

چکیده

آبهای زیرزمینی در بسیاری از نقاط جهان به عنوان مهمترین منبع تامین آب جهت مصارف مختلف مورد استفاده قرار می گیرد. عوامل زیادی می تواند منجر به آلودگی آبهای زیرزمینی شود که از مهمترین آن می توان به پدیده نفوذ آب شور دریا به آبخوان های ساحلی، گسترش نمک پیرامون گنبد های نمکی، آلودگی آب های زیرزمینی عمیق در اثر نشر آلودگی های هسته ای و رادیواکتیو و همچنین نفوذ شیرابه زباله های مدفون به آبهای زیرزمینی نام برد. در این نوع مسائل، خواص سیال یعنی دانسیته و لزجت سیال متاثر از غلظت نمک و دمای سیال می باشد. همین موضوع باعث پیچیدگی زیادی در حل معادلات دیفرانسیل غیرخطی حاکم می شود.

هدف از این تحقیق شبیه سازی کمی و کیفی آب زیرزمینی جهت بررسی پدیده نفوذ آب شور با رویکرد جریان با دانسیته متغیر می باشد. در این تحقیق به بررسی تاثیر شار پخشی سیال در معادله جریان با دانسیته متغیر در مدلسازی پدیده ترموهاالاین (پدیده انتقال همزمان دما و شوری) و تاثیر آن بر انتقال نمک و حرارت در محیط متخلخل خاک پرداخته می شود. شار پخشی سیال در معادله جریان، متاثر از ضریب پخش مکانیکی و گرادیان دانسیته سیال است. حل عددی معادلات حاکم جریان، انتقال نمک و انتقال حرارت در این تحقیق به روش تفاضلات محدود صریح انجام می شود و از روش تکراری پیکارد برای خطی سازی ضرایب غیرخطی استفاده می شود. صحت سنجی مدل با استفاده از مدل نفوذ آب شور هنری و همچنین مدل انتقال حرارت الدر و انتقال نمک الدر انجام می شود. نتایج عددی به دست آمده نشان می دهد که نسبت حداکثر شار پخشی سیال به شار جابجایی سیال با افزایش ضریب پخشیدگی سیال افزایش می یابد که حاکی از اهمیت این ترم در مدلسازی این نوع از مسائل می باشد. تاثیر شار پخشی بر نحوه انتقال نمک و حرارت در خاک در اختلاف دانسیته های بالاتر بیش از مسائلی است که اختلاف دانسیته آب شور و شیرین در آنها کمتر باشد.

در این تحقیق همچنین، به بررسی الگوی جریان و نحوه توزیع نمک در اطراف یک گنبد نمکی فرضی پرداخته می شود و به عنوان مطالعه موردی، مدل پیشنهاد شده برای مدلسازی تاثیر گودال بایوکورن¹ بر گنبد نمکی ناپلئونویل² در جنوب شرقی لوئیزیانا مورد استفاده قرار می گیرد. نحوه گسترش نمک و جریان رو به بالا در اطراف گنبد نمکی بیانگر افزایش شوری در گودال ایجاد شده در این منطقه می باشد. با استفاده از مدل پیشنهاد شده، این فرضیه که یک افزایش فشار ناگهانی در حفره فروریخته شده در داخل گنبد نمکی، باعث ایجاد شوری آب در گودال شکل گرفته در بالای گنبد نمکی می شود، مورد بررسی و آزمایش قرار می گیرد. نتایج عددی به دست آمده نشان می دهد که الگوی جریان پیرامون گنبد نمکی متاثر از مقدار فشار ایجاد شده در داخل حفره و ضریب نفوذ پذیری رسوبات پیرامون گنبد نمکی می باشد.

کلمات کلیدی: جریان با دانسیته متغیر، شار پخشی سیال، مسئله هنری، مسئله الدر، گنبد نمکی.

1- Bayou Corne

2 - Napoleonville

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

آبهای زیرزمینی در سطح جهان همیشه یکی از مطمئن ترین منابع تامین آب مورد نیاز بشر بوده‌اند. این منابع آب به دلیل اینکه دارای ثبات مناسبی از نظر کمیت و کیفیت هستند همیشه مورد توجه بوده‌اند. در مناطقی که دارای شرایط اقلیمی سخت و طاقت فرسایی می‌باشند، این منابع دارای اهمیت ویژه‌ای هستند، به طوریکه وجود آب در دل زمین تنها علت بقای حیات در این مناطق می‌باشد. بنابراین توجه به این منابع ارزشمند و حفاظت از آن در کنار منابع آبهای سطحی از ضروریات می‌باشد.

در سالهای اخیر افزایش جمعیت و در نتیجه افزایش تقاضا در مصرف آب جهت مصارف مختلف اعم از شرب، کشاورزی و صنعتی از یک طرف و عدم مدیریت صحیح در برداشت آبهای زیرزمینی از طرف دیگر، منجر به افت شدید سطح آب زیرزمینی در بسیاری از نقاط جهان شده است. افت سطح آبهای زیرزمینی مشکلات عدیده‌ای را بوجود می‌آورد که از آن جمله می‌توان به خشک شدن چشمه‌ها، قنات‌ها، چاههای کم عمق و نیمه عمیق و کاهش ضریب انتقال و ضریب ذخیره آبخوان اشاره نمود. به طور کلی برداشت غیر اصولی منابع آب زیرزمینی و عدم مدیریت صحیح آن منجر به بروز مشکلاتی به شرح زیر می‌شود:

- کمبود آب برای مصارف مختلف شهری، کشاورزی و صنعتی در اثر افت سطح آب در آبخوان ها
- افزایش هزینه های تامین آب
- پایین آمدن کیفیت آب برای مقاصد مختلف
- پیشروی آب شور در آب زیرزمینی در آبخوان های ساحلی^۱ و یا در آبخوان های مجاور گنبدهای نمکی^۲
- فرونشست زمین در بخش هایی از حوضه که سازندهای ریز دارد.
- کاهش نفوذپذیری خاک و حجم قابل ذخیره آبخوان که در بیشتر مواقع، غیر قابل برگشت می‌باشد.

^۱ - coastal aquifer

^۲ - salt domes

یکی از مشکلاتی که در اثر استخراج بی رویه آبهای زیرزمینی به وجود می آید، نفوذ و پیشروی آب شور^۱ و جایگزینی آن به جای آب شیرین می باشد. این پدیده یکی از مهم ترین مشکلات منابع آب زیرزمینی می باشد که در مجاورت سواحل، رودخانه های شور، دریاچه های شور و یا گنبد های نمکی قرار گرفته اند.

در آبخوان های ساحلی، در اثر تماس آب شور با آب شیرین، آب شیرین به دلیل چگالی کمتر نسبت به آب شور در بالای آن قرار می گیرد. در صورتی که به هر دلیل مانند برداشت بی رویه از چاهها، عدم اعمال مدیریت صحیح در بهره برداری از آبهای زیرزمینی، تغییرات اقلیمی دراز مدت نظیر خشکسالی های متوالی و ... سطح آب در سفره های شیرین کاهش یابد، بر طبق روابط موجود، به ازای هر یک متر افت سطح آزاد آب شیرین، در مرز بین آب شور و شیرین، آب شور ۴۰ متر پیشروی می کند. لذا در مدیریت بهره برداری از آبخوان های آب شیرین در مجاورت سواحل یا دریاچه های شور باید دقت کافی شود تا از نفوذ آب شور به آب شیرین که منجر به تنزل کیفیت آب می شود جلوگیری به عمل آید. به عبارت دیگر، نحوه مدیریت منابع آب زیرزمینی باید به ترتیبی باشد که از اثرات زیان آور بالقوه و بالفعلی که در اثر برداشت بی رویه آب ایجاد می شود چه در حال و چه در آینده جلوگیری نماید. در مجاورت گنبد های نمکی نیز مسئله انحلال نمک و گسترش شوری تاثیر زیادی بر کیفیت آب زیرزمینی می گذارد. گنبد های نمکی تاثیر زیادی بر فعالیت های اقتصادی نظیر استخراج هیدروکربن و مشتقات نفتی، تولید نمک و ایجاد حفره های بزرگ جهت ذخیره نفت، گاز طبیعی یا سایر مواد شیمیایی از جمله زباله های هسته ای دارد. بررسی جریان و نحوه انتقال نمک در اطراف گنبد های نمکی جهت پیش بینی و مطالعه میزان نفوذ آب شور به آبخوان ها، نشت نفت، گاز و یا زباله های هسته ای از داخل حفره های ذخیره به آبخوان ها و ... بسیار مهم می باشد. در مدلسازی گنبد های نمکی، جریان آب زیرزمینی متأثر از گرادیان غلظت نمک و گرادیان دما بوده و به عبارتی پدیده ترموهالاین^۲ بر الگوی جریان آب تاثیر گذار می باشد. این پدیده مکانیزم اصلی انتقال جریان روبه بالای آب در مجاورت گنبد های نمکی و گسترش شوری به آب زیرزمینی می باشد.

۱-۲- بیان مسئله (نفوذ آب شور به شیرین)

به طور کلی در این تحقیق، دو موضوع کلی مورد بررسی قرار می گیرد. (۱) مدلسازی نفوذ آب شور به آبخوان های ساحلی و (۲) مدلسازی جریان پیرامون گنبد های نمکی. در خصوص موضوع اول، معادلات حاکم شامل معادله جریان سیال و معادله انتقال نمک بوده و هدف اصلی در این بخش بررسی

^۱ - salt water intrusion

^۲ - thermohaline flow

صحت سنجی مدل پیشنهاد شده در این تحقیق با استفاده از مدل‌های معروف موجود می‌باشد. در خصوص موضوع دوم، علاوه بر معادله جریان سیال و معادله انتقال نمک، معادله انتقال حرارت نیز در مدلسازی بسیار مهم بوده و حل همزمان این سه معادله در کنار معادلات حالت (یعنی معادلات حاکم بین خواص سیال یعنی جرم مخصوص و لزجت با نمک و حرارت) حائز اهمیت می‌باشد.

آب زیرزمینی شور یک اصطلاح کلی برای تمام آب‌های زیرزمینی است که کل مواد جامد حل شده (TDS^1) آنها بیش از ۱۰۰۰ میلی گرم بر لیتر باشد. مهم‌ترین منابع آب شور در سفره‌های آب زیرزمینی به شش گروه تقسیم می‌شوند (Todd, 2005).

- آب شور ناشی از تبخیر آب زیرزمینی.
- آب شور به تله افتاده در بین رسوبات نفوذ ناپذیر در طی زمانهای گذشته.
- آب شور ناشی از انحلال گنبد‌های نمکی و لایه‌های نازک نمکی در سازندهای زمین‌شناسی.
- آب شور ناشی از جریانات برگشتی از زمین‌های کشاورزی.
- آب شور مربوط به فعالیتهای بشری مانند استفاده از نمک برای یخزدایی و
- نفوذ آب دریا به سفره‌های ساحلی.

همانطور که در بخش‌های قبل اشاره شد، یکی از مشکلاتی که منابع آب زیرزمینی را تهدید می‌کند وارد شدن آب‌های شور به داخل لایه‌های آبدار و یا به عبارت دیگر شور شدن لایه‌های آبدار زیرزمینی است. این امر بخصوص در مناطق ساحلی و مناطق کویری و یا نقاطی که آب شور در اعماق پایین‌تر وجود دارد از اهمیت بیشتری برخوردار است. تفاوت در جرم مخصوص آب شور و شیرین عامل مهمی در مدلسازی آب شور و شیرین می‌باشد. آب شیرین به دلیل چگالی کمتر نسبت به آب شور به صورت شناور بالای آب شور قرار می‌گیرد. در این مناطق آب شور و شیرین مطابق شکل ۱-۱-الف توسط یک جبهه از هم مجزا می‌باشند. عوامل اصلی نفوذ آب شور، تفاوت جرم مخصوص آب شور و شیرین و همچنین ضریب پخش هیدرودینامیکی می‌باشد. شکل ۱-۱-ب تعادل هیدروستاتیکی بین آب شور و شیرین را در یک لوله U شکل نشان می‌دهد. در هر نقطه از این جبهه، فشاری که از پایین و بالا وارد می‌شود مساوی بوده و لذا آنرا در حالت تعادل قرار می‌دهد. فشار وارده از پایین معادل فشار آب شور $\rho_s \cdot g \cdot Z$ و فشاری که از بالا وارد می‌شود معادل فشار آب شیرین و عبارت از $\rho_f \cdot g \cdot (Z + h)$ می‌باشد. بنابراین:

$$\rho_s \cdot g \cdot Z = \rho_f \cdot g \cdot (Z + h) \quad (1-1)$$

که در آن:

¹ - total dissolved solid

ρ_s = دانسیته آب شور

ρ_f = دانسیته آب شیرین،

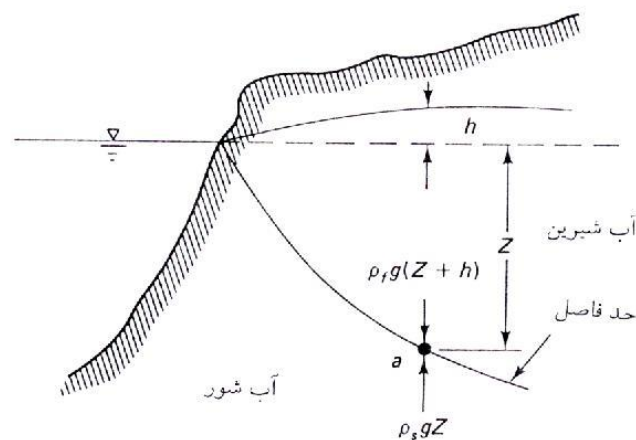
h = فاصله سطح ایستابی تا تراز آب سطح دریا (فشار پیزومتری نسبت به سطح دریا)

و Z = عمق جبهه آب شور نسبت به سطح دریا در هر نقطه می باشد.

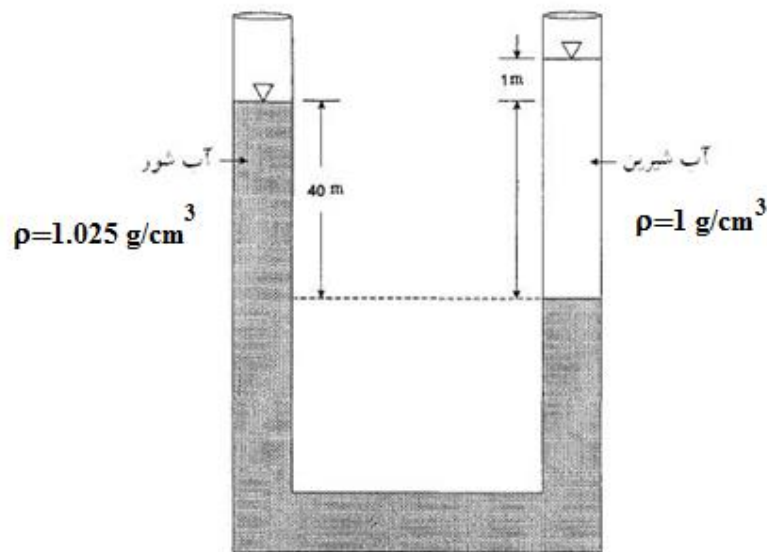
از فرمول فوق می توان Z را محاسبه کرد. اگر دانسیته آب شور دریا را 1.025 و دانسیته آب

شیرین را یک گرم در سانتیمتر مکعب فرض کرد خواهیم داشت:

$$Z = \frac{1}{1.025 - 1} h = 40h \quad (1-2)$$



شکل ۱-۱-الف - تعادل آب شور و شیرین در نواحی ساحلی



شکل ۱-۱-ب - لوله U شکل بیان کننده تعادل هیدروستاتیکی بین آب شور و شیرین

مطالعات انجام شده توسط بادون گبین Badon-Ghyben, 1889 و هرزبرگ Herzberg, 1901 نشان داده است که عمق آب شور در آبخوان های ساحلی با استفاده از معادله (۱-۲) به دست می آید. این معادله به نام اصل بادون گبین- هرزبرگ مشهور است و برای تخمین اولیه موقعیت سطح اشتراک آب شور و شیرین به کار می رود. بدین ترتیب مشاهده می شود که اگر سطح ایستابی آب شیرین در نواحی ساحلی به اندازه h بالاتر از تراز سطح آب دریا قرار گیرد، تا عمق $40 h$ در زیر آن آب شیرین وجود خواهد داشت و هر زمان که این سطح به پایین تر از سطح دریا برسد آب شور به سمت ساحل حرکت خواهد کرد. معادله (۱-۲) در حالتی قابل استفاده است که تعادل هیدرواستاتیکی بین آب شور و شیرین برقرار باشد و آب شور، حرکتی به سمت آب شیرین نداشته باشد. در وضعیت نفوذ آب شور به آبخوان باید از رابطه زیر برای محاسبه عمق مشترک سطح آب شور و شیرین نسبت به یک مبدا اختیاری استفاده نمود (Guo & Langevin, 2002).

$$Z = (1 + \alpha)h_s - \alpha h_f \quad (۱-۳)$$

$$\alpha = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} \quad (۱-۴)$$

در روابط فوق:

h = هد پیزومتری

ρ = جرم مخصوص آب

Z = موقعیت سطح مشترک نسبت به یک مبدا اختیاری می باشد.

اندیس های s و f نیز به ترتیب بیان کننده آب شور و شیرین می باشند. شکل (۱-۲) شرایط سطح مقطع یک آبخوان آزاد ساحلی را در دو حالت عدم نفوذ آب شور و حالت نفوذ آب شور به آبخوان در اثر پمپاژ آب شیرین نشان می دهد. همانطور که در شکل نشان داده شده است سطح تماس بین آب شور و شیرین، سهموی با انحنا به سمت آب شیرین می باشد.

یکی دیگر از مسائلی که در مورد تداخل آب شور اتفاق می افتد وضعیتی است که در آن، یک سفره آب شور در زیر سفره آب شیرین قرار می گیرد و چاه فقط در لایه آب شیرین حفر می شود. در این حالت، پمپاژ زیاد و یا حفر بیشتر چاه باعث ورود آب شور به چاه می گردد. این وضعیت که در شکل (۱-۳) نشان داده شده است به نام پدیده بالاآمدگی مخروطی آب شور^۱ معروف است. اگر عمق اولیه خط مرزی آب شور و شیرین نسبت به انتهای چاه a و ضریب آبگذری مصالح آبخوان، k باشد آب شور در زیر چاه به اندازه Z بالا خواهد آمد که این مقدار به دبی پمپاژ بستگی دارد.

^۱ - Upconing

$$Z = \frac{Q \cdot \rho_f}{2\pi a K (\rho_s - \rho_f)} \quad (۵-۱)$$

در این فرمول

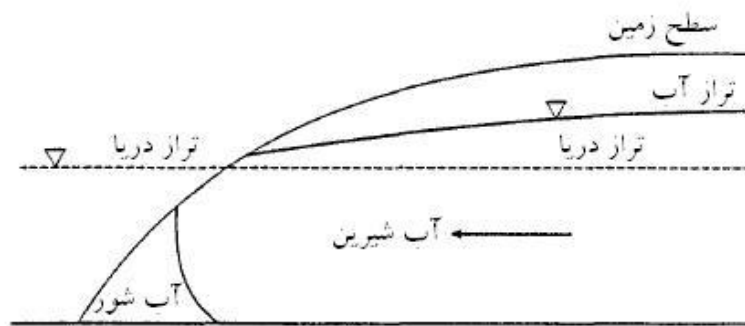
$$Q = \text{دبی پمپاژ}$$

$$\rho_s = \text{جرم مخصوص آب شور}$$

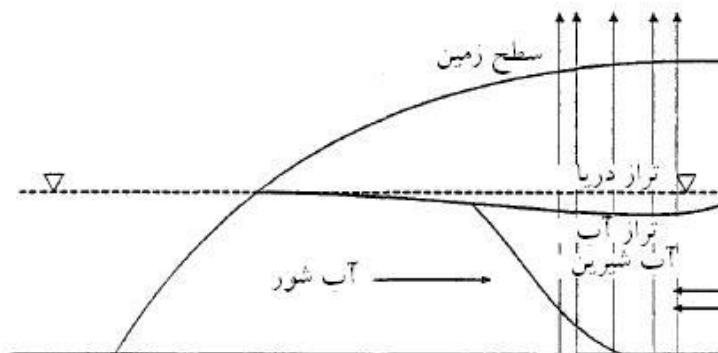
$$\rho_f = \text{جرم مخصوص آب شیرین می باشد.}$$

هنگامی که Z به مقدار نصف a برسد وضعیت بحرانی شده و آب شور می تواند وارد چاه شود. با توجه به اینکه در این حالت $Z = ۱/۵ a$ می باشد حداکثر دبی مجاز ($Q_{\max}$) برای اینکه آب شور نتواند وارد چاه شود برابر است با:

$$Q_{\max} = \pi a^2 K \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \quad (۶-۱)$$

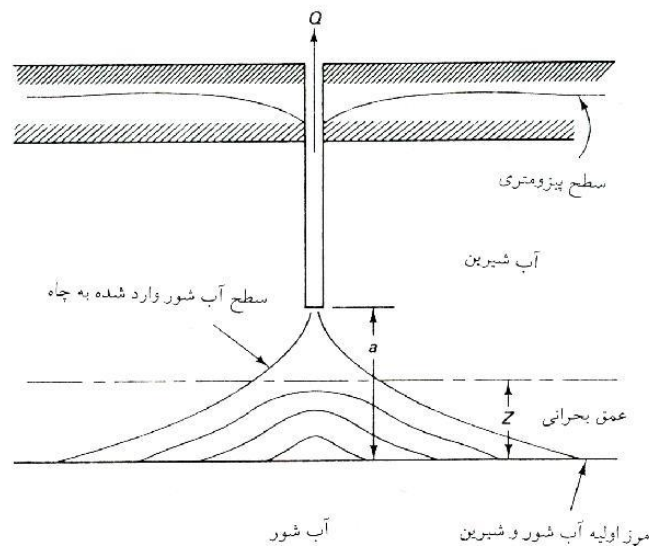


شکل ۱-۲-الف- شرایط هیدرولوژیکی در آبخوان آزاد ساحلی در حالت عدم نفوذ آب شور

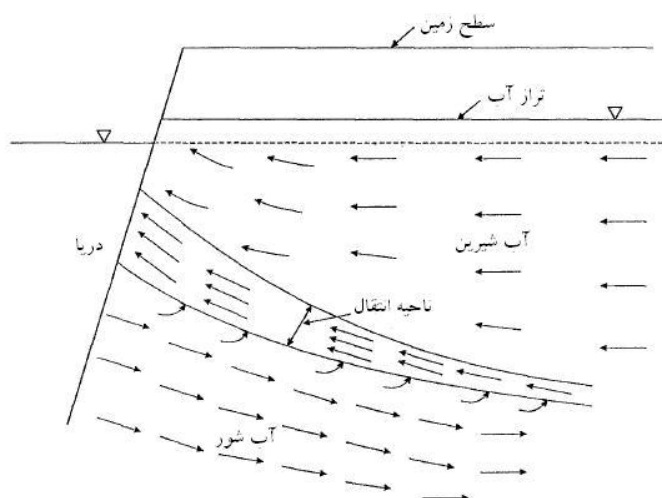


شکل ۱-۲-ب- شرایط هیدرولوژیکی در آبخوان آزاد ساحلی در حالت نفوذ آب شور

با توجه به اینکه در واقعیت آب شور و آب شیرین دو مایع مخلوط پذیر می‌باشند، به جای یک سطح تماس تیغه ای، یک ناحیه انتقال (پخش) بین آنها وجود دارد که گرادیان غلظت نمک در این ناحیه از سمت آب شور به سمت آب شیرین می‌باشد. وجود این ناحیه انتقال به دلیل پدیده پخش مولکولی و پخش مکانیکی می‌باشد. در شکل (۱-۴) ناحیه انتقال نشان داده شده است. ضخامت ناحیه انتقال بستگی به ساختار فیزیکی و خواص هیدرولیکی آبخوان، میزان استخراج آب از آبخوان، میزان تغذیه آبخوان و ... دارد.



شکل ۱-۳- بالا آمدگی مخروطی شکل آب شور در زیر چاه پمپاژ



شکل ۱-۴- وجود ناحیه انتقال بین آب شور و شیرین

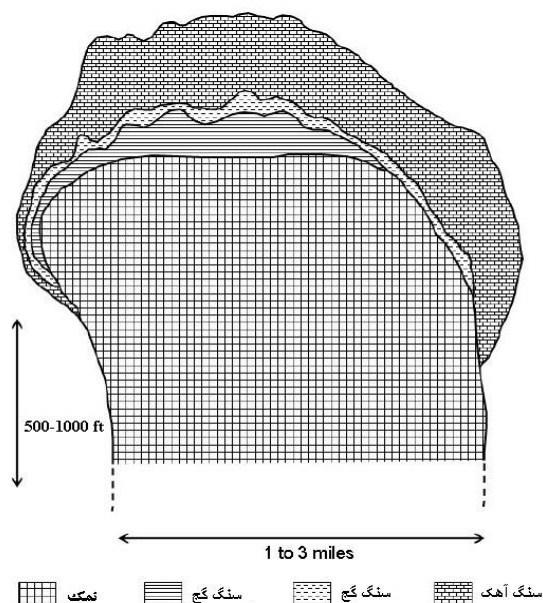
مدلسازی پدیده نفوذ آب شور در آبخوان‌های ساحلی با استفاده از معادله جریان با جرم مخصوص متغیر دارای پیچیده گی‌های زیادی است. در حال حاضر مدل‌های زیادی برای مدلسازی این پدیده وجود دارد و در این مدل‌ها معمولاً از روش‌ها و دیدگاه‌های مختلفی برای تحلیل این نوع مسائل استفاده می‌شود. اختلاف در روش‌ها و تکنیک‌های عددی از آنجا ناشی می‌شود که به دلیل پیچیده بودن معادلات حاکم و وجود ضرایب غیر خطی در معادلات، محققین با انجام فرضیات مورد نظر خود (با توجه به شرایط خاص مسئله) سعی در ساده سازی‌هایی در روش عددی استفاده شده دارند. در فصل سوم، به بررسی این نوع دیدگاه‌ها و روش‌های عددی مختلف در حل مسائل جریان با جرم مخصوص متغیر پرداخته می‌شود.

گسترش آب شور در اثر انحلال گنبد‌های نمکی نیز یکی دیگر از مشکلات پیش رو در نقاطی است که این گنبد‌های نمکی در تماس با آب‌های زیرزمینی می‌باشند. گنبد‌های نمکی توده‌های عظیم سنگ نمک بوده که ضریب هدایت گرمایی بالایی دارند و در نتیجه وجود گرادیان گرمایی بالا در ارتباط با رسوبات پیرامونی، میزان انحلال نمک در اطراف گنبد‌های نمکی زیاد بوده و مشکلات زیادی را می‌توانند در خصوص کیفیت آب زیرزمینی ایجاد نمایند. مطالعه بر روی گنبد‌های نمکی در نقاط مختلفی از جهان و از جمله در بخش جنوبی آمریکا (ایالت لوئیزیانا، تگزاس و فلوریدا) مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. غلظت نمک در اطراف این گنبد‌ها به بیشتر از ۳۰۰ گرم بر لیتر یعنی حدود ۱۰ برابر غلظت نمک در آب دریاها می‌رسد و گاهی بیشتر از چندین کیلومتر در آبخوان گسترش می‌یابد. به عنوان یک نمونه شکل (۵-۱) شماتیکی از یک گنبد نمکی به همراه سنگ پوش^۱ روی آن که معمولاً ترکیبی از سنگ گچ^۲ و سنگ آهک^۳ می‌باشد را نشان می‌دهد. شکل (۶-۱) غلظت نمک در اطراف یک گنبد نمکی در اعماق ۱ تا ۴ کیلومتری آبخوان را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود توده ای از نمک به غلظت ۱۶۰ گرم بر لیتر در بالای گنبد نمکی تولید شده است. همانطور که در این فصل اشاره شد، مهمترین عامل در شکل گیری توده‌های نمک با غلظت بالا در اطراف گنبد‌های نمکی گرادیان بالای حرارتی می‌باشد. گرادیان جرم مخصوص سیال متأثر از گرادیان حرارتی ناشی از اختلاف هدایت گرمایی سنگ نمک و سایر رسوبات پیرامونی و همچنین ناشی از گرادیان غلظت نمک ناشی از انحلال گنبد نمکی در آب می‌باشد. تأثیر عوامل مختلف بر مکانیزم حاکم بر الگوی جریان و پدیده انتقال ماده در این قبیل مسائل منجر به پیچیدگی حل معادلات حاکم می‌شود.

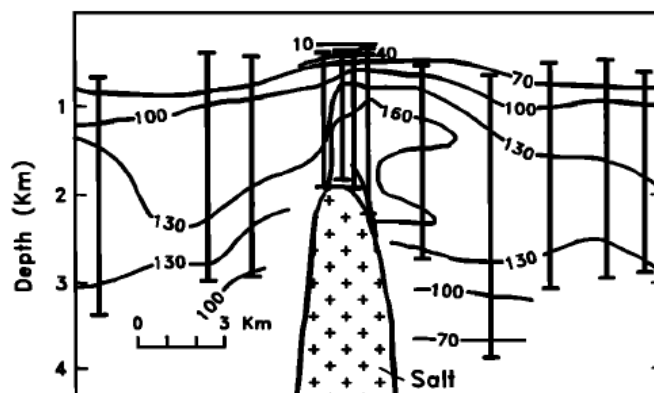
^۱ - cap rock

^۲ - gypsum

^۳ - calcite



شکل ۵-۱- شماتیک یک گنبد نمکی به همراه سنگ پوش روی آن

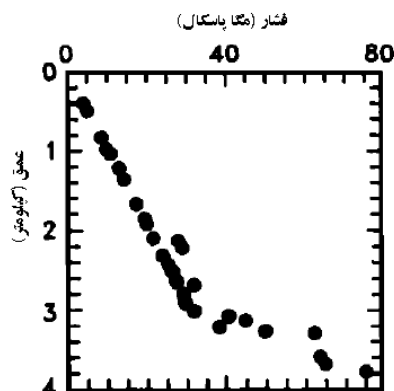


شکل ۶-۱- توزیع نمک در اطراف یک گنبد نمکی

یکی از مواردی که در مطالعه بر روی گنبدهای نمکی باید مد نظر قرار گیرد بررسی وجود ناحیه پرفشار^۱ در اعماق بزرگتر از ۳ کیلومتر در آبخوان ها می باشد که تاثیر زیادی بر الگوی جریان و انتقال نمک در اطراف گنبدهای نمکی دارد. منظور از ناحیه پرفشار، وجود رسوباتی با فشار آب منفذی بیش از فشار هیدروستاتیکی می باشد. عامل اصلی ایجاد لایه پرفشار، رسوب گذاری سریع در رسوبات با نفوذ پذیری کوچک می باشد. به عنوان یک نمونه شکل (۷-۱) نحوه تغییرات فشار نسبت به عمق را در اطراف یکی از گنبدهای نمکی در ایالت لوئیزیانا نشان می دهد. مشاهده می شود که از عمق ۳ کیلومتری به پایین

^۱ - over-pressure zone

یک ناحیه پر فشار وجود دارد. شایان ذکر است که وجود این ناحیه پر فشار با استفاده از مطالعات زمین شناسی منطقه به دست می‌آید. عمقی از آبخوان که در آن لایه های پر فشار وجود دارد تابع خصوصیات زمین شناسی منطقه مورد مطالعه بوده و از یک منطقه به منطقه دیگر متفاوت می‌باشد. با توجه به اینکه وجود لایه های پر فشار در الگوی جریان و انتقال نمک نقش بسیار مهمی دارد لذا قبل از مدلسازی باید از وجود و یا عدم وجود لایه های پر فشار در منطقه مورد مطالعه مطمئن شد.



شکل ۱-۲- روند عمومی تغییرات فشار سیال نسبت به عمق در اطراف گنبدهای نمکی در ایالت لویزیانا

۱-۳- اهداف تحقیق

هدف از این تحقیق شبیه سازی کمی و کیفی آب زیرزمینی جهت بررسی پدیده نفوذ آب شور با رویکرد جریان با جرم مخصوص متغیر می‌باشد. یکی از نکات بسیار مهم در شبیه سازی جریان آب شور با غلظت نمک زیاد که گاهی مواقع به بیش از ۳۰۰ گرم در لیتر می‌رسد این است که در این نوع مسائل، علاوه بر شار جابجایی^۱، شار پخشی سیال^۲ که متأثر از اختلاف جرم مخصوص آب شور و آب شیرین و همچنین پدیده پخش مکانیکی نیز باعث شکل گیری جریان سیال می‌شود. لذا معادله جریان در این نوع مسائل دارای یک عبارت اضافی به نام شار پخشی بوده که تأثیر قابل ملاحظه ای بر الگوی جریان و نحوه گسترش شوری در آب دارد. این موضوع در فصول بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این راستا یک مدل عددی تفاضلات محدود صریح به روش Block-Center برای شبیه سازی تغییرات زمانی و مکانی هد هیدرولیکی، الگوی جریان سیال و میزان گسترش و غلظت نمک در آب زیرزمینی با منظور نمودن اثر

1 - advective flux

2 - dispersive flux

شار پخشی در معادله جریان توسعه می‌یابد. به طور کلی مدل توسعه یافته در این مرحله باید موارد زیر را تامین نماید:

- مدل باید قادر به حل مسائل جریان با جرم مخصوص متغیر در آبهای زیرزمینی مثل نفوذ آب شور به آبخوان‌های ساحلی، جریان سیال پیرامون گندهای نمکی، انتقال آلاینده‌ها از محل دفن زباله‌ها به آب‌های زیرزمینی و ... باشد.
- با توجه به اینکه غیر همگنی در خواص هیدرولیکی آبخوان، به ویژه ضریب هدایت هیدرولیکی و تخلخل آبخوان اثرات قابل توجهی بر جریان آب زیرزمینی و انتقال آلاینده دارد، مدل باید قادر به مدلسازی هرگونه تغییر در خواص محیط متخلخل خاک مثل تغییر در میزان تخلخل و یا ضریب نفوذپذیری خاک باشد.
- توزیع زمانی و مکانی تراز آب در آبخوان با استفاده از این مدل قابل پیش‌بینی باشد.
- تغییرات زمانی و مکانی غلظت نمک در آبخوان قابل پیش‌بینی باشد.
- تغییرات زمانی و مکانی دما در آبخوان قابل پیش‌بینی باشد.
- موقعیت سطح مشترک بین آب شور و شیرین و همچنین ضخامت ناحیه اختلاط آب شور و آب شیرین قابل پیش‌بینی باشد.
- صحت سنجی مدل با استفاده از داده‌های میدانی و آزمایشگاهی تامین شود.
- مدل پیشنهاد شده باید قادر به پیش‌بینی نتایج قابل قبول و منطقی در شبیه‌سازی منطقه مورد مطالعه باشد.

به طور کلی این تحقیق شامل مراحل زیر می‌باشد:

۱-۳-۱- توسعه معادلات حاکم

به طور کلی دو هدف اصلی در این مرحله دنبال می‌شود:

- توسعه معادلات حاکم بر جریان سیال، انتقال نمک و انتقال حرارت در محیط متخلخل اشباع.
- استفاده از یک روش عددی برای حل عددی معادلات حاکم و نوشتن یک کد کامپیوتری برای آن.

هدف اصلی در این مرحله، توسعه یک مدل جریان با جرم مخصوص متغیر و بررسی قابلیت استفاده از آن جهت مدلسازی پدیده ترموهاالاین، به عنوان مثال جریان آب زیرزمینی پیرامون گندهای

نمکی، می‌باشد. مدل ریاضی مسئله به صورت سیستمی متشکل از سه معادله دیفرانسیل یعنی: معادله جریان آب زیرزمینی، معادله انتقال نمک و معادله انتقال حرارت بوده که به همراه معادلات حالت (معادلات بین کننده رابطه بین خواص سیال یعنی جرم مخصوص و لزجت سیال با غلظت نمک و دما) قادر به شبیه سازی این نوع مسائل می‌باشد. با توجه به پیچیدگی موجود در حل معادلات دیفرانسیل غیر خطی حاکم بر مدل، در این مرحله از تکنیک عددی تفاضلات محدود^۱ برای توسعه مدل جریان آب زیرزمینی، مدل انتقال محلول و انتقال حرارت استفاده می‌شود. با استفاده از این مدل عددی، میزان انتقال آلاینده (در اینجا میزان گسترش نفوذ آب شور) در آبخوان و اثرات آن بر الگوی جریان آب زیرزمینی پیش بینی می‌شود. نتایج بر حسب ارتفاع آب در آبخوان، غلظت نمک و توزیع حرارت در نقاط مختلف آبخوان و در زمانهای مختلف بیان خواهد شد. با توجه به اینکه الگوی جریان آب زیرزمینی و در نتیجه میزان گسترش نمک و توزیع دما در آبخوان، متأثر از خواص خاک مثل لایه بندی، ضریب نفوذ پذیری رسوبات و تخلخل لایه های مختلف می‌باشد، مدل توسعه یافته در این تحقیق قادر به شبیه سازی محیط متخلخل اشباع خاک غیرهمگن ناهمسانگرد نیز می‌باشد. به عبارت دیگر این مدل می‌تواند تغییرات زمانی و مکانی خواص محیط متخلخل خاک مثل تخلخل و ضریب نفوذپذیری را نیز شبیه سازی نماید.

۱-۳-۲- صحت سنجی مدل

گام اصلی در بررسی قابلیت عملکرد و صحت هر مدل عددی، محک زدن مدل با نتایج تحلیلی و یا آزمایش کد نوشته شده با استفاده از داده های تجربی در مقیاس آزمایشگاهی و یا استفاده از داده های میدانی می‌باشد. علی رغم وجود چندین حل تحلیلی و آزمایشگاهی برای مسائل مربوط به معادلات خطی جریان آب زیرزمینی و انتقال نمک، صحت سنجی در مدل های جریان با جرم مخصوص متغیر، به دلیل اینکه دسترسی به حل تحلیلی، داده های میدانی و یا آزمایشگاهی استاندارد بسیار محدود است، کار بسیار مشکلی است. به طور کلی، معمولاً از دو مدل یا شاخص^۲ معروف جهت صحت سنجی جریان با جرم مخصوص متغیر استفاده می‌شود. مدل عددی معرفی شده در این تحقیق با استفاده از مسئله نفوذ آب شور هنری^۳ (Henry, 1964) و مسئله انتقال حرارت الدر^۴ (Elder, 1967) تحت اثرات تغییرات کم جرم مخصوص سیال، و همچنین مسئله انتقال نمک الدر^۵ (Kolditz et al., 1998) تحت تأثیر تغییرات قابل توجه جرم مخصوص سیال صحت سنجی می‌شود. همچنین، میزان حساسیت مدل به ابعاد شبکه، تغییرات

^۱ - Finite difference

^۲ - benchmark

^۳ - Henry saltwater intrusion problem

^۴ - thermal Elder problem

^۵ - brine Elder problem

جرم مخصوص سیال و ضریب پخشیدگی مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد و نتایج عددی به دست آمده با نتایج به دست آمده توسط سایر محققین مقایسه و ارزیابی می‌شود.

۱-۳-۳- کاربرد مدل جهت شبیه سازی جریان پیرامون گنبد نمکی Napoleonville در جنوب شرقی ایالت لوئیزیانا

هدف از این مرحله، استفاده از مدل توسعه یافته جهت شبیه سازی یک مسئله واقعی می‌باشد. در این قسمت ابتدا به بررسی الگوی جریان و نحوه توزیع نمک و حرارت در اطراف یک گنبد نمکی فرضی پرداخته می‌شود و سپس به عنوان مطالعه موردی، مدل پیشنهاد شده برای مدلسازی جریان آب زیرزمینی پیرامون گنبد نمکی Napoleonville در جنوب شرقی لوئیزیانا مورد استفاده قرار می‌گیرد. نحوه گسترش نمک و جریان رو به بالا در اطراف گنبد نمکی بیانگر افزایش شوری در گودال ایجاد شده در این منطقه می‌باشد. با استفاده از مدل پیشنهاد شده، این فرضیه که یک افزایش فشار ناگهانی در حفره فرو ریخته شده در داخل گنبد نمکی، باعث ایجاد شوری آب در گودال شکل گرفته در سطح زمین می‌شود، مورد بررسی و آزمایش قرار می‌گیرد. نتایج عددی به دست آمده نشان می‌دهد که الگوی جریان پیرامون گنبد نمکی متأثر از مقدار فشار ایجاد شده در داخل حفره و ضریب نفوذ پذیری رسوبات پیرامون گنبد نمکی می‌باشد.

۱-۴- روش تحقیق

با توجه به اینکه در این تحقیق به عنوان مطالعه موردی، به مطالعه و شبیه سازی پدیده نفوذ آب شور در اطراف گنبد نمکی Napoleonville در جنوب شرقی ایالت لوئیزیانا آمریکا پرداخته می‌شود، باید اطلاعات کاملی در خصوص مشخصات هیدروژئولوژیکی آبخوان، تراز آب در آبخوان، وضعیت کیفی آب به لحاظ میزان شوری (میزان کل جامدات محلول) و تغییرات دما در اعماق مختلف آبخوان، تعداد چاه‌های مشاهداتی و پیژومتری موجود و ... داشته باشیم.

به طور کلی روش تحقیق در این پایان نامه عبارت است از:

۱-۴-۱- بسط معادلات حاکم بر جریان آب با جرم مخصوص متغیر با منظور نمودن عبارت شار پخشی در معادله جریان سیال.

۱-۴-۲- منقطع سازی معادلات ریاضی حاکم و حل عددی معادلات به روش تفاضلات محدود صریح.

۱-۴-۳- بررسی صحت عملکرد مدل توسعه یافته با استفاده از شاخص های معروف مثل مسئله نفوذ آب شور هنری و مسئله انتقال نمک و انتقال حرارت الدر.

۱-۴-۴- استفاده از مدل جهت شبیه سازی جریان پیرامون گنبد نمکی مورد نظر به عنوان مطالعه موردی.

یکی از مهمترین مواردی که باید در این بخش به آن توجه داشت تعیین پارامترهای مورد نیاز در مدلسازی می باشد. به عبارت دیگر باید یک مدل مفهومی مناسب از منطقه مورد مطالعه به دست آورد. در این مدل موارد زیر باید مشخص شود:

- تعیین وضعیت زمین شناسی منطقه به لحاظ لایه بندی و جنس رسوبات
- تعیین مشخصات هیدرودینامیکی و هیدرولیکی حوضه مورد مطالعه شامل گرادیان هیدرولیکی، ضریب ذخیره و ضریب انتقال آبخوان، ضریب هدایت هیدرولیکی و ضریب تخلخل گنبد نمکی و سایر رسوبات پیرامون آن، ضریب پخش و ... (پارامترهای مدل)
- تعیین ضخامت آبخوان و محدوده فیزیکی حوضه مورد مطالعه
- تعیین شرایط اولیه و شرایط مرزی

۱-۵- مروری بر مطالب فصل ها

- مطالب این تحقیق در هشت فصل و یک پیوست تدوین شده است.
- فصل اول به ارائه کلیاتی پیرامون مدلسازی جریان آب زیرزمینی و انتقال نمک در اثر پدیده نفوذ آب شور در آبخوان های ساحلی و یا انحلال گنبدهای نمکی اختصاص دارد و اهداف این تحقیق به اختصار بیان می شود.
 - فصل دوم با عنوان پدیده انتقال در محیط متخلخل خاک، به بررسی مهمترین فرایندهای موثر بر انتقال آلاینده در آب می پردازد.
 - فصل سوم با عنوان پیشینه تحقیق، بررسی جامع تری در ارتباط با موضوع شبیه سازی پدیده انتقال نمک و روشهای مختلف مورد استفاده در این خصوص دارد. در این فصل پیشینه تحقیقات انجام شده در مدلسازی جریان آب شور مورد مطالعه و بررسی قرار می گیرد.

- فصل چهارم با عنوان معادلات حاکم می‌باشد. در این فصل معادلات حاکم بر جریان با جرم مخصوص متغیر یعنی معادلات جریان سیال، انتقال نمک و انتقال حرارت در محیط متخلخل اشباع بصورت جداگانه شرح داده می‌شود.
- فصل پنجم با عنوان حل عددی معادلات حاکم، معادلات غیرخطی جریان سیال، انتقال نمک و انتقال حرارت به روش تفاضلات محدود صریح منقطع سازی شده و ضرایب غیرخطی با استفاده از روش تکراری پیکارد خطی سازی می‌شوند. سپس شرایط مرزی و اولیه مورد نیاز مسئله به آنها اعمال می‌شود و پارامترهای مورد نیاز از آنها استخراج می‌شود.
- در فصل ششم با عنوان صحت سنجی، مدل عددی توسعه یافته در این تحقیق با استفاده از مدل های معروفی که در جریان های با جرم مخصوص متغیر به عنوان شاخص مطرح بوده مثل مسئله نفوذ آب شور هنری و یا مسئله الدر صحت سنجی می‌شود. آنالیز حساسیت مدل با بررسی تاثیر ابعاد شبکه در منقطع سازی معادلات، تاثیر تغییرات جرم مخصوص سیال و همچنین تاثیر مقدار ضریب پخشیدگی در نتایج مدلسازی و الگوی جریان انجام می‌شود.
- در فصل هفتم با عنوان مطالعه موردی، الگوی جریان و نحوه توزیع و گسترش نمک در اطراف گنبد نمکی Napoleonville در جنوب شرقی ایالت لوئیزیانا آمریکا مورد بررسی و مطالعه قرار می‌گیرد.
- فصل هشتم با عنوان جمع بندی، نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات برای تحقیقات بعدی را شامل می‌شود.
- در پیوست ۱، کد عددی نوشته شده در MATLAB در حالت کلی حل همزمان معادله جریان، معادله انتقال نمک و معادله انتقال حرارت آورده شده است.