



Control of Salinity Intrusion in Arvand Estuary Under Different Hydrological Conditions

A.F. Etemad Shahidi^{1*}, A.A. Saburi²
and J. Parsa³

Abstract

Interaction of the saline water originated from the sea or the ocean with the riverine water is an important issue in estuarine systems. The intrusion of salt water in estuaries affects the quality of groundwater used for different purposes such as drinking, agricultural, and industrial consumptions. Several methods have been introduced by the investigators to control this natural phenomenon. The Venturi control method, submerged tidal barriers, and air curtains are examples of these methods. In this paper, the efficiency of the Venturi method for salinity intrusion control was studied for the Arvand estuary in south-western Iran. The performance of this method was assessed using three different discharges; the mean annual discharge (1050 m³/s), the minimum annual discharge (520 m³/s), and an assumed low discharge of 260 m³/s. A laterally averaged two-dimensional numerical model was used to simulate the salinity intrusion in Arvand estuary. The model was first calibrated using field data and then different scenarios were simulated. Results indicated the efficiency of the Venturi control method in decreasing the salinity intrusion length.

Keywords: Arvand estuary, Venturi method, Salinity intrusion length, Numerical modeling, CE-QUAL-W2.

Received: June 23, 2009
Accepted: March 15, 2011

کنترل نفوذ شوری در خور رودخانه‌ای اروند در شرایط مختلف هیدرولوژیکی

امیرفرشاد اعتماد شهیدی^{۱*}، امیرادهم صبوری^۲
و جواد پارسا^۳

چکیده

یکی از مسائل مهم در خورهای رودخانه‌ای اندرکنش آب شیرین رودخانه‌ها و آب شور دریا می‌باشد. نفوذ آب شور به رودخانه‌ها بر روی کیفیت آب آنها که برای مصارف شرب، کشاورزی و صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد موثر است. محققین در نقاط مختلف دنیا راهکارهای گوناگونی را برای کنترل این پدیده طبیعی معرفی نموده‌اند. روش کنترل ونتوری، بکارگیری بند موقت و بکارگیری پرده هوا از انواع این راهکارها هستند. در این تحقیق میزان کارایی روش کنترل ونتوری در کنترل پدیده نفوذ شوری در خور رودخانه‌ای اروند مورد بررسی قرار گرفته است. این کار برای سه دبی مختلف رودخانه، دبی ۱۰۴۰ مترمکعب بر ثانیه (دبی متوسط سالانه)، دبی ۵۲۰ مترمکعب بر ثانیه (دبی حداقل سالانه) و دبی ۲۶۰ مترمکعب بر ثانیه (یک دبی حداقل فرضی) صورت گرفته است. برای ارزیابی کارایی روش مورد نظر از یک مدل عددی دو بعدی متوسط گیری شده در جهت عرض استفاده شده است. ابتدا مدل با کمک اطلاعات میدانی صحت سنجی شده است و سپس سناریوهای مختلف برای کنترل نفوذ شوری اجرا شده است. نتایج حاصله، حاکی از عملکرد مناسب روش کنترل ونتوری در کاهش طول نفوذ شوری بوده است.

کلمات کلیدی: خور رودخانه‌ای اروند، روش ونتوری، طول نفوذ شوری، مدل عددی، مدل CE-QUAL-W2.

تاریخ دریافت مقاله: ۲ تیر ۱۳۸۸
تاریخ پذیرش مقاله: ۲۴ اسفند ۱۳۸۹

1- Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, Email: etemad@iust.ac.ir.
2- MSc of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
3- Academic member of Civil Engineering Department, Shahr-e-Ghods Branch, Islamic Azad University, Shahr-e-Ghods, Tehran, Iran.
*- Corresponding Author

۱- استاد گروه آب و محیط زیست دانشکده مهندسی عمران دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.
۲- کارشناس ارشد مهندسی عمران - آب از دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.
۳- عضو هیئت علمی گروه مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرقدس، تهران، ایران.
*- نویسنده مسئول

خورهای رودخانه‌ای به عنوان یکی از زیستگاههای آبی حساس در برابر آلودگی مورد توجه بسیار می‌باشند. یکی از عوامل مؤثر در تغییر کیفیت آب خورهای رودخانه‌ای، پدیده نفوذ شوری به بالادست آنها می‌باشد. افزایش شوری آب در بالادست نه تنها موجب کاهش کیفیت آب سطحی برای مصارف صنعتی و کشاورزی می‌شود، بلکه می‌تواند کیفیت منابع آب زیرزمینی را نیز به مخاطره اندازد (Dyer 1973). لذا کنترل نفوذ شوری به بالادست خورهای رودخانه‌ای یکی از اقداماتی است که جهت بهبود شرایط زیست محیطی و استفاده از این اکوسیستم‌های منحصر به فرد مورد توجه محققان بوده است (McAnally et al. 1997, Burt and Rees 2001, Haralambidou et al. 2003).

یکی از راهکارهای کنترل نفوذ شوری در خورهای رودخانه‌ای به کارگیری یک بند موقت مغروق در آب می‌باشد. ایجاد این بندهای مصنوعی در مسیر گوه شوری علاوه بر کنترل نفوذ شوری به بالادست، می‌تواند صرفه جویی‌های اقتصادی قابل توجهی را نیز به همراه داشته باشد (McAnally et al. 1997). استفاده از پرده هوا که با تخلیه هوای فشرده به داخل جریان توسط پمپ صورت می‌گیرد نیز جهت کنترل نفوذ شوری امکان‌پذیر می‌باشد (Nakai and Arita 2002). از دیگر راهکارهای پیشنهاد شده برای کنترل نفوذ شوری کاهش سطح مقطع رودخانه در بخشی از مسیر آن می‌باشد. در این روش که به کنترل ونتوری معروف است یک تنگ‌شدگی یا به عبارتی یک گلوگاه در بخشی از کانال به وجود می‌آید. بکارگیری روش کنترل ونتوری تاکنون برای بخشی از رودخانه می‌سی‌سی‌پی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در سال ۲۰۰۰ یک مدل عددی برای ارزیابی تأثیر کاهش عمق کانال بر روی میزان شوری بالادست بکار گرفته شد و به وسیله آن چهار حالت کاهش عمق برای مقطعی از کانال شبیه‌سازی شد (Berger et al. 2002). پس از آن در سال ۲۰۰۱ شبیه‌سازی دیگری در این کانال به وسیله یک مدل عددی صورت گرفت (Berger et al. 2002). این بار سه گزینه برای کاهش مقطع رودخانه مورد ارزیابی قرار گرفت. بر مبنای مقایسه صورت گرفته بین دو روش کاهش همزمان عرض و ارتفاع و کاهش ارتفاع به تنهایی، این نتیجه به دست آمد که تنگ کردن عرض کانال تأثیر بسیار عمده‌ای در کاهش میزان شوری در بالادست داشته است و تأثیر کاهش ارتفاع به تنهایی در مقابل کاستن هر دو پارامتر ناچیز بوده است.

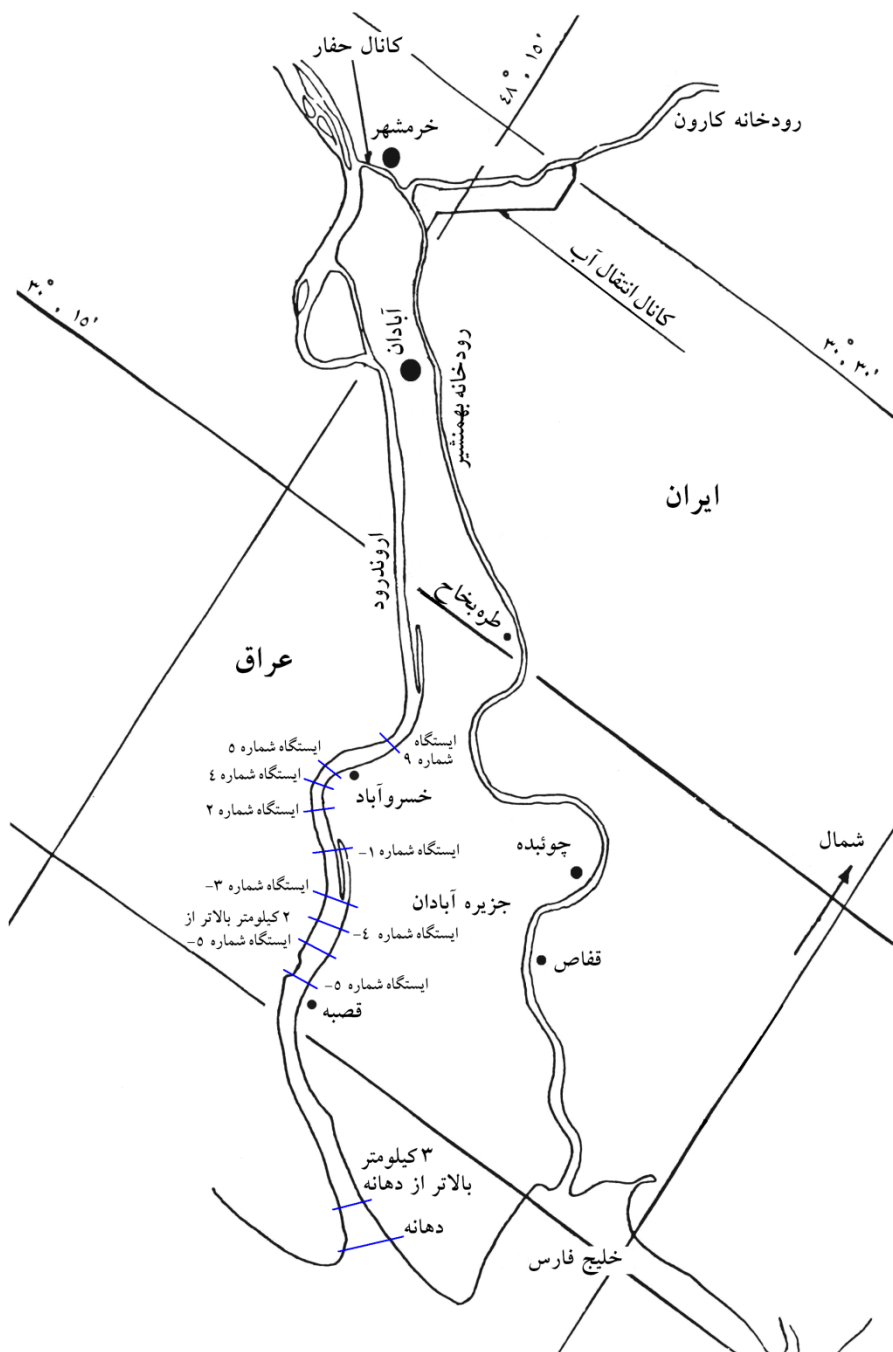
رودخانه اروند در جنوب ایران نیز از جمله رودخانه‌هایی است که کیفیت آب در آن طی دهه‌های اخیر به دلیل نفوذ شوری به شدت کاهش یافته است. لذا بررسی پدیده نفوذ شوری در این رودخانه به دلیل اهمیت آن بعنوان یکی از منابع آب جنوب کشور همواره مورد توجه بوده است. یکی از راهکارهای مناسب برای پیش‌بینی نفوذ شوری در خورهای رودخانه‌ای بکارگیری مدل‌های عددی می‌باشد. اولین بار محاسبات نفوذ شوری در خور رودخانه‌ای اروند بر اساس تئوری نفوذ شوری هارلمن به انجام رسید (Sweco, 1976) و دو برنامه کامپیوتری نفوذ شوری تهیه گردید. اولین برنامه، ضرایب انتشار شوری و برنامه دوم (با استفاده از ضرایب محاسبه شده) انتشارات شوری را در طول رودخانه (یک بعدی) پیش‌بینی می‌کرد. در محاسبات کامپیوتری، هندسه مدل به صورت یک کانال مستطیلی یکنواخت به عرض ۷۰۰ متر و عمق ۸ متر وارد گردید. مدل مذکور به علت فرضیات یک بعدی بودن و سطح مقطع یکنواخت، مدل دقیقی برای پیش‌بینی شوری بخصوص در حالت لایه‌ای نبود. Zahed et al. (2008) با بکارگیری نسخه ۳ مدل CE-QUAL-W2 و با استفاده از مدل‌های لزوجت گردابی قائم به شبیه‌سازی پدیده نفوذ شوری در رودخانه اروند پرداختند که در نهایت، رابطه‌ای بین طول نفوذ شوری و دبی رودخانه ارایه نمودند. در مقاله حاضر، در ابتدا شبیه‌سازی شوری در خور رودخانه‌ای اروند با استفاده از آخرین نسخه در دسترس مدل CE-QUAL-W2 (نسخه ۳/۶) و با وارد کردن هندسه واقعی رودخانه برای دو حالت جریان آمیخته و لایه‌ای انجام گرفته است. پس از صحت سنجی مدل، میزان کارایی روش کنترل ونتوری با شبیه‌سازی سه سناریوی کاهش عرض، کاهش عمق و کاهش همزمان این دو پارامتر مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- معرفی منطقه مورد مطالعه

رودخانه اروند رودخانه‌ای دائمی است که در حوضه آبریز خلیج فارس و دریای عمان واقع است. طول بخش مرزی آن ۸۴ کیلومتر و طول سراسری آن حدود ۱۹۰ کیلومتر است. اروند رود از تلاقی رودخانه دجله و فرات در بالا دست بصره تشکیل می‌گردد. مسیر کلی رودخانه اروند جنوب شرقی و شیب متوسط آن صفر می‌باشد. رودخانه اروند از محل القرنه رو به سوی جنوب غربی از کنار شهر بصره می‌گذرد و در نقطه‌ای به مختصات طولی حدود ۴۸ درجه و ۶ دقیقه و عرضی حدود ۳۰ درجه و ۲۷ دقیقه به مرز ایران و عراق وارد می‌گردد. در شهر خرمشهر، شاخه غربی رودخانه کارون به این رودخانه ملحق می‌گردد و شهرستانهای خرمشهر و آبادان را طی کرده و در هشت کیلومتری جنوب اروند کنار به خلیج فارس می‌ریزد.

شکل ۱، منطقه مورد مطالعه در بازه آبادان - خلیج فارس به همراه ایستگاه‌های اندازه‌گیری شوری نشان داده شده است. در ۲۵ کیلومتری جنوب شرقی آبادان، خسرو آباد در کنار رودخانه اروند واقع شده است. در ۲۰ کیلومتری جنوب خسرو آباد مرکز بخش قصبه (اروند کنار) در کنار رودخانه اروند واقع شده است. فعالیت‌های کشاورزی در تمام مسیر سواحل رودخانه دیده می‌شود که قسمت اعظم آن را نخلستان‌ها تشکیل می‌دهند.

منطقه مورد مطالعه، بخشی از رودخانه اروند در بازه آبادان تا خلیج فارس به طول ۷۴ کیلومتر می‌باشد. در محدوده مورد مطالعه، عرض دهانه رودخانه ۲۳۰۰ متر می‌باشد. متوسط تغییرات جزر و مد در دهانه رودخانه برابر ۳ متر بوده و بدین جهت خور رودخانه‌ای اروند به لحاظ طبقه بندی جزر و مد در دسته خورهای با دامنه جزر و مدی متوسط^۱ قرار می‌گیرد. به لحاظ طبقه بندی شوری، خور رودخانه‌ای اروند در دسته خورهای رودخانه‌ای نیمه آمیخته قرار می‌گیرد. در



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه و موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری شوری

$$\frac{\partial UB}{\partial t} + \frac{\partial UUB}{\partial x} + \frac{\partial WUB}{\partial z} = \quad (2)$$

$$gB \sin \alpha - \frac{B}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial B \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial B \tau_{xz}}{\partial z}$$

که چگالی آب، t زمان، α شیب کف پیکره آبی و τ_{xx} تنش برشی آشفته است که بر وجه x حجم کنترل و در جهت x اعمال می‌شود و τ_{xz} تنش برشی آشفته است که بر وجه z حجم کنترل و در جهت x اعمال می‌شود (تنش برشی بین لایه‌ای).
معادله اندازه حرکت در جهت z :

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} = g \cos \alpha \quad (3)$$

معادله (۳)، معادله فشار هیدرواستاتیک می‌باشد.

معادله سطح آزاد آب:

$$B_\eta \frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \int_\eta^h UB dz - \int_\eta^h qB dz \quad (4)$$

این معادله فرم ساده شده معادله پیوستگی می‌باشد. B_η عرض در سطح آب می‌باشد.

۳-۲- معادلات بخش پهن رفت- پخشیدگی

معادله دو بعدی بقاء جرم ماده محلول یا به عبارتی معادله دو بعدی پهن رفت- پخشیدگی عبارتست از:

$$\frac{\partial B\Phi}{\partial t} + \frac{\partial U B \Phi}{\partial x} + \frac{\partial W B \Phi}{\partial z} - \frac{\partial \left(B D_x \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)}{\partial x} - \frac{\partial \left(B D_z \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)}{\partial z} = q_\Phi B + S_\Phi B \quad (5)$$

Φ = میانگین عرضی غلظت ماده (g/m^3). Φ می‌تواند غلظت یا حرارت باشد. حرارت به صورت $\rho C_p T$ تعریف می‌شود که ρ معادل چگالی سیال، C_p گرمای ویژه آب و T درجه حرارت می‌باشد. بنابراین با جایگذاری C یا $\rho C_p T$ بجای Φ بترتیب معادلات حاکم بر غلظت یا حرارت حاصل می‌شوند. D_x = ضریب پخش طولی حرارت و ماده (m^2/s), D_z = ضریب پخش قائم حرارت و ماده (m^2/s), q_Φ = نرخ جریان ورودی یا خروجی ماده از واحد حجم ($\text{g/m}^3 \cdot \text{s}$) و S_Φ = جمله میانگین عرضی چشمه / چاه ($\text{g/m}^3 \cdot \text{s}$) می‌باشد.

۳-۳- مدل‌های محاسبه لزجت گردابی قائم

در این مدل، گزینه‌های مختلفی برای تعیین لزجت گردابی قائم (ν_t) وجود دارد. در جدول ۱ مدل‌های محاسبه لزجت گردابی قائم ارائه شده‌اند.

بزرگترین منطقه کشاورزی در قصبه واقع شده است. قسمت میانی جزیره آبادان به صورت صحرا و قسمتهای شرقی آن اکثراً به صورت اراضی باتلاقی می‌باشد. از سال ۱۹۲۵ پیشروی آب شور در رودخانه‌های اروند و بهمن‌شیر به تناوب مشاهده شده است. آب رودخانه به مصرف آبیاری نخلهای خرما در سواحل رودخانه و پالایشگاه نفت آبادان، شهر آبادان و خرمشهر می‌رسد. پیشروی آب شور به درختان خرما که در نزدیکی خلیج فارس قرار دارند (ناحیه قصبه) و گاهی تا نزدیکی محل آبگیر پالایشگاه آبادان اثرات نامطلوب گذاشته است (Sweco, 1976).

۳- شرح مدل بکار رفته

در این تحقیق از نسخه ۳/۶ مدل عددی CE-QUAL-W2 جهت پیش‌بینی و شبیه‌سازی هیدرودینامیک و شوری رودخانه اروند استفاده شده است. CE-QUAL-W2 یک برنامه مدل‌سازی هیدرودینامیک و کیفیت آب به صورت دو بعدی (متوسط‌گیری در جهت عرض) می‌باشد که توسط واحد مطالعات آبراهه‌های مهندسی ارتش آمریکا در سال ۱۹۹۵ تهیه شده است (Cole and Wells, 2008). حل معادلات میانگین عرضی بر اساس روش حل تفاضل محدود می‌باشد. کاربردهای این برنامه شامل مدل‌سازی طولانی مدت و متغیر زمانی کیفیت آبهای سطحی نظیر دریاچه‌ها، مخازن و خورهای رودخانه‌ای می‌باشد و برای مدل‌سازی خورهای رودخانه‌ای کم عرض مناسب می‌باشد. CE-QUAL-W2 دارای قابلیت‌های زیادی از جمله شبیه‌سازی هیدرودینامیک سازه‌های آبی (لوله، پمپ، سرریز، دریچه) و همچنین شبیه‌سازی مسائل کیفی مختلف (مانند: ردیاب پایستار، کلیفرم، CBOD، جلبک، اکسیژن محلول، نیترات- نیتريت، فسفر آلی، گازهای محلول، آهن و ...) است.

۳-۱- معادلات بخش هیدرودینامیک

در این بخش معادلات حاکم عبارتند از: معادله پیوستگی (معادله سطح آزاد آب) و معادله اندازه حرکت افقی و قائم. معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial UB}{\partial x} + \frac{\partial WB}{\partial z} = qB \quad (1)$$

که x و z مختصات افقی و قائم، B عرض، U سرعت افقی میانگین عرضی، W سرعت قائم میانگین عرضی و q شار خالص بر واحد حجم سلول می‌باشند.

معادله اندازه حرکت در جهت x :

زمانی کمتر از ۲۰ ثانیه تغییرات جواب‌های مدل کاملاً ناچیز بوده است. بدین ترتیب گام زمانی بیشینه برابر ۲۰ ثانیه انتخاب گردیده است.

۴-۱- واسنجی هیدرودینامیک

در این بخش به منظور واسنجی مدل از ترازهای سطح آب اندازه‌گیری شده در آبادان و قصبه برای روزهای ۹ و ۱۰ دسامبر به عنوان شرایط مرزی بالادست و پایین دست استفاده شده است. به منظور دستیابی به ضریب زبری مانینگ بهینه، مقادیر تراز سطح آب محاسبه شده توسط مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده متناظر در ایستگاه خسروآباد در روزهای ذکر شده مقایسه شده است. که کمترین میزان خطا برابر ۵/۳۵ سانتی‌متر به ازای ضریب زبری مانینگ ۰/۰۲۲ بدست آمده و این مقدار بیانگر عملکرد مناسب مدل می‌باشد. در شکل ۲ قدر مطلق خطای میانگین به ازای ضریب زبری‌های مختلف و در شکل ۳ مقادیر تراز سطح آب اندازه‌گیری و محاسبه شده توسط مدل به ازای ضریب زبری بهینه با یکدیگر مقایسه شده است.

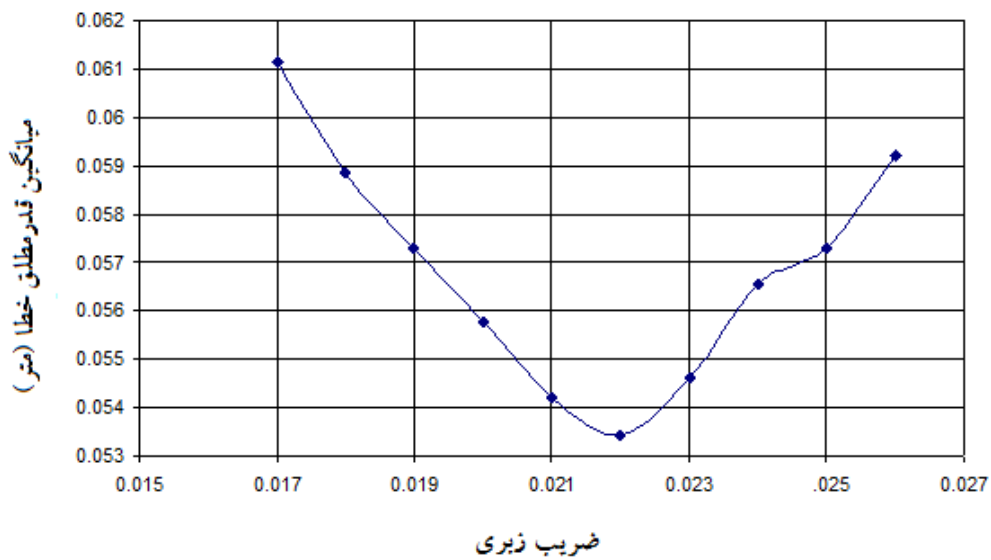
در این جدول، l_m : طول اختلاط، z : مختصه قائم، H : عمق، u : سرعت افقی، Ri : عدد ریچاردسون، C : ثابت (مفروض ۰/۱۵)، κ : ثابت فون-کارمن، τ_{wy} : برش عرضی ناشی از باد، k : عدد موج، p : چگالی سیال، $\Psi(x) = \max(0, x)$ ، v : لزجت مولکولی، C_1 : ثابت تجربی (مفروض ۱۰۰) می‌باشند. همانگونه که قبلاً بیان شد مدل K-ε اخیراً در نسخه ۳/۶ به برنامه اضافه شده و در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است.

۴-۲- واسنجی و صحت سنجی مدل

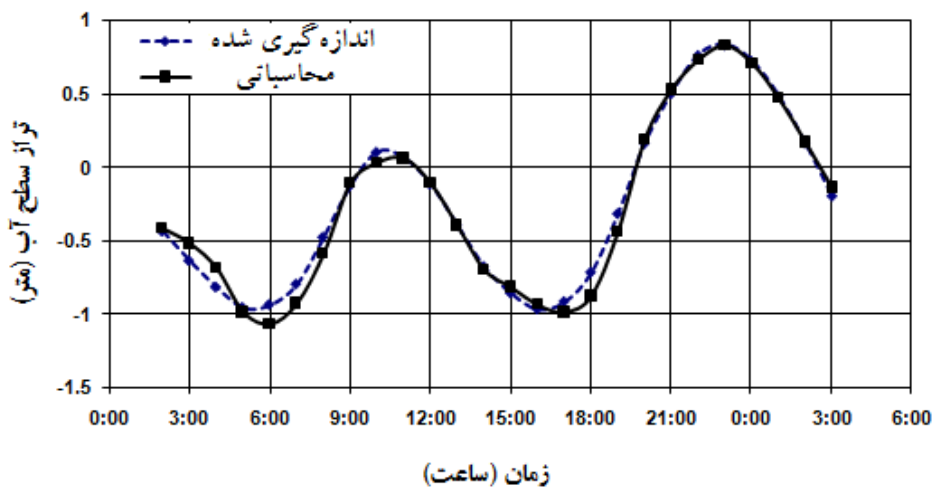
جهت شبیه‌سازی هیدرودینامیک خور رودخانه ای اروند در بازه آبادان - خلیج فارس، طول رودخانه به ۴۳ کیلومتر با طول متوسط ۱۸۳۰ متر تقسیم شده و عمق متوسط لایه‌ها ۱ متر تعریف شده است. در عمیق‌ترین نقطه رودخانه تعداد لایه‌ها به ۲۵ می‌رسد. در مورد گام زمانی، ذکر این موضوع حائز اهمیت است که مدل، دارای الگوریتم محاسبه خودکار گام زمانی بوده و تنها نیاز به تعیین گام زمانی بیشینه می‌باشد. شیوه انتخاب بیشینه گام زمانی بدین شکل بوده که با انتخاب گام زمانی در محدوده ۱ تا ۵۰۰ ثانیه جواب‌های مدل بررسی شده است و بر طبق مشاهدات انجام شده با انتخاب گام

جدول ۱- مدل‌های محاسبه لزجت گردابی قائم

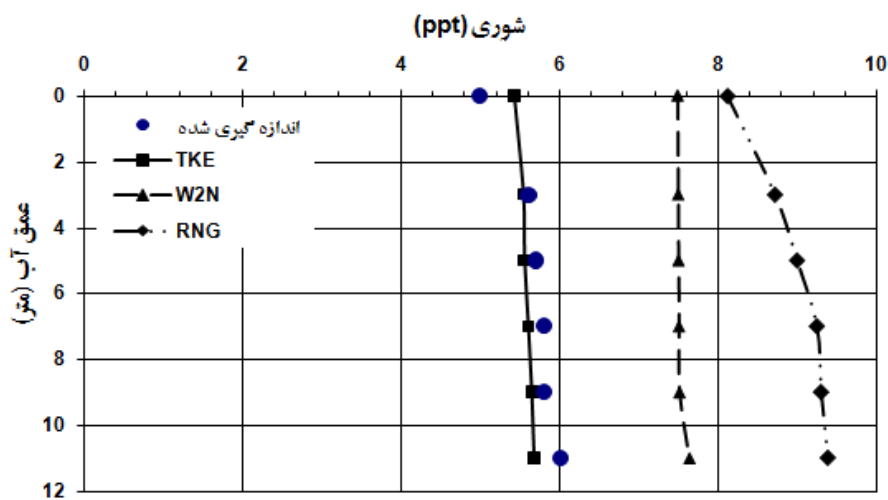
مدل	رابطه	مرجع
W2N (With mixing length of Nickuradse)	$v_t = \kappa \left(\frac{l_m^2}{2} \right) \sqrt{\left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{wy} e^{-2kz}}{\rho v_t} \right)^2} e^{(-CRi)}$ $l_m = H \left[0.14 - 0.08 \left(1 - \frac{z}{H} \right)^2 - 0.06 \left(1 - \frac{z}{H} \right)^4 \right]$	Cole & Buchak(1995) and Rodi (1993)
RNG (Renormalization group)	$v_t = v \left[1 + \Psi \left(3\kappa \left(\frac{z u_*}{v} \right)^3 \left(1 - \frac{z}{H} \right)^3 - C_1 \right) \right]^{1/3} e^{-\alpha z}$	Simoes(1998)
TKE (Turbulent Kinetic Energy)	$v_t = C_\mu \frac{K^2}{\varepsilon}$ <p>where K and ε are defined from</p> $\frac{\partial KB}{\partial t} + \frac{\partial KBU}{\partial x} + \frac{\partial KBW}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left(B \frac{v_t}{\sigma_K} \frac{\partial K}{\partial z} \right)$ $- \frac{\partial}{\partial x} \left(B \frac{v_t}{\sigma_K} \frac{\partial K}{\partial x} \right) = B(P + G - \varepsilon + P_K)$ $\frac{\partial \varepsilon B}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon BU}{\partial x} + \frac{\partial \varepsilon BW}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left(B \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right)$ $- \frac{\partial}{\partial x} \left(B \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) = B \left(C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{K} P + C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{K} + P_\varepsilon \right)$	



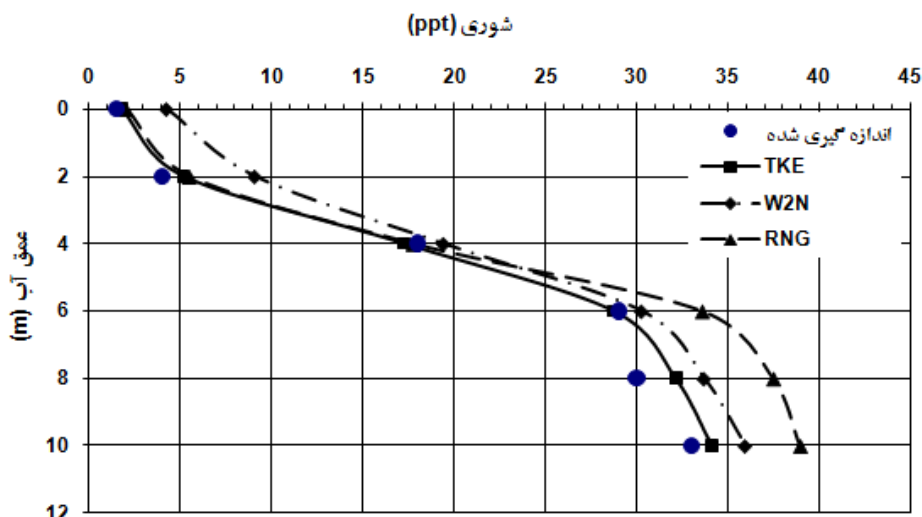
شکل ۲- مقادیر قدرمطلق خطای میانگین به ازای ضریب زبری های مختلف



شکل ۳- ترازهای آب اندازه گیری شده و محاسبه شده برای خسروآباد در یک دوره جزر و مدی



شکل ۴- نیمرخ های شوری اندازه گیری شده و محاسبه شده در ایستگاه شماره ۹



شکل ۵- نیمرخهای شوروی اندازه گیری شده و محاسبه شده در قصبه

۲-۴- واسنجی مدل کیفیت آب (شوروی)

در این بخش به منظور بدست آوردن ضریب پخش طولی بهینه و همچنین انتخاب الگوریتم مناسب برای محاسبه لزجت گردابی قائم، از دو نیمرخ شوروی اندازه گیری شده به ترتیب در ایستگاه اندازه گیری شوروی شماره ۹ و قصبه (محل تقریبی قرارگیری ایستگاهها در شکل ۱ نشان داده شده است) استفاده شده است که این نیمرخها هر دو حالت جریان شوروی آمیخته و لایه‌ای را دربرمی‌گیرد. شرایط مرزی بکار گرفته شده شامل ترازهای سطح آب برای دو روز ذکر شده برای ایستگاههای آبادان و خلیج فارس بوده است. میزان شوروی مرز آبادان در بالادست، برابر ppt ۱/۲ و برای خلیج فارس برابر ppt ۳۸ در نظر گرفته شده است. به منظور انتخاب الگوریتم مناسب جهت محاسبه لزجت گردابی قائم، ۳ الگوریتم K-ε، W2N و RNG مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. الگوریتم K-ε در نسخه جدید مدل به آن اضافه شده است و الگوریتم W2N بر اساس تحقیقات گذشته، مناسب‌ترین الگوریتم محاسبه لزجت گردابی قائم بوده است (Zahed et al., 2008). الگوریتم RNG نیز در کنار دو مدل دیگر به صورت جنبی مورد ارزیابی قرار گرفته است. اشکال ۴ و ۵ نتایج مقایسه جواب‌های مدل با مقادیر نیمرخهای شوروی اندازه گیری شده را برای دو ایستگاه شماره ۹ و قصبه که به ترتیب حالت‌های آمیخته و لایه‌ای داشته‌اند نمایش می‌دهد. جدول ۲ نتایج الگوریتم‌های مختلف را در پیش‌بینی طول نفوذ شوروی برای جریان در حالت آمیخته نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌شود، بهترین عملکرد مربوط به الگوریتم K-ε بوده که با خطای میانگین ppt ۰/۲۱۵، خطای جذر میانگین مربعات ۰/۰۶۱ و اندیس پراکندگی ۰/۰۱، جواب‌های قابل قبولی داشته است. جدول ۳ نیز نتایج مربوط به

الگوریتم‌های مختلف را برای جریان لایه‌ای نمایش می‌دهد. در این حالت نیز بهترین عملکرد مربوط به الگوریتم K-ε با خطای میانگین ppt ۰/۹۴۸ بوده، خطای جذر میانگین مربعات ۱/۳۳۵ و اندیس پراکندگی ۰/۰۶۹ که حاکی از عملکرد مناسب مدل بوده است.

به منظور صحت‌سنجی مدل از ۱۲ نیمرخ شوروی مختلف، اندازه‌گیری شده در ایستگاههای مختلف رودخانه استفاده شده است که خلاصه‌ای از نتایج این مرحله در جدول ۴ آمده و همانگونه که مشاهده می‌شود مدل K-ε دارای عملکرد مناسبی بوده است.

۵- ارزیابی روش کنترل و نتوری

مدل واسنجی شده نهایتاً برای ارزیابی میزان کارایی روش کنترل و نتوری بکار گرفته شده است. در روش کنترل و نتوری همانگونه که از نام آن مشخص است، یک تنگ شدگی یا به عبارتی یک گلوگاه در بخشی از کانال به وجود می‌آید و بنابراین با ایجاد این و نتوری سرعت‌ها در کانال افزایش یافته و گرادیان فشار خارجی بر روی جریان آب کاهش می‌یابد. نتیجه این امر آن است که عدد فرود در محل تنگ‌شدگی افزایش یافته و از مقدار بحرانی آن برای محدود کردن پیشروی گوه شوروی بیشتر خواهد شد. بدین وسیله ممکن است بتوان حرکت گوه شوروی را تا حدودی محدود نمود. از دلایل انتخاب روش کنترل و نتوری می‌توان به این نکته اشاره کرد که اولاً اجرای این روش دارای پیچیدگیهای کمتری در مقایسه با برخی روشهای سازه‌ای می‌باشد و همچنین نیازمند به کارگیری تکنولوژی پیچیده‌ای نیست. نکته دیگر اینکه هزینه‌های به کارگیری آن در مقایسه با برخی روشهای سازه‌ای نسبتاً پایین‌تر است.

جدول ۲- مقادیر خطا در در ایستگاه شماره ۹

میانگین قدرمطلق خطا (ppt)			جزر میانگین مربعات خطا (ppt)			اندیس پراکندگی		
K-ε	W2N	RNG	K-ε	W2N	RNG	K-ε	W2N	RNG
۰/۲۲	۱/۸۹	۳/۳۱	۰/۰۶	۳/۶۰	۱۱/۰	۰/۰۱	۰/۶۴	۱/۹۵

جدول ۳- مقادیر خطا در ساعت در قصبه

میانگین قدرمطلق خطا (ppt)			جزر میانگین مربعات خطا (ppt)			اندیس پراکندگی		
K-ε	W2N	RNG	K-ε	W2N	RNG	K-ε	W2N	RNG
۰/۹۵	۲/۸۸	۳/۴۰	۱/۳۴	۹/۹۸	۱۹/۳۴	۰/۰۷	۰/۵۲	۱/۰

جدول ۴- مقایسه دقت الگوریتم‌های مختلف در پیش بینی نفوذ شوری برای دو حالت آمیخته و لایه‌ای

	حالت آمیخته			حالت لایه‌ای		
	میانگین قدرمطلق خطا	جزر میانگین مربعات خطا	اندیس پراکندگی	میانگین قدرمطلق خطا	جزر میانگین مربعات خطا	اندیس پراکندگی
K-ε	۰/۱۷	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۵۴	۰/۵۶	۰/۰۷
W2N	۰/۵۹	۰/۹۴	۰/۳۰	۱/۵۶	۴/۲۹	۰/۵۴
RNG	۲/۵۰	۱۶/۹۹	۱۰/۶۸	۵/۰۸	۶۲/۹۷	۱۴/۹۵

خود داشته و همانند یک تپه زیرآبی پس از یک ناحیه با عمق زیاد قرار دارند و بنابراین در شرایط طبیعی، آب شور در پشت این دیواره به تله می‌افتد. با کاهش عمق این نقاط، این عملکرد تشدید می‌شود. نتایج حاکی از آن بوده که بکارگیری روش کاهش عمق در ۳ کیلومتر بالادست دهانه رودخانه بهترین عملکرد را داشته است (جدول ۵).

۲- روش کاهش عرض: این روش نیز با بکارگیری شش راهکار کاهش عرض مورد بررسی قرار گرفته است که شامل کاهش عرض به میزان ۲۰۰ متر، ۳۰۰ متر، ۴۰۰ متر، ۵۰۰ متر، ۶۰۰ و ۷۰۰ متر می‌شود. این راهکارها نیز برای چهار منطقه بکار گرفته شده‌اند: الف) دهانه رودخانه، ب) ۳ کیلومتر بالادست دهانه رودخانه، ج) ایستگاه اندازه‌گیری شوری شماره ۴ (عمق و عرض اولیه: ۱۲ متر و ۱۲۰۰ متر)، د) ایستگاه اندازه‌گیری شوری شماره ۱ (عمق و عرض اولیه: ۱۵ متر و ۵۹۰ متر). همانند قبل، گزینه‌های ۱ و ۲ در نزدیکی دهانه رودخانه انتخاب شده‌اند و گزینه‌های ۳ و ۴ نیز بدین دلیل که بطور طبیعی دارای عرض کمتری از نقاط قبل از خود می‌باشند بکار گرفته شده‌اند. در نهایت، بهترین نتایج برای این روش در ۳ کیلومتر بالادست دهانه رودخانه بدست آمده است که نتایج حاصله در جدول ۶ ارائه شده‌اند.

همچنین با توجه به اینکه در این روش، مسیر جریان آب بین بالادست و پایین دست بطور کامل قطع نمی‌شود، نسبت به روشهایی که مسیر جریان رودخانه را بطور کامل مسدود می‌کنند، مشکلات کمتری در زمینه کشتیرانی و نیز آلودگیهای زیست محیطی بوجود خواهد آمد. طول نفوذ شوری بر مبنای میزان پیشروی شوری ارائه شده توسط Van der Tuin (1991) تعیین شده است. این روش در سه بخش مجزای کاهش عرض، کاهش عمق و کاهش همزمان این دو پارامتر مورد ارزیابی قرار گرفته که در ذیل آمده است.

۱- روش کاهش عمق: این روش با بکارگیری سه راهکار کاهش عمق به شکل کاهش عمق تا ۴ متر مورد بررسی قرار گرفته است. هر یک از این راهکارها برای چهار منطقه بکار گرفته شده‌اند: الف) دهانه رودخانه (عمق و عرض اولیه: ۱۹ متر و ۲۳۰۰ متر)، ب) ۳ کیلومتر بالادست دهانه رودخانه (عمق و عرض اولیه: ۱۷ متر و ۱۸۰۰ متر)، ج) ایستگاه اندازه‌گیری شوری شماره ۵ (عمق و عرض اولیه: ۱۲ متر و ۱۲۰۰ متر)، د) ۳ کیلومتر بالادست ایستگاه اندازه‌گیری شوری شماره ۵ (عمق و عرض اولیه: ۱۲ متر و ۱۲۰۰ متر). گزینه‌های ۱ و ۲ همانگونه که مشخص است بدلیل قرارگیری در نزدیکی دهانه رودخانه استفاده شده است. منطقه قرارگیری گزینه‌های ۳ و ۴ بطور طبیعی عمق کمتری نسبت به نقاط قبل از

جدول ۵- نتایج بکارگیری روش کاهش عمق در ۳ کیلومتر بالادست دهانه رودخانه اروند

کاهش عمق در ۳ کیلومتر بالادست دهانه رودخانه						
میزان کاهش عمق	دبی ۱۰۴۰ (m ³ /s)		دبی ۵۲۰ (m ³ /s)		دبی ۲۶۰ (m ³ /s)	
	طول نفوذ (km)	درصد کاهش طول نفوذ	طول نفوذ (km)	درصد کاهش طول نفوذ	طول نفوذ (km)	درصد کاهش طول نفوذ
حالت پایه	۲۹/۸	—	۵۷/۵	—	۵۷/۵	—
تا ۸ متر	۲۱/۳۷	۲۸/۳	۳۷/۵۹	۳۴/۶۳	۵۷/۵	۰
تا ۶ متر	۲۱/۳۷	۲۸/۳	۳۲/۰۴	۴۴/۲۸	۵۷/۵	۰
تا ۴ متر	۱۹/۷۵	۳۳/۷۲	۲۹/۸	۴۸/۱۷	۵۷/۵	۰

جدول ۶- نتایج بکارگیری روش کاهش عرض در ۳ کیلومتر بالادست دهانه رودخانه اروند

کاهش عرض در ۳ کیلومتر بالادست دهانه رودخانه						
میزان کاهش عرض	دبی ۱۰۴۰ (m ³ /s)		دبی ۵۲۰ (m ³ /s)		دبی ۲۶۰ (m ³ /s)	
	طول نفوذ (km)	درصد کاهش طول نفوذ	طول نفوذ (km)	درصد کاهش طول نفوذ	طول نفوذ (km)	درصد کاهش طول نفوذ
حالت پایه	۲۹/۸	—	۵۷/۵	—	۵۷/۵	—
به میزان ۲۰۰ متر	۲۷/۷	۷	۵۷/۵	۰	۵۷/۵	۰
به میزان ۳۰۰ متر	۲۶/۰۹	۱۲/۴۵	۵۴/۷۹	۴/۷	۵۷/۵	۰
به میزان ۴۰۰ متر	۲۲/۹۴	۲۳/۰۲	۵۴/۷۹	۴/۷	۵۷/۵	۰
به میزان ۵۰۰ متر	۲۲/۹۴	۲۳/۰۲	۴۸/۲۶	۱۶/۰۷	۵۷/۵	۰
به میزان ۶۰۰ متر	۲۱/۳۷	۲۸/۲۸	۳۷/۶	۳۴/۶	۵۷/۵	۰
به میزان ۷۰۰ متر	۲۱/۳۷	۲۸/۲۸	۳۵/۷۵	۳۷/۸۳	۵۷/۵	۰

براساس میزان کاهش طول نفوذ شوری بیان گردیده است. در ستون آخر جدول ۸، ایستگاه نهایی نفوذ شوری مشخص شده است.

با توجه به جدول ۸ می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:

- ۱- با کاهش عمق تا ۴ متر در ۳ کیلومتر بالادست دهانه رودخانه طول نفوذ شوری برای دبی حداقل سالانه به میزان ۴۸/۱۷ درصد کاهش پیدا می‌کند که این بیشترین میزان کاهش طول نفوذ شوری برای دبی حداقل سالانه می‌باشد. بدین ترتیب مشکل شوری آب برای مناطق بالادست ایستگاه شماره ۲ از جمله منطقه خسروآباد، تا حدود زیادی کاهش پیدا خواهد کرد.
- ۲- با توجه به نتایج بدست آمده، بکارگیری هیچ یک از روشهای فوق در کاهش طول نفوذ شوری برای دبی پایینی در حد ۲۶۰ مترمکعب بر ثانیه موثر نخواهد بود.
- ۳- در مجموع می‌توان گفت که موثرترین روش در میان راهکارهای ارزیابی شده، کاهش عمق تا ۴ متر در ۳ کیلومتر بالادست دهانه رودخانه بوده است که عملکرد مناسبی را برای هر دو دبی متوسط و حداقل سالانه داشته است.

۳- ارزیابی روش کاهش همزمان عرض و عمق: این روش نیز با بکارگیری شش راهکار کاهش همزمان عرض و عمق بررسی شده است که عبارتند از: کاهش عرض به میزان ۲۰۰ متر و کاهش عمق تا ۱۴ متر، عرض به میزان ۳۰۰ متر و عمق تا ۱۲ متر، عرض به میزان ۴۰۰ متر و عمق تا ۱۰ متر، ۵۰۰ متر و ۸ متر، ۶۰۰ متر و ۶ متر و در پایان ۷۰۰ متر و ۴ متر. این شش راهکار نیز برای چهار منطقه بکارگرفته شده‌اند. الف) دهانه رودخانه، ب) ۳ کیلومتر بالادست دهانه رودخانه، ج) ایستگاه اندازه‌گیری شوری شماره ۵ و د) ایستگاه اندازه‌گیری شوری شماره ۴. دو ایستگاه آخر بعد از دهانه رودخانه و ۳ کیلومتر بالادست دهانه رودخانه دارای عملکرد مناسبی به ترتیب در روشهای کاهش عمق و کاهش عرض بوده‌اند. اما بهترین نتایج برای این روش نیز در ۳ کیلومتر بالادست دهانه رودخانه بدست آمده است که در جدول ۷ نتایج آن مشاهده می‌شوند.

در جدول ۸ نتایج بکارگیری روشهای مختلف بر مبنای بهترین گزینه بکار گرفته شده در مورد هر روش آمده‌اند. این نتایج برای سه دبی ۱۰۴۰، ۵۲۰ و ۲۶۰ متر مکعب بر ثانیه بوده و کارایی هر روش

جدول ۷- نتایج بکارگیری روش کاهش همزمان عرض و عمق در ۳ کیلومتر بالادست دهانه خور رودخانه‌ای اروند

کاهش همزمان عرض و عمق در ۳ کیلومتر بالادست دهانه رودخانه						
میزان کاهش عرض و عمق	دبی ۱۰۴۰ (m ³ /s)		دبی ۵۲۰ (m ³ /s)		دبی ۲۶۰ (m ³ /s)	
	طول نفوذ (km)	درصد کاهش طول نفوذ	طول نفوذ (km)	درصد کاهش طول نفوذ	طول نفوذ (km)	درصد کاهش طول نفوذ
حالت پایه	۲۹/۸	۰	۵۷/۵	۰	۵۷/۵	۰
عرض ۵۰۰ متر و عمق تا ۸ متر	۲۱/۳۷	۲۸/۲۸	۳۴	۴۷/۸۷	۵۷/۵	۰
عرض ۶۰۰ متر و عمق تا ۶ متر	۲۱/۳۷	۲۸/۲۸	۳۲/۰۹	۴۴/۱۹	۵۷/۵	۰
عرض ۷۰۰ متر و عمق تا ۴ متر	۱۹/۷۵	۳۳/۷۲	۳۲/۰۹	۴۴/۱۹	۵۷/۵	۰

جدول ۸- مقایسه کلی راهکارهای کنترل نفوذ شوری برای خور رودخانه‌ای اروند

راهکار کنترل نفوذ شوری	محل بکارگیری	کاهش طول نفوذ (%)			نفوذ شوری تا ایستگاه		
		۱۰۴۰ (m ³ /s)	۵۲۰ (m ³ /s)	۲۶۰ (m ³ /s)	۱۰۴۰ (m ³ /s)	۵۲۰ (m ³ /s)	۲۶۰ (m ³ /s)
کاهش عمق تا ۴ متر	۳ کیلومتر بالادست دهانه رودخانه	۳۳/۷۲	۴۸/۱۷	۰	شماره ۳	شماره ۲	آبادان
کاهش عرض به میزان ۷۰۰ متر	۳ کیلومتر بالادست دهانه رودخانه	۲۸/۲۸	۳۷/۸۳	۰	شماره ۲	خسروآباد	آبادان
کاهش عرض به میزان ۷۰۰ متر و عمق تا ۴ متر	۳ کیلومتر بالادست دهانه رودخانه	۳۳/۷۲	۴۴/۱۹	۰	شماره ۳	شماره ۴	آبادان
افزایش ضریب زبری مانینگ تا ۰/۰۸	از دهانه رودخانه تا ۱ کیلومتر پایین دست قصبه	۴۰	۲۰/۵۲	۰	شماره ۴	شماره ۱۰	آبادان
افزایش ضریب زبری مانینگ تا ۰/۰۸	از ایستگاه اندازه گیری شوری شماره ۱- تا شماره ۲	۱۲/۴۵	۴۴/۷۲	۰	شماره ۱	شماره ۴	آبادان

عددی دو بعدی متوسط گیری شده در عرض شبیه سازی گردید. در واسنجی مدول هیدرودینامیک جریان، با استفاده از ترازهای سطح آب، ضریب زبری مانینگ بهینه بدست آمد و در واسنجی مدول شوری، ضریب پخش طولی و همچنین الگوریتم لزجت گردابی قائم مناسب تعیین گردید. در این راستا نیمرخ‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده توزیع قائم شوری در محل دو ایستگاه منتخب مورد مقایسه قرار گرفتند. این مقایسه نشان داد که از بین الگوریتم‌های لزجت گردابی قائم، الگوریتم K-ε مناسب ترین الگوریتم می‌باشد. صحت‌سنجی مدل نیز با مقایسه نیمرخ‌های قائم شوری انجام گرفت که نتایج حاکی از قابلیت بالای مدل برای شبیه‌سازی جریان و شوری در خور رودخانه‌ای اروند بود. در ادامه با استفاده از مدل صحت‌سنجی شده، میزان کارایی روش کنترل و نتوری در کنترل نفوذ شوری در خور رودخانه‌ای اروند مورد بررسی قرار گرفت. این روش با سه حالت مختلف کاهش عرض، کاهش عمق و کاهش همزمان عرض و عمق و به ازاء سه دبی مختلف رودخانه، دبی ۱۰۴۰ مترمکعب بر ثانیه (دبی متوسط سالانه)، دبی ۵۲۰ مترمکعب بر ثانیه (دبی حداقل سالانه) و دبی ۲۶۰ مترمکعب بر ثانیه (یک دبی حداقل

ذکر این نکته حائز اهمیت است که بر پایه بررسی صورت گرفته، با کاهش عمق به کمتر از ۴ متر و نیز با کاهش بیش از ۷۰۰ متر عرض، تأثیری در کاهش بیشتر طول نفوذ شوری ایجاد نمی‌شود. دلیل این پدیده را می‌توان اینگونه توجیه کرد که مهمترین پارامتر تأثیرگذار بر میزان نفوذ شوری به بالادست، دبی آب شیرین و شدت جریان جزر و مدی می‌باشد. در شرایط جزر، دبی آب شیرین، آب شور نفوذ کرده به بالادست را به سمت عقب می‌راند، اما در شرایطی که مقطع رودخانه از یک حد معین کوچکتر باشد این عمل به کندی صورت گرفته و بخشی از آب شور نفوذ کرده در بالادست به تله خواهد افتاد. ضمن اینکه این میزان کاهش عرض و عمق می‌تواند مشکلاتی را برای کشتیرانی به همراه داشته باشد.

۶- نتیجه گیری

در این مطالعه، راهکارهای مختلف کنترل نفوذ شوری در خور رودخانه‌ای اروند مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور ابتدا هیدرودینامیک جریان و توزیع شوری در آن با استفاده از یک مدل

Dyer, K. R. (1973) *Estuaries: A Physical Introduction*, John Wiley, New York, 140p.

Haralambidou, K., Sylaios, G. K. and Tsihrinitzis, V. A. (2003) "Testing alternatives for salt wedge management in an estuary with the use of monitoring and a mathematical model," *Global Nest: the International Journal*, 5(2), pp. 107-118.

McAnally, W. H. and Pritchard D. W. (1997) "Salinity control in Mississippi River under drought flows," *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, American Society of Civil Engineering 123(1), pp. 34-40.

Nakai, M. and Arita, M. (2002) "An experimental study on the prevention of saline wedge intrusion by an air curtain in rivers," *Journal of Hydraulic Research*, 40(3), pp. 333-339.

Rodi, W. (1993) *Turbulence Models and Their Application in Hydraulics*, 3rd edition, IAHR, A.A. Balkema, Rotterdam, 316p.

Simoes, F. (1998) "An eddy viscosity model for shallow-water flows," *Proceedings of the international Conference on Water Resources Engineering*, 98, ASCE, NY, pp. 1858-1863.

Sweco, (1976) *Abadan Island and Irrigation Project Report, Hydraulic Condition and Salt Water Mathematical Model Studies*, Khuzestan Water and Power Authority.

Van der Tuin, H. (1991) *Guidelines on the Study of Seawater Intrusion into Rivers*, Prepared for the International Hydrological Programme by the Working Group of Project 4.4b (IHP-III) UNESCO.

Zahed, F., Etemad-Shahidi, A. and Jabbari, E. (2008) "Modeling of salinity intrusion under different hydrological condition in Arvand River Estuary," *Canadian Journal of Civil Engineering*, 35, pp. 1476-1480.

فرضی) صورت گرفت. نتایج نشان دادند که کاهش عمق تا ۴ متر و همچنین کاهش عرض تا ۷۰۰ متر تأثیر قابل توجهی بر کاهش طول نفوذ شوری نخواهند داشت. علاوه بر این هیچکدام از سه روش، برای دبی‌های کم در حد ۲۶۰ مترمکعب بر ثانیه موثر نخواهند بود. در نهایت نتایج نشان دادند که بهترین روش برای کنترل نفوذ شوری در این خور رودخانه‌ای، کاهش عمق تا ۴ متر در فاصله ۳ کیلومتری از دهانه می‌باشد که در نتیجه مشکل شوری در مناطق بالادست ایستگاه شماره ۲ تا حد زیادی کاهش خواهد یافت.

پی نوشت

1-Mesotidal

۷- مراجع

Berger, R. C., Tate, J. N. and Carrillo, A. R. (2002) *Salinity Changes in Pontchartrain Basin Estuary, Louisiana, Resulting from Mississippi River-Gulf Outlet Partial Closure Plans with Width Reduction*, US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center.

Burt, N. and Rees, A. (2001) *Guidelines for the Assessment and Planning of Estuarine Barrages*, Thomas Telford, 483p.

Cole, T. M. and Buchak, E. (1995) *CE-QUAL-W2, A Two Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 2.0*, Technical Report, EI-95-May 1995.

Cole, T. M. and Wells S. A. (2008) *CE-QUAL-W2: A Two Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 3.6*, Prepared for U.S Army Corps of Engineers Waterway Experiment Station.