

Numerical model of Transport and Contaminant Discharge from Coastal Aquifers into Seaward

B. Ataie- Ashtiani¹, H. R. Hosseinabadi²,
E. Fatemi²

Abstract

Transport and contaminant discharge Simulation from coastal aquifers into seaward is complex due to boundary condition in seaward. In this research, ModSharp, a numerical model has been developed that is able to simulate contaminants transport in large scale in coastal aquifers. This model solves Advection-Dispersion equation with method of characteristics. The accuracy of the model was evaluated for several idealized problems for which analytical and numerical solution, in field of seawater intrusion and contaminant transport could be obtained. Effect of seawater intrusion on contaminants transport in coastal aquifers was simulated. Simulation results show that seawater intrusion has significant effect on solute transport in coastal aquifers. Neglecting the influence of seawater intrusion leads to a lower estimate for rate of contaminant discharge to sea.

Keywords: Contaminant Discharge, Seawater Intrusion, Numerical Simulation, Coastal Aquifer, Characteristics Method.

مدل عددی انتقال و تخلیه آلاینده ها از آبخوان ساحلی به دریا

بهزاد عطائی آشتیانی^۱ و حمیدرضا حسین آبادی^۲
و سیداحسان فاطمی^۲

چکیده

شبیه‌سازی انتقال و تخلیه آلاینده‌ها از آبخوانهای ساحلی به دریا به علت شرایط مرزی در سمت دریا پیچیده می‌باشد. مدل ModSharp که در این تحقیق توسعه داده شده است. مدلی قدرتمند و کارا برای مدل‌سازی انتقال آلاینده‌ها در آبخوانهای ساحلی در مقیاس بزرگ می‌باشد. این مدل معادله همرفتی-پراکندگی را به روش مشخصه‌ها حل می‌نماید. دقت و اعتبار مدل با حل چند مثال که جوابهای تحلیلی و عددی معلوم دارند، در زمینه پیشروی آب شور و انتقال آلاینده‌ها کنترل گردید. در ادامه اثر پیشروی آب شور بر انتقال و تخلیه آلاینده‌ها در آبخوانهای ساحلی شبیه‌سازی شد. نتایج نشان می‌دهد که پیشروی آب شور اثر قابل توجهی بر انتقال آلاینده در آبخوانهای ساحلی دارد. همچنین صرف‌نظر کردن از شرایط مرزی در سمت دریا به تخمینی کوچکتر از نرخ تخلیه آلاینده‌ها به دریا می‌انجامد.

کلمات کلیدی: انتقال آلودگی، پیشروی آب شور دریا، شبیه‌سازی عددی، آبخوان ساحلی، روش مشخصه‌ها

1- Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Sharif University of Technology,

2 - M.Sc., Water Resources Engineering, School of Civil Engineering, Sharif University of Technology

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف
۲- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

شبهه سازی عددی از روشهای سودمند و معمول مطالعه جریان آب زیرزمینی و انتقال آلایندهها بشمار می‌رود. از میان مدل‌های موجود، مدلی که توانایی شبهه‌سازی همزمان پیشروی آب شور و انتقال آلایندهها در آبخوانهای ساحلی را در مقیاس بزرگ دارا باشد، در دسترس نمی‌باشد. در این مقاله مدل ModSharp که توانایی شبهه‌سازی همزمان پیشروی آب شور و انتقال آلایندهها در آبخوانهای ساحلی را داراست، معرفی می‌گردد. سپس اثر پیشروی آب شور بر انتقال آلایندهها در آبخوانهای ساحلی بررسی می‌شود.

به‌علت پیشروی آب دریا در آبخوانهای ساحلی، سه ناحیه قابل تشخیص است: ناحیه آب شیرین، ناحیه اختلاطی یا پخشی و ناحیه آب شور (Reilly and Goodman (1985). آب شیرین از بالای آب شور جریان یافته و از خط ساحلی به دریا تخلیه می‌گردد. در ناحیه اختلاطی پراکندگی هیدرودینامیکی رخ می‌دهد، در این ناحیه غلظت نمک از آب شور دریا تا آب شیرین زیرزمینی وابسته است. این ضخامت بین یک تا صد متر گزارش شده است. بطور کلی دو دیدگاه برای مدل کردن پیشروی آب شور دریا به آبخوانهای ساحلی وجود دارد: زمانی که ضخامت ناحیه انتقالی نسبت به ضخامت لایه آبخوان کوچک باشد، می‌توان از پراکندگی هیدرودینامیکی صرف‌نظر کرد، در این حالت آب شور و آب شیرین بصورت دو سیال مخلوط نشدنی در نظر گرفته می‌شوند. این روش بنام روش سطح تماس غیراختلاطی شناخته می‌شود. اگر ضخامت ناحیه انتقالی قابل توجه باشد، با در نظر گرفتن پراکندگی هیدرودینامیکی مساله از دیدگاه فصل مشترک اختلاطی بررسی می‌شود (Reilly and Goodman (1985). تخلیه آب زیرزمینی به دریا می‌تواند به عنوان محملی برای ورود آلایندهها از آب زیرزمینی به دریا باشد (Essaid, 1987). تخلیه آب شیرین به دریا مسیری برای انتقال آلایندهها (آلایندههای فلزی، آلی و رادیواکتیو ناشی از فعالیتهای بشر) به دریا خواهد بود. Johannes (1980)، خاطر نشان کرد که در بسیاری از سواحل، تخلیه آب زیرزمینی به دریا، شامل میزان زیاد و قابل توجهی آلایندههای معدنی و آلی می‌باشد.

داری و رابطه گین - هرزبرگ برای تعیین محل سطح تماس آب شور و آب شیرین استفاده کردند. Moore (1996) و Church (1996)، با استفاده از ردیابی Ra^{226} در آبهای ساحلی در سواحل آتلانتیک جنوبی به این نتیجه رسیدند که میزان دبی آب شیرین تخلیه شده به دریا در حدود ۴۰ درصد از دبی کل رودخانه‌های مجاور می‌باشد. Uchiyama et al. (2000) جریان آب زیرزمینی را در ساحل Hasaki مقایسه نمودند و دریافتند که آهنگ تخلیه آلایندههای همراه آب زیرزمینی به دریا، کمتر از نرخ تخلیه آلایندههای همراه آب رودخانه Tone به دریا است. Li et al. (1999)، مدلی تحلیلی برای تخلیه آب زیرزمینی به دریا و تعیین میزان مواد شیمیایی همراه آن معرفی کردند. آنها با استفاده از اطلاعات و داده‌های میدانی، نتایج مدل تحلیلی خود را با مشاهدات Moore مقایسه کردند. آنها با تقسیم خط ساحلی به بخشهایی که در هر یک از آن بخشها، شرایط ساحل و نوسانات تراز آب دریا در اثر جزر و مد و بالاروی موج یکنواخت فرض می‌شود، میزان تخلیه آب زیرزمینی به دریا در اثر جزر و مد، عامل تخلیه ۹۲ درصد از میزان کل آب زیرزمینی تخلیه شده به دریا است. این نتیجه با مشاهدات Moore (1996) سازگار می‌باشد. همچنین این مدل اثر جریانهای نوسانی و چرخه موضعی آب زیرزمینی در اثر امواج و جزر و مد بر افزایش آهنگ انتقال مواد شیمیایی به دریا را نشان می‌دهد. Ataie-Ashtiani et al. (1999a, 1999b, 2001, 2002) انتقال آلایندهها را در یک سفره ساحلی فرضی به طور عددی شبهه‌سازی کردند. همانگونه که مشاهده شد، کار بسیار کمی در زمینه انتقال آلایندهها در آبخوانهای ساحلی انجام شده است، هیچکدام از این مطالعات انتقال آلایندهها را بطور همزمان با در نظر گرفتن پیشروی آب شور مدل نکرده‌اند. بنابراین ضرورت تهیه مدلی که توانایی شبهه‌سازی انتقال آلاینده را بعد از رسیدن به خط ساحلی نیز داشته باشد احساس می‌گردد. در این مقاله سعی گردیده تا مدلی با قابلیت شبهه‌سازی همزمان پیشروی آب شور و جابجایی آلاینده ارائه گردد.

۲- مدل عددی ModSharp

در این قسمت مدل عددی تهیه شده ModSharp جهت شبهه‌سازی انتقال آلاینده در آبخوانهای ساحلی معرفی می‌گردد. مدل حاضر بر پایه مدل Sharp که از دیدگاه سطح تماس غیراختلاطی برای مدل‌سازی پیشروی آب شور استفاده می‌کند، استوار شده است. معادله همرفتی - پراکندگی با استفاده از روش مشخصه‌ها حل می‌شود. معادلات جریان در مدل Sharp به شکل زیر است.

(Sutcliffe (1972، رابطه و پیوستگی آشکار بین نرخ تخلیه آلاینده (معدنی و آلی) و میزان استحصال و صید ماهی را نشان داد. Nilsen & Dunn (1998) از ییزومتر برای تعیین هد آب زیرزمینی استفاده کردند. اندازه‌گیریهای آنها نشان داد که میدان سرعت در آبخوانهای ساحلی با پیشروی آب شور پیچیده می‌گردد. آنها از قانون

$$S_f B_f \frac{\partial \Phi_f}{\alpha} + n \alpha \frac{\partial \Phi_f}{\alpha} + [n \alpha \frac{\partial \Phi_f}{\alpha} - n(1+\delta) \frac{\partial \Phi_s}{\alpha}] = \frac{\partial}{\partial x} (B_f K_{fx} \frac{\partial \Phi_f}{\alpha}) + \frac{\partial}{\partial y} (B_f K_{fy} \frac{\partial \Phi_f}{\alpha}) + q_f + q_{lf} \quad (1)$$

$$S_s B_s \frac{\partial \Phi_s}{\alpha} + [n(1+\delta) \frac{\partial \Phi_s}{\alpha} - n \delta \frac{\partial \Phi_f}{\alpha}] = \frac{\partial}{\partial x} (B_s K_{sx} \frac{\partial \Phi_s}{\alpha}) + \frac{\partial}{\partial y} (B_s K_{sy} \frac{\partial \Phi_s}{\alpha}) + q_s + q_{ls} \quad (2)$$

معادله انتقال که به مدل Sharp اضافه شده است به شکل زیر است:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial x_i} (BD_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j}) - V_i \frac{\partial C}{\partial x_i} + \quad (8)$$

$$C \frac{\partial \Phi}{\partial t} + Q - n \frac{\partial B}{\partial t} - C'Q$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial x_i} (BD_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j}) - V_x \frac{\partial C}{\partial x} - V_y \frac{\partial C}{\partial y} + F \quad (9)$$

$$F = \frac{C(S \frac{\partial \Phi}{\partial t} + Q + \sum Q_{li} - n \frac{\partial B}{\partial t}) - C'Q - \sum C'_i Q_{li}}{n.B} \quad (10)$$

حال با در نظر گرفتن ذرات در حال حرکت به همراه جریان آب زیرزمینی، تغییرات زمانی خصوصیات سیال نظیر غلظت را می‌توان از دو منظر بررسی کرد. نخست با در نظر گرفتن یک سیستم مختصات ثابت که موقعیت ذرات سیال نسبت به آن سنجیده می‌شود؛ در این حالت خصوصیات سیال تابعی از زمان و مکان نظیر ذره هستند، (دیدگاه اولری). از دیدگاه دیگر، با در نظر گرفتن یک سیستم مختصات متحرک همراه ذرات سیال در حال حرکت، مکان و دیگر خصوصیات سیال تنها تابع زمان خواهد بود، (دیدگاه لاگرانژی). با توجه به این دو دیدگاه Aris در سال ۱۹۶۲ دو مشتق تعریف کرد؛ $\frac{\partial C}{\partial t}$ نرخ تغییرات غلظت مشاهده شده از یک نقطه ثابت و $\frac{dC}{dt}$ نرخ تغییرات غلظت مشاهده شده هنگام حرکت همراه یک ذره سیال. Aris مشتق دوم را مشتق مادی^۱ نامید. این مشتق را می‌توان به فرم زیر نوشت:

$$\frac{dc}{dt} = \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial c}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial c}{\partial y} \frac{dy}{dt} \quad (11)$$

با دقت در عبارتهای دوم و سوم در سمت راست معادله (۹) با عبارات دوم و سوم در سمت راست معادله (۱۱)، تناظر بین آنها را می‌توان درک کرد. عبارتهای دوم و سوم معادله (۱۱)، مشتق مادی موقعیت (مکان) را در بر می‌گیرد که سرعت تعریف می‌شود. مؤلفه‌های x و y موقعیت و سرعت:

$$\frac{dx}{dt} = v_x \quad (12)$$

$$\frac{dy}{dt} = v_y \quad (13)$$

همچنین میزان تراوش از یک لایه به لایه دیگر نسبت به حرکت افقی آب زیرزمینی ناچیز در نظر گرفته می‌شود (فرضیات دویوئی)، بنابراین نشت در راستای قائم از قانون تراوش یک بعدی داری محاسبه می‌شود. در صورت وجود اختلاف بار هیدرولیکی در دو سمت لایه نیمه‌تراوا از قانون داری با ترم‌های فشار محاسبه خواهد شد.

$$q_l = -\left(\frac{K'}{B'}\right)(\Phi_a - \Phi_b) \quad (3)$$

$$q_l = -\frac{K'}{B'} \left[\frac{\gamma_a}{\gamma_f} \Phi_a - \frac{\gamma_b}{\gamma_f} \Phi_b + \frac{(\gamma_b - \gamma_a)}{\gamma_f} \cdot \frac{(Z_a + Z_b)}{2} \right] \quad (4)$$

$\frac{K'}{B'}$ مقاومت علیه نشت $[T^{-1}]$ ، هدایت هیدرولیکی لایه محصورکننده، $\Phi_f = z + p_f / \gamma_f$ هد آب شیرین با فرض سیال تراکم ناپذیر $[L]$ ، $\Phi_s = z + p_s / \gamma_s$ هد آب شور با فرض سیال تراکم ناپذیر $[L]$ ، z تراز سطح لایه $[L]$ ، p_s و p_f به ترتیب فشار آب شیرین و آب شور $[ML^{-1}T^{-2}]$ ، δ_f و γ_s وزن مخصوص آب شیرین و آب شور $[ML^{-1}T^{-2}]$ ، S_s و S_f ذخیره ویژه آب شیرین و آب شور $[L^{-1}]$ ، q_s و q_f شار آب شیرین و آب شور $[LT^{-1}]$ ، Z_2 و Z_1 ، Z_0 ترازهای کف لایه، سطح تماس و بالای لایه آبدار $[L]$ ، n تخلخل مؤثر $[-]$ ، $\tilde{\Phi}_s$ و $\tilde{\Phi}_f$ هد متوسط آب شیرین و آب شور در راستای قائم $[L]$ ، q_{sz} و q_{fz} مؤلفه قائم شار تراوش آب شیرین و آب شور، K_s و K_f هدایت هیدرولیکی متوسط آب شیرین و آب شور در راستای قائم $[LT^{-1}]$ ، B_s و B_f ضخامت ناحیه آب شیرین و شور $[L]$ و در آن $\delta = \gamma_f / (\gamma_s - \gamma_f)$ و $q' = q_x I_x + q_y I_y$ و $\nabla \cdot (-) = \frac{\partial(-)}{\partial x} I_x + \frac{\partial(-)}{\partial y} I_y$

$$z_l = (1+\delta)\Phi_s - \delta\Phi_f \quad (5)$$

$$Q = Q_f + Q_{lf} \quad (6)$$

$$Q = Q_s + Q_{ls} \quad (7)$$

Q مقدار کل آب وارد (خارج) شده از بلوک، $[L/T]$ ؛ Q_{ls} و Q_{lf} میزان تراوش آب شیرین و شور از بلوک یک لایه به بلوک لایه مجاور، $[L/T]$ ؛ Q_s و Q_f میزان پمپاژ یا تزریق آب شیرین یا آب شور، $[L/T]$.

اگر سمت راست معادله (۹) و (۱۲) و (۱۳) با عبارتهای نظیر در معادله (۱۱) جایگزین شود، می توان نوشت:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial x_i} (BD_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j}) + F \quad (14)$$

جواب سیستم معادله (۱۲) تا (۱۴) به فرم زیر در نظر گرفته می شود:

$$x = x(t); y = y(t); C = C(t) \quad (15)$$

روابط (۱۵) منحنی های مشخصه معادله (۹)، نامیده می شوند. جوابهای معین معادلات (۱۲) تا (۱۴)، یک جواب معادله (۹) خواهند بود که با حرکت بروی منحنی های مشخصه، بدست می آید. به طور عددی این کار با در نظر گرفتن مجموعه ای از ذرات مرجع (نقاط متحرک)، که درون دستگاه مختصات ثابت شبکه تفاضل محدود قابل ردیابی هستند، صورت می گیرد. هر ذره نظیر یک منحنی مشخصه است و مقادیر x ، y و C به عنوان تابعی از زمان برای هر مشخصه بدست می آیند (Konikow and Grove, 1978).

لایه های محصور کننده، از یک لایه به لایه دیگر و همچنین از ناحیه آب شور (شیرین) به ناحیه آب شیرین (شور) در همان لایه منتقل می شوند و یا از سطح تراوش به دریا تخلیه می گردند. از این رو معادله انتقال در یک لایه باید هم در ناحیه آب شیرین و هم در ناحیه آب شور حل گردد. بدین منظور سرعت آب زیر زمینی در هر دو ناحیه محاسبه می گردد. جهت جلوگیری از حرکت آلاینده ها از ناحیه آب شیرین (شور) به ناحیه آب شور (شیرین) در یک لایه لازم است که محدوده حل معادله انتقال در هر کدام از نواحی مشخص باشد. برای این کار از مقدار ضخامت ناحیه آب شیرین (شور) به عنوان فاکتور تعیین حدود ناحیه استفاده شده است. اگر ضخامت ناحیه آب شیرین (شور) در یک بلوک صفر باشد، آن بلوک جزء محدوده حل معادله انتقال در ناحیه آب شیرین (شور) نخواهد بود. مدل Sharp، جریان در هر لایه را بطور متوسط افقی فرض می کند؛ در نتیجه انتقال آلاینده در هر سفره نیز در سطح افقی صورت می گیرد. مدل سازی انتقال آلاینده در راستای قائم (جابجایی آلاینده از یک لایه به لایه دیگر) به همراه نشست از لایه محصور کننده صورت خواهد گرفت.

Bear نشان داد که پراکنندگی مکانیکی و دیگری پخش یونی و مولکولی است. Bear تفکیک این دو فرایند را غیر واقعی و مجازی بر می شمارد. چون عمده جابجایی آلاینده در سیستم های فعال و جاری آب زیرزمینی از راه انتقال همرفتی صورت می گیرد. در این تحقیق از اثر پخش مولکولی و یونی صرف نظر شده است.

نخستین گام در روش مشخصه ها، جاگذاری تعدادی ذره یا نقاط قابل ردیابی در هر یک از بلوک های شبکه تفاضل محدود است؛ به نحوی که مجموعه هایی از نقاط با یک الگوی یکنواخت و منظم هندسی در ناحیه مورد نظر پراکنده گردند. قرار دادن ۴ تا ۱۶ ذره در هر بلوک نتایج قابل قبولی برای بیشتر مسائل دو بعدی بدست می دهد. موقعیت یا وضعیت هر ذره با مختصات x و y آن ذره در درون شبکه تفاضل محدود تعیین می شود. از دو روش تحلیلی و عددی برای ردیابی ذرات در درون بلوک ها استفاده می گردد. روش تحلیلی با استفاده از مفاهیمی چون خطوط جریان و توابع جریان به ردیابی ذرات می پردازد. روش تحلیلی به مسائل دو بعدی در حالت دائم محدود می باشد. در روش عددی که از عمومیت بیشتری برخوردار است، ذرات در درون میدان جریان جادهی شده و در میدان پیوسته توزیع مکانی سرعت حرکت می کند. سرعت با استفاده از توزیع هد در مدل عددی جریان آب زیرزمینی محاسبه می گردد. تاخیر آلاینده ها در اثر فرایند جذب سطحی را می توان با تقسیم سرعتها بر فاکتور تأخیر، در نظر گرفت.

پس از جاگذاری اولیه ذرات درون بلوک ها، غلظت هر ذره درون یک بلوک برابر غلظت آن بلوک در نظر گرفته می شود، بنابراین غلظت هر بلوک را می توان با میانگین ذرات درون آن بلوک نشان داد. هر ذره موقعیت و غلظت خاص خود را دارا بوده و متناسب با سرعت نظیر موقعیت خود در میدان جریان آب زیرزمینی حرکت می کند. با این روش ردیابی ذرات در میدان جریان قابل تصور خواهد بود و تغییرات غلظت در هنگام حرکت ذرات نشان داده می شود. سرعت آب زیرزمینی در مدل حاضر با عبارت تانسوری با استفاده از قانون دارسی به فرم زیر محاسبه می شود (Konikow and Grove, 1978):

$$V_i = -\frac{K_{i,j} \Phi_{i-1,j} - \Phi_{i+1,j}}{n} \frac{1}{2\Delta x} \quad (16)$$

V_i ، سرعت تراوش در جهت x_i ؛ $K_{i,j}$ ، تانسور هدایت هیدرولیکی $[L/T]$ ؛ Φ تخلخل مؤثر آبخوان $[-]$. در هر گام زمانی با حل معادلات جریان، هد آب شور (شیرین) محاسبه شده و می توان سرعت آب زیرزمینی را در هر گره با تقریب تفاضل محدود صریح معادله (۱۶) بدست آورد. با فرض عدم تبادل ذرات سیال از سطح تماس غیر اختلاطی عملاً انتقال آلاینده در صفحه افقی از ناحیه آب شور به آب شیرین و بالعکس امکان ندارد. از طرفی ارتباط بین لایه ها تنها با نشست از لایه محصور کننده صورت می گیرد؛ بنابراین آلاینده ها به محض رسیدن به سطح تماس تنها از طریق تراوش از

p شماره معرف ذره است. δx_p و δy_p مسافت‌های طی شده در جهات x و y هستند. سرعت‌های x و y نظیر مکان هر ذره با درونبایی سرعتها در گره‌ها و یا نقاط معلوم بدست می‌آید. غالباً در ردیابی ذرات از روشهای خطی^۲ و یا دو خطی^۳ برای درونبایی استفاده می‌گردد. هرچند گاهی اوقات از روشهایی چون درونبایی دومکعبی^۴ نیز استفاده می‌شود. رابطه درونبایی خطی برای محاسبه مؤلفه x سرعت V_x ، تنها تابعی از تغییرات سرعت V_x ، در راستای x است. در صورتی که گام زمانی جهت ردیابی بزرگ انتخاب شده باشد، خطاهای عددی بزرگ و بزرگتر می‌گردند. برای حل این مشکل یا از گام زمانی کوچکتر یا از روش چند مرحله‌ای رونگ-کوتا استفاده می‌شود. در صورتی که در فرمول اولر، عبارت مرتبه بالاتر مشتقات زمانی که نشان‌دهنده تغییرات سرعت نسبت به زمان (شتاب) باشد، وارد گردد روش بسط سری تیلور بدست می‌آید. در این تحقیق از روش انتگرال‌گیری اولر استفاده شده است. و برای مقابله با خطاهای عددی ناشی از گام زمانی بزرگ، در مدل تهیه شده از فرایندی خودکار برای کاهش زمانی استفاده می‌شود. استفاده از روش درونبایی ضروری است، زیرا در واقع ذرات درون یک فضای پیوسته حرکت می‌کند در حالی که سرعتها با استفاده از هد معلوم در نقاط یک شبکه گسسته شده، محاسبه می‌شوند.

این روش طی سه گام محاسبه می‌گردد:

گام اول - یک مقدار میانی برای سرعت در جهت x بین دو نقطه نزدیک به هم که سرعت در جهت x آنها معلوم است و ذره مابین آنها قرار دارد با توجه به وضعیت ذره P نسبت به این دو نقطه محاسبه می‌شود:

(۱۹- الف)

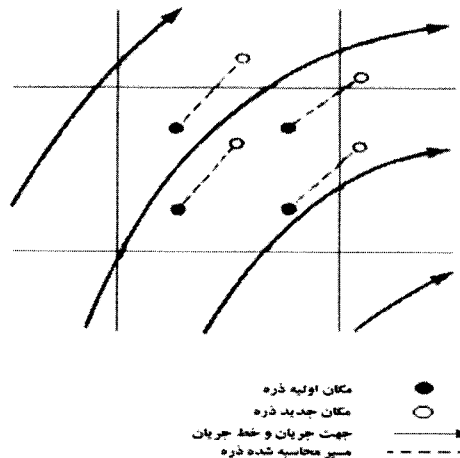
$$(V_x)_1 = (1 - f_x)V_x(i, j + 1) + f_x V_x(i + \frac{1}{2}, j + 1)$$

گام دوم - مقدار میانی دیگری برای سرعت در جهت x برای دو نقطه دیگر که با دو نقطه فوق‌الذکر ذره P را در بر گرفته‌اند و سرعت جهت x آنها معلوم است، محاسبه شود:

(۱۹- ب)

$$(V_x)_2 = (1 - f_x)V_x(i, j) + f_x V_x(i + \frac{1}{2}, j)$$

گام سوم - مقدار نهایی سرعت x ذره با استفاده از مقادیر میانی محاسبه شده در دو گام قبلی محاسبه می‌گردد:



شکل ۱- قسمتی از یک شبکه تفاضل محدود فرضی و ارتباط حرکت محاسبه شده ذرات و میدان جریان

این روش، توانایی ردیابی ذرات، تولید و حذف ذرات در جایی که از چشمه یا مرزهای تغذیه وارد شده و یا از چاه یا مرزهای تخلیه خارج می‌شوند، داراست. گسسته سازی افقی و قائم برای تعیین دقیق خط سیر، بخصوص در نواحی‌ای که جریان با تغییر ناگهانی نظیر چاه یا چشمه روبرو می‌شود از اهمیت زیادی برخوردار است. دقت روشهای عددی در ردیابی ذرات به طرح درونبایی جهت محاسبه سرعتها و روش استفاده شده برای حرکت ذرات بستگی دارد. بدلیل آنکه توزیع هد حاصل از معادله جریان تنها در نقاط گسسته معلوم می‌باشد، محاسبه سرعت در محل ذرات به درونبایی سرعتها نیازمند است. تفاوت روشهای عددی برای ردیابی سرعت و روش حرکت ذره باز می‌گردد.

در هر گام زمانی، ذره مسافتی متناسب با طول گام زمانی و سرعت نظیر موقعیت خودش حرکت می‌کند (شکل ۱). با حل معادلات (۱۲) و (۱۳) ذرات در طول خطوط سیر ردیابی می‌شوند. چهار روش معمول برای حل معادلات (۱۲) و (۱۳) وجود دارد: نیمه تحلیلی، اولر، رنج - کوتا و بسط سری‌های تیلور. روش نیمه تحلیلی برای زمانی که از طرح درونبایی خطی برای سرعت استفاده می‌شود، بکار می‌رود (Konikow and Grove, 1978).

موقعیت جدید ذره با روش انتگرال‌گیری اولر از معادلات (۱۲) و (۱۳) که در زیر آمده است، تعیین می‌گردد:

$$X_p^n = X_p^{n-1} + \delta x_p = X_p^{n-1} + \Delta t.V_{x[x_p^{n-1}, y_p^{n-1}]} \quad (۱۷)$$

$$y_p^n = y_p^{n-1} + \delta y_p = y_p^{n-1} + \Delta t.V_{y[x_p^{n-1}, y_p^{n-1}]} \quad (۱۸)$$

$$\Delta C = (\Delta C)_i + (\Delta C)_{ii} + (\Delta C)_{iii} \quad (21)$$

تغییر غلظت ناشی از پراکندگی هیدرودینامیکی است که اینگونه تعریف می‌شود:

$$(\Delta C)_i = \frac{\Delta t}{B} \cdot \left[\frac{\partial}{\partial x_i} (BD_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j}) \right] \quad (22)$$

تغییر غلظت ناشی از چشمه و چاه، تغییر در ضخامت اشباع را نشان می‌دهد:

$$(\Delta C)_{ii} = \Delta t \left[\frac{C(S \frac{\partial \Phi}{\partial t} + Q + \sum Q_l - n \frac{\partial B}{\partial t} - C' \cdot Q)}{n \cdot B} \right] \quad (23)$$

تغییر غلظت ناشی از نشت آلاینده از لایه‌های بالا و یا پائین را نشان می‌دهد:

$$(\Delta C)_{iii} = \frac{\Delta t}{n \cdot B} (\sum C'_i Q_{ii}) \quad (24)$$

$$C_{i,j,k}^n = C_{i,j,k}^{n-1} + \Delta C_{i,j,k}^n \quad (25)$$

تعریف شرایط اولیه و مرزی فضای مساله، برای بدست آوردن جواب معادلات حاکم بر جریان آب زیرزمینی و انتقال آلاینده، ضرورت دارد. انواع مختلفی از شرایط مرزی را می‌توان به مدل انتقال آلاینده اعمال کرد. دودسته کلی از شرایط مرزی در این مدل قابل استفاده و تعریف هستند. معیارهای متفاوت پایداری و نحوه اعمال آن برای جلوگیری از ایجاد و گسترش خطاهای محاسباتی و اجتناب از ناپایداری در مرجع فارسی ارائه گردیده است.

شرط مرز شار ثابت که توسط ترم چشمه (تزریق یا تغذیه) اعمال می‌شود، در این حالت باید غلظت سیال تزریق شده به مدل معرفی گردد. در صورتی که چاه (پمپاژ) وجود داشته باشد غلظت سیال خروجی برابر غلظت بلوکی در نظر گرفته می‌شود که چاه در آن قرار دارد. شرط مرزی دیگر شرط هد و غلظت ثابت است. در این حالت لازم است غلظت سیال در ناحیه هد ثابت تعیین گردد. از آنجایی که انتقال آلاینده مستقیماً به گرادیان هیدرولیکی و گرادیان غلظت وابسته است، غلظت و هد اولیه باید در لحظه آغازین شبیه‌سازی تعریف گردد. این مقادیر از برداشتهای میدانی و یا نتایج شبیه‌سازی قبلی استخراج می‌شود. باید توجه داشت که نتایج ممکن است به تغییرات و یا خطاهای موجود در شرایط اولیه حساس باشد.

$$V_x = (1 - F_y) (V_x) + F_y (V_x)_2$$

که در آن

$$f_x = (X_p - X_{i,j}) / (\Delta X_{i,j} / 2)$$

$$F_x = (Y_p - Y_{i,j}) / (\Delta X_{i,j} / 2)$$

V_y ذره نیز به روشی مشابه بدست می‌آید. برای سه ربع دیگر نیز به طریق مشابه، سرعت‌ها درونیابی می‌گردد. برای محاسبه سرعت نقطه P که در ربع چهارم قرار دارد: سرعت در جهت x ذره p از سرعت x نقاط $(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}), (i + \frac{1}{2}, j), (i, j + 1), (i, j)$ استفاده می‌شود. محاسبه سرعت در جهت y ذره p از سرعت y نقاط $(i, j + \frac{1}{2}), (i + 1, j + \frac{1}{2}), (i + 1, j), (i, j)$ برای محاسبه V_{yp} استفاده خواهد شد.

بعد از اینکه همه نقاط حرکت کردند، موقتاً غلظت هر گره با میانگین غلظت ذرات درون بلوک آن گره محاسبه می‌گردد و با C_{ij}^* نشان داده می‌شود. شاخص زمان میانی که در اینجا با ستاره نشان داده شده بدلیل آن است که غلظت جدید تنها اثر انتقال همرفتی را در نظر گرفته است. ذرات متحرک، انتقال همرفتی را شبیه‌سازی می‌کند؛ زیرا در هر گام زمانی، غلظت هر گره شبکه، با ورود و خروج ذرات که غلظت‌های متفاوتی را دارا هستند، تغییر می‌کند.

تفاضل معادلات (۱۲) تا (۱۴) مجموع تغییر غلظت را محاسبه می‌کنند. حال آنکه معادلات (۱۲) و (۱۳) تنها انتقال ناشی از جریان همرفتی سیال را در نظر می‌گیرند. اثر پراکندگی هیدرودینامیکی، چاه و چشمه‌های سیال، انحراف سرعت و تغییر ضخامت ناحیه اشباع با تقریب تفاضل محدود از رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود:

$$\Delta C = \Delta t \left[\frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial x_i} (BD_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j}) + F \right] \quad (20)$$

یک راه‌حل معادله (۱۴)، محاسبه عبارت (۲۰) برای هر ذره ردیاب است. بدلیل سختی محاسبه گرادیان غلظت برای تعداد بسیار زیادی از ذرات متحرک، معادله (۲۰) برای هر گره از شبکه تفاضل محدود محاسبه می‌گردد. در طی یک گام زمانی، مشتق کامل غلظت روی هر منحنی مشخصه (با برای هر ذره ردیاب) به تغییر غلظت گره نظیر آن ذره، در آن دوره زمانی وابسته است، که با حل معادله (۲۰) بدست می‌آید. سمت راست معادله (۲۰) را می‌توان جمع سه عبارت در نظر گرفت:

۳- کنترل اعتبار و دقت مدل

معمولاً اعتبار مدل‌های عددی با مقایسه نتایج چند مسأله نمونه که به صورت تحلیلی یا توسط سایر مدل‌های عددی مدلسازی شده‌اند، بررسی می‌گردد. با توجه به پیچیدگی مدل‌های عددی، به منظور کاربرد درست مدل لازم است اثر پارامترهای مختلف در نتایج حاصله تحقیق گردد. بررسی اثر پارامترهای مدلسازی، تعیین و انتخاب مقدار صحیح این پارامترها نظیر ابعاد شبکه تفاضل محدود، اندازه گام زمانی، تعداد ذرات ردیاب، نسبت پراکندگی عرضی به طولی و تراوایی لایه محصور کننده صحت و دقت جواب‌های مدل را کنترل می‌کند. البته صرف بدست آوردن دقت تنها، نباید هزینه و زمان محاسبات را به طور نامعقولی افزایش دهد. برای اثبات صحت و درستی جواب‌های حاصل از معادله جریان، مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی عددی با جواب‌های تحلیلی و مشاهدات تجربی مدل‌هله - شاو صورت می‌گیرد. حرکت سطح تماس خطی و سطح تماس پیش‌رونده و پس‌رونده انطباق خوبی با نتایج تحلیلی و عددی قبلی دارد. این نتایج در زیر خلاصه شده‌اند.

۳-۲- سطح تماس عقب‌رونده و پیش‌رونده

حال رفتار سطح تماس غیراختلاطی پیش‌رونده و پس‌رونده را با نتایج آزمایشگاهی مدل هله-شاو که توسط Bear و Dagan انجام شده است مقایسه می‌کنیم. پارامترهای مورد استفاده در جدول (۱) آمده است. محل خروج جریان و یا سطح تراوش با یک گره مرزی با مقدار نشت^۵ زیاد ($\frac{K'}{B} = 3/3 \text{ s}^{-1}$) و هد آب برابر با صفر در بالای سفره تقریب زده می‌شود. برای سطح تماس پس‌رونده، دبی آب شیرین، ناگهان از حالت دائمی و مقدار $3/9$ سانتی‌متر مکعب در ثانیه به $18/8$ سانتی‌متر مکعب در ثانیه افزایش می‌یابد (شکل ۳). بطور مشابه محاسبات برای سطح تماس پیش‌رونده، نیز صورت گرفته است. نتایج عددی مدل Shamir و Dagan و مدل حاضر با مشاهدات مدل هله-شاو را نشان می‌دهد؛ نتایج عددی از تفرع کمتری نسبت به مشاهدات مدل هله - شاو برخوردارند. همچنین نتایج عددی اندکی تأخیر زمانی را نشان می‌دهد؛ که در اثر خطای ناشی از فرض جریان افقی در فرضیات دوپویی می‌باشد.

۳-۱- چرخش سطح تماس خطی

Keulegan (1954) راهحلی تحلیلی برای تعیین موقعیت پنجه یک سطح تماس خطی که در ابتدا به صورت قائم قرار گرفته است و برای رسیدن به تعادل در حال چرخش می‌باشد، ارائه داد. سفره محصور و دارای ضخامت یکنواخت و ثابت است. در این قسمت غلظت در تمامی بلوک‌ها صفر در نظر گرفته شده است.

۳-۳- حرکت منبع آلاینده لحظه‌ای

اگر یک پلوم لحظه‌ای به طور کامل در تمام ضخامت یک سفره دو بعدی و همگن تزریق شود، با گذشت زمان این پلوم در جهت جریان حرکت کرده و پخش می‌گردد. اگر آلاینده‌های با غلظت C_0 در نقطه (X_0, Y_0) در سطحی به مساحت A وارد سفره شود، غلظت در هر نقطه (X, Y) در زمان t از معادله زیر بدست می‌آید (Konikow and Grove, 1978):

$$C(x, y, t) = \frac{C_0 A}{4\pi t (D_x D_y)^{1/2}} \quad (26\text{-الف})$$

$$\exp\left\{-\frac{(x-x_0)-V_x t}{4D_x t} - \frac{(y-y_0)^2}{4D_y t}\right\}$$

$$D_x = D_L = \alpha_L V_x \quad (26\text{-ب})$$

$$D_y = D_T = \alpha_T V_x \quad (26\text{-ج})$$

$V_x = V/n$ سرعت متوسط خطی، D_x ضریب پراکندگی طولی و D_y ضریب پراکندگی عرضی، در این معادله ثابت فرض می‌شوند.

میدان جریان، یکنواخت و در راستای x است. پس از گذشت زمان t غلظت ماکزیمم در مرکز جرم پلوم آلاینده در نقطه $x = V_x t$ و $y = 0$ برابر است با:

$$C_{\max} = \frac{C_0 A}{4\pi t (D_x D_y)^{1/2}} \quad (27)$$

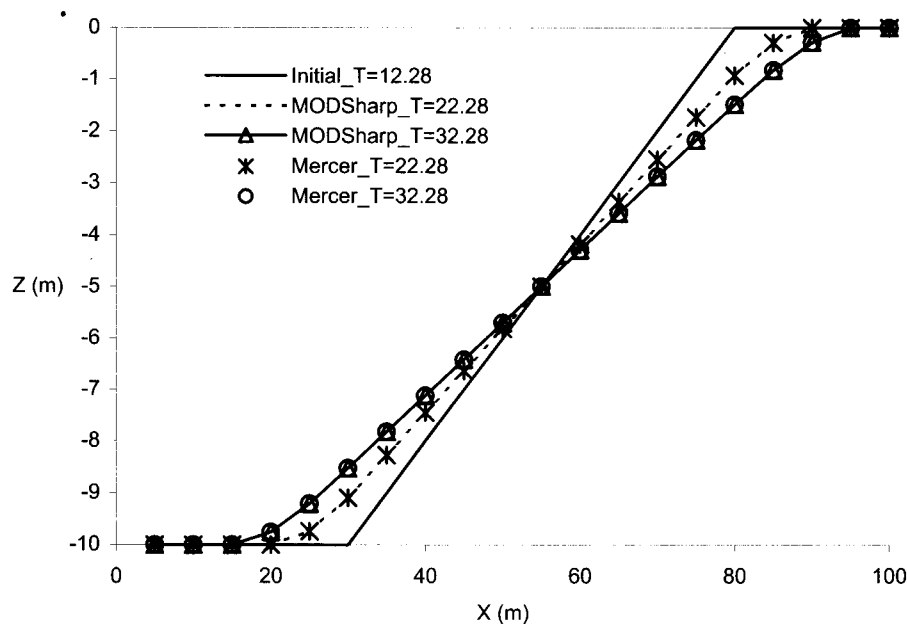
$$L(t) = \left(\frac{t(\Delta\rho)K_f D}{n\rho_f}\right)^{1/2} \quad (26)$$

$L(t)$: فاصله پنجه سطح تماس از موقعیت اولیه، $[L]$: $\Delta\rho = \rho_s - \rho_f$ ، $[ML^{-3}]$ و D ، ضخامت لایه آبدار، $[L]$.

برای تسهیل در مقایسه نتایج مدل با نتایج سایر مدل‌های عددی و نیز جواب تحلیلی از پارامترهای جدول ۱ و شرایط اولیه شده توسط Mercer et al. (1980) استفاده شده است. نتایج $12/28$ روزه Mercer و همکاران بعنوان شرایط اولیه در نظر گرفته شده است. در این حالت محل پنجه سطح تماس در مکان $L=20$ متر، قرار دارد. نتایج مدل حاضر در یک دوره بیست روزه و نتایج Mercer et al. در شکل ۲ ارائه شده است. غلظت در سفره برابر صفر در نظر گرفته شده است. نتایج هر دو مدل با جواب تحلیلی تطابق بسیار خوبی دارد.

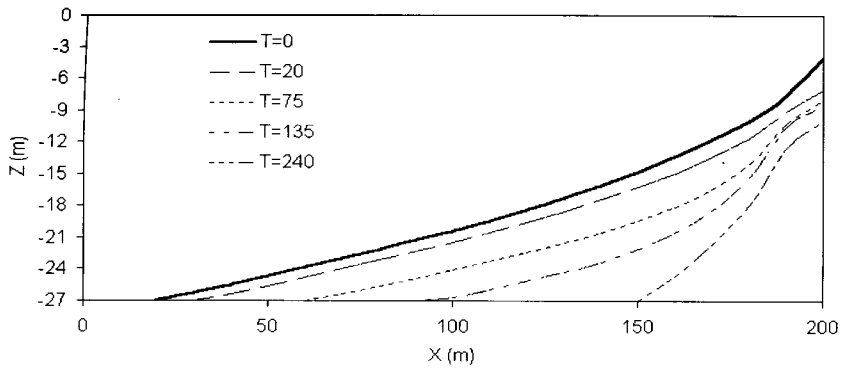
جدول ۱- پارامترهای استفاده شده در مثالهای حل شده توسط مدل جریان

پارامتر	سطح تماس چرخنده	سطح تماس پیش‌رونده و پس‌رونده
ضخامت m	۱۰/۰	۲۷/۰
چگالی آب شیرین، g/cm^3	۱/۰	۱/۰
چگالی آب شور، g/cm^3	۱/۰۲۵	۱/۰۳۰
هدایت هیدرولیکی، m/s	$۴/۵۲ \times ۱۰^{-۴}$	۰/۶۹
ضریب ذخیره ویژه آب شیرین، m^{-1}	$۱/۰ \times ۱۰^{-۴}$	$۱/۰ \times ۱۰^{-۴}$
ضریب ذخیره ویژه آب شور، m^{-1}	$۱/۰۲۵ \times ۱۰^{-۴}$	$۱/۰۳ \times ۱۰^{-۴}$
تخلخل	۰/۳	۱/۰
طول بلوک تفاضل محدود، m	۵/۰	۰/۱
گام زمانی، sec	۸۶۴۰۰/۰	۵/۰

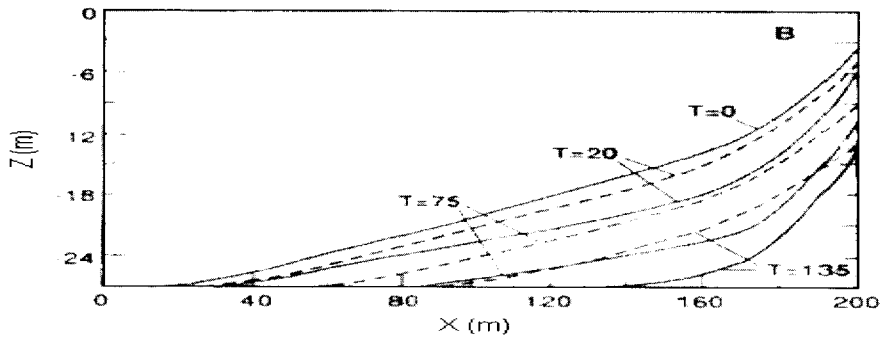


شکل ۲- شبیه‌سازی چرخش سطح تماس خطی

(نقاط نشان‌دهنده نتایج مدل عددی ModSharp و منحنی‌ها جوابهای مدل Mercer et al. (1980) را نشان می‌دهد)



(الف)



(ب)

شکل ۳- سطح تماس پس‌رونده، (الف) نتایج مدل حاضر (ب) نتایج shamir و Dagan

در این مساله، شبکه مش‌بندی ۲۲ ردیف و ۱۰ ستون دارد و جریان یکنواخت دائمی در راستای x برقرار است. ضریب هدایت هیدرولیکی، 0.0005892 متر بر ثانیه، گام زمانی ۳۶۰۰ ثانیه؛ $\frac{D_T}{D_L} = 0.1$ و غلظت $C_0 = 1$ گرم بر لیتر در مختصات (۴۵ و ۵۵) وارد شده است. کانتورهای غلظت بعد از گذشت ۷۲۰ ساعت در شکل ۴-ب نشان داده شده است. با استفاده از روابط فوق و در نظر گرفتن سرعت یکنواخت متر بر ثانیه، مسافت طی شده توسط مرکز جرم برابر $158/22$ متر، غلظت ماکزیمم و ابعاد پلوم به ترتیب

در صورت محاسبه انحراف استاندارد معادله (۲۷-الف)، با استفاده از روابط زیر می‌توان ابعاد پلوم آلاینده را حساب کرد.

$$\sigma_x = (2D_x t)^{\frac{1}{2}} \quad (28\text{-الف})$$

$$\sigma_y = (2D_y t)^{\frac{1}{2}} \quad (28\text{-ب})$$

گسترش پلوم سه برابر انحراف استاندارد از مرکز جرم پلوم می‌باشد؛ زیرا ۹۹/۷ درصد از جرم پلوم در وسعتی به اندازه سه برابر انحراف استاندارد از نقطه میانگین پخش شده است.

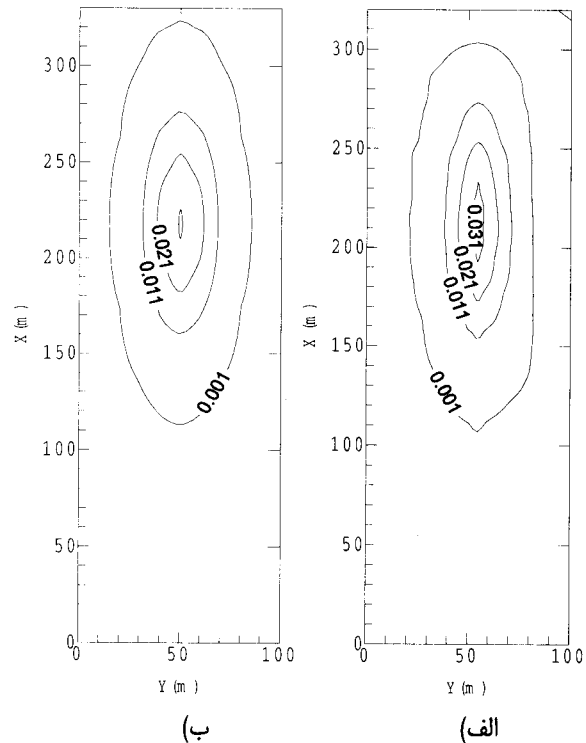
جدول ۲- پارامترهای استفاده شده در مثال دو بعدی انتقال آلاینده

پارامتر	طول بلوک، m	پراکندگی طولی، m	تخلخل	زمان، day	تعداد نقاط درون هر بلوک	نسبت مجاز مسافت حرکت ذره به ابعاد بلوک
مقدار	۱۰/۰	۵/۰ و ۰/۱ و ۱۰/۰	۰/۳۵	۲/۰	۱۶	۰/۵

خروجی آب شیرین در مجاورت دریا، با نسبت هدایت هیدرولیکی قائم به هدایت هیدرولیکی افقی برابر ۰/۱ استفاده شده است.

این آبخوان توسط ۸۴۰ (۴۲×۲۰) بلوک به ابعاد ۵۰۰×۵۰۰ مترمربع شبکه‌بندی شده است. درگه (۳۷ و ۱۲) به مختصات (۱۸۲۵۰ و ۵۷۵۰) چاه مشاهده‌ای w1 قرار دارد. برای حل معادلات جریان و انتقال از گام زمانی یک روزه استفاده شده است. برای بررسی اثر پیش‌روی آب شور بر انتقال آلاینده‌ها و تخلیه آنها به دریا، مساله یکبار با پیش‌روی آب شور و بار دیگر بدون در نظر گرفتن پیش‌روی آب شور شبیه‌سازی شده است. برنامه ModSharp معادلات جریان آب شور و جریان آب شیرین را توأمان با شرط مرزی پیوستگی فشار در سطح تماس آب شور و آب شیرین حل می‌کند. برای تعیین هد اولیه آب شیرین، مساله را با فرض عدم پیش‌روی آب شور حل کرده و هد آب شیرین در دهمین گام زمانی به عنوان هد اولیه آب شیرین بدست می‌آید. منبع آلاینده در ناحیه مرزی سمت خشکی با غلظت ثابت ۱۰۰ میلی‌گرم بر مترمکعب در چهار بلوک (۹ و ۲)، (۱۰ و ۲)، (۱۱ و ۲) و (۱۲ و ۲) به محیط اعمال می‌شود. در این بررسی از پراکندگی هیدرودینامیکی آلاینده صرف‌نظر شده است. انتقال آلاینده تنها توسط همرفتی صورت می‌گیرد. آلاینده به همراه جریان آب درون آبخوان ساحلی به سمت دریا حرکت کرده و از خط ساحلی خارج می‌شود. مساله یکبار برای زمانی که پیش‌روی آب دریا وجود دارد و بار دیگر بدون پیش‌روی آب دریا شبیه‌سازی می‌شود. شکل (۶) موقعیت و عمق سطح تماس غیراختلاطی را در حالتی که پیش‌روی آب شور دریا لحاظ شده است، نشان می‌دهد.

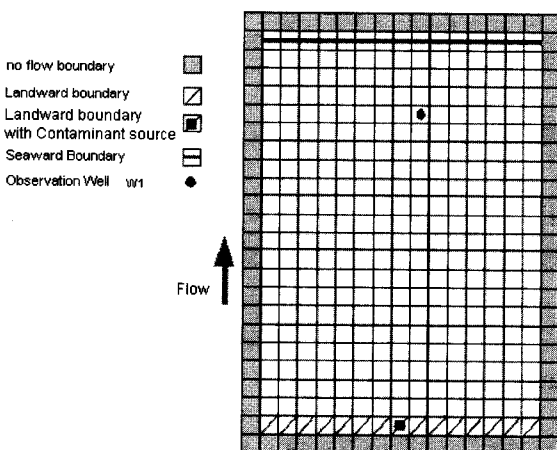
$C_{max}=0.318$ و $74/0.3 \times 238/68$ مترمربع محاسبه می‌شود. در شکل‌های (۴-الف) و (۴-ب) نزدیکی نتایج راه حل تحلیلی و مدل حاضر مشاهده می‌شود.



شکل ۴- حرکت و توزیع غلظت پلوم لحظه‌ای دو بعدی پس از گذشت ۷۲۰ ساعت (الف) نتایج عددی (ب) راه حل تحلیلی

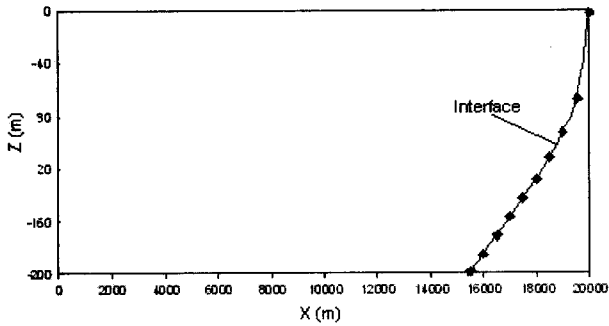
۴- اثر پیش‌روی آب شور دریا بر انتقال آلاینده‌ها

در این بخش از مدل تهیه شده ModSharp برای بررسی اثر پیش‌روی آب شور دریا بر انتقال آلاینده‌ها در آبخوانهای ساحلی و محاسبه میزان آلاینده تخلیه شده به دریا استفاده می‌گردد. هندسه و شرایط مرزی مساله در شکل (۵) نشان داده شده است. این آبخوان ۲۱ کیلومتر طول، ۱۰ کیلومتر عرض و ۲۰۴ متر ضخامت دارد. آبخوان همگن و همسان فرض شده و مقادیر پارامترهای هیدرولیکی خاک عبارتند از هدایت هیدرولیکی $k=100$ متر بر روز، تخلخل $n=0.4$ ذخیره ویژه آب شور و آب شیرین به ترتیب $10^{-6} \times 1/0$ و $10^{-6} \times 1/0.3$ بر متر، شرط مرزی در سمت خشکی با هد ثابت آب شیرین و برابر با ۲۴/۱ متر تعریف شده است تا گرادیان هیدرولیکی ثابتی برابر 0.0012322 را به سمت دریا تامین کند. شرط مرزی در سمت دریا شامل هد ثابت آب شیرین و برابر با ۰/۷۲ متر و هد ثابت آب شور برابر با صفر می‌باشد. چگالی آب شور و آب شیرین به ترتیب ۱۰۳۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد. گره‌های



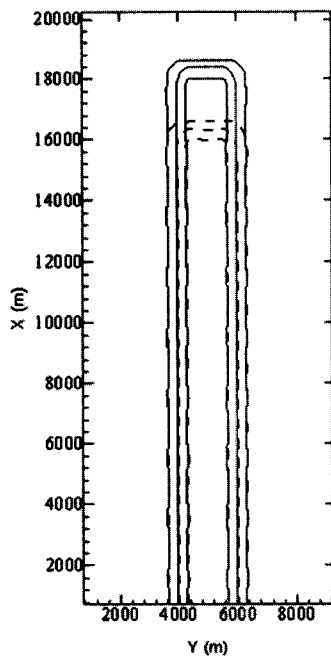
شکل ۵- هندسه و شرایط مرزی جریان و انتقال آلاینده در آبخوان ساحلی

جابجایی و انتقال آلاینده را حتی قبل از رسیدن به سطح تماس تغییر می‌دهد. اختلاف جابجایی پلوم آلاینده در دو حالت شبیه‌سازی پیش‌روی و عدم پیش‌روی آب شور، با نزدیک شدن جبهه غلظت به سطح تماس از ۷۰۰ متر به ۲۰۰۰ متر رسیده است.

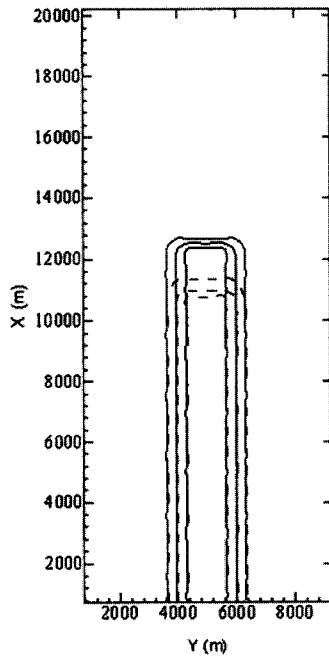


شکل ۶- موقعیت و عمق سطح تماس غیراختلاطی

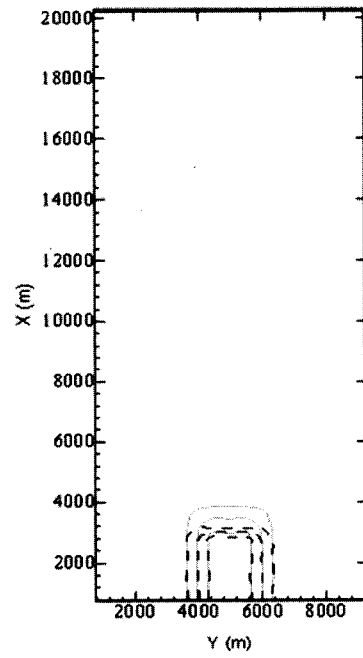
سطح تماس طولی برابر ۴۴۷۵ متر درون آبخوان ساحلی پیش‌روی کرده است. شکل (۷) کانتورهای غلظت ۱۰ و ۵۰ و ۹۰ درصد آلاینده را در زمانهای ۱۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ ساله در هر دو حالت شبیه‌سازی نشان می‌دهد. شکل (۷-الف) نتایج شبیه‌سازی را در زمان $t=10$ سال نشان می‌دهد. محل کانتور هم غلظت ۱۰ درصد در حالت پیش‌روی آب شور در محل $x=3150$ متر و در حالت عدم پیش‌روی آب شور در محل $x=2850$ متر قرار دارد. همچنین در زمان ۱۰۰ سال و ۱۵۰ سال، کانتور هم غلظت ۱۰ درصد، در حالت پیش‌روی آب شور به ترتیب در محل ۱۲۶۳۰ و ۱۸۶۰۰ متر است. در زمانهای ۱۰ و ۱۰۰ ساله پلوم آلاینده برخلاف زمان ۱۵۰ سال، به سطح تماس نرسیده است. بنابراین مطابق نتایج در شکل (۷)، در صورت صرف‌نظر کردن از پیش‌روی آب شور، پلوم آلاینده با سرعت بیشتری حرکت خواهد کرد که به تخمین دست بالا در توزیع و گسترش پلوم منجر خواهد شد. همچنین پیش‌روی آب شور الگوی



(ج)

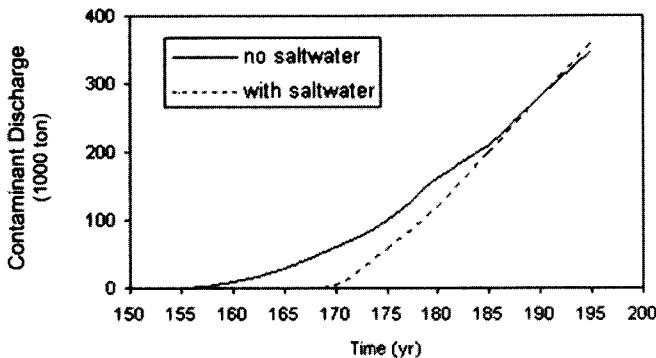


(ب)



(الف)

شکل ۷- کانتورهای غلظت آلاینده (خط‌پر، بدون پیش‌روی سطح تماس، خط منقطع به همراه پیش‌روی آب شور) در زمانهای الف) ۱۰ ساله ب) ۱۰۰ ساله ج) ۱۵۰ ساله



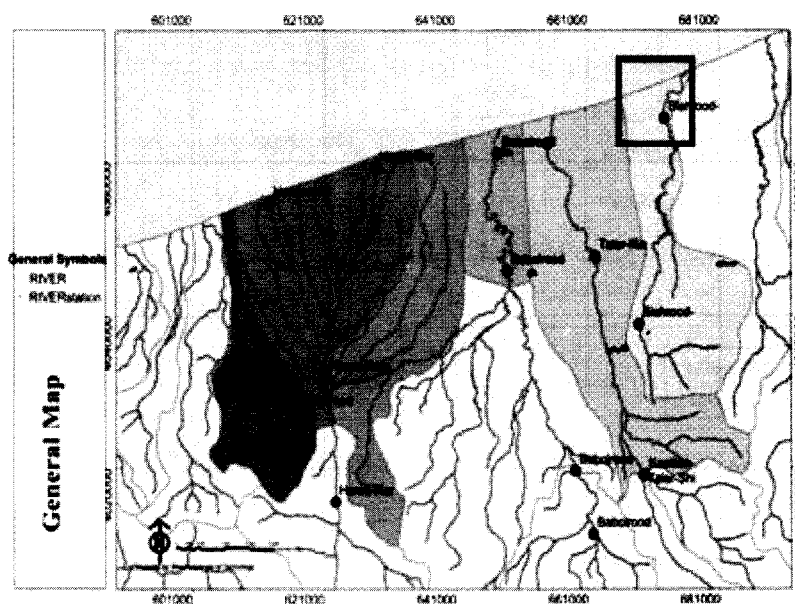
شکل ۸- میزان تخلیه آلاینده به دریا

شکل (۸) میزان آلاینده تخلیه شده به دریا را دو حالت شبیه‌سازی نشان می‌دهد. تخلیه آلاینده در حالت پیش‌روی آب شور در زمان سال ۱۶۹ و در حالت عدم پیش‌روی آب شور در سال ۱۵۵ شروع می‌شود. پیش‌روی آب شور باعث تاخیر در زمان شروع تخلیه آلاینده می‌گردد. اما سرعت و نرخ تخلیه در حالت پیش‌روی آب شور بیشتر از حالت بدون پیش‌روی آب شور می‌باشد. بطوریکه در زمان سال ۱۹۰، میزان تخلیه در هر دو حالت برابر می‌گردد. همانگونه که ملاحظه می‌شود پیش‌روی آب شور در آبخوانهای ساحلی اثر قابل توجهی بر انتقال آلاینده‌ها و تخلیه به دریا دارد. به علت اثر عوامل مختلف در پیش‌روی آب دریا و انتقال آلاینده در آبخوانهای ساحلی، در ادامه اثر برخی از این عوامل بررسی می‌گردد.

تخلیه آلاینده به دریا نیازی به در نظر گرفتن کل محدوده نمی‌باشد و از نوار باریکی به عرض ۱۰/۵ کیلومتر از خط ساحلی استفاده شده است. زیرحوضه سیاه‌رود شرقی‌ترین ناحیه درحوضه استان مازندران می‌باشد، که از سمت غرب به زیرحوضه تالار متصل می‌باشد. حداکثر عمق آبخوان ۲۳/۱۴ متر در قسمت جنوب شرقی و حداقل عمق ۱۰ متر در نوار ساحلی و مرکزی زیرحوضه می‌باشد به منظور مدل‌سازی این ناحیه از دوزنقه‌ای به طول ۱۰/۵ کیلومتر، با عرضهای ۷/۵ و ۱۰/۵ کیلومتر استفاده شده است. جهت گسسته‌سازی ناحیه مزبور از مش ۵۰۰ متری در جهت‌های x و y استفاده شده است. بعضی از مشخصات مدل‌سازی و فیزیکی زیرحوضه در جدول (۳) آورده شده است. در منطقه طرح چاههای بسیاری وجود دارند که از آنها آب قابل ملاحظه‌ای برداشت می‌شود، در مجموع سالانه ۱۲۴۲۵ مترمکعب آب از زیرحوضه سیاه‌رود برداشت می‌شود. جهت مدل‌سازی چاههای مشاهده‌ای چهارچاه با مختصات (۵، ۱۸) و (۱۷، ۱۰) و (۱۹، ۶) و (۱۹، ۱۵) در نظر گرفته شده، که به منظور تعیین مقدار دبی هرچاه مشاهده‌ای از متوسط تخلیه سالیانه چاه‌ها استفاده شده است. به منظور بررسی اثر پیش‌روی آب شور بر میزان تخلیه آلاینده به دریا، منابع آلاینده را سه گره به مختصات (۱۷ و ۵) و (۱۵ و ۹) و (۱۶ و ۱۴) با غلظت اولیه ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر مترمکعب در نظر گرفته که در این نقاط میزان غلظت آلاینده ورودی به ترتیب با دبی‌های ۰/۰۶۵، ۰/۰۲، ۰/۰۱ برابر ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر مترمکعب می‌باشد. اصولاً مرزهای جانبی سیستم براساس تاثیر فیزیکی شرایط هیدروژئولوژیکی در حوضه تعیین می‌گردد. باتوجه به اینکه در این حوضه هیچ گونه مرز فیزیکی مشخصی وجود ندارد، لذا این مرزها بدون بدون جریان (No flow boundary) در نظر گرفته می‌شوند.

۵- کاربرد مدل ModSharp در آبخوان ساحلی زیر حوضه سیاه‌رود (استان مازندران)

ناحیه ساحلی استان مازندران بین مدارهای ۳۶ تا ۳۷ درجه عرض شمالی و نصف‌النهارهای ۵۲ و ۵۳ درجه طول شرقی قرار گرفته است. این منطقه عموماً دشت ساحلی استان مازندران را شامل می‌شود. حد شمال این محدوده دریای خزر و حد جنوب آن ارتفاعات یال شمالی سلسله جبال البرز می‌باشد. رودخانه سیاه‌رود از جنوب به شمال محدوده مورد نظر جریان دارد. این رودخانه دائمی بوده و از آب آن در کشت برنج استفاده می‌شود. در شکل (۹) محدوده مطالعاتی زیر حوضه سیاه‌رود در شهرهای فریدون‌کنار و سرخورد در منطقه‌ای بین شهرهای بابلسر و محمودآباد واقع شده است. به منظور مدل‌سازی



شکل ۹- محدوده مطالعاتی آبخوان ساحلی زیر حوضه سیاه‌رود

باتوجه به نحوه قرار گرفتن خطوط جریان در مرزهای کناری زیرحوضه می‌توان در مورد چگونگی شرایط مرزی در این نواحی تصمیم‌گیری نمود. پس از رسم خطوط جریان روشن گردید که خطوط جریان بر مرزهای کناری عمود بوده، بنابراین می‌توان این مرزها را بدون جریان در نظر گرفت.

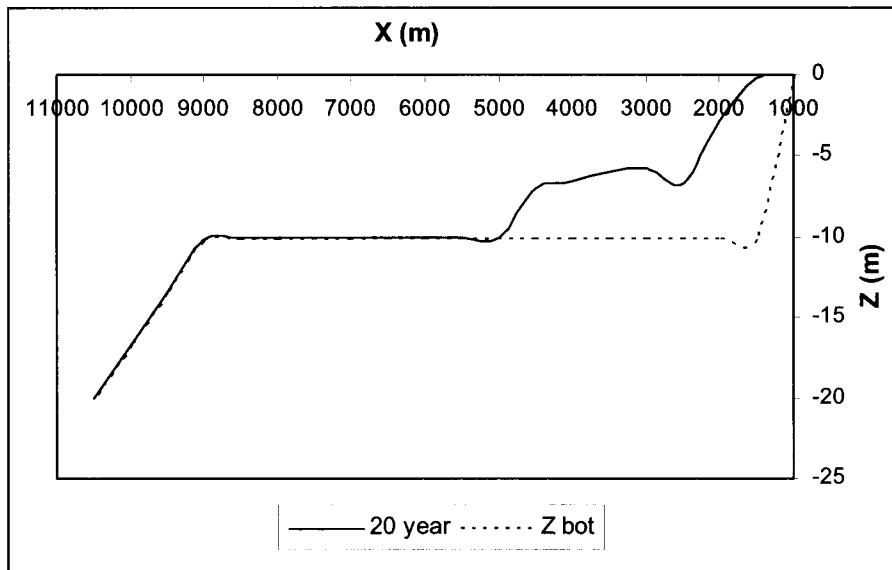
جدول ۳- مشخصات مدل‌سازی و فیزیکی زیر حوضه

سیاهرود

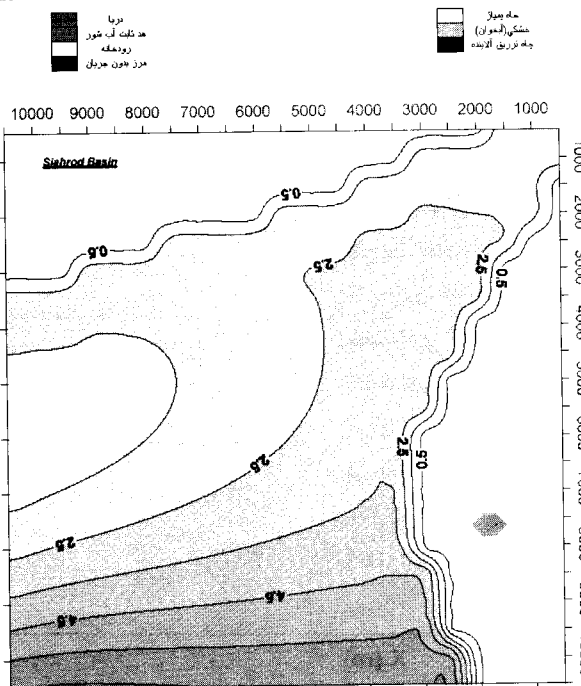
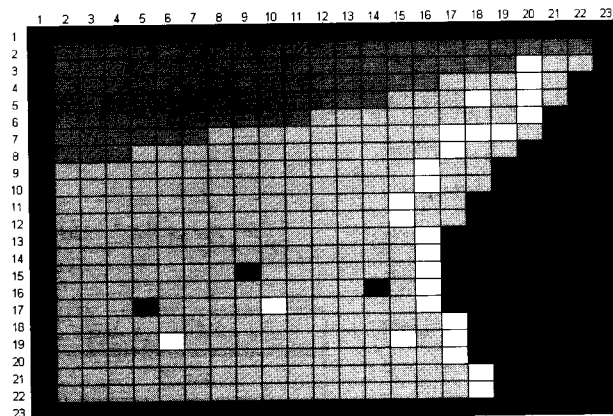
پارامتر	مقدار در نظر گرفته شده
تعداد بلوک‌ها در جهت X و Y	۲۳ عدد
طول ضلع بلوک‌ها در جهت X و Y	۵۰۰ متر
فاصله زمانی حل معادلات	۱ روز
تعداد چاه مشاهده‌ای	۴ حلقه
چگالی آب شیرین و شور	۱۰۰۰ و ۱۰۳۰ کیلوگرم بر مترمکعب
ضرائب پراکندگی طولی، عرضی	۱۰۰ و ۲۰ متر
ضریب هدایت هیدرولیکی	۱۰ متر بر روز
تخلخل محیط	۰/۲
عرض آبخوان	۱۰/۵ کیلومتر
عمق آبخوان	متوسط ۱۰ متر
میزان تغذیه خالص زیر حوضه	$10^{-1} \times 4/4$ متر بر ثانیه

شرط مرزی در سمت دریا شامل هد ثابت آب شیرین و برابر با ۰/۰۷۲ متر و هد ثابت آب شور برابر با صفر می‌باشد. گره‌های خروجی آب شیرین در مجاورت دریا، با نسبت هدایت هیدرولیکی قائم به هدایت هیدرولیکی افقی برابر ۰/۱ استفاده شده است. انتقال آلاینده توسط همرفتی و پراکندگی صورت می‌گیرد. آلاینده به همراه جریان آب درون آبخوان ساحلی به سمت دریا حرکت کرده و از خط ساحلی خارج می‌شود. مساله یکبار برای زمانی که پیش‌روی آب دریا وجود دارد و بار دیگر بدون پیش‌روی آب دریا شبیه‌سازی می‌شود. نحوه تعیین میزان تغذیه خالص آبخوان و ضرایب پراکندگی طولی، عرضی در مرجع دوم آمده ذکر گردیده است.

شکل (۱۰) موقعیت و عمق سطح تماس غیراختلاطی را در فاصله ۷ کیلومتری از غرب زیر حوضه برای زمان ۲۰ سال بعد از اجرای برنامه، در مقایسه با کف آبخوان در حالتی که پیش‌روی آب شور دریا لحاظ شده است، نشان می‌دهد. سطح تماس طولی برابر ۵۰۰۰ متر درون آبخوان ساحلی پیش‌روی کرده است. شکل (۱۱) هندسه و شرایط منحنی‌های هم غلظت ۵۰ و ۴۵۰ و ۸۵۰ میلی‌گرم بر مترمکعب آلاینده را در زمانهای ۲، ۲۰ و ۵۰ ساله در هر دو حالت شبیه‌سازی نشان می‌دهد. مطابق نتایج در شکل (۱۲)، در صورت صرف‌نظر کردن از پیش‌روی آب شور، پلوم آلاینده با سرعت بیشتری حرکت خواهد کرد که به تخمین دست بالا در توزیع و گسترش پلوم منجر خواهد شد.



شکل ۱۰- موقعیت و عمق سطح تماس غیراختلاطی

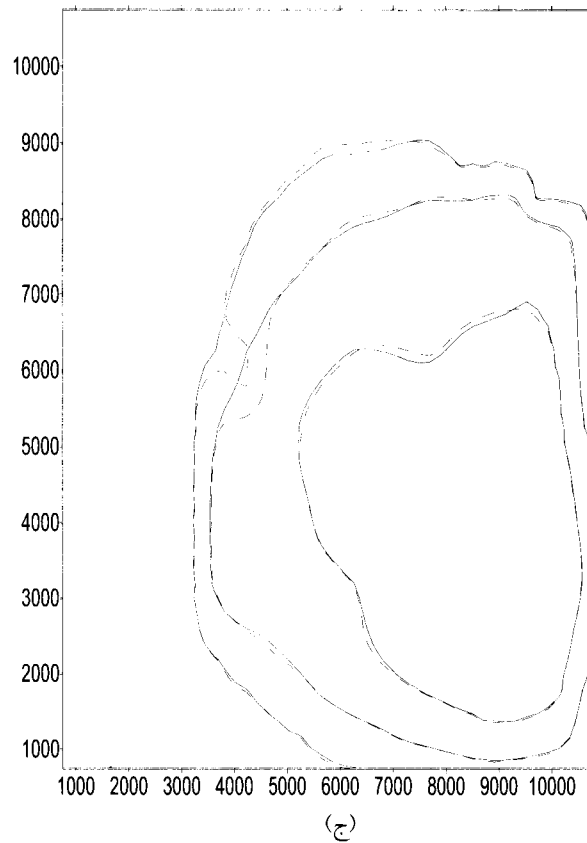
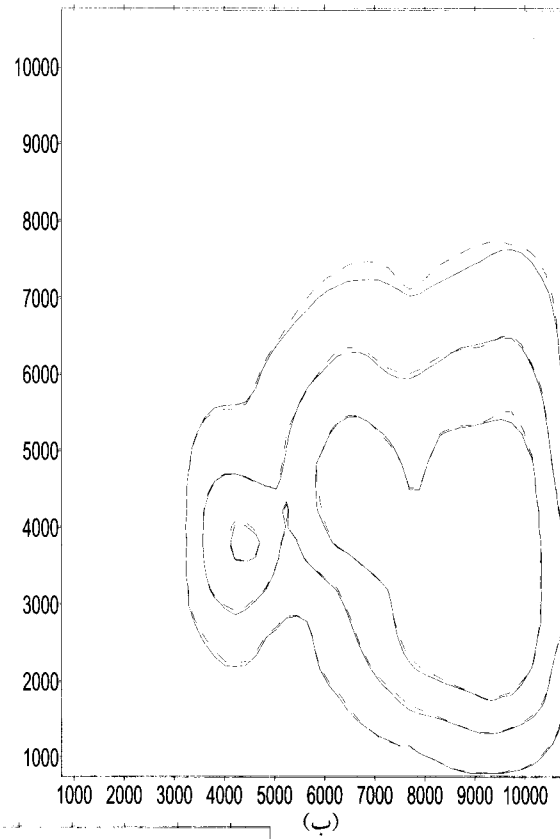
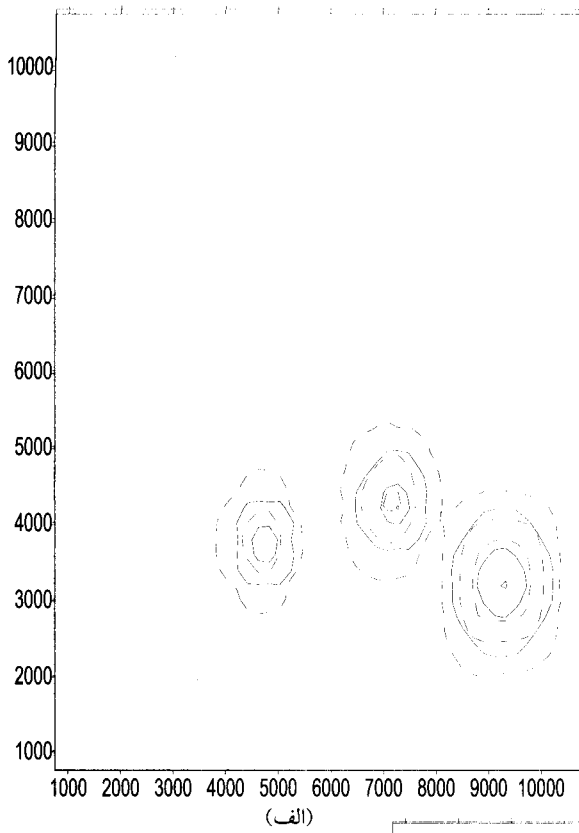


شکل ۱۱- هندسه و شرایط مرزی جریان، انتقال آلاینده و تراز سطح آب زیرزمینی نسبت به سطح دریا در آبخوان ساحلی سیاهرود

وضعیت آبخوان در دراز مدت (steady state) به حالت عدم پیشروی آب شور نزدیک می‌شود. بنابراین نمودار شکل (۱۳) برای دو حالت منظور شده خیلی به هم نزدیک می‌باشند. برای مقایسه بهتر موضوع، اعداد مربوط به میزان تخلیه آلاینده به دریا برای دو حالت شبیه‌سازی در جدول (۴) آورده شده است.

همانگونه که از اعداد جدول (۴) مشاهده می‌شود برای حالت واقعی و اعمال پراکندگی هیدرودینامیکی، مقدار تخلیه آلاینده به دریا در حالت بدون پیشروی آب شور بیشتر از حالت پیشروی آب شور می‌باشد.

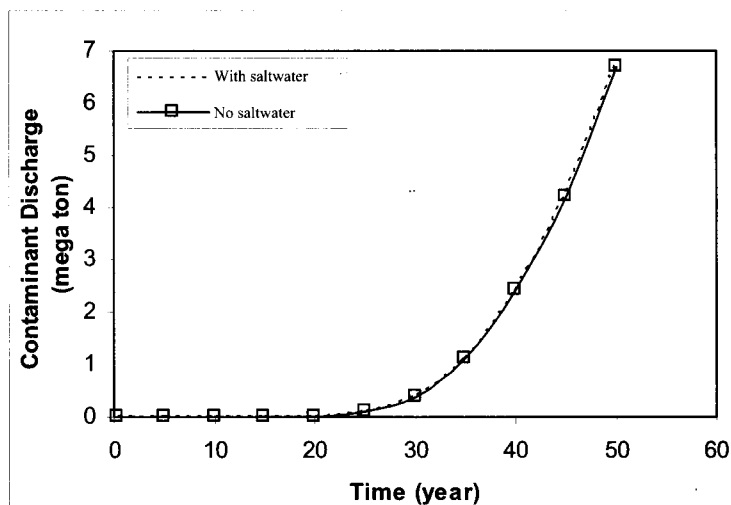
شکل (۱۳) میزان آلاینده تخلیه شده به دریا را دو حالت شبیه‌سازی نشان می‌دهد. تخلیه آلاینده در حالت پیشروی آب شور در زمان سال ۰/۳۸۳ (ماه بیست و سوم) و در حالت عدم پیشروی آب شور در سال ۰/۳۶۷ (ماه بیست و دوم) شروع می‌شود. پیشروی آب شور باعث تاخیر در زمان شروع تخلیه آلاینده می‌گردد. اما سرعت و نرخ تخلیه در حالت پیشروی آب شور بیشتر از حالت بدون پیشروی آب شور می‌باشد. بطوریکه در زمان سال ۲۰، میزان تخلیه در هر دو حالت برابر می‌گردد. همانگونه که ملاحظه می‌شود پیشروی آب شور در آبخوانهای ساحلی اثر قابل توجهی بر انتقال آلاینده‌ها و تخلیه به دریا دارد. با توجه به واقعی بودن آبخوان و وجود تغذیه بالای آبخوان ($10^{-1} \times 4/4$ متر بر ثانیه) که بطور پیوسته اعمال می‌گردد،



شکل ۱۲- منحنی‌های هم غلظت آلاینده (خط‌پر، به همراه پیش‌روی سطح تماس، خط منقطع بدون پیش‌روی آب شور) در زمانهای الف) ۲ ساله ب) ۲۰ ساله ج) ۵۰ ساله

جدول ۴- میزان تخلیه آلاینده به دریا در دو حالت شبیه‌سازی شده

Time (year)	Contaminant Discharge (Mg/d)	
	with saltwater	without saltwater
23 month	0.0E+00	1.1E-13
2 year	1.3E-13	1.7E-13
5 year	6.4E-09	4.6E-09
10 year	7.6E-06	8.2E-06
15 year	7.7E-04	8.5E-04
20 year	1.5E-02	1.5E-02
25 year	9.8E-02	1.0E-01
30 year	3.9E-01	4.0E-01
35 year	1.1	1.1
40 year	2.4	2.4
45 year	4.2	4.3
50 year	6.7	6.8



شکل ۱۳- میزان تخلیه آلاینده به دریا

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق پس از مرور مطالعات قبلی، مدل توسعه یافته‌ای که براساس مدل Sharp بنا شده است، ارائه گردید. این مدل ModSharp نامگذاری شده است. معادله انتقال استفاده شده در توسعه مدل و روش مشخصه‌ها که برای مدل‌سازی ترم همرفتی استفاده می‌شود، توضیح داده شده است. در این راستا نحوه ردیابی ذرات، محاسبه سرعت‌ها با استفاده از قانون دارسی، درونیابی سرعت‌ها و نحوه محاسبه ضرایب پراکندگی هیدرودینامیکی بیان شده است سپس از تقریب تفاضل محدود برای محاسبه دیگر ترم‌های معادله انتقال استفاده شده است.

مسائل مبتلابه روش مشخصه‌ها و تکنیک‌های حل آنها در ادامه بحث شده است. آنگاه شرایط اولیه و شرایط مرزی قابل تعریف در مدل ModSharp توضیح داده شده است. مدل توسعه یافته ModSharp توانایی مدل‌سازی شرایط مرزی غلظت ثابت و شار ثابت را دارد. اعتبار و دقت مدل با حل چند مسأله نمونه بررسی شده است؛ مدل ModSharp با دقت کافی، چندین مسأله پیش‌روی آب شور را شبیه‌سازی نمود، چرخش سطح تماس خطی، پیش‌روی و پس‌روی سطح تماس و نیز پیش‌روی آب شور در سفره لایه‌ای از جمله این مثالها می‌باشد. نتایج مدل ModSharp و Sharp در این مسائل کاملاً یکسان می‌باشد. سپس مثالهایی برای کنترل و تعیین اعتبار مدل در مسائل انتقال آلاینده حل گردید. این مسائل شامل مسائل تحلیلی، انتقال یک بعدی آلاینده از یک منبع آلاینده پیوسته و حرکت منبع آلاینده لحظه‌ای می‌باشد. نتایج مدل ModSharp با دقت بسیار خوبی با نتایج تحلیلی تطبیق می‌کند.

در بخش بعدی، اثر پیش‌روی آب شور بر انتقال آلاینده و تخلیه آنها به دریا و اثر صرف‌نظر کردن از پیش‌روی آب شور تحقیق شد. در ادامه نیز اثر پیش‌روی آب شور بر انتقال و پراکندگی آلاینده و تخلیه آنها به دریا در آبخوان ساحلی سیاه‌رود بررسی شد. نتایج حاکی از آن است که پیش‌روی آب شور اثر قابل توجهی بر انتقال و تخلیه آلاینده‌ها در آبخوانهای ساحلی دارد. پیش‌روی آب شور باعث تاخیر در جبهه پیش‌رونده آلاینده حتی قبل از رسیدن به سطح تماس می‌شود. با این حال سرعت انتقال در ناحیه سطح تماس بیشتر از سرعت در حالت عدم پیش‌روی آب شور است. بنابراین تاخیر جبهه غلظت تا حدودی جبران می‌شود، بگونه‌ای که می‌توان اثر آنرا در میزان تخلیه آلاینده به دریا دید. در حالت عدم پیش‌روی آب شور، نخست میزان تخلیه آلاینده بیشتر از حالت پیش‌روی آب شور است اما به تدریج این مقدار برابر و در نهایت آهنگ تخلیه در هر دو حالت بیشتر می‌گردد. عوامل زیادی بر انتقال آلاینده و تخلیه آنها به دریا و پیش‌روی آب شور دخالت دارند. اثر این عوامل همچون شرایط مرزی واقعی در سمت دریا جزر و مدی و نوسانات بلند مدت سطح آب دریا، پارامترهای هیدرولوژیکی مانند بارندگی، خشکسالی، نوسانات فصلی و سالیانه سطح آب زیرزمینی، برداشت از آبخوان توسط چاهها و رودخانه‌ها و دیگر پارامترهای فیزیکی و ژئوهیدرولوژیکی در مطالعات آتی بررسی خواهد شد.

۷- تشکر

حمایت مالی معاونت امور پژوهشی سازمان مدیریت منابع آب ایران (دفتر امور پژوهشی و پشتیبانی علمی) در تهیه این مقاله مورد قدردانی قرار می‌گیرد.

- Church, T. M. (1996), *An Underground Route for the Water Cycle*, Nature, 380, pp. 579-580.
- 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. Dissertation, Stanford Univ., Stanford, Calif.
- Johannes, R. E. (1980), *The Ecological Significance of the Submarine Discharge of Groundwater*. Mar. Ecol. Prog. Ser., 3. pp. 365-373.
- Konikow, L. F. and Grove, D. B. (1978), "Computer Model of Two-Dimensional Solute Transport and Dispersion in Groundwater": *U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations*, Book 7, Chapter C2, 90 p.
- Li, L., Barry, D. A., Stagnitty, F. and Parlange, J. Y. (1999), "Submarine Ground Water Discharge and Associated Chemical Input to a Coastal Sea", *Water Resources Research*, 35 (11). pp. 3253-3259.
- Mercer, J. W., Larson, S. P. and Faust, C. R. (1980), "Simulation of Salt-water Interface Motion", *Ground Water*, 18(4), pp. 374-385.
- Moore, W. S. (1996), Large Ground Water Inputs to Coastal Waters Revealed by Ra²²⁶ Enrichment, Nature, 380, pp. 612-614.
- Nielsen, P. and Dunn, S. L. (1998), Manometer Tubes for Coastal Hydrodynamics Investigations, *Coastal Eng.*, 35, pp. 73-84.
- Reilly, Th. E. and Goodman, A. S. (1985), Quantitative Analysis of Saltwater Fresh Water Relationships in Groundwater Systems a Historical Perspective, *Journal of Hydrology*, 80, pp. 125-160.
- Sutcliffe, W. H. (1972), "Some Relations of Land Drainage, Nutrient and Particulate Material and Fish Catches in Two Eastern Canadian bays", *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 29, pp. 357-362.
- Uchiyama, Y., Nadaoka, K., Rolke, P., Adachi, K. and Yagi, H. (2000), Submarine Ground Water Discharge into the Sea and Associated Nutrient Transport in a Sandy Beach, *Water Resources Research*, 36 (6), pp. 1467-1479.

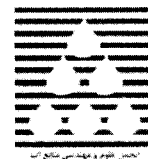
1. Material Derivative
2. Linear Interpolation
3. Bilinear Interpolation
4. Bicubic Interpolation
5. Leakage

۹- مراجع

- حسین آبادی، حمیدرضا، (۱۳۸۱)، مدل سازی عددی انتقال و تخلیه آلاینده ها از آبخوانهای ساحلی به دریا، پایان نامه کارشناسی ارشد سازه های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران.
- فاطمی، سید احسان، (۱۳۸۴)، شبیه سازی تخلیه آلاینده ها به مناطق ساحلی از آبخوان های ساحلی در مقیاس منطقه ای، پایان نامه کارشناسی ارشد آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران.
- Aris, R. (1962), *Vectors, Basic Equations of Fluid Mechanics*. Prentice-Hall, Cliffs, N.J., 286 p.
- Ataie-Ashtiani, B., Volker, R. E. and Lockington, D. A. (1996b) "Numerical and Experimental Study of Seepage in Unconfined Aquifers with a Periodic Boundary Condition", *Journal of Hydrology*, 222:1-4, pp. 165-184.
- Ataie-Ashtiani, B., Volker, R. E. and Lockington, D. A. (2001) "Tidal Effects on Groundwater dynamics in Unconfined Aquifers", *Journal of Hydrology*, 15: 4, pp. 655-669.
- Ataie-Ashtiani, B., Volker, R. E. and Lockington, D. A. (2002) "Contaminant Transport in Coastal Aquifers Influenced by Tide", *Australian Civil Engineering Transactions*, Vol. CE43, pp. 1-11.
- Ataie-Ashtiani, B., Volker, R. E. and Lockington, D. A. (1999a) "Tidal Effects on Seawater Intrusion in Unconfined Aquifers", *J. of Hydrology*, 216 (1-2), pp. 17-31.
- Bear J. and Verruijt, A. (1987), *Modeling Groundwater Flow and Pollution*, D. Reidel Publishing Company, 414p.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۵ آبان ۱۳۸۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۲۵ بهمن ۱۳۸۴



Extended Abstract

Numerical Model of Transport and Contaminant Discharge from Coastal Aquifers into Seaward

B. Ataie-Ashtiani¹, H. R. Hosseinabadi², E. Fatemi³

Introduction

Groundwater is a major source of drinking water. The quality of groundwater is therefore of dominant importance. The potential sources of contamination for groundwater can be categorized as industrial, agricultural and municipal. These can be classified more specifically as leaching from municipal solid waste landfills, hazardous waste disposal sites, illegal waste dumps, and nuclear waste disposal sites. Accidental spills from chemical storage can also adversely affect groundwater. Coastal aquifers are encountered to seawater intrusion as another important contamination source. Contaminants move through coastal groundwater and exit from seepage face near of shoreline. This can threaten endanger marine and coastal environment (Li et al., 1999, Uchiyama et al., 2000).

Objectives

In this study a numerical model, named ModSharp, has been developed. This model is able to simulate contaminant transport and seawater intrusion in coastal aquifers simultaneously. ModSharp has been developed based on Sharp model that simulates seawater intrusion by Sharp interface approach.

Methodology

The Advection – Dispersion equation is used in Sharp model to develop ModSharp. ModSharp uses a particle tracking procedure to represent convective transport and a two step explicit procedure to solve a finite difference equation that describes that effect of hydrodynamic dispersion, fluid sources and sinks, and

divergence of velocity. This explicit procedure has several stability criteria, but the program automatically determines the consequent time step limitations.

Results and Discussion

The accuracy of the model was evaluated for several pre-solved problems with known analytical and semi analytical solutions. Effect of some variables, such as length of intruded seawater and hydrodynamic dispersion on contaminant transport patterns is studied, especially at the seaward boundary.

Simulation results show that seawater intrusion has significant effect on solute transport in coastal aquifers. Delay of contaminant plume is occurred by seawater intrusion, even before contaminant plume reaches to the interface zone. Ignoring the influence of seawater intrusion leads to a lower estimate for rate of contaminant discharge to sea. However in long term, amount of contaminant discharge is similar in both cases; with or without seawater intrusion, Figure 1. Moreover, investigation of landward boundary condition show that fluxes boundary condition may cause an incorrect prediction.

Keywords: Contaminant Transport, Seawater intrusion, Numerical modeling, Coastal aquifer, Method of Characteristics.

1-Assistant professor, Sharif University of Technology

2-MS, Sharif University of Technology

3-MS, Sharif University of Technology

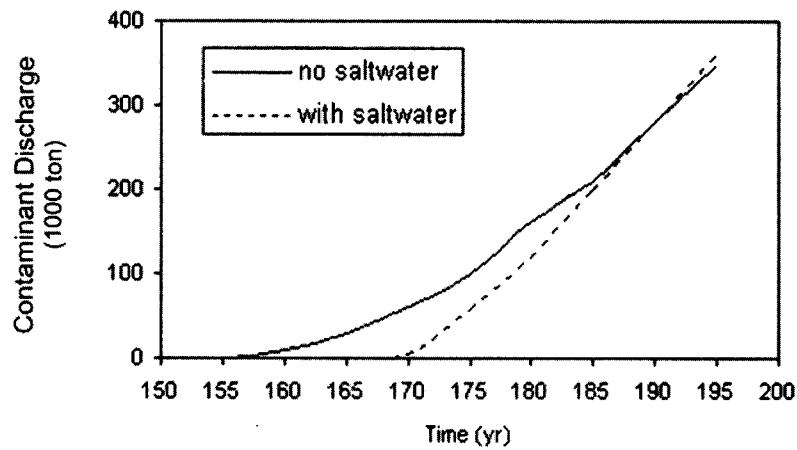


Figure 1-Value of contaminant discharge to sea

References

- Li, L., Barry, D. A., Stagnitty, F. and Parlange, J. Y. (1999), "Submarine Ground Water Discharge and Associated Chemical Input to a Coastal Sea", *Water Resources, Research*, 35 (11), 3253-3259.
- Uchiyama, Y., Nadaoka, K., Rolke, P., Adachi, K. and 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.