

# بررسی تأثیر تراز آب شیرین رودخانه، چگالی آب دریا و کارایی سیستم پردهی حباب هوا در جلوگیری از پیشروی آب شور در آب‌های سطحی

اکرم طالبی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

سیدعلی اکبرصالحی نیشابوری\* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی عمران شریف، تابستان (۱۴۰۰)  
دوری ۲ - ۳۷، شماره ۲/۲، ص. ۸۵-۹۴، (پژوهشی)

پیشروی آب شور دریا به سمت رودخانه باعث تنزل کیفیت آب شیرین می‌شود. کنترل هیدرولیکی پیشروی آب دریا به منظور کاستن از تبعات منفی آن، مستلزم شناخت هر چه بهتر مکانیزم‌های مؤثر در آن است. در پژوهش حاضر سعی شده است تا با مدل‌سازی عددی نفوذ شوری در آب سطحی با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلوئنت به بررسی تأثیر تغییر چگالی آب دریا و همچنین تراز آب رودخانه در میزان نفوذ شوری پرداخته شود. همچنین سیستم پردهی حباب هوا به عنوان راهکاری برای جلوگیری از پیشروی شوری بررسی شده است. نتایج حاکی از آن است که چگالی آب دریا و تراز آب رودخانه با میزان پیشروی آب شور رابطه‌ی مستقیم دارند. بدین‌گونه که به ازاء افزایش  $2/3\%$  چگالی آب دریا، میزان پیشروی آب شور به میزان  $86\%$  بیشتر می‌شود و با کاهش  $19\%$  تراز رودخانه، نفوذ شوری به میزان  $45\%$  کاهش می‌یابد. همچنین سیستم پردهی حباب هوا با ایجاد جریان چرخشی از پیشروی آب شور در آب شیرین جلوگیری می‌کند.

واژگان کلیدی: تداخل آب شور و شیرین، تراز آب شیرین رودخانه، چگالی آب دریا، پردهی حباب هوا، نفوذ آب شور.

akram.talebi@modares.ac.ir  
salehi@modares.ac.ir

## ۱. مقدمه

ناشی از آن، از جمله: تنزل کیفیت آب‌های زیرزمینی و نشست زمین و همچنین پرهزینه بودن احیای منابع آب زیرزمینی، لازم است که منابع آب زیرزمینی به عنوان یک منبع تأمین آب کنار گذاشته شوند و به منابع آب سطحی به عنوان یک منبع تأمین آب شیرین توجه ویژه شود.

به طور کلی کیفیت آب شیرین، هم به دلایل زیست محیطی و هم به دلایل استفاده از آن برای کشاورزی و آشامیدن، اهمیت زیادی دارد.<sup>[۱]</sup> کیفیت منابع آب شیرین علاوه بر اینکه به‌طور مصنوعی (آلودگی‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی) در معرض خطر است، به صورت طبیعی نیز در معرض خطر قرار دارد. یکی از عوامل آلوده‌کننده‌ی طبیعی اشاره شده، پدیده‌ی پیشروی آب شور دریا است. پیشروی آب شور دریا، یک فرایند طبیعی است که به علت تفاوت چگالی آب شور نسبت به آب شیرین صورت می‌گیرد.<sup>[۲]</sup> به عبارت دیگر، چگالی بیشتر آب شور دریا به علت داشتن املاحی از قبیل نمک، سبب قرار گرفتن آن در زیر آب شیرین می‌شود و در سطح تماس، آب دریا به شکل یک گوه در آب شیرین نفوذ می‌کند. نفوذ نمک از طریق آب‌های ساحلی می‌تواند تهدید جدی برای آب آشامیدنی، صنعت و کشاورزی، به ویژه در سیستم‌های رودخانه‌ی جزر و مدی با شیب بستر متوسط باشد.<sup>[۳]</sup> علاوه

آب به عنوان حیاتی‌ترین و فراوان‌ترین ماده در دنیا شناخته می‌شود که حیات بشر همواره درگرو آن بوده است. در دنیای امروز که بحران آب به یک مسئله‌ی اجتناب‌ناپذیر تبدیل شده است، توجه به منابع آب و استفاده‌ی بهینه از آن‌ها امری ضروری بوده و این موضوع چالش‌های جدیدی را فراروی متخصصان و کارشناسان مسائل آب قرار داده است.

با توجه به اینکه فقط حدود  $2/5\%$  از آب‌های موجود در جهان شیرین است و آب‌های زیرزمینی با سهم حدود  $30/1\%$  از آب‌های شیرین، بالاترین حجم قابل دسترس آب‌های شیرین محسوب می‌شوند، بنابراین از دهه‌های گذشته، آب‌های زیرزمینی یکی از منابع عمده‌ی آب مصرفی در سراسر جهان به شمار رفته‌اند، به گونه‌ی که حتی در صورت وجود منابع آب سطحی و عدم کمبود مسئله‌ی آب، ارجحیت استفاده از منابع آب زیرزمینی به دلایلی غیرقابل چشم‌پوشی بوده است،<sup>[۱]</sup> ولیکن هم‌اکنون با توجه به افت شدید تراز آب‌های زیرزمینی و پیامدهای مخرب

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳/۳/۱۳۹۹، اصلاحیه ۲۳/۹/۱۳۹۹، پذیرش ۱۰/۷/۱۳۹۹.

DOI:10.24200/J30.2020.55273.2717

بر آن، افزایش شوری آب رودخانه، اکوسیستم مناطق ساحلی را به خطر می‌اندازد و گونه‌های گیاهی و جانوری موجود در مناطق ساحلی را که نسبت به افزایش شوری آب حساس هستند، از بین می‌برد. مصب رودخانه‌ها و قفل کشتی‌رانی از مثال‌های واضح محلی هستند که نفوذ نمک از طریق آب سطحی صورت می‌گیرد که اگر به درستی با آن مقابله نشود، کیفیت آب شیرین به شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرد.<sup>[۸۷]</sup> در نتیجه، حفاظت منابع آب در شرایط افزایش تقاضا و کاهش منابع آب امری ضروری بوده و افزایش برداشت از منابع آب به منظور تأمین تقاضای آب به دلیل رشد جمعیت و تداوم توسعه مناطق ساحلی و تغییرات اقلیم از طریق تغییرات تراز آب دریاها، تشدید پیشروی آب شور را به یک مسئله جهانی تبدیل کرده است.

پدیده نفوذ شوری اولین بار توسط گبین<sup>۱</sup> (۱۸۸۹) در زمان برداشت آب از منابع زیرزمینی در آمستردام مشاهده شد. چندین سال بعد نیز هرزبرگ<sup>۲</sup> (۱۹۰۱) در جزایر آلمانی دریای شمال به تشریح پدیده نفوذ شوری پرداخت. این دو نفر مستقلاً به بیان معادله‌ی بر پایه تعادل استاتیکی بین آب شور و شیرین به شرح رابطه‌ی ۱ پرداختند که بعدها به معادله‌ی گبین - هرزبرگ مشهور شد:<sup>[۸۹]</sup>

$$h_t = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f \quad (۱)$$

که در آن  $h_s$  عمق نفوذ شوری از سطح آزاد دریا،  $\rho_s$  و  $\rho_f$  به ترتیب چگالی آب دریا و آب شیرین و  $h_f$  تراز سطح آب زیرزمینی نسبت به سطح آزاد دریاست. مطابق رابطه‌ی ۱، تفاوت در چگالی‌ها به‌عنوان عامل نفوذ شوری بیان شده است. از آن زمان به بعد و در دهه‌های پیشین، مطالعات در زمینه‌ی ذکر شده با سرعت بیشتری پیشرفت کرده و ارزیابی میزان پیشروی شوری در نقاط مختلف جهان انجام پذیرفته است. مهم‌ترین مطالعات تا سال ۱۹۳۰ را می‌توان رابطه‌ی تحلیلی ساده‌ی گبین - هرزبرگ قلمداد کرد. از آن به بعد، دامنه‌ی مطالعات گسترده‌تر و شرایط و فرض‌های مسئله به واقعیت نزدیک‌تر شد.<sup>[۹۰]</sup> و کم‌کم مطالعات از آب‌های زیرزمینی به آب‌های سطحی راه پیدا کرد. به‌گونه‌ی که آریتا<sup>۳</sup> و جیرکا<sup>۴</sup> (۱۹۸۷) با استفاده از معادلات حاکم، به پیش‌بینی خواص کلی گوه‌ی آب شور، از قبیل شکل گوه و عمق نفوذ کل در مصب رودخانه‌ها پرداختند و در نهایت دریافتند که طول نفوذ گوه شور، به عبارتی طول بین نوک گوه تا قسمت بحرانی، تابعی از عدد رینولدز جریان و عدد فرود دنسیمتریک است.<sup>[۹۱]</sup>

ساوینیچ<sup>۵</sup> و یانگتز<sup>۶</sup> (۲۰۱۱)، یک مدل تحلیلی برای نفوذ شوری در خور یانگتز<sup>۷</sup> چین ارائه کردند.<sup>[۹۲]</sup> همچنین در همان سال پاسخ نفوذ شوری به تغییرات جریان رودخانه و جزرومد در فصل خشک در خور مودامن<sup>۸</sup> چین توسط گانگ<sup>۹</sup> و شین<sup>۱۰</sup> بررسی و نتیجه‌گیری شد که رفتار نفوذ شوری در رودخانه‌ها بیشتر وابسته به میزان دبی جریان رودخانه است و زمانی که دبی رودخانه افزایش پیدا می‌کند، تأثیر افزایش سرعت جزر و مد کاهش می‌یابد.<sup>[۹۳]</sup>

در سال ۲۰۱۲، نیز رایس<sup>۱۱</sup> و همکاران به بررسی تأثیر افزایش تراز آب دریا در شوری رودخانه‌ها پرداختند و دریافتند که افزایش ۱ متری تراز آب دریا باعث پیشرفت نفوذ آب شور به ۱۰ کیلومتر بالادست می‌شود.<sup>[۹۴]</sup> همچنین مطالعات دیگری در همان سال، به منظور بررسی تأثیر افزایش تراز آب دریا در نفوذ شوری در رودخانه‌ها انجام شد. به‌عنوان مثال، بهویان<sup>۱۲</sup> و دانا<sup>۱۳</sup> گزارش کردند که با افزایش ۱ متری آب دریا، مقدار شوری در رودخانه گورای<sup>۱۴</sup> در بنگلادش به اندازه‌ی ۵/۵ PSU افزایش پیدا می‌کند.<sup>[۹۵]</sup>

در سال ۲۰۱۶ نیز چن<sup>۱۵</sup> و همکارانش با مطالعه بر روی رودخانه‌ی یانگتز به بررسی تأثیر افزایش تراز آب دریا در نفوذ شوری پرداختند.<sup>[۹۶]</sup> علاوه بر این، در مطالعات دیگری توسط وراگاس<sup>۱۶</sup> و همکاران (۲۰۱۷)، تأثیر تغییرات اقلیمی در

نفوذ شوری بررسی و نتیجه‌گیری شد که افزایش تراز آب دریا نسبت به کاهش دبی رودخانه، در افزایش طول نفوذ شوری تأثیر بیشتری دارد.<sup>[۱۷]</sup> رانگهو<sup>۱۷</sup> و همکاران (۲۰۱۷)، نیز یک مدل فیزیکی نفوذ آب شور برای تخمین و شبیه‌سازی توزیع مکانی شوری در رودخانه‌ها و خورها ارائه کردند.<sup>[۱۸]</sup>

تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی و طبیعی، نفوذ آب شور در رودخانه‌ی پیارل<sup>۱۸</sup> به یکی از مهم‌ترین مسائل اصلی در چین تبدیل شده است. بنابراین در سال ۲۰۱۹، لیو<sup>۱۹</sup> و همکاران به بررسی مسائل مربوط به نفوذ آب شور و ارائه‌ی اطلاعات برای بهره‌برداری پایدار از منابع آب در مصب رودخانه‌ها پرداختند.<sup>[۱۹]</sup> با توجه به آثار مخرب نفوذ شوری در اکوسیستم و شرایط محیطی، مین آهن<sup>۲۰</sup> و همکاران (۲۰۲۰)، با استفاده از کد دینامیک سیالات محیطی (EFDC)<sup>۲۱</sup> به بررسی نفوذ شوری در رودخانه‌ی سمجین<sup>۲۲</sup> به طول ۷۸ کیلومتر در کره پرداختند و دریافتند که ساخت سد و انتقال آب از زیرحوضه، منجر به کاهش جریان آب می‌شود و نفوذ شوری را در حدود ۱ کیلومتر در بالادست گسترش می‌دهد.<sup>[۲۰]</sup>

هم‌زمان با گسترش مطالعات در ارتباط با نفوذ شوری، مطالعات پیرامون به کارگیری روش‌هایی به منظور جلوگیری از تداخل آب شور و شیرین نیز شروع شد. با وجود بررسی و آزمون روش‌های متعدد به منظور پیشگیری از نفوذ شوری، پژوهشگران در تلاش برای دستیابی به روشی سازگار با محیط زیست بودند که سیستم پرده‌ی حباب هوا به عنوان روشی سازگار با محیط زیست مطرح شد. سیستم پرده‌ی حباب هوا، یک سازه‌ی مهندسی محسوب می‌شود که پتانسیل قابل توجهی در حفظ کیفیت آب دارد. در حقیقت، پرده‌ی حباب هوا با انتشار هوای فشرده در بدنه‌ی آب، یک میدان جریان ایجاد می‌کند که می‌تواند برای اهداف مهندسی، از جمله جلوگیری از پیشروی آب شور در آب‌های سطحی استفاده شود.<sup>[۲۱]</sup> به‌گونه‌ی که در سال ۱۹۹۳، تاکاشی ساساکی<sup>۲۳</sup> و تاکاشی آسایدا<sup>۲۴</sup> به دنبال به‌کاربردن روشی سازگار با محیط زیست به منظور کنترل گوه‌ی آب شور، سیستم پرده‌ی حباب هوا را آزمایش و از یک آبراهه‌ی آزمایشی استفاده کردند که یک طرف آبراهه از طریق دروازه‌ی بی با آب شور و طرف دیگر آبراهه با آب شیرین پر شده بود و شکل‌گیری گوه‌ی آب شور از طریق بازکردن دروازه‌ی آب شور شبیه‌سازی شد.<sup>[۲۲]</sup> ناکائی<sup>۲۵</sup> و آریتا<sup>۲۶</sup> (۲۰۰۲)، آزمایش مشابهی را برای بررسی مکانیزم جریان در اطراف پرده‌ی حباب هوا انجام دادند. در حقیقت، ایشان در مطالعه‌ی خود تلاش کردند تا با انجام آزمایش، رفتار گوه‌ی آب شور در حضور پرده‌ی حباب هوا و تشخیص مکانیزم جریان را بررسی کنند. بنابراین از یک کانال آزمایشگاهی استفاده کردند که در آن آب شیرین از طرف بالادست به طرف پایین دست جریان داشت و نفوذ گوه‌ی آب شور در کانال با رهاسازی آب شور از خروجی قرار داده شده در انتهای پایین دست به سمت بالادست بازسازی شد. یک سیلندر دایره‌ی نیز به‌منظور شبیه‌سازی پرده‌ی هوا در موقعیتی نزدیک به انتهای پایین دست، عمود بر جهت جریان کانال نصب و رفتار گوه‌ی آب شور در اطراف پرده‌ی هوا در طول آزمایش با عکس‌برداری ثبت شد.<sup>[۲۳]</sup>

کیتازو<sup>۲۶</sup> و یوتنبوگارد<sup>۲۷</sup> (۲۰۱۱)، به مطالعه‌ی نفوذ شوری از طریق قفل‌های کشتی پرداختند. تمرکز اصلی مطالعه‌ی آن‌ها، بررسی اثر بخشی چند اقدام علیه نفوذ شوری در قفل کشتی بود. ایشان اثر بخشی اقدام‌هایی از قبیل: پرده‌ی حباب هوا، جت آب و مانع<sup>۲۸</sup> در نفوذ شوری را بررسی کردند.<sup>[۲۶]</sup> از دیگر مطالعات میدانی انجام شده در محل می‌توان به مطالعات یوتنبوگارد و همکاران (۲۰۱۵) بر روی قفل کشتی استون<sup>۲۹</sup> در هلند که ۱۴۸ متر طول، ۱۴ متر عرض و ۴/۷ متر عمق دارد، اشاره کرد. آزمایش‌های مذکور، طراحی پیشرفته‌ی پرده‌ی حباب هوا در ترکیب با دیگر اقدام‌های کاهش نفوذ نمک، از قبیل: ترکیب پرده‌ی حباب هوا با جت آب شیرین و مانع ارائه بودند.<sup>[۲۴]</sup> همچنین طراحی مشابهی از پرده‌ی حباب هوا توسط ویلر<sup>۳۰</sup>

$k$  و  $\varepsilon$  دارند. تفاوت‌های اصلی سه مدل اخیر در روش محاسبه‌ی لزجت آشفتگی، اعداد پراوتل آشفتگی حاکم بر پخش آشفتگی  $k$  و  $\varepsilon$  و همچنین جملات نشان‌دهنده‌ی تولید و اتلاف در معادله‌ی  $\varepsilon$  هستند. با توجه به ویژگی‌های جریان و خصوصیات مدل  $k - \varepsilon$  RNG در جریان‌های چرخشی، مدل آشفتگی  $k - \varepsilon$  RNG انتخاب شده است.<sup>[۲۹]</sup> معادلات انتقال در مدل  $k - \varepsilon$  RNG به صورت رابطه‌های ۴ و ۵ است:<sup>[۲۹]</sup>

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{2\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (5)$$

که در آن‌ها،  $G_k$  نشان‌دهنده‌ی تولید انرژی جنبشی آشفتگی به دلیل گرادیان میانگین سرعت،  $G_b$  نشان‌دهنده‌ی انرژی جنبشی آشفتگی به دلیل شناوری،  $Y_M$  نشان‌دهنده‌ی سهم تراکم نوسان‌ها در آشفتگی تراکم‌پذیر به نرخ کلی اتلاف،  $C_{1\varepsilon}$ ،  $C_{2\varepsilon}$  و  $C_{3\varepsilon}$  مقادیر ثابت،  $\alpha_k$  و  $\alpha_\varepsilon$  معکوس اعداد پراوتل آشفتگی،  $S_k$  و  $S_\varepsilon$  جملات چشمه هستند. همچنین مقدار لزجت آشفتگی در مدل مذکور از رابطه‌های ۶ و ۷ محاسبه می‌شود:<sup>[۲۹]</sup>

$$d \left( \frac{\rho^* k}{\sqrt{\varepsilon \mu}} \right) = 1.72 \frac{\hat{v}}{\sqrt{\hat{v}^2 - 1 + C_v}} d\hat{v} \quad (6)$$

$$\hat{v} = \frac{\mu_{eff}}{\mu} \quad (7)$$

مقادیر ثابت مدل RNG در جدول ۱ ارائه شده است:<sup>[۲۹]</sup>

## ۲.۲. مدل‌سازی

نرم‌افزار انسیس فلونت قابلیت مدل‌سازی جامع را برای طیف گسترده‌ی از جریان‌های تراکم‌ناپذیر و تراکم‌پذیر، لایه‌یی و آشفته فراهم می‌کند. همچنین قابلیت شبیه‌سازی جریان به‌صورت پایدار یا گذرا را دارد. از طرف دیگر، طیف گسترده‌ی از مدل‌های ریاضی برای پدیده‌های انتقال (مانند انتقال حرارت) با توانایی مدل‌سازی هندسه‌های پیچیده، در فلونت استفاده شده است.

یکی دیگر از گروه‌های بسیار مفید مدل در انسیس فلونت، مجموعه‌ی مدل‌های جریان سطح آزاد و چندفازی<sup>۴۱</sup> است که می‌توانند برای تجزیه و تحلیل جریان‌های مایع-گاز، جامد-گاز، جامد-مایع و گاز-مایع-جامد استفاده شوند. نرم‌افزار انسیس فلونت برای این نوع از مسائل، روش‌های حجم سیال (VOF)<sup>۴۲</sup>، مخلوط<sup>۴۳</sup>، و مدل‌های اولیرین<sup>۴۴</sup> با عنوان مدل فاز گسسته (DPM)<sup>۴۵</sup> را فراهم می‌کند. در این شبیه‌سازی از نرم‌افزار گمبیت<sup>۴۶</sup> به منظور ایجاد هندسه‌ی جریان و شبکه‌بندی آن و از نرم‌افزار فلونت برای مدل‌سازی عددی جریان استفاده شده است. بنابراین هندسه‌ی مدل مطابق با شکل ۱ در نرم‌افزار گمبیت ایجاد شده و سپس با استفاده از شبکه‌ی غیر یکنواخت و مستطیلی شبکه‌بندی صورت گرفته است. شکل ۲، شبکه‌ی محاسباتی مدل برای حالت‌های بدون حضور پرده‌ی حباب هوا را نشان می‌دهد.

جدول ۱. ضرایب ثابت مدل RNG.<sup>[۲۹]</sup>

$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	$C_v$	$C_\mu$	$\alpha_k$	$\alpha_\varepsilon$
۱/۴۲	۱/۶۸	≈ ۱۰۰	۰/۰۸۴۵	≈ ۱/۳۹۳	≈ ۱/۳۹۳

و همکاران (۲۰۰۵) در قفل کرانر<sup>۳۱</sup> در هلند انجام شد.<sup>[۲۵]</sup> همچنین فان‌درفن<sup>۳۲</sup> به همراه ویلیام<sup>۳۳</sup> (۲۰۱۷)، آزمایش‌های مقیاس کوچک از پرده‌ی حباب هوا را در یک فلوم در دلتارس<sup>۳۴</sup> در دلف<sup>۳۵</sup> هلند انجام دادند.<sup>[۲۱]</sup> فان‌درفن و اولدنیز<sup>۳۶</sup> (۲۰۱۸)، نیز به منظور ارزیابی تفاوت عملکرد در تغییر نرخ جریان هوای پرده‌ی حباب هوا، آزمایش‌های دیگری با دقت بیشتری انجام دادند که در آن‌ها نرخ جریان هوا و اندازه‌ی حباب متغیر بود. نتایج مطالعات ایشان نشان داد که افزایش نرخ جریان هوا لزوماً عملکرد پرده‌ی حباب هوا را به‌عنوان یک روش مقابله با نفوذ شوری بهبود نمی‌بخشد.<sup>[۲۶]</sup> همچنین فان در فن، اوماهونی<sup>۳۷</sup> و ویلر (۲۰۱۸) در بررسی پارامترهای اصلی تأثیرگذار در نفوذ نمک در طی بهره‌برداری از قفل‌های کشتی‌رانی، بر روی پرده‌ی حباب هوا به عنوان یکی از اقدام‌های ممکن برای کاهش نفوذ شوری متمرکز شدند و طرح‌ها و اقدام‌های ترکیبی با پرده‌ی حباب هوا، را که توسط دیگران آزمایش شده بود، به‌طور خلاصه بیان کردند.<sup>[۷]</sup>

اولدن<sup>۳۸</sup> و همکاران (۲۰۲۰) نیز با استفاده از یک مدل عددی براساس روش اولیر- لاگرانژ به بررسی سیستم پرده‌ی حباب هوا پرداختند.<sup>[۲۷]</sup> کنترل هیدرولیکی پیشروی آب دریا به منظور کاستن از تبعات منفی آن و حفاظت از اکوسیستم‌های ساحلی، مستلزم شناخت هر چه بهتر مکانیزم‌های مؤثر در آن و پیش‌بینی نحوه‌ی تأثیرگذاری آن‌هاست. برای نیل به این مهم، از مدل‌های عددی که از جمله ابزارهای متداول در انجام چنین مطالعاتی است، استفاده می‌شود. بنابراین، با توجه به اینکه غالب مطالعات صورت گرفته به بررسی تأثیر پارامترهایی، از قبیل: تغییر تراز آب دریا و تغییرات اقلیمی در نفوذ شوری پرداخته‌اند، در مطالعه‌ی حاضر، تأثیر تغییر تراز آب رودخانه و چگالی آب دریا در نفوذ شوری با استفاده از یک مدل عددی در نرم‌افزار انسیس فلونت<sup>۳۹</sup> با شبیه‌سازی یک جریان دوپدیدی و نیز تأثیر پرده‌ی حباب هوا به عنوان عایق حبابی بین آب شور و شیرین در جلوگیری از نفوذ شوری در آب‌های سطحی بررسی شده است.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۱.۲. معادلات حاکم بر جریان

در حالت کلی، معادلات بقاء حاکم بر جریان آشفته، به صورت رابطه‌ی ۲ بیان می‌شوند:<sup>[۲۸]</sup>

-- بقای جرم (پیوستگی):

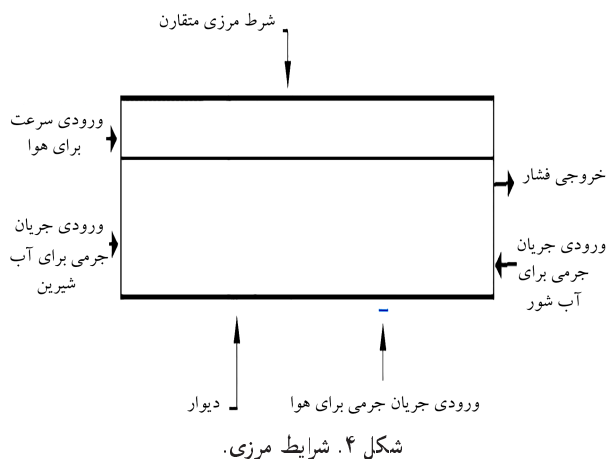
$$u_{j,j} = 0 \quad (2)$$

-- بقای ممنتوم:

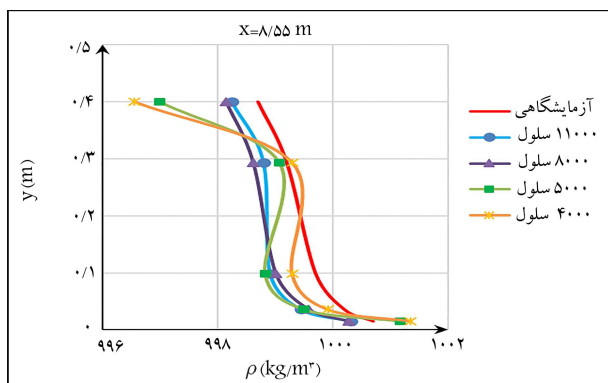
$$\rho \left( \frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + (\rho - \rho_0) g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i u_j} \right] \quad (3)$$

که در آن‌ها،  $U_i$  مؤلفه‌ی سرعت متوسط در جهت  $x_i$ ،  $P$  مقدار فشار متوسط،  $-\rho \overline{u_i u_j}$  تنش‌های رینولدز،  $\rho$  چگالی محلی،  $\rho_0$  چگالی مرجع،  $g_i$  مؤلفه‌ی شتاب ثقل در جهت  $x_i$  و  $\mu$  لزجت دینامیکی هستند.

شایان ذکر است که از بین مدل‌های آشفتگی  $k - \varepsilon$ ، مدل آشفتگی  $k - \varepsilon$  Standard RNG<sup>۴۰</sup> استفاده شده است. به‌طور کلی، مدل‌های آشفتگی  $k - \varepsilon$  Standard، Realizable  $k - \varepsilon$  و RNG  $k - \varepsilon$  شکل یکسان داشته و معادلات انتقال برای



شکل ۴. شرایط مرزی.



شکل ۵. بررسی استقلال از شبکه‌ی مدل‌ها.

نتایج آزمایشگاهی آریتا و جیرکا (۱۹۸۷) استفاده شده است. [۱۱] ایشان با استفاده از معادلات حاکم بر جریان، خواص کلی گوی شور مانند شکل و عمق نفوذ آن را پیش‌بینی و در نهایت به روابطی دست یافتند که براساس آن‌ها می‌توان طول نفوذ گوی شور را با تقریب خوبی به دست آورد. از جمله‌ی روابط مذکور می‌توان به رابطه‌ی ۸ اشاره کرد که بر طبق نتایج آن‌ها، مقدار عددی  $\Delta^*$  در دهانه‌ی رودخانه برابر صفر است.

$$\Delta^* = 1 - \frac{F_0^2}{\eta^2} \left[ 1 + \beta_r q_r \left( \frac{\eta}{1 - \eta} \right)^2 \right] \quad (8)$$

که در آن،  $F_0$  عدد فرود دنسیمیتریک،  $\eta$ ،  $\beta_r$  و  $q_r$  طبق روابط ۹ الی ۱۲ محاسبه می‌شوند.

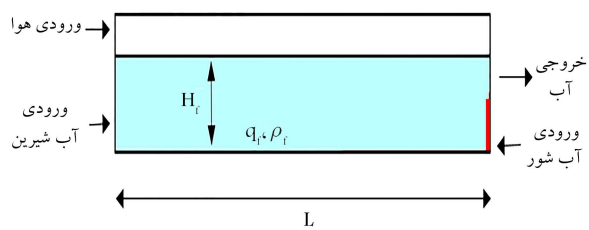
$$F_0^2 = \frac{q_f^2}{(\rho_s - \rho_f) g H_0^3} \quad (9)$$

$$\eta = \frac{h_1}{H_0} \quad (10)$$

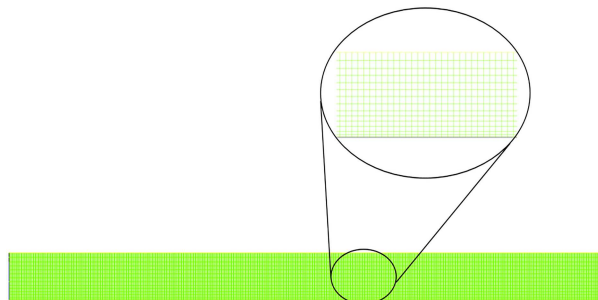
$$\beta_r = \frac{1}{c} + \frac{4/3}{1 - c} \quad (11)$$

$$q_r = \frac{q_s}{q_f} \quad (12)$$

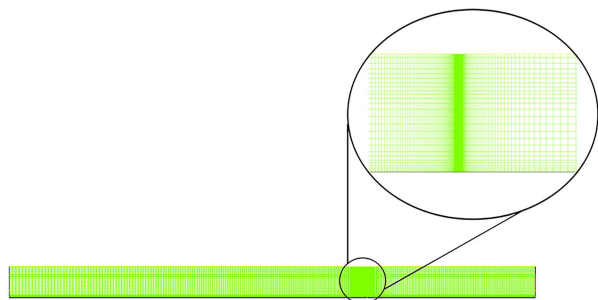
که در روابط ۸ الی ۱۲،  $q_f$  دبی آب شیرین،  $q_s$  دبی آب شور،  $\rho_f$  چگالی آب شیرین،  $\rho_s$  چگالی آب شور،  $h_1$  ارتفاع آب شیرین روی گوی آب شور در هر مقطع از رودخانه،  $H_0$  عمق آب شیرین در نوک گوی و  $c$  نیز ضریب ثابتی برای هر مقطع از رودخانه است که معمولاً در مقاطع نزدیک نوک گوی مقدار  $c \geq 0/9$  و در



شکل ۱. هندسه‌ی مدل.



شکل ۲. شبکه‌ی محاسباتی مدل‌های بدون پرده‌ی حباب هوا.



شکل ۳. شبکه‌ی محاسباتی مدل با پرده‌ی حباب هوا.

در شکل ۳، نیز شبکه‌ی محاسباتی مدل با پرده‌ی حباب هوا مشاهده می‌شود. تفاوت شبکه‌ی محاسباتی مدل‌های با پرده‌ی حباب هوا با مدل‌های بدون پرده‌ی حباب هوا در این است که در مدل‌های با پرده‌ی حباب هوا، به دلیل وجود پرده‌ی حباب هوا و اهمیت پاسخ جریان در برخورد با پرده‌ی هوا، نیاز به شبکه‌ی محاسباتی ریزتر در اطراف پرده‌ی هوا نسبت به سایر نقاط است.

پس از ایجاد هندسه‌ی مدل در نرم‌افزار گمیت، شرایط مرزی مطابق شکل ۴ به آن اعمال شده و سپس در نرم‌افزار فلونتنت با استفاده از مدل چندفازی اویلرین و مدل آشفتگی  $k - \epsilon$  حل شده است.

همچنین برای حل معادلات ممتوم از روش کوئیک، حل معادلات  $k, \epsilon$  از روش اختلاف بالادست مرتبه اول و از روش سیمپل برای اتصال سرعت - فشار استفاده شده است. شایان ذکر است که مدل‌های ذکر شده با تعداد سلول‌های ۴۰۰۰، ۵۰۰۰، ۸۰۰۰ و ۱۱۰۰۰ بررسی شدند و نتایج حاکی از آن است که شبکه‌ی محاسباتی با تعداد سلول ۸۰۰۰، مستقل از شبکه است. بنابراین مدل‌هایی با تعداد سلول ۸۰۰۰ ایجاد شدند. نتایج استقلال از شبکه‌ی مدل پرده‌ی حباب هوا با نتایج آزمایشگاهی آسایدا و آریتا (۱۹۹۷) در موقعیت ۸/۵۵ متری از ورودی آب شیرین در شکل ۵ مشاهده می‌شود. [۳۰]

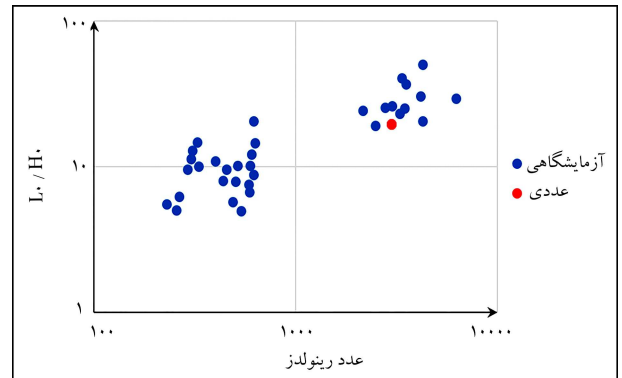
به منظور اطمینان از عملکرد صحیح مدل، از مقایسه‌ی نتایج مدل عددی با

جدول ۲. مشخصات مدل برای صحت‌سنجی.

$F_0$	$H_0(m)$	$q_s(kg/m^2)$	$q_f(kg/m^2)$	$q_s(m^2/s)$	$q_f(m^2/s)$
۰/۴۰	۰/۱۳	۱۰۰۲	۹۹۹/۵	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۳

جدول ۳. پارامترهای فیزیکی و هیدرولیکی مدل‌ها.

مدل	$q_f(m^2/s)$	$q_s(m^2/s)$	$q_a(m^2/s)$	$\rho S(kg/m^2)$	$H_f(m)$	$L_r(m)$
۱	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰۶	۰	۱۰۰۲	۰/۱۶	۱۴
۲	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰۶	۰	۱۰۰۲	۰/۱۳	۱۲
۳	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰۶	۰	۱۰۰۲	۰/۱۰	۸
۴	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰۶	۰	۱۰۰۴	۰/۱۰	۸
۵	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰۶	۰	۱۰۰۶	۰/۱۰	۸
۶	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰۶	۰	۱۰۰۸	۰/۱۰	۸
۸	۰/۰۰۰۶۸۲	۰/۰۰۰۱۲۵	۰/۰۰۰۰۲	۱۰۰۲	۰/۴۵	۱۲/۵



شکل ۶. مقایسه‌ی نتایج مدل عددی با نتایج مدل آزمایشگاهی آریتا و همکاران (۱۹۸۷).

نزدیکی دهانه‌ی رودخانه مقدار تقریبی  $c = 0/5$  دارد. <sup>[۱۱]</sup> آریتا و جیرکا (۱۹۸۷) علاوه بر روابط ۸ الی ۱۲، نموداری را ارائه کردند که نسبت طول نفوذ گوهی شوری به عمق آب در نوک گوه ( $L_0/H_0$ ) را بر حسب عدد رینولدز نشان می‌داد. بنابراین با استفاده از روابط ۸ الی ۱۲ و نمودار ارائه شده توسط آریتا و جیرکا (۱۹۸۷) می‌توان میزان نفوذ گوهی شوری ( $L_0$ ) را به دست آورد. بنابراین جریانی با مشخصات جدول ۲ در نظر گرفته شد. سپس روابط ۹ الی ۱۲ برای جریان در نظر گرفته شده طبق مشخصات جدول ۲ محاسبه شدند، تا در نهایت رابطه‌ی ۸ برای مصب رودخانه حل شود. شایان ذکر است که برای به دست آوردن مقدار  $\beta_2$  در رابطه‌ی ۱۱، با توجه به اینکه رابطه‌ی ۸ برای مقطع رودخانه حل می‌شود، مقدار  $c$  برابر با  $0/5$  در نظر گرفته شده است.

بنابراین پس از محاسبه‌ی روابط ۹ الی ۱۲، طبق داده‌های جدول ۲، رابطه‌ی ۸ به معادله‌ی ۱۳ تبدیل می‌شود:

$$1 - \frac{0/40^2}{\eta^3} [1 + 4/66 \times 0/2^2 \times (\frac{\eta}{1-\eta})^2] = 0 \quad (13)$$

بنابراین تنها مجهول معادله‌ی ۱۳ برای مقطع مصب رودخانه،  $\eta$  است. بنابراین با به دست آوردن مقدار  $\eta$  در حقیقت مقدار  $h_1$  معلوم می‌شود. در نتیجه مقدار ارتفاع آب شیرین روی گوهی آب شور در ورودی آب شور برای مدل‌سازی به دست می‌آید. پس از مدل‌سازی و به دست آوردن میزان نفوذ شوری با استفاده از مدل عددی لازم است نتایج به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی آریتا و جیرکا (۱۹۸۷) مقایسه شوند، که نتایج آن در شکل ۶ مشاهده می‌شود که مطابق آن، نتایج مدل عددی با مدل آزمایشگاهی همخوانی دارد.

بنابراین مطابق با شکل ۱، مدل‌های دوبعدی با ورودی آب شیرین از سمت چپ و ورودی آب شور از سمت راست ایجاد شدند. با توجه به اینکه جریان مورد بررسی یک جریان چندفازی است، لذا با توجه به قابلیت‌های مدل اویلرین، مدل آشفستگی  $k - \epsilon$  برای شبیه‌سازی جریان چندفازی پژوهش حاضر انتخاب و براساس شرایط جریان استفاده شده است. پارامترهای فیزیکی و هیدرولیکی مدل‌ها و شرایط اولیه‌ی جریان در جدول ۳ ارائه شده است. به منظور بررسی اثر تراز آب رودخانه در میزان نفوذ شوری، مدل‌های ۱، ۲ و ۳ بر طبق جدول ۳ ایجاد شدند و تمامی

شرایط برای مدل‌های ذکر شده به جز تراز آب رودخانه یکسان در نظر گرفته شد. به عبارت دیگر، همه‌ی مدل‌ها دارای دبی آب شیرین، تراز آب دریا، چگالی آب شور و شیرین مشابه بودند و فقط در تراز آب رودخانه با یکدیگر تفاوت داشتند. همچنین به منظور بررسی تأثیر چگالی آب دریا نیز مدل‌های ۳ الی ۶ ایجاد شدند که آن‌ها نیز همگی با شرایط یکسان بودند و فقط در چگالی آب دریا تفاوت داشتند. یک مدل نیز مطابق با مشخصات مدل ۷ در جدول ۳، به منظور بررسی اثر پرده‌ی حباب هوا در جلوگیری از نفوذ شوری ایجاد شد. شایان ذکر است که به منظور کاهش زمان و حجم محاسبات، مدل‌های دوبعدی با شرایط هیدرولیکی کوچک مقیاس در نظر گرفته شدند.

در جدول ۳،  $q_f$  دبی در عرض واحد آب شیرین رودخانه،  $q_s$  دبی در عرض واحد آب شور دریا،  $q_a$  دبی در عرض واحد پرده‌ی حباب هوا،  $\rho S$  چگالی آب شور،  $H_f$  عمق آب شیرین رودخانه و  $L_r$  طول رودخانه‌ی مدل شده هستند. شایان ذکر است که در مدل‌سازی‌های انجام شده برای کاهش زمان و حجم محاسبات، طول رودخانه‌ی مدل شده ( $L_r$ ) متناسب با هر مدل در نظر گرفته شده است.

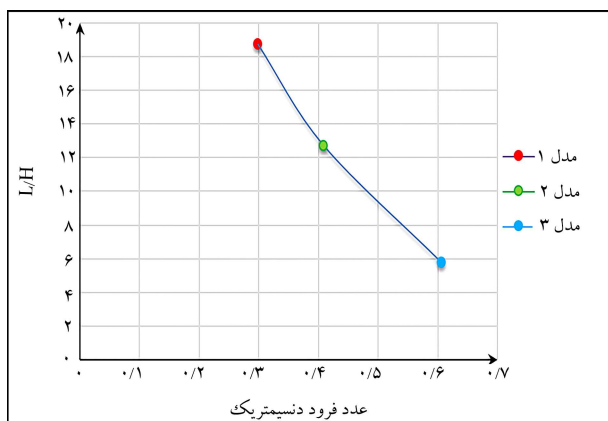
### ۳. نتایج و بحث

#### ۳.۱. بررسی تأثیر تراز آب رودخانه در نفوذ شوری

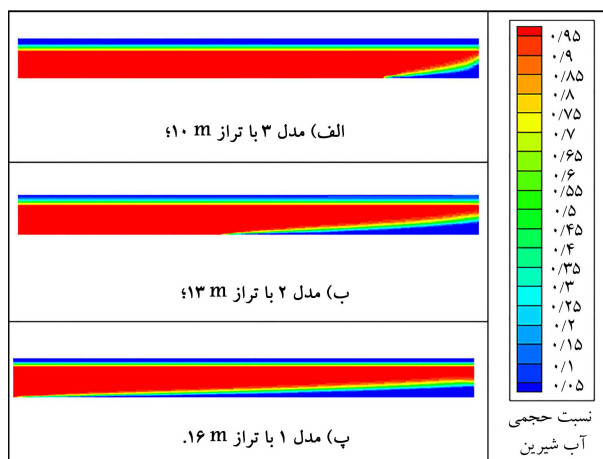
برای بررسی اثر تراز آب رودخانه در میزان پیشروی آب شور دریا، سه مدل ۱، ۲ و ۳ با شرایط جدول ۳ ایجاد شدند. میزان پیشروی آب شور در سه مدل مذکور در شکل ۷ مشاهده می‌شود.

نتایج حاصل از مدل‌سازی مدل ۱ مطابق جدول ۳، بیانگر این است که در مدل اول با ارتفاع  $0/16$  متر تراز رودخانه و عدد فرود دنسیمیتریک  $0/299$  (براساس رابطه‌ی ۹)، پیشروی آب شور در حدود ۳ متر بوده و همچنین با تراز رودخانه معادل  $0/13$  متر، آب شور در حدود  $1/65$  متر در آب شیرین نفوذ کرده است. به عبارت دیگر، با کاهش  $19\%$  تراز رودخانه، نفوذ شوری به میزان  $45\%$  کاهش یافته است. مدل سوم نیز با تراز آب رودخانه‌ی  $0/10$  متر ایجاد شده و میزان نفوذ آب شور در این حالت در قیاس با دو مدل پیشین کمتر بوده است. طول نفوذ شوری در مدل سوم با تراز رودخانه‌ی معادل  $0/10$  متر، در حدود  $0/57$  متر بوده است. در این حالت نیز با کاهش  $38\%$  تراز رودخانه نسبت به مدل اول، نفوذ شوری به میزان  $81\%$  نسبت به مدل اول کاهش یافته است. به منظور مقایسه‌ی بهتر میزان نفوذ شوری، نتایج هر سه مدل در شکل ۸ مشاهده می‌شود.

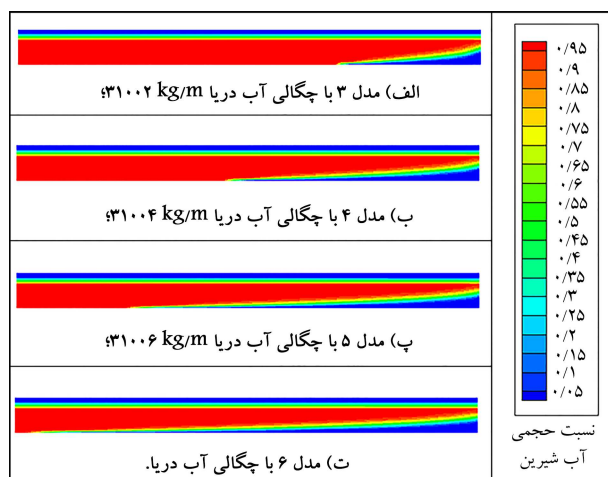
بنابراین براساس نتایج مدل‌ها می‌توان نتیجه گرفت که به ازاء افزایش تراز آب رودخانه، میزان پیشروی آب شور افزایش پیدا خواهد کرد. این افزایش نفوذ به معنای



شکل ۹. نمودار نسبت طول نفوذ شوری به تراز رودخانه به عدد فرود دنسیمیتریک.



شکل ۷. میزان پیشروی آب شور.

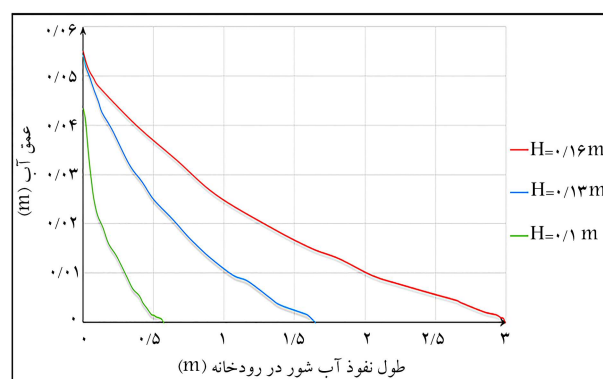


شکل ۱۰. میزان پیشروی آب شور.

آب شور در حدود  $1/0.65$  متر در آب شیرین نفوذ می‌کند. بنابراین می‌توان گفت که مدل ۴ در مقایسه با مدل ۳ به ازاء افزایش  $2/0\%$  چگالی آب دریا، میزان پیشروی آب شور نسبت به مدل ۳،  $86\%$  بیشتر می‌شود.

میزان پیشروی آب شور در مدل ۵ با چگالی آب دریا  $1006 \text{ kg/m}^3$ ، معادل با  $1/49$  متر بوده است. بنابراین در مدل ۵ نیز با افزایش چگالی آب دریا به مقدار  $4/0\%$  نسبت به مدل ۳، میزان پیشروی آب شور دریا به مقدار  $162\%$  نسبت به مدل ۳ افزایش یافته است. بنابراین، نتایج مدل ۵، تأییدی بر صحت این موضوع است که با افزایش چگالی آب دریا، میزان پیشروی آب شور نیز افزایش می‌یابد و چگالی آب دریا رابطه‌ی مستقیم با میزان پیشروی آب شور دریا دارد. بنابراین با مقایسه‌ی سه مدل ۳، ۴ و ۵، نتیجه گرفته می‌شود که به ازاء افزایش چگالی دریا به مقدار  $2/0\%$  نسبت به مدل ۳، میزان پیشروی آب شور دریا نسبت به مدل ۳،  $86\%$  بیشتر می‌شود. بنابراین در مدل ۶ انتظار می‌رود که آب شور در حدود ۲ متر نفوذ کند که مطابق انتظار، میزان پیشروی آب شور در مدل ۶، برابر با  $1/94$  متر بوده است. به منظور مقایسه‌ی بهتر مدل‌های اخیر، نتایج در غالب یک نمودار، در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که مطابق آن، میزان پیشروی آب شور دریا به ازاء چگالی‌های متفاوت از دریا مقایسه شده‌اند.

همان‌طور که پیشتر نیز ذکر شد، با افزایش چگالی، میزان پیشروی شوری نیز بیشتر می‌شود و با انجام چهار مدل اخیر مشخص شد که به ازاء افزایش  $2 \text{ kg/m}^3$  چگالی آب دریا، در حدود  $5/0$  متر بر میزان پیشروی آب شور دریا افزوده می‌شود.

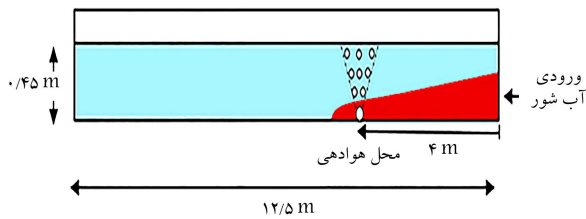


شکل ۸. مقایسه‌ی میزان پیشروی آب شور دریا به ازاء ترازهای مختلف رودخانه.

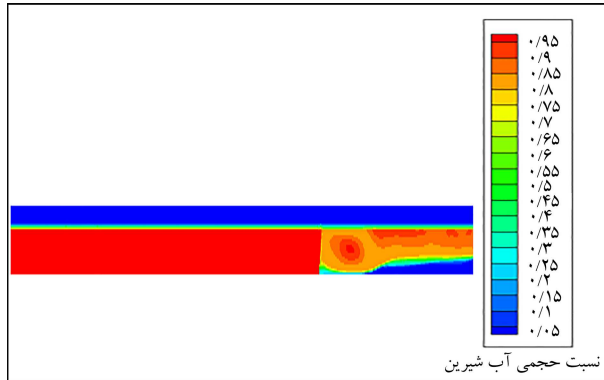
ورود شوری بیشتری به مناطق ساحلی و در نتیجه افزایش آلودگی آب شیرین توسط آب شور دریا و تخریب اکوسیستم مناطق ساحلی است. همچنین با بررسی عدد فرود دنسیمیتریک جریان در هر مدل با میزان نفوذ شوری، مشخص شد که با افزایش تراز آب رودخانه، عدد فرود دنسیمیتریک جریان رودخانه کاهش پیدا می‌کند. بدین معنا که نیروی اینرسی نسبت به نیروی جاذبه کاهش می‌یابد و در نتیجه نیروی پیشران رودخانه کم و امکان پیشروی آب شور در رودخانه بیشتر می‌شود. بنابراین می‌توان گفت که عدد فرود دنسیمیتریک جریان، یکی از عوامل تعیین‌کننده‌ی میزان نفوذ شوری در آب‌های سطحی است. به منظور بررسی صحت تأثیر عدد فرود دنسیمیتریک در میزان نفوذ شوری، در ابتدا طول نفوذ شوری در هر مدل با استفاده از تراز آب رودخانه بی‌بعد شده و سپس پارامتر بی‌بعد نسبت طول نفوذ شوری به تراز رودخانه ( $L/H_f$ ) با عدد بی‌بعد فرود مقایسه شده است که در شکل ۹ مشاهده می‌شود. بنابراین مطابق شکل ۹ می‌توان نتیجه گرفت که به ازاء یک عدد فرود دنسیمیتریک خاص، هر چقدر تراز رودخانه کمتر باشد، طول نفوذ شوری کمتر خواهد بود.

### ۲.۳. بررسی تأثیر چگالی آب دریا در نفوذ شوری

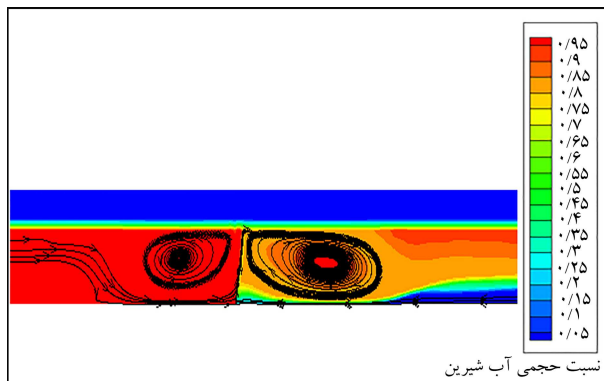
برای بررسی اثر چگالی آب دریا در میزان پیشروی آب شور دریا، چهار مدل ۳ الی ۶ با شرایط جدول ۳ ایجاد شده‌اند که میزان پیشروی هر کدام از آن‌ها در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود. نتایج حاصل از مدل‌سازی مدل ۳ بر طبق جدول ۳، بیانگر این موضوع است که به ازاء چگالی  $1002 \text{ kg/m}^3$ ، آب شور به میزان  $57/0$  متر در آب شیرین رودخانه پیشروی خواهد کرد. در مدل ۴ با چگالی آب دریا  $1004 \text{ kg/m}^3$ ،



شکل ۱۳. هندسه مدل پردهی حباب هوا.



شکل ۱۴. جلوگیری از نفوذ شوری با استفاده از پردهی حباب هوا (مدل ۷).



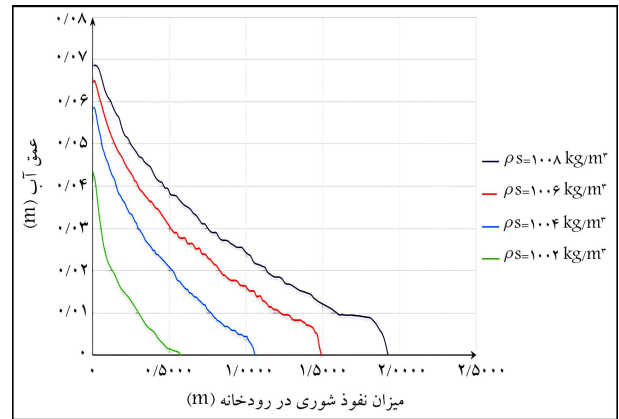
شکل ۱۵. جریان چرخشی ایجاد شده در اثر پردهی حباب هوا.

عمودی در موقعیت ۴ متری از ورودی آب شور مطابق با شکل ۱۳ و ویژگی‌های جریان طبق مدل ۷ در جدول ۳ پرداخته شده است.

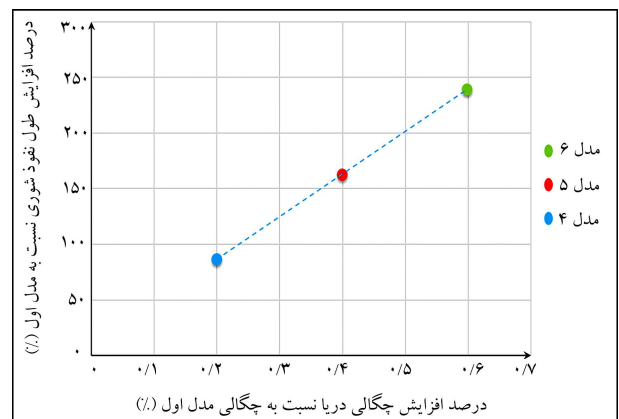
نتایج حاصل از مدل‌سازی انجام شده نشان می‌دهد که استفاده از یک سیستم پردهی حباب هوا در جلوگیری از نفوذ شوری در آب‌های سطحی تأثیرگذار است و به‌کار بردن یک پردهی حباب هوا با توجه به شرایط جریان می‌تواند از پیشروی گوهی شوری جلوگیری کند. در شکل ۱۴، نیز جلوگیری از نفوذ شوری با استفاده از یک سیستم پردهی حباب هوا مشاهده می‌شود.

همان‌گونه که در شکل ۱۵ به‌خوبی نمایان است، جریان آب شور در اثر جریان چرخشی ایجاد شده توسط پردهی حباب هوا به سمت بالا رانده شده و سپس توسط جریان آب شیرین به سمت راست (دریا) هدایت شده است. به‌بیان دیگر، آب شور به علت چگالی بیشتر در کف رودخانه، شروع به پیشروی در آب شیرین رودخانه می‌کند که در نزدیکی پردهی حباب هوا، به علت جریان چرخشی ایجاد شده توسط پردهی حباب هوا به سمت بالا رانده شده و سپس در نزدیکی سطح آب به علت جریان آب شیرین رودخانه به سمت دریا هدایت شده است.

منحنی‌های هم‌تراز چگالی آب در اطراف پردهی حباب هوا در شکل ۱۶ مشاهده



شکل ۱۱. مقایسه‌ی میزان پیشروی آب شور به ازاء چگالی‌های متفاوت دریا.



شکل ۱۲. نمودار درصد افزایش طول نفوذ شوری بر حسب درصد افزایش چگالی آب دریا.

اگرچه که بیان این موضوع با قطعیت کامل نیاز به انجام مدل‌سازی‌هایی متعدد دارد، ولی می‌توان به‌عنوان نتیجه‌ی از مدل‌سازی انجام‌شده آن را به صراحت بیان کرد. شکل ۱۲، به خوبی بیانگر رابطه‌ی مستقیم چگالی آب دریا و میزان پیشروی آب شور در رودخانه‌هاست.

براساس جدول ۳ می‌توان گفت که تغییر چگالی آب شور دریا فقط در عدد فرود دنسیمتریک جریان تأثیرگذار خواهد بود. بنابراین با توجه به اینکه افزایش چگالی دریا منجر به کاهش عدد فرود دنسیمتریک جریان رودخانه می‌شود، لذا می‌توان بیان کرد که کاهش عدد فرود دنسیمتریک جریان در اثر افزایش چگالی دریا، دلیل افزایش میزان پیشروی آب شور دریا در رودخانه است، چراکه کاهش عدد فرود دنسیمتریک جریان به معنای کاهش نیروی پیشران رودخانه است. پس با کاهش نیروی پیشران رودخانه، آب شور به میزان بیشتری می‌تواند در آب شیرین نفوذ کند. پس به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که چگالی آب دریا به‌عنوان یک پارامتر تأثیرگذار در عدد فرود دنسیمتریک جریان، یکی از عوامل تعیین‌کننده‌ی میزان نفوذ شوری در آب‌های سطحی است.

### ۳.۳. بررسی تأثیر پردهی حباب هوا در جلوگیری از نفوذ شوری

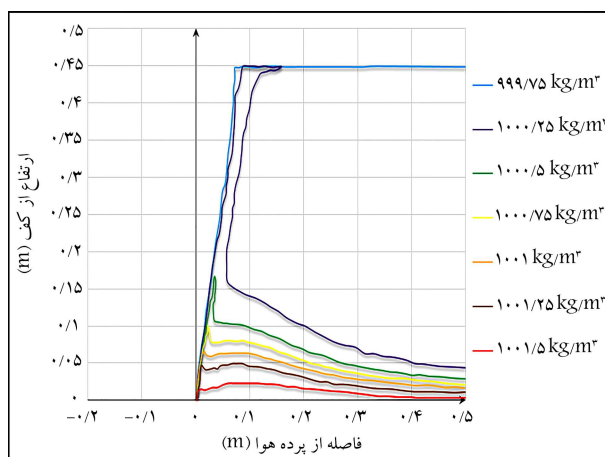
برای بررسی تأثیر پردهی حباب هوا در نفوذ شوری در آب‌های سطحی به شبیه‌سازی جریان سه‌فازی و دو‌بعدی به طول ۱۲٫۵ متر و عمق آب ۰٫۴۵ متر با ورودی آب شیرین از سمت چپ، ورودی آب شور از سمت راست، و ورودی هوا از مجرای

هوا از نیروی نفوذ آب شور بیشتر است. در نتیجه، سیستم توانایی مقابله با نفوذ آب شور را داشته است. بنابراین از پارامترهای مهم و تأثیرگذار در عملکرد سیستم، مقدار دبی هوای پرده‌ی حباب هواسط که لازم است در مطالعات بعدی، مقدار دبی‌های متعدد هوا بررسی شود. همچنین در پژوهش حاضر از حباب‌های به قطر  $1\text{ mm}$  استفاده شده است که لازم است اندازه‌ی حباب هوا نیز در مطالعات آتی آزمایش شود تا تأثیر آن در عملکرد سیستم پرده‌ی حباب هوا مشخص شود.

#### ۴. نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از مدل‌سازی حاکی از آن است که تراز رودخانه و میزان نفوذ شوری با یکدیگر رابطه‌ی مستقیم دارند و با افزایش تراز رودخانه به ازاء یک دبی یکسان از رودخانه، میزان نفوذ شوری دریا بیشتر می‌شود. به عبارت بهتر، طول نفوذ گوه‌ی شوری وابسته به شرایط جریان رودخانه و به خصوص عدد فرود دنسیمیتریک جریان است؛ یعنی با افزایش تراز آب رودخانه، عدد فرود دنسیمیتریک جریان کم می‌شود و در نتیجه میزان نفوذ شوری افزایش می‌یابد. همچنین طول نفوذ گوه‌ی شوری علاوه بر تراز آب رودخانه وابسته به چگالی آب دریا است. به عبارت بهتر، با افزایش چگالی آب دریا، میزان نفوذ شوری در آب‌های سطحی افزایش می‌یابد. نکته‌ی حائز اهمیت دیگر این است که تغییر چگالی دریا نیز در عدد فرود دنسیمیتریک جریان تأثیرگذار است، لذا می‌توان اظهار کرد که عدد فرود دنسیمیتریک جریان از عوامل تأثیرگذار در میزان پیشروی آب شور دریا است.

پس از بررسی تأثیر تراز آب رودخانه و چگالی آب دریا، یک مدل عددی به منظور بررسی تأثیر پرده‌ی حباب هوا در جلوگیری از نفوذ شوری ایجاد شد که براساس نتایج آن، سیستم پرده‌ی حباب هوا با قابلیت ایجاد عایق حبابی بین آب شور و شیرین، راهکار مناسبی برای جلوگیری از نفوذ شوری در آب‌های سطحی است. در نتیجه با توجه به مطالعات گسترده‌ی سال‌های اخیر در ارتباط با نفوذ شوری و اقدامات کاهش‌دهنده‌ی آن می‌توان اذعان داشت که با وجود روش‌های متعدد برای جلوگیری از نفوذ شوری، استفاده از سیستم پرده‌ی حباب هوا، روش بهتری محسوب می‌شود. در حقیقت، روش مذکور چون که هیچ سازه‌ی فیزیکی را در آب نصب نمی‌کند، علاوه بر اینکه میزان تأثیر در اکوسیستم را نسبت به سایر روش‌های دیگر کاهش می‌دهد، میزان اکسیژن موجود در آب را نیز افزایش می‌دهد. بنابراین می‌توان انتظار داشت که روش پرده‌ی حباب هوا نسبت به روش‌های دیگر ارجح باشد. در واقع به علت وجود ویژگی مثبت ذکر شده، سیستم پرده‌ی حباب هوا، روشی کارآمد در کاهش نفوذ شوری در آب‌های سطحی محسوب می‌شود.



شکل ۱۶. منحنی‌های هم‌تراز چگالی در اطراف پرده‌ی حباب هوا (مدل ۷).

می‌شود که در آن موقعیت صفر در محور افقی بیانگر مکان پرده‌ی حباب هواسط، که در ۴ متری سمت چپ آن ورودی آب شور و در ۸٫۵ متری سمت راست آن ورودی آب شیرین قرار دارد. همان‌گونه که در شکل اخیر مشخص است، پرده‌ی هوا باعث توقف پیشروی آب شور شده است؛ به گونه‌ی بی‌کی که در سمت چپ پرده‌ی هوا، آب شور وجود ندارد و تماماً آب شیرین موجود است.

بنابراین واضح است که عملکرد مورد انتظار سیستم پرده‌ی حباب هوا در جلوگیری از نفوذ شوری بستگی زیادی به توانایی و نیروی هوا در مقابل نیروی نفوذ گوه‌ی شوری دارد. به بیان بهتر، سیستم پرده‌ی حباب هوا زمانی کارایی مطلوب دارد که بتواند آب شور را از کف رودخانه به سمت بالا هدایت کند که سپس توسط جریان آب شیرین به دریا منتقل شود. بنابراین لازم است برای بررسی کارایی سیستم مذکور، نیروهای پرده‌ی هوا و نفوذ آب شور با یکدیگر مقایسه شوند. بدین منظور از روابط ۱۴ و ۱۵ که توسط ناکائی و آریتا (۲۰۰۲) ارائه شده‌اند، استفاده می‌شود:<sup>[۲۳]</sup>

$$A = (q_a g)^{\frac{1}{3}} \quad (14)$$

$$B = \left( \frac{(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f} g h_a \right)^{\frac{1}{3}} \quad (15)$$

که در آن‌ها،  $A$  نیروی ناشی از پرده‌ی حباب هوا،  $B$  نیروی نفوذ گوه‌ی شوری، و  $h_a$  نیز ارتفاع آب شور در محل هوادهی پیش از هوادهی است. با توجه به مشخصات مدل ۷ در جدول ۳ و روابط ۱۴ و ۱۵، در مدل ۷ نیروی پرده‌ی حباب

#### پانویس‌ها

1. Ghyben
2. Herzberg
3. Arita
4. Jirka
5. Savenije
6. Yangtze
7. Yangtze Estuary
8. Modaomen Estuary

9. Gong
10. Shen
11. Rice
12. Bhuiyan
13. Dutta
14. Gorai river
15. Chen
16. Vargas
17. Rounghu
18. Pearl river
19. Liu



20. Min Ahn
21. environmental fluid dynamics code (EFDC)
22. Seomjin
23. Takashi Sasaki
24. Takashi Asaeda
25. Nakai
26. Keetels
27. Uittenbogaard
28. Sill
29. Stevin
30. Weiler
31. Krammer
32. Van der Ven
33. Wieleman
34. Deltares
35. Delft
36. Oldenzien
37. O'Mahoney
38. Oldeman
39. ANSYS fluent
40. ReNormalization Group
41. multiphase flow
42. volume of fluid
43. mixture
44. Eulerian
45. discrete phase model
46. Gambit

### منابع (References)

1. Bardaji, M. "Evaluation and conceptualization of environmental impacts on coastal groundwater system behavior", M.Sc. Dissertation, Tarbiat Modares University, Iran (In Persian) (2016).
2. Van der ven, P. and Wieleman, V. "The use of small scale experiments for a shipping lock's bubble screen", *4th International Symposium of shallow flows, Eindhoven University of Technology*, NL (26-28 June, 2017).
3. Mahmudzadeh, D., Ketabchi, H. and Ashtiyani, B. "Investigating the effect of rising sea level and changes in feeding rate on the progression of saline water in an enclosed aquifer", *Journal of Hydraulic Research*, **10**(4), pp. 1-15 (In Persian) (2015).
4. Johnson, T. "Battling seawater intrusion in the central and west coast basins", WRD Technical Bulletin (2007).
5. Rajabi, M., Ashtiyani, B. and Ketabchi, H. "Numerical modeling of freshwater lenses in small islands (Case study: Kish Island)", *9th Iran Hydraulic Conference*, Tehran, Iran (in Persian) (2010).
6. Keetels, K., Uittenbogaard, R., Cornelisse, J. and et al. "Field study and supporting analysis of air curtains and other measures to reduce salinity transport through shipping locks", *Wiley, Irrigation and Drainage*, **60**(1), pp. 42-50 (2011).
7. Van der ven, P., Mahoney, T. and Weiler, O. "Method to assess bubble screens applied to mitigate salt intrusion through locks", Planc-word congress, Panama city, Panama (2018).
8. Mohammed, R. and Scholz, M. "Critical review of salinity intrusion in rivers and estuaries", *Journal of Water and Climate Change, IWA Publishing*, **9**(1), pp. 1-16 (2017). doi:10.2166/wcc.2017.334.
9. Feseker, T. "Numerical studies on saltwater intrusion in a coastal aquifer in northwestern Germany", *Hydrogeology Journal*, **15**, pp. 267-279 (2007).
10. Mahmoudzadeh, D. "Effect of sea level rise and aquifer characteristics on saline water intrusion in coastal aquifers", M.Sc. Dissertation, Sharif University of Technology, Iran (in Persian) (2013).
11. Arita, M. and Jirka, G.H. "Two-layer model of saline wedge. II: prediction of mean properties", *Journal of Hydraulic Engineering*, **113**(10), pp.1249-1263 (1987). doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(1987)113:10(1249).
12. Zhang, E., Savenije, H.H.G., Wu, H. and et al. "Analytical solution for salt intrusion in the Yangtze Estuary, China", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **91**(4), pp. 492-501 (2011).
13. Gong, W. and Shen, J. "The response of salt intrusion to changes in river discharge and tidal mixing during the dry season in the Modaomen Estuary, China", *Continental Shelf Research*, **31**(7-8), pp. 769-788 (2011).
14. Rice, K.C., Hong, B. and Shen, J. "Assessment of salinity intrusion in the James and Chickahominy Rivers as a result of simulated sea-level rise in Chesapeake Bay", *East Coast, USA, Journal of Environmental Management*, **111**, pp. 61-69 (2012).
15. Bhuiyan, M. and Dutta, D. "Assessing impacts of sea level rise on river salinity in the Gorai river network, Bangladesh", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **96**, pp. 219-227 (2012).
16. Chen, W., Chen, K., Kuang, C. and et al. "Influence of sea level rise on saline water intrusion in the Yangtze river estuary, China", *Applied Ocean Research*, **54**, pp. 12-25 (2016).
17. Vargas, C.I.C., Vaz, N. and Dias, J.M. "An evaluation of climate change effects in estuarine salinity patterns: Application to Ria de Aveiro shallow water system", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **189**, pp. 33-45 (2017).
18. Ye, R., Song, Z., Zhang, C. and et al. "Analytical model for surface saltwater intrusion in estuaries", *Journal of Coastal Research*, **33**(3), pp. 712-719 (2017).
19. Liu, B., Peng, S., Liao, Y. and et al. "The characteristics and causes of increasingly severe saltwater intrusion in Pearl River Estuary", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Elsevier, **220**, pp. 54-63 (Feb., 2019). doi: 10.1016/j.ecss.2019.02.041.
20. Ahn, J.M., Lee, K. and Lyu, S. "Effect of changes in watershed runoff characteristics on salinity intrusion in estuary using EFDC", *KSCE Journal of Civil Engineering*, **24**(1), pp. 87-98 (2020). doi: 10.1007/s12205-020-1306-5.
21. Dugue, V., Blancckaert, K., Chen, Q. and et al. "Influencing flow patterns and bed morphology in open channels and rivers by means of an air-bubble screen", *Journal of Hydraulic Engineering*, **141**(2), pp. 1-13 (2015). doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000946.
22. Sasaki, T. and Asaeda, T. "Air curtain for preventing the salt water intrusion in estuaries", *Environmental System Research*, **21**(8), pp 335-338 (in Japanese) (1993).
23. Nakai, M. and Arita, M. "An experimental study on prevention of saline wedge intrusion by an air curtain in rivers", *Journal of Hydraulic Research*, **40**(3), pp. 333-339 (2002).

24. Uittenbogaard, R., Cornelisse, J. and O'Hara, K. "Water - air bubble screens reducing salt intrusion through shipping locks", 36th IAHR World Congress, The Hague, The Netherlands (28 June-3 July, 2015).
25. Weiler, O., de Kerk, A.J. and Meeuse, K.-J. "Preventing salt intrusion through shipping locks: Recent innovations and results from a pilot setup", 36th IAHR World Congress, (2015).
26. Van der Ven, PPD and Oldenziel, G. "A scale model study assessing the performance of a bubble screen mitigating salinity driven lock exchange", in *Proceedings of the 5th IAHR Europe Congress - New Challenges in Hydraulic Research and Engineering*, pp. 673-674 (2018). doi: 10.3850/978-981-11-2731-1.
27. Oldeman, A.M., Kamath, S., Masterov, M.V. and et al. "Numerical study of bubble screens for mitigating salt intrusion in sea locks", *International Journal of Multiphase Flow*, **129**, 103321 (2020) (DOI:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2020.103321).
28. Nabhani, N. "Fluid mechanics", in Sharif University of Technology Applications, Iran (in Persian) (2011).
29. Fluent Theory Guide 18.2.0, Fluent Inc. (2017).
30. Asaeda, T., Arita, M. and Hong son, P. "Prevention of saline wedge intrusion by an air curtain in an estuary", *JSCE Proceedings* , **572**(II-40), pp. 23-31 (in Japanese) (1997).