



مدیریت آب و آبیاری

دوره ۳ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۲

صفحه‌های ۲۷-۱۳

بررسی مکانی و زمانی نفوذ شوری در رودخانه جزرومدی با استفاده از مدل COHERENS: مورد مطالعاتی رودخانه بهمنشیر

سید پویان پیرنیا*^۱، جمال محمد ولی سامانی^۲، محمدجواد منعم^۳

۱. کارشناس ارشد مهندسی سازه‌های آبی، گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران- ایران

۲. استاد گروه مهندسی سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران- ایران

۳. استادیار گروه مهندسی سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران- ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۲/۲۱

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۱/۳/۲۷

چکیده

بررسی تغییرات زمانی و مکانی شوری رودخانه‌های جزرومدی در شرایطی که سد کنترل‌کننده در انتهای رودخانه نباشد، به‌منظور تأمین آب موردنیاز کشاورزی حائز اهمیت است. در تحقیق حاضر از مدل COHERENS به‌عنوان ابزاری برای بررسی وضعیت هیدرولیکی جریان و نحوه انتشار و انتقال شوری در رودخانه بهمنشیر استفاده شد. COHERENS نوعی مدل عددی سه‌بعدی چندمنظوره است. در این نرم‌افزار، مدل هیدرودینامیکی با مدل‌های بیولوژیکی، تعلیق مجدد و آلاینده ترکیب شده است. واسنجی و صحت‌سنجی مدل عددی با مشاهدات تراز سطح آب در دو دوره کم‌آبی و پرآبی در سال‌های ۱۳۸۱ و ۱۳۸۲ و اندازه‌گیرهای شوری در یک جزرومد بلند (spring) در سال ۱۳۸۲ انجام گرفت. سه سناریو در شرایط مختلف جریان رودخانه و باد برای مدل تنظیم شد. نتایج مدل افزایش نفوذ شوری به بالادست رودخانه در سناریو دبی کم و وزش باد در خلاف جهت مسیر رودخانه را نشان داد. از طرفی، نتایج طبقه‌بندی شوری در شرایط مختلف نیروهای محیطی تقریباً در نقاط مختلف رودخانه یکسان بود و در همه موارد، اختلاط کامل شوری وجود داشت. در ادامه با استفاده از سری زمانی جابه‌جایی جبهه‌های شوری، الگوی مکانی و زمانی نفوذ شوری بررسی و بهترین محدوده‌های مکانی و زمانی برای برداشت آب از رودخانه ارزیابی شد. نتایج نشان داد که اعمال شرایط بهینه مرکب از دبی آب شیرین رودخانه و برداشت متناوب آب، راه حلی مناسب برای دریافت آب باکیفیت برای کشاورزی خواهد بود.

کلیدواژه‌ها: باد، دبی، جزرومد، نفوذ شوری.

مقدمه

جزرومد رودخانه‌ای ناشی از نیروی جاذبه نیست، بلکه پدیده جزرومد در اقیانوس‌ها و دریاها، سبب جریان جزرومدی به سمت رودخانه می‌شود. هنگام وقوع مد در اقیانوس، توده عظیمی از آب به دلیل بالا رفتن سطح آب، وارد رودخانه می‌شود و به سمت بالادست حرکت می‌کند (۱). دبی رودخانه به همراه متغیرهای مناسب، معرف شکل مصب و نیروی جزرومدی، عامل کلیدی در تعیین نفوذ شوری در مصب‌های آبرفتی است (۹). این پدیده در بسیاری از مصب‌ها با استفاده از یک مدل تحلیلیگر نشان داده شده است (۱۰، ۱۲-۱۵). در سال ۱۳۸۵ یک مدل تحلیلیگر پیش‌بینی‌کننده نفوذ شوری برای دلتای مکونگ در ویتنام توسعه داده شد که در صورت معلوم بودن توپوگرافی، جزرومد و دبی رودخانه، می‌تواند توزیع شوری در شاخه‌های دلتای مکونگ را پیش‌بینی کند. این مدل در صورت معلوم بودن توزیع شوری در دلتای مکونگ، توانایی تخمین دبی رودخانه را نیز دارد (۹). در مصب، آب شیرین رودخانه با آب شور دریا اختلاط پیدا می‌کند. در صورتی که دبی رودخانه در مقابل دبی ناشی از جزرومد بسیار کوچک باشد، مقدار شوری نفوذ کرده به رودخانه، تابعی از فاصله دهانه رودخانه است و به عمق بستگی ندارد (۹، ۱۶). گردش جریان در مصب بیشتر تحت تأثیر عواملی مانند گردش زمین، توپوگرافی محلی، جریان رودخانه، نفوذ شوری، جزرومد و نیروی باد است. برای بررسی نحوه انتقال جریان و شوری در مصب و رودخانه‌های جزرومدی دارای ژئومتری پیچیده، اغلب یک مدل سه‌بعدی مورد نیاز است (۱۷). هم‌اکنون از تعداد زیادی مدل عددی برای شبیه‌سازی هیدرودینامیک جریانات و غلظت آلودگی در دریا استفاده می‌شود. آلن

بلومبرگ مدل عددی POM^۱ را در سال ۱۳۷۶ ارائه داد و به دنبال استفاده‌های وسیع کاربرانی با نیازهای متفاوت، نسخه‌های دیگری از مدل مانند مدل اقیانوس ساحلی و دهانه‌ای، مدل اقیانوس ساحلی نیروی دریایی و مدل اقیانوس ساحلی حجم محدود تهیه شد (۲). مدل‌هایی مانند MIKE21 و EFDC^۲ و COHERENS^۳ از پرکاربردترین مدل‌های شبیه‌ساز هیدرودینامیک هستند. تحقیقات بسیاری با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی‌کننده مذکور انجام گرفته است. تحقیق انجام گرفته در مصب رودخانه اوجیانگ بر پایه مدل EFDC نشان داد که نتایج مدل در دو فاز جزرومد بزرگ و کوچک با داده‌های مشاهده شده مطابقت دارد. در این تحقیق، تغییرات جریان، نفوذ شوری و طبقه‌بندی قائم شوری در شرایط مختلف جریان رودخانه و باد در مصب رودخانه اوجیانگ بررسی شد. مدل برای حل سه‌بعدی معادلات تلاطم حرکت برای یک سیال با جرم مخصوص متغیر با فرض هیدرواستاتیک قائم بود (۱۸).

از جمله تحقیقات انجام گرفته در ایران، ابداع مدلی بر اساس روش حجم کنترل برای بررسی دوبعدی سیال غیر لزج و استفاده از مدل COHERENS برای شبیه‌سازی جریان در خلیج فارس است. این پژوهش بر مکان‌های تشکیل آب‌های با دانسیته زیاد که از تنگه هرمز تخلیه می‌شود، عوامل کنترل‌کننده متغیرهای فصلی چرخه تبادل در تنگه هرمز، بررسی فرایندهای مسبب شورتر شدن خلیج فارس در زمستان نسبت به تابستان و تعیین الگوی چرخه و جرم آب در پاییز تمرکز کرد. بین محاسبات و مشاهدات توافق خوبی وجود داشت که نشان می‌داد نتایج مدل نه تنها روندهای فصلی را دنبال می‌کند، بلکه با اندازه‌گیری‌های دقیق دما و شوری همبستگی زیادی دارد (۱۹). در تحقیقی

1. POM (Princeton Ocean Model)
2. EFDC (Environmental Fluid Dynamics Code)
3. COHERENS (A Coupled Hydrodynamical-Ecological Model for Regional and Shelf Seas)

مدیریت آب و آبیاری

مبانی و روش‌ها

مدل هیدرودینامیک COHERENS

مدل عددی کوهرنس، نوعی مدل سه‌بعدی هیدرودینامیکی-اکولوژیکی است که با حمایت اتحادیه اروپا در دانشگاه نیپیر^۱ در سال ۱۳۷۷ توسعه داده شد. مدل در محیط فرترن ۷۷ نوشته شده و دسترسی به کد آن امکان‌پذیر است. این مدل که از دو تقریب بوزینسک و فرض فشار هیدرواستاتیک در حل معادلات جریان استفاده می‌کند، توانایی حل معادلات حاکم بر جریان شامل معادلات پیوستگی، مومنت‌های افقی، معادله انتقال-انتشار (شوری و درجه حرارت و رسوب و پارامترهای آشفتگی و...) را در دو دستگاه مختصات کارترزین و کروی داراست. این مدل در راستای قائم از سیستم مختصات σ -coordinate استفاده می‌کند. در این مدل امکان استفاده از روش‌های عددی مختلف Upwind, Lax-wandrof, TVD برای مقطع‌سازی ترم‌های انتقال و همچنین امکان استفاده از مدل‌های آشفتگی مختلف مانند Mellor-Yamada 2.5 و K- ϵ برای کاربر وجود دارد. فرایندهای افقی با مقیاس ثانویه^۲ که با استفاده از مدل حل مجدد نمی‌شوند براساس ضرایب پخشیدگی افقی (رابطه ۱) فرمول‌بندی می‌شوند. دو حالت برای ضرایب پخشیدگی افقی در برنامه در نظر گرفته شده است. در حالت اول λ_H و ν_H در زمان و مکان یکنواخت هستند. در حالت دوم، این ضرایب متناسب با فاصله‌بندی شبکه در جهت افق و مقدار تغییر شکل تنسور سرعت جابه‌جا می‌شوند.

$$\lambda_H = C_s \Delta_{x1} \Delta_{x2} D_T \quad \text{و} \quad \nu_H = C_m \Delta_{x1} \Delta_{x2} D_T \quad [1]$$

که در این رابطه:

$$D_T^* = \left(\frac{\partial u}{\partial x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x_2} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial x_2} + \frac{\partial v}{\partial x_1} \right)^2 \quad [2]$$

دیگر، از مدل COHERENS به‌عنوان مدلی با مبنای ریاضی که قادر است نرخ انتقال رسوبات چسبنده و تغییر شکل بستر رسوبی را محاسبه کند استفاده شد. به این منظور فرایندهای متعددی نظیر لخته‌شدگی، ترسیب و فرسایش رسوبات چسبنده به مدل اضافه شده و از نسخه ارتقایافته مدل COHERENS استفاده شد. سپس نتایج شبیه‌سازی فرایندهای انتقال رسوبات چسبنده توسط مدل توسعه‌یافته در یک مصب فرضی با نتایج مدل MT مدل تجاری MIKE3 مقایسه شد. مقایسه دو مدل نشان می‌دهد که نتایج در مورد نوسان سطح آب، در هر دو مشابه است، اما مقادیر سرعت دو مدل تفاوت‌هایی دارد که آن را می‌توان به تفاوت الگوریتم و روش حل عددی دو مدل نسبت داد. در خصوص پارامترهای مؤثر بر انتقال رسوبات چسبنده، پاسخ‌های به‌نسبت مشابهی از نتایج شبیه‌سازی شده اخذ شد که می‌توان آن را دلیلی بر صحت ارتقای انجام‌گرفته در مدل COHERENS دانست (۳). همچنین در تحقیق دیگری مدل عددی COHERENS برای شبیه‌سازی جریان در تنگه خوران به‌کار گرفته شد. نتایج مدل‌سازی با داده‌های اندازه‌گیری شده، چه به‌لحاظ نوسانات جزرومدی سطح آب و چه به‌لحاظ جریانات دریایی هماهنگی خوبی را نشان داد و مدل توانست به‌خوبی میدان جریانات دریایی تحت اثر جزرومد را شبیه‌سازی کند (۲).

هدف این پژوهش، تعیین الگوی مکانی و زمانی جابه‌جایی جبهه‌های شوری تحت بده‌های متداول طی ماه‌های پرآبی و کم‌آبی در رودخانه بهمنشیر و نیز ارزیابی عملکرد مدل در تخمین نفوذ شوری در شرایط مختلف تحمیلی از طرف محیط بود. به این منظور از مدل هیدرودینامیک COHERENS که نوعی مدل سه‌بعدی با فرض حاکم بودن توزیع فشار هیدرواستاتیک در عمق است، استفاده شد.

1. Napier
2. Sub-grid

است. در این مدل برای حل معادلات حاکم از روش Mode-Splitting استفاده شد. معادلات مومتم^۱ و پیوستگی متوسط‌گیری شده در عمق برای حالت خارجی یا بارتروپیک^۲ با یک گام زمانی (Δt_{TD}) و معادلات مومتم سه‌بعدی و انتقال اسکالر برای حالت داخلی یا باروکلینیک^۳ با یک گام زمانی بزرگ‌تر (Δt_{TD}) حل می‌شود. در این روش، ابتدا یک تخمین اولیه از جریانات افقی (u^p, v^p) با استفاده از حل معادلات سه‌بعدی حرکت و با گام زمانی Δt_{TD} به دست می‌آید. سپس با حل بارتروپیک معادلات (حل معادلات متوسط‌گیری شده در عمق پیوستگی و مومتم‌های افقی است) با گام زمانی Δt_{TD} مقادیر نوسانات سطح آب \bar{u} و جریانات افقی متوسط‌گیری شده در عمق (\bar{U}, \bar{V}) محاسبه می‌شود. در مرحله بعد جریانات افقی (u^p, v^p) با توجه به نتایج حاصل از بخش بارتروپیک اصلاح می‌شود. این اصلاح به نحوی انجام می‌گیرد که متوسط زمانی جریانات افقی متوسط‌گیری شده در عمق (\bar{U}, \bar{V}) در طول گام زمانی Δt_{TD} با مقادیر متوسط‌گیری شده در عمق جریانات افقی (u^p, v^p) برابر باشد. گام زمانی دوبعدی (Δt_{TD}) باید به اندازه کافی کوچک باشد تا معیار پایداری CFL^۴ امواج ثقلی سطحی را ارضا کند. گام زمانی سه‌بعدی (Δt_{TD}) نیز مضربی از گام زمانی دوبعدی است (معمولاً از مرتبه ۱۰-۲۰). از آنالیز پایداری موج ثقلی سطحی معیارهای ۷ و ۸ حاصل می‌شود:

$$(\Delta t_{TD}) \leq \min \left(\frac{1}{f}, \frac{\Delta h_{\min}}{2\sqrt{gh_{\max}}} \right) \quad [7]$$

1. Depth-integrated momentum
2. Barotropic
3. Baroclinic
4. Courant-Friedrichs-Levy

فاصله‌بندی شبکه در صفحه افقی، C_m و C_s ضرایب عددی هستند که به شکل پیش فرض، برنامه مقدار ۰/۱ را به آن اختصاص می‌دهد. شرایط سطح برای جریانات افقی معمولاً با تعریف تنش سطح به‌عنوان تابعی از مؤلفه‌های باد، تعیین می‌شود (رابطه ۳).

[۳]

$$\rho \cdot \frac{v_T}{J} \left(\frac{\partial u}{\partial \hat{x}_s}, \frac{\partial v}{\partial \hat{x}_s} \right) = (\tau_{sv}, \tau_{st}) = \rho \cdot C_D^s \left(U_{1,0}^2, V_{1,0}^2 \right)^{1/2} (U_{1,0}, V_{1,0})$$

که در آن $(U_{1,0}, V_{1,0})$ مؤلفه‌های بردار باد در ارتفاع مرجع (۱۰ متری از سطح زمین)، C_D^s ضریب دراگ سطح، v_T ضریب ادی، J فاصله قائم شبکه در مرکز سلول و ρ جرم مخصوص هوا برابر $1/2 \left(\frac{kg}{m^3} \right)$ است. برای جریانات افقی در کف، شرایط مرزی لغزشی اعمال می‌شود که مقدار آن از رابطه ۴ محاسبه می‌شود.

$$\rho \cdot \frac{v_T}{J} \left(\frac{\partial u}{\partial \hat{x}_s}, \frac{\partial v}{\partial \hat{x}_s} \right) = (\tau_{bs}, \tau_{bt}) \quad [4]$$

برای رابطه بالا، تنش در مدل با استفاده از رابطه ۵ محاسبه می‌شود (قانون اصطکاک درجه دو).

$$(\tau_{bs}, \tau_{bt}) = \rho \cdot C_D^b \left(U_{b,0}^2, V_{b,0}^2 \right)^{1/2} (u_{b,0}, v_{b,0}) \quad [5]$$

مؤلفه‌های سرعت در کف $(u_{b,0}, v_{b,0})$ در نزدیک‌ترین سلول شبکه به کف محاسبه می‌شوند. یک مقدار ثابت برای ضریب اصطکاک خطی در نظر گرفته می‌شود. در تقریب لایه مرزی، تنش برشی که در امتداد قائم یکنواخت است، یک پروفایل لگاریتمی برای جریان به دست می‌دهد. ضریب اصطکاک درجه دو به شکل تابعی از طول زبری z و فاصله‌بندی شبکه در جهت قائم بیان می‌شود.

$$C_D^b = \left(k / \ln(z_T/z) \right)^2 \quad [6]$$

که z_T یک ارتفاع مرجع در مرکز شبکه سلول کف

مدیریت آب و آبیاری

$$R^2 = \left(\frac{\sum (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum (O_i - \bar{O})^2 \sum (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2 \quad [10]$$

در این روابط، P_i داده پیش‌بینی شده از مدل، O_i داده مشاهداتی، \bar{O} متوسط داده‌های مشاهداتی، \bar{P} متوسط داده‌های پیش‌بینی شده از مدل و n تعداد داده‌هاست.

منطقه تحقیق

رودخانه بهمنشیر به طول تقریبی ۸۰ کیلومتر در انتهای جلگه خوزستان، در شمال غرب خلیج فارس واقع شده است. ارتفاع متوسط دشت سیلابی که بهمنشیر بر روی آن جریان دارد، حدود ۲/۵ متر نسبت به متوسط سطح دریاست و شیب اراضی، بسیار کم و در حدود ۰/۰۰۰۰۲ تا ۰/۰۰۰۰۳ به طرف خلیج فارس است. شهرهای آبادان و خرمشهر بزرگ‌ترین پایگاه‌های جمعیتی مجاور رودخانه هستند. این رودخانه تنها منبع تأمین آب جزیره آبادان و خرمشهر محسوب می‌شود. کاهش آب کارون و اروندرود به دلیل ساخت سدهای مخزنی در ایران، ترکیه و سوریه، سبب افزایش شوری رودخانه‌های بهمنشیر و اروندرود کاهش کیفیت آب برای مصارف کشاورزی و شهری شده است. اروندرود به موازات بهمنشیر قرار دارد و از طریق سه‌راه حفار به بالادست بهمنشیر متصل است. به دلیل عرض بیشتر هنگام مد دریا، شوری سرعت نفوذ شوری در آن بیشتر است. این وضعیت، بالادست بهمنشیر را تحت تأثیر قرار می‌داد. پس از ساخت سد سلولزی در بالادست بهمنشیر این راه ارتباطی قطع شده است و بهمنشیر تنها تحت تأثیر مد از مرز دریا قرار دارد. موقعیت جغرافیایی شهرهای اطراف، مرزهای رودخانه و ایستگاه‌های آب‌سنجی در شکل ۱ و جدول ۱ ارائه شده است (۸).

$$(\Delta t_{rD}) \leq \min \left(\frac{\lambda}{f}, \frac{\Delta h_{\min}}{\sqrt{g' h_{\max}}} \right) \quad [A]$$

که در آن Δh_{\min} حداقل فاصله شبکه افقی، $g' = g \frac{\Delta \rho}{\rho}$ شتاب ثقل کاهش یافته، h_{\max} حداکثر عمق آب و $\Delta \rho$ اختلاف دانسیته قائم است. چون $g' \ll g$ است، معیار مربوط به گام زمانی Δt_{rD} کمتر تعیین کننده است. پس از اصلاح جریان‌ات افقی، با استفاده از حل معادلات پیوستگی برای هر سلول مقادیر سرعت قائم w محاسبه خواهد شد. جزئیات بیشتر درباره این مدل در مرجع ۱۵ آمده است. به مدل تراز سطح جزرومدی در مرز باز دریا، دبی‌های رودخانه، تنش سطحی به عنوان تابعی از سرعت باد، دمای هوا، رطوبت نسبی و زبری بستر اعمال می‌شود. خروجی‌های مدل شامل سرعت جریان در راستای طول رودخانه (u)، سرعت جریان در راستای عرض رودخانه (v)، سرعت جریان در راستای قائم (w)، ارتفاع سطح آب (z) و غلظت شوری (s) است. برای بررسی بهتر دقت نتایج مدل‌سازی با معیارهای مختلف، از پارامترهای آماری متوسط خطای نسبی میانگین^۱ (رابطه ۹) و ضریب همبستگی^۲ (رابطه ۱۰) برای مقایسه استفاده شده است. مقدار بهینه شاخص ARE برابر صفر بوده و نشان‌دهنده انطباق مقادیر شبیه‌سازی بر مقادیر مشاهداتی است. ضریب R^2 معرف پراکندگی متغیر به صورت مطلق بوده و بدون واحد است.

$$ARE = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i - O_i}{O_i} \right)}{n} \quad [9]$$

1. ARE

2. R^2



شکل ۱. موقعیت مکانی شهرهای مجاور، مرزهای رودخانه و ایستگاه‌های آب‌سنجی در مسیر رودخانه بهمنشیر

جدول ۱. موقعیت مکانی ایستگاه‌های آب‌سنجی

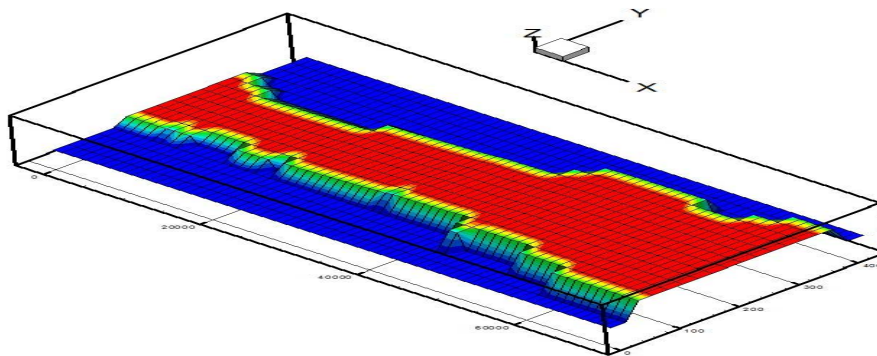
نام ایستگاه	موقعیت
کانال مارد	کیلومتر ۲/۲ از سه‌شاخه حفار
طره بخاخ	کیلومتر ۲۷ از سه‌شاخه حفار
قفاس	کیلومتر ۵۸ از سه‌شاخه حفار
چوئیده	کیلومتر ۶۰ از سه‌شاخه حفار
دهانه	کیلومتر ۷۳ از سه‌شاخه حفار

شبکه‌بندی دامنه محاسباتی

ایجاد سلول‌های شبکه همراه با داده‌های عمق‌سنجی قابل اعتماد، نقش مهمی در دریافت جواب‌های مناسب از مدل دارد. در این تحقیق از شبکه مستطیل شکل استفاده شد. داده‌های عمق‌سنجی ۷۱ مقطع در طول رودخانه به کار برده شد. هدف ابتدایی این تحقیق ایجاد شبکه از روی نقشه موضوعی منطقه^۱ با ابعاد سلولی ۲۵ متر بود. در این حالت تعداد سلول از مقدار مجاز مدل تجاوز می‌کرد. عرض رودخانه عامل محدودکننده‌ای بود که اجازه افزایش ابعاد سلول‌های شبکه را نمی‌داد و از طرفی سرعت اجرای برنامه در حالت کاهش ابعاد سلول شبکه به شدت افزایش

پیدا می‌کرد. در نهایت از یک شبکه مستقیم‌الخط با ابعاد سلولی متفاوت در راستای طول و عرض استفاده شد تا هم نقاط بستر رودخانه به خوبی در مدل دیده شود و هم از تمامی مقاطع عرضی رودخانه جهت افزایش دقت نتایج استفاده شود. شبکه‌بندی با سلول‌هایی با ابعاد طولی ۱۰۰۰ متر و عرضی ۲۵ متر در مقایسه با سایر گزینه‌ها توانست تا حدود زیادی نیازمندی‌های دقت و سرعت اجرای برنامه را برآورده کند (شکل ۲). با توجه به این موضوع، محدوده مورد مطالعه که از جنوب به خلیج فارس، از شمال به رودخانه حفار و شهر خرمشهر و از شرق و غرب به سواحل رودخانه محدود می‌شد توسط شبکه‌ای با ۷۱ سلول در راستای طول جغرافیایی و ۲۰ سلول در راستای طول جغرافیایی شبکه‌بندی شد.

1. Theme



شکل ۲. نمونه‌ای از شبکه با ابعاد سلول ۱۰۰۰ متر × ۲۵ متر

واسنجی و صحت‌سنجی مدل

به‌منظور تعیین ضرایب هیدرودینامیک مدل از اندازه‌گیری‌های انجام‌گرفته در ایستگاه‌های مختلف رودخانه بهمنشیر از کیلومتر ۲/۲ تا ۷۳ نسبت به سه‌شاخه بهمنشیر- حفار- کارون استفاده شد. بنا بر نتایج مدل‌سازی مهندسین مشاور مه‌اب-سونکو (در طرح آبیاری جزیره آبادان) بر اساس مدل هارلمن، دبی پایه برای کنترل شوری در حد کمتر از ۱۵۰۰ ppm که حد مجاز شوری برای آبیاری نخلیات است، ۳۰ متر مکعب بر ثانیه تعیین شد. همچنین نتایج شبیه‌سازی مهندسین مشاور سازه‌پردازی با استفاده از مدل Salt در طرح لایروبی بهمنشیر، مقدار یادشده را تأیید کرد و این مقدار، مبنای طراحی ایستگاه پمپاژ وارد که منبع تأمین آب رودخانه بهمنشیر است، قرار گرفت. از این‌رو در مرز بالادست مدل دبی متوسط ماهانه در نظر گرفته شد. در مرحله واسنجی مدل، نتایج مدل با مشاهدات مهر ۱۳۸۱ مقایسه شد. از آنجا که این ماه جزء ماه‌های کم‌آب محسوب می‌شود و با توجه به بده‌های اندازه‌گیری‌شده، تراز سطح آب منطبق بر دبی متوسط ماهانه ۳۰ متر مکعب بر ثانیه، در مرز رودخانه در نظر گرفته شد. در مرز پایین‌دست، جزرومد دریا با ثابت‌های هارمونیک N2، O1، K1، M2 و S2 استفاده شد (M2 و S2 به‌ترتیب ناشی از نیروی جاذبه ماه و خورشید بر آب‌های

سطح زمین و امواج K1 و O1 ناشی از انحرافات محور گردش زمین به دور خود با صفحه گردش ماه به دور زمین است). با تغییر ضرایب مقاومت بستری و پیش‌زمینه‌ادی (ضریب مؤثر انتشار یا پخشیدگی^۱)، تغییر تراز سطح آب در طول رودخانه تا حد امکان به مقادیر اندازه‌گیری‌شده نزدیک شد. در نهایت با به‌کاربردن ضرایب پیش‌زمینه‌ادی $\epsilon = 10^{-4} (\nu T, \lambda T)$ و طول زبری $Z_b = 0.00007 \text{ m}$ در بازه ابتدایی رودخانه، یعنی از سراب تا کیلومتر ۴۵ و طول زبری $Z_b = 0.00001 \text{ m}$ از کیلومتر ۴۵ تا ۷۳ رودخانه، بهترین همپوشانی بین داده‌های میدانی و حاصل از مدل حاصل شد. در مرحله صحت‌سنجی مدل، از داده‌های مشاهداتی فروردین ۱۳۸۲ که یک دوره پرآبی محسوب می‌شود استفاده شد. در این مرحله ضرایب حاصل از مرحله واسنجی تغییر داده نشد و دبی رودخانه به ۵۰ متر مکعب بر ثانیه افزایش داده شد. واسنجی و صحت‌سنجی شوری از مقایسه نتایج مدل و مقادیر مشاهداتی طی یک دوره جزرومد بلند^۲ با فاصله زمانی دو ساعت در دو ایستگاه قفاس و طره بخاخ انجام گرفت. ضریب انتشار افقی از مدل Smagorensky با ضریب ثابت $C_S = 0.1$ محاسبه شد.

1. Effective diffusion coefficient
2. Spring

شرایط هیدرولیکی مدلسازی

در این بخش متغیرها، ضرایب و روش‌های عددی در نظر گرفته شده برای هر بخش شبیه‌سازی و سپس هدف و خروجی‌های مورد انتظار شبیه‌سازی بیان می‌شود.

بررسی عوامل مؤثر بر نفوذ شوری

هدف این بخش، تعیین عوامل مؤثر بر نفوذ شوری در رودخانه بهمنشیر بود. به این منظور پاسخ‌های سیستم در شرایط مختلف هیدرولیکی و محیطی بررسی شد. مدلسازی برای بازه زمانی یک ماه انجام گرفت و گام زمانی در حالت دوبعدی و سه‌بعدی به ترتیب ۱/۲ و ۱۰ ثانیه در نظر گرفته شد. بازه زمانی به گونه‌ای انتخاب شد که بیانگر رفتار کلی محیط باشد و گام زمانی نیز با توجه به پارامتر محدودکننده CFL انتخاب شد. روش عددی بادسو برای معادلات انتقال مومنتم و روش TVD برای معادلات انتقال اسکالر به کار برده شد. ضریب انتشار قائم از مدل Mellor-Yamada 2.5 و ضرایب پخشیدگی افقی از مدل Smagorinsky محاسبه شد. برای بررسی پاسخ‌های

سیستم به تغییرات دبی و اثر باد، سه سناریو با شرایط اولیه موجود در جدول ۲ در نظر گرفته شد.

سناریو شاهد بیانگر حالت متوسط طبیعی رودخانه با دبی ۳۰ متر مکعب بر ثانیه با شوری مرجع ۱ psu و دامنه جزرومد ۳ متر در مرز دریاست. شوری مرجع در مرز دریا ۲۸ psu در نظر گرفته شد. پاسخ سیستم به شرایط مختلف هیدرولیکی و محیطی با تعریف سه سناریو ارزیابی شد و در هر سناریو تنها یک پارامتر از سناریو شاهد تغییر داده شد. آب رودخانه بهمنشیر از ایستگاه پمپاژ کانال وارد تأمین می‌شود و حداکثر توان پمپاژ از این کانال، ۱۲۰ متر مکعب بر ثانیه و کمترین بده مشاهده شده در ماه‌های کم‌آبی ۵ متر مکعب بر ثانیه است (۸). از این‌رو، دو سناریو افزایش و کاهش بده به مقادیر بیشینه و کمینه بده رودخانه بهمنشیر به ترتیب ۱۲۰ و ۵ متر مکعب بر ثانیه تغییر داده شد. همچنین بادی با شدت ۴۹ Knot که شدیدترین باد اندازه‌گیری شده در منطقه است در خلاف مسیر رودخانه اعمال شد.

جدول ۲. تنظیم مدل برای سه سناریو حساس

متغیر مدل	گزینه مدلسازی		
	وزش باد در جهت مخالف جریان رودخانه	دبی کم	دبی زیاد
دبی ($\frac{m^3}{sec}$)	۳۰	۵	۱۲۰
طول زبری بستر (m) بازه اول رودخانه	۰/۰۰۰۰۷	۰/۰۰۰۰۷	۰/۰۰۰۰۷
طول زبری بستر (m) بازه دوم رودخانه	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۱
ارتفاع مد (m)	۲	۲	۲
سرعت باد (Knot)	۴۹	۰	۰
شوری دریا (psu) †	۲۸	۲۸	۲۸
شوری رودخانه (psu)	۱	۱	۱

PSU (Practical Salinity Unit) واحدی براساس محتویات رسانای آب بوده و برابر با ۱ g/kg یا حدود ۱۰۰۰ ppm است.

مدیریت آب و آبیاری

دوره ۳ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۲

تعیین الگوی مکانی و زمانی نفوذ شوری

به منظور بررسی الگوی مکانی و زمانی نفوذ شوری در رودخانه بهمنشیر، چگونگی تغییرات شوری در طول رودخانه برای دو دبی ۳۰ و ۵۰ متر مکعب بر ثانیه در حالت جزرومد با دامنه ۳ متر (شرایط بیشینه)، در مدت سه روز شبیه سازی شد. سه جبهه شوری ppm ۲۰۰۰۰، ppm ۱۰۰۰۰ و ppm ۲۰۰۰ در طول رودخانه و مدت زمان سه روز ردیابی شد تا مکان های مناسب پمپاژ آب با کیفیت مناسب تخمین زده شده و همچنین تعیین الگوی زمانی و مکانی برداشت آب به عنوان یکی از گزینه های دستیابی به آب با کیفیت مناسب تر ارزیابی شود.

نتایج و بحث

جدول های ۳، ۴ و ۵، نتایج واسنجی و صحت سنجی مدل و مقادیر شاخص های ارزیابی در نظر گرفته شده برای واسنجی و صحت سنجی را بر اساس دو دوره زمانی سی روزه نشان می دهد. مقادیر زیاد ضریب تعیین R^2 و

مقادیر کم درصد خطای نسبی میانگین ARE نشان می دهد که مدل به خوبی واسنجی شده و برای شبیه سازی شرایط گزینه های مختلف بهره برداری و نیروهای محیطی از دقت خوبی برخوردار است.

نتایج متوسط گیری شده در راستای قائم توزیع جریان و شوری مدل در شکل های ۳ تا ۶ ارائه شده است. برای سناریو شاهد (شکل ۳)، شوری شبیه سازی شده مدل به ایستگاه طره بخاخ با فاصله ۴۶ کیلومتر از دهانه رودخانه بهمنشیر رسیده است. همچنین نتایج مدل نشان می دهد که به دلیل وجود جریان آب شیرین رودخانه به سمت دریا، اختلاف چگالی شوری در عرض رودخانه وجود دارد. نیروی باد برای سناریو شاهد به کار گرفته نشده و این عدم تقارن شوری اصولاً به دلیل نیروی کولیریوس است. نتایج توزیع جریان باقی مانده و شوری در طول رودخانه (در محور میانی رودخانه) در شکل ۷ نشان داده شده است. این شکل نشان می دهد که توزیع شوری در راستای عمق، تقریباً یکنواخت است.

جدول ۳. مقادیر متوسط خطای نسبی و ضریب همبستگی تغییرات تراز آب در مرحله واسنجی مدل

ایستگاه	موقعیت ایستگاه	ARE%	R^2
دهانه	کیلومتر ۷۳ از سه شاخه	۵/۰۸	۹۹/۰۲
چوئیده	کیلومتر ۶۰ از سه شاخه	۵/۶	۹۷/۷۶
طره بخاخ	کیلومتر ۲۷ از سه شاخه	۹/۲۹	۹۵/۴

جدول ۴. مقادیر متوسط خطای نسبی و ضریب همبستگی تغییرات تراز آب در مرحله صحت سنجی مدل

ایستگاه	موقعیت ایستگاه	ARE%	R^2
دهانه	کیلومتر ۷۳ از سه شاخه	۵/۹۶	۹۸/۱۹
چوئیده	کیلومتر ۶۰ از سه شاخه	۳/۳۳	۹۹/۰۲
طره بخاخ	کیلومتر ۲۷ از سه شاخه	۳/۲۹	۹۹/۱۴

جدول ۵. مقادیر متوسط خطای نسبی و ضریب همبستگی تغییرات شوری در واسنجی و صحت سنجی

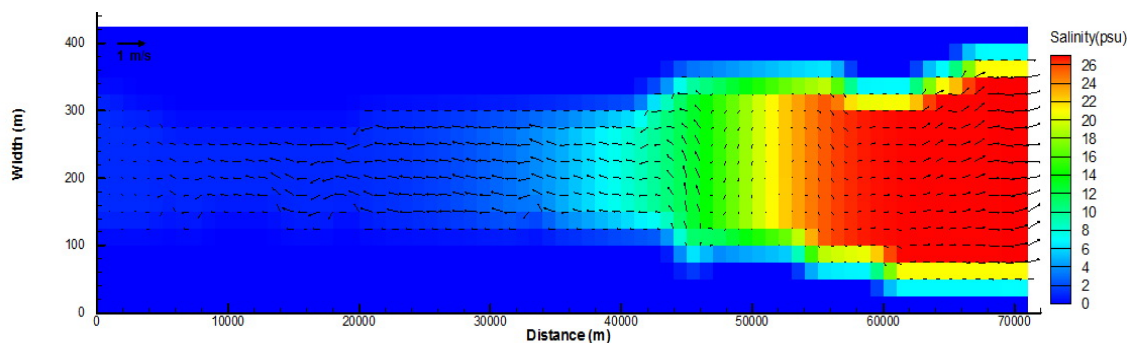
ایستگاه	موقعیت ایستگاه	ARE%	R^2
قفاس	کیلومتر ۵۸ از سه شاخه	۲۹/۹۶	۹۸/۴
طره بخاخ	کیلومتر ۲۷ از سه شاخه	۳۱/۱	۸۶/۲۷

مدیریت آب و آبیاری

جهت وزش باد غالب منطقه شمال و شمال غربی است. بنابراین وزش باد در خلاف جهت رودخانه خواهد بود که سبب افزایش ارتفاع موج در طول رودخانه و بیشتر شدن طول نفوذ شوری متناسب با افزایش ارتفاع موج خواهد شد. در این سناریو، باد با شدت ۴۹ نات بر سطح آب وارد می‌شود و سطح آب را حدود ۱ متر در بالادست افزایش می‌دهد. همان طور که در شکل ۱۰ دیده می‌شود، طول نفوذ شوری ۶ کیلومتر افزایش یافته است. همچنین جریان سطحی در دهانه رودخانه به دلیل عرض بیشتر رودخانه، بیشتر تحت تأثیر قرار می‌گیرد و هنگام جریان جزری نیز بردارهای سرعت در سطح به سمت بالادست رودخانه حرکت می‌کنند. سرعت جریان متوسط عمقی به سمت دریا، نسبت به حالت پایه کاهش یافته، شاید به دلیل اثر مشترک حجم آب، ارتفاع سطح دریا، اختلاف فشار باروکلنیک (اختلاف فشار ستون آب) و کاهش فشار باروتروپیک (فشار در سطح آزاد آب) باشد. اختلاف شوری ایجاد شده به دلیل تغییرات سطح آب به این نکته مهم اشاره دارد که با افزایش تدریجی سطح آب، نفوذ شوری مشکلی بزرگ خواهد شد.

در شرایط دبی زیاد رودخانه، نتایج مدل نشان می‌دهد که جریان قوی‌تر رودخانه، شوری را به سمت پایین دست رودخانه هدایت می‌کند (شکل ۴). در بخش پایین دست رودخانه بهمنشیر، ماندگاری جریان به سمت دریا قوی‌تر خواهد بود، در سطح آب تمرکز جریان رودخانه قوی‌تر است. همچنین جریان بستری و طبقه بندی شوری در مقایسه با سناریو شاهد تفاوت نمی‌کند. این حالت بیانگر آن است که با افزایش دبی رودخانه به ۱۲۰ متر مکعب بر ثانیه جریان لایه‌ای که همان حرکت آب شور و چگال‌تر دریا در کف و جریان رودخانه در سطح است، دیده نمی‌شود. از طرفی شدت شوری در ایستگاه طره بخاخ هنگام مد تا حد زیادی کاهش می‌یابد و در محدوده مجاز 1500 ppm قرار می‌گیرد (شکل ۸).

در شرایط دبی کم، مدل نفوذ شوری بیشتری را به سمت بالادست شبیه‌سازی می‌کند. همچنین کاهش مقاومت رودخانه در برابر جزرومد، سبب افزایش طول نفوذ شوری خواهد شد. از طرفی کاهش دبی رودخانه به کمتر از ۳۰ متر مکعب، سبب ماندگاری جریان چگال‌تر می‌شود، در نتیجه شدت شوری در مد بلند در ایستگاه پمپاژ طره بخاخ به 3000 ppm می‌رسد که حدود دو برابر شوری مجاز (1500 ppm) برای آبیاری نخیلات است (شکل‌های ۵ و ۹).

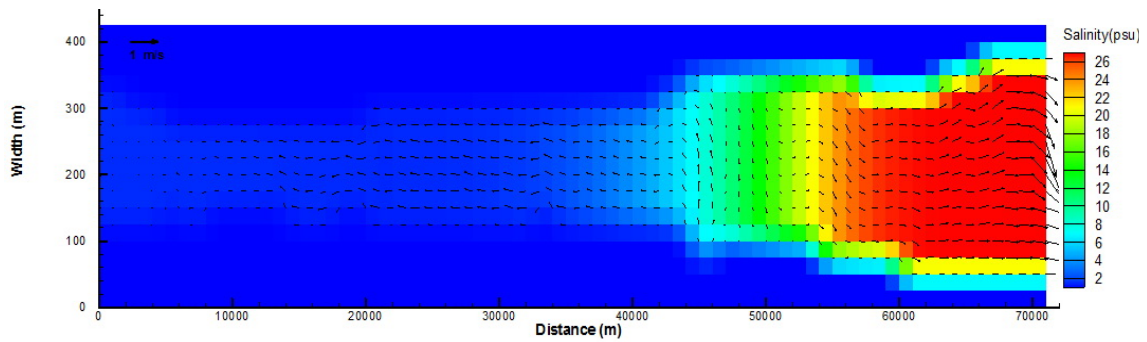


شکل ۳. توزیع جریان و شوری در سطح برای سناریو شاهد

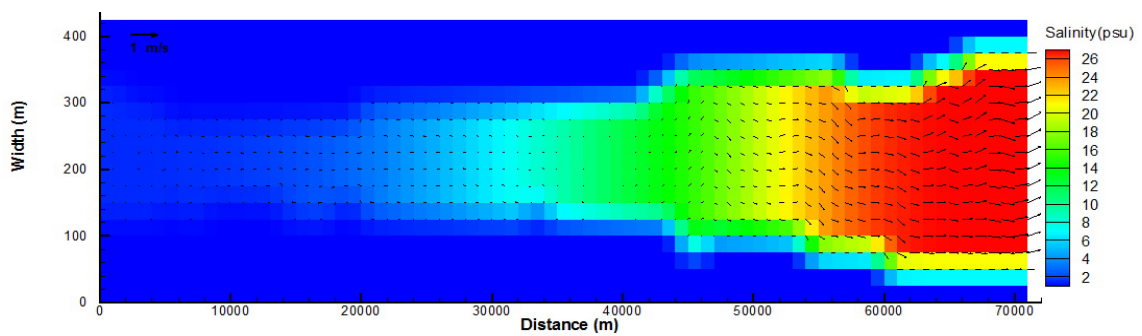
مدیریت آب و آبیاری

دوره ۳ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۲

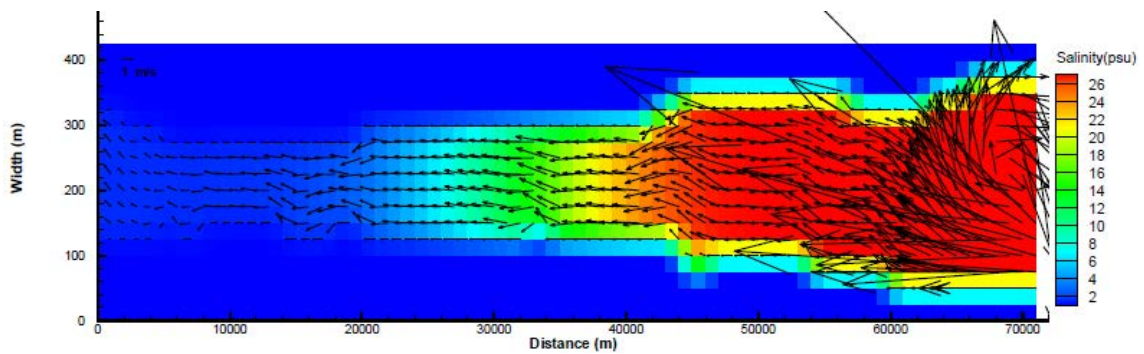
بررسی مکانی و زمانی نفوذ شوری در رودخانه جزرومدی با استفاده از مدل COHERENS: مورد مطالعاتی رودخانه بهمنشیر



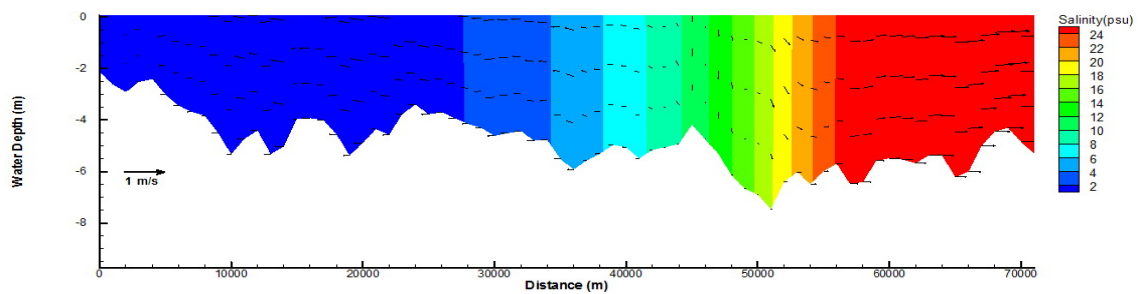
شکل ۴. توزیع جریان و شوری در سطح برای سناریو افزایش دبی رودخانه



شکل ۵. توزیع جریان و شوری در سطح برای سناریو کاهش دبی رودخانه



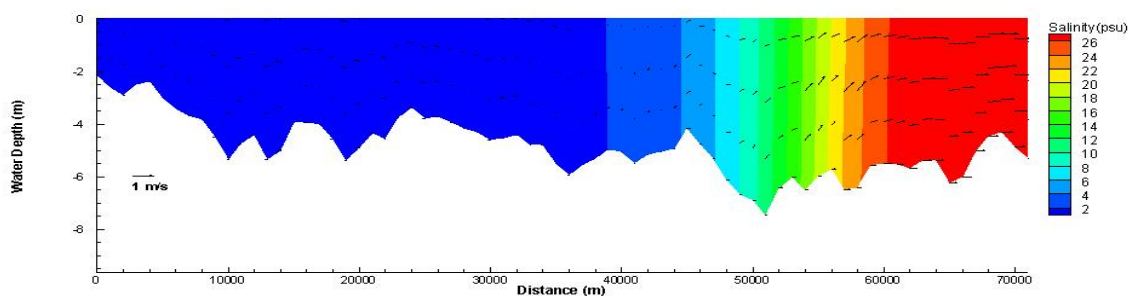
شکل ۶. توزیع جریان و شوری در سطح برای سناریو وزش باد در جهت خلاف جریان رودخانه



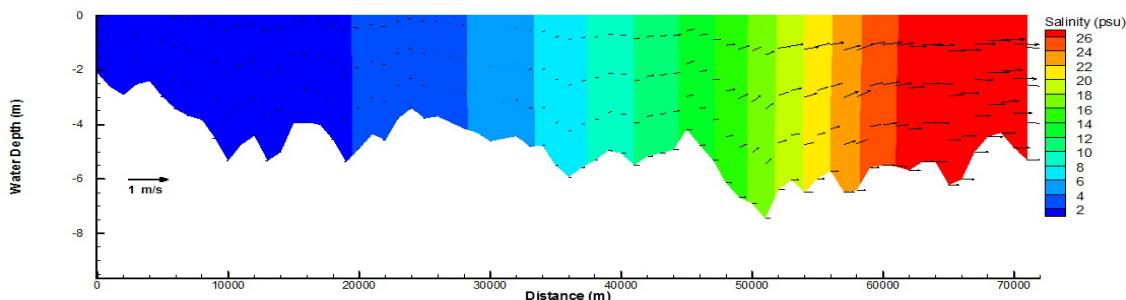
شکل ۷. توزیع جریان و شوری در طول و عمق رودخانه برای سناریو شاهد

مدیریت آب و آبیاری

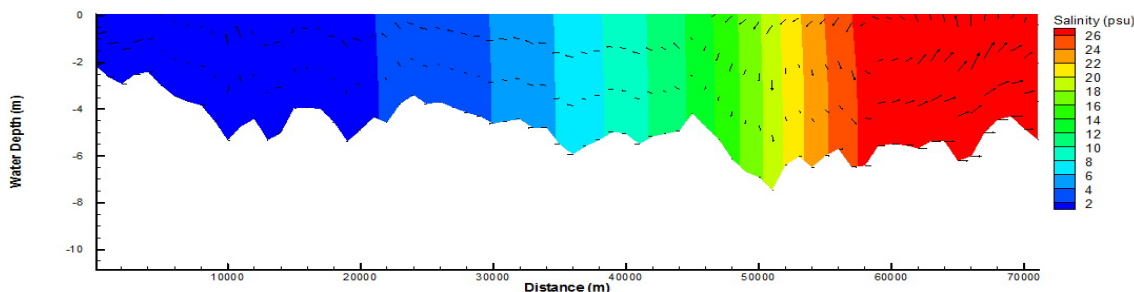
دوره ۳ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۲



شکل ۸. توزیع جریان و شوری در طول و عمق رودخانه برای سناریو دبی زیاد رودخانه



شکل ۹. توزیع جریان و شوری در طول و عمق رودخانه برای سناریو دبی کم رودخانه

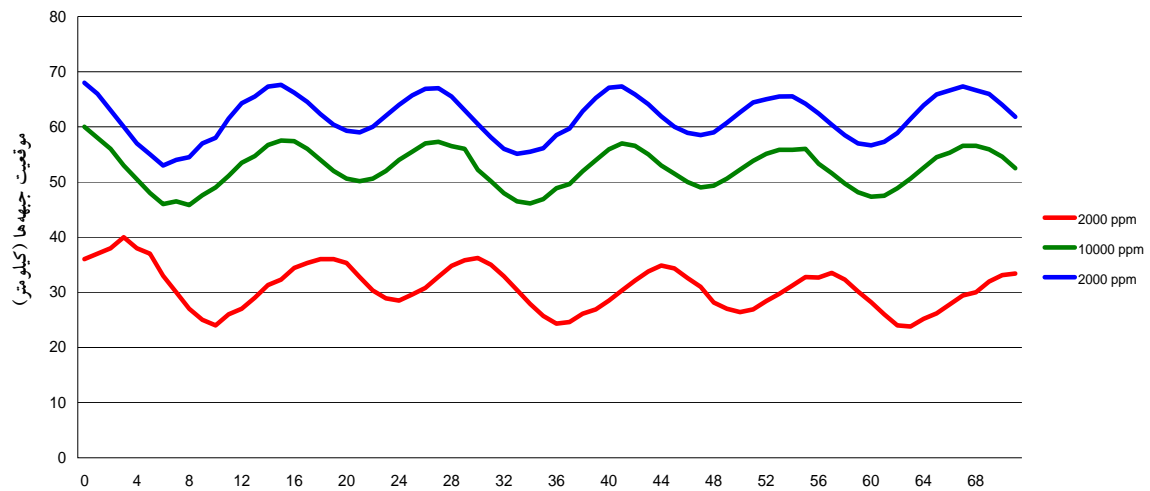


شکل ۱۰. توزیع جریان و شوری در طول و عمق رودخانه برای سناریو وزش باد در جهت خلاف جریان رودخانه

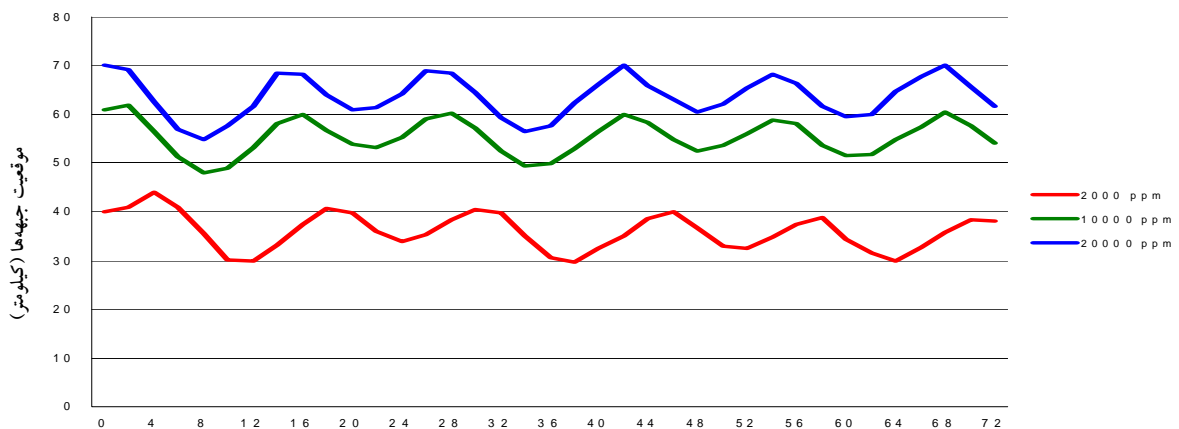
یک چرخه جزرومد بلند، جزرومد با دامنه کمتر اتفاق می‌افتد و به تناسب آن مدت زمان حضور جبهه شوری 2000 ppm کاهش می‌یابد. در مد کوچک، شوری به مدت ۵ ساعت (۲۱ تا ۲۶) در محدوده بیشینه قرار می‌گیرد. این روند به‌طور تقریبی در ادامه تکرار می‌شود و پس از هر بازه زمانی هشت‌ساعته که شوری در محدوده کمتر از 2000 ppm قرار دارد، ۵ تا ۷ ساعت شوری از این حد تجاوز می‌کند.

تجزیه و تحلیل مقادیر شوری در کیلومتر ۳۰ رودخانه نشان می‌دهد (شکل ۱۱) که قبل از کامل شدن مد بزرگ در این نقطه از رودخانه، شوری به مدت ۷ ساعت (۰ تا ۷) در محدوده کمتر از 2000 ppm قرار دارد و در فاصله زمانی ۷ تا ۱۴، در حد بیشینه قرار می‌گیرد. پس از غالب شدن جریان جزری، جبهه شوری به سمت پایین دست رودخانه تخلیه می‌شود و بازه زمانی ۱۴ تا ۲۲، کمترین شدت شوری در کیلومتر ۳۰ را نشان می‌دهد. پس از پایان

بررسی مکانی و زمانی نفوذ شوری در رودخانه جزرومدی با استفاده از مدل COHERENS: مورد مطالعاتی رودخانه بهمنشیر



شکل ۱۱. سری زمانی جابه‌جایی جبهه‌های شوری برای دبی رودخانه ۳۰ متر مکعب بر ثانیه



شکل ۱۲. سری زمانی جابه‌جایی جبهه‌های شوری برای دبی رودخانه ۵۰ متر مکعب بر ثانیه

محدوده بالادست رودخانه است. همچنین مشاهده می‌شود که دامنه نفوذ دو جبهه شوری ۱۰۰۰۰ ppm و ۲۰۰۰۰ ppm نسبت به حالت دبی ۳۰ متر مکعبی محدودتر شده و هنگام جریانات جزری جبهه‌ها بیشتر به سمت دریا تخلیه می‌شوند. بیشترین نفوذ جبهه شوری ۲۰۰۰۰ ppm تا ۵۶ کیلومتر از بالادست رودخانه در حالت مد بزرگ است. جبهه ۱۰۰۰۰ ppm نیز به‌طور تقریبی تا ۵۰ کیلومتر از بالادست رودخانه نفوذ می‌کند. این تغییرات مکانی و زمانی

شکل ۱۲، چگونگی تغییرات جبهه‌های شوری در حالت دبی ۵۰ متر مکعب بر ثانیه را نشان می‌دهد. افزایش دبی رودخانه جبهه شوری ۲۰۰۰ ppm را کنترل کرده و گسترش آن را در بازه ۳۰ تا ۴۰ کیلومتری از بالادست رودخانه محدود کرده است. بنابراین آگیری در طول رودخانه ممکن است در بازه بزرگ‌تری انجام گیرد. در نتیجه، افزایش دبی رودخانه، گزینه مناسبی برای مقابله با پدیده نفوذ شوری در طول رودخانه، به‌خصوص در

مدیریت آب و آبیاری

دوره ۳ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۲

نفوذ شوری در محدوده پایین دست رودخانه (۷ تا ۵۰ کیلومتر) می‌تواند برای بهره‌برداران آب مانند پرورش دهندگان میگو حائز اهمیت باشد.

نتیجه‌گیری

هدف این تحقیق ارزیابی و توسعه مدل کوهیرنس به منظور تعیین پارامترهای مؤثر نفوذ شوری و تحلیل اطلاعات شبیه‌سازی برای تعیین الگوی مکانی و زمانی جبهه‌های شوری در رودخانه بهمنشیر بود که به نتایج زیر منجر شد:

- مدل کوهیرنس در دو بخش پیش‌پردازشگر و پس‌پردازشگر با اضافه کردن دو زیربرنامه بهبود داده شد. مدل توسعه داده شده قابلیت خود را برای محیط‌های کم عمق تحت تأثیر جزرومد در منطقه تحقیق به اثبات رساند، اگرچه داده‌های کیفی بیشتر افزایش دقت و اسنجی مدل را سبب خواهد شد؛
- نحوه توزیع شوری در رودخانه بهمنشیر با توجه به نیروهای محیطی مختلف در نقاط مختلف رودخانه متفاوت است. در رودخانه بهمنشیر، طبقه بندی شوری به تغییرات دبی رودخانه حساسیت نشان نمی‌دهد، در حالی که طول نفوذ شوری به عوامل ضمنی مثل تغییرات تراز سطح آب در دهانه رودخانه و بده رودخانه بسیار حساس است؛
- اعمال شرایط بهینه مرکب از دبی آب شیرین رودخانه و برداشت متناوب آب، می‌تواند راه حلی مناسب برای دریافت آب با کیفیت قابل قبول کشاورزی باشد؛
- با توجه به شرایط منابع آب موجود در منطقه، می‌توان برداشت متناوب زمانی در چند نقطه از رودخانه را به عنوان گزینه پیشنهادی به جای طرح‌هایی مانند ساخت سد در پایین دست رودخانه قابل بررسی دانست. در حال حاضر ساخت سد در پایین دست رودخانه تحت بررسی است که هزینه‌های مالی و زیست محیطی بسیاری را در بر خواهد داشت.

منابع

۱. ایوب‌زاده، ع (۱۳۶۸). مدل کامپیوتری سیستم آبیاری جزرومدی نخلیات بهمنشیر با تغییراتی در سیستم ستی، دانشگاه تهران، تهران. پایان‌نامه کارشناسی ارشد.
۲. بختیاری فر، م (۱۳۸۸). مدلسازی عددی جریان در تنگه خوران. دانشگاه تهران. تهران. پایان‌نامه کارشناسی ارشد.
۳. خوش خلق، ع؛ بدیعی، پ (۱۳۸۷). ارتقای مدل هیدرودینامیکی سه بعدی COHERENS جهت شبیه‌سازی فرایندهای انتقال رسوبات چسبنده. چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران. مجموعه مقالات چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، ایران.
۴. طرح مطالعات آبرسانی و آبیاری جزیره آبادان و خرمشهر (۱۳۵۴). مشاورین مه‌اب-سوئکو.
۵. طرح لایروبی رودخانه بهمنشیر (۱۳۷۲). مهندسین مشاور سازه‌پردازی ایران.
۶. گزارش زمان بندی عملیات لایروبی رودخانه بهمنشیر (۱۳۷۶). مرحله دوم، جلد دوم، شرکت مهندسین مشاور سازه‌پردازی ایران.
۷. مطالعات شوری (۱۳۸۴). پروژه مدل‌های ریاضی و فیزیکی رودخانه بهمنشیر، شرکت مهندسین مشاور سازه‌پردازی ایران.
۸. مطالعات هیدرولیک (۱۳۸۴). پروژه مدل‌های ریاضی و فیزیکی رودخانه بهمنشیر، شرکت مهندسین مشاور سازه‌پردازی ایران.

مدیریت آب و آبیاری

9. Nguyen AD, Savenije HHG, Pham DN and Tang TD (2008) Using salt intrusion measurements to determine the freshwater discharge distribution over the branches of a multi-channel estuary: The Mekong Delta Case. *Estuarine, coastal and shelf science*. 77 (2008): 433-445
10. Nguyen AD and Savenije HHG (2006) Salt intrusion in multi-channel estuaries: a case study in the Mekong Delta, Vietnam. *Hydrology and Earth System Sciences*. 10 (5): 743-754.
11. Pritchard DW (1956) The dynamic structure of a coastal plain estuary. *Journal of Marine Research* 15, 33-42.
12. Savenije HHG (1986) A one-dimensional model for salinity intrusion in alluvial estuaries. *Journal of Hydrology*. 85: 87-109.
13. Savenije HHG (1989) Salt intrusion model for high-water slack, low-water slack and mean tide on spreadsheet. *Journal of Hydrology*. 107: 9-18.
14. Savenije HHG (1993b) Predictive model for salt intrusion in estuaries. *Journal of Hydrology*. 148: 203-218.
15. Savenije HHG (2005) *Salinity and Tides in Alluvial Estuaries*. Elsevier. Amsterdam, 197 pp.
16. Hansen DV and Rattray M (1965) Gravitational circulation in straits and estuaries. *Journal of Marine Research*. 23: 104-122.
17. Hounghou Xu, Jing lin, Dongxiao Wang (2008) numerical study on salinity stratification on Pamlico river estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 80: 74-84.
18. JIANG Heng-zhi and SHEN Yong-ming. (2009) Numerical study on salinity stratification on OUJIANG river estuary. *Journal of Hydrodynamics*. 21(6): 835-842.
19. Kampf J, And Sadrinasab M (2005) The circulation of Persian Gulf: A numerical study. *Ocean Science Discussions*. Vol.2., Pp 129-164.
20. Luyten P J, Jones JE, Proctor R, Tabor A, Tett P and Wild-Allen K (1999) COHERENS- A Coupled Hydrodynamical – Ecological Model For Regional And Shelf Seas: Users Documentation, MUMM Rep, Management Unit Of the North Sea Mathematical Models. Official Website.
21. Mellor G and Yamada T (1982) Development of a turbulent closure model for geophysical fluid problems.
22. *Review of Geophysics and Space Physics*. 20 (4): 851-875.