



## مدیریت آب و آبیاری

دوره ۶ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۵

صفحه‌های ۳۱۴-۲۹۵

# اثر سیلاب‌ها و مدیریت منابع آلاینده بر تغییرات زمانی و مکانی شوری رودخانه کارون (ملاثانی تا فارسیات)

بهمن فکوری دکاهی<sup>۱</sup>، جمال محمودلی سامانی<sup>۲</sup> و مهدی مظاهری<sup>۳\*</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی‌ارشد، گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۲. استاد، گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۳. استادیار، گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۲۱

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۲۰

### چکیده

رودخانه‌ها علاوه بر اهمیت محیط‌زیستی، نقش مهمی در زندگی مردم مجاور خود دارد. رودخانه کارون، پرآب‌ترین و طولانی‌ترین رودخانه ایران، در سال‌های اخیر با کاهش جریان و افزایش بارگذاری منابع آلاینده، با افزایش شوری همراه بوده است. در تحقیق حاضر، تغییرات زمانی و مکانی شوری آب ۱۰۵ کیلومتر از رودخانه کارون در محدوده ملاثانی تا فارسیات با استفاده از مدل MIKE11 شبیه‌سازی شد. بعد از واسنجی و صحت‌سنجی مدل هیدرودینامیکی و جابه‌جایی-پراکندگی، نتایج شبیه‌سازی عددی نشان داد که بر اثر بارگذاری منابع آلاینده، پروفیل طولی شوری، به ویژه در محدوده ۶۰ و ۹۰، به ترتیب با قرارگیری شهر اهواز و مزارع کشاورزی، به صورت پله‌ای افزایش یافته است. حداکثر و حداقل تغییرات شوری به ترتیب در مرداد و اسفند اتفاق می‌افتد. برای توصیف نرخ تغییرات شوری در فصول تر و خشک معادله مرتبه چهارم به ترتیب با ضریب تبیین ۰/۹۹ و ۰/۹۸ پیشنهاد شد. نتایج نشان داد که افزایش دبی سیلاب منجر به کاهش قابل‌ملاحظه‌ای در شوری رودخانه می‌شود. در مرداد، حذف منابع کشاورزی و در اسفند، حذف منابع صنعتی و شهری به ترتیب در بالادست و پایین‌دست شهر اهواز بیشترین تأثیر را در کاهش شوری رودخانه دارد. نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق برای بررسی اثر تغییرات جریان و بارگذاری منابع آلاینده بر شوری رودخانه کارون و ارائه راهکار مدیریتی مناسب است.

**کلیدواژه‌ها:** انتقال و انتشار، بارگذاری منابع آلاینده، شبیه‌سازی عددی، مدل MIKE11، مدیریت شوری، هیدرودینامیک.

## مقدمه

رودخانه‌ها علاوه بر اهمیت محیط‌زیستی، نقش مهمی در زندگی مردم مجاور خود دارد. وجود منابع آلاینده شهری، صنعتی و کشاورزی در حاشیه رودخانه‌ها موجب ورود انواع مختلفی از آلاینده‌ها به رودخانه‌ها شده است. ورود آلاینده‌ها، کیفیت آب رودخانه‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد (۱۳، ۲۶). شوری از پارامترهای اولیه سنجش کیفیت آب رودخانه‌هاست که غلظت نمک‌های محلول در آب را نشان می‌دهد و از طریق بارگذاری منابع آلاینده نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای به رودخانه، مقدار آن افزایش می‌یابد (۲۵). ورود شوری به رودخانه موجب تغییر در کیفیت آب پایین دست رودخانه می‌شود. به‌ویژه قرارگیری منابع مصرف در پایین دست رودخانه‌ها (برداشت آب)، اهمیت تغییرات کیفی آب رودخانه را دوچندان می‌کند، به‌طوری که با افزایش شوری از ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، آب برای فعالیت‌های شرب انسان غیرمفید خواهد شد (۳۰). همچنین، با افزایش بیش از ۳۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، برای اغلب فعالیت‌های شهری و کشاورزی نامناسب است. آبیاری همراه آب شور موجب مشکلات بسیاری برای گیاهان می‌شود (۱۰). بنابراین، لازم است بررسی‌های بیشتری درباره تغییرات زمانی و مکانی شوری، و مدیریت منابع آلاینده بر شوری رودخانه‌ها صورت گیرد.

در سال‌های اخیر، تحقیقات زیادی در زمینه بررسی و منابع افزایش شوری رودخانه‌ها صورت گرفته است. در تحقیقی با استفاده از داده‌های ده ساله از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۱ توزیع شوری در رودخانه بریزبن<sup>۱</sup> استرالیا با مدل MIKE11 بررسی شد. نتایج نشان داد که با ورود جریان شور در شرایط جزرومدهای ضعیف و قوی، به ترتیب شوری در طول رودخانه بین ۰/۴۵ تا ۰/۶ PSU<sup>۲</sup> بر ساعت

افزایش می‌یابد. همچنین، نتایج نشان داد که تقاطع آب شور و شیرین در وضعیت سیلابی رودخانه در پنج کیلومتر پایین تر از شرایط غیرسیلابی رخ می‌دهد (۳۱).

در تحقیق دیگر ضمن بررسی وضعیت شوری و منابع آلاینده ورودی به رودخانه اردن، تغییرات شوری رودخانه، متأثر از حذف جریان‌ات سطحی و زیرزمینی به روش محاسبات بیلان جرمی بررسی شد. بررسی‌ها نشان داد که شوری اولیه در رودخانه ۲۶۰۰ میلی‌گرم بر لیتر است. نتایج نشان داد، در بخش شمالی رودخانه با حذف رواناب‌های سطحی، 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 رواناب‌های سطحی، باعث افزایش شوری ۳۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و حذف منابع شور باعث کاهش ۶۶۵ میلی‌گرم بر لیتر می‌شود (۱۱).

بررسی شوری رودخانه کلرادو در امریکا نشان داد که شوری آن متأثر از عوامل طبیعی و فعالیت‌های انسانی است، به‌طوری که مهم‌ترین عوامل انسانی شامل زهاب برگشتی از مزارع کشاورزی است. در این تحقیق ضمن برآورد میزان جرم نمک ورودی ماهانه به رودخانه، اثر زهکش‌های کشاورزی در افزایش شوری آب رودخانه بررسی شد (۲۴).

در تحقیقی 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

1. Brisbane River  
2. Practical Salinity Unit (PSU)

از انجام این تحقیق نه تنها افزایش دانش در زمینه هیدرودینامیک و انتقال و انتشار شوری در رودخانه‌هاست، بلکه بررسی وضعیت شوری رودخانه کارون حد فاصل ملاثنای تا فارسیات متأثر از بارگذاری متعدد آلاینده‌های نقطه‌ای مجاور رودخانه به منظور مطالعه عددی در شرایط موجود است. برای دستیابی به نتایج دقیق، با استفاده از داده‌ها و شرایط واقعی به شبیه‌سازی هیدرودینامیکی و شوری محدوده مورد نظر، تغییرات زمانی و مکانی شوری رودخانه تحت اثر سیلاب‌ها و مدیریت منابع آلاینده (گزینه‌های حذف منابع آلاینده) پرداخته‌ایم.

### مواد و روش‌ها محدوده مطالعاتی

رودخانه کارون پرآب‌ترین و طولانی‌ترین رودخانه ایران، با طولی حدود ۹۰۰ کیلومتر در جنوب غربی ایران واقع شده است. حوضه آبریز این رودخانه با مساحتی بالغ بر ۶۷۰۰۰ کیلومترمربع در  $48^{\circ} 15'$  تا  $52^{\circ} 30'$  شرقی و  $30^{\circ} 17'$  تا  $33^{\circ} 49'$  شمالی قرار دارد (شکل a). سرچشمه سرشاخه‌های آن از کوه‌های زاگرس است که پس از گذر از دشت خوزستان وارد خلیج فارس می‌شود (شکل b) (۱۶، ۲۲). این رودخانه تأمین‌کننده آب شرب چندین شهر و روستا، مزارع کشاورزی و صنایع متعددی است (۶). ورود پساب‌های کشاورزی و شهری و صنعتی موجب افزایش شوری رودخانه شده است. محدوده مطالعاتی، ۱۰۵ کیلومتر از این رودخانه، حدفاصل بین ایستگاه ملاثنای تا فارسیات است که در مجاورت آن شهرهای مهمی نظیر ملاثنای، ویس، شبیان و اهواز، همچنین در انتهای آن محل برداشت آب صدها هکتار زمین کشاورزی و کشت و صنعت‌های نیشکر قرار دارد (شکل c). محدوده مورد نظر به دلیل تراکم بالای جمعیت و صنایع متعدد حاشیه رودخانه، یکی از بازه‌های مهم و بحرانی رودخانه است (۱۶).

پویایی ترتیبی<sup>۱</sup> (SDGA) بررسی شد. نتایج نشان داد که در 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 (۱۹).

در تحقیقی، نفوذ شوری در مصب رودخانه مکونگ<sup>۲</sup> تحت اثر دو سناریوی تأثیر سیلاب‌ها و حداقل جریان از بالادست در شرایط لایروبی رودخانه با استفاده از مدل MIKE11 شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که در مواقع سیلابی شوری رودخانه کاهش می‌یابد، اما هنگام کاهش جریان از بالادست، شوری به شدت در مصب افزایش می‌یابد. همچنین، بیشترین نفوذ شوری در مصب رودخانه در فصول خشک اتفاق می‌افتد (۲۹).

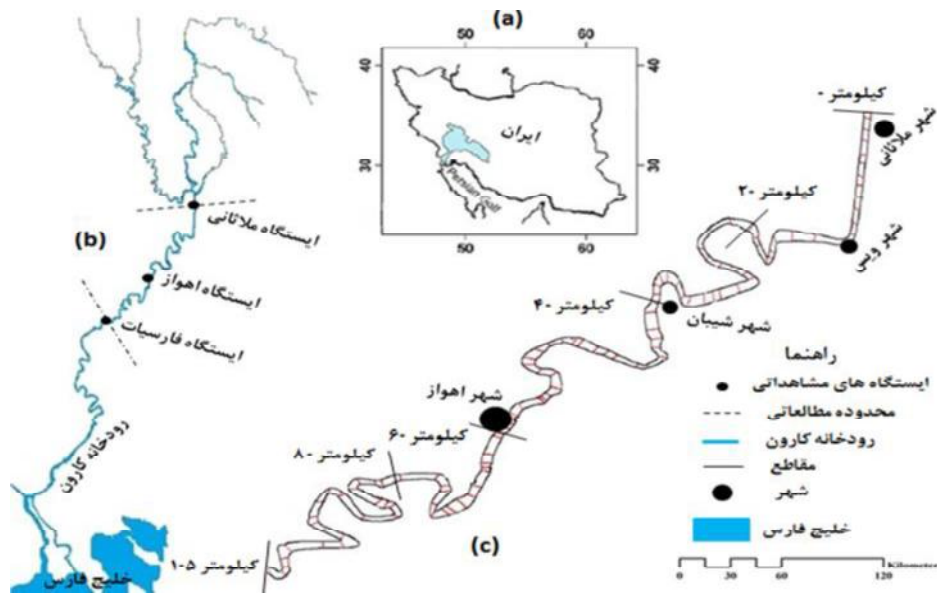
رودخانه کارون در جنوب غربی ایران قرار دارد و به خلیج فارس می‌ریزد (شکل ۱). شوری آب این رودخانه به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر منابع مصرف و آلاینده ورودی قرار دارد، به طوری که در سال‌های اخیر سلامت زیست‌بوم رودخانه با منابع برداشت و آلاینده ورودی در معرض تهدید قرار گرفته است. یکی از مشکلات کیفی رودخانه کارون، افزایش شوری آن است، به طوری که در سال‌های اخیر، برای چند ماه از سال آب رودخانه برای شهرهای مجاور غیرقابل‌استفاده است (۱۳).

محدوده مورد مطالعه از رودخانه کارون در این تحقیق، به دلیل قرارگیری منابع مصرف متعدد شهری و روستایی مجاور، همچنین آبیگری برای صدها هکتار از مزارع کشاورزی پایین دست انتخاب شد. تغییرات مکانی و زمانی شوری محدوده مطالعه رودخانه کارون علاوه بر ورود شوری از بالادست، متأثر از منابع نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای متعددی در مسیر محدوده مورد نظر است. بنابراین، هدف

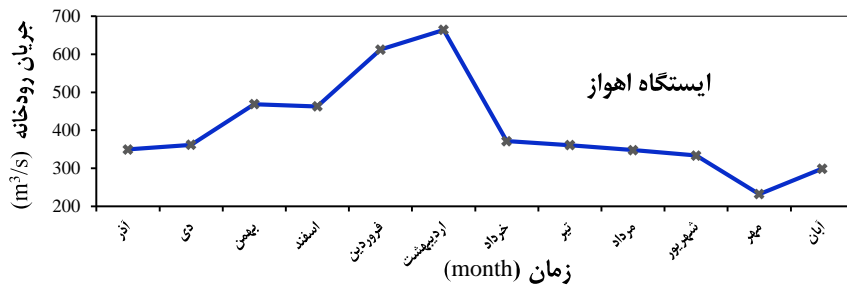
1. Sequential Dynamics Genetic Algorithm (SDGA)  
2. Mekong River

۳۳۰ مترمکعب بر ثانیه کاهش می‌یابد. در سال‌های اخیر، علاوه بر کاهش جریان، سیلاب‌های سنگین در رودخانه اتفاق افتاده است، به طوری که در فروردین ۱۳۹۵ سیل با روانابی بالغ بر ۸۵۰۰ مترمکعب بر ثانیه در رودخانه جاری شد.

در شکل ۲، متوسط جریان ده‌ساله رودخانه (۱۳۸۴-۱۳۹۳) در ایستگاه اهواز نشان داده شده است. طی فصول تر (آذر تا اردیبهشت) متوسط جریان در رودخانه کارون به ۵۴۳ مترمکعب بر ثانیه می‌رسد و در مقابل، در فصول خشک (خرداد تا آبان) متوسط جریان رودخانه به



شکل ۱. (a) موقعیت رودخانه کارون، (b) محدوده مطالعاتی، (c) طول رودخانه (km) و موقعیت شهرها (۱۸)



شکل ۲. متوسط دبی ماهانه رودخانه طی ده سال اخیر (از ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۳)

گذشته به‌طور مستمر در ایستگاه‌های هیدرومتری به نمونه‌برداری کمیت و کیفیت آب روخانه پرداخته است (۲۰). اداره محیط‌زیست استان خوزستان نیز برای صدور مجوز و نظارت بر منابع آلاینده ورودی به رودخانه به

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

## مدیریت آب و آبیاری

دوره ۶ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۵

اثر سیلاب‌ها و مدیریت منابع آلاینده بر تغییرات زمانی و مکانی شوری رودخانه کارون (ملاثنای تا فارسیات)

وارد رودخانه می‌کند. افزایش شوری در محدوده مورد مطالعه متأثر از عواملی چون زهاب‌های کشاورزی، پساب خانگی و صنعتی، خاک‌های شور، برداشت بی‌رویه جریان و خشکسالی‌های اخیر است (۲، ۵). در جدول ۱، مشخصات کمی و کیفی مهم‌ترین منابع آلاینده در محدوده مطالعاتی و موجب افزایش شوری آب رودخانه آمده است.

پایش کیفی پساب‌های ورودی می‌پردازد. اطلاعات هیدرومتری و کیفی سه ایستگاه ملاثنای، 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 محدوده مورد مطالعه، منابع آلاینده زیادی در مجاورت رودخانه قرار دارد که این منابع مقادیر زیادی مواد محلول به صورت نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای

جدول ۱. متوسط دبی و شوری سالانه منابع آلاینده نقطه‌ای در محدوده ملاثنای تا فارسیات

منبع آلاینده	نماد	کیلومتر (m)	دبی پساب (m <sup>3</sup> /s)	شوری (μS/cm)	مواد محلول (mg/L)
ایستگاه ملاثنای (کیلومتر ۰)					
شهر ملاثنای	P <sub>1</sub>	۱۲۰	۰/۱۲	۲۵۱۷/۲	۱۶۱۰/۸۸
شبکه آبیاری شمال شرق اهواز ۱	P <sub>2</sub>	۳۸۰۰	۱/۲	۲۳۶۹/۸	۱۵۱۶/۱۶
شبکه آبیاری شمال شرق اهواز ۲	P <sub>3</sub>	۶۰۰۰	۰/۷۲	۱۷۲۵/۴	۱۱۰۴
نیروگاه رامین	P <sub>4</sub>	۹۵۰۰	۰/۷۵	۴۲۸۷/۸	۲۷۴۲/۶۸
شهر ویس	P <sub>5</sub>	۱۱۵۰۰	۰/۲۲	۱۸۲۵	۱۱۶۸
شبکه آبیاری شمال شرق اهواز ۳	P <sub>6</sub>	۱۸۷۰۰	۲/۴	۲۶۷۱/۶	۱۷۰۹/۴۴
شبکه آبیاری شمال شرق اهواز ۴	P <sub>7</sub>	۳۴۶۰۰	۰/۴۸	۳۲۸۶/۸	۲۱۰۳/۴
شهر شیبان	P <sub>8</sub>	۳۷۹۰۰	۰/۱	۱۷۳۴/۴	۱۱۰۹/۷۶
کشت و صنعت نیشکر دهخدا	P <sub>9</sub>	۴۲۱۰۰	۰/۱	۱۹۲۱۰	۱۲۲۹۴/۴
کارخانه شکر اهواز	P <sub>10</sub>	۴۷۲۰۰	۰/۳۱	۱۵۶۰/۴	۱۰۰۲/۸۸
نیروگاه زرگان	P <sub>11</sub>	۴۸۶۰۰	۰/۱	۳۶۰۶/۲	۲۳۰۷/۸۴
پساب شهر اهواز ۱	P <sub>12</sub>	۵۸۱۰۰	۱/۱۳	۲/۲۶۱۰	۱۶۷۱/۶۸
ایستگاه اهواز (کیلومتر ۶۰)					
پساب شهر اهواز ۲	P <sub>13</sub>	۶۴۷۰۰	۱/۸۰	۴۲۳۶	۲۷۱۱/۰۴
پساب شهر اهواز ۳	P <sub>14</sub>	۶۸۶۰۰	۰/۹۰	۶۱۷۲/۲	۳۹۵۰/۰۸
پساب شهر اهواز ۴	P <sub>15</sub>	۷۲۰۰۰	۰/۶۸	۳۲۷۰/۲	۲۰۹۷/۹۲
تصفیه‌خانه شهر اهواز	P <sub>16</sub>	۸۱۰۰۰	۰/۶۹	۴۶۸۱/۲	۲۹۹۳/۹۲
مجتمع صنعتی	P <sub>17</sub>	۸۳۱۰۰	۰/۶۹	۳۸۷۷/۸	۲۴۷۷/۹۷
زهکش مزارع کشاورزی ۱	P <sub>18</sub>	۹۲۰۰۰	۵/۰۴	۲۷۴۱	۱۷۵۲/۲۴
زهکش مزارع کشاورزی ۲	P <sub>19</sub>	۹۷۵۰۰	۳/۷۳	۲۷۳۹	۱۷۵۴/۲۴
ایستگاه فارسیات (کیلومتر ۱۰۵)					

### مدیریت آب و آبیاری

دوره ۶ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۵

## مدل عددی

MIKE11 ابزاری یک بعدی و با هیدرودینامیک قوی برای مدلسازی شرایط رودخانه‌ها، مصب‌ها و کانال‌های آبیاری است که مؤسسه هیدرولیکی دانمارک<sup>۱</sup> (DHI) پدید آورد (۹).

## شرح و راه‌اندازی مدل

در این تحقیق، برای بررسی تغییرات شوری در طول محدوده مطالعه از مدول هیدرودینامیکی (HD) همراه مدول انتقال-انتشار (AD) استفاده شده است. خروجی مدول HD، در زمان و مکان مانند دبی و تراز سطح آب جزء ورودی‌های مدول AD محسوب می‌شود. مدول HD بر اساس موج دینامیکی، معادله بیوستگی (معادله ۱) و ممتوم (معادله ۲) را به صورت تفاضل محدود ضمنی<sup>۲</sup> حل می‌کند.

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

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

در این روابط،  $Q$  جریان رودخانه،  $A$  مساحت سطح مقطع،  $q$  جریان جانبی،  $h$  سطح آب،  $I_f$  ترم مقاومت،  $f$  نیروی ممتوم،  $\rho_w$  چگالی آب،  $g$  شتاب ثقل و  $\alpha$  ضریب تصحیح ممتوم است (۹). اساس مدول AD، معادله یک بعدی بقای جرم برای ماده‌ای محلول یا معلق نظیر شوری و رسوب است (معادله ۳).

$$\frac{\partial AC}{\partial t} + \frac{\partial QC}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left( AD \frac{\partial C}{\partial x} \right) = -AKC + C_2 \quad (3)$$

در این رابطه،  $C$  غلظت ماده،  $D$  ضریب پراکندگی طولی،  $K$  ضریب زوال خطی، و  $C_2$  غلظت ماده در جریان جانبی است. معادله (۳) با فرض اختلاط کامل ماده آلاینده در سطح مقطع، نشان‌دهنده دو سازوکار است: ۱. جابه‌جایی افقی ماده آلاینده با جریان، و ۲. پراکندگی ماده آلاینده تحت اثر گرادیان غلظت (۹).

کانال اصلی رودخانه در محدوده مطالعاتی از ملاثانی (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 ۳ با خط چین نشان داده شده است. در طول محدوده مطالعه، ۱۱۵ سطح مقطع با فواصل تقریبی ۱۰۰۰ متر برای معرفی بخش عرضی رودخانه به مدل معرفی شد؛ برای مثال، برخی مقاطع در شکل ۳-d نمایش داده شده است. در بالادست رودخانه، برای مثال سطح مقطع کیلومتر صفر، مقاطع معمولاً عمیق و باریک است (شکل ۳-b). مقاطع میانی رودخانه، مانند سطح مقطع کیلومتر ۶۰، ضمن عمیق بودن، عریض می‌شود (شکل ۳-c). عمق و عرض مقاطع پایین دست، کاملاً متفاوت از بالادست رودخانه، کاهش می‌یابد؛ برای مثال، سطح مقطع کیلومتر ۱۰۵ در شکل ۳-d.

برای شرایط مرزی در بالادست، دبی روزانه و متوسط شوری ماهانه به صورت شرایط مرزی باز استفاده شد و برای شرایط مرزی در پایین دست، متوسط روزانه تراز سطح آب به صورت شرایط باز و شوری به صورت گرادیان صفر<sup>۳</sup> وارد مدل شد. شرایط مرزی در بالادست و پایین دست منطبق بر محدوده شبیه‌سازی نبود، بلکه حدود ۷ کیلومتر با محدوده مطالعاتی فاصله داشت. همچنین، منابع آلاینده ورودی در مسیر به صورت منابع نقطه‌ای و متوسط ماهانه معرفی شد. اثر باد در این مطالعه با توجه به نبود اطلاعات آن در امتداد رودخانه، در نظر گرفته نشد. برای اطمینان از پایداری شبیه‌سازی عددی، از معادله ۴ استفاده شد. در این تحقیق، فواصل مکانی و گام‌های زمانی به ترتیب ۳۵۰ متر و ۲۰ ثانیه در نظر گرفته شد. برای افزایش دقت شبیه‌سازی عددی و رسیدن مدل به حالت

1. Danish Hydraulic Institute (DHI)

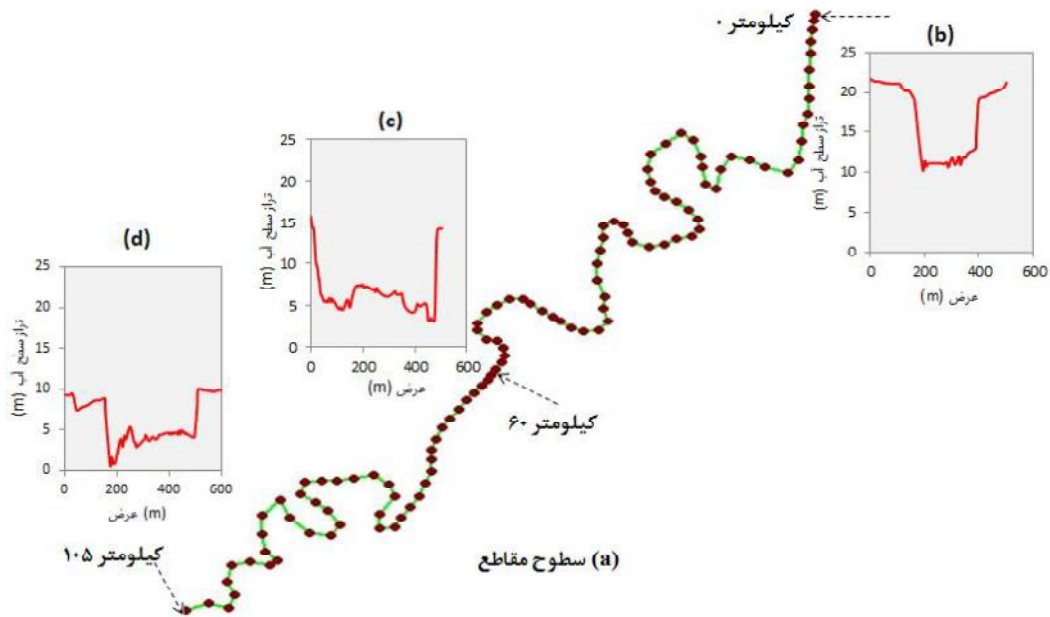
2. Implicit Finite Difference

3. Zero Gradient

در این رابطه،  $V$  سرعت جریان،  $\Delta t$  گام زمانی و  $\Delta x$  فواصل مکانی است.

دینامیکی پایدار، نخست مدل برای دوره‌ای یک ساله اجرا شد تا از صحت نتایج خروجی اطمینان حاصل شود.

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



شکل ۳. (a) کانال اصلی رودخانه در محدوده مطالعاتی، (b) در ۰ کیلومتر صفر، (c) در ۶۰ کیلومتر، (d) در ۱۰۵ کیلومتر

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

در این رابطه،  $V$  سرعت متوسط جریان به صورت متر بر ثانیه، و  $a$  و  $b$  به ترتیب عامل و توان پراکنندگی<sup>۱</sup> است (۹). در جدول ۲، نخست ضریب پراکنندگی از چهار رابطه تجربی فیشر و همکاران (۱۹۷۹)، سئو و چنگ (۱۹۹۸)، دنگ و همکاران (۲۰۰۱)، و کاشفی پور و فالكونر (۲۰۰۲) مجزا محاسبه شد (۱۲، ۱۷، ۸، ۲۷). سپس، در مدل در دو حالت  $b$  برابر با صفر و یک، برای هر یک از روابط واسنجی شد. در صورتی که  $b$  برابر صفر باشد، ضریب پراکنندگی در طول محاسبات مستقل از سرعت است و برابر فاکتور پخش می‌شود. اگر  $b$  غیر صفر باشد، ضریب

### واسنجی و صحت‌سنجی مدل

در مدل HD، مقاومت بستر پارامتری حیاتی است که تا حد زیادی رفتار جریان رودخانه را تعیین می‌کند (۲۱). در این تحقیق، از ضریب زبری مانینگ  $n$  برای مقاومت بستر استفاده شد. این ضریب به صورت یکنواخت با فرض ثابت بودن زبری در امتداد طولی رودخانه فرض شد. بر اساس تحقیقات گذشته درباره رودخانه کارون مقدار این ضریب از ۰/۰۲۵ تا ۰/۰۵ مشاهده شد (۱، ۴، ۷). بنابراین، مقدار ضریب  $n$  مانینگ از ۰/۰۲۵ تا ۰/۰۵ با گام ۰/۰۰۵ به‌طور مجزا در ارزیابی عملکرد مدل HD آزمون شد. علاوه‌بر این، در مدل AD، ضریب پراکنندگی تا حد زیادی با گرادیان غلظت ماده آلاینده مرتبط و در مدل MIKE11 به صورت معادله (۵) تعریف می‌شود.

1. Dispersion factor and exponent

است و ضریب زوال ( $k=0$ ) در مدل صفر وارد شد (۱۵). برای واسنجی از داده‌های دبی و تراز سطح آب و شوری در سال ۱۳۹۰، در دو ایستگاه ملاثانی و فارسیات استفاده شد. همچنین، برای صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی، عملکرد مدل در ترم‌های سطح آب و شوری با داده‌های هشت ماه (بهمن تا شهریور) از سال ۱۳۹۱ در ایستگاه فارسیات بررسی شد.

پراکندگی در طول محاسبات وابسته به سرعت است و مقداری متغیر خواهد بود. در جدول ۲، ضریب پراکندگی از روابط تجربی برای رودخانه کارون محاسبه شده است. در این روابط،  $H$  عمق جریان،  $W$  عرض جریان،  $U$  سرعت جریان،  $U_* = \sqrt{gHS}$  برشی که در آن  $S$  شیب خط انرژی است و  $D$  ضریب پراکندگی طولی در رودخانه است. قابل ذکر است که شوری آلاینده‌ای پایستار<sup>۱</sup>

جدول ۲. روابط تجربی محاسبه ضریب پراکندگی

D (m <sup>2</sup> /s)	U* (m/s)	U (m/s)	W (m)	H (m)	رابطه تجربی	نام رابطه
۳۰۱/۱۹					$D = 0.011 \frac{U^2 W^2}{H U_*}$	فیشر و همکاران (۱۹۷۹)
۲۶۳/۷۲					$D = 5.92 \left[ \frac{W}{H} \right]^{0.62} \left[ \frac{U}{U_*} \right]^{1.43} H U_*$	سئو و چنگ (۱۹۹۸)
۲۷۶/۸۳	۰/۰۷	۰/۳۷	۲۷۰/۹۶	۵/۱۱	$D = \frac{0.15}{8 e_t} \left[ \frac{W}{H} \right]^{1.67} \left[ \frac{U}{U_*} \right]^2 H U_*$ Where $e_t = 0.145$	دنگ و همکاران (۲۰۰۱)
۱۰۳/۳۱					$D = 10.612 H U \left( \frac{U}{U_*} \right) + \frac{1}{3520} \left( \frac{W}{H} \right)^{1.38} \left( \frac{U}{U_*} \right)$	کاشفی پور و فالکونر (۲۰۰۲)

زبری مانینگ ۰/۰۳۵ به دست آمد. متوسط روزانه تراز سطح آب شبیه‌سازی شده و اندازه گیری شده در سال ۱۳۹۰ در ۶۰ کیلومتر (ایستگاه اهواز) و ۱۰۵ کیلومتر (ایستگاه فارسیات) مقایسه شد (شکل ۴ و ۵). به طور کلی، تراز سطح آب شبیه‌سازی شده با تراز سطح آب اندازه‌گیری شده با ضریب تبیین  $R^2$  ۰/۹۱ تطبیق داشت. ریشه میانگین مربعات خطا<sup>۳</sup> (RMSE) و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده<sup>۴</sup> (NRMSE) بین تراز سطح آب شبیه‌سازی شده و تراز سطح آب اندازه‌گیری شده به ترتیب برابر ۰/۱۷ متر و ۱۳/۴٪ است.

## نتایج و بحث

در این بخش بعد از ارائه نتایج واسنجی و صحت‌سنجی، به نتایج شبیه‌سازی شوری رودخانه متأثر از تغییرات جریان و بارگذاری منابع آلاینده اشاره می‌کنیم. در انتها نیز به اثر سیلاب‌ها و حذف منابع آلاینده نقطه‌ای بر تغییرات زمانی و مکانی شوری رودخانه پرداخته‌ایم.

## نتایج واسنجی و صحت‌سنجی

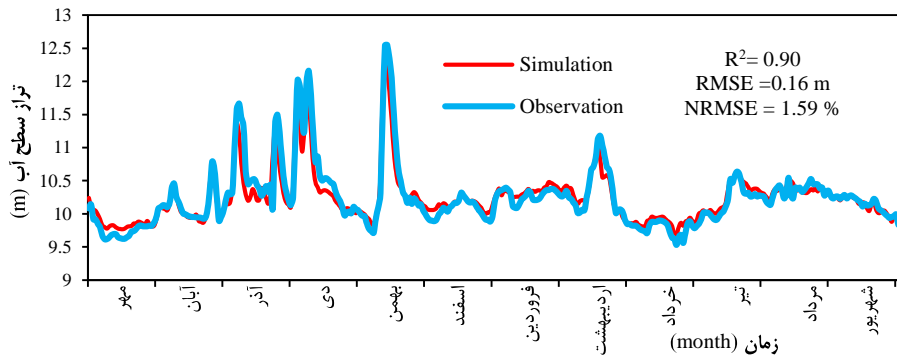
نتایج واسنجی نشان داد که مدل همراه ضریب زبری مانینگ ۰/۰۳۵ در مقایسه با سایر ضرایب نتایج بهتری ارائه می‌دهد. بنابراین، نتایج شبیه‌سازی با استفاده از ضریب

2. Coefficient of Determination ( $R^2$ )  
3. Root mean Square Error  
4. Normalized Root Mean Square Error

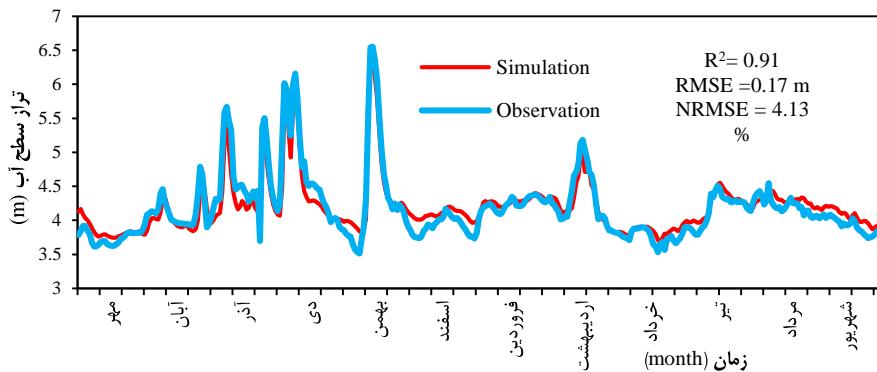
1. Conservative pollutant



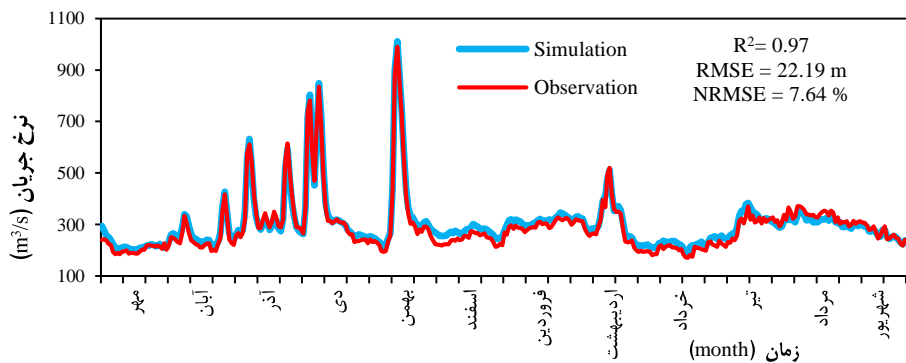
اثر سیلاب‌ها و مدیریت منابع آلاینده بر تغییرات زمانی و مکانی شوری رودخانه کارون (ملاثنای تا فارسیات)



شکل ۴. مقایسه متوسط روزانه تراز سطح آب شبیه‌سازی شده با اندازه‌گیری شده در ایستگاه اهواز



شکل ۵. مقایسه متوسط روزانه تراز سطح آب شبیه‌سازی شده با اندازه‌گیری شده در ایستگاه فارسیات



شکل ۶. مقایسه جریان روزانه شبیه‌سازی شده با اندازه‌گیری شده در ایستگاه اهواز

در شکل ۶، مقایسه جریان روزانه اندازه‌گیری و  $R^2$  ۰/۹۱ تطبیق داشت. همچنین، RMSE و NRMSE، شبیه‌سازی ایستگاه اهواز آمده است. متوسط روزانه جریان شبیه‌سازی شده با متوسط روزانه جریان اندازه‌گیری شده با  $R^2$  ۰/۹۱ تطبیق داشت. همچنین، RMSE و NRMSE، به ترتیب برابر با ۲۲/۹ مترمکعب بر ثانیه و ۷/۶۴٪ به دست آمد.

## مدیریت آب و آبیاری

دوره ۶ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۵

در حالت  $a=179.22$  و  $b=1$  با RMSE و NRMSE به ترتیب  $۳۲/۱۴$  میکروزیمنس بر سانتی متر است و  $۸/۹۳$  درصد شبیه سازی بهتری انجام می دهد (جدول ۳). همچنین، مقدار  $R^2$  برای تطبیق متوسط شوری شبیه سازی شده با اندازه گیری شده،  $۰/۹۳$  به دست آمد.

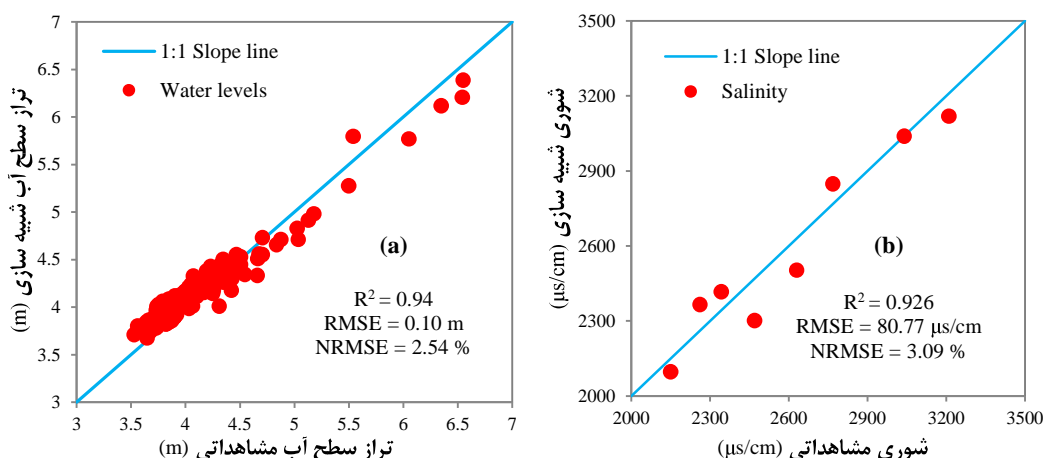
بعد از محاسبه ضریب پراکندگی از روابط ارائه شده (جدول ۲)، ضرایب  $a$  و  $b$  هر رابطه کالیبره شد. مقایسه نتایج بر اساس غلظت شوری شبیه سازی با مقدار اندازه گیری شده در سال  $۱۳۹۰$  در ایستگاه فارسیات انجام شد. نتایج نشان داد که رابطه کاشفی پور و فالکونر ( $۲۰۰۲$ )

جدول ۳. واسنجی ضریب پراکندگی محاسبه شده از روابط تجربی در محدوده مطالعاتی

اجرا	معادلات	D (m <sup>2</sup> /s)	$D = aV^b$	$R^2$	RMSE ( $\mu\text{s/cm}$ )	NRMSE (%)
۱ #	فیشر و همکاران (۱۹۷۹)	$۳۰۱/۱۹$	$b=۳۰۱/۱۹a=$	$۰/۵۲$	$۷۶/۴۴$	$۲۸/۰۶$
۲ #			$b=۸۱۴/۰۳a=$	$۰/۶۱$	$۶۹/۳۷$	$۲۳/۵۹$
۳ #	ستو و چنگ (۱۹۹۸)	$۲۶۳/۷۲$	$b=۲۶۳/۷۲a=$	$۰/۶۸$	$۵۴/۲۳$	$۱۴/۶۷$
۴ #			$b=۷۱۲/۷۶a=$	$۰/۷۳$	$۴۴/۱۶$	$۱۰/۲۰$
۵ #	دنگ و همکاران (۲۰۰۱)	$۲۷۶/۸۳$	$b=۲۷۶/۸۳a=$	$۰/۸۴$	$۶۱/۳۱$	$۱۹/۷۷$
۶ #			$b=۷۴۸/۱۹a=$	$۰/۸۹$	$۵۲/۲۵$	$۱۵/۹۴$
۷ #	کاشفی پور و فالکونر (۲۰۰۲)	$۱۰۳/۳۱$	$b=۱۰۳/۳۱a=$	$۰/۸۵$	$۴۸/۲۰$	$۱۲/۷۵$
۸ #			$b=۱۷۹/۲۲a=$	$۰/۹۳$	$۳۲/۱۴$	$۸/۹۳$

ویژگی های جریان و شوری آب رودخانه را در محدوده مطالعاتی تعیین می کند.

بر اساس نتایج صحت سنجی، عملکرد مدل با ضرایب زبری مانینگ ( $n$ ) و پراکندگی ( $D$ ) در ترم های سطح آب و شوری تأیید شد (شکل ۷). بنابراین، مدل با دقت بالایی



شکل ۷. مقایسه شبیه سازی و اندازه گیری شده (a) تراز سطح آب و (b) متوسط شوری در ایستگاه فارسیات

## مدیریت آب و آبیاری

دوره ۶ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۵

پروفیل طولی شوری با نوسان کمی در حال افزایش است، در حالی که در بازه اهواز تا فارسیات، ضمن کاهش تعداد منابع آلاینده، مقدار جرم بارگذاری و فواصل بین منابع آلاینده افزایش می‌یابد. در نتیجه، افزایش پله‌ای شوری در پروفیل طولی بیشتر نشان داده می‌شود. در ادامه به این موضوع بیشتر می‌پردازیم.

وضعیت افزایش پله‌ای با توجه به زمان بارگذاری متفاوت است، به طوری که افزایش پله‌ای پروفیل شوری در ماه‌های اردیبهشت، خرداد، تیر، مرداد، شهریور و مهر در کیلومتر ۲۰ و ۹۰ بیش از سایر ماه‌ها به چشم می‌خورد. در این ماه‌ها پیک جریان برگشتی از مزارع کشاورزی، به‌ویژه نمک‌های شسته شده از پروفیل خاک، همراه رواناب سطحی زهکش‌های شبکه آبیاری شمال شرق اهواز و مزارع جنوب اهواز با متوسط شوری ۲۶۰۹ میکروزیمنس بر سانتی‌متر و متوسط دبی زهاب ۱۳/۵۷ مترمکعب بر ثانیه وارد رودخانه می‌شود.

با توجه به شکل ۸، مقایسه نتایج شبیه‌سازی با داده‌های شوری مشاهداتی نشان داد که مدل دقت خوبی در شبیه‌سازی شوری رودخانه دارد. اما در سه ماه اسفند، خرداد و تیر در انتهای محدوده مطالعاتی بین نتایج شبیه‌سازی با داده‌های مشاهداتی اختلاف مشاهده می‌شود. این اختلاف، ممکن است ناشی از خطا در ثبت و انتقال داده‌های اندازه‌گیری باشد، زیرا در بررسی نقشه‌ها و بازدید میدانی هیچ‌گونه شاخه فرعی در محدوده مشاهده نشد. همچنین، تأثیر جریان‌های آب شیرین در بالادست فارسیات در سری‌های زمانی ورودی به مدل دیده شده است.

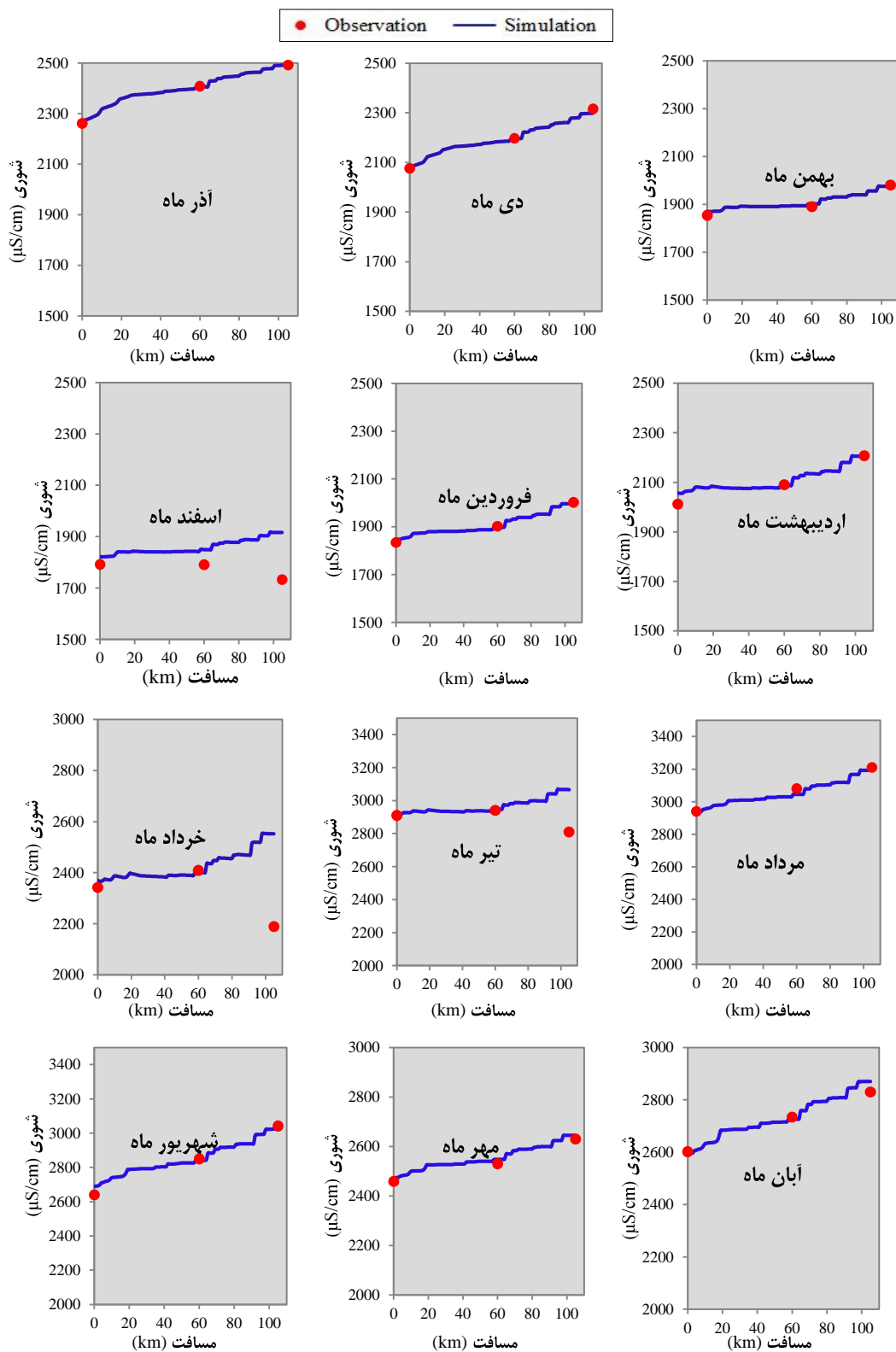
همان‌طور که در شکل ۱۰ (a) نشان داده شده است، هنگام افزایش تراز سطح آب مقادیر شبیه‌سازی برآورد کمتری نشان می‌دهد. این برآورد کم ممکن است به علت صرف‌نظر کردن از آثار باد و عدم در نظرگیری برداشت‌ها در مسیر رودخانه در شبیه‌سازی باشد (۱۴). نتایج صحت‌سنجی نشان می‌دهد که مدول‌های شبیه‌سازی شده رودخانه کارون قابل اعتماد است.

### تغییرات شوری رودخانه بر اثر بارگذاری منابع آلاینده

ورود منابع آلاینده شهری، کشاورزی و صنعتی باعث افزایش شوری در رودخانه کارون شده است. با استفاده از مدل عددی MIKE11 اثر تغییرات جریان و منابع آلاینده نقطه‌ای بر شوری رودخانه کارون از ملاثنای تا فارسیات شبیه‌سازی شد.

### پروفیل طولی تغییرات شوری

شکل ۸ پروفیل طولی شوری رودخانه را در ماه‌های مختلف سال ۱۳۹۳ نشان می‌دهد. در اثر بارگذاری منابع آلاینده نقطه‌ای، پروفیل طولی شوری رودخانه به صورت پله‌ای افزایش یافته است. این وضعیت در سرتاسر محدوده مورد مطالعه در مکان‌های ورود منابع آلاینده در حال تکرار است. اثر منابع آلاینده نقطه‌ای در هر مکان به دلیل تفاوت در مقدار دبی و شوری بارگذاری پساب، متفاوت است، به طوری که افزایش پله‌ای پروفیل شوری در اثر بارگذاری فاضلاب شهر اهواز و جریان برگشتی از مزارع کشاورزی، به ترتیب در کیلومتر ۶۰ و ۹۰ رودخانه، بیش از سایر نقاط به چشم می‌خورد. همچنین، در بازه ملاثنای تا اهواز به دلیل فاصله و مقدار کم جرم بارگذاری منابع آلاینده، تغییرات



شکل ۸. پروفیل طولی شوری رودخانه در ماه‌های مختلف

## مدیریت آب و آبیاری

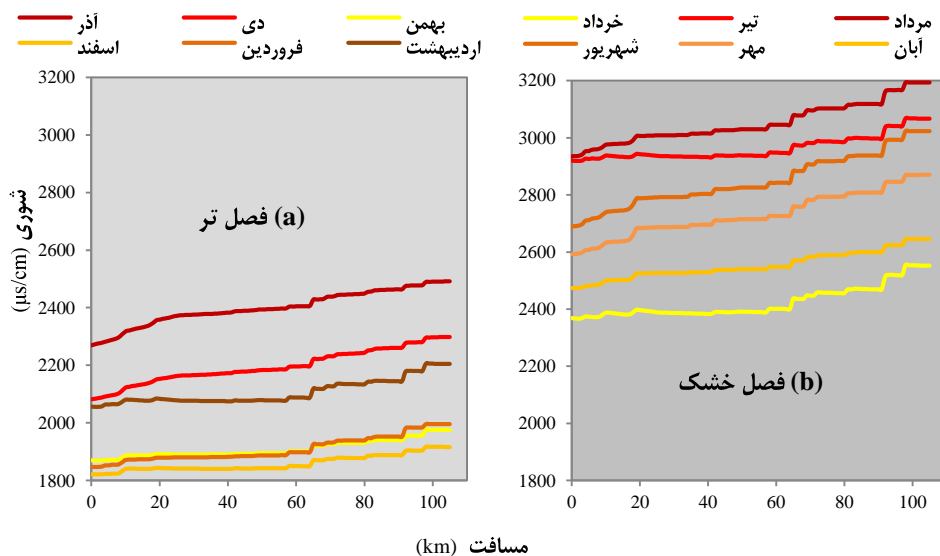
دوره ۶ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۵

### تغییرات فصلی شوری

تغییر رژیم جریان رودخانه و مقدار بارگذاری منابع آلاینده در فصول مختلف بر شوری رودخانه کارون تأثیر می‌گذارد. شکل ۹ تغییرات شوری در دو فصل تر (آذر تا اردیبهشت) و خشک (خرداد تا آبان) را در رودخانه کارون نشان می‌دهد. در کل، شوری از ابتدا تا انتهای محدوده مورد مطالعه به‌طور پیوسته در حال افزایش است و شوری حداکثر در انتهای بازه رخ می‌دهد. این افزایش ناشی از ورود شوری از مرز بالادست و بارگذاری منابع آلاینده در محدوده مورد مطالعه است. لازم به ذکر است که شوری از آلاینده‌های زوال‌ناپذیر ( $k=0$ ) است (۳، ۱۵). بنابراین، بارگذاری جرم شوری ناشی از منابع آلاینده به رودخانه، بدون کاهش جرم با فرایند جابه‌جایی به پایین دست منتقل می‌شود و بر اثر فرایندهای انتشار، غلظت آن کاهش می‌یابد. حداکثر شوری محدوده مطالعاتی در مرداد به دلیل

کاهش جریان رودخانه از بالادست و افزایش بارگذاری منابع آلاینده، به‌ویژه زهاب‌های کشاورزی و پساب شهرها، اتفاق می‌افتد. در مقابل، حداقل شوری محدوده مطالعاتی در اسفند به دلیل افزایش جریان از بالادست و کاهش بارگذاری زهاب کشاورزی است.

در شکل ۹a و b، به ترتیب، شوری برای فصل تر و خشک را نشان می‌دهد. در فصل تر، به دلیل افزایش جریان ورودی از مرز بالادست (۲۸) و کاهش بارگذاری منابع آلاینده به رودخانه، نوسانات افزایش پله‌ای پروفیل طولی شوری کاهش می‌یابد، در حالی که در فصل خشک این افزایش پله‌ای قابل مشاهده است. در انتهای محدوده (ایستگاه فارسیات) متوسط ماهانه شوری به ترتیب در دو فصل تر و خشک تقریباً برابر با ۲۱۴۷/۱۲ و ۲۸۹۱/۹ میکروزیمنس بر سانتی‌متر می‌رسد.



شکل ۹. متوسط شوری ماهانه طی (a) فصل تر و (b) فصل خشک

## نرخ تغییرات شوری

برای بررسی نحوه تغییرات مکانی شوری در محدوده مطالعه، نرخ افزایش شوری  $S_p(x)$  (بر حسب درصد) با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی محاسبه شد. در شکل ۱۰ و b، نرخ افزایش متوسط شوری متأثر از بارگذاری منابع آلاینده در محدوده مطالعه برای فصل تر و خشک نشان می‌دهد که با منحنی چند جمله‌ای درجه چهارم برازش داده شده است (معادله ۶).

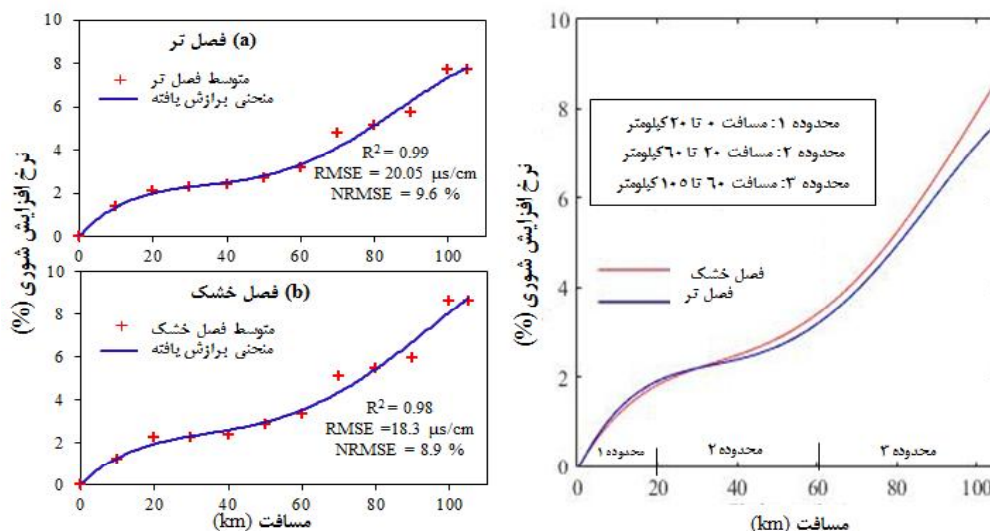
$$S_p(x) = \sum_{i=1}^4 P_i x^i \quad (6)$$

تابع  $S_p(x)$  با ضرایب  $P_i$  ( $i = 0, 1, 2, 3, 4$ ) در فصول تر و خشک برابر  $0.18, -0.1829, 0.0055, -0.0005, 7.4 \times 10^{-7}$  و  $0.18, -0.1829, 0.0055, -0.0005, 7.4 \times 10^{-7}$  و  $0.18, -0.1829, 0.0055, -0.0005, 7.4 \times 10^{-7}$  در فصل خشک برابر  $0.18, -0.1829, 0.0055, -0.0005, 7.4 \times 10^{-7}$  و  $0.18, -0.1829, 0.0055, -0.0005, 7.4 \times 10^{-7}$  با ضریب تبیین  $0.98$  مشخص شد. در تحقیق یو و همکاران (۲۰۱۴) برای بیان نرخ تغییرات شوری در دو فصل تر و خشک از منحنی چند جمله‌ای درجه چهارم استفاده شد (۳۱).

در شکل ۱۰ نرخ افزایش شوری از ابتدا تا انتهای رودخانه بین فصول تر و خشک مقایسه شده است. همان‌طور که در بخش‌های قبلی بیان شد، طی هر دو فصل، در محدوده ۱ (کیلومتر ۰ تا ۲۰) و محدوده ۳ (کیلومتر ۶۰ تا ۱۰۵)، شوری

با نرخ افزایش سریع به ترتیب با ۲ و ۵ درصد اتفاق افتاده است، در حالی که در محدوده ۲ (کیلومتر ۲۰ تا ۶۰)، نرخ افزایشی شوری آب رودخانه قبل از ورود به محدوده ۳ افزایش بسیار کمی داشته است، به طوری که در این محدوده در طول ۴۰ کیلومتر نرخ افزایشی شوری ۲ درصد است، زیرا در محدوده ۱ و ۳ منابع آلاینده بزرگی نظیر شهرهای ملاثانی و اهواز، نیروگاه ملاثانی، مجتمع‌های صنعتی، شبکه آبیاری شمال شرق اهواز و مزارع کشاورزی قرار دارد. این در حالی است که در محدوده ۲ منابع آلاینده کوچک است و اثر کمی بر شوری رودخانه دارد. همچنین، در طول ۴۰ کیلومتر فرایندهای خودپالایی رودخانه اثر بیشتری پیدا می‌کند.

مقایسه دو فصل تر و خشک نشان داد که نرخ افزایش شوری، در فصل خشک بیش از فصل تر است. اما، به دلیل میانگین‌گیری بین ماه‌های مختلف این اختلاف کاهش یافت و حداکثر در زون ۳ به ۱/۱۲ درصد است. این تغییرات در توزیع شوری، علاوه بر تغییرات جریان رودخانه، به وضعیت بارگذاری منابع آلاینده در فصول مختلف بستگی دارد، به طوری که در فصل خشک علاوه بر کاهش جریان، بارگذاری منابع آلاینده کشاورزی به شدت افزایش می‌یابد.



شکل ۱۰. درصد نرخ افزایش شوری در طول رودخانه کارون (a) فصل تر و (b) فصل خشک (c) مقایسه دو فصل تر و خشک

طی سه محدوده مجزا از طول رودخانه

## مدیریت آب و آبیاری

دوره ۶ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۵

اثر سیلاب‌ها و مدیریت منابع آلاینده بر تغییرات زمانی و مکانی شوری رودخانه کارون (ملاثنای تا فارسیات)

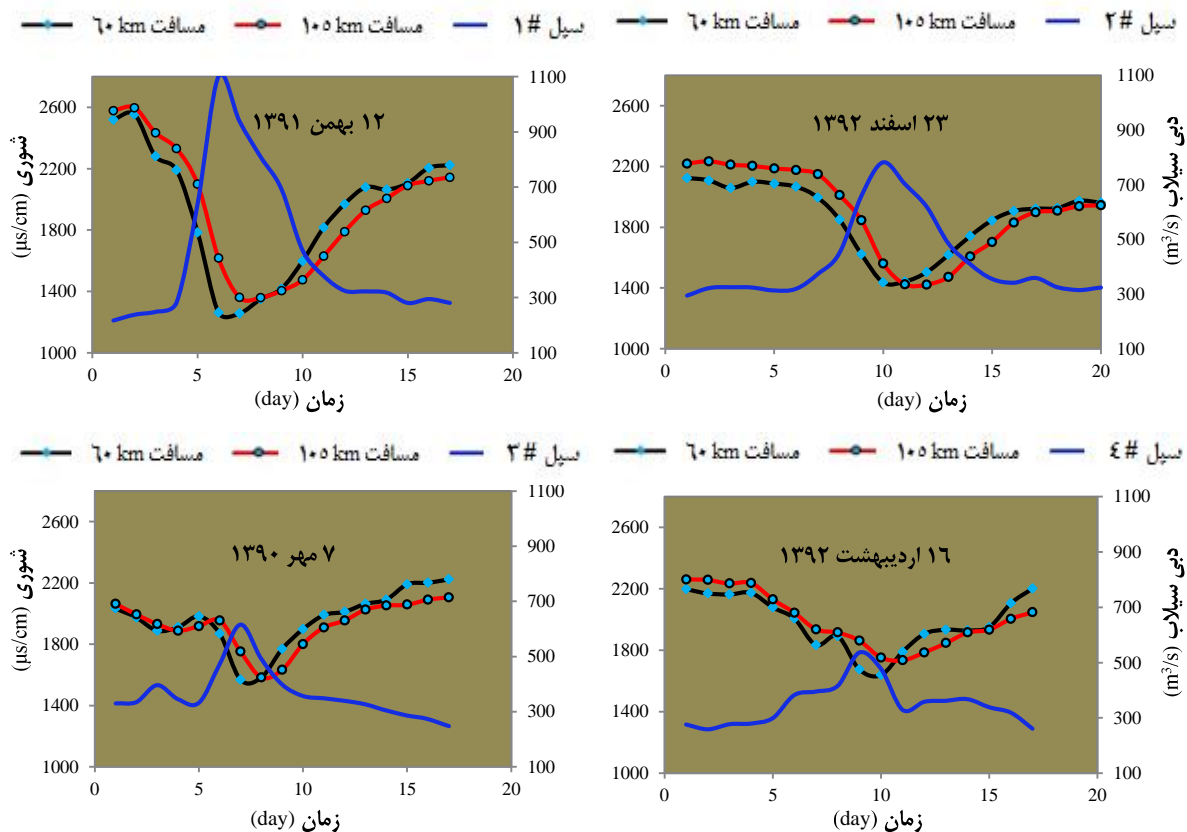
### تغییرات شوری بر اثر سیلاب رودخانه

به‌منظور بررسی اثر سیلاب‌ها بر شوری رودخانه، چهار سیلاب ایجاد شده در پنج سال اخیر رودخانه کارون انتخاب شد (جدول ۴). بر اساس نتایج شبیه‌سازی، در دو

مقطع کیلومتر ۶۰ (ایستگاه اهواز) و کیلومتر ۱۰۵ (ایستگاه فارسیات) اثر هر یک از سیلاب‌ها بر شوری رودخانه نشان داده شد (شکل ۱۱).

جدول ۴. مشخصات سیلاب‌های ورودی در مرز بالادست

سیلاب	زمان وقوع	دبی متوسط سیلاب (m <sup>3</sup> /s)	دبی پیک سیلاب (m <sup>3</sup> /s)
۱ #	۱۲ بهمن ۱۳۹۱	۴۶۰/۷۶	۱۱۰۰
۲ #	۲۳ اسفند ۱۳۹۲	۴۱۹/۷	۷۸۲
۳ #	۷ مهر ۱۳۹۰	۳۶۴/۴۷	۶۵۲
۴ #	۱۶ اردیبهشت ۱۳۹۲	۳۴۹/۰۶	۵۳۶



شکل ۱۱. تغییرات شوری تحت تأثیر سیلاب‌ها در مقاطع مختلف رودخانه

### مدیریت آب و آبیاری

دوره ۶ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۵

اتفاق افتاده است. در شکل ۱۲، اثر حذف منابع آلاینده کشاورزی، صنعتی و خانگی بر شوری رودخانه راهکاری مدیریتی در این دو ماه نشان داده شده است. حذف همه منابع آلاینده در کاهش شوری رودخانه در هر دو ماه مشابه هم عمل کرده است و در مرداد، حذف منابع آلاینده کشاورزی بیشترین تأثیر را در کاهش شوری آب رودخانه دارد، در حالی که در اسفند، در ۶۰ کیلومتر ابتدایی (ایستگاه اهواز) حذف منابع صنعتی و در ۵۰ کیلومتر انتهایی (ایستگاه فارسیات) حذف منابع شهری بیشترین تأثیر را در کاهش شوری آب رودخانه دارد، زیرا در اسفند بارگذاری آلاینده‌های کشاورزی کاهش و اثر آلاینده‌های صنعتی و شهری افزایش می‌یابد. بنابراین، برای مدیریت بهتر شوری در رودخانه باید حذف هر یک از منابع آلاینده را متناسب با مکان و زمان بارگذاری اعمال کرد (۱۱).

در جدول ۵ تفاوت شوری برای حذف منابع آلاینده نسبت به وضعیت موجود (۱۳۹۳) نشان داده شده است. اثر حذف هر یک از منابع آلاینده در مرداد، نسبت به اسفند، اثر بیشتری در کاهش شوری رودخانه دارد. در واقع، در مرداد ضمن کاهش جریان رودخانه، منابع آلاینده زیادی وارد رودخانه می‌شود و با حذف هر کدام کیفیت آب رودخانه بهبود می‌یابد. برای کاهش و مدیریت شوری رودخانه پیشنهاد می‌شود که گزینه حذف منابع آلاینده از طریق انتقال منابع آلاینده به حوضچه‌های تبخیری، انتقال به خلیج فارس و رهاسازی در مواقع پیک سیلاب در رودخانه انجام شود. با توجه به شوری ورودی به رودخانه از مرز بالادست، در محدوده مطالعه حذف منابع آلاینده در کاهش شوری رودخانه قابل توجه نیست. بنابراین، پیشنهاد می‌شود برای مدیریت کاهش بیشتر شوری در محدوده مطالعاتی راهکار مدیریتی کاهش شوری ورودی از بالادست رودخانه یا ترکیبی از این راهکارها بررسی شود.

نتایج نشان داد که افزایش دبی سیلاب‌ها منجر به کاهش شوری در رودخانه می‌شود (۲۳)، به طوری که در زمان پیک سیلاب شوری به حداقل رسید و بعد از فروکش کردن سیلاب، شوری با شیب کمی در حال افزایش است. هر سیلاب با توجه به حجم جریان تأثیر متفاوتی بر غلظت مواد آلاینده دارد، به طوری که سیلاب‌های بزرگ منجر به کاهش زیاد غلظت مواد آلاینده در رودخانه می‌شود. برای مثال، سیلاب ۱۲ بهمن ۱۳۹۱ با دبی پیک ۱۱۰۰ مترمکعب بر ثانیه باعث تغییر غلظتی ۱۴۰۰ واحدی شوری شده است. تغییر شوری در اثر سیلاب به دو دلیل توجیه‌پذیر است:

۱. حجم زیاد جریان باعث کاهش غلظت مواد محلول می‌شود.

۲. افزایش سرعت جریان در هنگام سیلاب اثر فرایندهای انتقال و انتشار را تسریع می‌بخشد.

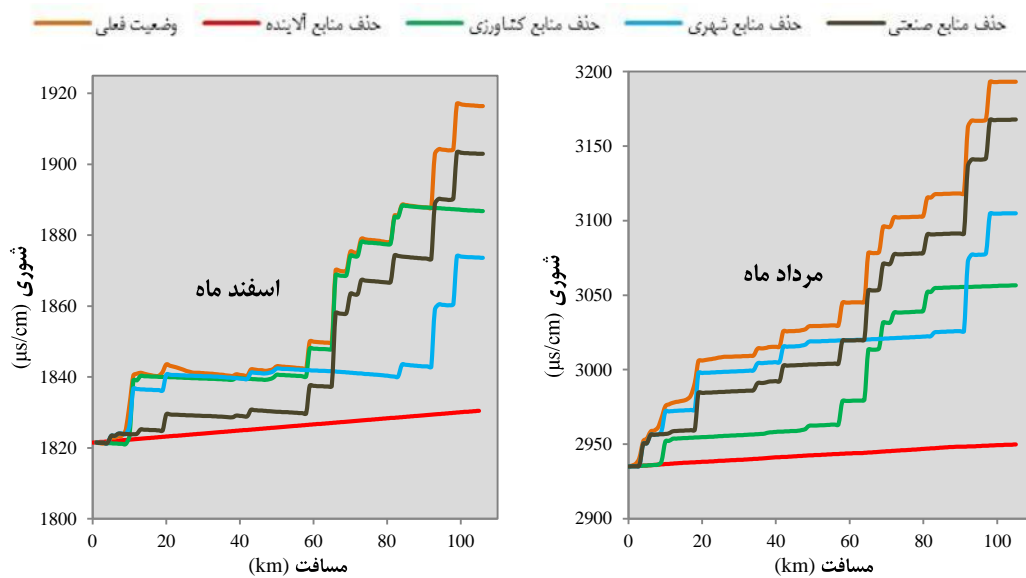
سپس، فروکش سیلاب وضعیت رودخانه به حالت قبل برگشت و منابع نقطه‌ای و شوری ورودی از شرایط مرزی بالادست موجب تغلیظ شوری در رودخانه شد. بنابراین، با آگاهی از شرایط و نحوه اثر سیلاب‌ها بر شوری رودخانه، می‌توان در مواقع پیک سیلاب، بارگذاری منابع آلاینده در طول رودخانه را مدیریت کرد. افزایش جریان و کاهش اثر منابع آلاینده نقطه‌ای در مواقع سیلابی، فرصت مناسبی برای رهاسازی بیشتر این منابع را فراهم می‌سازد. همچنین، از آنجا که در مواقع سیلابی بهره‌برداری از رودخانه برای شرب و کشاورزی در بازه‌ای زمانی متوقف می‌شود، بنابراین در افزایش بارگذاری منابع آلاینده و شوری رودخانه محدودیتی ایجاد نمی‌شود.

### اثر حذف منابع آلاینده

با توجه به بخش پروفیل طولی تغییرات شوری، حداکثر و حداقل شوری متوسط ماهانه به ترتیب در مرداد و اسفند



اثر سیلاب‌ها و مدیریت منابع آلاینده بر تغییرات زمانی و مکانی شوری رودخانه کارون (ملاثنانی تا فارسیات)



شکل ۱۲. تغییرات شوری تحت اثر حذف منابع آلاینده در مقاطع مختلف رودخانه

جدول ۵. تفاوت شوری اثر حذف منابع آلاینده نسبت به وضعیت فعلی

تفاوت شوری اثر حذف با وضعیت موجود				حذف منابع آلاینده
(µs/cm)				
ایستگاه فارسیات		ایستگاه اهواز		
اسفند	مرداد	اسفند	مرداد	
-	-	-	-	وضعیت موجود
۱۰۱/۸	۲۴۳/۵	۳۱/۶	۱۰۱/۴۴	حذف همه منابع آلاینده
۲۹/۵	۱۳۶/۷	۲	۶۶	حذف منابع کشاورزی
۴۲/۷	۸۸/۳	۷	۲۵/۵۱	حذف منابع شهری
۱۳/۵	۲۵/۵	۱۲/۳	۲۵/۳	حذف منابع صنعتی

### نتیجه‌گیری

شوری است. در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی، با مقایسه نتایج مدل با مقادیر مشاهداتی، رابطه کاشفی پور-فالكونر تخمین دقیق‌تری از ضریب پراکندگی می‌دهد. نتایج عددی نشان داد که بر اثر بارگذاری منابع آلاینده، پروفیل طولی شوری به صورت پله‌ای افزایش یافته است و حداکثر و حداقل تغییرات شوری بر اثر ورود منابع آلاینده نقطه‌ای به ترتیب در مرداد و اسفند است. برای توصیف نرخ

این تحقیق مطالعه عددی جامعی برای بررسی تغییرات زمانی و مکانی شوری در رودخانه کارون (ملاثنانی تا فارسیات) در وضعیت موجود است. در این تحقیق از مدل یک‌بعدی MIKE11 برای شبیه‌سازی هیدرودینامیکی جریان و شوری استفاده شد. مقایسه نتایج مدل با مقادیر مشاهداتی، حاکی از دقت بالای مدل در شبیه‌سازی پارامتر

### مدیریت آب و آبیاری

دوره ۶ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۵

۲. حسینیان س. حسونی زاده ه و حسینی زارع ن. (۱۳۹۱) بررسی میزان شوری رودخانه کارون ناشی از ورود پساب‌های کشاورزی و صنعتی در استان خوزستان در چند سال اخیر. مجموعه مقالات نهمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران.

۳. ناصری ملکی م. و کاشفی پور س.م. (۱۳۹۲) شبیه‌سازی هیدرودینامیک جریان و پارامترهای کیفی در سیستم رودخانه کرخه با استفاده از مدل FASTER. پژوهش آب ایران، ۷(۱۳): ۱۲۱-۱۲۹.

۴. محمدی س. و کاشفی پور س.م. (۱۳۹۱) مدلسازی عددی جریان به کمک ضریب زبری دینامیک (مطالعه موردی: رودخانه کارون). مهندسی آب و آبیاری، ۳(۹): ۹۹-۱۱۰.

5. Afkhami M. (2003) Environmental effects of salinity in the Karun Dez basin, IRAN. Proceeding 7<sup>th</sup> International Water Technology Conference, Egypt.
6. Afkhami M. Shariat M. Jaafarzadeh N. Ghadiri H. and Nabizadeh R. (2007) Developing a water quality management model for Karun and Dez rivers. Environmental Health Science and Engineering, 4(2): 99-106.
7. Delphi M. (2012) Application of characteristics method for flood routing (Case study: Karun River). Geology and Mining Research, 4(1): 8-12.
8. Deng Z.Q. Singh V.P. and Bengtsson L. (2001) Longitudinal dispersion coefficient in straight rivers. Hydraulic Engineering, 127(11): 919-927.
9. DHI Water and Environment (2007) MIKE11, a modeling system for rivers and channels. Reference Manual, 516p.
10. FAO (Food and Agricultural Organization of the United Nations) (1976) Water quality for agriculture, FAO, Rome. 510 p.

تغییرات شوری در فصول تر و خشک، معادله مرتبه چهارمی با  $R^2$  به ترتیب ۰/۹۹ و ۱۰/۹۸ ارائه شد. علاوه بر این، مشاهدات نشان داد که با حرکت به سمت انتهای محدوده نرخ تغییرات شوری در فصل خشک بیش از فصل تر است.

نتایج بررسی اثر سیلاب‌ها بر شوری رودخانه نشان داد که افزایش دبی سیلاب منجر به کاهش قابل ملاحظه شوری رودخانه می‌شود و بعد از فروکش کردن سیلاب، شوری رودخانه دوباره متأثر از شوری ورودی بالادست است و منابع آلاینده با شیب کم افزایش می‌یابد. نتایج بررسی اثر حذف منابع آلاینده نشان داد، برای مدیریت بهتر شوری در رودخانه باید حذف هر یک از منابع آلاینده را متناسب با مکان و زمان بارگذاری اعمال کرد، به طوری که حذف منابع آلاینده کشاورزی در فصول خشک و حذف منابع صنعتی و شهری در فصول تر به ترتیب برای بالادست و پایین دست شهر اهواز بهتر از بقیه گزینه‌هاست. هر چند که با حذف منابع آلاینده، شوری رودخانه کاهش می‌یابد، به دلیل شوری زیاد ورودی از مرز بالادست این کاهش قابل توجه نیست و برای کاهش زیاد پیشنهاد می‌شود اثر راهکارهای مدیریتی کاهش و مدیریت شوری از مرز بالادست نیز بررسی شود. از نتایج این تحقیق می‌توان در راستای کاهش شوری رودخانه هنگام وقوع سیلاب‌ها و تغییرات فصلی جریان، برای مدیریت نحوه رهاسازی منابع آلاینده در شرایط زمانی و مکانی مختلف به رودخانه استفاده کرد.

#### منابع

۱. دهانزاده ب. و ظهیری ع. (۱۳۹۴) برآورد ظرفیت انتقال رسوب رودخانه‌ها با استفاده از مدل ریاضی شبه دویبعدی. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۲(۲): ۱۴۳-۱۵۸.

11. Farber E. Vengosh A. Gavrieli I. Marie A. Bullen T. Mayer B. Holtzman R. Segal M. and Shavit U. (2005) Management scenarios for the Jordan River salinity crisis. *Applied Geochemistry*, 20: 2138-2153.
12. Fischer H.B. List E.J. Koh R.C.Y. Imberger J. and Brooks N.H. (1979) *Mixing in Inland and Coastal Waters*. Academic Press, New York, 483 p.
13. Ghadiri H. (2016) Salinization of Karun River in Iran by shallow groundwater and seawater encroachment. *Advances in Hydro-Science and -Engineering*, (4): 1-9.
14. Hughes M.G. Harris P.T. and Hubble T.C.T. (1998) Dynamics of the turbidity maximum zone in a micro-tidal estuary: Hawkesbury River, Australia. *Sedimentology*, 45: 397-410.
15. Kanda E. Kosgei J. and Kipkorir E. (2015). Simulation of organic carbon loading using MIKE 11 model: a case of River Nzoia, Kenya. *Water Practice and Technology*, 10 (2): 298-304.
16. Karamouz M. Mahjouri N. and Kerachian R. (2004) River water quality zoning: A case study of Karoon and Dez River system. *Environmental Health Science and Engineering*, 1(2): 16-27.
17. Kashefipour S.M. and Falconer R.A. (2002) Longitudinal dispersion coefficient in natural channels. *Water Research*, 36: 1596-1608.
18. Kashefipour S.M. and Zahiri J. (2010) Comparison of empirical equations application in the Advection-Dispersion Equation (ADE) on sediment transport modeling. *World Applied Sciences*, 11(8): 1015-1024.
19. Kerachian R. and Karamouz M. 2005. Wast-load allocation model for seasonal river water quality management: Application of sequential dynamics genetic algorithm. *Journal of Scintica Iranica*, 12(2): 117-130.
20. KWPA (2000) An assessment of pollutants in Karun River: A report prepared by the Water Quality Assessment section. 1<sup>th</sup> Ed. Khuzestan Water and Power Authority, Iran, 346 p.
21. Lemckert C.J. Cambell P.G. and Jenkins G.A. (2011) Turbulence in the bottom boundary layer of Moreton Bay, Queensland, Australia. *Coast Research*, 64: 1091-1094.
22. Naddafi K. Honari H. and Ahmadi M. (2007) Water quality trend analysis for the Karoon River in Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 134: 305-312.
23. Peck A.J. and Hatton T. (2003) Salinity and the discharge of salts from catchments in Australia. *Hydrology*, 272(1-4): 191-202.
24. Prairie J.R. Rajagopalan B. Fulp T.J. and Zagona E.A. (2005) Statistical nonparametric model for natural salt estimation. *Environmental Engineering*, 131(1): 130-138.
25. Quinn N.W.T. (2011) 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: 930-940.
26. Laxmi R. Arya S. Sultana A. and Sanjay D. (2015) Assessment and impact of industrial effluents on river Yamuna ecosystem. *Current Research*, 7(9): 19956-19963.
27. Seo I.W. and Cheong T.S. (1998) Predicting longitudinal dispersion coefficient in natural streams. *Hydraulic Engineering*, 124: 25-32.
28. Shetye S.R. and Murty C.S. (1987) Seasonal variation of the salinity in the Zuari estuary, Goa, India. *Earth and Planetary Sciences*, 96 (3): 249-257.
29. Tri D.Q. Don N.C. Ching C.Y. and Mishra P.K. (2014) Modeling the influence of river flow and Salinity intrusion in the Mekong River Estuary,

- Vietnam. International Association of Lowland Technology (IALT), 16(1): 14-25.
30. WHO (World Health Organization) (2004) Guidelines for drinking water quality: surveillance and control of community supplies. 3th Ed. World Health Organization, Geneva, 515 p.
31. Yu Y. Zhang H. and Lemckert C. (2014). Salinity and turbidity distributions in the Brisbane River estuary, Australia. Hydrology, 519: 3338-3352.