



شبیه سازی اثر پیشروی آب شور بر تخلیه آلاینده‌ها در آبخوان ساحلی زیر حوضه تالار

سید احسان فاطمی^۱، بهزاد عطایی آشتیانی^۲

۱- کارشناس ارشد منابع آب، شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس

۲- دانشیار دانشگاه صنعتی شریف تهران

نمابر: ۰۲۱-۲۲۲۶۲۱۰۳، پست الکترونیکی: e_fatemi78@yahoo.com

آدرس: تهران، خیابان شهید وحید دستگردی، کوی تخارستان، شماره ۱۷، شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس

خلاصه

شبیه‌سازی انتقال و تخلیه آلاینده‌ها از آبخوانهای ساحلی به دریا بعثت شرایط مرزی در سمت دریا پیچیده می‌باشد. مدل Sharp که در این تحقیق توسعه داده شده است، برای مدل‌سازی پیشروی آب شور در سفره‌های ساحلی لایه‌ای تهیه شده و معادلات جریان آب شور و آب شیرین را با شرط مرزی تساوی فشار در دو سمت سطح تماس به طور همزمان حل می‌نماید. اثر پیشروی آب شور بر انتقال و تخلیه آلاینده‌ها و تاثیر ابعاد مش بندی در آبخوان ساحلی زیر حوضه تالار شبیه‌سازی شد. نتایج نشان می‌دهد که پیشروی آب شور اثر قابل توجهی بر انتقال آلاینده در آبخوانهای ساحلی دارد. با بررسی نتایج حاصل از شبکه‌بندی‌های مختلف مشخص گردید که بکار بردن شبکه بندی مختلط در نقاط مرزی به دریا، منجر به افزایش دقت نتایج و کاهش زمان محاسبات در مقایسه با سایر شبکه‌بندی‌های انجام شده می‌گردد.

کلمات کلیدی: انتقال آلودگی، پیشروی آب شور دریا، شبیه‌سازی عددی، آبخوان ساحلی، دریای خزر

مقدمه

آب زیرزمینی بعنوان مهمترین و اصلی‌ترین منبع تامین آب نواحی ساحلی بخصوص در مناطق خشک و نیمه خشک در اثر ورود آلاینده‌های مختلف، ناشی از فعالیت‌های صنعتی، کشاورزی و توریستی با معضل آلودگی کاهش شدید کیفیت مواجه شده است. پیشروی آب شور دریا که در اثر اختلاف چگالی بین آب شور و شیرین بصورت یک گوه در زیر آب شیرین قرار می‌گیرد، آلاینده دیگری است که آبخوان‌های ساحلی در معرض آن هستند [۱]. آلاینده‌ها از منابع سطحی وارد آب زیرزمینی شده و همراه آن به سمت دریا حرکت می‌کنند. این آلاینده‌ها علاوه بر آلوده سازی آب شیرین زیرزمینی، به همراه آب شیرین به دریا تخلیه شده و محیط دریا را نیز با خطرات زیست محیطی به مخاطره می‌اندازد. بنابراین شناخت الگوی انتقال آلاینده‌ها در نواحی ساحلی و میزان تخلیه آب شیرین و آلاینده‌های همراه آن، امری ضروری بنظر می‌رسد. پیشروی آب شور در سفره‌های ساحلی پدیده مهم و قابل توجهی است که به شور شدن آب زیرزمینی شیرین حتی به بیشتر از میزان استانداردهای مجاز آب آشامیدنی و کشاورزی می‌انجامد. به دلیل رشد جمعیت و این حقیقت که ۵۰ درصد از مردم در حاشیه دریاها و اقیانوس‌ها زندگی می‌کنند، آلودگی آب زیرزمینی در نواحی ساحلی به یک مسئله جدی تبدیل شده است. سابقاً پیشروی آب شور توسط هیدروژئولوژیست‌ها دنبال می‌شد، در حالی که تخلیه آب شیرین زیرزمینی و مواد همراه آن به دریا، توسط اقیانوس‌شناسان مطالعه می‌گشت. با این حال ترکیب مطالعه این دو فرآیند از لحاظ مدیریتی، علمی و فنی بسیار سودمند خواهد بود. واضح است که پیشروی آب شور در آبخوان‌های ساحلی و تخلیه آب شیرین زیرزمینی به دریا، متقابلاً بر یکدیگر اثر می‌گذارند [۲] و [۳].

^۱ کارشناس گروه برنامه‌ریزی منابع آب شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس
^۲ دانشیار و رئیس دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شریف تهران



شناخت و تشخیص آلودگی در آب های زیر زمینی برخلاف آب های سطحی بسیار مشکل است. علاوه بر این رفع آلودگی آب های زیر زمینی نسبت به آب های سطحی از اهمیت بیشتری برخوردار است. زیرا آلودگی آب های سطحی بعد از برداشتن منابع آلوده کننده با توجه به سرعت زیاد جریان برطرف خواهد شد، ولی در آب های زیرزمینی با گذشت زمان، وسعت آلودگی افزایش خواهد یافت. یکی از مسائل مهم در زمینه آلودگی آب های زیر زمینی که خطر آن را بسیار جدی می سازد، طبیعت بلند مدت آن است، ده ها سال طول می کشد تا موادی که سال ها پیش در زمین دفن شده و سبب آلودگی آب زیرزمینی گشته اند، کشف شود. اگر چه مناطقی که آب های زیرزمینی آنها آلوده است، کم وسعت می باشد؛ اما به دلیل جابه جایی آلاینده ها به همراه آب زیر زمینی و دور شدن آن از منبع آلودگی در یک دوره زمانی طولانی، پلوم های آلودگی وسیع نیز گزارش شده اند [۴]. عطایی آشتیانی و همکاران در سال ۲۰۰۱ در مقایسه بین نتایج عددی انتقال آلاینده در نواحی ساحلی با شرایط مرزی ساده شده سمت دریا و نتایج آزمایشگاهی که تغییرات جزر و مدی و فصل مشترک آب شور و آب شیرین را در نظر می گرفت، نشان دادند که صرف نظر کردن از تداخل آب دریا و تغییرات جزر و مدی بر آهنگ کلی انتقال آلاینده، تا قبل از رسیدن به فصل مشترک آب شور و آب شیرین مؤثر نیست. در نظر نگرفتن دانسیته آب شور در مدل عددی آنها، حرکت آلاینده را به سمت دریا و خروج قسمتی از پلوم را در پایین فصل مشترک نشان داد. این نتیجه با نتایج مدل آزمایشگاهی که حرکت آلاینده را به سمت بالا در امتداد فصل مشترک و خروج از خط ساحلی نشان می دهد، متفاوت است. بنابراین صرف نظر کردن از دانسیته آب شور به برآوردی دست پایین و حداقل از میزان خروج آلاینده از خط ساحلی و مسیرهای غیر واقعی انتقال در پایین آبخوان ساحلی منجر می شود. اما در مورد آلاینده هایی که چگالی کمی دارند صرف نظر کردن از دانسیته آب شور، تأثیر بسیار کمی در مسیرهای جابجایی آلاینده دارد [۲] و [۵].

در تعریف مسائل طبیعی ساده سازی شرایط (شرایط مرزی و...) یکی از راه های معمول در محاسبات عددی برای کاستن از هزینه و زمان طولانی اجرای مدل ها می باشد. از این رو تحقیق در زمینه اثر ساده سازی شرایط مرزی در سمت دریا مانند صرف نظر کردن از پیشروی آب شور، مفید و مناسب خواهد بود؛ صرف نظر کردن از پیشروی آب شور (چگالی آب شور)، به صرفه جویی قابل توجهی در زمان و هزینه محاسبات منجر می گردد. بعلت پیشروی آب دریا در آبخوانهای ساحلی، سه ناحیه قابل تشخیص است: ناحیه آب شیرین، ناحیه اختلاطی یا پخشی و ناحیه آب شور [۶]. آب شیرین از بالای آب شور جریان یافته و از خط ساحلی به دریا تخلیه می گردد. در ناحیه اختلاطی پراکندگی هیدرودینامیکی رخ می دهد، در این ناحیه غلظت نمک از آب شور دریا تا آب شیرین زیرزمینی متغیر است. این ضخامت بین یک تا صد متر گزارش شده است. بطور کلی دو دیدگاه برای مدل کردن پیشروی آب شور دریا به آبخوان های ساحلی وجود دارد: زمانی که ضخامت ناحیه انتقالی نسبت به ضخامت لایه آبخوان کوچک باشد، می توان از پراکندگی هیدرودینامیکی صرف نظر کرد، در این حالت آب شور و آب شیرین بصورت دو سیال مخلوط نشدن در نظر گرفته می شوند. این روش بنام روش سطح تماس غیراختلاطی شناخته می شود. اگر ضخامت ناحیه انتقالی قابل توجه باشد، با در نظر گرفتن پراکندگی هیدرودینامیکی مساله از دیدگاه فصل مشترک اختلاطی بررسی می شود [۶]. برای حل مساله در حالت تداخل، آب شور و شیرین به عنوان دو مایع جداگانه در نظر گرفته می شوند که معادلات حاکم بر حرکت آب زیرزمینی برای هر کدام بطور جداگانه حل می شود. برای ساده کردن معادلات ریاضی حاکم بر جریان آب شور و شیرین از فرض سطح تماس غیراختلاطی استفاده می شود که در آن شرایط مرزی فرض شده توسط Badon Ghizben - Herzberg مورد استفاده قرار می گیرد.

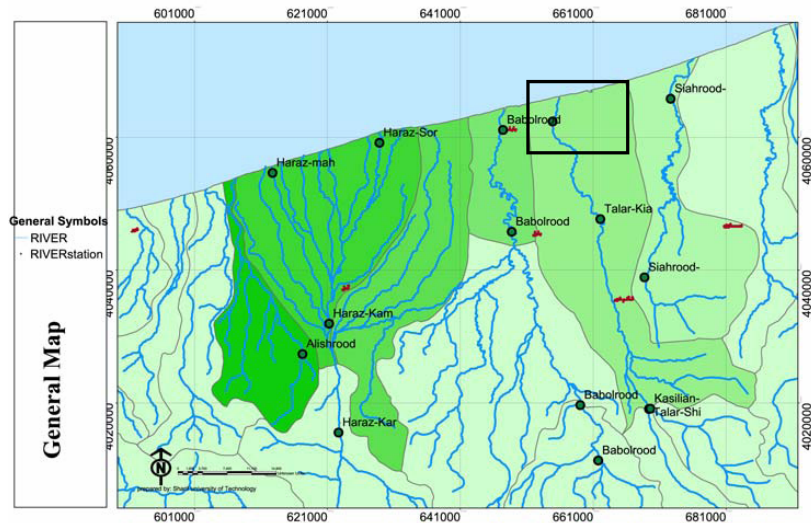
فرضیات حاکم بر سطح تماس غیر اختلاطی عبارتند از:

- ۱- تنها در جهت افقی جریان داریم و معادلات در جهت عمودی انتگرال گیری می شوند.
- ۲- تعادل هیدرواستاتیکی بین آب شور و شیرین وجود دارد.
- ۳- نفوذپذیری و ضریب ذخیره در جهت عمودی ثابت هستند.
- ۴- اگر تراوش وجود داشته باشد در حالت آرام مورد بررسی قرار می گیرد. (در لایه نشتی فرض می شود که ذخیره های وجود ندارد). به دلیل اینکه در این مقاله از یک مدل سطح غیراختلاطی استفاده شده است.
- ۵- فرضیات Badon Ghizben - Herzberg برقرار می باشد.

این فرضیات به همراه فرض همسان بودن و متقارن بودن آبخوان از فرضیاتی هستند که در مدل های تحلیلی نیز در نظر گرفته می شوند [۷] و [۸]. مدل SHARP در سال ۱۹۸۷ توسط Essaid جهت بررسی رفتار سطح جدا کننده و نحوه حرکت آن در اثر تغییراتی که در آبخوان صورت می پذیرد، تهیه شده است.

معرفی محدوده مطالعاتی

ناحیه ساحلی استان مازندران بین مدارهای ۳۶ تا ۳۷ درجه عرض شمالی و مدارهای ۵۲ تا ۵۳ درجه طول شرقی قرار گرفته است. این منطقه عموماً دشت ساحلی استان مازندران را شامل می شود. محدوده مورد نظر از شمال به دریای خزر، از جنوب به ارتفاعات یال شمالی سلسله جبال البرز، از غرب به زیر حوضه سیاهرود و از شرق به زیر حوضه بابلرود محدود می شود. رودخانه بابلرود از جنوب به شمال جریان دارد. آب این رودخانه دائمی بوده و از آن برای آبیاری اراضی شالی استفاده می شود. شکل ۱- محدوده مورد مطالعه را در کل حوضه آبریز مازندران نمایش می دهد. به منظور مدلسازی نفوذ شوری در آبخوان ساحلی از نوار باریکی به عرض ۱۵ کیلومتر از خط ساحلی (عمود بر نوار ساحلی) استفاده شده و نیازی به در نظر گرفتن کل محدوده نمی باشد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی عمومی زیرحوضه تالار نسبت به کل حوضه آبریز مازندران

نحوه مدلسازی:

به منظور مدلسازی این ناحیه از دوزنقه ای به طول ۱۵ کیلومتر، با عرضهای ۱۰/۵ و ۷/۵ کیلومتر استفاده شده است. حداکثر عمق آبخوان ۴۸/۷ متر در قسمت جنوب شرقی و حداقل عمق ۱۰ متر در نوار ساحلی زیر حوضه تالار می‌باشد. به منظور گسسته سازی ناحیه مزبور از مش‌های ۵۰۰ متری در جهات X و Y استفاده شده است. بعضی از مشخصات مدلسازی و فیزیکی زیرحوضه در جدول ۱- زیر آورده شده است. در منطقه طرح چاههای بسیاری وجود دارند که از آنها آب قابل ملاحظه ای برداشت می‌شود. در مجموع سالانه ۱۴۷۷۶ مترمکعب آب از زیر حوضه سیاهرود برداشت می‌شود.

جدول ۱- مشخصات مدلسازی و فیزیکی زیر حوضه تالار

مقدار عددی	مقدار در نظر گرفته شده	پارامتر
-----	عدد ۲۳	تعداد المانها در جهت X
	متر ۵۰۰	طول المانها در جهت X
	عدد ۳۲	تعداد المانها در جهت Y
	متر ۵۰۰	طول المانها در جهت Y
	روز ۱۰	فاصله زمانی حل معادلات
	عدد ۶	تعداد چاه مشاهده ای
۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب	-----	چگالی آب شیرین
۱۰۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب		چگالی آب شور
۱۰ متر بر روز		ضریب هدایت هیدرولیکی
۰/۲		تخلخل محیط
۱۵ کیلومتر		عرض آبخوان
متوسط ۲۴ متر		عمق آبخوان ^۱
۶×۱۰^{-۴} ثانیه ^{-۱}		ضریب ذخیره ویژه آب شیرین
$۶/۱۵ \times ۱۰^{-۴}$ ثانیه ^{-۱}		ضریب ذخیره ویژه آب شور
۵×۱۰^{-۱۰} متر بر ثانیه		میزان تغذیه خالص زیر حوضه

^۱ در اجرای برنامه از داده های واقعی مربوط به هر node استفاده شده است.



جهت مدلسازی چاههای مشاهده‌ای چهار چاه با مختصات های (۴و۲۹) و (۷و۱۱) و (۱۵و۱۴) و (۱۵و۲۰) و (۱۸و۳۰) و (۲۰و۸) در نظر گرفته شده، که به منظور تعیین مقدار تخلیه هر چاه مشاهده ای از متوسط تخلیه سالیانه چاهها استفاده شده است.

شرایط مرزی و اولیه:

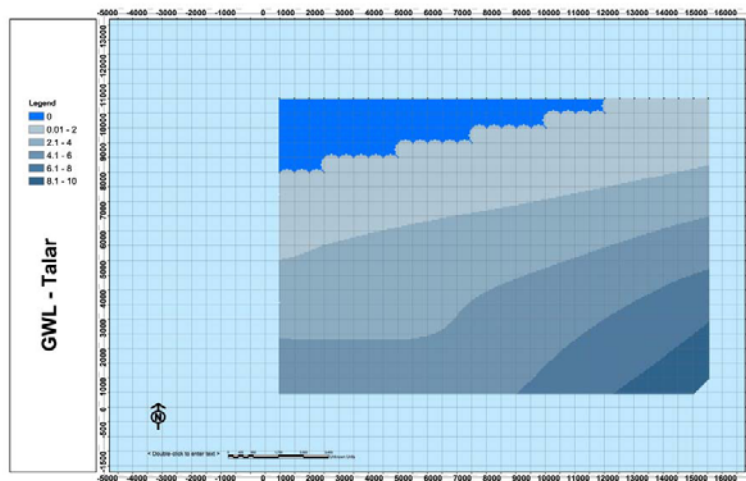
اصولاً مرزهای جانبی سیستم براساس تاثیر فیزیکی شرایط هیدروژئولوژیکی درحوضه تعیین می‌گردد. باتوجه به اینکه دراین حوضه هیچ گونه مرزفیزیکی مشخصی وجود ندارد، لذا این مرزها بدون جریان (No flow boundary) در نظر گرفته می‌شوند. باتوجه به نحوه قرارگرفتن خطوط جریان در مرزهای کناری زیرحوضه می‌توان در مورد چگونگی شرایط مرزی در این نواحی تصمیم‌گیری نمود. پس از رسم خطوط جریان توسط نرم افزار GIS روشن گردید که خطوط جریان بر مرزهای کناری عمود بوده، بنابراین می‌توان این مرزها را بدون جریان (No flow boundary) در نظر گرفت.

با توجه به بررسی‌های به عمل آمده میزان تراکم نسبی چاه‌های موجود در خط ساحلی زیر حوضه تالار زیاد بوده، از طرفی هد آب زیرزمینی در نوار ساحلی مقداری یکسانی دارد. دلیل این امر همجواری چاه‌ها با دریا و پیشروی آب شور در آنها می‌باشد که منجر به شور شدن چاه‌ها شده است. لذا در نوار ساحلی مقدار هد ثابت آب شور برابر ۲/۲۵ متر منظور شد. به منظور تعیین شرایط اولیه فصل مشترک آب شور و شیرین و تعیین ارتفاع اولیه آب شیرین، میتوان از فرمول های گیبین - هرتزبرگ استفاده نمود.

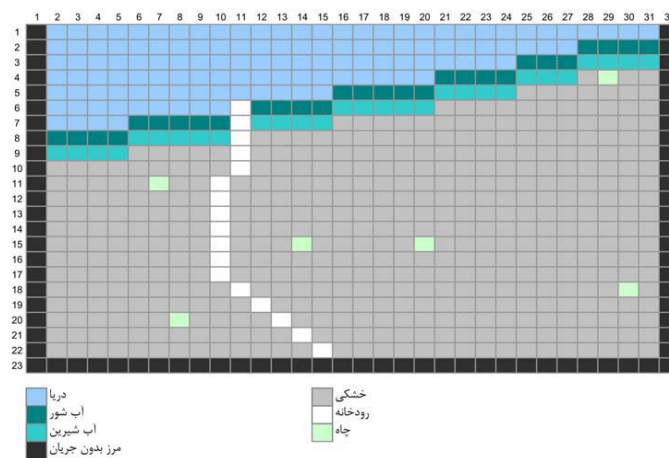
$$z = -h_f / \delta \quad (1)$$

$$\delta = \gamma_f / (\gamma_s - \gamma_f) \quad (2)$$

که در آن γ_s و γ_f وزن مخصوص آب شور و شیرین، h_f ارتفاع اولیه سطح آب زیرزمینی هستند.



شکل ۲- رسم خطوط جریان در زیرحوضه تالار



شکل ۳- مدل شماتیک و نحوه قرارگیری چاه ها و رودخانه تالار در منطقه مطالعاتی

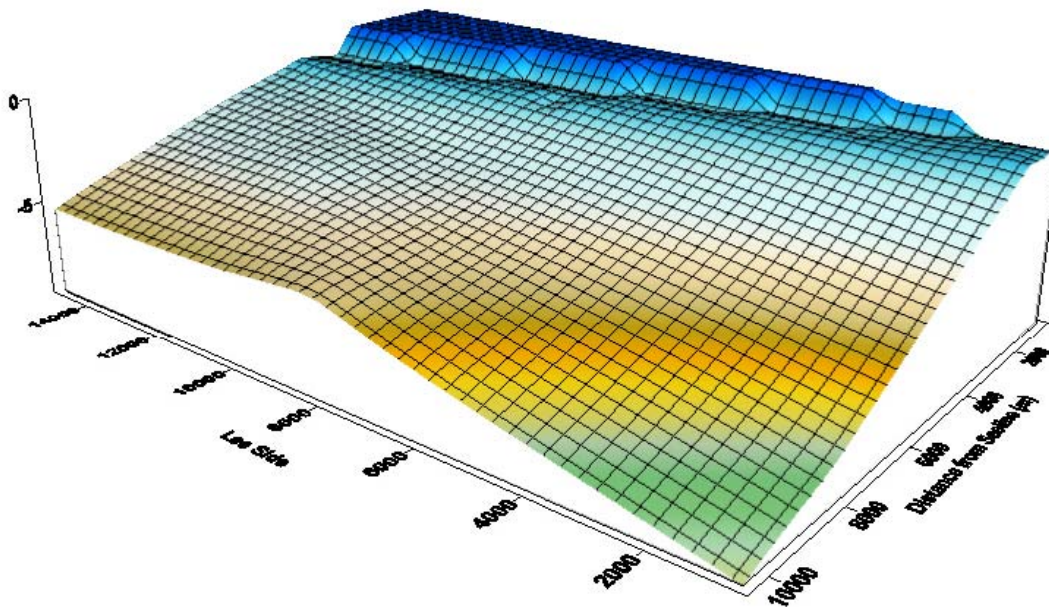


جهت برقراری گرادیان هیدرولیکی آب زیرزمینی در زیرحوضه، پنجره خروجی آب شیرین درستون بالایی خط ساحلی (یک ردیف پایین تر از هد ثابت آب شور) با آبگذری بالا (نسبت هدایت هیدرولیکی قائم به هدایت هیدرولیکی افقی برابر ۰/۰۰۱) منظور شد. همچنین لازم است هد ثابت آب شیرینی نیز در این محل در نظر گرفته شود، این مقدار برای زیرحوضه تالار مقدار ثابت ۲ متر می باشد. در نهایت مدل شبیه سازی شده از زیر حوضه تالار با توجه به شرایط اولیه مرزی بصورت شماتیک در شکل ۳ آورده شده است. در این شکل مختصات چاهها و هندسه نوار ساحلی قابل مشاهده می باشد.

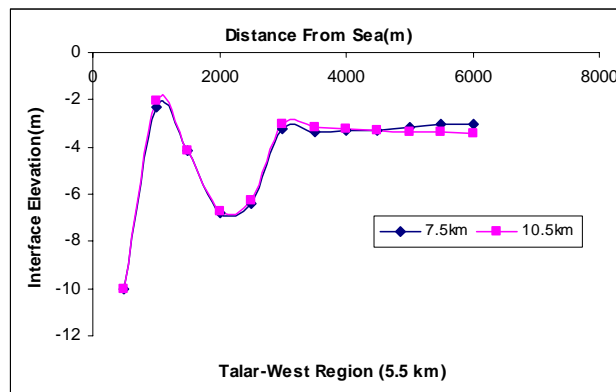
نتایج مدلسازی:

با اعمال شرایط بالا وضعیت قرارگیری فصل مشترک آب شور و شیرین در حالت سه بعدی بصورت شکل ۴ می باشد. نتایج برای دو مقطع عرضی یکی در فاصله ۵/۵ کیلومتری از غرب حوضه (قسمت غربی حوضه) و دیگری در ۱۳ کیلومتری از غرب زیرحوضه (قسمت شرقی) برای فواصل عمودی ۷/۵ و ۱۰/۵ کیلومتر از خط ساحلیدر شکل های ۵-الف و ۵-ب آورده شده است.

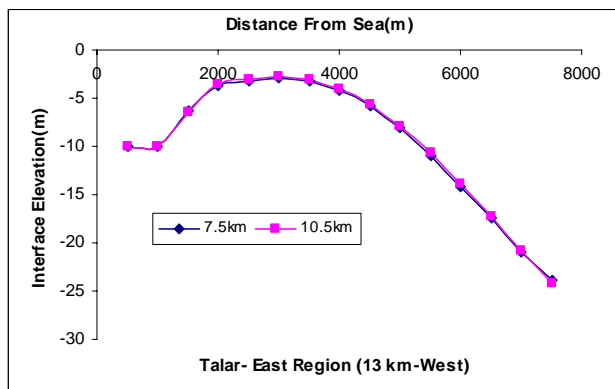
Sea Side



شکل ۴- نتایج حاصله از پیشروی آب شور در زیرحوضه تالار



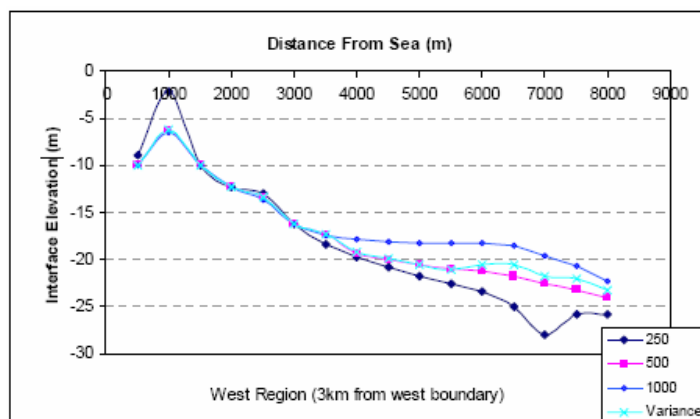
شکل ۵ الف- موقعیت ارتفاع فصل مشترک در ناحیه غربی زیرحوضه تالار



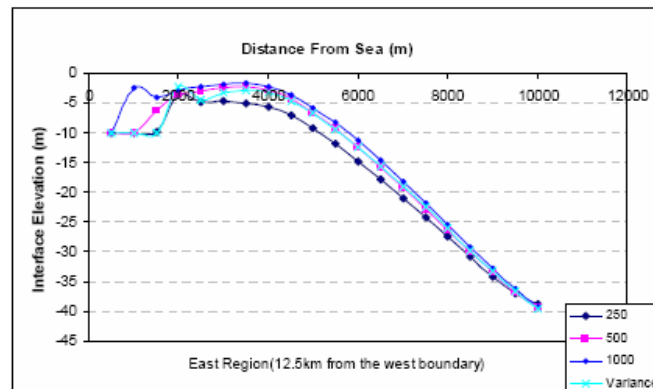
شکل ۵ ب- موقعیت ارتفاع فصل مشترک در ناحیه شرقی زیرحوضه تالار

همانطور که از شکل ۵ پیداست در ناحیه غربی زیرحوضه ارتفاع فصل مشترک به سمت بالا (سطح زمین) حرکت کرده است و سبب تشکیل مخروط رو به بالا یا up coning شده است، بدین معنی که آبخوان در این ناحیه مورد هجوم آب شور دریا قرار گرفته است. دلیل این امر استفاده بیش از اندازه آب زیرزمینی می باشد. به منظور دستیابی به شبکه بندی مناسب از چند سری مش بندی ریز و درشت استفاده شده تا نهایتاً شبکه بندی مناسبی که هم خیلی ریزنبوده و هم تغییری در صحت جوابها حاصل نگردد، انتخاب گردد. از آنجا که ابعاد مش بندی تاثیر به سزایی در دقت و پیچیدگی مدل به لحاظ زمان اجرا دارد، لازم است ابعاد مش بندی به گونه ای تعیین شود که علاوه بر ریز نبودن بیش از اندازه مشها، بتوان به دقت نتایج مدل اطمینان داشت. برای این منظور چهار نوع مش بندی ۲۵۰ متری، ۵۰۰ متری، ۱۰۰۰ متری و ترکیبی از هر سه مش بندی در زیرحوضه انجام شده است.

شکل های ۶ و ۷ وضعیت قرارگیری فصل مشترک آب شور و شیرین را در دو مقطع عرضی (شرقی- غربی) برای انواع مش بندی ریز و درشت نشان می دهد. همانگونه که از شکل ۶ و ۷ پیداست نمودار مربوط به حالت variance (ترکیبی از سه مش بندی قبلی، بدین ترتیب که در نوار ساحلی از مش ریزتر و با زیاد شدن فاصله از ساحل مش درشتراستفاده شده است) مناسب تر می باشد. دلیل این امر داشتن دقت مناسب، پرهیز از طولانی شدن اجرای برنامه نسبت به مش ریز ۲۵۰ متری و پرهیز از پراکندگی عددی در مقایسه با مشهای ریزتر می باشد. با توجه به نتایج بدست آمده از وضعیت پیشروی آب شور در زیر حوضه تالار، این منطقه در معرض شور شدن آب زیر زمینی قرار دارد. به منظور جلوگیری از پیشروی آب شور مخصوصاً در ناحیه غربی زیر حوضه تالار بایستی با رعایت مدیریت یکپارچه و اصولی سبب کاهش میزان برداشت از منابع آب زیر زمینی شد.



شکل ۶ - مقایسه نتایج ارتفاع فصل مشترک از نقطه نظر ابعاد مش بندی در ناحیه غربی زیرحوضه تالار



شکل ۷- مقایسه نتایج ارتفاع فصل مشترک از نقطه نظر ابعاد مش بندی در ناحیه شرقی زیرحوضه سیاهرود

جمع بندی و نتیجه گیری

انتقال آلاینده ها در آبخوان های ساحلی و تخلیه آنها به دریا به شدت تحت تاثیر پیشروی آب شور و نوسانات سطح آب دریا و بطور کلی شرایط مرزی آبخوان در سمت دریا، قرار دارد. بنابراین شناخت پدیده پیشروی آب شور و نحوه مد لسازی آن ضروری می باشد. از طرفی اکثر مسائل واقعی بسیار پیچیده هستند و به دلیل محدودیت اطلاعات هیدروژئولوژیکی و شرایط مرزی نامعین، نتایج مدل های عددی در حد مطالعه موردی قابل قبول خواهند بود. به همین دلیل، تحقیق زیادی برای تعیین اثر و اهمیت اطلاعات محدود میدانی مورد نیاز است. بنابراین در این مقاله سعی شده وضعیت پیشروی آب شور در یک آبخوان واقعی (زیر حوضه تالار) و تعیین اثرات پیشروی در تخلیه آلاینده ها به دریا بررسی گردد. انتخاب مش بندی مناسب در جهت طولی (عمود بر نوار ساحلی) را می توان از دیگر اهداف مقاله برشمرد. انتخاب مش ترکیبی (مختلط) براساس استفاده از مش ریزتر در نوار ساحلی و در نظر گرفتن مش درشت تر با افزایش فاصله از نوار ساحلی صورت گرفته است، نتایج نشان می دهد که استفاده از مش بندی ترکیبی (مختلط) سبب کاهش زمان محاسبات و پرهیز از پراکندگی عددی در مقایسه با مش های ریزتر می گردد. نتایج شبیه سازی پیشروی آب شور در زیر حوضه تالار نشان می دهد که در ناحیه غربی زیرحوضه ارتفاع فصل مشترک به سمت بالا (سطح زمین) حرکت کرده است و سبب تشکیل مخروط رو به بالا یا up coning شده است، بدین معنی که آبخوان در این ناحیه مورد هجوم آب شور دریا قرار گرفته است.

مراجع

۱. فاطمی، سید احسان (۱۳۸۴)، شبیه سازی تخلیه آلاینده ها به مناطق ساحلی از آبخوان های ساحلی در مقیاس منطقه ای، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف تهران.

2. Ataie-Ashtiani, B., Volker, R.E., Lokington, D.A (2002) Contaminant transport in coastal aquifers influenced by tide, *Australian Civil Engineering Transactions*, vol. CE43, pp 1-11.
3. Li, L., Barry, D.A., Stagnitty, F., Parlange, J. Y (1999) Submarine ground water discharge and associated chemical input to a coastal sea, *Water Resources, Research*, 35 (11). 3253-3259.
4. Uchiyama, Y., Nadaoka, K., Rolke, P., Adachi, K., Yagi, H (2000). Submarine ground water discharge into the sea and associated nutrient transport in a sandy beach, *Water Resources Research*, 36 (6), 1467-1479.
5. Essink, G. O (2000) Density dependent Groundwater flow salt water intrusion and Heat transport. *lecture notes, Utrecht University Department of Geophysics*.
6. Reilly, Th. E. & Goodman, A. S (1985). Quantitative analysis of saltwater fresh water relationships in groundwater systems a historical perspective, *Journal of Hydrology*, 80, 125-160.
7. Essaid, H.I (1987). A quasi three dimensional finite difference model for the simulation of fresh water and salt water flow in a coastal aquifer system, Ph.D. Thesis, *Stanford Univ., Stanford, Calif*.
8. Essaid, Hedref I (1987). Freshwater-Saltwater Flow Dynamics in Coastal Aquifer System: Development and Application of a Multi-Layered Sharp Interface Model, Ph.D. Thesis, *Stanford University*.