیب بالای ۶۰ و ۴۶ درصد موجب کاهش شوری رودخانه شده است. نتایج نشان داد که برای کاهش شوری در محدوده مطالعاتی، اهمیت مدیریت منابع آلاینده در بالادست مهم است.

۳-۴- مقایسه اثر سناریوها با استاندارد شوری

نتایج گزینه‌های برتر سناریوهای مدیریتی، با حد مجاز شوری آب شرب



شکل ۸: مقایسه سناریوهای مدیریتی و استاندارد شوری برای شرب و آبیاری (الف) فصل تر و (ب) فصل خشک

Fig. 8. Comparison of management scenarios and salinity standard for drinking and irrigation (a) wet season and (b) dry season

۴- نتیجه گیری

این تحقیق به منظور بررسی اثر راه کارهای مدیریتی برای کاهش شوری آب رودخانه کارون در محدوده ملاثانی تا فارسیات، تحت سناریوهای مختلف انجام شد. سناریوهای مختلف مدیریتی شامل حذف منابع آلاینده، کاهش از مرز ورودی بالادست و کاهش منابع نقطه‌ای و ترکیبی از گزینه‌های برتر با استفاده از مدل MIKE11 شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی سناریوهای مختلف مدیریتی نشان داد که تأثیر گزینه‌های مختلف حذف منابع آلاینده در دو فصل تر و خشک، در کاهش شوری رودخانه متفاوت است. به طوری که در فصل خشک، حذف منابع کشاورزی و در فصل تر در بالادست شهر اهواز، حذف منابع صنعتی و در پایین دست شهر اهواز، حذف منابع شهری در کاهش شوری رودخانه مؤثر است. نتایج حذف تمامی منابع آلاینده در مسیر رودخانه نشان داد که اثر این سناریو در فصل خشک به مراتب بیشتر از فصل تر است. اما این سناریو اثر نسبتاً کمی در کاهش شوری رودخانه دارد و در قالب یک پروژه کاربردی امکان حذف تمامی منابع آلاینده نیست.

نتایج شبیه‌سازی سناریوهای مدیریتی نشان داد که تمامی سناریوها موجب کاهش شوری آب رودخانه می‌شود. در بین سناریوهای مختلف به طور متوسط سناریوی کاهش منابع آلاینده از مرز بالادست به ویژه در فصل تر، بیشترین اثر کاهش شوری رودخانه دارد. بنابراین لازم است که مدیریت منابع آلاینده در بالادست به صورت کاهش یا عدم بارگذاری منابع آلاینده نظیر شوری مخزن سد گتوند، زه‌آب شبکه آبیاری گتوند و عقیلی، کشت و صنعت شعبیه و کارون، پساب شهرهای گتوند و شوشتر، صورت گیرد.

نتایج شبیه‌سازی سناریوهای ترکیبی نشان داد که ترکیب کاهش شوری از مرز بالادست و کاهش منابع آلاینده نقطه‌ای بهترین عملکرد کاهش شوری در طول رودخانه دارد. در بین گزینه‌های ترکیبی، سناریوی کاهش ۳۰ درصدی منابع نقطه‌ای همراه کاهش ۶۰٪ از بالادست بیشترین تأثیر کاهش شوری رودخانه را دارد. و مقایسه نتایج این سناریو با حدود مجاز استاندارد شوری نشان داد که در هر دو فصل تر و خشک، دارای شرایط حد مطلوب استاندارد آب شرب و کشاورزی است.

نتایج این تحقیق نشان داد: می‌توان با مدیریت منابع آلاینده شوری رودخانه‌ها را کاهش داد. لازم به ذکر است، هر چند نتیجه سناریوها موجب کاهش شوری رودخانه می‌شود. اما بایستی امکان اجرایی شدن سناریوها در شرایط مختلف بررسی گردد. پیشنهاد می‌شود امکان اجرایی شدن هر یک از سناریوها در قالب یک مسئله بهینه‌سازی بین اثر سناریو در کاهش شوری و امکان اجرای آن در فصول مختلف مورد بررسی قرار گیرد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از سازمان آب و برق و اداره محیط‌زیست خوزستان برای در اختیار قرار دادن داده‌های کمی و کیفی رودخانه کارون صمیمانه تشکر می‌نمایند.

مراجع

- [1] D.F. Shmueli, Water quality in international river basins, *Political Geography*, 18(4) (1999) 437-476.
- [2] N.W. Quinn, Adaptive implementation of information technology for real-time, basin-scale salinity management in the San Joaquin Basin, USA and Hunter River Basin, Australia, *Agricultural water management*, 98(6) (2011) 930-940.
- [3] L. Somlyódy, M. Henze, L. Koncsos, W. Rauch, P. Reichert, P. Shanahan, P. Vanrolleghem, River Water Quality Modelling: III. Future of the Art, *Water Science and Technology*, 38(11) (1998) 253-260.
- [4] Q.T. Doan, Y. C. Chen, P. K. Mishra, Numerical Modeling in Water Quality Management for Rivers Case Study of the Day/ Nhue River Sub-basin, Vietnam, *Journal of Earth Sciences and Engineering*, 6(5) (2013) 1111-1119.
- [5] G.B. McBride, Calculating stream reaeration coefficients from oxygen profiles, *Journal of Environmental Engineering*, 128(4) (2002) 384-386.
- [6] R. Prairie James, B. Rajagopalan, J. Fulp Terrance, A. Zagona Edith, Statistical Nonparametric Model for Natural Salt Estimation, *Journal of Environmental Engineering*, 131(1) (2005) 130-138.
- [7] M. Bagherian Marzouni, A.M. Akhoundalib, H. Moazed, N. Jaafarzadeh, J. Ahadian, H. Hasoonizadeh, Evaluation of Karun River Water Quality Scenarios Using Simulation Model Results, *International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research*, 2(2) (2014) 339-358.
- [8] E. Farber, A. Vengosh, I. Gavrieli, A. Marie, T.D. Bullen, B. Mayer, R. Holtzman, M. Segal, U. Shavit, Management scenarios for the Jordan River salinity crisis, *Applied Geochemistry*, 20(11) (2005) 2138-2153.
- [9] R. Kerachian, Waste-Load Allocation Model for Seasonal River Water Quality Management: Application of Sequential Dynamic Genetic Algorithms, *Scientia Iranica*, 12(2) (2005) 117-130.
- [10] V. Cat, Assessment of Saline Water Intrusion into Huong River in Dry Season, *Journal of Shipping and Ocean Engineering*, 1(1) (2011) 54-64.
- [11] Y. Yu, H. Zhang, C. Lemckert, Salinity and turbidity distributions in the Brisbane River estuary, Australia, *Journal of Hydrology*, 519 (2014) 3338-3352.
- [12] Q.T. Doan, C.D. Nguyen, Y.C. Chen, K.M. Pawan, Modeling the influence of river flow and salinity intrusion in the Mekong river estuary, Vietnam, *Lowland Technology International*, 16(1) (2014) 14-25
- [13] H. Ghadiri, Salinization of Karun River in Iran by Shallow Groundwater and Seawater Encroachment,

- systems using a new approach to the source term in the ADE, *Hydroinformatics*, 10(3) (2008) 245- 255
- [24] S. Mohammadi, S.M. Kashefipour, Numerical modeling of flow in riverine basins using an improved dynamic roughness coefficient, *Water resources*, 41(4) (2014) 412-420.
- [25] E. Kanda, J. Kosgei, E. Kipkorir, Simulation of organic carbon loading using MIKE 11 model: A case of River Nzoia, Kenya, *Water Practice and Technology*, 10 (2) (2015) 298- 304.
- [26] H.B. Fischer, List, E. J., Koh, R. C. Y., Imberger, J. and Brooks, N. H, *Mixing in inland and coastal waters*, Academic Press, New York 1979, pp. 483.
- [27] I.W. Seo, T.S. Cheong, Predicting longitudinal dispersion coefficient in natural streams, *Journal of hydraulic engineering*, 124(1) (1998) 25-32.
- [28] Z. Q. Deng, V.P. Singh, L. Bengtsson, Longitudinal dispersion coefficient in straight rivers, *Journal of hydraulic engineering*, 127(11) (2001) 919-927.
- [29] S.M. Kashefipour, R.A. Falconer, Longitudinal dispersion coefficients in natural channels, *Water Research*, 36(6) (2002) 1596-1608.
- [30] M. Hughes, P. Harris, T. Hubble, Dynamics of the turbidity maximum zone in a micro-tidal estuary: Hawkesbury River, Australia, *Sedimentology*, 45(2) (1998) 397-410.
- [31] M. Naseri, S.M. Kashefipour, Hydrodynamic simulation and qualitative parameters in the river system by using FASTER., *Journal of Iran Water Research* 7(13) (2013) 121-129. (In Persian).
- [32] W.H.O. WHO, *Guidelines for drinking water quality: surveillance and control of community supplies*, 2008.
- [33] Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO), *Water quality for agriculture*, 1976
- Advances in Hydro-Science and Engineering*, 4 (2016) 1-9.
- [14] Iran Ministry of Power, the decisions of the twenty-fifth session of the Supreme Council for Water Iran, Ministry of Power, Tehran, Iran, 2016. (In Persian).
- [15] K. Naddafi, H. Honari, M. Ahmadi, Water quality trend analysis for the Karoon River in Iran, *Environmental monitoring and assessment*, 134(1-3) (2007) 305-312.
- [16] M. Karamouz, N. Mahjouri, R. Kerachian, River water quality zoning: a case study of Karoon and Dez River system, *Health Science and Engineering*. 1(2) (2004) 16-27.
- [17] M. Afkhami, M. Shariat, N. Jafarzadeh, H. Ghadiri, R. Nabizadeh, Developing a water quality management model for Karun and Dez Rivers, *Environmental Health Science and Engineering*, 4(2) (2007) 99-106.
- [18] Khuzestan Water and Power Authority (KWPA) , *An assessment of pollutants in Karun River: A report prepared by the Water Quality Assessment section*, 2000.
- [19] S. Kashefipour, J. Zahiri, Comparison of Empirical Equations' Application in the Advection-Dispersion Equation (ADE) on Sediment Transport Modelling, *World Applied Sciences*. 11(8) (2010) 1015-1024.
- [20] R. Holtzman, U. Shavit, M. Segal-Rozenhaimer, I. Gavrieli, A. Marei, E. Farber, A. Vengosh, Quantifying Ground Water Inputs along the Lower Jordan River, 34 (2005) 897-906.
- [21] Danish Hydraulic Institute (DHI), *MIKE11 a modeling system for rivers and channels*, Reference Manual, 2009.
- [22] C. Lemckert, P. Campbell, G. Jenkins, Turbulence in the bottom boundary layer of Moreton Bay, Queensland, Australia, *Journal of Coastal Research*, (64) (2011) 1091.
- [23] A. Roshanfekar, S. Kashefipour, N. Jafarzadeh, Numerical modelling of heavy metals for riverine

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

B. Fakouri Dekahi, M. Mazaheri, J. Mohammad Vali Samani, Evaluation of Karun River Water Salinity Reduction Strategies Using Management Scenarios, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(2) (2018) 245-256.

DOI: 10.22060/ceej.2017.12160.5138

