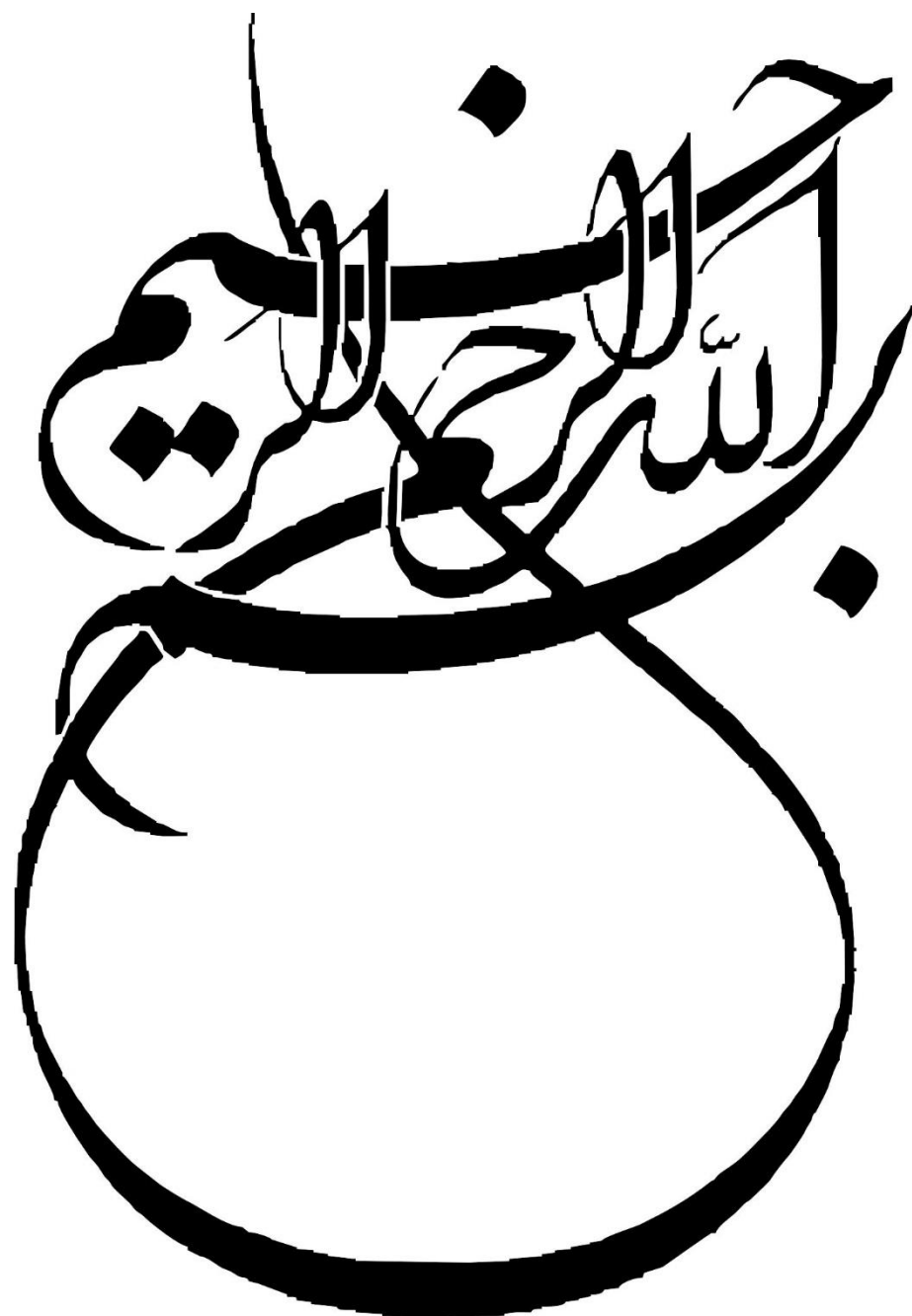






دانشگاه صنعتی شاهرود
دانشکده مهندسی عمران

رساله دکتری
گرایش هیدرولیک

عنوان
مطالعه آزمایشگاهی و عددی اندرکنش آب‌های شور و شیرین در محیط‌های متخلخل

نگارنده
عباسعلی رضاپور

استاد راهنما:
سید فضل‌الله ساغروانی

استاد مشاور:
علیرضا احمدی‌فرد

شهریور ۱۳۹۷

شماره: ۳۲۸ / ۹۷
تاریخ: ۲۰ / ۱۱ / ۹۷

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

ویرایش:

فرم شماره ۱۲: صورت جلسه نهایی دفاع از رساله دکتری (Ph.D)

(ویژه دانشجویان ورودی های ۹۴ و ما قبل)

بدینوسیله گواهی می شود آقای عباسعلی رضاپور دانشجوی دکتری رشته عمران- هیدرولیک به شماره دانشجویی ۹۱۲۵۵۷۵ ورودی مهر ماه سال ۱۳۹۱ در تاریخ ۱۳۹۷/۶/۲۰ از رساله نظری ☐ / عملی ☒ خود با عنوان: مطالعه آزمایشگاهی و عددی اندرکنش آب های شور و شیرین در محیط های متخلخل دفاع و با اخذ نمره ۱۹/۲۰ به درجه عالی نائل گردید.

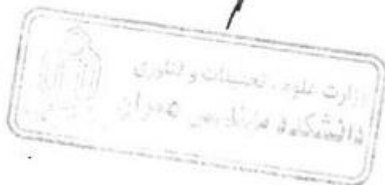
- الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰ ☒ (ب) درجه بسیار خوب: نمره ۱۸/۹۹ - ۱۷ ☐
ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹ - ۱۵ ☐ (د) غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد ☐
ه) رساله نیاز به اصلاحات دارد ☐

ردیف	هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱	دکتر سید فضل الله ساغروانی	استاد راهنما	دانشیار	
۲	دکتر علیرضا احمدی فرد	مشاور	دانشیار	
۳	دکتر ابوالفضل اکبرپور	استاد مدعو خارجی	دانشیار	
۴	دکتر غلامحسین کرمی	استاد مدعو داخلی	دانشیار	
۵	دکتر احمد احمدی	استاد مدعو داخلی	دانشیار	
۶	دکتر سعید گلپای	سرپرست (نماینده) تحصیلات تکمیلی دانشکده	استادیار	

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم در خصوص انجام مراحل دانش آموختگی آقای/خانم عباسعلی رضا پور بعمل آید.

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:
تاریخ و مهر دانشکده:



تقدیم‌نامه

تقدیم به خدایی که آفرید

جهان را، انسان را، عقل را، علم را، معرفت را، عشق را ...

و به کسانی که عشقشان را در وجودم دمید

تقدیم به همسر مهربان و فرزند دلبندم که در تمام طول تحصیل همراه و همگام من بودند،

به اساتید فرزانه و فرهیخته‌ای که در راه کسب علم و معرفت مرا یاری نمودند،

به آنان که نفس خیر و دعاهایشان بدرقه راهم بود.

سپاس‌گزاری

نخستین سپاس و ستایش از آن خداوندی است که بنده کوچکش را در دریای بیکران اندیشه، قطره‌ای ساخت تا وسعت آن را از دریچه اندیشه‌های ناب آموزگارانی بزرگ به تماشا نشیند. لذا اکنون که در سایه‌سار بنده‌نوازی‌هایش رساله حاضر به انجام رسیده است، بر خود لازم می‌دانم تا مراتب سپاس را از بزرگوارانی به جا آورم که اگر دست یاریگرشان نبود، هرگز این پایان‌نامه به انجام نمی‌رسید.

از استاد فرهیخته جناب آقای دکتر سید فضل الله ساغروانی که زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند، از استاد محترم، جناب آقای دکتر علیرضا احمدی فرد که زحمت مشاوره این رساله را متقبل شدند و از اساتید فرزانه، جناب آقای دکتر احمد احمدی، جناب آقای دکتر غلامحسین کرمی و جناب آقای دکتر ابوالفضل اکبرپور که زحمت داوری این رساله را به عهده گرفتند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

تعهدنامه

اینجانب عباسعلی رضاپور دانشجوی دوره دکتری رشته مهندسی عمران گرایش هیدرولیک دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مطالعه آزمایشگاهی و عددی اندرکنش آب های شور و شیرین در محیط های متخلخل تحت راهنمایی آقای دکتر سید فضل الله ساغروانی متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ
امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

سفره‌های آب زیرزمینی منبع اصلی تأمین آب شیرین در بسیاری از مناطق جهان هستند. متأسفانه، مجاورت و ارتباط هیدرولیکی این ذخایر طبیعی با آب‌های شور، چه در نواحی ساحلی و چه در مجاورت کویرها (پلایاها)، آن‌ها را در معرض خطر شور شدن قرار داده است. در نواحی ساحلی غلظت آب دریا تقریباً ثابت است و سطح ایستابی آبخوان عموماً بالاتر از سطح آب دریا قرار دارد. در حالی که در نواحی خشک و نیمه خشک، غلظت آب شور کویر از مکانی به مکان دیگر متغیر است و امکان افت سطح ایستابی آبخوان در تراز پایین‌تر از سطح آب شور کویر، در اثر برداشت بی‌رویه، وجود دارد. اهداف مورد نظر برای انجام این تحقیق عبارتند از: الف) بررسی حرکت گذرای گوه آب شور و ناحیه اختلاط در آبخوان‌های ساحلی، ب) بررسی شکل پیشروی سطح مشترک آب شور و شیرین و ناحیه اختلاط در آبخوان‌های مجاورت کویر، در شرایطی که سطح ایستابی آبخوان پایین‌تر از سطح آب شور کویر قرار می‌گیرد.

هجوم آب دریا به آبخوان‌های ساحلی، ذاتاً یک فرآیند گذرا است. اما محدودیت‌های بشری در برداشت و آنالیز نتایج آزمایشگاهی و عددی موجب شده که فرآیند گذرای این پدیده کمتر مورد توجه قرار گیرد. در این تحقیق، داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از فن پردازش تصویر و نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی‌های عددی توسط پیاده‌سازی الگوریتمی به‌صورت خودکار و بدون دخالت انسانی، برداشت و آنالیز شدند. نتایج برای گوه آب شور نشان دادند که: ۱) رفتار شاخص مساحت گوه به طور قابل‌ملاحظه‌ای با رفتار شاخص طول پنجه گوه در شرایط گذرا مشابه است. ۲) در وضعیت پیشروی گوه، شاخص ارتفاع گوه به‌مراتب زودتر از دو شاخص طول پنجه و مساحت گوه به شرایط دائمی می‌رسد، در صورتی که در هنگام بازگشت گوه هر سه شاخص به طور هم زمان متوقف می‌شوند. همچنین نتایج برای ناحیه اختلاط نشان داد که: ۱) در اوایل مرحله بازگشت گوه در اثر فرآیندهای شستشو و اختلاط، ضخامت ناحیه اختلاط افزایش می‌یابد. اما پس از گذشت مدت زمانی از شروع مرحله بازگشت گوه، فرآیند شستشو کاهش می‌یابد و سپس رفته‌رفته قطع می‌شود. در نتیجه نواحی رقیق به نواحی غلیظ ناحیه اختلاط نزدیک می‌شوند و ضخامت ناحیه اختلاط

مجدداً کاهش می‌یابد. ۲) سرعت پیشروی و بازگشت گوه آب شور تاثیری بر ضخامت ناحیه اختلاط در شرایط دائمی ندارد. اما هر چه سرعت برگشت گوه کمتر شود، از میزان افزایش ناحیه اختلاط که در ابتدای مرحله بازگشت رخ می‌دهد کاسته می‌شود.

نتایج مطالعات آزمایشگاهی و عددی انجام‌شده برای مسئله هجوم آب شور به آبخوان‌های مجاور کویر نشان دادند که: ۱) هر چه غلظت آب شور کویر افزایش یابد، سطح مشترک با شیب کمتری به سمت آبخوان حرکت می‌کند. ۲) فارغ از اینکه مقدار غلظت آب شور کویر چند است، هر چه از زمان آغاز فرآیند هجوم آب شور بگذرد، از شیب سطح مشترک کاسته می‌شود. ۳) بر خلاف آبخوان‌های ساحلی که پراکنده‌پذیری عرضی عمدتاً نقش موثرتری را نسبت به پراکنده‌پذیری طولی در گسترش ناحیه اختلاط دارد، در آبخوان مجاور کویر به علت سرعت بالاتر پیشروی سطح مشترک در راستای جریان، نسبت به آبخوان‌های ساحلی، پراکنده‌پذیری طولی تأثیر بیشتری بر توسعه ناحیه اختلاط نسبت به پراکنده‌پذیری عرضی دارد.

واژگان کلیدی: هجوم آب‌شور؛ آبخوان‌های ساحلی؛ آبخوان‌های مجاور کویر؛ گوه آب شور؛ ناحیه اختلاط؛ شیب سطح مشترک.

مقالات چاپ شده در مجلات علمی و پژوهشی:

- ۱- رضاپور، ع.، ساغروانی، س.ف. و احمدی فرد، ع. (۱۳۹۷). مطالعه پدیده هجوم آب شور به آبخوان های ساحلی در شرایط گذرا با استفاده از پردازش تصویر و مدل سازی عددی. مجله علمی و پژوهشی انجمن هیدرولیک ایران. دوره ۱۳، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۷. ص ۸۲-۶۹.
- ۲- رضاپور، ع. و ساغروانی، س.ف. (۱۳۹۷). بررسی عددی هجوم و برگشت آب دریا در آبخوان های ساحلی. دوره ۵، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۷، ص ۱۱۰۲-۱۰۹۱.

مقالات پذیرفته شده در کنفرانس های داخلی:

- ۱- رضاپور، ع.، ساغروانی، س.ف. (۱۳۹۵). بررسی عددی پیشروی آب شور در آبخوان های ساحلی در شرایط کاهش سطح ایستابی آبخوان. ششمین کنفرانس ملی مدیریت منابع آب ایران.
- ۲- رضاپور، ع.، ساغروانی، س.ف. (۱۳۹۵). اثر تغییر زاویه نفوذ دیوار آب بند بر کنترل هجوم آب شور در آبخوان های ساحلی. دومین کنفرانس علوم، مهندسی و فناوری های محیط زیست.

فهرست عنوان‌ها

فصل ۱ کلیات..... ۱

- ۱-۱ مقدمه..... ۲
- ۲-۱ بیان مسئله..... ۳
- ۳-۱ ضرورت و اهداف پژوهش..... ۴
- ۱-۳-۱ هجوم آب دریا به آبخوان‌های ساحلی..... ۴
- ۲-۳-۱ هجوم آب دریا به آبخوان‌های مجاور کویر..... ۵
- ۴-۱ سازمان‌بندی رساله..... ۶

فصل ۲ مفاهیم و مطالعات پیشین..... ۷

- ۱-۲ مقدمه..... ۸
- ۲-۲ روشهای ریاضی توسعه‌یافته جهت بررسی حرکت آب شور..... ۸
- ۳-۲ هجوم آب دریا به آبخوان‌های ساحلی..... ۱۰
- ۱-۳-۲ مفاهیم اولیه و تاریخچه..... ۱۰
- ۲-۳-۲ مطالعات آزمایشگاهی..... ۱۵
- ۳-۳-۲ مطالعات عددی..... ۲۳
- ۴-۲ هجوم آب شور به آبخوان‌های مجاور کویر..... ۲۵
- ۱-۴-۲ مفاهیم و تعاریف اولیه..... ۲۵
- ۲-۴-۲ مطالعات انجام‌گرفته در کشورهای توسعه‌یافته..... ۲۸
- ۳-۴-۲ مطالعات انجام‌گرفته در کشور ایران..... ۳۱

فصل ۳ مواد و روش‌ها..... ۳۵

- ۱-۳ مقدمه..... ۳۶
- ۲-۳ مدل آزمایشگاهی و تجهیزات آن..... ۳۶
- ۳-۳ اندازه‌گیری تخلخل و هدایت هیدرولیکی در آزمایشگاه..... ۳۹
- ۴-۳ مدل عددی سوترا..... ۴۲
- ۱-۴-۳ مدل میوز..... ۴۴
- ۵-۳ هجوم آب دریا به آبخوان‌های ساحلی..... ۴۵
- ۱-۵-۳ مطالعات انجام‌گرفته در مقیاس آزمایشگاهی..... ۴۶

۵۲	 ۲-۵-۳ مطالعات انجام شده در مقیاس میدانی
۵۴	 ۶-۳ هجوم آب شور به آبخوان‌های مجاور کویر
۵۶	 ۱-۶-۳ روش انجام آزمایش‌ها در آزمایشگاه
۵۹	 ۲-۶-۳ شبیه‌سازی عددی

فصل ۴ نتایج و بحث..... ۶۱

۶۲	 ۱-۴ مقدمه
۶۲	 ۲-۴ هجوم آب دریا به آبخوان‌های ساحلی در شرایط گذرا
۶۲	 ۱-۲-۴ رفتار گوه آب شور
۷۲	 ۲-۲-۴ رفتار ناحیه اختلاط
۷۸	 ۳-۴ هجوم آب شور به آبخوان‌های مجاور کویر
۷۸	 ۱-۳-۴ نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی و عددی در مقیاس آزمایشگاه
۹۲	 ۲-۳-۴ نتایج آزمون‌های عددی در مقیاس میدانی

فصل ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادها..... ۱۰۱

۱۰۲	 ۱-۵ مقدمه
۱۰۲	 ۲-۵ هجوم آب دریا به آبخوان‌های ساحلی در شرایط گذرا
۱۰۲	 ۱-۲-۵ نتیجه‌گیری
۱۰۳	 ۲-۲-۵ پیشنهادهای آتی
۱۰۴	 ۳-۵ هجوم آب شور به آبخوان‌های مجاور کویر
۱۰۴	 ۱-۳-۵ نتیجه‌گیری
۱۰۵	 ۲-۳-۵ پیشنهادهای آتی

منابع..... ۱۰۶

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ چگونگی توزیع منابع آب در کره زمین ۲
- شکل ۱-۲ مدل مفهومی هجوم آب دریا به آبخوان‌های ساحلی ۱۱
- شکل ۲-۲ هجوم آب دریا در مدل گین-هرزبرگ ۱۱
- شکل ۳-۲ (الف) میدان هندسی و شرایط مرزی مسئله هنری (ب) نتایج حل تحلیلی مسئله هنری ۱۴
- شکل ۴-۲ شماتیکی از مدل آزمایشگاهی گاسوامی و کلمنت (۲۰۰۷) ۱۶
- شکل ۵-۲ تصاویری آزمایشگاهی پیشروی و بازگشت گوه آب شور در تحقیق گاسوامی و کلمنت (۲۰۰۷) ۱۷
- شکل ۶-۲ شماتیکی از مدل آزمایشگاهی چانگ و کلمنت (۲۰۱۲) ۱۸
- شکل ۷-۲ نتیجه به‌دست آمده برای پنجه گوه در اثر کاهش و افزایش یکسان شار جریان (چانگ و کلمنت، ۲۰۱۲) ۱۸
- شکل ۸-۲ تصاویر پیشروی و بازگشت گوه آب شور در اثر تغییرات یکسان شار جریان آب شیرین (چانگ و کلمنت، ۲۰۱۲) ۱۸
- شکل ۹-۲ (الف) ناحیه اختلاط شناسایی شده توسط روش رنگ سنجی (ب) ناحیه اختلاط شبیه‌سازی شده توسط مدل عددی سوترا در تحقیق آبارکا و کلمنت (۲۰۰۹) ۲۰
- شکل ۱۰-۲ تصاویر آزمایشگاهی شکل‌گیری ناحیه اختلاط در شرایط دائمی در تحقیق لو و همکاران (۲۰۱۳) ۲۱
- شکل ۱۱-۲ نتایج شبیه‌سازی عددی در شرایط دائمی در تحقیق لو و همکاران (۲۰۱۳) ۲۱
- شکل ۱۲-۲ فرآیند اندازه‌گیری پارامترهای هجوم آب شور برای یک تصویر مشخص (رابینسون و همکاران ۲۰۱۵) ۲۳
- شکل ۱۳-۲ شماتیکی از یک مدل مفهومی عمومی جهت نمایش الگوهای جریان شکل‌گرفته در لایه‌های زیرین پلایا و آبخوان مجاور ۲۷

- شکل ۲-۱۴ شماتیکی از مدل مفهومی و الگوهای جریان شکل گرفته در آبخوان مجاور کویر در شرایطی که سطح ایستابی آبخوان پایین تر از آب شور کویر قرار می گیرد. ۲۸
- شکل ۲-۱۵ جریان های آب شور و شیرین در زیر و مجاور دریاچه نمک در مدل مفهومی هولزیچر (۲۰۰۵) ۳۰
- شکل ۳-۱ تصاویری از روند ساخت فلوم آزمایشگاهی (مخزن جریان) در آزمایشگاه. ۳۸
- شکل ۳-۲ شماتیکی از مدل آزمایشگاهی درون اتاقک تاریک و تجهیزات بکار رفته در آن. ۳۹
- شکل ۳-۳ تصویر اتاقک تاریک ساخته شده در آزمایشگاه، فلوم ماسه ای درون اتاقک قرار گرفته است. ۳۹
- شکل ۳-۴ تصاویری از روند اندازه گیری تخلخل دانه های شیشه ای در آزمایشگاه ۴۰
- شکل ۳-۵ پیشروی آب شیرین قرمز رنگ درون محیط متخلخل جهت اندازه گیری هدایت هیدرولیکی ۴۲
- شکل ۳-۶ نمودار مرجع برای تعریف پارامترهای محاسبه شده ی هجوم آب دریا به آبخوان های ساحلی. ۴۵
- شکل ۳-۷ تصویر دیجیتالی از نحوه متراکم کردن دانه های شیشه ای درون محفظه مرکزی ۴۶
- شکل ۳-۸ مراحل انجام پیش پردازش روی تصاویر آزمایشگاه ۴۸
- شکل ۳-۹ نحوه استخراج پارامترهای مورد نظر در فرآیند پردازش تصاویر: الف) شناسایی مرزهای گوه در دستگاه رنگ HSI، ب) نمودار افکنش عمودی گوه، ج) نمودار افکنش افقی گوه، د) تغییرات پروفایل کانال سبز تصویر ۵۰
- شکل ۳-۱۰ هندسه میدان محاسباتی مدل عددی و نحوه اعمال شرایط مرزی به آن. ۵۰
- شکل ۳-۱۱ شماتیکی از مدل مفهومی مسئله مبنا در مقیاس میدانی به همراه نمایشی از پارامترهای اندازه گیری شده برای گوه آب شور و ناحیه اختلاط ۵۲
- شکل ۳-۱۲ نمودار مرجع برای تعریف پارامترهای هجوم آب شور به آبخوان مجاور کویر ۵۵
- شکل ۴-۱ تصاویری از حرکت گوه آب شور در مدل فیزیکی : الف) مرحله پیشروی گوه، ب) مرحله بازگشت گوه. ۶۴
- شکل ۴-۲ نتایج شبیه سازی عددی حرکت آب شور در شرایط گذرا: الف) مرحله پیشروی گوه ب) مرحله بازگشت گوه. ۶۴

- شکل ۳-۴ رفتار گذرای شاخص‌های گوه آب شور در مرحله پیشروی (شاخه صعودی) و مرحله بازگشت (شاخه نزولی): الف) طول پنجه گوه، ب) مساحت گوه، ج) ارتفاع گوه. ۶۵
- شکل ۴-۴ تغییرات نسبی شاخص‌های گوه آب شور نسبت به زمان: الف) مرحله پیشروی گوه آب شور ب) مرحله بازگشت. ۶۷
- شکل ۵-۴ تغییرات شاخص‌های انتخابی گوه آب شور نسبت به زمان در مقیاس آزمایشگاه. ۶۸
- شکل ۶-۴ مقایسه رفتار گذرای پنجه، ارتفاع و مساحت گوه آب شور در اثر کاهش و افزایش آبی ارتفاع آب شیرین. ۷۰
- شکل ۷-۴ مقایسه رفتار گذرای پنجه، ارتفاع و مساحت گوه آب شور در اثر کاهش و افزایش ارتفاع مرزی آب شیرین با نرخ ۱۰ میلیمتر در سال. ۷۰
- شکل ۸-۴ مقایسه رفتار گذرای پنجه، ارتفاع و مساحت گوه آب شور در اثر کاهش و افزایش ارتفاع مرزی آب شیرین با نرخ ۱۰ میلیمتر در سال. ۷۱
- شکل ۹-۴ رفتار گذرای ناحیه اختلاط در امتداد سطح مشترک در مدت زمان پیشروی (فاصله زمانی ۰ تا ۱۸۰ دقیقه) و در مدت زمان بازگشت (فاصله زمانی ۱۸۰ تا ۱۵۰ دقیقه)، در مدل فیزیکی. ۷۳
- شکل ۱۰-۴ نتایج شبیه‌سازی عددی ناحیه اختلاط در امتداد سطح مشترک در طول زمان در مقیاس آزمایشگاهی. ۷۳
- شکل ۱۱-۴ نتایج شبیه‌سازی عددی ناحیه اختلاط در امتداد سطح مشترک در شرایط گذرا برای مسئله مبنا. ۷۵
- شکل ۱۲-۴ شماتیکی از نحوه گسترش ناحیه اختلاط در مرحله بازگشت گوه. ۷۶
- شکل ۱۳-۴ تغییرات افقی لایه‌های انتخاب شده برای ناحیه اختلاط، بر روی بستر آبخوان در شرایط گذرا (مسئله مبنا). ۷۶
- شکل ۱۴-۴ حساسیت ناحیه اختلاط به سرعت تغییر ارتفاع آب شیرین مرزی در مرحله پیشروی و بازگشت. ۷۷
- شکل ۱۵-۴ حساسیت ناحیه اختلاط به ترکیب‌های مختلف پراکنده‌پذیری طولی و عرضی. ۷۸
- شکل ۱۶-۴ تصاویری پیشروی آب شور در مدل فیزیکی به همراه نتایج شبیه‌سازی عددی در غلظت ۵ گرم بر لیتر. ۸۰

- شکل ۴-۱۷ تصاویری پیشروی آب شور در مدل فیزیکی به همراه نتایج شبیه‌سازی عددی در غلظت ۱۵ گرم بر لیتر. ۸۱
- شکل ۴-۱۸ تصاویری پیشروی آب شور در مدل فیزیکی به همراه نتایج شبیه‌سازی عددی در غلظت ۲۵ گرم بر لیتر. ۸۲
- شکل ۴-۱۹ تصاویری پیشروی آب شور در مدل فیزیکی به همراه نتایج شبیه‌سازی عددی در غلظت ۳۵ گرم بر لیتر. ۸۳
- شکل ۴-۲۰ تغییرات زاویه هجوم نسبت به زمان در غلظت‌های مختلف آب شور. ۸۴
- شکل ۴-۲۱ شماتیکی از وقوع پدیده انتقال آزاد هنگام پیشروی آب شور به آبخوان مجاور کویر. ۸۶
- شکل ۴-۲۲ موقعیت شاخص‌های پنجه و راس سطح مشترک نسبت به زمان در غلظت‌های مختلف آب شور، (الف) شاخص پنجه سطح مشترک (ب) شاخص راس سطح مشترک. ۸۷
- شکل ۴-۲۳ مقایسه توسعه ناحیه اختلاط در مدل فیزیکی و مدل عددی، پس از گذشت ۲۰ دقیقه از شروع فرآیند هجوم، (الف) غلظت آب شور ۵ گرم بر لیتر است، (ب) غلظت آب شور ۲۵ گرم بر لیتر است. ۹۰
- شکل ۴-۲۴ تغییرات ضخامت متوسط ناحیه اختلاط در شرایط گذرا در مدل فیزیکی. ۹۱
- شکل ۴-۲۵ نتایج شبیه‌سازی عددی ضخامت متوسط ناحیه اختلاط در شرایط گذرا. ۹۱
- شکل ۴-۲۶ پیشروی نهایی گوه آب شور در غلظت‌ها مختلف با شرایط مرزی $hf = 32m$ و $hs = 30m$ ۹۳
- شکل ۴-۲۷ پیشروی نهایی گوه آب شور در غلظت‌ها مختلف با شرایط مرزی $hf = 31m$ و $hs = 30m$ ۹۴
- شکل ۴-۲۸ رفتار گذرای سطح مشترک برای غلظت آب شور ۵ گرم بر لیتر. ۹۵
- شکل ۴-۲۹ رفتار گذرای سطح مشترک برای غلظت آب شور ۱۵ گرم بر لیتر. ۹۶
- شکل ۴-۳۰ رفتار گذرای سطح مشترک برای غلظت آب شور ۲۵ گرم بر لیتر. ۹۷
- شکل ۴-۳۱ رفتار گذرای سطح مشترک برای غلظت آب شور ۳۵ گرم بر لیتر. ۹۸
- شکل ۴-۳۲ تغییرات زاویه هجوم نسبت به زمان در غلظت‌های مختلف آب شور (مقیاس میدانی). ۹۹
- شکل ۴-۳۳ موقعیت شاخص‌های پنجه سطح مشترک نسبت به زمان در غلظت‌های مختلف آب شور (مقیاس میدانی). ۹۹

شکل ۴-۳۴ موقعیت شاخص‌های راس سطح مشترک نسبت به زمان در غلظت‌های مختلف آب شور (مقیاس

میدانی). ۹۹.....

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۲ تعدادی از مطالعات آزمایشگاهی انجام‌شده جهت بررسی اثر عوامل مختلف بر حرکت گوه آب

شور ۱۵

جدول ۱-۳ خلاصه‌ای از پارامترهای به‌کار رفته در مدل عددی سوترا ۵۱

جدول ۲-۳ خلاصه‌ای از پارامترهای تعریف شده در مسئله مبنا ۵۳

جدول ۳-۳ مشخصات کیفی آب‌های شور در نظر گرفته شده برای پلایاها ۵۵

جدول ۴-۳ خلاصه‌ای از پارامترهای به‌کار رفته در مدل عددی سوترا برای شبیه‌سازی آزمون‌های

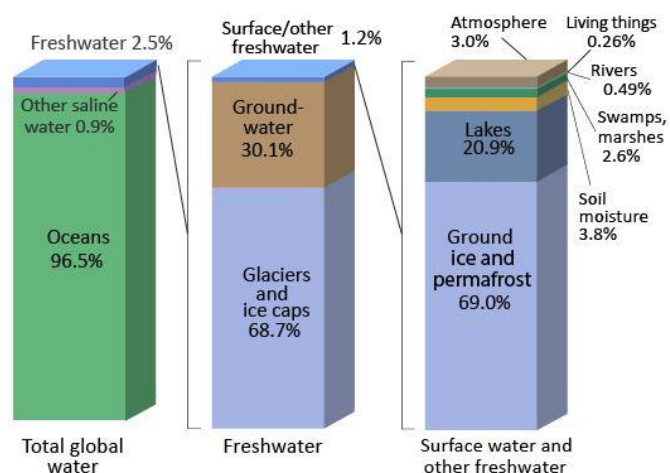
آزمایشگاهی ۶۰

جدول ۱-۴ اندازه شاخص M برای غلظت‌های مختلف و شیب هیدرولیک در این تحقیق ۸۸

فصل ۱ کلیات

۱-۱ مقدمه

حدود ۹۶/۵ درصد از کل منابع آب جهان را اقیانوس‌ها و دریاها و حدود ۱ درصد از آن را سایر آب‌های شور سطحی یا زیرسطحی تشکیل می‌دهند. استفاده از این حجم زیاد منابع آب، به علت شوری بالا در شرایط عادی امکان‌پذیر نیست. حدود ۲/۵ درصد از کل منابع آب موجود در جهان را آب‌های شیرین تشکیل می‌دهند، با این وجود بیشتر آن‌ها به صورت جامد (حدود ۶۸/۷ درصد) در یخچال‌های قطبی و قله کوه‌ها تجمع دارند و امکان استفاده از آن‌ها در حال حاضر میسر نیست. از کل آب‌های شیرین موجود در کره زمین، حدود ۳۰/۱ درصد آن را سفره‌های آب زیرزمینی و در حدود ۱/۲ درصد آن را آب‌های سطحی یا سایر آب‌های شیرین موجود در طبیعت تشکیل می‌دهند (Shiklomanov, 1998). شکل ۱-۱ شماتیکی از نحوه توزیع منابع آب را در کره زمین نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱ چگونگی توزیع منابع آب در کره زمین (Shiklomanov, 1998)

اگر چه سهم آب‌های زیرزمینی نسبت به کل آب‌های موجود در جهان ناچیز است (حدود ۰/۷۶ درصد) ولی می‌توان از آن به عنوان مهم‌ترین منبع تأمین آب شیرین در اکثر نقاط جهان نام برد. آب‌های زیرزمینی ذخایر طبیعی ارزشمندی هستند که در برابر تبخیر سطحی محافظت شده‌اند. همچنین این منابع برخلاف منابع سطحی که متمرکز هستند و فقط می‌توانند آب مورد نیاز محدوده نزدیک به خود را تأمین کنند، آنها منابع توزیع‌شده‌ای هستند که می‌توانند به جمعیت پراکنده‌شده‌ای در نواحی بزرگ‌تر خدمت رسانی کنند

(Wheater et al., 2010). یکی از عمده‌ترین عوامل آلوده‌کننده سفره‌های آب زیرزمینی، هجوم آب شور^۱ به این سفره‌ها است. بنابراین شناخت مناسب از نحوه شکل‌گیری و چگونگی گسترش این پدیده، می‌تواند نقش موثری بر مدیریت سفره‌های آب زیرزمینی شیرین چه در نواحی ساحلی و چه در نواحی خشک داشته باشد.

۱-۲ بیان مسئله

سفره‌های آب زیرزمینی منبع اصلی تأمین آب شیرین در اغلب مناطق جهان هستند. این منابع در نواحی ساحلی در معرض هجوم آب شور دریاها و در نواحی خشک و نیمه‌خشک در معرض هجوم آب شور کویرها (پلایاها) قرار دارند (Wheater et al., 2010; Bear and Cheng, 2010). در آبخوان‌های ساحلی غلظت آب دریا مشخص و حدود ۳۵ گرم بر لیتر است. در این آبخوان‌ها، معمولاً سطح ایستابی آبخوان بالاتر از سطح آب دریا قرار دارد، در نتیجه جریان عمومی از سمت آبخوان به سمت دریا سرازیر است (Bear and Cheng, 2010). در این شرایط آب دریا به علت چگالی بیشتر نسبت به آب زیرزمینی، از عمق به سمت آبخوان هجوم می‌آورد و یک شکل گوه‌مانندی را در آبخوان ایجاد می‌کند (Bear and Cheng, 2010; Chang and Clement, 2012). در سطح فوقانی گوه آب شور^۲ که در تماس با سطح آب شیرین است، به علت اثرات پراکندگی مکانیکی^۳ و پخشیدگی مولکولی^۴ ماده محلول، ناحیه بینابینی یا ناحیه اختلاط^۵ توسعه می‌یابد (Bear and Cheng, 2010).

بر خلاف آبخوان‌های ساحلی که در آن‌ها غلظت آب شور هجوم آورنده (آب دریا) تقریباً ثابت و مشخص است، غلظت آب شور کویرها بسته به موقعیت جغرافیایی، فرایندهای هیدرولوژیکی و مشخصات فیزیکی و شیمیایی لایه‌های خاک آن می‌تواند از مکانی به مکانی دیگر متغیر باشد. از طرفی در آبخوان‌های مجاور کویر، در اثر برداشت بی‌رویه از آبخوان می‌تواند شرایطی ایجاد شود که در آن سطح ایستابی آبخوان در تراز پایین‌تر از سطح آب شور کویر قرار گیرد. در این وضعیت، شرایط مرزی این آبخوان‌ها با شرایط مرزی آبخوان

¹ Saltwater intrusion

² Saltwater wedge

³ Mechanical dispersion

⁴ Molecular diffusion

⁵ Mixing zone

ساحلی متفاوت می‌شود. در نتیجه هجوم آب شور به سمت آبخوان مجاور کویر علاوه بر عامل اختلاف چگالی، ناشی از شیب هیدرولیکی معکوس شده نیز خواهد بود. با توجه به موارد فوق انتظار می‌رود که شکل پیشروی آب شور و چگونگی توسعه ناحیه اختلاط در آبخوان‌های مجاور کویر متفاوت از آبخوان‌های ساحلی باشد.

با عنایت به اهمیت منابع آب شیرین زیرزمینی برای حیات بشر و انجام فعالیت‌های صنعتی، کشاورزی و اجتماعی، در این پژوهش هم به مسئله هجوم آب دریا^۱ به آبخوان‌های ساحلی و هم به پدیده هجوم آب شور به آبخوان‌های مجاور کویر پرداخته می‌شود.

۱-۳ ضرورت و اهداف پژوهش

۱-۳-۱ هجوم آب دریا به آبخوان‌های ساحلی

هجوم آب دریا به آبخوان ساحلی یک مشکل جدی زیست‌محیطی است، چرا که حدود ۸۰ درصد از جمعیت جهان در امتداد خط ساحلی زندگی می‌کنند و آب مورد نیاز اغلب آنها از آبخوان‌های ساحلی تأمین می‌شود (Chang et al., 2011). امروزه رشد جمعیت از یک سو و برداشت بی‌رویه از آبخوان‌های ساحلی برای مصارف گوناگون صنعت و کشاورزی از سوی دیگر، سبب گسترش پدیده تداخل آب شور و شیرین در این آبخوان‌ها شده است. به‌عنوان مثال، مطالعات اخیر سازمان زمین‌شناسی آمریکا^۲، در سال ۲۰۱۱ میلادی نشان می‌دهد که آب شور دریاها در حدود ۴۶۰ مایل مربع از سرزمین‌های اصلی این کشور را در بر گرفته است (Prinos et al., 2014). پدیده هجوم آب دریا در بسیاری از آبخوان‌های ساحلی جهان، از جمله در آبخوان‌های ساحلی ایران نیز گزارش شده است. برای کاهش تبعات اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی این پدیده، لازم است شناخت مناسبی از فرآیند وقوع و گسترش این پدیده ایجاد شود.

اگر چه تا کنون تحقیقات متعددی بر روی مسئله هجوم آب دریا انجام شده و در این زمینه دستاوردهای ارزشمندی به‌دست آمده است، ولی هنوز شکاف‌های علمی در شناسایی و درک این پدیده در شرایط گذرا

^۱ Seawater intrusion

^۲ U.S. Geological Survey (USGS)

وجود دارد (Werner et al., 2013). اغلب تحقیقات قبلی به دلیل محدودیت‌های انسانی در برداشت نتایج آزمایشگاهی و عددی، یا شرایط دائمی مسئله هجوم آب دریا را بررسی کرده‌اند یا جهت بررسی این پدیده در شرایط گذرا، فقط به اندازه‌گیری طول پیشروی پنجه گوه در زمان‌های مشخص و محدود بسنده کرده‌اند. این در حالی است که هجوم آب دریا ذاتاً فرآیندی گذرا است (Werner, 2017) و مطالعات نشان می‌دهد که پیشروی آب دریا می‌تواند سال‌ها، ده‌ها و حتی قرن‌ها به طول بینجامد. بنابراین اولین هدف این تحقیق، شناسایی و بررسی رفتار گوه آب شور و ناحیه اختلاط در شرایط گذرا است. برای رسیدن به این هدف، مطالعاتی به‌صورت آزمایشگاهی و عددی انجام گرفت.

۱-۳-۲ هجوم آب دریا به آبخوان‌های مجاور کویر

در حال حاضر اکثر منابع آب سرتاسر جهان با چالش‌های بی‌سابقه‌ای روبرو هستند، اما بیشتر این چالش‌ها در نواحی خشک و نیمه‌خشک جهان متمرکزند. در نواحی خشک و نیمه‌خشک، میزان بارش نسبت به پتانسیل تبخیر کمتر است. از این‌رو این نواحی در معرض کمبود شدید آب قرار دارند و آب‌های زیرزمینی منبع اصلی تأمین آب در آنها به شمار می‌رود (Wheater et al., 2010). کشور ایران نیز به دلیل داشتن آب و هوای خشک و نیمه‌خشک، از یک طرف به شدت وابسته به منابع آب زیرزمینی است و از طرفی دیگر اکثر این منابع در مجاور آب‌های شور کویر قرار گرفته‌اند. احداث چاه‌های پمپاژ و عدم مدیریت صحیح آنها، موجب اختلاط آب شور و شیرین در بسیاری از آبخوان‌های کویری کشور شده است. از این‌رو شناسایی شکل پیشروی آب شور در آبخوان‌های مجاور کویر برای مدیریت هرچه بهتر این آبخوان‌ها ضروری است. نکته قابل‌توجه که بر ضرورت انجام این تحقیق می‌افزاید این است که تا کنون مطالعه علمی دقیقی که بتواند شکل پیشروی آب شور را در آبخوان‌های مجاور کویر توصیف کند انجام نشده است. از جایی که کشورهای توسعه‌یافته کمتر با مسئله هجوم آب شور به آبخوان‌های مجاور کویر روبرو بوده‌اند، تحقیقات کمی از طرف محققین آنها در این زمینه انجام شده است. در کشور ایران نیز اکثر مطالعات انجام‌شده، تنها به بررسی وقوع یا عدم وقوع پدیده هجوم آب شور در یک آبخوان خاص تمرکز داشته‌اند، به‌طوری که خلاء علمی در این زمینه کاملاً مشهود است. بنابراین دومین هدف این تحقیق، شناسایی و بررسی شکل پیشروی آب

شور در آبخوان‌های مجاور کویر، در شرایطی که سطح ایستابی آبخوان پایین‌تر از سطح آب شور کویر قرار می‌گیرد، است. انتظار می‌رود که نتایج به‌دست آمده از مطالعات آزمایشگاهی و عددی این تحقیق بتواند به درک بهتر فرآیند هجوم آب شور به آبخوان‌های مجاور کویر کمک کند.

۴-۱ سازمان‌بندی رساله

رساله حاضر در پنج فصل تدوین شده است که شامل:

فصل اول: کلیات

در این فصل بیان مسئله، ضرورت انجام تحقیق و اهداف مطالعه تشریح شده است.

فصل دوم: مفاهیم و مطالعات پیشین

در این فصل برای هر یک از موضوعات مورد بحث این تحقیق (مسئله هجوم آب دریا به آبخوان ساحلی و مسئله هجوم آب شور به آبخوان مجاور کویر) ابتدا مفاهیم و تعاریف اولیه مرتبط با آن موضوع بیان می‌شود. سپس مطالعات قبلی نزدیک به اهداف این تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد.

فصل سوم مواد و روش‌ها:

در ابتدای این فصل، توضیحاتی در مورد نحوه ساخت مدل آزمایشگاهی، تجهیزات به‌کاررفته در مدل آزمایشگاهی و مدل عددی سوترا^۱ بیان می‌گردد. در ادامه فصل، نحوه انجام آزمون‌های آزمایشگاهی، نحوه استخراج نتایج آزمایشگاهی و چگونگی شبیه‌سازی عددی آزمایش‌ها تشریح می‌گردد.

فصل چهارم: نتایج و بحث

در این فصل ضمن ارائه نتایج آزمایشگاهی و عددی به‌دست آمده برای هر یک از اهداف این تحقیق، این نتایج به طور مفصل تفسیر و تحلیل می‌شوند.

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این فصل نتایج اصلی تحقیق حاضر بیان می‌گردد و پیشنهادهایی برای انجام مطالعات آتی ارائه می‌شود.

¹ SUTRA (Saturated-Unsaturated-Transport)

فصل ۲ مفاهیم و مطالعات پیشین

۲-۱ مقدمه

به طور کلی منابع آلودگی آب‌های زیرزمینی به دو دسته منابع آلودگی طبیعی و منابع آلودگی انسانی تقسیم‌بندی می‌شوند. منابع آلودگی طبیعی منابعی هستند که بدون دخالت بشر در طبیعت وجود دارند ولی منابع آلودگی انسانی منابعی هستند که به طور مستقیم یا غیرمستقیم به انسان و فعالیت‌های او وابسته است (محمودیان شوشتری، ۱۳۹۲). آب شور از معروف‌ترین منابع آلودگی طبیعی است که آبخوان‌های متعددی را در سرتاسر جهان تهدید کرده و یا در آینده‌ای نزدیک تهدید می‌کند.

در این فصل ابتدا روش‌های ریاضی توسعه‌یافته جهت بررسی حرکت آب شور در محیط‌های متخلخل بیان می‌شوند. سپس به مسئله هجوم آب دریا به عنوان اولین موضوع مورد بحث این تحقیق پرداخته می‌شود. در همین راستا ابتدا مفاهیم اولیه و تاریخچه تحقیقات انجام‌شده روی پدیده هجوم آب دریا مرور می‌گردد. سپس تعدادی از مطالعات آزمایشگاهی و عددی قبلی که نزدیک به موضوع تحقیق حاضر است بررسی می‌شوند تا نوآوری تحقیق حاضر بهتر نمایان شود. در ادامه این فصل به دومین بحث تحقیق حاضر یعنی مسئله هجوم آب شور به آبخوان‌های مجاور کویر پرداخته می‌شود. بنابراین ابتدا توضیحاتی در خصوص منابع شوری در نواحی خشک و علل شکل‌گیری آنها بیان می‌شود. سرانجام سابقه تحقیقات انجام‌شده روی مسئله هجوم آب شور به آبخوان‌های مجاور کویر بررسی و خلاء علمی موجود در این زمینه بیان می‌گردد.

۲-۲ روش‌های ریاضی توسعه‌یافته جهت بررسی حرکت آب شور

آب شور از معمول‌ترین آلاینده‌های آب‌های زیرزمینی شیرین است. مواد آلاینده بر اساس نحوه انتقال آنها در سفره آب زیرزمینی به دو گروه آلاینده‌های مایع امتزاج‌پذیر (مخلوط شدنی) و آلاینده‌های مایع امتزاج‌ناپذیر (مخلوط نشدنی) تقسیم‌بندی می‌شوند. آلاینده‌های مایع امتزاج‌پذیر موادی هستند که در آب حل می‌شوند و می‌توانند توسط فرآیندهای همرفتی^۱ (انتقالی)، پخشیدگی مولکول^۲ و پراکندگی مکانیکی^۳ در سفره آب-

^۱ Advection

^۲ Molecular diffusion

^۳ Mechanical dispersion

زیرزمینی جابجا و پخش شوند. اما آلاینده‌های مایع امتزاج‌ناپذیر ($NAPL_s^1$) در آب حل و یا مخلوط نمی‌شوند، از این رو به صورت یک فاز مجزا در محیط دیده می‌شوند (محمودیان شوشتری، ۱۳۹۲). بر همین اساس دو دیدگاه یا دو روش برای آنالیز هجوم آب شور در محیط‌های متخلخل توسعه یافته است. این دو روش عبارت‌اند از: الف) روش سطح مشترک- قاطع^۲، ب) روش سطح مشترک- پراکندگی^۳ یا روش چگالی متغیر^۴. در روش سطح مشترک- قاطع آب شور و شیرین را دو سیال امتزاج‌ناپذیر فرض می‌کنند (هرچند در واقعیت این دو سیال امتزاج‌پذیر هستند)، بنابراین در این روش از ناحیه انتقالی^۵ یا ناحیه اختلاط^۶ صرف‌نظر شده و آب شور و شیرین توسط یک مرز بی‌نهایت کوچک از هم مجزا می‌شوند. این روش، روشی کارآمد برای پیش‌بینی اولیه هجوم آب شور است و معمولاً برای حل‌های تحلیلی مسئله و در شرایط دائمی بکار می‌رود (Watson et al., 2010; Bear and Cheng, 2010; Mehdizadeh et al., 2014). مبانی این روش در کتاب‌های تالیف‌شده توسط بیر (Bear, 1972) و بیر و چانگ (Bear and Chang, 2010) آمده است و از آن در مطالعات بسیاری از محققین، از جمله استراک (Strack, 1976)، داگان و زیتون (Dagan and Zeitoun, 1998) و باکر (Bakker, 1998 and 2006). استفاده شده است. در روش چگالی- متغیر، آب شور و شیرین را دو سیال امتزاج‌پذیر در نظر می‌گیرند، بنابراین این روش نسبت به روش سطح مشترک- قاطع دقیق‌تر است چرا که در آن امکان شبیه‌سازی ناحیه اختلاط وجود دارد. در این روش معادلات حاکم بر اندرکنش آب شور و شیرین (معادلات جریان آب زیرزمینی و معادلات انتقال ماده محلول) به طور هم‌زمان حل می‌شوند. حل معادلات در این روش عمدتاً توسط روش‌های عددی انجام می‌گیرد، در نتیجه پیچیدگی محاسباتی و زمان حل بیشتری نسبت به روش سطح مشترک- قاطع دارند. معادلات جریان آب زیرزمینی و انتقال ماده محلول بکار رفته در مدل سوترا (مدل عددی استفاده‌شده در این تحقیق) در بخش ۳-۴، ارائه شده است.

¹ Nonaqueous phase liquid contaminations

² Sharp-interface method

³ Dispersive-interface method

⁴ Variable-density method

⁵ Transition zone

⁶ Mixing zone

۲-۳ هجوم آب دریا به آبخوان‌های ساحلی

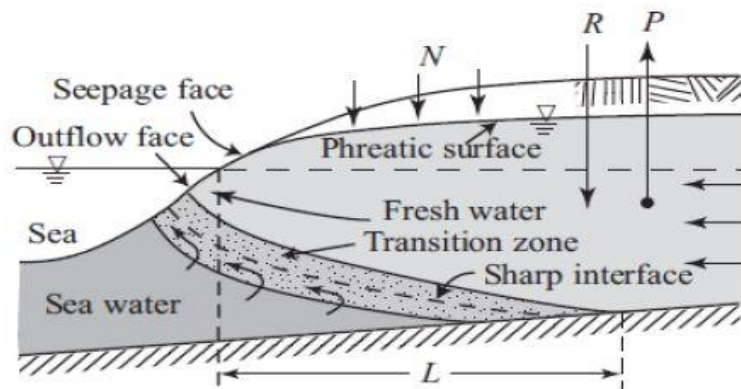
۲-۳-۱ مفاهیم اولیه و تاریخچه

به طور معمول در آبخوان‌های ساحلی شرایط به گونه‌ای است که سطح ایستابی آبخوان در تراز بالتر از سطح آب دریا قرار دارد، بنابراین جریان طبیعی از سمت آبخوان به سمت دریا برقرار است. در این شرایط آب شور دریا، طی فرآیندی طبیعی و به علت چگالی بیشتر نسبت به آب زیرزمینی به سمت آبخوان هجوم می‌آورد و یک گوه آب شور را در عمق آبخوان ایجاد می‌کند (شکل ۲-۱). پیشروی گوه آب شور با کاهش شیب هیدرولیکی آبخوان که عمدتاً نتیجه استخراج آب زیرزمینی است تشدید می‌شود و از حجم آب شیرین آبخوان می‌کاهد (Kuan et al., 2012; Chang and Clement, 2012). از آنجا که آب شور آلاینده‌ای امتزاج‌پذیر است، ضمن پیشروی آب دریا به درون آبخوان در سطح مشترک آب شور و شیرین^۱ ناحیه انتقالی یا ناحیه اختلاط شکل می‌گیرد. ناحیه اختلاط در درجه اول، ناشی از اثرات پراکندگی مکانیکی و پخشیدگی مولکولی ماده محلول (نمک) است. هرچند که عوامل دیگری مثل، اختلاف چگالی بین آب دریا و آب زیرزمینی، ابعاد هندسی آبخوان، ناهمگنی در ساختار زمین‌شناختی، نیروهای موج و جذر و مدی، بالا آمدگی تراز دریا^۲ و عملیات پمپاژ می‌توانند بر آن موثر باشند. ناحیه اختلاط مشخصه مهم آبخوان‌های ساحلی است که چگالی سیال در سرتاسر عرض آن، از چگالی آب شور دریا تا چگالی آب شیرین آبخوان تغییر می‌کند. از این‌رو این ناحیه نقش مهمی در چرخش آب‌های شور درون گوه و انتقال نمک به سمت خروجی جریان آب شیرین بر روی مرز دریا دارد (Werner et al., 2013). بررسی‌های میدانی نشان می‌دهد که ناحیه اختلاط می‌تواند از چندین متر تا چند کیلومتر در آبخوان ساحلی گسترش یابد (Barlow, 2003; Cherry, 2007). از جایی که اختلاط مقدار حجم ناچیزی از آب دریا با آب شیرین (حتی حدود ۰.۱٪) موجب از بین رفتن کیفیت آب برای نوشیدن می‌شود، ناحیه اختلاط منطقه‌ای با اهمیت در آبخوان‌های ساحلی محسوب می‌شود (Abarca and Clement, 2009). بنابراین علاوه بر درک حرکت گوه آب‌شور، شناخت مناسب از هیدرودینامیک ناحیه اختلاط می‌تواند نقش موثری بر بهبود مدیریت منابع آب‌های زیرزمینی ساحلی داشته

^۱ Saltwater-Freshwater Interface

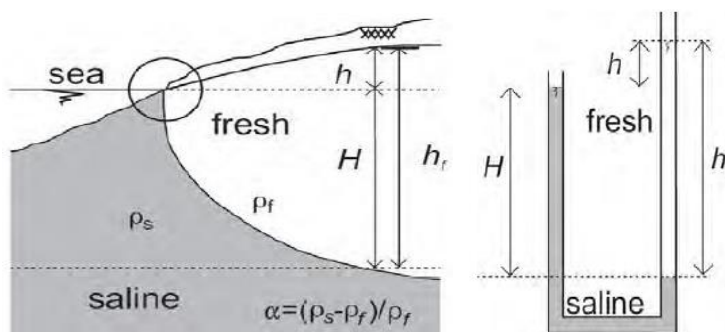
^۲ Sea-level Rise

باشد. شکل ۱-۲ سامانه واقعی اندرکنش آب شور و شیرین را در آبخوان ساحلی نشان داده شده است.



شکل ۱-۲ مدل مفهومی هجوم آب دریا به آبخوان‌های ساحلی (Bear and Cheng, 2010).

مسئله هجوم آب دریا از قدیم مورد توجه پژوهشگران بوده است به‌طوری‌که از اواخر قرن ۱۹ میلادی محققین بسیاری بر این موضوع تمرکز داشته‌اند. مدل اولیه هجوم آب دریا به طور جداگانه توسط گی‌بن^۱ در سال ۱۸۸۹ میلادی و هرزبرگ^۲ در سال ۱۹۰۱ میلادی ارائه شد. از آن پس، این مدل ساده به‌عنوان رابطه گی‌بن-هرزبرگ شناخته می‌شود. مبنای این مدل، فرض تعادل هیدرواستاتیکی بین آب شور و شیرین در یک لوله U شکل است (Freeze and Cherry, 1979). در شکل ۲-۲ شماتیکی از مدل گی‌بن-هرزبرگ ارائه شده است.



شکل ۲-۲ هجوم آب دریا در مدل گی‌بن-هرزبرگ (Bertorelle, 2014).

^۱ Gheyben

^۲ Herzberg

در مدل گی-بن-هرزبرگ موقعیت سطح مشترک آب شور و شیرین برای هر نقطه بافاصله مشخص از مرز ساحلی طبق رابطه‌ی (۱-۲) محاسبه می‌شود.

$$H = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} \cdot h \quad (۱-۲)$$

در رابطه فوق ρ_s و ρ_f به ترتیب چگالی آب شور و شیرین، h فاصله سطح ایستایی آبخوان تا سطح آب دریا و H فاصله سطح مشترک آب شور و شیرین تا تراز دریا در محل نقطه مورد نظر است. از جایی که عموماً چگالی آب دریا و آب زیرزمینی به ترتیب برابر ۱۰۲۵ و ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته می‌شود، معادله (۱-۲) به فرم خلاصه‌شده $H = 40 h$ ساده می‌شود. این رابطه بیان می‌کند که برای هر نقطه بافاصله معین از مرز ساحلی، فاصله سطح مشترک آب شور و شیرین از سطح دریا، ۴۰ برابر فاصله سطح ایستایی آبخوان تا سطح دریا است (Freeze and Cherry, 1979). باوجود اینکه در مدل گی-بن-هرزبرگ خطاهای بارزی ازجمله نادیده گرفتن نقش پراکندگی مکانیکی، پخشیدگی مولکولی و سطح ناحیه خروجی جریان آب زیرزمینی وجود داشت، اما تا مدت‌ها این رابطه تنها ابزار در دسترس برای تخمین موقعیت فرضی سطح مشترک آب شور و شیرین در آبخوان‌های ساحلی بود. طی سال‌های ۱۹۴۰ تا ۱۹۶۵ محققین بیشتر بر مطالعات میدانی تمرکز کرده بودند. در همین راستا نتایج ارزشمندی در کارهای بی‌موند^۱ تاد و هایسمن^۲ و والکر^۳ در کشور هلند، استرن و همکاران^۴، جاکوبز و اشمورا^۵ در کشور اسرائیل، کوپر و همکاران^۶، لوزینزکی^۷ و سوارزنسکی^۸ در کشور آمریکا دیده شد (Reilly and Goodman, 1985). گلوور^۹ توانست با استخراج یک رابطه تحلیلی-تقریبی (بر مبنای نظریه جریان پتانسیل) توصیف بهتری از سطح مشترک قاطع آب شور و شیرین نسبت به رابطه گی-بن-هرزبرگ ارائه کند. در مدل گلوور جریان آب زیرزمینی از سطح معینی روی مرز ساحلی عبور می‌کرد و به دریا تخلیه می‌شد. ضمن اینکه در مدل گلوور سامانه آب زیرزمینی

^۱ Biemond

^۲ Todd and Huisman

^۳ Volker

^۴ Stern et al.

^۵ Jacobs and Schmorak

^۶ Coper et al.

^۷ Lusczynski

^۸ Swarzenski

^۹ Glover

در شرایط تعادل هیدرودینامیکی قرار داشت نه تعادل هیدرواستاتیکی (Reilly and Goodman, 1985). نخستین تلاش جدی جهت بررسی اثرات پخشیدگی مولکولی در مسئله هجوم آب دریا توسط هنری (Henry, 1964) انجام گرفت. مسئله هنری^۱ یک مسئله منحصر به فرد است چون تنها مسئله‌ای است که پدیده هجوم آب دریا را به روش چگالی متغیر (روشی که در آن آب شور و شیرین به عنوان دو سیال امتزاج‌پذیر در نظر گرفته می‌شود) به صورت تحلیلی بررسی کرده است. اگرچه مسئله هنری به عنوان مسئله مبنا (معیار) برای ارزیابی بسیاری از مدل‌های عددی هجوم آب شور بکار رفته است ولی در این مسئله نیز محدودیت‌های وجود دارد که امکان شبیه‌سازی هجوم آب دریا را در شرایط واقعی فراهم نمی‌کند. مهم‌ترین محدودیت مسئله هنری این است که در آن فقط مکانیزم‌های همرفتی و پخشیدگی مولکولی در نظر گرفته شده و از اثرات پراکندگی مکانیکی صرف‌نظر شده است. بنابراین در مسئله هنری، ناحیه اختلاط فقط به علت وجود ضریب پخشیدگی مولکولی بالا شکل می‌گیرد. محدودیت دیگر مسئله هنری این است که در آن فقط شرایط دائمی مسئله هجوم آب دریا بررسی شده است (Werner et al., 2013; Abarca et al., 2007). شکل ۲-۳ شرایط مرزی و نتایج مسئله هنری را نشان می‌دهد.

از سال ۱۹۶۵ تا سال ۱۹۸۵ میلادی اغلب تحقیقات صورت گرفته در رابطه با موضوعات خاص بود، به عنوان مثال بیر و معلم در سال ۱۹۷۴ نقش و تأثیر لایه‌های نیمه نفوذپذیر را در یک آبخوان خاص بر هجوم آب دریا مشخص کردند. در ضمن در این دوره پیشرفت‌هایی نیز در مطالعات میدانی و روش‌های عددی دیده شد. شبیه‌سازی‌های دو بعدی با هر دو روش سطح مشترک قاطع و جریان-چگالی متغیر توسعه یافتند. به عنوان مثال شامیر و داگان^۲، کاشف^۳ و بیر و کاپولر^۴ از روش سطح مقطع قاطع برای شبیه‌سازی‌های عددی استفاده کردند. هر چند روش چگالی متغیر با استفاده از حل همزمان معادلات جریان و انتقال قدرتمند و دقیق بود، اما تا سال‌ها مشکلات زیادی نظیر نوسانات عددی و پراکندگی عددی که ناشی از عدم امکانات و

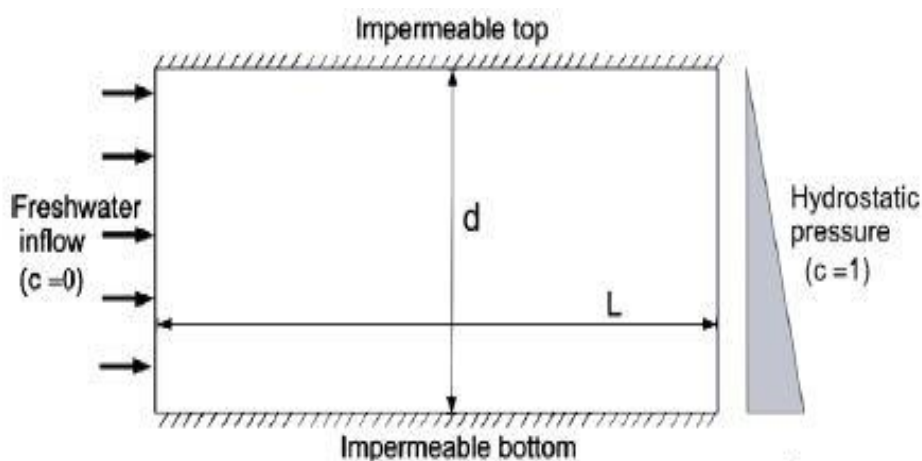
¹ Henry Problem

² Shamir and Dagan

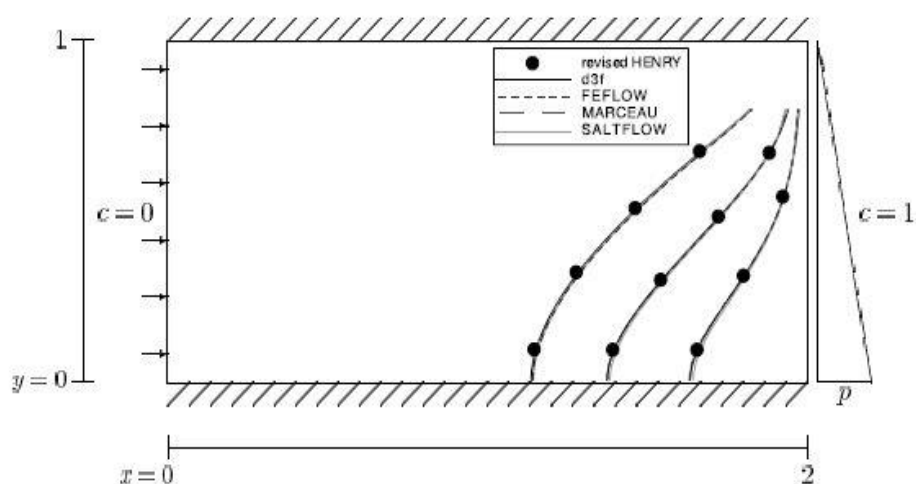
³ Kashef

⁴ Bear and Kapuler

فناوری رایانه بوده (سالهای قبل از ۱۹۸۵) کاربرد این فن را غالباً محدود می‌کرد (Reilly and Goodman, 1985).



(الف)



(ب)

شکل ۳-۲ (الف) میدان هندسی و شرایط مرزی مسئله هنری (ب) نتایج حل تحلیلی مسئله هنری (Abaraca et al., 2007).

در دهه‌های اخیر با پیشرفت فناوری و ساخت رایانه‌هایی با سرعت و دقت بالا، حل عددی سیالات امتزاج‌پذیر و شبیه‌سازی اندرکنش آب شور و شیرین ساده‌تر و دقیق‌تر شده است. به همین علت استفاده از مدل‌های عددی و نرم‌افزارهای مختلف مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفت. علاوه بر این بسیاری از محققین توانستند با ایجاد شرایط نسبتاً واقعی در مدل‌های آزمایشگاهی، به نتایج قابل قبولی دست یابند. در نتیجه، بررسی‌های آزمایشگاهی با فن‌های مختلف اندازه‌گیری به منظور مدل‌سازی مسائل خاص توسعه یافت. در

ادامه برخی از مطالعات آزمایشگاهی و عددی که در سال‌های اخیر انجام گرفته و نزدیک به موضوع تحقیق حاضر است، بررسی می‌شود.

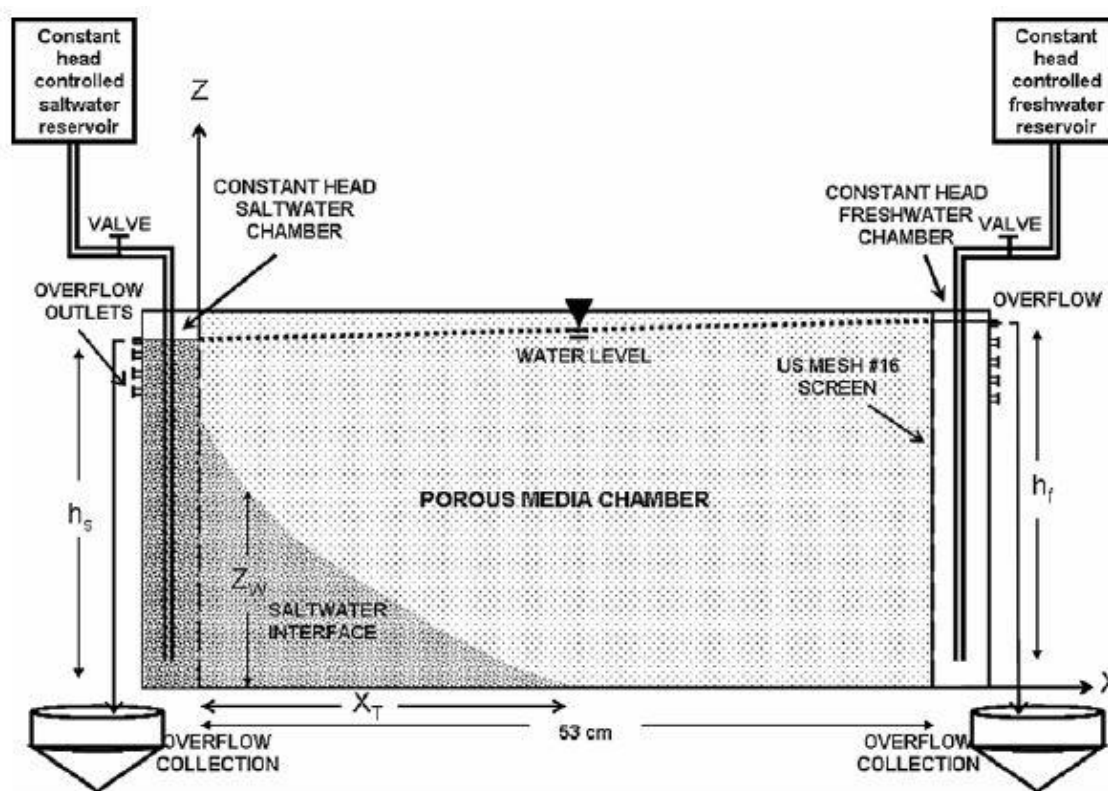
۲-۳-۲ مطالعات آزمایشگاهی

مطالعات آزمایشگاهی بسیاری حرکت گوه آب شور را تحت تأثیر عوامل مختلف بررسی کرده‌اند. در اکثر این مطالعات، نتایج آزمایشگاهی با استفاده از مشاهدات چشمی برداشت شده‌اند. تعدادی از این مطالعات در جدول ۱-۲ ارائه شده‌اند.

جدول ۱-۲ تعدادی از مطالعات آزمایشگاهی انجام شده جهت بررسی اثر عوامل مختلف بر حرکت گوه آب شور

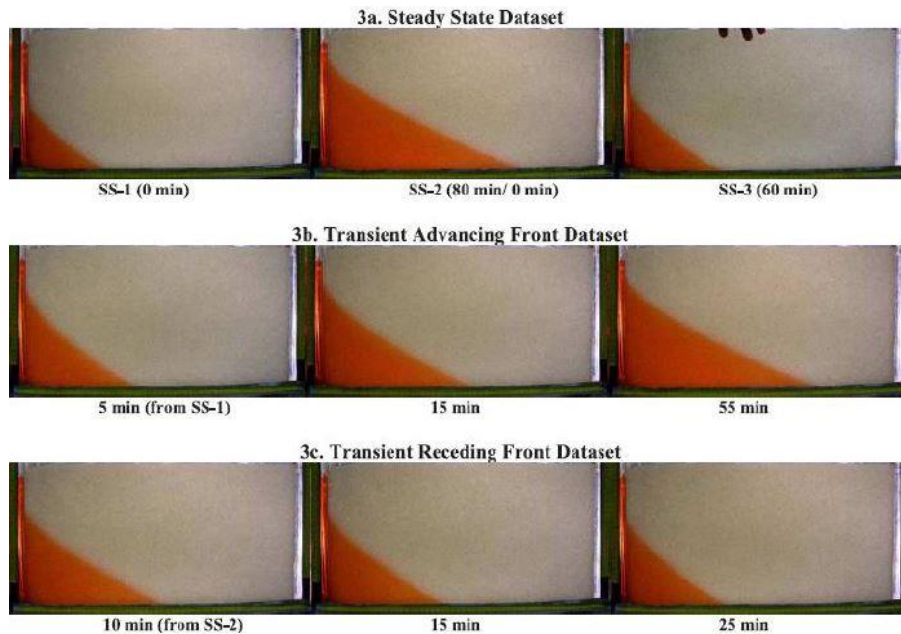
منبع	مدل عددی استفاده شده	هدف از تحقیق
Goswami and Clement (2007)	SEAWAT	بررسی اثر تغییر سطح ایستابی بر حرکت گوه آب شور در آبخوانی با سیستم هد-کنترل شده
Luyun et al. (2009)	SEAWAT	بررسی تأثیر احداث سد زیرزمینی بر کنترل پیشروی گوه آب شور
Luyun et al. (2011)	SEAWAT	بررسی اثر عمق نفوذ و فاصله دیوار آب بند بر کنترل پیشروی گوه آب شور
Chang and Clement (2012)	SEAWAT	بررسی اثر تغییر شار جریان بر حرکت گوه آب شور در آبخوانی با سیستم شار-کنترل شده
Chang and Clement (2013)	SEAWAT	بررسی حرکت هاله آلوده درون گوه آب شور
Lu et al. (2013)	SEAWAT	بررسی تأثیر ناهمگنی محیط متخلخل بر حرکت کوه آب شور و ناحیه اختلاط
Morgan et. (2013)	FEFLOW	بررسی اثر بالآمدگی تراز دریا بر حرکت گوه آب شور
Bertorelle (2014)	SUTRA	بررسی پیشروی گوه آب شور
Oz et al. (2014)	RST2D	بررسی نحوه شکل‌گیری و حرکت گوه آب شور در اثر قرارگیری آبخوان در مجاورت با دولایه آب شور با غلظت‌های مختلف
Mehdizadeh et al. (2014)	SEAWAT	بررسی نحوه شکل‌گیری جریان‌های قائم در اطراف گوه آب شور در یک آبخوان لایه‌بندی شده
Oz et al. (2015)	RST2D	بررسی الگوی جریان‌های چرخشی شکل گرفته شده درون گوه آب شور

چون اندازه‌گیری و استخراج نتایج پارامترهای مختلف گوه آب شور و ناحیه اختلاط در شرایط گذرا، با استفاده از مشاهدات چشمی، سخت، زمان‌بر و همراه با خطای انسانی است (Robinson et al., 2015)، محققین یا فقط به شرایط دائمی مسئله توجه داشته‌اند و یا در صورت بررسی حرکت گوه آب شور در شرایط گذرا، فقط موقعیت پنجه گوه را در زمان‌هایی مشخص و محدود اندازه‌گیری کرده‌اند. به‌عنوان مثال در مطالعه گاسوامی و کلمنت (Goswami and Clement, 2007)، اثر تغییر سطح ایستابی آبخوان بر حرکت گوه آب شور در آبخوانی با سیستم هد-کنترل شده^۱ بررسی گردید. تصویر شماتیک مدل آزمایشگاهی گاسوامی و کلمنت در شکل ۲-۴، و تصاویری پیشروی و بازگشت گوه آب شور در مدل فیزیکی آن‌ها در شکل ۲-۵ نشان داده شده است.



شکل ۲-۴ شماتیک از مدل آزمایشگاهی (Goswami and Clement (2007).

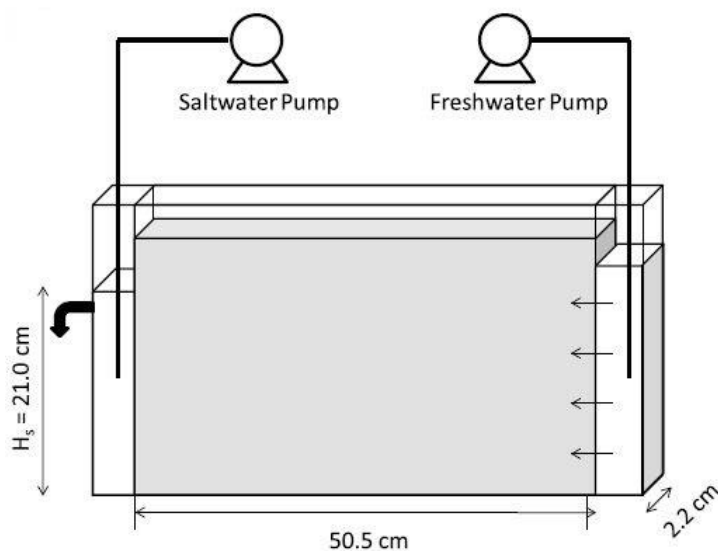
¹ Head-Controlled system



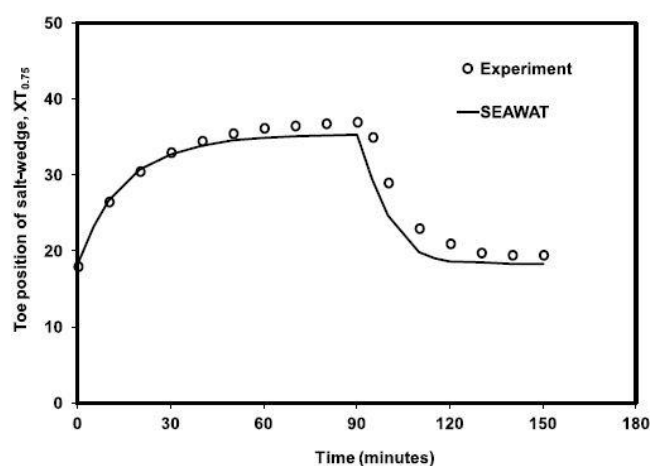
شکل ۲-۵ تصاویری آزمایشگاهی پیشروی و بازگشت گوه آب شور در تحقیق (Gowsami and Clement, 2007).

در مطالعه‌ای دیگر چانگ و کلمنت (Chang and Clement, 2012) اثر تغییر شار آب زیرزمینی را بر پیشروی و بازگشت گوه آب شور در آبخوانی با سیستم شار-کنترل شده^۱ بررسی کردند (شکل ۲-۶). مطالعات آنها نشان داد که در اثر کاهش و افزایش یکسان شار جریان، مدت زمان بازگشت پنجه گوه کمتر از مدت زمان پیشروی آن است (شکل ۲-۷). آنها علت این پدیده را تغییر در میدان جریان و ایجاد جریان‌های همسوی آب شور و شیرین به سمت مرز دریا، در هنگام افزایش شار آب زیرزمینی عنوان کردند. شکل ۲-۸ تصاویر پیشروی و بازگشت گوه آب شور را در مدل آزمایشگاهی چانگ و کلمنت نشان می‌دهد. شایان ذکر است هم گاسوامی و کلمنت (Goswami and Clement, 2007) و هم چانگ و کلمنت (Chang and Clement, 2012) یکی از اهداف تحقیقشان را ارائه معیاری قوی‌تر نسبت به مسئله معروف هنری برای تأیید مدل‌های عددی جریان چگالی-متغیر بیان کردند.

¹ Flux-Controlled system

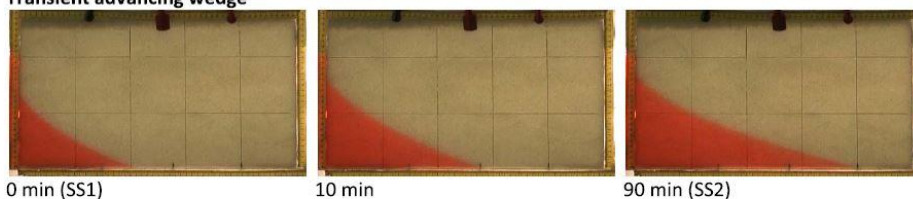


شکل ۶-۲ شماتیکی از مدل آزمایشگاهی چانگ و کلمنت (Chang and Clement, 2012).

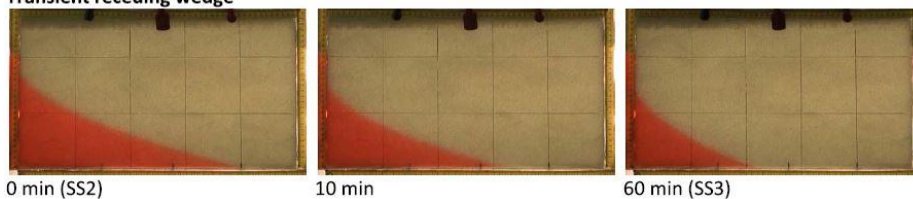


شکل ۷-۲ نتیجه به دست آمده برای پنجه گوه در اثر کاهش و افزایش یکسان شار جریان، پنجه گوه در هنگام بازگشت نسبت به هنگام هجوم زودتر به شرایط دائمی می‌رسد (Chang and Clement, 2012).

Transient advancing wedge



Transient receding wedge



شکل ۸-۲ تصاویر پیشروی و بازگشت گوه آب شور در اثر تغییرات یکسان شار جریان آب شیرین (Chang and Clement, 2012).

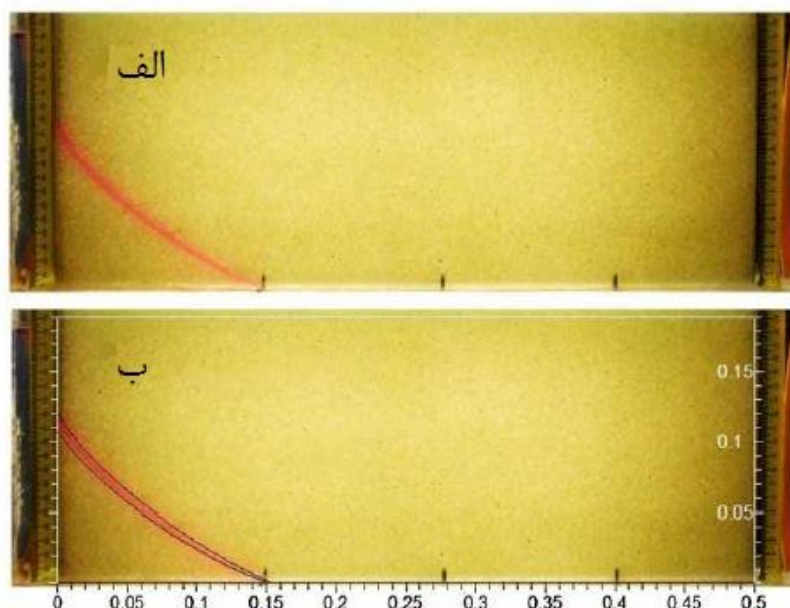
مطالعات آزمایشگاهی کمی جهت بررسی تغییرات ضخامت ناحیه اختلاط، چه در شرایط دائمی و چه در شرایط گذرا، انجام شده است. در مدل‌های آزمایشگاهی به علت مقیاس کوچک آنها، ناحیه اختلاط نیز ضخامت کمی دارد (Werner et al., 2013). بنابراین شناسایی چشمی ناحیه اختلاط در مدل‌های آزمایشگاهی، به ویژه در شرایط گذرا، سخت و شاید غیرممکن است (Robinson et al., 2015). از این‌رو در اکثر مطالعات آزمایشگاهی قبلی از جمله مطالعات گاسوامی و کلمنت (Goswami and Clement, 2007) و چانگ و کلمنت (Chang and Clement, 2012) ناحیه اختلاط به صورت یک سطح مشترک قاطع در نظر گرفته شده است. آبارکا و کلمنت (Abarca and Clement, 2009) از محدود محققینی بودند که بر شناسایی ناحیه اختلاط در شرایط دائمی تمرکز کردند. آنها با توسعه روش رنگ سنجی^۱ نمایش مناسبی از محدوده ناحیه اختلاط را در مدل‌های آزمایشگاهی ارائه دادند (شکل ۲-۹-الف). اساس روش رنگ سنجی، تغییرات رنگ ماده فنول فتالین^۲ در اثر قرارگیری در معرض PH های مختلف ناحیه اختلاط است. نتایج آزمایش آنها در شرایط دائمی نشان داد که ناحیه اختلاط در پنجه گوه نازک است و با بالا رفتن در امتداد سطح مشترک به سمت مرز دریا ضخیم می‌شود. یکی دیگر از کارهای انجام‌شده در مطالعه آبارکا و کلمنت (Abarca and Clement, 2009) تعیین ضریب پراکنده‌پذیری طولی^۳ و ضریب پراکنده‌پذیری عرضی^۴ محیط متخلخل آزمایش بود. برای این منظور ابتدا در مدل عددی مقادیر اولیه‌ای برای این ضرایب انتخاب شد. ایشان تغییر در مقدار ضرایب پراکنده‌پذیری تا زمانی ادامه دادند که نتایج عددی به دست آمده برای ناحیه اختلاط منطبق بر داده‌های آزمایشگاهی شد (شکل ۲-۹-ب).

¹ Colorimetric method

² Phenolphthalein

³ Longitudinal dispersivity

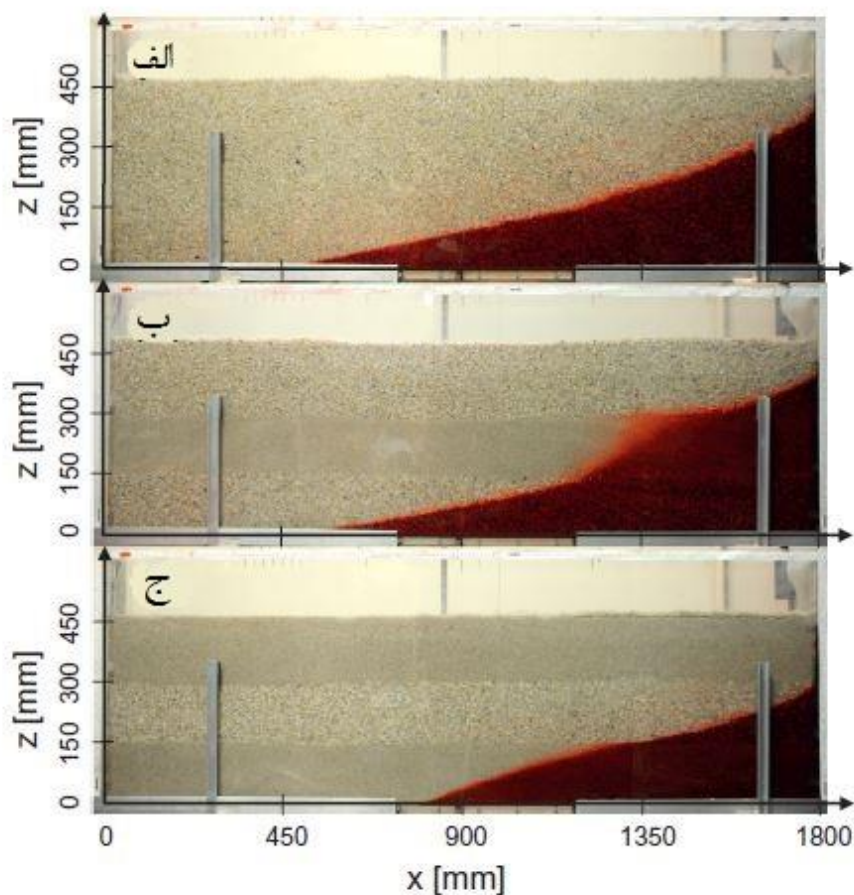
⁴ Transverse dispersivity



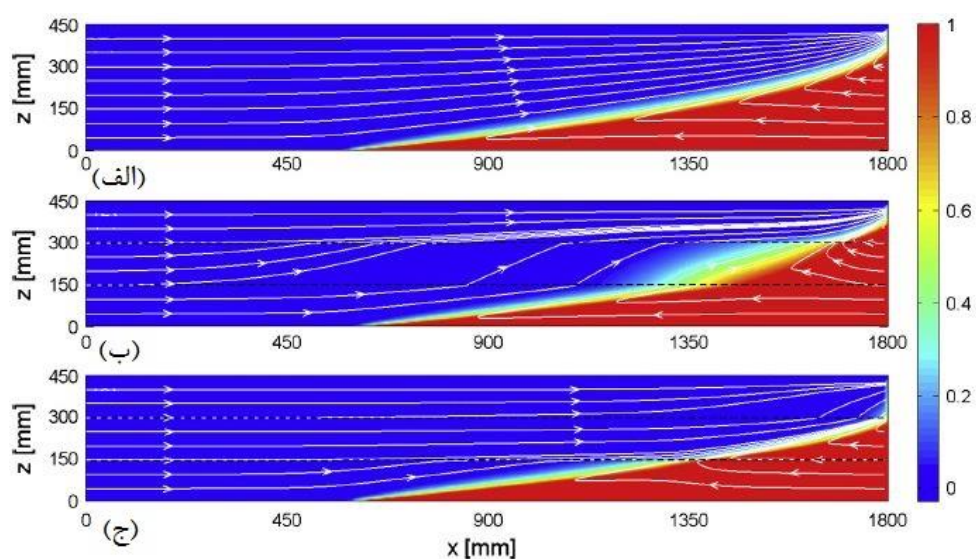
شکل ۲-۹ (الف) ناحیه اختلاط شناسایی شده توسط روش رنگ سنجی (ب) ناحیه اختلاط شبیه سازی شده توسط مدل عددی (Abarca and clement, 2009) SUTRA

لو و همکاران (Lu et al., 2013) اثر ناهمگنی آبخوان لایه بندی شده^۱ را بر تغییرات ضخامت ناحیه اختلاط، با استفاده از مدل سازی آزمایشگاهی و عددی بررسی نمودند. مطالعات آنها نشان داد، چنانچه یک لایه با هدایت هیدرولیکی کمتر در بین دو لایه با هدایت هیدرولیکی بالا قرار گیرد، در اثر شکست خطوط جریان که ناشی از اختلاف هدایت هیدرولیکی دو لایه است، ناحیه اختلاط در لایه میانی گسترش می یابد. در مقابل چنانچه یک لایه با هدایت هیدرولیکی بالا در بین دو لایه با هدایت هیدرولیکی نسبتاً کم قرار گیرد، ضخامت ناحیه اختلاط در لایه میانی کاهش می یابد. در این تحقیق نیز با توجه به برداشت چشمی داده ها، تغییرات ضخامت ناحیه اختلاط فقط در شرایط دائمی آنالیز شد. نتایج مطالعات آزمایشگاهی و عددی لو و همکاران را در شرایط دائمی به ترتیب در شکل ۲-۱۰ و شکل ۲-۱۱ مشاهده می کنید.

¹ Stratified aquifer



شکل ۲-۱۰ تصاویر آزمایشگاهی شکل‌گیری ناحیه اختلاط در شرایط دائمی. (الف) محیط متخلخل شامل دانه‌بندی درشت و همگن. (ب) محیط متخلخل شامل یک لایه با دانه‌بندی ریز در وسط و دو لایه با دانه‌بندی درشت در بالا و پایین آن. (ج) محیط متخلخل شامل یک لایه با دانه‌بندی درشت در وسط و دو لایه با دانه‌بندی ریز در بالا و پایین آن (Lu et al, 2013).

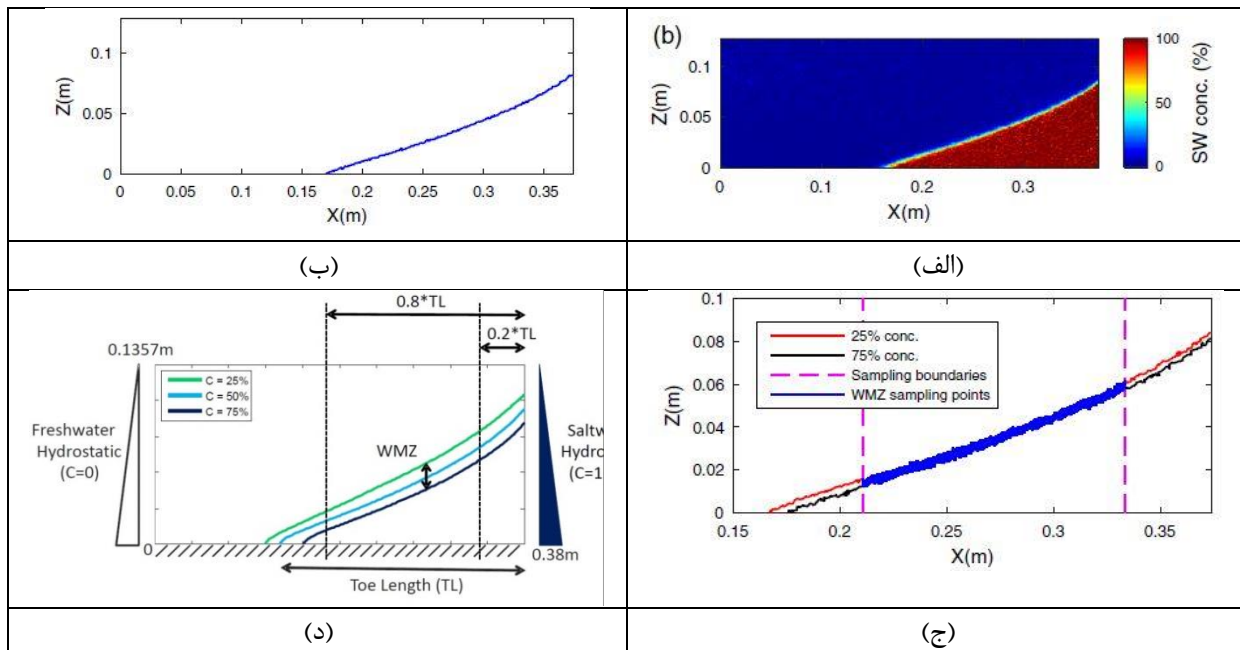


شکل ۲-۱۱ نتایج شبیه‌سازی عددی در شرایط دائمی. (الف) همگن و درشت. (ب) لایه‌ریز در وسط و لایه‌های درشت در بالا و پایین. (ج) لایه درشت در وسط و لایه‌های ریز در بالا و پایین (Lu et al, 2013).

اخيراً رابینسون و همکاران (Robinson et al., 2015) توانستند با کمک آنالیز خودکار تصاویر، برخی از محدودیت‌های مطالعات آزمایشگاهی را جهت شناسایی پارامترهای هجوم آب شور برطرف کنند. مطالعات آنها در مدلی کوچک با ابعاد (عمق×ارتفاع×طول) $38 \times 15 \times 1$ cm انجام گرفت و بیشتر بر استخراج رابطه‌ای کالیبراسیونی متمرکز بود که بر اساس آن بتوانند غلظت محلول را در هر پیکسل تصویر بر اساس شدت روشنایی آن پیکسل تعیین کنند. استخراج این رابطه مستلزم تهیه نمونه‌هایی از آب شور رنگی با غلظت‌های مختلف (از غلظت آب شیرین تا غلظت آب شور دریا)، افزودن هر یک از نمونه‌ها به محیط متخلخل و نیز عکس‌برداری در شرایط نوری کاملاً یکسان بود. آنها با کمک این رابطه کالیبراسیونی که فقط مختص ساختار آزمایشگاهی خودشان بود توانستند نقشه تغییرات غلظت را برای هر تصویر مشخص کنند (شکل ۲-۱۲-الف). سپس از کانتور غلظت ۵۰٪ آن مقدار پیشروی پنجه گوه (شکل ۲-۱۲-ب) و از کانتورهای غلظت ۲۵٪ و ۷۵٪ آن اندازه ضخامت ناحیه اختلاط (شکل ۲-۱۲-ج) را محاسبه نمایند. اگرچه رابینسون فن جدیدی را برای شناسایی پارامترهای هجوم آب شور در مدل‌های آزمایشگاهی کوچک ارائه کردند ولی آنها جهت بررسی حرکت گذرای گوه آب شور، تنها به اندازه‌گیری تغییرات طول پنجه گوه و برای بررسی رفتار ناحیه اختلاط فقط به اندازه‌گیری ضخامت متوسط ناحیه در محدوده ۰/۲ تا ۰/۸ طول پنجه گوه (شکل ۲-۱۲-د) بسنده کردند. این احتمالاً به علت ابعاد کوچک مدل آزمایشگاهی آنها بوده که ناحیه اختلاط در آزمایش‌ها آنها، در امتداد سطح مشترک آب شور و شیرین نازک و یکنواخت شکل می‌گرفت.

نتایج مطالعه فوق‌الذکر نشان داد که مدت‌زمان لازم برای بازگشت پنجه گوه کمتر از مدت زمان لازم برای پیشروی آن است. در واقع این همان نتیجه‌ای است که قبلاً در مطالعه چانگ و کلمنت (Chang and Clement, 2012) با استفاده از آنالیز چشمی تصاویر به‌دست آمده بود. به علاوه نتایج آزمایشگاهی آنها نشان داد که در هنگام بازگشت گوه آب شور ضخامت متوسط ناحیه اختلاط ابتدا افزایش و سپس مجدداً کاهش می‌یابد. نکته قابل‌توجه در مطالعه رابینسون و همکاران (Robinson et al., 2015) این است که آنها علت وقوع این پدیده را به طور دقیق توضیح ندادند و فقط در یک توضیح کلی دلیل آن را ناشی از تغییر میدان جریان در ابتدای مرحله بازگشت گوه بیان کردند. در تحقیق حاضر تمرکز بیشتری روی

پدیده گسترش ناحیه اختلاط در مرحله بازگشت شده و دلایل وقوع آن با جزئیات بیشتری تفسیر خواهد شد.



شکل ۲-۱۲ فرآیند اندازه‌گیری پارامترهای هجوم آب شور برای یک تصویر مشخص، (الف) نقشه تغییرات غلظت، (ب) ترسیم کانتور غلظت ۵۰٪ برای اندازه‌گیری طول پنجه گوه، (ج) ترسیم کانتورهای غلظت ۲۵٪ و ۷۵٪ برای اندازه‌گیری ضخامت ناحیه اختلاط، (د) نمودار مرجع برای نمایش محدود ناحیه اختلاط اندازه‌گیری شده (Robinson et al., 2015).

۲-۳-۳ مطالعات عددی

با وجود اینکه مدل‌های عددی می‌توانند ابزار تحقیقاتی موثری برای بهبود درک ما از فرآیند هجوم آب دریا باشند، اما مطالعات عددی هجوم آب دریا در شرایط گذرا، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در مطالعات عددی نیز همانند مطالعات آزمایشگاهی، برداشت و آنالیز چشمی نتایج در شرایط گذرا، به ویژه برای ناحیه اختلاط، کاری سخت، زمان‌بر و تقریباً غیرممکن است. از این‌رو اغلب تحقیقات عددی قبلی یا بر اساس دیدگاه سطح مشترک- قاطع انجام‌شده است که هدف آنها بیشتر شناسایی موقعیت پنجه گوه در شرایط دائمی بوده (از جمله مطالعات: استراک، داگان و زیتون و باکر (Strack, 1976; Dagan and Zeitoun, 1998; Bakker, 1998) و یا در صورت استفاده از دیدگاه چگالی متغیر، بیشتر مطالعات بر شرایط دائمی مسئله از جمله شکل‌های مختلف مسئله هنری، تمرکز داشته‌اند (Werner, 2017). به عنوان مثال سیمسون و کلمنت (Simpson and Clement, 2004) برای بهبود مسئله

هنری، پیشنهاد کاهش تغذیه آب شیرین را دادند. هلد و همکاران (Held et al., 2005) اثر ناهمگنی محیط متخلخل را در مسئله هنری بررسی کردند. در مطالعه عددی دیگر آبارکا و همکاران (Abarca et al., 2007) با در نظر گرفتن اثرات پراکندگی مکانیکی در مسئله هنری توصیف بهتری از پدیده هجوم آب دریا ارائه دادند. آنها با انجام شبیه‌سازی‌های عددی توسط مدل سوترا نشان دادند که در شرایط دائمی هر دو پارامتر پراکنده‌پذیری طولی و پراکنده‌پذیری عرضی به مقدار مساوی بر گسترش ناحیه اختلاط موثر هستند. درحالی‌که پاستر و داگان (Paster and Dagan, 2007) و هلد و همکاران (Held et al., 2005) معتقد بودند که برای آبخوان‌های همگن و در شرایط دائمی، پراکنده‌پذیری عرضی مسئول اصلی گسترش ناحیه اختلاط است. اخیراً لو و ورنر (Lu and Werner., 2013) مدت‌زمان پیشروی و بازگشت پنجه گوه آب شور را در اثر کاهش و افزایش سطح ایستابی آبخوان، مورد بررسی قرار دادند. تحقیقات آنها که توسط مدل عددی سی‌وت^۱ انجام شد، منجر به توسعه معادلات لگاریتمی ساده‌ای شد که بر اساس آن‌ها الف) لگاریتم مدت‌زمان پیشروی پنجه گوه یک رابطه خطی با لگاریتم اختلاف تراز سطح ایستابی آبخوان و سطح آب دریا داشت. ب) لگاریتم مدت‌زمان بازگشت پنجه گوه یک رابطه خطی ساده با مسافت پیموده شده پنجه در هنگام بازگشت گوه داشت. اگرچه در این مطالعه از یک مدل عددی مبتنی بر روش چگالی-متغیر استفاده شد ولی به دینامیک ناحیه اختلاط توجه نشده بود.

در سال‌های اخیر، از روش‌های ریاضی بیشتر جهت بررسی اثرات بالآمدگی تراز دریا بر حرکت گوه آب شور استفاده شده است. استفاده از روش سطح مشترک-قاطع برای تحلیل اثرات بالآمدگی تراز دریا، در شرایط دائمی، در مطالعات ورنر و سیمونز (Werner and Simmons, 2009)، ورنر و همکاران (Werner et al., 2012)، عطایی آشتیانی و همکاران (Ataie-Ashtiani et al., 2013) و کارترو و همکاران (Carretero et al., 2013) دیده می‌شود. همچنین در این سال‌ها از مدل‌های عددی بیشتر جهت بررسی پدیده گذرای اور شوت^۲ که ناشی از بالآمدگی تراز آب دریا است، استفاده شده است. در این مطالعات (از جمله: چانگ و همکاران، مورگان و همکاران، حسین و جوادی و کتابچی و همکاران

¹ SEAWAT

² Overshoot

(Cheng et al., 2011; Morgan et al., 2015; Hussain and Javadi 2016; Ketabchi et al., 2016)) نیز

بیشتر تاکید بر اندازه‌گیری شاخص طول پنجه گوه نسبت به زمان بوده است.

مرور منابع علمی نشان می‌دهد، اگر چه تلاش‌های شایسته‌ای برای بررسی فرآیند هجوم آب دریا انجام شده است اما هنوز شکاف‌های علمی در شناسایی و درک این پدیده در شرایط گذرا وجود دارد (Werner et al., 2013) به‌طوری که شناخت عمومی از مسئله هجوم آب دریا، در درجه اول مبتنی بر شرایط دائمی این پدیده از جمله شکل‌های مختلف مسئله هنری است (Werner, 2017). این پژوهش باهدف روشن کردن رفتار گذرای گوه آب شور و ناحیه اختلاط، در آبخوان‌هایی با سیستم هد-کنترل شده هم به‌صورت آزمایشگاهی و هم به‌صورت عددی انجام شده است. به‌منظور بهبود داده‌های آزمایش، مدلی بزرگ‌تر از تحقیقات قبلی گزارش‌شده انتخاب شد تا بتوان به کمک پردازش تصاویر آزمایشگاهی شناسایی بهتری از ناحیه اختلاط در امتداد سطح مشترک انجام گیرد. جهت بررسی کامل‌تر رفتار گوه آب شور، علاوه بر شاخص طول پنجه گوه که در اغلب تحقیقات آزمایشگاهی و عددی قبلی از آن استفاده شده است، دو شاخص مساحت گوه و ارتفاع گوه نیز در شرایط گذرا مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای ایجاد دید واقع‌بینانه‌تر و بررسی بیشتر پارامترهای هجوم آب دریا در شرایط گذرا، مطالعات عددی از مقیاس-آزمایشگاهی به مقیاس-میدانی توسعه یافت. در این تحقیق به‌منظور بالا بردن سرعت و دقت در کار، نتایج عددی نیز همانند نتایج آزمایشگاهی به‌صورت خودکار برداشت و آنالیز شده‌اند.

۲-۴ هجوم آب شور به آبخوان‌های مجاور کویر

۲-۴-۱ مفاهیم و تعاریف اولیه

آب و هوای خشک و نیمه‌خشک عمدتاً به نواحی اطلاق می‌شود که در آن میزان بارش نسبت به پتانسیل تبخیر کمتر است. چنین شرایط آب و هوایی محیط‌های هیدرولوژیکی مناسبی را برای تجمع نمک در خاک طبیعی و شکل‌گیری انواع ساختارهای نمکی^۱ از جمله کویرها، کفه‌های نمکی^۲، دریاچه‌های شور^۳ و یا

^۱ Salt constructions

^۲ Salt flats

پلایاها^۱ فراهم می‌کند (Wheater et al, 2010). ساختارهای نمکی یا حوضه‌های شور مشخصه نواحی خشک و نیمه‌خشک جهان هستند. هر چند اسامی و تعاریف مختلفی برای توصیف حوضه‌های شور بکار می‌رود ولی تمامی آنها دارای فرآیندهای هیدرولوژیکی مشابهی هستند و فقط ممکن است در شرایط مرزی با یکدیگر متفاوت باشند (Yecheili and Wood 2002). روزن (Rosen, 1994) اطلاعات مفیدی را در مورد تاریخچه پلایاها، سابقه به‌کارگیری این واژه اسپانیایی (به معنی ساحل)^۲ در متون علمی و تفکیک انواع مختلف آن ارائه کرد. طبق نظر روزن، پلایاها ممکن است هم در سیستم‌های هیدرولوژیکی باز و هم در سیستم‌های هیدرولوژیکی بسته تشکیل شوند. هر چند ایشان معتقد بود که عمدتاً آنها در نواحی خشک و در سیستم‌های هیدرولوژیکی بسته شکل می‌گیرند. روزن برای شکل‌گیری پلایا در یک سیستم هیدرولوژیکی بسته معیارهای زیر را بیان کرد: الف) تعادل آبی دریاچه پلایا (شامل تمامی منابع ورودی به آن نظیر بارش، جریان آب سطحی، جریان آب زیرزمینی منهای خروجی از آن شامل تبخیر و تعرق) هم برای بیش از نیمی از سال و هم برای کل سال منفی باشد. ب) خیز مویینه^۳ به اندازه کافی به سطح پلایا نزدیک باشند به‌طوری که تبخیر موجب تخلیه آب شیرین از سطح شود (Rosen, 1994). در تحقیقی دیگر، بریر (Briere, 2000) تعریف روزن (Rosen, 1994) را اصلاح و تعریف دیگری برای پلایا پیشنهاد کرد. طبق تعریف ایشان، پلایاها دریاچه‌های شور فصلی هستند با مشخصات زیر: الف) بیش از نیمی از سال دارای بیلان آبی منفی هستند، ب) بیش از ۷۵٪ روزهای سال خشک هستند و ج) دارای درزهای مویینگی هستند که به اندازه کافی به سطح زمین نزدیک‌اند به‌طوری که تبخیر باعث تخلیه آب از آنها می‌شود و در نتیجه آن مواد محلول معدنی^۴ (قشرهای نمکی) در سطح پلایا به‌جا می‌ماند. کفه‌های نمکی یا دریاچه‌های نمکی خشک^۵ نیز شرایطی مشابه شرایط پلایا را دارند با این تفاوت که در اثر تبخیر، آب دریاچه پلایا خشک شده است. هولزبچر (Holzbecher, 2005) شکل‌گیری کفه‌های نمکی را وابسته به سه شرط دانست: الف) حوضه شامل کفه نمکی از نظر هیدرولوژیکی بسته باشد، به عبارتی هیچ نوع جریان خروجی سطحی یا زیرسطحی در حوضه

^۲ Saline lakes

^۱ Playas

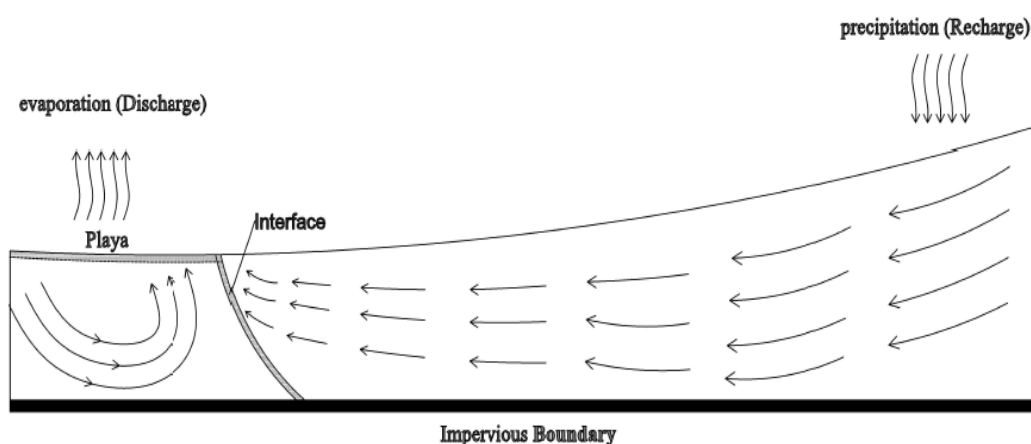
^۲ Shore

^۳ Capillary fringe

^۴ Evaporites

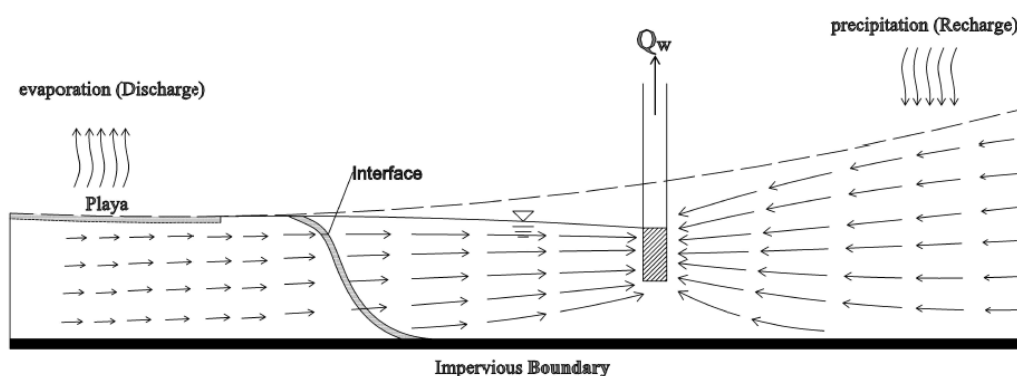
^۵ Dry salt lake

وجود نداشته باشد. ب) باران‌های کافی در کوه‌های پیرامون حوضه ببارد به‌طوری که یک جریان پایداری را به داخل حوضه ایجاد کند. ج) شرایط آب و هوایی حوضه خشک باشد به گونه‌ای که پتانسیل تبخیر بالایی را به وجود آورد. همان طور که قبلاً نیز بیان شد اسامی و تعاریفی مختلفی برای حوضه‌های شور بکار رفته است ولی همه آن‌ها دارای شرایط هیدرولوژیکی مشابهی هستند به‌طوری که عمده آن‌ها در پست‌ترین قسمت‌های یک حوضه بسته هیدرولوژیکی شکل می‌گیرند و تخلیه از آن‌ها فقط از طریق تبخیر انجام می‌شود (Boufadel et al., 1999; Holzbecher, 2005). شکل ۲-۱۳ شماتیکی از یک مدل مفهومی عمومی است که جریان آب زیرزمینی را در مجاور یک پلایا یا کفه نمکی (کویر) نشان می‌دهد. سفره آب زیرزمینی توسط بارندگی‌های رخ داده در ارتفاعات تغذیه می‌شود و آب زیرزمینی به سمت مناطق پست حوضه (پلایا) در نواحی خشک جریان می‌یابد. با عبور آب زیرزمینی از سازندهای مختلف، به علت تغییر در خصوصیات زمین‌شناختی آبخوان، به تدریج از سرعت و کیفیت آن کاسته می‌شود. در نزدیکی پلایا، به علت اختلاف چگالی، مرز مشترکی بین آب شور تجمع شده در لایه‌های زیرین پلایا و آب زیرزمینی ایجاد می‌شود. جریان آب زیرزمینی در امتداد این مرز مشترک به سمت بالا تغییر مسیر می‌دهد و در سطح پلایا تخلیه می‌گردد. آب‌های زیرزمینی راه‌یافته به پلایا و همچنین رواناب‌ها سطحی منتهی شده به آن در اثر تابش خورشید تبخیر شده و عاملی برای شوری لایه‌های زیرین پلایا می‌شوند.



شکل ۲-۱۳ شماتیکی از یک مدل مفهومی عمومی جهت نمایش الگوهای جریان شکل گرفته در لایه‌های زیرین پلایا و آبخوان مجاور

به دلیل اینکه اغلب مناطق ایران در نواحی خشک و نیمه خشک قرار گرفته است، کفه های نمکی یا پلایهای متعددی در آن پراکنده شده اند. در سال های اخیر، برداشت بی رویه از آبخوان ها برای مصارف مختلف شرب، صنعت و کشاورزی موجب شده که در بیشتر آبخوان های کشور، سطح ایستابی آبخوان افت کند و در شرایط بحرانی، در تراز پایین تر از سطح آب شور کویر (پلایا) قرار بگیرد (شکل ۲-۱۴). این وضعیت موجب معکوس شدن جهت محلی جریان از سمت کویر به سمت آبخوان می شود و بر سرعت هجوم آب شور می افزاید. آبخوان های متعددی در کشور ایران در معرض هجوم آب های شور کویر قرار گرفته اند و یا در آینده ای نزدیک قرار می گیرند. از این رو می بایست مدیران منابع آب زیرزمینی در نواحی خشک و نیمه خشک، توجه ویژه ای به نحوه پیشروی آب های شور به آبخوان های مجاور کویر داشته باشند.



شکل ۲-۱۴ شماتیکی از مدل مفهومی و الگوهای جریان شکل گرفته در آبخوان مجاور کویر در شرایطی که سطح ایستابی آبخوان پایین تر از آب شور کویر قرار می گیرد.

۲-۴-۲ مطالعات انجام گرفته در کشورهای توسعه یافته

چون کشورهای توسعه یافته کمتر با مسئله هجوم آب شور کویر به سمت آبخوان ها روبرو بوده اند، تحقیقات کمی از طرف محققین آنها روی این پدیده انجام شده است. با بررسی های انجام گرفته مشخص شد که تحقیقات آنها بیشتر بر شناسایی دینامیک جریان آب شور در لایه های زیرین پلایا و بررسی پدیده انتقال

آزاد^۱ آب شور، در شرایطی که سطح ایستابی آبخوان در ترازى بالاتر از سطح آب شور پلایا قرار داشته است (شرایطی مشابه شکل ۲-۱۳)، متمرکز بوده است. در ادامه مروری بر این مطالعات خواهیم داشت.

دافی و الحسن (Duffy and Al-Hassan, 1988) به کمک اطلاعات هیدرولوژیکی و انجام مدل‌سازی‌های عددی، الگوهای جریان آب زیرزمینی را در زیر پلایا و آبخوان مجاور آن، در حوضه کویری و بسته ایالت یوتاه^۲ آمریکا، شبیه‌سازی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که پدیده انتقال آزاد آب نمک می‌تواند در لایه‌های زیرین پلایا رخ دهد. برای بررسی و تأیید یافته‌های دافی و الحسن (Duffy and Al-Hassan, 1988)، تلاش‌های میدانی زیادی توسط فن و همکاران (Fan et al., 1997) انجام گرفت. آنها با استفاده از اندازه‌گیری‌های میدانی که بیش از ۵ سال به طول انجامید، وجود جریان آزاد آب شور را در زیر پلایا و جریان اجباری آب زیرزمینی را در آبخوان مجاور آن در حوضه بسته ایالت نوادا^۳ نشان دادند. فن و همکاران (Fan et al., 1997) در ادامه تحقیقاتشان، اثر ناهمگنی آبخوان را بر الگوهای جریان آب شور با استفاده از مدل‌سازی عددی بررسی کردند. در مطالعاتی که این بار به صورت آزمایشگاهی و عددی انجام گرفت و دین و همکاران (Wooding et al., 1997a-b) توانستند شروع پدیده انتقال آزاد آب شور، پایداری لایه مرزی و توسعه انگشتی‌های نمک را در زیر پلایا شبیه‌سازی نمایند. به منظور اعتبار سنجی و تأیید قابلیت مدل عددی سوترا در شبیه‌سازی مسئله دریاچه نمک^۴، سیمونز و همکاران (Simons et al., 1999) از نتایج آزمایشگاهی و دین و همکاران (Wooding et al., 1997a-b) استفاده نمودند. مقایسه نتایج عددی مدل سوترا و داده‌های آزمایشگاهی انطباق زمانی و مکانی مناسبی را از رشد انگشتی‌های نمک نشان داد. بوفادل و همکاران (Boufadel et al., 1999) از کد عددی ماران^۵ برای شبیه‌سازی جریان‌های وابسته به چگالی، در لایه‌های زیرین دریاچه‌های نمکی خشک استفاده نمود. آنها ابتدا کد عددی را توسط مسئله الدر^۶ صحت سنجی کردند و سپس اثرات موینگی و لزجت را بر نحوه گسترش آب شور غلیظ از سطح دریاچه به سمت پایین بررسی نمودند. هولزبچر (Holzbecher, 2005)

¹ Free convection

² Utah

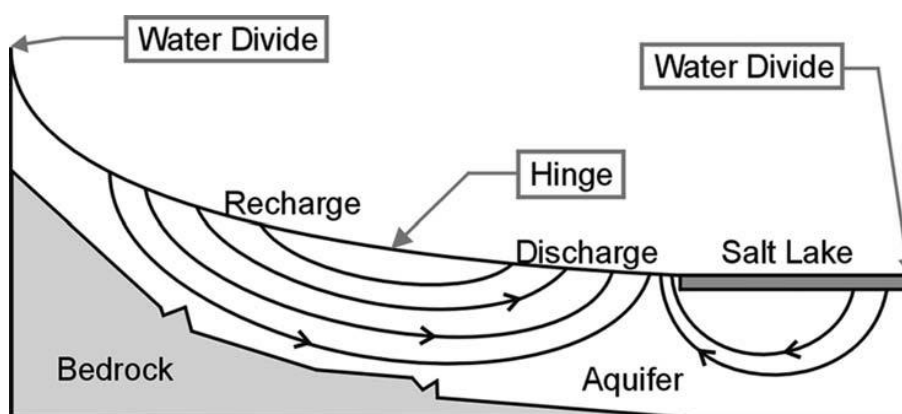
³ Nevada

⁴ Salt lake Problem

⁵ MARUN

⁶ Elder Problem

ابتدا مروری بر مدل‌های مفهومی حوضه‌های شامل دریاچه‌های نمکی و همچنین کدهای عددی که الگوهای جریان را برای آنها شبیه‌سازی کرده‌اند، ارائه کرد. سپس ایشان کد عددی FAST-C(2D) را جهت شبیه‌سازی جریان چگالی ناپایدار پیشنهاد داد و توسط آن اثر خاصیت شناوری را بر رفتار جریان آب شور در زیر دریاچه‌های نمکی بررسی نمود. شکل ۲-۱۵ مدل مفهومی مطالعه هولزبچر را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۵ جریان‌های آب شور و شیرین در زیر و مجاور دریاچه نمک در مدل مفهومی (Holzbecher, 2005).

در سال‌های اخیر بیشتر تحقیقاتی که روی دریاچه‌های نمکی انجام شده، یا به بررسی موضوعات خاصی پرداخته‌اند یا موارد میدانی خاص را مورد بررسی قرار داده‌اند. به‌عنوان مثال ژئی و همکاران (Xie et al., 2010) اثر شرایط مرزی نوسانی را با استفاده از مدل عددی فی‌فلو^۱ روی مسئله‌الدیر بررسی نمودند. مطالعات قبلی شرایط مرزی را در سطح دریاچه نسبت به زمان ثابت در نظر گرفته بودند درحالی‌که در سیستم‌های طبیعی، بارگذاری محلول نمک می‌تواند گذرا و نوسانی باشد. پُست و سیمونز (Post and Simmons, 2010) اثر قرارگیری قشرهایی با نفوذپذیری-کم^۲ را در زیر دریاچه‌های نمکی، بر پدیده انتقال آزاد به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی کرد. تُئید و همکاران (Tweed et al., 2011) تحقیقاتی در مورد فرآیندهای شوری و تغذیه آب زیرزمینی حوضه دریاچه ایر^۳، واقع در کویر مرکزی استرالیا انجام دادند. واسکوئیز و همکاران (Vasquez et al., 2013) تأثیر فرآیندهای ژئوشیمیایی را بر شکل‌گیری الگوهای جریان در زیر

^۱ FEFLOW

^۲ Low-Permeability Strata

^۳ Lake Eyre Basin

کفه نمکی آتاکاما^۱، واقع در کشور شیلی بررسی کردند. برای این منظور آنها از کد عددی شیمت^۲ استفاده نمودند و توانستند جریان‌های چرخشی آب شور را در زیر کفه نمکی شبیه‌سازی کنند.

۲-۴-۳ مطالعات انجام گرفته در کشور ایران

با توجه به وفور و پراکندگی متعدد کفه‌های نمکی در ایران، بسیاری از آبخوان‌های کشور در معرض هجوم آب شور قرار گرفته‌اند. به همین علت، تحقیقات بر روی برخی از دشت‌های کشور که دچار این مشکل شده‌اند، در دستور کار محققین قرار گرفت. در ادامه به برخی از این تحقیقات اشاره می‌شود:

نظری و همکاران (۱۳۸۹) در تحقیقات خود بر روی آبخوان دشت قم، تغییر کیفیت آب زیرزمینی را مشاهده کردند. آنها با تحلیل اطلاعات هیدرو گراف چاه‌های نزدیک و دور به دریاچه نمک (بین سال‌های ۷۹ تا ۸۳)، پیشروی آب شور را از مرز دریاچه به داخل آبخوان ثابت کردند. جعفری (۱۳۹۰) با مقایسه و آنالیز منحنی‌های هم‌پتانسیل و هدایت الکتریکی آبخوان دشت هرات، برای یک دوره ۱۹ ساله (از سال ۶۸ تا ۸۷) نشان داد که در سال ۶۸ گرادیان هیدرولیکی و جهت اصلی جریان به سمت بیرون آبخوان بوده درحالی‌که در سال‌های بعد به علت برداشت بی‌رویه از آبخوان، سطح ایستابی آبخوان کاهش یافته و جهت جریان به‌مرور معکوس شده است. ایشان نتیجه گرفت که تغییر جهت جریان موجب ورود آب‌های شور کفه نمکی هرات به بخش‌های داخلی آبخوان شده و در نتیجه آن کیفیت منابع آب زیرزمینی کاهش یافته است. در مطالعه ایشان میزان غلظت آب شور کفه هرات در محدود ۲/۵ تا ۵ گرم بر لیتر گزارش شده است. جهت بررسی اثر افت سطح ایستابی بر شوری آب زیرزمینی دشت جیرفت در استان کرمان، طباطبایی و محمدی برداشت‌های کمی و کیفی از ۵۶ حلقه چاه انجام دادند. برداشت‌ها در یک دوره ۸ ساله (از سال ۸۰ تا ۸۷) انجام گرفت و نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که یکی از مهم‌ترین علل افزایش شوری آب زیرزمینی (حدود ۱۶ گرم بر لیتر) افت سطح ایستابی آبخوان است و کنترل آن نقش زیادی در کنترل شوری آب زیرزمینی دارد. محمدی و کرمی (۱۳۹۲) به‌منظور یافتن علل کاهش کیفیت آب زیرزمینی در بخش‌های جنوب و جنوب غربی دشت

^۱ Atacama salt fat

^۲ SHEMAT

اسفراین، مطالعات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمی را بر روی این دشت انجام دادند. آنها با ترسیم نقشه‌های هدایت الکتریکی و همپتانسیل آبخوان و آنالیز دیگر پارامترهای هیدروژئوشیمیایی، وقوع پدیده هجوم آب شور را به بخش‌های جنوب و جنوب غربی آبخوان، خصوصاً ناحیه مجاور به آبخوان شور (صفی‌آباد) نمایان ساختند. آنها علت اصلی هجوم آب شور (حدود ۱۰ گرم بر لیتر) را در این منطقه، برداشت بی‌رویه از سفره آب زیرزمینی و افت سطح ایستابی آبخوان بیان کردند. از جمله تحقیقات دیگری که در آن‌ها هجوم آب شور کویر به داخل آبخوان با استفاده از آنالیزهای کیفی مشخص شده است می‌توان به کارهای شیخ وانلو و لشکری پور (۱۳۹۲)، ملکی فرد و همکاران (۱۳۹۲)، کاردان‌مقدم و بنی‌حبیب (۱۳۹۶) به ترتیب برای آبخوان‌های دشت درونه، دشت قزوین و دشت سرایان اشاره کرد. اخیراً بهرامی و حسینی (۱۳۹۴) با استفاده از روش‌های زمین‌آمار، تحقیقاتی را جهت برآورد شوری آبخوان دشت مه‌ولات- فیض‌آباد انجام دادند. آن‌ها پس از صحت سنجی نتایج مدل آماری EBK، نقشه‌های توزیع شوری را برای سال‌های آبی ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۱ ترسیم نمودند. نقشه‌های تولید شده، بالا بودن میزان شوری را در مرزهای غربی دشت (مجاور کفه نمکی) نشان داد که سال‌به‌سال با سرعت بالایی در حال توسعه است. آن‌ها سرعت بالای پیشروی آب شور را از مرز غربی و جنوب غربی به سمت مرکز دشت، برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی و پایین افتادن تراز آب شیرین زیرزمینی در مرکز دشت نسبت به سطح آب شور بیان نمودند.

همان‌طور که قبلاً بحث شد، کشورهای توسعه یافته کمتر با مشکل هجوم آب شور کویر به سمت آبخوان روبرو بوده‌اند، در نتیجه به این مسئله کمتر پرداخته‌اند. از طرفی مرور منابع علمی داخلی نیز نشان داد که تا کنون مدل‌سازی جامع و کاملی که بیانگر نحوه پیشروی آب شور به سمت آبخوان‌های مجاور کویر باشد، انجام نشده است. به طوری که اغلب مطالعات داخل کشور تنها وقوع پدیده هجوم آب شور کویر را با استفاده از مطالعات میدانی و ارزیابی‌های کیفی نشان داده‌اند. در بیشتر مطالعات محققین علت اصلی هجوم آب شور را افت سطح ایستابی آبخوان بیان کردند. چنانچه برداشت از سفره‌های آب زیرزمینی ادامه یابد، احتمالاً در آینده‌ای نزدیک در بسیاری از آبخوان‌های کشور، شاهد افت سطح ایستابی آبخوان در تراز پایین‌تر از سطح آب شور کویر باشیم. ضمن اینکه در برخی از مطالعات مرور شده به وقوع این پدیده در زمان حال نیز اشاره شده بود. این پژوهش می‌کوشد تا با استفاده از مدل‌سازی آزمایشگاهی و عددی، شکل پیشروی سطح

مشترک آب شور و شیرین و همچنین نحوه تغییرات ضخامت ناحیه اختلاط را در شرایطی که سطح ایستابی آبخوان پایین‌تر از سطح آب شور کویر قرار می‌گیرد را شناسایی و بررسی نماید.

فصل ۳ مواد و روش‌ها

۳-۱ مقدمه

برای انجام این تحقیق، لازم بود مطالعاتی هم به صورت آزمایشگاهی و هم به صورت عددی انجام گیرد. بنابراین ساخت مدل آزمایشگاهی کارا و انتخاب مدل عددی مناسب که بتواند پاسخگوی اهداف مورد نظر این پژوهش باشد در دستور کار قرار گرفت. قبل از ساخت مدل آزمایشگاهی، بررسی دقیقی از مطالعات آزمایشگاهی و عددی قبلی که تا حدودی زیادی نزدیک به تحقیق حاضر بود انجام شد. سپس ابعاد مدل بر اساس اهداف مورد نظر تحقیق و تجهیزات مورد نیاز برای ساخت آن، بر اساس جنس مصالح موجود در بازار تعیین شدند. در این فصل ابتدا توضیحاتی در مورد فرآیند ساخت مدل آزمایشگاهی و تجهیزات بکار رفته در آن ارائه می‌شود. در همین راستا نحوه اندازه‌گیری دو پارامتر تخلخل و هدایت هیدرولیکی محیط متخلخل در آزمایشگاه بیان می‌گردد. سپس معادلات و قابلیت‌های مدل عددی سوترا، به عنوان یکی از قوی‌ترین و پرکاربردترین کدهای عددی شبیه‌سازی پدیده هجوم آب شور معرفی می‌گردد. در قسمت بعدی این فصل برای هر کدام از اهداف این تحقیق یعنی: الف) بررسی پدیده هجوم آب شور به آبخوان‌های ساحلی در شرایط گذرا و ب) مطالعه پدیده هجوم آب شور به آبخوان‌های مجاور کویر در هنگام افت سطح ایستابی به تراز پایین‌تر از سطح آب شور کویر، توضیحاتی به ترتیب زیر ارائه می‌گردد: نحوه انجام آزمون‌های آزمایشگاهی، نحوه استخراج پارامترهای هجوم آب شور از آزمون‌های آزمایشگاهی، نحوه شبیه‌سازی عددی آزمون‌های آزمایشگاهی.

۳-۲ مدل آزمایشگاهی و تجهیزات آن

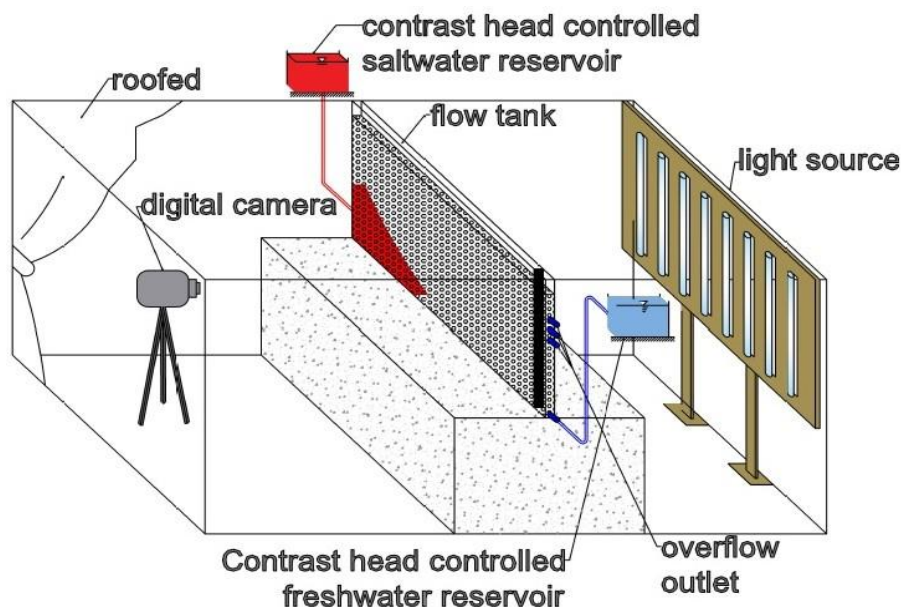
برای انجام تحقیقات آزمایشگاهی این پژوهش، نیاز به یک مخزن جریان (فلوم ماسه‌ای) دو بعدی بود. از این‌رو مخزن جریانی از جنس شیشه شفاف، با ضخامت ۱۰ میلی‌متر ساخته شد و برای استحکام بیشتر، پیرامون آن به کمک پروفیل‌های آلومینیمی مهار گردید (شکل ۳-۱). مخزن جریان به سه محفظه مجزا تقسیم شد که شامل یک محفظه مرکزی با ابعاد داخلی $4 \times 65 \times 110$ سانتی‌متر و دو محفظه جانبی با طول ۵ سانتی‌متر بود. از محفظه مرکزی به عنوان محیط متخلخل (آبخوان) و از محفظه‌های جانبی برای اعمال شرایط مرزی در طول مدت آزمایش‌ها، استفاده می‌شد. برای تثبیت ارتفاع آب شور و شیرین در محفظه‌های

جانبی، دو مخزن بزرگ با ارتفاع آب ثابت در ترازى بالاتر از محفظه‌های جانبی قرار داده شد که از طریق آن‌ها آب شور و شیرین در طول مدت آزمایش با دبی ثابت به محفظه‌های جانبی تزریق شود (شکل ۳-۲). در محفظه‌های جانبی، شیرهایی پلاستیکی در ارتفاعات مختلف تعبیه شدند تا امکان تنظیم به‌موقع ارتفاع آب شور و شیرین را فراهم کنند. برای جلوگیری از ورود دانه‌های محیط متخلخل به محفظه‌های جانبی، از صفحات پلکسی‌گلاس مشبک استفاده گردید. برای مشبک کردن صفحات پلکسی‌گلاس، ابتدا سوراخ‌های ۱/۵ میلی‌متری با فواصل مشخص بر روی آنها ایجاد شدند و سپس دورتادور صفحات سوراخ شده، توسط توری ریز پوشیده شدند. با این کار ضمن عبور جریان از صفحات مشبک از ورود دانه‌ها به محفظه‌های جانبی جلوگیری شد. این صفحات درون شیارهای آلومینیومی قرار می‌گرفت که از قبل در مرز محفظه مرکزی و محفظه‌های جانبی تعبیه شده بودند. برای ایجاد محیط متخلخل از دانه‌های شیشه‌ای در محدوده‌ی قطر ۱۰۰۰ تا ۱۱۸۰ میکرون با وزن مخصوص ۲۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب (تهیه‌شده از شرکت دانه‌های شیشه‌ای ایران بیدز) استفاده گردید. آب شیرین مورد نیاز آزمایش از آب شیر با جرم حجمی ۹۹۷/۳۰ کیلوگرم بر مترمکعب، در دمای ۲۴ درجه سانتی‌گراد تأمین شد. برای تمایز آب شور از آب شیرین و پایش آن درون محیط متخلخل، مطابق مطالعات از و همکاران (Oz et al., 2014)، چانگ و کلمنت (Chang and Clement, 2012) و گاسوامی و کلمنت (Goswami and Clement, 2007) از رنگ خوراکی استفاده گردید. قبل از انجام هر آزمایش، آب شور مورد نیاز با افزودن نمک طعام و رنگ خوراکی قرمز به آب شیرین، درون بشکه‌های ۶۰ لیتری آماده می‌گردید. جرم حجمی آب شور رنگ‌شده هم توسط چگالی سنج و هم توسط ترازوی دیجیتال اندازه‌گیری می‌شد تا از آن در شبیه‌سازی‌های عددی استفاده گردد. از آنجایی‌که در این تحقیق قرار بود برای شناسایی رفتار گوه آب شور و ناحیه اختلاط در شرایط گذرا از فن پردازش تصویر استفاده شود، لازم بود مخزن جریان درون اتاقکی تاریک قرار گیرد که نور آن فقط از یک منبع روشنایی کنترل‌شده تأمین شود. این کار موجب می‌شد تا اثر نور محیط پیرامونی بر روی تصاویر به حداقل برسد و تمامی تصاویر در شرایط نوری کاملاً یکسان گرفته شوند. بنابراین یک اتاقک چوبی با طول ۲/۸، عرض ۱/۲ و ارتفاع ۱/۵ متر ساخته شد و مخزن جریان درون آن بر روی یک میز، قرار گرفت (شکل ۳-۲ و شکل ۳-۳). اتاقک تاریک به گونه ساخته شد که قابلیت جداسازی از محل قرارگیری مخزن جریان به طرفین را داشت. به

علت ممانعت از انعکاس نور، جداره‌های داخلی اتاقک توسط رنگ مشکی مات، تیره شدند. برای ایجاد شرایط نوری یکسان در طی فرآیند آزمایش‌ها، منبع نوری شامل ۸ لامپ مهتابی فلورسنت ۲۰ وات ساخته شد. لامپ‌های منبع نور به طور موازی و با فواصل برابر بر روی یک تابلوی چوبی قرار گرفتند تا نور یکنواختی به سطح مخزن جریان بتابد. منبع نور در یک سمت اتاقک و با فاصله ۱/۲ متری از مخزن جریان قرار گرفت. برای ضبط و ثبت فرآیند هجوم آب شور درون محفظه مرکزی جریان از یک دوربین عکاسی دیجیتال (Nikon D7100) با رزولوشن 6000×3368 پیکسل که دارای قابلیت عکس‌برداری در فواصل زمانی مشخص بود استفاده شد. در شکل ۱-۳ چند تصویر از مراحل ساخت مخزن جریان (فلوم ماسه‌ای) در آزمایشگاه قرار داده شده است. شکل ۲-۳ شماتیکی از مدل آزمایشگاهی و تجهیزات به‌کاررفته در آن را درون اتاقک تاریک نشان می‌دهد و شکل ۳-۳، نمایی از اتاقک تاریک ساخته شده در آزمایشگاه است که مدل فیزیکی درون آن قرار دارد.



شکل ۱-۳ تصاویری از روند ساخت فلوم آزمایشگاهی (مخزن جریان) در آزمایشگاه.



شکل ۳-۲ شماتیکی از مدل آزمایشگاهی درون اتاقک تاریک و تجهیزات بکار رفته در آن.



شکل ۳-۳ تصویر اتاقک تاریک ساخته‌شده در آزمایشگاه، فلوم ماسه‌ای درون اتاقک قرار گرفته است.

۳-۳ اندازه‌گیری تخلخل و هدایت هیدرولیکی در آزمایشگاه

برای اندازه‌گیری تخلخل دانه‌های شیشه‌ای از روش حجمی استفاده گردید. برای انجام این روش به این صورت عمل شد که:

(الف) دانه‌ها شیشه‌ای در شرایط کاملاً اشباع درون بشر مدرج آزمایشگاهی ریخته شدند،

(ب) حجم کل نمونه اشباع از روی بشر خوانده شد (V_t)،

(ج) جرم نمونه اشباع به همراه بشر آن توسط ترازوی دیجیتال اندازه‌گیری شد (m_t)،

د) نمونه اشباع به مدت ۲۴ ساعت درون آون^۱ با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت تا کاملاً خشک شود، ه) جرم نمونه خشک‌شده به همراه بشر آن اندازه‌گیری شد (m_s).

و) جرم کل نمونه خشک و بشر از جرم کل نمونه اشباع و بشر کسر شد تا جرم آب موجود در نمونه اشباع به‌دست آید ($m_w = m_t - m_s$).

ز) از تقسیم جرم آب نمونه اشباع به جرم حجمی آب (0.9973 گرم بر سانتی مترمکعب) مقدار حجم آب نمونه اشباع محاسبه گردید ($v_w = m_w / \rho_w$).

د) حجم آب به‌دست آمده بر کل حجم نمونه اشباع تقسیم شد تا مقدار تخلخل به‌دست آید ($n = v_w / v_t$). این فرآیند برای نمونه‌هایی با حجم‌های مختلف تکرار شد که در نهایت پس از میانگین‌گیری، مقدار تخلخل دانه‌های شیشه‌ای 0.37 به‌دست آمد. شایان‌ذکر است که برای نمونه‌های مختلف، میزان تخلخل اندازه‌گیری شده در محدوده 0.364 تا 0.373 متغیر بودند. شکل ۳-۴ چند تصویر از مراحل اندازه‌گیری تخلخل دانه‌های شیشه‌ای را در آزمایشگاه نشان می‌دهد.



شکل ۳-۴ تصاویری از روند اندازه‌گیری تخلخل دانه‌های شیشه‌ای در آزمایشگاه

یکی از پارامترهای مهمی که برای شبیه‌سازی عددی نتایج آزمایشگاهی مورد نیاز است، هدایت هیدرولیکی محیط متخلخل است. هر چه هدایت هیدرولیکی محیط متخلخل در آزمایشگاه دقیق‌تر محاسبه شود، با ورود آن به مدل عددی، نتایج شبیه‌سازی عددی با داده‌های آزمایشگاهی انطباق بیشتری پیدا می‌کند. بر این اساس، در این تحقیق هدایت هیدرولیکی محیط متخلخل هم با استفاده از روش توصیف‌شده در منابع علمی

¹ Oven

(از جمله مطالعات: Oostrom et al. 1992، Gaswami and Clement 2007، Oz et al 2014 and 2015 و Robinson et al. 2015) اندازه‌گیری شد و هم با استفاده از روشی ابداعی و به کمک آنالیز تصاویر محاسبه گردید. در روش اول که به آن روش در محل نیز گفته می‌شود، هدایت هیدرولیکی در فلوم ماسه‌ای و در محل محیط متخلخل اندازه‌گیری شد. برای انجام این روش ابتدا باید یک جریان دائمی با گرادیان هیدرولیکی مشخصی درون سیستم آبخوان ایجاد شود، سپس با استفاده از قانون دارسی هدایت هیدرولیکی محیط متخلخل محاسبه گردد. بنابراین، ابتدا محیط متخلخل کاملاً از آب شیرین اشباع گردید، سپس شیرهای خروجی جریان در محفظه‌های چپ و راست به گونه‌ای تنظیم شدند که شرایط مرزی بار ثابت را در محفظه‌های جانبی، یا به عبارتی گرادیان هیدرولیکی مورد نظر را درون آبخوان، اعمال کنند. برای شکل‌گیری گرادیان هیدرولیکی، آب شیرین از پایین به محفظه سمت چپ تزریق شد تا جریان از محیط متخلخل عبور کند، این در حالی بود که مازاد آب ورودی از ارتفاع مشخص‌شده‌ی محفظه سمت چپ سرریز می‌کرد. همچنان که جریان از درون محیط متخلخل عبور می‌کرد، از ارتفاع تعیین‌شده در محفظه سمت راست نیز خارج می‌شد. پس از اطمینان از رسیدن جریان به شرایط دائمی، میزان حجم آب خروجی از محفظه راست نسبت به زمان (دبی جریان) اندازه‌گیری شد. با داشتن دبی جریان، گرادیان هیدرولیکی سطح مقطع جریان، مقدار هدایت هیدرولیکی محیط متخلخل توسط رابطه دارسی اندازه‌گیری شد. این فرآیند تحت گرادیان‌های هیدرولیکی مختلفی تکرار شد که مقدار آن از این روش در محدوده ۰/۶ تا ۰/۶۸ سانتی متر بر ثانیه به دست آمد. در روش آنالیز تصاویر، ابتدا مشابه روش فوق‌الذکر جریان آب شیرین از درون محیط متخلخل تحت گرادیان هیدرولیکی مشخصی، از چپ به راست، عبور کرد تا سیستم به شرایط دائمی رسید. این بار آب شیرین رنگ‌شده به محفظه چپ تزریق شد. آب شیرین رنگ شده به سرعت جایگزین آب شیرین معمولی در محفظه چپ شد و از ارتفاع مشخص‌شده سرریز کرد. در این شرایط آب شیرین رنگی در تمام سطح مقطع، به شکل تیغه‌ای در جهت عمومی جریان شروع به حرکت کرد (شکل ۳-۵). از لحظه ورود تیغه رنگی به محیط متخلخل تا زمان خروج آن، دوربین در فواصل ۶۰ ثانیه از حرکت آب قرمز رنگ عکس‌برداری می‌کرد. تصاویر به‌دست آمده آنالیز شدند و مدت‌زمان عبور جریان آب رنگی از درون محیط متخلخل، برای ترازهای مختلف ۵، ۱۵، ۲۵ و ۳۵ سانتی‌متری محاسبه شد. با داشتن زمان عبور

و طول محیط متخلخل، سرعت حقیقی (سرعت منفذی) برای ترازهای فوق‌الذکر محاسبه و با میانگین‌گیری از این سرعت‌ها، سرعت حقیقی کل سطح مقطع به دست آمد. سرعت حقیقی کل در تخلخل دانه‌ها ضرب و سرعت داری به دست آمد. سرانجام با استفاده از قانون داری هدایت هیدرولیکی محیط متخلخل محاسبه شد. این روند برای گرادیان‌های هیدرولیکی مختلف تکرار گردید. مقدار هدایت هیدرولیکی محیط متخلخل از این روش در محدوده $0/63$ تا $0/67$ سانتی متر بر ثانیه تخمین گردید. در نهایت مقدار هدایت هیدرولیکی محیط متخلخل $0/65$ سانتی متر بر ثانیه جهت استفاده در مدل عددی، در نظر گرفته شد.



شکل ۳-۵ پیشروی آب شیرین قرمز رنگ درون محیط متخلخل جهت اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی

۳-۴ مدل عددی سوترا

در این تحقیق برای شبیه‌سازی پدیده هجوم آب شور از کد عددی سوترا استفاده شده است. سوترا یک برنامه رایانه‌ای است که قابلیت شبیه‌سازی حرکت سیال و انتقال ماده محلول (یا انرژی) را در محیط‌های متخلخل در شرایط اشباع و غیراشباع دارد. نسخه اصلی سوترا در سال ۱۹۸۴ توسط وُس^۱ و بر اساس معادلات اساسی بیر^۲ توسعه یافت. این برنامه به ترتیب در سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۰۸ مجدداً توسط وُس و پروست^۳ بازنگری شد و تحت عنوان سوترا ۱-۲ (SUTRA 2.1) ارائه گردید. نسخه حاضر سوترا ۲-۲ (SUTRA 2.2)، آخرین نسخه ارتقاء یافته این برنامه است که توسط سازمان زمین‌شناسی امریکا در سال ۲۰۱۰ منتشر شده است. یکی از مهم‌ترین قابلیت‌های این برنامه نسبت به نسخه‌های قبلی (البته بدون کد نویسی مجدد در برنامه)، تعریف شرایط مرزی وابسته به زمان و همچنین تعریف جریان‌های ورودی و خروجی وابسته به زمان است (Voss and Provost, 2010). برنامه سوترا قادر است معادلات حاکم بر دو

¹ Voss

² Bear

³ Provost

فرآیند مرتبط به هم زیر را در هر یک از فضاها، دو و سه بعدی تقریب بزند و رفتار آنها را شبیه‌سازی کند. این دو فرآیند عبارت‌اند از: (۱) جریان آب زیرزمینی وابسته به چگالی در حالت اشباع و غیراشباع، (۲) فرآیند انتقال ماده محلول در آب زیرزمینی در حالی که ماده ممکن است در معرض جذب، تولید یا فروپاشی باشد و یا فرآیند انتقال انرژی گرمایی در آب زیرزمینی و بستر آبخوان. روابط موجود در سوترا، بر اساس معادله تعادل جرم سیال و معادله تعادل جرم ماده محلول (یا تعادل انرژی) نوشته شده است. شایان ذکر است که سوترا توانایی شبیه‌سازی هر یک از زیرمجموعه‌های اشاره شده در بالا را به طور جداگانه نیز دارد. معادلات اصلی حاکم بر جریان سیال و انتقال ماده محلول، در مدل عددی سوترا، در شرایطی که محیط متخلخل اشباع باشد و ماده محلول در معرض جذب، تولید یا فروپاشی نباشد به صورت زیر خلاصه می‌شود:

$$(\rho S_{op}) \frac{\partial P}{\partial t} + \left(\varepsilon \frac{\partial \rho}{\partial C} \right) \frac{\partial C}{\partial t} - \nabla \cdot \left[\left(\frac{k\rho}{\mu} \right) \cdot (\nabla P - \rho \mathbf{g}) \right] = Q_P \quad (1-3)$$

$$\frac{\partial(\varepsilon \rho C)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon \rho \mathbf{V} C) - \nabla \cdot [\varepsilon \rho (D_m \mathbf{I} + \mathbf{D}) \cdot \nabla C] = Q_P (C^* - C) \quad (2-3)$$

که در آن ρ چگالی سیال (M/L^3)، S_{op} ذخیره فشار ویژه آبخوان $[M/(L/T^2)]^{-1}$ که تابعی از تراکم‌پذیری اسکلت خاک و سیال است، P فشار سیال $[M/(L \cdot T^2)]$ ، ε تخلخل خاک $[1]$ ، k نفوذپذیری ذاتی خاک $[L^2]$ ، μ لزجت دینامیکی سیال $[M/(L \cdot T)]$ ، $\mathbf{g}$ بردار شتاب ثقل $[L/T^2]$ ، Q_P شار جرمی سیال منبع $[M/(L^3 \cdot T)]$ ، V میانگین سرعت سیال (L/T) که از رابطه دارسی محاسبه می‌شود، D_m ضریب پخش مولکولی $[L^2/T]$ ، $\mathbf{I}$ ماتریس همانی $[1]$ ، $\mathbf{D}$ ماتریس پراکندگی مکانیکی $[L^2/T]$ ، C غلظت جرمی محلول $[M_s/M]$ و C^* غلظت ماده محلول در سیال منبع $[M_s/M]$ است. در مدل SUTRA مقدار ضریب پخشیدگی مولکولی برای نمک 10^{-9} در نظر گرفته شده و ماتریس پراکندگی مکانیکی برای محیط دو بعدی همگن طبق روابط زیر استخراج می‌شود:

$$D = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} \\ D_{yx} & D_{yy} \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

$$D_{xx} = \frac{1}{v^2} (d_L v_x^2 + d_T v_y^2) \quad (۴-۳)$$

$$D_{yy} = \frac{1}{v^2} (d_T v_x^2 + d_L v_y^2) \quad (۵-۳)$$

$$D_{xy} = D_{yx} = \frac{1}{v^2} (d_L - d_T) (v_x v_y) \quad (۶-۳)$$

$$d_L = \alpha_L v, \quad d_T = \alpha_T v \quad (۷-۳)$$

در روابط فوق v مقدار سرعت جریان، d_L و d_T به ترتیب ضریب پراکندگی طولی و ضریب پراکندگی عرضی، α_L پراکنده‌پذیری طولی و α_T پراکنده‌پذیری عرضی است. پراکنده‌پذیری طولی، اثر ناهمگنی را در انتشار ماده حل شده در جهت جریان و پراکنده‌پذیری عرضی، اثر ناهمگنی را در انتشار ماده حل شده جهت عمود بر راستای جریان نشان می‌دهند.

سوترا برای حل معادلات جریان و انتقال، از روش‌های اجزاء-محدود و اختلاف-محدود به‌صورت توأم استفاده می‌کند. بدین‌صورت که روش اجزاء-محدود برای توصیف جمله‌هایی از معادله بکار می‌رود که بیانگر شار جرم سیال و شار جرم محلول (یا شار انرژی) باشند و سایر جمله‌ها بدون شار، با استفاده از روش اختلاف-محدود تقریب می‌خورند. این شیوه حل معادلات، قابلیت بالای سوترا را نشان می‌دهد که دقت ریاضی و انعطاف‌پذیری هندسی روش اجزاء-محدود را داراست درحالی‌که کارآمدی و سرعت عمل روش اختلاف-محدود را نیز حفظ می‌کند (Voss and Provost, 2010).

۳-۴-۱ مدل میوز^۱

مدل میوز یک رابطه گرافیکی^۲ بین کاربر و مدل عددی سوترا است که قابلیت ایجاد هندسه مدل، شبکه-بندی میدان محاسباتی، تعریف شرایط مرزی و مشاهده نتایج حل شده توسط سوترا را داراست. این مدل

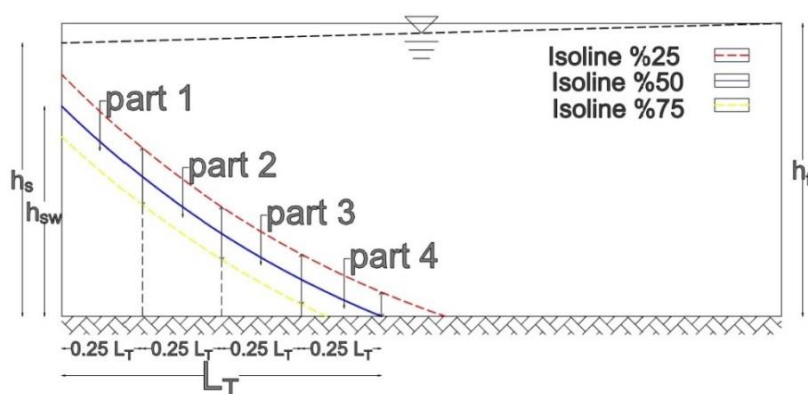
^۱ ModelMuse

^۲ Graphical-Interface

علاوه بر سوترا، در حال حاضر می‌تواند به‌عنوان رابط گرافیکی برای مدل‌های مادفلو-۲۰۰۵^۱، فست^۲، مادپست^۳ و امتی‌تری‌دی‌ام‌اس^۴ نیز مورد استفاده قرار بگیرد (Winston, 2015). مدل میوز، علاوه بر نمایش گرافیکی نتایج (مثل: سرعت، فشار، غلظت و...)، می‌تواند این نتایج را در به‌صورت ماتریس‌هایی در قالب فایل اکسل^۵ نیز ارائه کند. از ماتریس نتایج، مقدار هر پارامتر را در شرایط گذرا می‌توان با داشتن شماره سلول (شماره سطر) و شماره گام زمانی (شماره ستون) استخراج کرد.

۳-۵ هجوم آب دریا به آبخوان‌های ساحلی

در این تحقیق نیز مشابه بسیاری از مطالعات محققین قبلی، منحنی غلظت ۵۰٪ به عنوان سطح مشترک آب شور و شیرین و حد فاصله منحنی‌های ۲۵٪ تا ۷۵٪ به عنوان ناحیه اختلاط در نظر گرفته شد. برای اینکه بتوان رفتار گذرای ناحیه اختلاط در امتداد سطح مشترک را بررسی نمود، برنامه‌ریزی شد که طول پیشروی پنجه گوه در هر گام زمانی، به ۴ قسمت مساوی تقسیم شود، سپس خطوط قائمی رسم شود تا ناحیه اختلاط را به ۴ قسمت تقسیم کند. برای نمایش تغییرات ضخامت ناحیه اختلاط در امتداد سطح مشترک، میانگین ضخامت قائم ناحیه اختلاط در هر قسمت تفکیک‌شده محاسبه گردید. شکل ۳-۶ نمودار مرجعی است که نحوه محاسبه پارامترهای مختلف هجوم آب دریا را در این تحقیق نشان می‌دهد.



شکل ۳-۶ نمودار مرجع برای تعریف پارامترهای محاسبه‌شدهی هجوم آب دریا به آبخوان‌های ساحلی.

¹ MODFLOW-2005

² PHAST

³ MODPAST

⁴ MT3DMS

⁵ EXEL

پارامترهای نشان داده شده در شکل فوق عبارت‌اند از، L_t : طول پنجه گوه آب شور، h_{sw} : ارتفاع گوه آب شور روی مرز دریا، h_f : ارتفاع آب شیرین در مرز سمت راست، h_s : ارتفاع آب دریا در مرز سمت چپ و TMZ^1 : ضخامت متوسط ناحیه اختلاط برای ۴ قسمت تفکیک شده.

همان طور که در فصل اول نیز اشاره شد، علاوه بر مطالعه مسئله هجوم آب دریا در مقیاس آزمایشگاهی، جهت ایجاد دیدی واقع‌بینانه‌تر و تفسیر بیشتر نتایج آزمایشگاهی به‌دست آمده، مطالعات عددی از مقیاس-آزمایشگاهی به مقیاس میدانی توسعه یافت. در ادامه روش انجام این مطالعات و نحوه استخراج نتایج آنها بیان می‌شود.

۳-۵-۱ مطالعات انجام گرفته در مقیاس آزمایشگاهی

۳-۵-۱-۱ روش انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی

قبل از ورود دانه‌های شیشه‌ای به محفظه مرکزی، مخزن جریان از آب شیرین پر شد. سپس دانه‌ها در لایه‌های ۵ سانتی‌متری به داخل محفظه مرکزی ریخته و به‌صورت یکنواخت متراکم شدند. با این کار ضمن توزیع یکنواخت دانه‌ها، حباب‌های هوای گیر افتاده بین دانه‌ها از محیط متخلخل حذف شدند. شکل ۳-۷ نحوه پر کردن محفظه مرکزی را در آزمایشگاه نشان می‌دهد.



شکل ۳-۷ تصویر دیجیتال از نحوه متراکم کردن دانه‌های شیشه‌ای درون محفظه مرکزی

برای انجام آزمایش، در شرایطی که محیط متخلخل کاملاً از آب شیرین اشباع بود، شیرهای خروجی آب در محفظه‌های راست و چپ به ترتیب در ترازهای ۴۸/۸ سانتی‌متری و ۴۶/۸۸ سانتی‌متری باز شدند (کلیه

¹ Thickness of Mixing Zone

ترازها از کف مخزن جریان محاسبه شده‌اند). آب شیرین از پایین به محفظه سمت راست تزریق شد تا ضمن تثبیت بار در تراز ۴۸/۸ سانتی‌متری این محفظه، جریان آب از درون محیط متخلخل عبور کند و از ارتفاع ۴۶/۸۸ سانتی‌متری محفظه چپ سرریز کند. پس از رسیدن جریان به شرایط دائمی، آب شور قرمز رنگ از پایین به محفظه سمت چپ تزریق گردید. آب شور با چگالی بالا به سرعت جایگزین آب شیرین در محفظه سمت چپ شد و مازاد آن از تراز ۴۶/۸۸ سانتی‌متری سرریز می‌کرد. با جایگزینی آب شور در محفظه سمت چپ، فرآیند هجوم آب شور با تشکیل گوه آب شور درون محیط متخلخل آغاز شد. با گذشت زمان گوه آب شور پیشروی کرد تا اینکه سرانجام سیستم به شرایط دائمی رسید (مرحله اول آزمایش). پس از اطمینان از توقف گوه، ارتفاع آب شیرین در محفظه سمت راست از ۴۸/۸ سانتی‌متری به ۴۸ سانتی‌متری کاهش یافت. همان طور که انتظار می‌رفت گوه مجدداً شروع به پیشروی کرد و پیشروی آن تا رسیدن به شرایط دائمی جدید ادامه یافت (مرحله دوم یا مرحله پیشروی گوه، شکل ۴-۱). در مرحله آخر آزمایش، ارتفاع آب شیرین مجدداً از ۴۸ سانتی‌متری به ۴۸/۸ سانتی‌متری افزایش یافت. در نتیجه گوه شروع به بازگشت به سمت مرز دریا کرد تا اینکه سرانجام متوقف شد (مرحله سوم یا مرحله بازگشت، شکل ۴-۱).

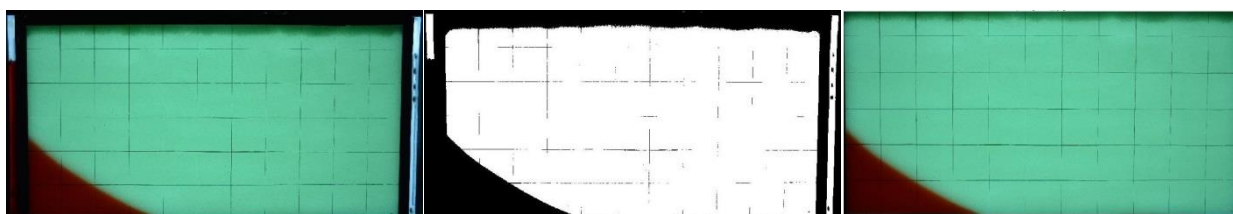
۳-۵-۱-۲ جمع‌آوری داده‌ها و پردازش تصاویر

قبل از شروع فرآیند آزمایش، شرایط نوری درون اتاق تاریک به گونه‌ای تنظیم شد که عدسی دوربین فقط نور عبوری از مخزن جریان را دریافت کند. فاصله دوربین از تانک جریان و سایر پارامترهای دوربین به گونه‌ای تنظیم شدند که مرزهای ناحیه اختلاط به خوبی شناسایی شود. بنابراین پس از آزمون‌های حساسیت (سعی و خطا)، دوربین در فاصله ۱/۵ متری مخزن جریان قرار گرفت و سایر پارامترهای دوربین با مقادیر: فاصله کانونی ۳۵ میلی‌متر، سرعت شاتر: ۰/۳۳ ثانیه، دیافراگم: f/۸، ایزو: ۳۲۰ و وایت بالانس فلورسنت تنظیم شدند. با شروع فرآیند آزمایش، حرکت گوه آب شور در فواصل زمانی ۶۰ ثانیه‌ای توسط دوربین با رزولوشن ۶۰۰۰×۳۳۶۸ پیکسل عکس‌برداری شد. تصاویر گرفته‌شده در قالب فرمت‌های RAW و JPG ذخیره شدند. برای استخراج پارامترهای مد نظر در شرایط گذرا، رشته ویدئوی به دست آمده از تصاویر

دیجیتال به صورت خودکار آنالیز شدند. برای این منظور، الگوریتم پیشنهادی در نرم‌افزار متلب^۱ پیاده‌سازی شد که در آن مراحل زیر انجام می‌گرفت:

الف) پیش‌پردازش

هدف از این مرحله، حذف خودکار نواحی خارج از محفظه مرکزی بود (شکل ۳-۸-الف). لذا ابتدا هر فریم از رشته ویدئو که تصویری رنگی است به تصویر خاکستری تبدیل شد و با اعمال یک آستانه مناسب به تصویر باینری تبدیل گردید (شکل ۳-۸-ب). سپس اجزای متصل تصویر استخراج و به کمک عملگر مورفولوژیکی^۲، تکه‌های نواحی نزدیک به هم به یکدیگر متصل شدند. پس از استخراج جزء اصلی، از آن به‌عنوان یک ماسک استفاده گردید تا محدوده مخزن از تمام فریم‌های ویدئویی استخراج شود. ماسک به دست آمده بروی تک‌تک کانال‌های رنگی RGB اعمال شد و ناحیه محفظه مرکزی تعیین گردید (شکل ۳-۸-ج).



الف) تصویر رنگی عکس‌برداری شده از کل مخزن جریان

ب) تصویر باینری مخزن جریان

ج) تصویر مجزا شده محفظه مرکزی از مخزن جریان

شکل ۳-۸ مراحل انجام پیش‌پردازش روی تصاویر آزمایشگاه

ب) استخراج داده‌ها

با توجه به اینکه در دستگاه رنگ HSI^3 فام رنگ از خلوص و روشنایی مجزا شده است برای تشخیص مرزهای گوه آب شور، به‌جای دستگاه رنگ RGB^4 ، از این فضای رنگ استفاده شد. در مدل HSI کانال H معرف فام رنگ (طول موج رنگ)، کانال S معرف خلوص رنگ و کانال I معرف روشنایی است. بنابراین نواحی از تصویر که کانال H در آن به طول موج رنگ قرمز نزدیک است و از طرفی غلظت این نواحی از یک آستانه

¹ Matlab

² Closing

³ Hue, Saturation, Intensity

⁴ Red, Green, Blue

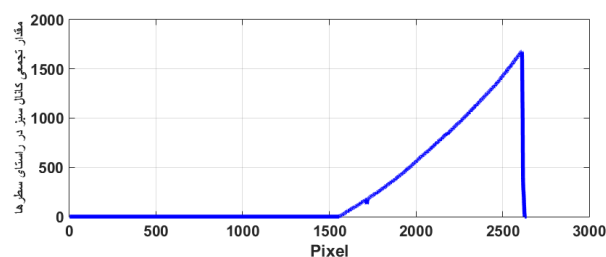
مشخص (منحنی غلظت ۵۰٪ آب شور و شیرین) بیشتر است، به عنوان مرز گوه استخراج گردید (شکل ۳-۹-الف). مساحت گوه در هر تصویر، با شمارش تعداد پیکسل‌های موجود در گوه و ضرب آنها در مساحت هر پیکسل محاسبه شد. مساحت هر پیکسل تصویر با توجه به معلوم بودن ابعاد مدل و تعداد سطر و ستون‌های تصویر دیجیتال متناظر با آن برابر $\frac{1}{46} \times \frac{1}{46}$ سانتی مترمربع محاسبه شد. برای تعیین طول پیشروی پنجه گوه، ابتدا افکنش عمودی تصویر گوه به‌دست آمد (شکل ۳-۹-ب) سپس از آخرین عنصر بردار افکنش به سمت اولین عنصر آن حرکت نموده، اولین عنصری که دارای مقدار غیر صفر بود به‌عنوان طول پیشروی پنجه گوه در نظر گرفته شد. برای تعیین ارتفاع گوه روی مرز دریا، ابتدا افکنش افقی تصویر گوه به‌دست آمد (شکل ۳-۹-ج)، سپس اولین نقطه از بردار افکنش که دارای مقداری مخالف صفر بود به‌عنوان ارتفاع گوه در نظر گرفته شد. برای شناسایی ناحیه اختلاط در امتداد سطح مشترک، برای هر تصویر ضخامت متوسط قائم هر یک از قسمت‌های ۴ گانه نشان داده‌شده در شکل ۳-۶ اندازه‌گیری شد. مطالعات ما نشان داد که کانال سبز در دستگاه رنگ RGB نمایش خوبی از غلظت رنگ در ناحیه اختلاط دارد. بنابراین برای ۵ نقطه مذکور پروفایلی از کانال سبز تصویر گوه استخراج شد (شکل ۳-۹-د). در ناحیه اختلاط، پروفایل کانال سبز از یک مقدار حداقل تا یک مقدار حداکثر افزایش می‌یافت، بنابراین طبق قرارداد ضخامت ناحیه اختلاط در هر نقطه، فاصله‌ای در نظر گرفته شد که پروفایل از ۲۵ درصد تا ۷۵ درصد مقدار بیشینه آن تغییر کند.

(ج) پردازش کل داده‌ها

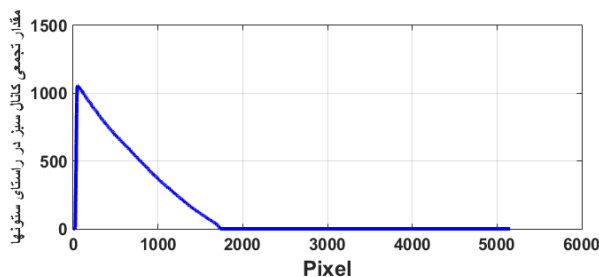
کلیه عملیات انجام‌شده در مراحل (الف) و (ب) به‌صورت خودکار برای تمام تصاویر به‌دست آمده از فرآیند آزمایش انجام شد و داده‌های به‌دست آمده در طول زمان (فاصله تصاویر متوالی ۶۰ ثانیه است) مرتب و رسم شدند.



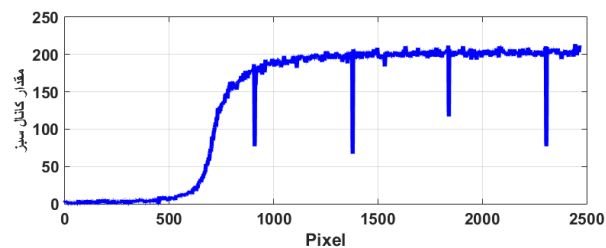
(الف)



(ب)



(ج)

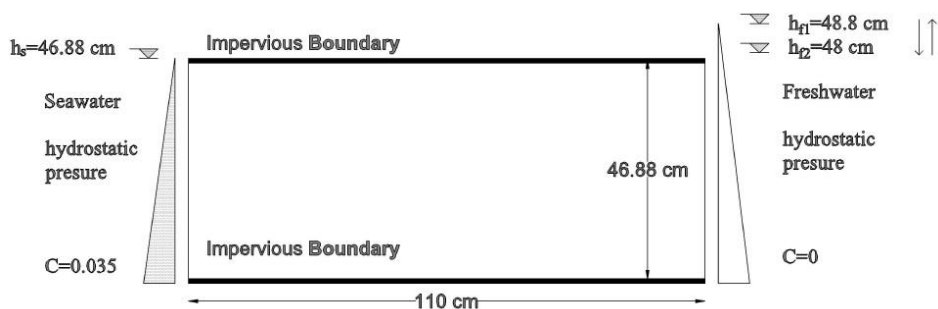


(د)

شکل ۳-۹ نحوه استخراج پارامترهای مورد نظر در فرآیند پردازش تصاویر: الف) شناسایی مرزهای گوه در دستگاه رنگ HSI، ب) نمودار افکنش عمودی گوه، ج) نمودار افکنش افقی گوه، د) تغییرات پروفایل کانال سبز تصویر

۳-۱-۵-۳ شبیه‌سازی عددی

برای شبیه‌سازی آزمون‌های آزمایشگاهی، ابتدا مستطیلی دو بعدی در مقطع- قائم با ابعاد 110×46.88 سانتی‌متر به‌عنوان میدان محاسباتی مدل عددی، در پیش‌پردازنده مدل میوز ایجاد گردید. سپس شرایط فشار هیدرواستاتیکی برای مرزهای چپ و راست میدان مدل، و شرط عدم وجود جریان برای مرزهای بالا و پایین مدل اعمال شد. شکل ۳-۱۰ شماتیکی از میدان محاسباتی مدل عددی و شرایط مرزی آن را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۰ هندسه میدان محاسباتی مدل عددی و نحوه اعمال شرایط مرزی به آن.

برای جلوگیری از نوسانات عددی، در هنگام حل عددی معادلات با سوترا، اندازه اجزاء شبکه باید به گونه‌ای تعیین شوند که شرایط پایداری مکانی را ارضاء کند. طبق تعریف، شرایط پایداری مکانی در سوترا زمانی برقرار است که عدد پکلت شبکه کوچک‌تر یا مساوی ۴ باشد (به عبارتی $Pe = \frac{\Delta X}{\alpha_L} \leq 4$). از طرفی نیز در دستورالعمل سوترا (Voss and Provost; 2010) اشاره شده است که برای شبیه‌سازی مناسب ناحیه اختلاط و در زمانی که پراکنده‌پذیری عرضی می‌تواند نقش مهمی در شکل‌گیری ناحیه اختلاط داشته باشد باید اندازه اجزاء شبکه در راستای عمود بر جریان اصلی از ۱۰ برابر پراکنده‌پذیری عرضی کمتر باشند (به عبارتی $\Delta Y < 10\alpha_T$). بنابراین برای تعیین مقادیر طولی، پراکنده‌پذیری عرضی و اندازه اجزاء شبکه میدان محاسباتی از یک فرآیند هدفمند آزمون و خطا استفاده گردید. آزمون و خطا با در نظر گرفتن محدوده پیشنهادی آبارکا و کلمنت (Abarca and Clement, 2009) برای پراکنده‌پذیری طولی (α_L) و عرضی (α_T) و با توجه به شرایط پایداری مکانی سوترا (Voss and Provost; 2010) آغاز شد. تغییر در پراکنده‌پذیری طولی، پراکنده‌پذیری عرضی و ریز کردن ابعاد شبکه مادامی ادامه داشت که اولاً نتایج عددی تطابق خوبی با داده‌های آزمایش پیدا کند، دوماً در دو شبیه‌سازی متوالی تغییری در نتایج، خصوصاً برای ناحیه اختلاط، دیده نشود. در نهایت یک شبکه یکنواخت با ابعاد $\Delta X = \Delta Z = 4\text{mm}$ که نتیجه آن ۳۲۱۷۵ سلول چهارضلعی بود برای مدل‌سازی بکار گرفته شد. مقدار گام زمانی برای شبیه‌سازی $\Delta t = 1\text{sec}$ تنظیم شد. خلاصه‌ای از پارامترهای بکار رفته در مدل سوترا برای شبیه‌سازی آزمون‌های آزمایشگاهی، در جدول ۱-۳ ارائه شده است.

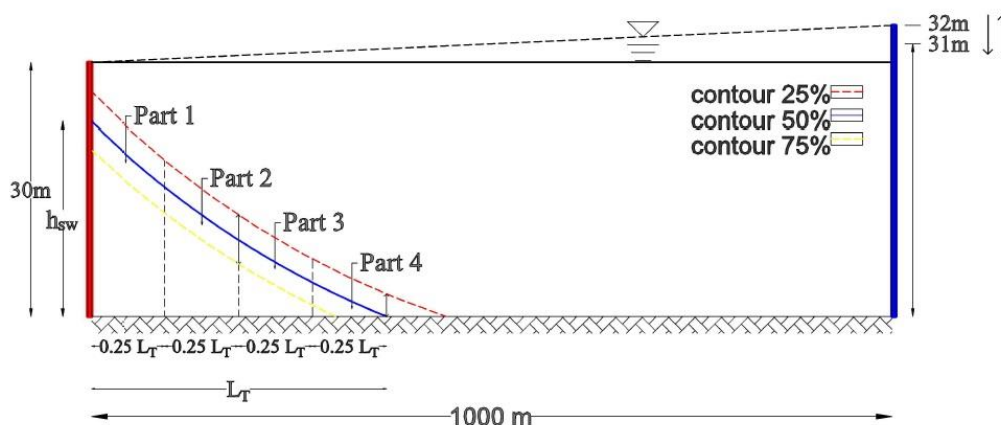
جدول ۱-۳ خلاصه‌ای از پارامترهای به‌کار رفته در مدل عددی سوترا

پارامتر	مقدار	واحد
طول میدان محاسباتی (L)	۱/۱	m
ارتفاع میدان محاسباتی (H)	۰/۴۶۸۸	m
پراکنده‌پذیری طولی (α_L)	۰/۰۰۱	m
پراکنده‌پذیری عرضی (α_T)	۰/۰۰۰۰۷۵	m
تخلخل موثر (n)	۰/۳۷	-
چگالی آب شور (ρ_s)	۱۰۲۱/۲۵	kg/m ³
چگالی آب شیرین (ρ_f)	۹۹۷/۳۰	kg/m ³
نسبت غلظت جرمی (C_s)	۰/۰۳۵	-
نفوذپذیری ذاتی (k)	۱۰E-۶/۵	m ²
ذخیره ویژه (S_s)	۰/۰۰۸	1/m

۳-۵-۲ مطالعات انجام شده در مقیاس میدانی

۳-۵-۲-۱ مدل مفهومی

در این قسمت از مطالعه، از یک آبخوان فرضی دو بعدی که در آن محیط متخلخل به صورت همگن و همسانگرد در نظر گرفته شده، استفاده می‌شود. از آنجایی که قرار بود حساسیت تغییر برخی از پارامترها بر رفتار گوه آب شور و ناحیه اختلاط سنجیده شود، لازم بود یک مسئله به عنوان مسئله مبنا که پارامترهای اولیه آن مشخص است تعریف شود. بنابراین از مشخصات هندسی و پارامترهای هیدرولوژیکی آبخوان لو و ورنر (Lu and Werner, 2013) به عنوان مسئله مبنای این تحقیق استفاده گردید (جدول ۳-۲). در مسئله مبنا طول آبخوان ۱۰۰۰ متر و ضخامت آن ۳۰ متر است. دریا در سمت چپ آبخوان واقع شده و سطح آن در تراز ۳۰ متری بستر آبخوان ثابت است. شکل ۳-۱۱ شماتیکی از مدل مفهومی آبخوان مسئله مبنا را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۱ شماتیکی از مدل مفهومی مسئله مبنا در مقیاس میدانی به همراه نمایشی از پارامترهای اندازه‌گیری شده برای گوه آب شور و ناحیه اختلاط

برای بررسی فرآیند هجوم آب دریا در مسئله مبنا، ارتفاع آب شیرین در مرز راست آبخوان از تراز ۳۲ متری به تراز ۳۱ متری به صورت آنی کاهش یافت (مرحله پیشروی گوه آب شور) و برای بررسی چگونگی برگشت آب دریا، این بار ارتفاع آب شیرین از تراز ۳۱ متری به تراز ۳۲ متری به صورت آنی افزایش یافت (مرحله برگشت گوه آب شور). در تمام شبیه‌سازی‌ها، منحنی غلظت ۵۰٪ به عنوان مرز مشترک آب شور و شیرین (مرز گوه آب شور) و منحنی‌های غلظت ۲۵٪ و ۷۵٪ به عنوان مرزهای ناحیه اختلاط در نظر گرفته شد. در

مقیاس میدانی نیز مشابه مطالعات مقیاس-آزمایشگاهی، برای بررسی رفتار ناحیه اختلاط در امتداد سطح مشترک، ناحیه اختلاط به ۴ قسمت مساوی تقسیم شد و تغییرات ضخامت ناحیه اختلاط برای هر قسمت به طور جداگانه در شرایط گذرا اندازه‌گیری شد.

جدول ۳-۲ خلاصه‌ای از پارامترهای تعریف شده در مسئله مینا

پارامتر	مقدار	واحد
طول میدان محاسباتی (L)	۱۰۰۰	m
ارتفاع میدان محاسباتی (H)	۳۰	m
پراکنده پذیری طولی (α_L)	۱	m
پراکنده پذیری عرضی (α_T)	۰/۱	m
تخلخل موثر (n)	۰/۳	-
چگالی آب شور (ρ_s)	۱۰۲۵	kg/m ³
چگالی آب شیرین (ρ_f)	۱۰۰۰	kg/m ³
نسبت غلظت جرمی (Cs)	۰/۰۳۵	-
نفوذپذیری ذاتی (k)	۱/۱۸E-۱۱	m ²
ذخیره ویژه (S_s)	۰/۰۰۸	1/m

۳-۵-۲-۲ شبیه‌سازی عددی

برای شبیه‌سازی مناسب ناحیه اختلاط، میدان مدل به شبکه‌ای کوچک با ابعاد $\Delta X = 1\text{m}$ و $\Delta Z = 0.5\text{m}$ گسسته شد به طوری که نتیجه آن ۶۰۰۰۰ سلول چهارضلعی بود. برای انتخاب ابعاد نهایی شبکه محاسباتی موارد زیر در نظر گرفته شد: الف) جواب‌های بدست آمده از دو شبیه‌سازی متوالی، ناشی از کوچک کردن شبکه، در حد قابل قبولی بر هم منطبق شوند، ب) شرط پایداری مکانی سوترا (عدد پکلت کمتر از ۴) برقرار شود. گام زمانی نیز برابر $\Delta t = 1\text{day}$ تنظیم شد. طبق مدل مفهومی مسئله، شرایط مرزی فشار هیدرواستاتیکی برای مرزهای راست و چپ میدان محاسباتی و شرط عدم وجود جریان، برای مرزهای بالا و پایین میدان محاسباتی در نظر گرفته شد. برای شناسایی رفتار گوه آب شور و ناحیه اختلاط در شرایط گذرا می‌بایست اندازه شاخص‌های در نظر گرفته‌شده برای گوه آب شور (طول پنجه گوه، ارتفاع گوه و مساحت گوه) و همچنین اندازه ضخامت ناحیه اختلاط برای هر ۴ قسمت، در گام‌های زمانی متوالی برداشت و آنالیز می‌شدند. برداشت مستقیم داده‌ها از مدل عددی سوترا و سپس آنالیز آنها، با توجه به تعدد پارامترها و همچنین مدت زمان زیاد آنها برای رسیدن به شرایط دائمی، سخت و بسیار زمان‌بر بود. بنابراین جهت

سهولت در کار و همچنین بالا بردن سرعت و دقت در استخراج نتایج، لازم بود تا برداشت و آنالیز نتایج طی یک فرآیند خودکار انجام گیرد. برای این منظور، پس از اتمام شبیه‌سازی‌ها توسط سوترا، نتایج غلظت به‌دست آمده برای تمامی گره‌های شبکه محاسباتی و در همه گام‌های زمانی، در قالب درایه‌های یک ماتریس از این برنامه خارج شدند. سپس فایل نتایج غلظت در محیط متلب فراخوانی شد. با داشتن داده‌های غلظت، در متلب الگوریتمی پیاده‌سازی شد که در آن مراحل زیر انجام می‌گرفت. الف) در هر گام زمانی، منحنی‌های غلظت مورد نظر (از جمله: منحنی ۲۵٪، ۵۰٪ و ۷۵٪) با دقت بالایی رسم می‌شدند، ب) با داشتن منحنی‌های غلظت، تمامی مشخصات مورد نظر اعم از مقدار شاخص‌های انتخابی برای گوه و ضخامت متوسط ناحیه اختلاط برای هر ۴ قسمت، اندازه‌گیری شدند، ج) مراحل الف و ب در مدت‌زمان پیشروی و برگشت آب دریا به‌صورت خودکار انجام و تغییرات هر پارامتر نسبت به زمان رسم شدند.

۳-۶ هجوم آب شور به آبخوان‌های مجاور کویر

همانطور که قبلاً اشاره گردید، غلظت آب شور کویرها (کفه‌های نمکی) در نواحی خشک و نیمه خشک، بسته به موقعیت جغرافیایی، فرآیندهای هیدرولوژیکی و مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک آن می‌تواند از مکانی به مکانی دیگر متفاوت باشد. این موضوع در بررسی‌های کیفی محققین که در فصل قبل به آنها اشاره شد نیز مشاهده گردید. هر چند در برخی حوضه‌ها ممکن است غلظت آب شور کویر (پلایا) از غلظت آب دریا فراتر برود ولی بررسی‌های میدانی انجام گرفته (قسمت ۲-۴-۳) نشان می‌دهد که در بیشتر موارد غلظت آب شور کویرها کمتر از غلظت آب دریا است. از این رو برای بررسی نحوه هجوم آب شور به آبخوان مجاور کویر، ۴ غلظت مختلف برای آب شور در نظر گرفته شد و برای هر کدام از آنها آزمایش جداگانه‌ای انجام گرفت. مشخصات آب‌های شور در نظر گرفته شده برای پلایا در جدول ۳-۳ ارائه شده است. شایان ذکر است، برای بیان شوری آب‌های زیرزمینی علاوه بر شاخص غلظت، از پارامترهای دیگری نظیر، هدایت الکتریکی^۱ و یا کل مواد جامد محلول^۲ نیز استفاده می‌شود. اما در اینجا برای یکنواختی با مسئله هجوم آب دریا از همان

^۱ Electrical Conductivity (EC)

^۲ Total dissolved solids (TDS)

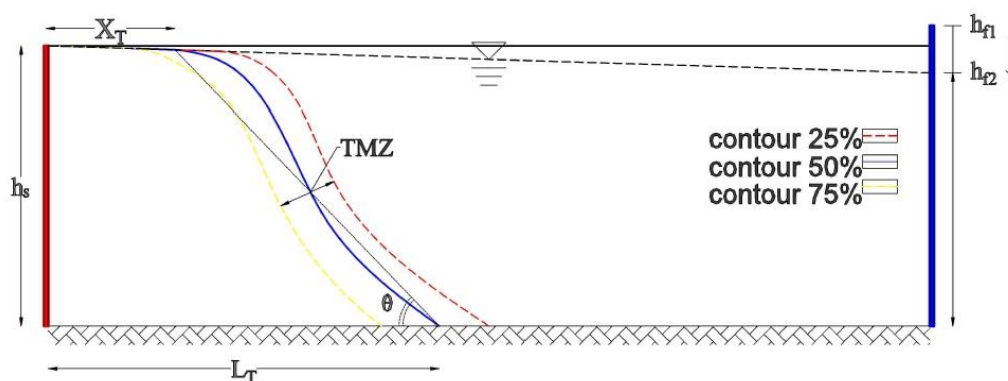
شاخص غلظت استفاده شده است. ضمن این‌که با داشتن مقدار هر یک از این پارامترها، می‌توان پارامتر دیگر را طبق رابطه (۸-۳) محاسبه نمود.

$$C \left(\frac{gr}{lit} \right) = TDS(PPM) \times E^{-3} = 0.64 \times EC \left(\frac{\mu S}{cm} \right) \times E^{-3} \quad (۸-۳)$$

جدول ۳-۳ مشخصات کیفی آب‌های شور در نظر گرفته شده برای پلایاها

شماره آزمایش	۱	۲	۳	۴
مشخصات آب شور				
غلظت $C \left(\frac{gr}{lit} \right)$	۵	۱۵	۲۵	۳۵
هدایت الکتریکی $EC \left(\frac{\mu S}{cm} \right)$	۷۸۱۲	۲۳۴۳۷	۳۹۰۶۲	۵۴۶۸۶
$TDS(PPM)$ کل مواد جامد محلول	۵۰۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۳۵۰۰۰
چگالی $\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right)$	۱۰۰۰/۳۰	۱۰۰۷/۳۰	۱۰۱۴/۳۰	۱۰۲۱/۲۵

مقادیر چگالی آب شور نوشته شده در جدول ۳-۳، با استفاده از ترازوی دیجیتالی و چگالی سنج قبل از انجام هر آزمایش در آزمایشگاه اندازه‌گیری شده است. برای اینکه بتوان مقایسه‌ای منطقی از شکل پیشروی آب شور برای ۴ غلظت انتخاب شده داشت، مقدار گرادیان‌های هیدرولیکی اعمال شده بر سیستم آبخوان برای هر ۴ آزمایش یکسان در نظر گرفته شد. شکل ۳-۱۲ نمودار مرجعی است که نحوه اندازه‌گیری پارامترهای هجوم آب شور را در این تحقیق نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۲ نمودار مرجع برای تعریف پارامترهای هجوم آب شور به آبخوان مجاور کویر

پارامترهای نشان داده شده در شکل فوق عبارتند از:

L_t : طول پیشروی پنجه سطح مشترک آب شور و شیرین،

X_t : طول پیشروی راس سطح مشترک آب شور و شیرین،

θ : زاویه هجوم آب شور یا شیب سطح مشترک آب شور و شیرین،

S : مساحت اشغال شده توسط آب شور در زیر منحنی غلظت ۰.۵٪ و

TMZ : ضخامت متوسط ناحیه اختلاط، حدفاصل منحنی‌های غلظت ۰.۲۵٪ تا ۰.۷۵٪.

نتایج آزمایشگاهی نشان داد که با تغییر غلظت آب شور، شیب سطح مشترک نیز تغییر می‌کند (شکل ۴-۱۷). از این رو اندازه‌گیری ضخامت ناحیه اختلاط در راستای قائم (مشابه آبخوان ساحلی)، نمی‌توانست پارامتر مناسبی برای مقایسه گسترش ناحیه اختلاط در غلظت‌ها مختلف باشد. بنابراین تعریف دیگری برای ضخامت متوسط ناحیه اختلاط صورت گرفت که طبق آن ضخامت متوسط ناحیه اختلاط (TMZ) از تقسیم مساحت ناحیه اختلاط (A) بر طول سطح مشترک (L) بدست می‌آمد ($TMZ = \frac{A}{L}$).

۳-۶-۱ روش انجام آزمایش‌ها در آزمایشگاه

برای مهیا کردن محیط متخلخلی همگن و شفاف، اولاً: قبل از شروع هر آزمایش، دانه‌های شیشه‌ای در شرایط کاملاً اشباع، در لایه‌های ۵ سانتی‌متری به داخل محفظه مرکزی ریخته می‌شدند و به صورت یکنواخت متراکم می‌گشتند، ثانیاً: پس از اتمام هر آزمایش، دانه‌های شیشه‌ای از محفظه مرکز خارج و با استفاده از آب شیرین به گونه‌ای شسته می‌شدند که تمامی نمک‌ها و رنگ‌های آزمایش قبلی از آنها حذف شوند. برای مدل‌سازی شکل پیشروی آب شور در آبخوان مجاور کویر، ۴ آزمایش با ۴ غلظت مختلف (جدول ۳-۳) انجام گرفت. فرآیند انجام همه آزمایش‌ها با یکدیگر مشابه بودند و در همه آن‌ها مراحل زیر انجام گرفت: (۱) ابتدا ارتفاع آب شیرین در محفظه‌های راست و چپ به ترتیب در ترازهای ۴۸/۸ و ۴۶/۸۸ سانتی‌متری تنظیم شدند، سپس مشابه روش توصیف‌شده در آبخوان ساحلی (قسمت ۳-۵-۱)، یک جریان دائمی از سمت راست به سمت چپ محفظه مرکزی ایجاد گردید. (۲) آب شور قرمز رنگ از پایین به محفظه

چپ تزریق شد تا جایگزین آب شیرین در این محفظه شود، سپس به سیستم اجازه داده شد که آب شور، در صورت امکان، از عمق به داخل آبخوان نفوذ کند. ۳) پس از اطمینان از رسیدن جریان به شرایط دائمی در مرحله دوم آزمایش، ارتفاع آب شیرین محفظه راست از تراز ۴۸/۸ سانتی‌متری به تراز ۴۵/۳۵ سانتی‌متری کاهش یافت، به عبارتی گرادیان هیدرولیکی معکوس شد، در نتیجه آب‌های شور محفظه سمت چپ (کویر) از سرتاسر مقطع عرضی جریان به داخل آبخوان هجوم آوردند. در این شرایط هجوم آب شور برای هر آزمایش مادامی ادامه یافت که پنجه سطح مشترک به انتهای مخزن جریان رسید.

۳-۶-۱-۱ جمع‌آوری داده‌ها و پردازش تصاویر

کاملاً روشن است که هر چه تصاویر دیجیتالی دارای شدت نور یکنواخت‌تر و نوفه کمتری باشد، نتایج به‌دست آمده از فن پردازش تصویر دارای خطای کمتری است. برای این منظور می‌بایست تمامی عوامل اثرگذار بر کیفیت تصاویر آزمایشگاهی از قبیل شرایط نوری اتاق تاریک، فاکتورهای مختلف دوربین و فاصله دوربین از مخزن جریان به شکل مناسبی تنظیم شوند. با توجه به این که همه این عوامل برای آزمایش قبلی (آزمایش هجوم آب شور به آبخوان ساحلی)، پس از انجام آنالیزهای مختلف حساسیت تنظیم‌شده بودند، در این آزمایش‌ها نیز از همان تنظیمات استفاده گردید. با شروع هر آزمایش، دوربین در فواصل زمانی ۶۰ ثانیه‌ای از فرآیند هجوم آب شور در محفظه مرکزی عکس‌برداری می‌کرد و تصاویر در قالب‌های RAW و JPG ذخیره می‌گشتند. برای استخراج پارامترهای مورد نظر، مجموعه تصاویر به‌دست آمده از هر آزمایش به محیط متلب فراخوانی شدند تا با استفاده از الگوریتمی که به همین منظور پیاده‌سازی شده بود مورد پردازش قرار بگیرند. در این الگوریتم، مراحل زیر انجام می‌گرفت:

الف) پیش‌پردازش

مراحل انجام پیش‌پردازش در این قسمت، مشابه فرآیند توضیح داده شده در آبخوان ساحلی است. با این حال به طور خلاصه فرآیند پیش‌پردازش در اینجا نیز ذکر می‌شود. هدف از این مرحله، استخراج خودکار محدوده محفظه مرکزی جریان (جایی که فرآیند هجوم آب شور در آن رخ می‌دهد) از کل مخزن جریان در هر تصویر آزمایشگاهی بود. بنابراین ابتدا هر تصویر رنگی گرفته‌شده در آزمایشگاه (تصویر ورودی)، به تصویر

خاکستری تبدیل شد. تصویر خاکستری، با اعمال یک آستانه مناسب (در اینجا $0/2$) به تصویر باینری تبدیل گردید. در تصویر باینری، حفره‌های نمایان می‌شد که ناشی از نوفه تصویربرداری و دانه‌های محیط متخلخل بود. این حفره‌ها با کمک عملگر مورفولوژیکی کلوزینگ، پر شدند تا یک ناحیه مستطیلی یکپارچه که به آن ماسک گفته می‌شود به دست آید. ماسک به دست آمده، بروی تک‌تک کانال‌های رنگی (RGB) تصویر اعمال شد تا ناحیه محفظه مرکزی از مخزن جریان جدا گردد.

(ب) استخراج داده‌ها

چون در دستگاه رنگ HSI فام رنگ از خلوص و روشنایی مجزا است، جهت شناسایی ناحیه پیشروی آب شور به جای دستگاه رنگ RGB از این فضای رنگ استفاده شد. بنابراین در این مرحله، تصویر رنگی محفظه مرکزی به سیستم HSI منتقل گردید. در مدل HSI کانال H معرف فام رنگ (طول موج رنگ)، کانال S معرف خلوص رنگ (غلظت رنگ) و کانال I معرف روشنایی است. چون ناحیه پیشروی آب شور در تصویر، دارای پس زمینه مشخصی (قرمز رنگ) بود، برای کانال H تصویر، آستانه $0/3$ و برای کانال S تصویر، آستانه $0/5$ (غلظت 50% آب شور و شیرین) در نظر گرفته شد. با این کار در سیستم رنگ HSI، ناحیه پیشروی آب شور از ناحیه آب شیرین به طور دقیق تفکیک شد. تصویر به دست آمده در سیستم HSI، مجدداً برچسب-گذاری شد تا ناحیه پیشروی آب شور به عنوان یک ناحیه مستقل انتخاب شود و پارامترهای مورد نظر برای این ناحیه اندازه‌گیری شود. مساحت ناحیه پیشروی آب شور (S)، با شمارش تعداد پیکسل‌های موجود در این ناحیه و ضرب آنها در مساحت یک پیکسل ($\frac{1}{46} \times \frac{1}{46}$)، برحسب سانتی‌متر مربع اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری سایر پارامترهای هجوم آب شور، لازم بود ابتدا مرز مشترک آب شور و شیرین مشخص شود. بنابراین این مرز با استفاده از عملیات مورفولوژیکی تعیین گردید و بر اساس آن هر پارامتر به شرح زیر استخراج شد:

✓ طول پیشروی پنجه سطح مشترک (L_t): این پارامتر با خواندن شماره بیشترین پیکسل افقی موجود بر روی سطح مشترک و سپس تبدیل آن به مقدار برابر در واحد سانتی‌متر (هر پیکسل $\frac{1}{46}$ سانتی‌متر است)، به دست آمد.

- ✓ طول پیشروی رأس سطح مشترک (X_t): این پارامتر با خواندن شماره پیکسل افقی قرارگرفته در ارتفاع ۴۶/۸۸ سانتی‌متری سطح مشترک و تبدیل آن به واحد سانتی متر اندازه‌گیری شد.
- ✓ زاویه هجوم آب شور (θ): برای محاسبه این پارامتر، ابتدا ارتفاع رأس سطح مشترک بر فاصله افقی مابین رأس تا پنجه تقسیم شد. سپس آرک‌تانژانت آن به‌عنوان زاویه هجوم آب شور در نظر گرفته شد.
- ✓ مساحت ناحیه اختلاط (A): طبق تعریف، ناحیه اختلاط منطقه‌ای است که در آن غلظت سیال از ۲۵٪ تا ۷۵٪ غلظت بیشینه آب شور تغییر می‌کند. لذا برای شناسایی این ناحیه بر روی کانال S تصویر (کانال غلظت رنگ)، آستانه حداکثر ۰/۷۵ و آستانه حداقل ۰/۲۵ اعمال شد تا ناحیه اختلاط برای هر تصویر از سایر نواحی موجود در تصویر تفکیک شود. سپس ناحیه اختلاط برچسب‌گذاری شد و با شمارش تعداد پیکسل‌های موجود در آن مساحت ناحیه اختلاط به‌دست آمد.
- ✓ طول سطح مشترک (L): با داشتن مختصات نقاط پنجه و رأس سطح مشترک این پارامتر با استفاده از قضیه فیثاغورس استخراج گردید.
- ✓ ضخامت متوسط ناحیه اختلاط (TMZ): از تقسیم مساحت ناحیه اختلاط (A) بر طول سطح مشترک (L) محاسبه شد.

ج) پردازش کل داده‌ها

کلیه عملیات انجام‌شده در مراحل (الف) و (ب) به‌صورت خودکار برای تمام تصاویر به‌دست آمده از فرآیند آزمایش انجام شد و داده‌های به‌دست آمده در طول زمان (فاصله تصاویر متوالی ۶۰ ثانیه است) مرتب و رسم شدند.

۳-۶-۲ شبیه‌سازی عددی

در آزمون‌های آزمایشگاهی، مشخصات فیزیکی محیط متخلخل، مشخصات هیدرولیکی سیستم آبخوان و فرآیند انجام آزمایش‌ها برای هر ۴ آزمایش با هم یکسان بودند. این موضوع در هنگام شبیه‌سازی عددی نیز رعایت گردید. به طوری که در هنگام شبیه‌سازی عددی، ابعاد هندسه مدل، نحوه اعمال شرایط مرزی و سایر مشخصات هیدرولیکی و زمین‌شناختی محیط متخلخل برای هر ۴ آزمایش یکسان در نظر گرفته شد. فقط

قبل از شبیه‌سازی هر آزمایش، میزان غلظت مرتبط به آن آزمایش به مدل عددی وارد می‌گردد. برای شبیه‌سازی عددی ابتدا در پیش‌پردازنده مدل میوز، یک مستطیل دو بعدی با ابعاد $۱۱۰ \times ۴۶/۸۸$ سانتی‌متر به عنوان میدان مدل عددی ایجاد گردید. همان‌گونه که قبلاً بیان گردید برای برقراری شرایط پایداری مکانی SUTRA، اندازه ابعاد شبکه و پراکنده‌پذیر طولی باید طوری تعیین شوند که عدد پکلت شبکه کمتر از ۴ باشد ($Pe < 4$). همچنین مقدار پارامترهای فوق و پارامتر پراکنده‌پذیری عرضی باید به گونه‌ای باشند که نتایج عددی بیشترین انطباق را با داده‌های آزمایشگاهی، خصوصاً برای ناحیه اختلاط، داشته باشد. چون ساختار محیط متخلخل و ابعاد مدل آزمایشگاهی در این سری از آزمایش‌ها، نسبت به شرایط آزمایش قبلی (آبخوان ساحلی) تغییر نکرده بودند، از نتایج واسنجی شبیه‌سازی آزمایش قبلی به‌عنوان حدس اولیه‌ای برای تعیین پارامترهای پراکنده‌پذیری طولی، پراکنده‌پذیری عرضی و اندازه ابعاد شبکه مدل عددی استفاده گردید. بدیهی است که در این شرایط فرآیند واسنجی با سرعت بیشتری پایان یافت، به طوری که ابعاد شبکه مشابه آزمایش قبلی باقی ماند و فقط تغییرات کوچکی در پراکنده‌پذیری طولی به وجود آمد. نتایج اندازه‌گیری شده برای پراکنده‌پذیرهای طولی و عرضی، به همراه سایر پارامترهای بکار رفته در مدل عددی در جدول ۳-۴ آمده است. شرایط مرزی میدان مدل عددی با در نظر گرفتن شرایط موجود در آزمایشگاه اعمال شد. بنابراین برای مرزهای چپ و راست، شرایط فشار هیدرو استاتیکی و برای مرزهای بالا و پایین، شرط عدم وجود جریان بکار رفت. مقدار گام زمانی نیز برای شبیه‌سازی عددی آزمون‌های آزمایشگاهی برابر $\Delta t = 1 \text{ sec}$ تنظیم شد.

جدول ۳-۴ خلاصه‌ای از پارامترهای به‌کاررفته در مدل عددی سوترا برای شبیه‌سازی آزمون‌های آزمایشگاهی

پارامتر	مقدار	واحد
طول میدان محاسباتی (L)	m	۱/۱
ارتفاع میدان محاسباتی (H)	m	۰/۴۵۳۵
پراکنده‌پذیری طولی (α_L)	m	۰/۰۰۰۷۵
پراکنده‌پذیری عرضی (α_T)	m	۰/۰۰۰۰۷۵
تخلخل موثر (n)	-	۰/۳۷
چگالی آب شیرین (ρ_f)	kg/m^3	۹۹۷/۳۰
نفوذپذیری ذاتی (k)	m^2	$1.0 \times 10^{-6}/5$
ذخیره ویژه (S_s)	1/m	۰/۰۰۸

فصل ۴ نتایج و بحث

۴-۱ مقدمه

در فصل قبل، توضیحاتی در مورد نحوه انجام آزمون‌های آزمایشگاهی، شبیه‌سازی‌های عددی و چگونگی استخراج نتایج آنها بیان گردید. در این فصل، نتایج استخراج شده ارائه و مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به اهداف این تحقیق، ابتدا به مسئله هجوم آب دریا به آبخوان‌های ساحلی پرداخته می‌شود. در این قسمت تمرکز اصلی بر بررسی رفتار گوه آب شور و ناحیه اختلاط در شرایط گذرا است. در ادامه این فصل، نتایج آزمایشگاهی و عددی مرتبط با مسئله هجوم آب شور به آبخوان‌های مجاور کویر ارائه می‌شود و بر اساس آن‌ها شکل پیشروی سطح مشترک آب شور و شیرین و نحوه گسترش ناحیه اختلاط به درون آبخوان در مدت زمان فرآیند هجوم، مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

۴-۲ هجوم آب دریا به آبخوان‌های ساحلی در شرایط گذرا

۴-۲-۱ رفتار گوه آب شور

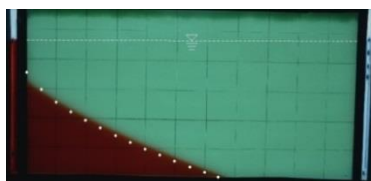
مرور منابع علمی در فصل دوم نشان داد که اغلب مطالعات آزمایشگاهی و عددی قبلی، یا شرایط دائمی پدیده هجوم آب دریا را بررسی کرده‌اند و یا در صورت بررسی این پدیده در شرایط گذرا، فقط به اندازه‌گیری شاخص طول پنجه گوه در زمان‌های محدود و مشخص تاکید داشته‌اند. در این پژوهش، به منظور بررسی کامل‌تر رفتار گوه آب شور، علاوه بر تغییرات شاخص طول پنجه گوه، تغییرات دو شاخص مساحت گوه و ارتفاع گوه نیز در شرایط گذرا مورد بررسی قرار گرفته است.

۴-۲-۱-۱ نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی و عددی در مقیاس - آزمایشگاه

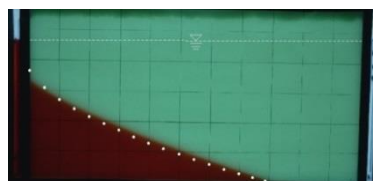
همان‌طور که در فصل سوم اشاره شد، به منظور بررسی رفتار گوه آب شور و ناحیه اختلاط در شرایط گذرا، آزمایش‌ها در سه مرحله انجام گرفت. در مرحله اول، آب شور قرمز رنگ به سرعت جایگزین آب شیرین در محفظه چپ شد، در نتیجه یک افزایش فشار آبی در محدوده مرز دریا ایجاد گردید و گوه آب شور با سرعت نسبتاً بالایی به درون محیط متخلخل پیشروی کرد. به علت صرف‌نظر کردن از اثرات شرایط مرزی بر پیشروی گوه آب شور، رفتار گوه آب شور در مرحله اول آزمایش بررسی نشده است. تنها از شرایط دائمی

مرحله اول به عنوان شرط اولیه‌ای برای مرحله دوم یا مرحله پیشروی گوه استفاده گردید. در شرایط دائمی مرحله اول، شاخص طول پنجه گوه (L_T) برابر $38/24$ سانتی‌متر، مساحت گوه (S_{sw}) برابر $378/33$ سانتی-متر مربع و ارتفاع گوه روی مرز دریا (h_{sw}) برابر $24/52$ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. در مرحله دوم یا مرحله پیشروی گوه، ارتفاع آب شیرین درون محفظه سمت راست از $48/8$ سانتی‌متری به 48 سانتی‌متری کاهش یافت و در مرحله سوم یا مرحله بازگشت گوه، مجدداً ارتفاع آب شیرین به وضعیت اول خود یعنی تراز $48/8$ سانتی‌متری برگشت داده شد. شکل ۴-۱ تصاویری از پیشروی و بازگشت گوه آب شور را درون محفظه‌ی مرکزی جریان نشان می‌دهد. به منظور مقایسه بهتر داده‌های آزمایشگاهی با نتایج عددی، نتایج شبیه‌سازی عددی نیز برای کانتور غلظت 50 درصد آب شور و شیرین به شکل دایره‌های سفید رنگ بر روی تصاویر دیجیتال مشخص شده است. با این حال، نتایج شبیه‌سازی عددی تنها در شکل ۴-۲ آمده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که تطابق خوبی بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی عددی ایجاد شده است. هر چند نتایج عددی انحنای بیشتر سطح مشترک را نسبت به داده‌های آزمایشگاهی، به ویژه در نزدیکی مرز دریا، نشان می‌دهند. رابینسون و همکاران (Robinson et al., 2015)، علت خطی‌تر بودن سطح مشترک را در مدل‌های فیزیکی نسبت به مدل‌های عددی، وجود ناهمگنی‌های جزئی در محیط متخلخل که ناشی از تغییرات کوچک اندازه قطر دانه‌ها است، بیان کردند. کاهش ارتفاع آب شیرین در آغاز مرحله پیشروی باعث کاهش نیروهای اندرکنشی اعمال‌شده از طرف آب شیرین بر گوه آب شور شد. در نتیجه تعادل موجود در سیستم آبخوان به هم خورد و گوه به درون آبخوان تا رسیدن به شرایط تعادل جدید پیشروی کرد (شکل ۴-۱ الف و شکل ۴-۲ الف). در مقابل با افزایش ارتفاع آب شیرین، نیروهای اندرکنشی اعمال‌شده از طرف آب شیرین بر گوه افزایش یافت و گوه به سمت دریا عقب رانده شد (شکل ۴-۱ ب و شکل ۴-۲ ب).

الف) advancing wedge



Time=60 min



Time=120 min

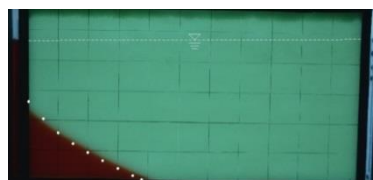


Time= 180 min

ب) receding wedge



Time= 60 min



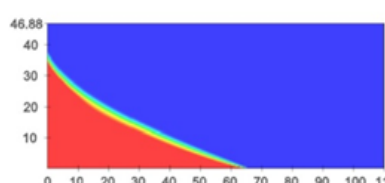
Time= 120 min



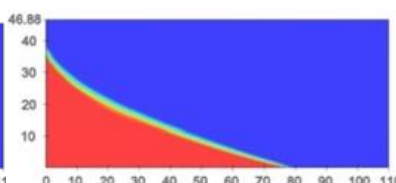
Time= 150 min

شکل ۴-۱ تصاویری از حرکت گوه آب شور در مدل فیزیکی : الف) مرحله پیشروی گوه، ب) مرحله بازگشت گوه، نقاط سفید رنگ نتایج حل عددی برای غلظت ۵۰٪ را نشان می‌دهند.

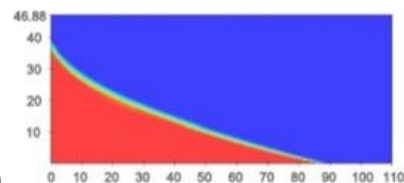
الف) advancing wedge



Time=60 min

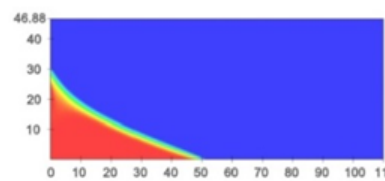


Time=120 min

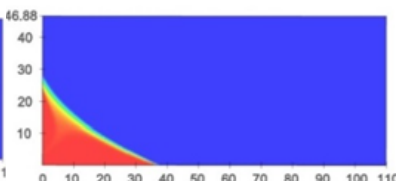


Time= 180 min

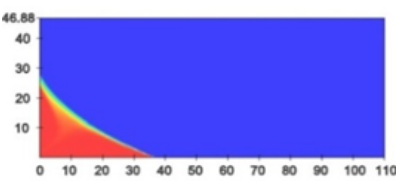
ب) receding wedge



Time= 60 min



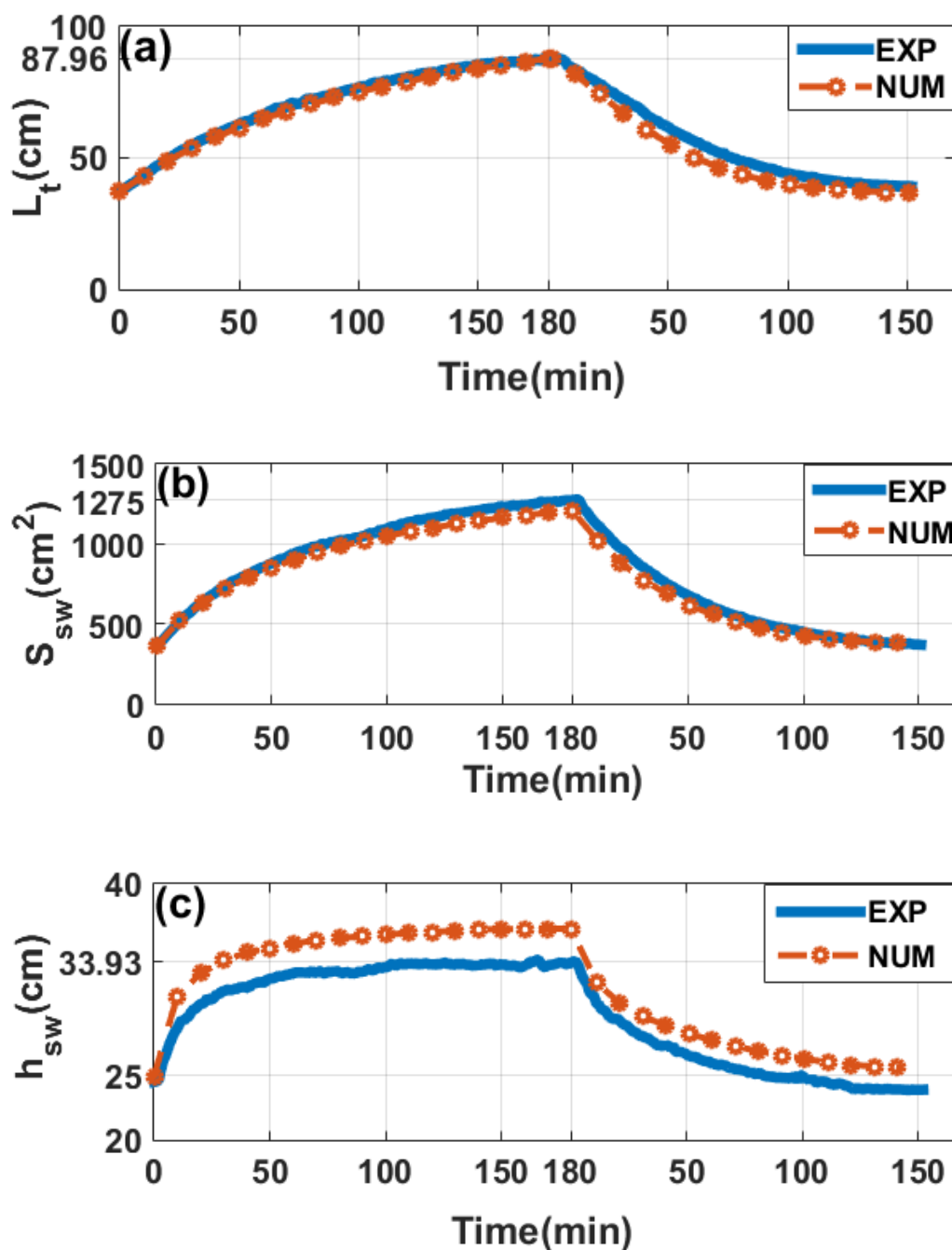
Time= 120 min



Time= 150 min

شکل ۴-۲ نتایج شبیه‌سازی عددی حرکت آب شور در شرایط گذرا: الف) مرحله پیشروی گوه ب) مرحله بازگشت گوه.

شکل ۴-۳ تغییرات شاخص‌های مختلف گوه آب شور را نسبت به زمان، بر اساس نتایج آزمایشگاهی و عددی، نشان می‌دهد. نتایج آزمایشگاهی و عددی به ترتیب در فواصل ۱ دقیقه‌ای و ۱۰ دقیقه‌ای، بر مبنای کانتور غلظت ۵۰ درصد آب شور و شیرین، به صورت خودکار استخراج و رسم شده‌اند.



شکل ۳-۴ رفتار گذرای شاخص‌های گوه آب شور در مرحله پیشروی (شاخه صعودی) و مرحله بازگشت (شاخه نزولی): الف) طول پنجه گوه، ب) مساحت گوه، ج) ارتفاع گوه.

در شکل ۳-۴ و شکل‌های بعدی، شاخه صعودی هر نمودار مربوط به مرحله پیشروی گوه آب شور و شاخه نزولی هر نمودار مربوط به مرحله بازگشت گوه آب شور است. شکل ۳-۴-الف و شکل ۳-۴-ب انطباق خوب نتایج آزمایشگاهی و عددی را در شرایط گذرا به ترتیب برای شاخص‌های طول پنجه گوه (L_T) و مساحت گوه (S_{sw}) نشان می‌دهد. شکل ۳-۴-ج نیز نشان می‌دهد که روند تغییرات شاخص ارتفاع گوه (h_{sw}) برای

هر دو نوع مدل سازی عددی و آزمایشگاهی در شرایط گذرا شبیه به هم است، ولی بنا بر دلایلی که در بالا به آن اشاره شد اختلاف اندکی بین نتایج آزمایشگاهی و عددی از نظر مقدار بزرگی آنها وجود دارد. نگاهی اجمالی به نمودار شکل ۴-۳-الف نشان می دهد که پنجه گوه، در وضعیت بازگشت نسبت به وضعیت پیشروی، زودتر به شرایط دائمی می رسد. مدت زمان رسیدن به شرایط دائمی در مرحله بازگشت تقریباً ۱۳۰ دقیقه است در صورتی که در مرحله پیشروی تقریباً ۱۷۵ دقیقه است. این پدیده اولین بار در مطالعه آزمایشگاهی و عددی چانگ و کلمنت (Chang and Clement, 2012) مشاهده و بررسی شد و پس از آن نیز در مطالعه عددی لو و ورنر (Lu and Werner, 2013) و مطالعه آزمایشگاهی رابینسون و همکاران (Robinson et al., 2015) به آن پرداخته شد. چانگ و کلمنت (Chang and Clement, 2012) علت این پدیده را تغییر در میدان جریان و ایجاد جریان های همسوی آب شور و شیرین به سمت دریا، در هنگام بازگشت گوه آب شور، عنوان کردند. نگاهی عمیق تر به نمودارهای شکل ۴-۳ نشان می دهد که روند تغییرات شاخص مساحت گوه در شرایط گذرا، مشابه روند تغییرات شاخص پنجه گوه است (به عبارتی شیب خط مماس بر دو منحنی در زمان های برابر تقریباً با هم برابرند). در صورتی که این شرایط برای شاخص ارتفاع گوه متفاوت از دو شاخص دیگر به نظر می رسد. برای روشن کردن این موضوع، باید نمودار تغییرات هر سه شاخص نسبت به زمان در یک شکل واحد رسم شود. بنابراین از تغییرات نسبی هر شاخص (تغییرات هر شاخص تقسیم بر کل تغییرات آن شاخص) که پارامتر بدون بعدی است و امکان مقایسه را مستقل از واحد و مقدار کل تغییرات فراهم می کند استفاده شده است. به عنوان مثال برای شاخص طول پنجه گوه، تغییرات نسبی آن از رابطه (۴-۱) محاسبه می شود. بدیهی است که هر یک از دو شاخص دیگر نیز می توانند جانشین طول پنجه گوه در رابطه (۴-۱) شوند.

$$X_T^*(t) = \frac{|X_T(t_0) - X_T(t)|}{\Delta X_T} \quad (۴-۱)$$

در رابطه فوق هر یک از پارامترها به صورت زیر تعریف می شوند:

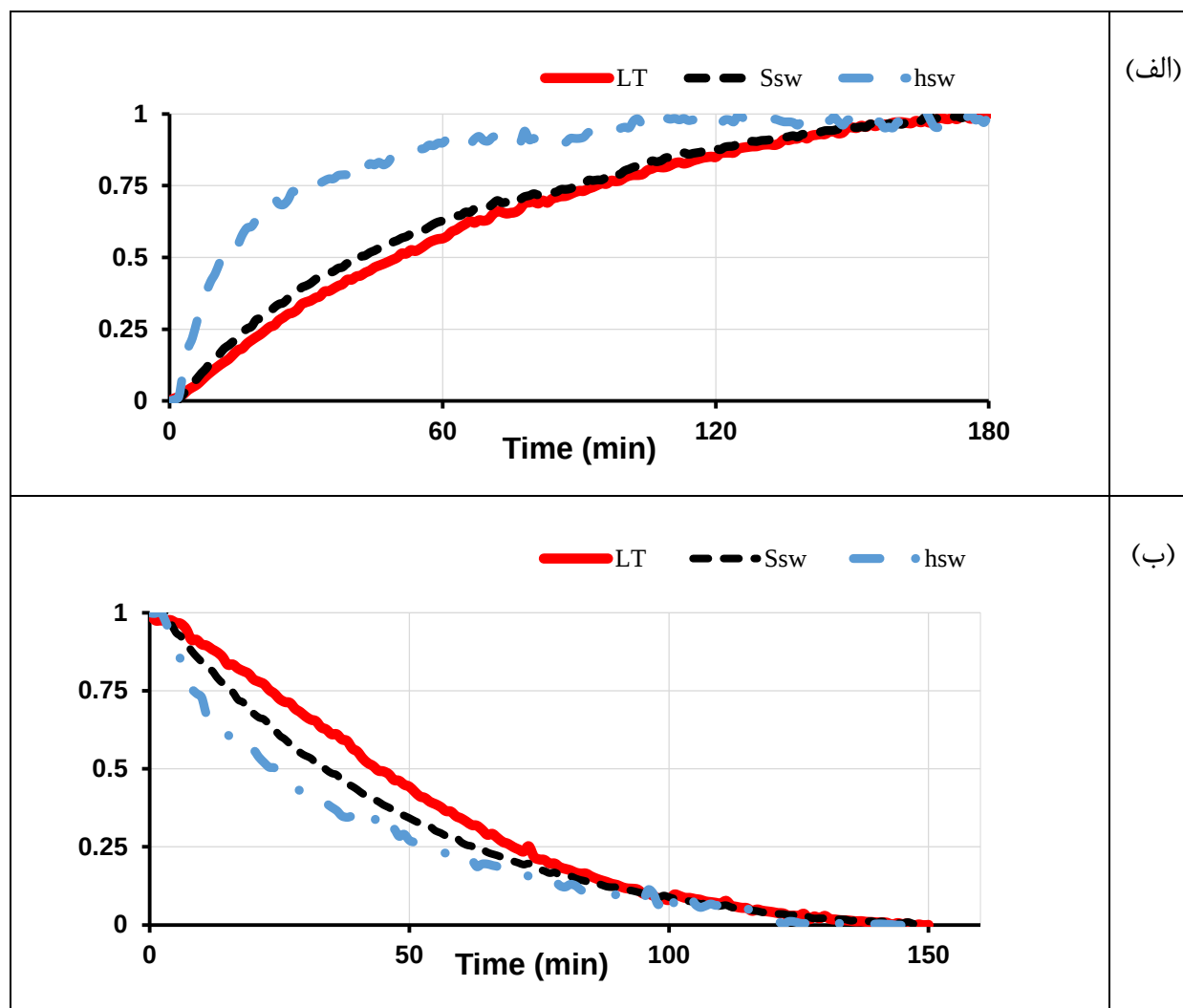
$X_T^*(t)$: جابجایی نسبی طول پنجه گوه پس از مدت زمان t از شروع هر مرحله (پیشروی یا بازگشت)،

$X_T(t_0)$: اندازه شاخص طول پنجه گوه در آغاز هر مرحله،

$X_T(t)$: اندازه شاخص طول پنجه گوه پس از طی مدت زمان t از آغاز هر مرحله و

ΔX_T : اندازه کل جابجایی انجام شده توسط پنجه گوه در هر مرحله.

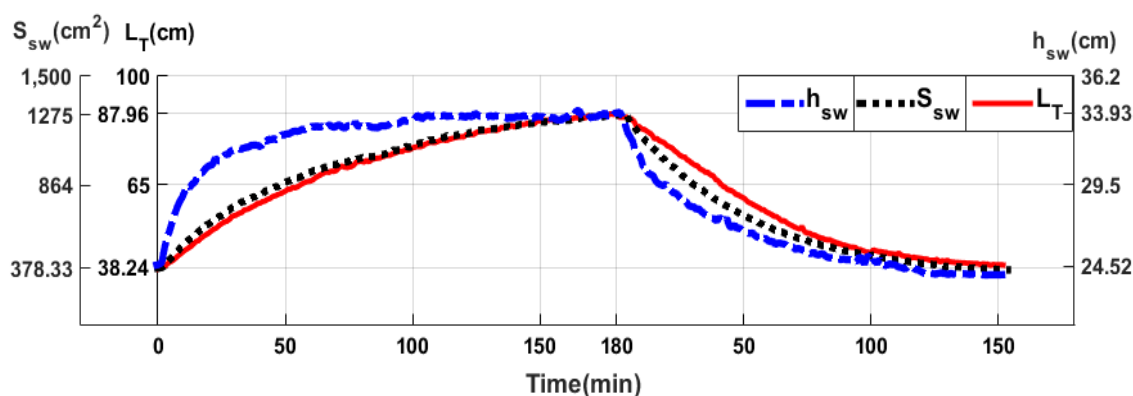
شکل ۴-۴ نمودار تغییرات نسبی شاخص‌های اصلی گوه آب شور را برای مراحل پیشروی و بازگشت گوه نشان می‌دهد.



شکل ۴-۴ تغییرات نسبی شاخص‌های گوه آب شور نسبت به زمان: (الف) مرحله پیشروی گوه آب شور (ب) مرحله بازگشت.

با توجه به بررسی رفتار گوه آب شور در مقیاس میدانی و انجام آنالیزهای حساسیت برای آن، در ادامه این تحقیق شکل‌های متعددی ایجاد می‌گردید که در آن‌ها می‌بایست هم اندازه هر شاخص در طول زمان به طور جداگانه نشان داده می‌شد و هم نحوه تغییرات نسبی شاخص‌ها در هر دو مرحله پیشروی و بازگشت با هم دیگر مقایسه می‌گردید. برای جلوگیری از تعدد این شکل‌ها، نمودار مقدار هر شاخص در طول زمان و نمودار

تغییرات نسبی هر شاخص نسبت به زمان در یک شکل واحد نمایش داده شده‌اند (شکل ۴-۵). در شکل ۴-۵ و شکل‌های بعد آن، مقادیر کمینه و بیشینه محور قائم نمودار مرتبط با هر شاخص، به گونه‌ای تنظیم شدند که نقاط ابتدایی و انتهایی هر سه نمودار در هر دو مرحله (پیشروی و بازگشت گوه) بر هم منطبق شوند. با این کار، امکان مقایسه تغییرات نسبی هر شاخص (به عبارتی تغییرات هر شاخص نسبت به کل تغییرات آن شاخص در هر مرحله)، فراهم گردید. علاوه بر این، در این اشکال مقدار هر شاخص در زمان‌های مختلف بر اساس محور خودش نیز قابل دیدن است. شکل ۴-۵ نشان می‌دهد که نرخ نسبی تغییرات مساحت گوه در بیشتر زمان‌ها با نرخ نسبی تغییرات پنجه گوه برابر است. نتایج آزمایشگاهی به دست آمده در این تحقیق نمایان می‌کند که شاخص طول پنجه گوه علاوه بر شرایط دائمی، در شرایط گذرا نیز می‌تواند نماینده مناسبی برای بیان میزان حجم آب شور هجوم آورنده به آبخوان‌های ساحلی باشد.



شکل ۴-۵ تغییرات شاخص‌های انتخابی گوه آب شور نسبت به زمان در مقیاس آزمایشگاه.

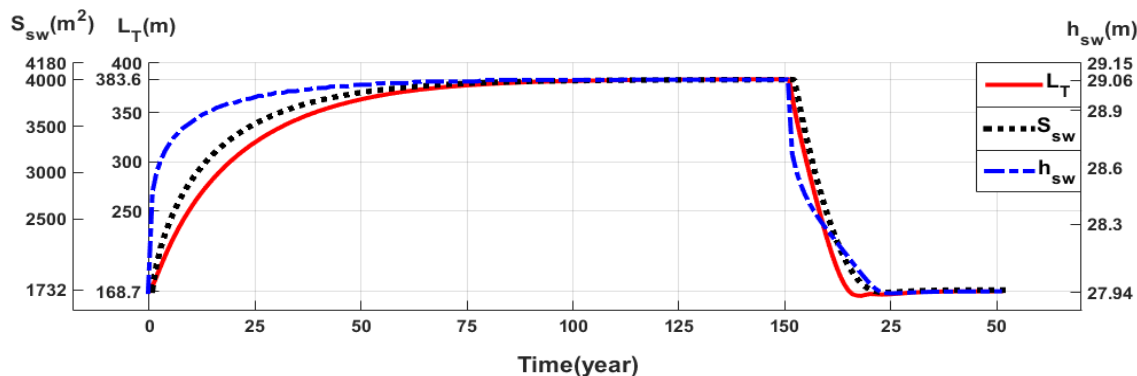
نکته قابل توجه دیگر، نحوه رفتار شاخص ارتفاع گوه آب شور در شرایط گذرا است. در هنگام پیشروی، ارتفاع گوه با سرعت نسبی به مراتب بالاتری نسبت به پنجه و مساحت گوه به سمت دائمی شدن پیش می‌رود و خیلی زودتر از آنها به شرایط دائمی می‌رسد. در صورتی که در مرحله بازگشت هر سه شاخص تقریباً به طور هم زمان متوقف می‌شوند. علت این رفتار را می‌توان چنین توصیف کرد که در اثر کاهش ارتفاع آب شیرین در محفظه سمت راست، میدان فشار آب شیرین در آبخوان کاهش می‌یابد. بنابراین آب‌های شور از مرز دریا به سمت آبخوان هجوم می‌آورند و سطح مشترک شروع به پیشروی می‌کند. به علت اختلاف چگالی بین آب شور و شیرین، هر چه عمق سطح مشترک افزایش یابد، میزان پیشروی آن در شرایط دائمی افزایش می‌یابد.

هر چه میزان پیشروی سطح مشترک در شرایط دائمی بیشتر شود، نرخ نسبی پیشروی آن کاهش می‌یابد. از این‌رو ارتفاع گوه به عنوان بالاترین نقطه سطح مشترک، با بیشترین نرخ نسبی شروع به حرکت می‌کند و زودتر از سایر نقاط سطح مشترک به شرایط دائمی می‌رسد. بر همین اساس پنجه گوه به‌عنوان پایین‌ترین نقطه سطح مشترک، بیشترین پیشروی نهایی را دارد در نتیجه با کمترین نرخ جابجایی نسبی، دیرتر از سایر نقاط سطح مشترک به شرایط دائمی می‌رسد. در مرحله بازگشت گوه، چون شاخص ارتفاع گوه روی مرز دریا قرار دارد، در ابتدای مرحله بازگشت با سرعت نسبی بیشتری نسبت به دو شاخص دیگر کاهش می‌یابد. با گذشت زمان، جریان‌های آب‌شیرین به ناحیه اختلاط ورود کرده و شروع به شستن لایه‌های غلیظ ناحیه اختلاط می‌کنند. سپس جریان‌های لب شور ایجاد شده در ناحیه اختلاط، در امتداد سطح مشترک به سمت خروجی جریان (بر روی مرز دریا) حرکت می‌کنند. خروج آب‌های لب شور از مرز دریا موجب کاهش سرعت افت ارتفاع گوه می‌شود. فرآیند شستشو تا زمانی ادامه می‌یابد که پنجه گوه به شرایط دائمی نزدیک شود، در نتیجه هر سه شاخص طول پنجه گوه، مساحت گوه و ارتفاع گوه تقریباً به طور هم زمان به شرایط دائمی می‌رسند.

۴-۲-۱-۲ نتایج عددی در مقیاس میدانی

شکل ۴-۶ رفتار شاخص‌های طول پنجه گوه، مساحت گوه و ارتفاع گوه را برای مسئله مبنا در مقیاس-میدانی (شرح مسئله در قسمت ۳-۵-۲-۱ آمده است) نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج به‌دست آمده برای مسئله مبنا در مقیاس میدانی مشابه نتایج مقیاس-آزمایشگاهی است. به عبارتی: الف) نرخ نسبی تغییرات شاخص‌های طول پنجه گوه و مساحت گوه در زمان‌های یکسان، تقریباً با هم برابرند. یعنی این دو شاخص رفتار مشابهی را در شرایط گذرا ارائه می‌دهند. ب) در هنگام پیشروی گوه آب شور، ارتفاع گوه زودتر از دو شاخص دیگر به شرایط دائمی می‌رسد، چون با سرعت نسبی بیشتری نسبت به دو شاخص دیگر تغییر می‌کند. توجه داشته باشید که چنانچه مشابه تحقیق واتسون و همکاران (Watson et al., 2010) و مطالعه لو و ورنر (Lu and Werner, 2013)، لحظه رسیدن به شرایط دائمی هر شاخص را لحظه‌ای که آن شاخص به ۹۵٪ کل جابجایی خود رسید در نظر گرفته شود، ارتفاع گوه پس از ۳۵ به شرایط دائمی می‌رسد

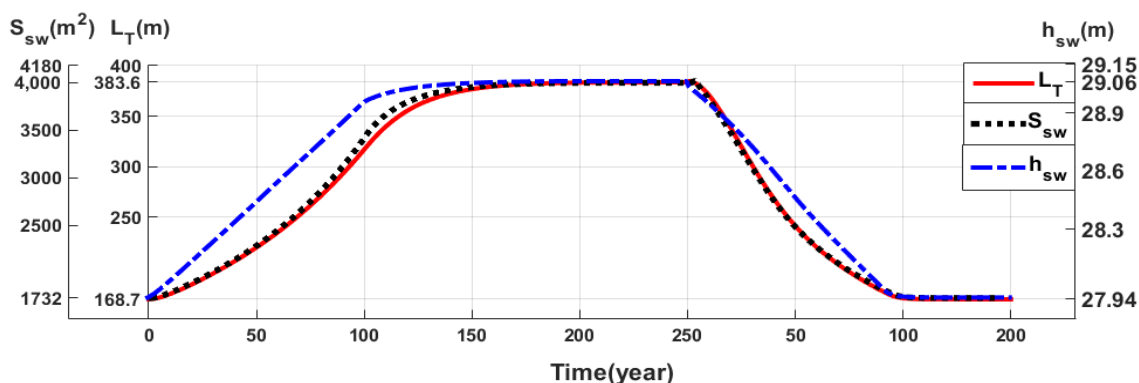
در حالی که مساحت گوه و پنجه گوه پس از ۷۵ سال به شرایط دائمی می‌رسند. (ج) در هنگام بازگشت گوه، هر سه شاخص تقریباً به طور همزمان به شرایط دائمی می‌رسند.



شکل ۴-۶ مقایسه رفتار گذرای پنجه، ارتفاع و مساحت گوه آب شور در اثر کاهش و افزایش آبی ارتفاع آب شیرین.

حساسیت رفتار گوه آب شور به سرعت تغییر ارتفاع آب شیرین در مرز زمین

جهت بررسی حساسیت شاخص‌های طول پنجه، مساحت و ارتفاع گوه آب شور به سرعت کاهش و افزایش ارتفاع آب شیرین در مرز زمین، علاوه بر کاهش و افزایش آبی (مسئله مبنا)، سه سناریوی: ۰/۵ میلی‌متر بر روز، ۰/۱ میلی‌متر بر روز و ۱۰ میلی‌متر بر سال، برای آبخوانی با مشخصات هندسی و هیدرولوژیکی آبخوان مسئله مبنا در نظر گرفته شد. به‌عنوان نمونه، شکل ۴-۷ روند تغییرات سه شاخص مد نظر را نسبت به زمان برای کاهش و افزایش ارتفاع آب شیرین با سرعت تدریجی ۱۰ میلی‌متر بر سال نشان می‌دهد.



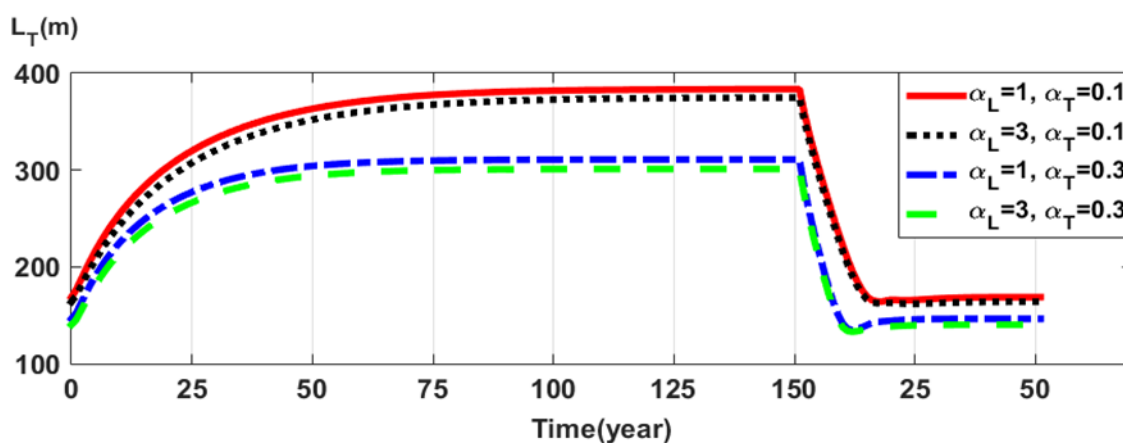
شکل ۴-۷ مقایسه رفتار گذرای پنجه، ارتفاع و مساحت گوه آب شور در اثر کاهش و افزایش ارتفاع مرزی آب شیرین با نرخ ۱۰ میلی‌متر در سال

بررسی‌های انجام شده نشان داد که اولاً: یافته‌های قبلی تحقیق در مورد همه سناریوهای صادق است. ثانیاً: هرچه سرعت تغییر ارتفاع آب در مرز زمین کندتر می‌شود، نرخ تغییرات مساحت گوه انطباق بیشتری با نرخ تغییرات طول پنجه گوه ایجاد می‌کند.

از طرفی مقایسه شکل ۴-۶ و شکل ۴-۷ در مرحله پیشروی نشان می‌دهد که هر چه هجوم آب شور آرام‌تر شود، با فرض برابر بودن میزان پیشروی پنجه، مساحت ایجادشده برای گوه کمتر می‌شود. این بیانگر آن است که در هجوم آب شور آرام انحناى سطح مشترک به سمت مرز دریا بیشتر است. به عنوان نمونه برای میزان پیشروی ثابت پنجه گوه به مقدار $L_T = 250 \text{ m}$ هنگامی که ارتفاع مرزی به صورت آنی کاهش می‌یابد، میزان مساحت گوه برابر $S_{sw} = 2935 \text{ m}^2$ است، در صورتی که برای کاهش تدریجی با سرعت ۱۰ میلی‌متر بر سال مساحت ایجاد شده برای گوه برابر $S_{sw} = 2651 \text{ m}^2$ است.

حساسیت رفتار گوه آب شور به پراکنده‌پذیری طولی و عرضی

مطالعات آبارکا و همکاران (Abarca et al., 2007) و لو و ورنر (Lu and Werner, 2013) در شرایط دائمی نشان داده بودند که افزایش هر یک از پراکنده‌پذیری‌های طولی و عرضی سبب کاهش پیشروی نهایی پنجه گوه می‌شود. در این تحقیق برای بررسی تأثیر پراکنده‌پذیری طولی و عرضی بر رفتار گذرای پنجه گوه، ترکیب‌های متفاوتی برای این ضرایب در نظر گرفته شد. شکل ۴-۸ نشان می‌دهد که یافته‌های محققین فوق‌الذکر، در شرایط گذرا نیز صادق است.



شکل ۴-۸ مقایسه رفتار گذرای پنجه، ارتفاع و مساحت گوه آب شور در اثر کاهش و افزایش ارتفاع مرزی آب شیرین با نرخ ۱۰ میلی‌متر در سال

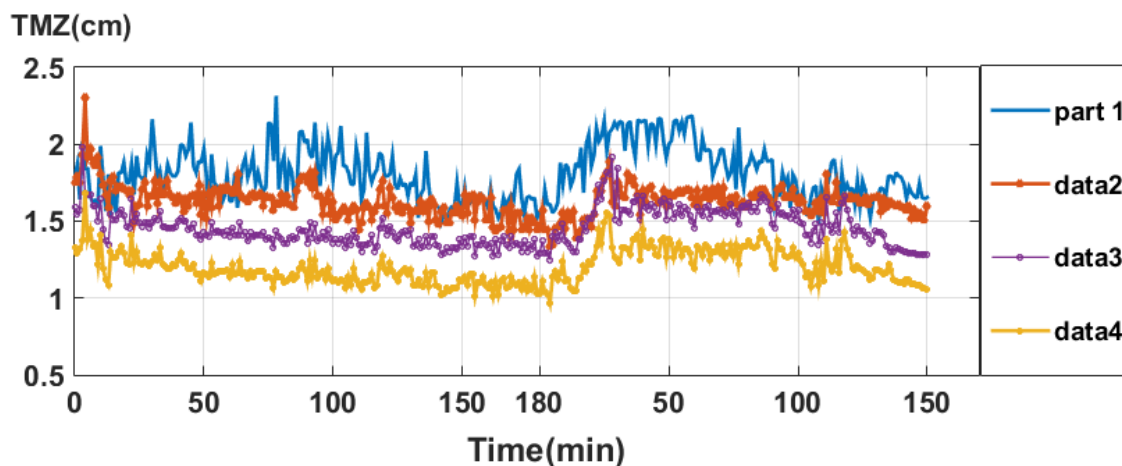
علاوه بر این، شکل ۴-۸ نشان می‌دهد که برای مسئله بررسی شده در این تحقیق (مسئله مبنا) تأثیر پراکنده‌پذیری عرضی بر رفتار پنجه گوه به مراتب بیشتر از پراکنده‌پذیری طولی است.

۴-۲-۲ رفتار ناحیه اختلاط

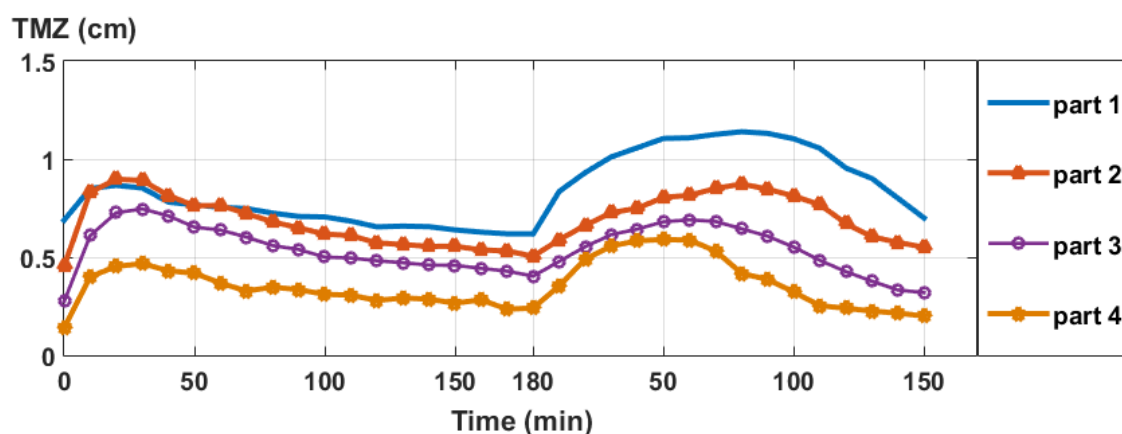
۴-۲-۲-۱ نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی و عددی در مقیاس - آزمایشگاه

استفاده از فن پردازش تصویر امکان شناسایی ضخامت ناحیه اختلاط را در امتداد سطح مشترک، در شرایط گذرا، فراهم کرد. شکل ۴-۹ تغییرات ضخامت ناحیه اختلاط (TMZ) را در مدت زمان پیشروی و بازگشت گوه آب شور، در مدل فیزیکی برای ۴ قسمت تفکیک‌شده (در امتداد سطح مشترک) نشان می‌دهد. به دلیل عدم تداخل نتایج شبیه‌سازی عددی با داده‌های آزمایشگاهی، نتایج عددی در شکل ۴-۱۰ رسم شده است. مقایسه شکل ۴-۹ و شکل ۴-۱۰ نشان می‌دهد که اختلاف اندکی بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج عددی، در بعضی از قسمت‌های تفکیک‌شده ناحیه اختلاط و در برخی از بازه‌های زمانی، وجود دارد. با این وجود روند کلی تغییرات ضخامت ناحیه اختلاط (TMZ) در هر دو نوع مدل‌سازی مشابه هم هستند. این نشان می‌دهد که مدل عددی سوترا در حد قابل قبولی توانایی شبیه‌سازی ناحیه اختلاط را در شرایط گذرا دارد. نتایج هر دو مدل‌سازی آزمایشگاهی و عددی نشان می‌دهند که ضخامت ناحیه اختلاط در قسمت ۴ (بالای پنجه گوه) کمترین مقدار را دارد و با بالا رفتن در امتداد سطح مشترک رفته‌رفته به مقدار آن افزوده می‌شود. این نتیجه در توافق با نتایج آزمایشگاهی آبارکا و کلمنت (Abarca and Clement, 2009) است که در شرایط دائمی بررسی شده بود. همچنین نتایج نشان می‌دهند که ضخامت ناحیه برای تمامی قسمت‌ها در زمان‌های اولیه مرحله بازگشت افزایش می‌یابد و پس از رسیدن به یک مقدار حداکثری، رفته‌رفته از میزان آن کاسته می‌شود تا اینکه سرانجام به مقدار اولیه خود در ابتدای مرحله پیشروی می‌رسد. اگر چه این پدیده در آزمایشات رابینسون و همکاران (Rabinson et al., 2015) نیز مشاهده شده است ولی آنها بدون گفتن علل وقوع این پدیده، با بیان یک دلیل کلی، افزایش ضخامت ناحیه اختلاط را ناشی از تغییر میدان جریان در مرحله بازگشت گوه بیان کردند. در این تحقیق، بررسی و دلایل وقوع این پدیده، با جزئیات و تفسیر بیشتر، با استفاده از نتایج عددی در مقیاس - میدانی ارائه می‌گردد. چرا که تغییر در پارامترهای مختلف هجوم آب

شور از جمله ضخامت ناحیه اختلاط در مقیاس - میدانی به مراتب بزرگتر از مقیاس - آزمایشگاهی رخ می- دهد، از این رو فرآیند وقوع این پدیده بهتر درک می شود.



شکل ۹-۴ رفتار گذرای ناحیه اختلاط در امتداد سطح مشترک در مدت زمان پیشروی (فاصله زمانی ۰ تا ۱۸۰ دقیقه) و در مدت زمان بازگشت (فاصله زمانی ۱۸۰ تا ۱۵۰ دقیقه)، در مدل فیزیکی.



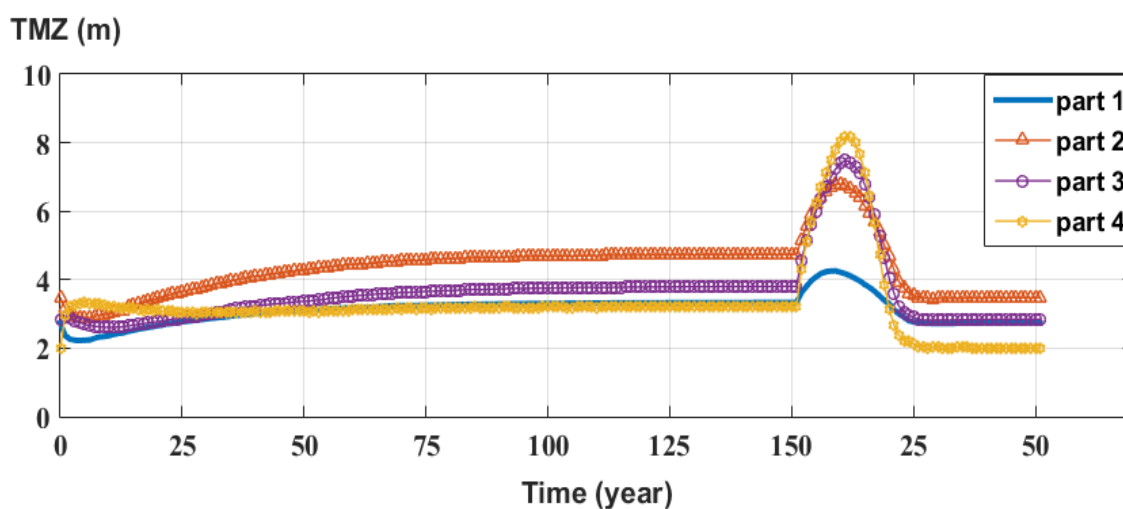
شکل ۱۰-۴ نتایج شبیه سازی عددی ناحیه اختلاط در امتداد سطح مشترک در طول زمان در مقیاس آزمایشگاهی

۴-۲-۲ نتایج عددی در مقیاس میدانی

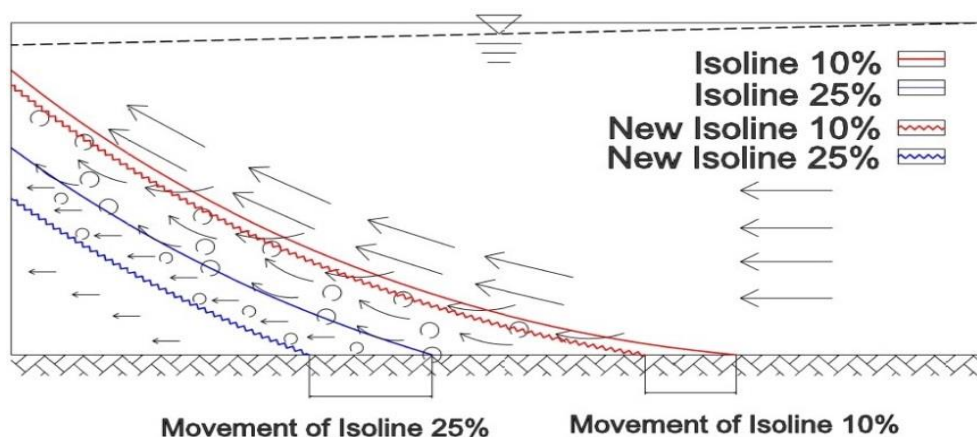
شکل ۱۱-۴ تغییرات ضخامت ناحیه اختلاط (TMZ) را برای آبخوان مسئله مبنا در شرایط گذرا نشان می- دهد. مشاهده می شود که ضخامت ناحیه اختلاط، مشابه مقیاس - آزمایشگاهی، در مقیاس - میدانی نیز در ابتدای مرحله بازگشت افزایش می یابد و پس از رسیدن به مقدار حداکثری، از مقدار آن کاسته می شود تا اینکه سرانجام به مقدار اولیه خود در ابتدای مرحله پیشروی می رسد. جهت بررسی این پدیده، فرض می شود که ناحیه اختلاط، در جهت عمود بر سطح مشترک، به چند لایه مجزا در حد فاصل منحنی های ۱۰ تا ۲۵

درصد، ۲۵ تا ۵۰ درصد، ۵۰ تا ۷۵ درصد و ۷۵ تا ۹۰ درصد آب شور و شیرین تقسیم شود. بدیهی است که به علت وجود گرادیان غلظت در سرتاسر مقطع عرضی، ناحیه اختلاط هر یک از این لایه‌ها نیز می‌توانند به لایه‌های کوچک‌تری تقسیم شوند. همان طور که می‌دانیم افزایش ارتفاع آب شیرین در ابتدای مرحله بازگشت، هم سبب افزایش شدت جریان آب شیرین ورودی به آبخوان و هم سبب تغییر جهت حرکت گوه آب شور از سمت زمین به سمت دریا می‌شود. به علت پایین‌تر بودن سرعت گوه نسبت به سرعت جریان طبیعی، در نزدیکی گوه مقداری از ذرات آب شیرین در امتداد سطح مشترک، به سمت خروجی جریان (در بالای گوه روی مرز دریا) تغییر جهت می‌دهند و مقداری نیز به ناحیه اختلاط ورود می‌کنند. این ذرات با ورود به اولین لایه فرض شده ناحیه اختلاط (حد فاصل منحنی ۱۰٪ تا منحنی ۲۵٪)، با ذرات لب شور آنها اختلاط کرده و ضمن رقیق کردن لایه، شروع به شستن نواحی غلیظ آن (به عبارتی نزدیکی منحنی ۲۵٪) به سمت خروجی جریان می‌کنند (شکل ۴-۱۲). فرآیند شستشو باعث می‌شود که مقداری از نمک‌های محلول لایه در امتداد سطح مشترک به سمت خروجی جریان انتقال یابند. در اثر فرآیند شستشو و اختلاط، نواحی نزدیک به کانتور ۲۵٪، هم در لایه فرضی اول و هم در لایه پایینی آن، رقیق‌تر شده و کانتور ۲۵٪ به مرز دریا نزدیک‌تر می‌شود (شکل ۴-۱۲). نکته قابل توجه این است که با وجود اینکه سرعت سیال به سمت مرز دریا، در محل کانتور رقیق لایه (کانتور ۱۰٪) بیشتر از سرعت سیال در محل کانتور غلیظ آن (کانتور ۲۵٪) است، اما اثر توأم فرآیندهای شستشو، اختلاط و سرعت محلی سیال باعث می‌شود که کانتور غلیظ جدید فاصله خود را از کانتور رقیق جدید بیشتر کند و ضخامت لایه اول گسترش یابد. بدیهی است که این فرآیند می‌تواند به طور پیوسته و با ورود ذرات لب شور لایه اول به لایه مجاور، و به همین ترتیب برای لایه‌های پایین‌تر تکرار شود. شکل ۴-۱۳ تغییرات فاصله افقی لایه‌های انتخاب‌شده را بر روی کف آبخوان در شرایط گذرا نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با شروع مرحله بازگشت کانتور ۲۵ درصد رفته‌رفته از کانتور ۱۰ درصد و به همین ترتیب کانتور ۵۰ درصد از کانتور ۲۵ درصد و کانتور ۷۵ درصد از کانتور ۵۰ درصد فاصله گرفته است. از طرفی شکل ۴-۱۳ نشان می‌دهد که در هنگام بازگشت گوه کانتور ۹۰٪ از کانتور ۷۵٪ فاصله نگرفته است، به عبارتی در این لایه که به مراتب غلیظ‌تر از لایه‌های قبلی است گسترشی رخ نداده است. این را می‌توان چنین توضیح داد که فرآیند اختلاط و شستشو مادامی ادامه می‌یابد که ذرات لب شور بتوانند به

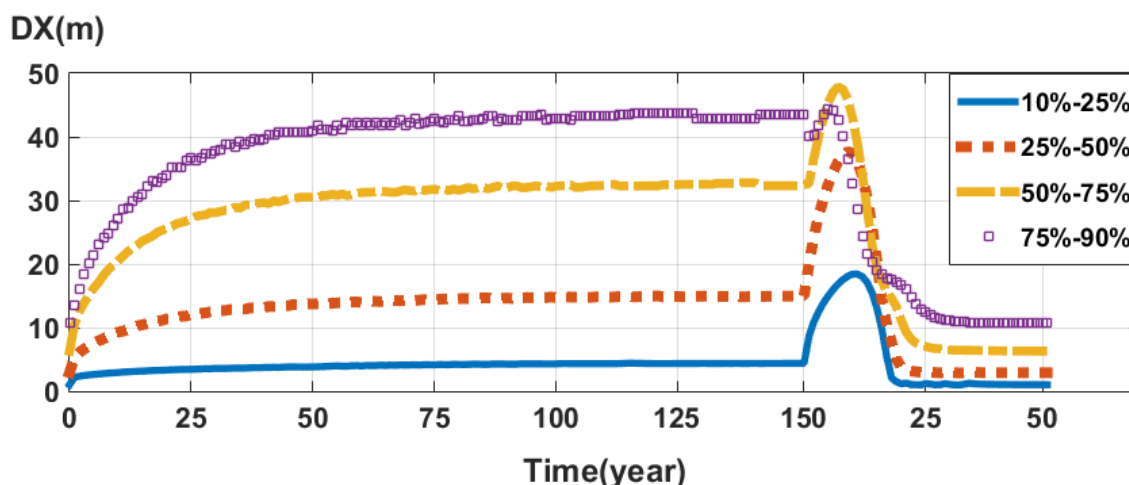
لایه‌های غلیظ مجاور وارد شوند. از آنجا که از سرعت ذرات لب شور با عبور از لایه‌های مختلف رفته‌رفته کاسته می‌شود احتمالاً سرعت جریان سیال در نزدیکی کانتور ۷۵٪ با سرعت جریان در محل کانتور برابر شده و امکان شستشو و ورود ذرات لب شور به لایه ۷۵٪ تا ۹۰٪ فراهم نگردیده است. پس از مدتی از آغاز مرحله بازگشت، اختلاف سرعت بین جریان‌های آب شیرین و مرز مشترک رفته‌رفته کم می‌شود، در نتیجه فرآیند شستشو و اختلاط به تدریج کاهش می‌یابد. بنابراین کانتورهای رقیق به کانتورهای غلیظ نزدیک می‌شوند و لایه‌های مختلف ناحیه اختلاط به تدریج منقبض می‌شوند. با نزدیک شدن گوه به شرایط دائمی در مرحله بازگشت، جریان‌های آب شور درون گوه کم‌کم به سمت مرز زمین تغییر جهت می‌دهند (به عبارتی گوه کم‌کم وضعیت هجوم به خود می‌گیرد). سرانجام با رسیدن گوه به شرایط دائمی، ضخامت ناحیه اختلاط با مقدار آن در شروع مرحله پیشروی برابر می‌شود.



شکل ۴-۱۱ نتایج شبیه‌سازی عددی ناحیه اختلاط در امتداد سطح مشترک در شرایط گذرا برای مسئله مینا.



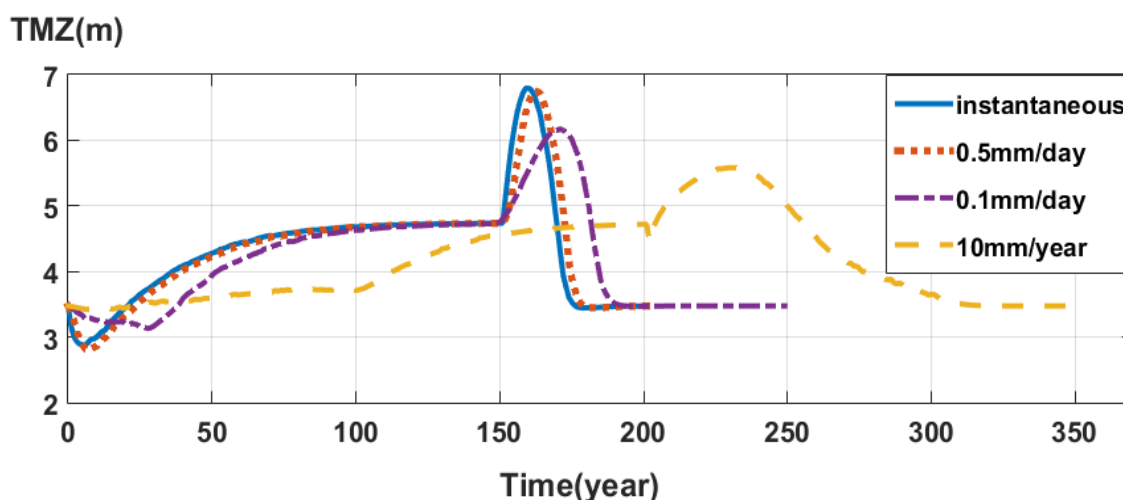
شکل ۴-۱۲ شماتیکی از نحوه گسترش ناحیه اختلاط در مرحله بازگشت گوه، کانتور غلیظ در اثر فرآیندهای شستشو، اختلاط و جریان محلی سریع تر از کانتور رقیق به سمت دریا حرکت می کند و از کانتور رقیق فاصله می گیرد.



شکل ۴-۱۳ تغییرات افقی لایه های انتخاب شده برای ناحیه اختلاط، بر روی بستر آبخوان در شرایط گذرا (مسئله مبنا).

حساسیت رفتار ناحیه اختلاط به سرعت تغییر ارتفاع آب شیرین مرزی

شکل ۴-۱۴ رفتار گذرای قسمت ۲ ناحیه اختلاط را، به عنوان یک نمونه برای کل ناحیه اختلاط، تحت سناریوهای مختلف سرعت کاهش و افزایش ارتفاع آب شیرین بر روی مرز زمین نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، سرعت تغییر ارتفاع آب شیرین تأثیری بر مقدار دائمی ضخامت ناحیه اختلاط، چه در مرحله پیش روی و چه در مرحله بازگشت گوه، ندارد. همچنین در شکل ۴-۱۴ نمایان است که هر چه سرعت بالا آمدگی سطح ایستابی کاهش یابد میزان افزایش ضخامت ناحیه اختلاط که در مرحله بازگشت رخ می دهد، کمتر می شود.



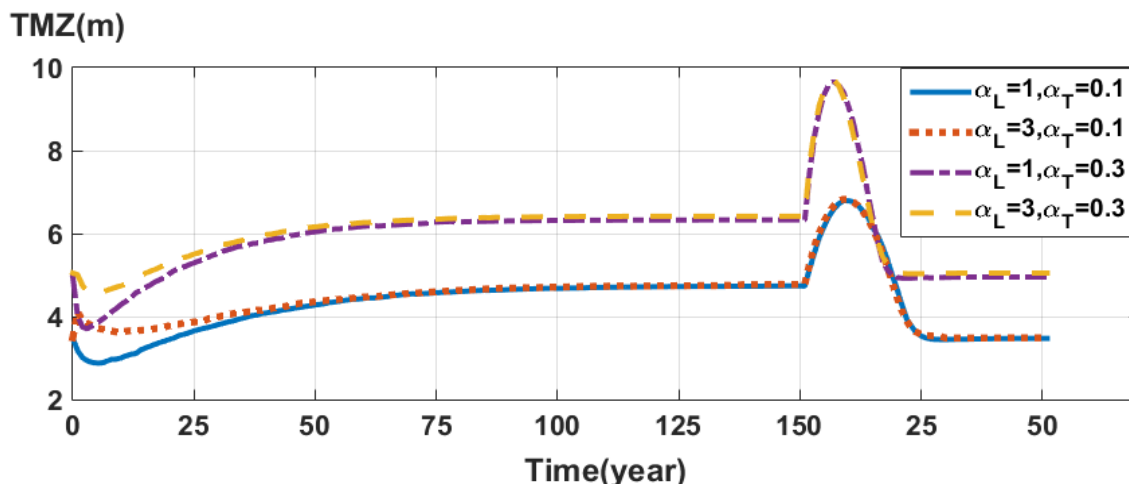
شکل ۴-۱۴ حساسیت ناحیه اختلاط به سرعت تغییر ارتفاع آب شیرین مرزی در مرحله پیشروی و بازگشت

این بدان علت است که هر چه سرعت بالآمدگی سطح ایستابی کمتر شود، از شدت جریان ورودی به آبخوان کاسته می‌شود. بنابراین سرعت ورود ذرات آب شیرین به لایه‌های مختلف ناحیه اختلاط کمتر شده و اثر فرآیند شستشو و اختلاط در لایه‌ها کمتر می‌شود، در نتیجه ناحیه اختلاط کمتر توسعه می‌یابد.

حساسیت رفتار ناحیه اختلاط به پراکنده‌پذیری طولی و عرضی

شکل ۴-۱۵ نتایج شبیه‌سازی عددی را برای ترکیب‌های مختلف پراکنده‌پذیری، برای قسمت دوم ناحیه اختلاط نشان می‌دهد. با مقایسه نمودار پراکنده‌پذیری طولی برابر ۱، پراکنده‌پذیری عرضی برابر ۰/۱ (نمودار $\alpha_T=0/1, \alpha_L=1$) با نمودار پراکنده‌پذیری طولی برابر ۳، پراکنده‌پذیری عرضی برابر ۰/۱ (نمودار $\alpha_T=0/1, \alpha_L=3$) و یا مقایسه نمودار $\alpha_T=0/3, \alpha_L=1$ با نمودار $\alpha_T=0/3, \alpha_L=3$ نتیجه می‌شود، پراکنده‌پذیری طولی در سال‌های ابتدایی پیشروی گوه که هجوم آب شور نسبت به سال‌های بعدی آن سریع‌تر است، تأثیری بیشتری بر ضخامت ناحیه اختلاط دارد. از طرفی مقایسه نمودارهای $\alpha_T=0/1, \alpha_L=1$ با $\alpha_T=0/3, \alpha_L=1$ و همچنین نمودارهای $\alpha_T=0/1, \alpha_L=3$ با $\alpha_T=0/3, \alpha_L=3$ نشان می‌دهد که پراکنده‌پذیری عرضی در هجوم آب شور آرام، اثر بیشتری بر ضخامت ناحیه اختلاط نسبت به هجوم آب شور سریع دارند. بررسی انجام شده برای سایر قسمت‌های ناحیه اختلاط نیز به همین نتیجه منجر شد. از طرفی با مقایسه نمودارهای این شکل

می‌توان گفت که ناحیه اختلاط در شرایط دائمی بیشتر متأثر از پراکنده پذیری عرضی است. هر چند که در شرایط گذرا با توجه به سرعت پیشروی و بازگشت گوه، نیازمند بررسی بیشتر است.



شکل ۴-۱۵ حساسیت ناحیه اختلاط به ترکیب‌های مختلف پراکنده‌پذیری طولی و عرضی

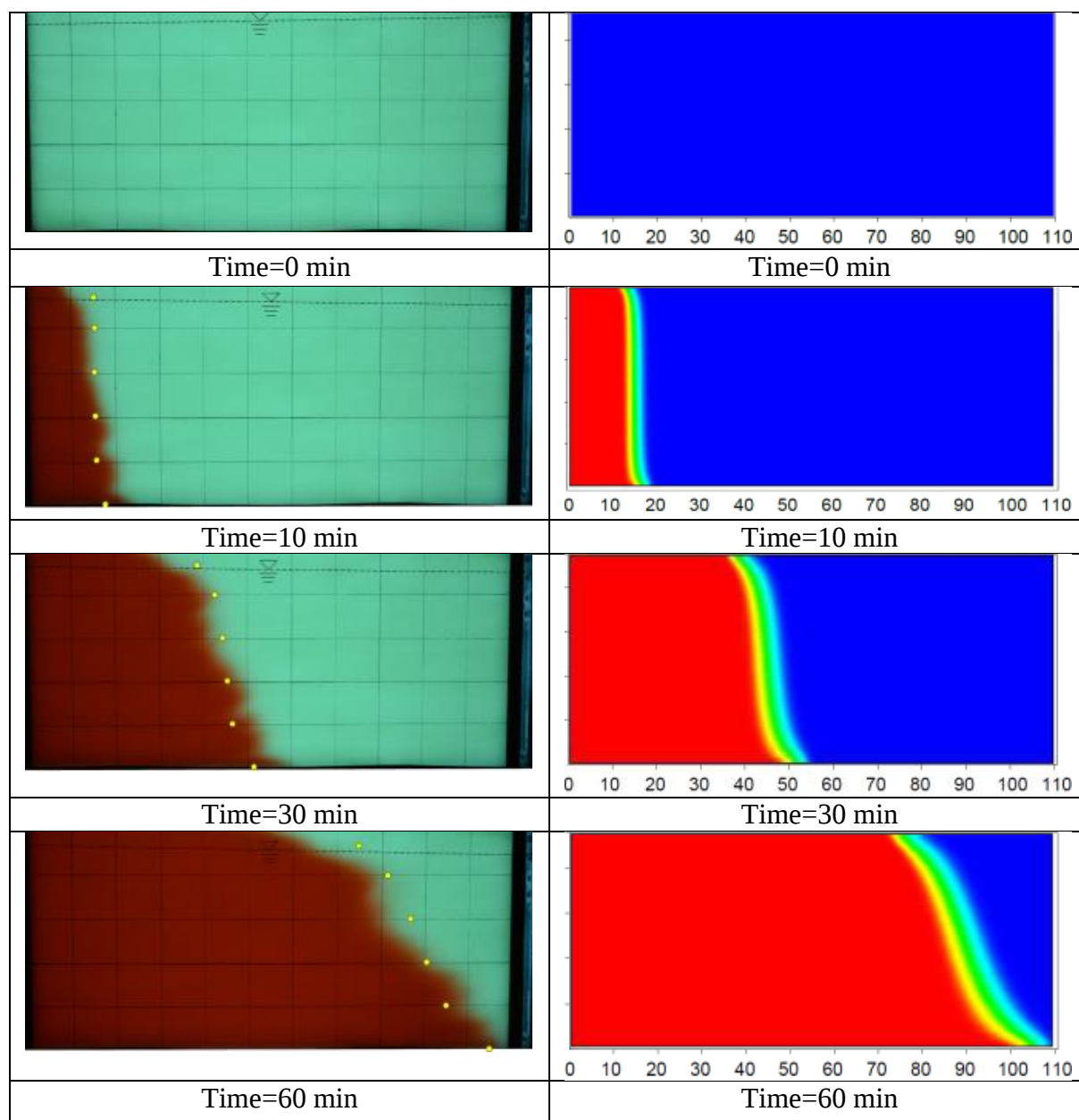
۳-۴ هجوم آب شور به آبخوان‌های مجاور کویر

بر خلاف آبخوان‌های ساحلی که غلظت آب شور دریاها و اقیانوس‌ها تقریباً ثابت است (حدود ۳۵ گرم بر لیتر) در آبخوان‌های مجاور کویر، غلظت آب شور هجوم آورنده می‌تواند از آبخوانی به آبخوان دیگر متفاوت باشد. بنابراین همان‌طور که در فصل قبل (قسمت ۳-۶) اشاره گردید، جهت بررسی پدیده هجوم آب شور به این آبخوان‌ها، برای آب شور کویر، ۴ غلظت مختلف ۵، ۱۵، ۲۵ و ۳۵ گرم بر لیتر در نظر گرفته شد. شایان‌ذکر است که هجوم آب شور فقط برای شرایطی که سطح ایستابی آبخوان پایین‌تر از سطح آب شور کویر قرار می‌گیرد (مرحله سوم آزمایش) بررسی شده است.

۳-۴-۱ نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی و عددی در مقیاس آزمایشگاه

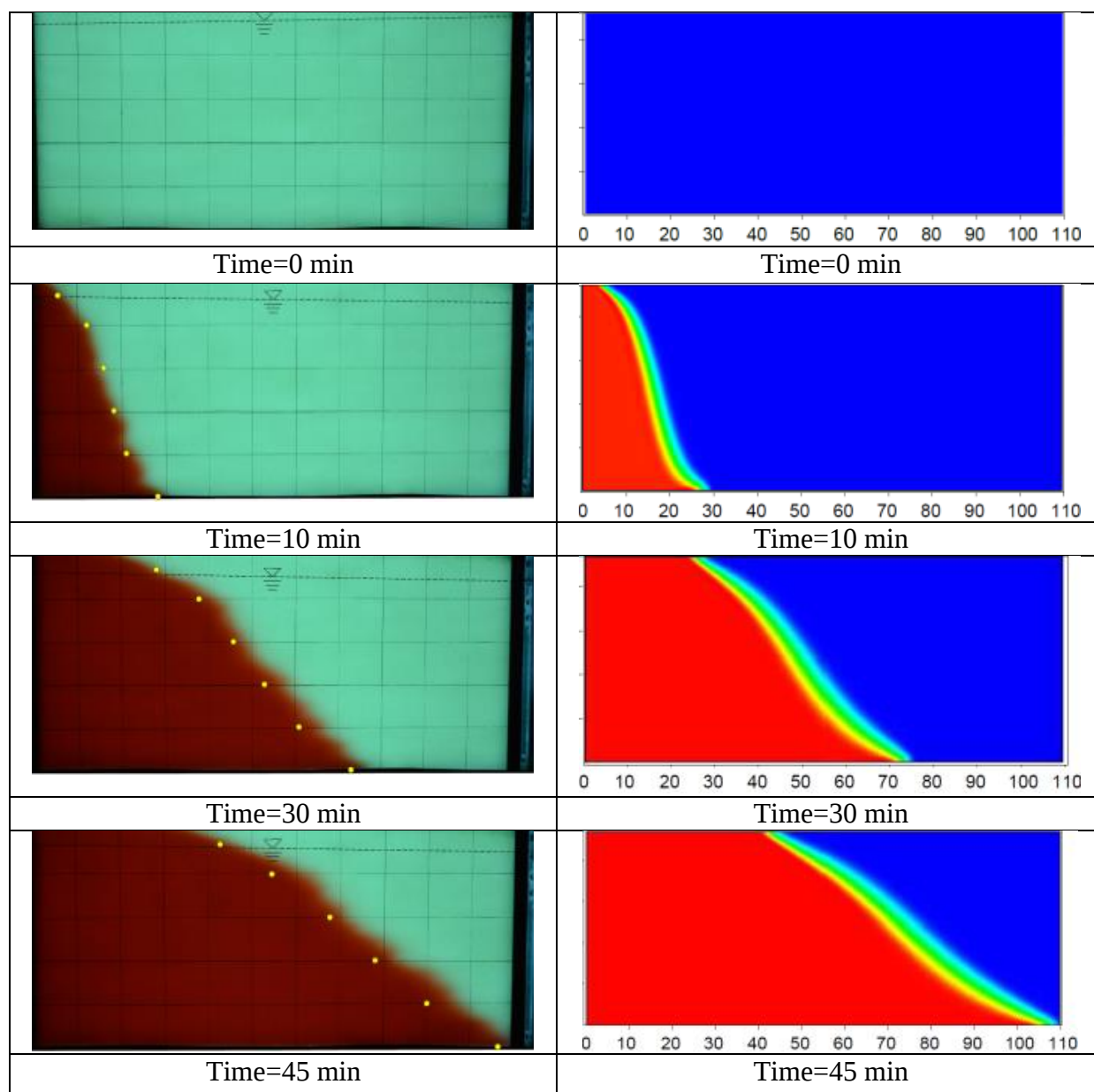
شکل ۴-۱۶ تا شکل ۴-۱۹ تصاویری از پیشروی آب شور را در مدل فیزیکی و مدل عددی به ترتیب برای غلظت‌های ۵، ۱۵، ۲۵ و ۳۵ گرم بر لیتر نشان می‌دهد. در هر یک از شکل‌های نشان داده شده، تصاویر ارائه‌شده در زمان صفر (Time=0) مربوط به لحظه‌ی شروع مرحله سوم یا همان شرایط دائمی مرحله دوم آزمایش است که در آن ارتفاع آب شیرین محفظه سمت راست برابر ۴۸/۸ سانتی‌متری بوده است. به منظور

مقایسه بهتر نتایج آزمایشگاهی و عددی، کانتور غلظت ۵۰٪ به دست آمده از شبیه سازی عددی، به شکل دایره های توپر بر روی تصاویر آزمایشگاهی مشخص شده اند. بررسی تصاویر مربوط به هر غلظت نشان می دهد که به طور کلی انطباق خوبی بین نتایج عددی و داده های آزمایشگاهی به وجود آمده است. هر چند سطح مشترک غلظت ۵ گرم بر لیتر (شکل ۴-۱۶) ، در دو مدل سازی آزمایشگاهی و عددی به طور کامل بر هم منطبق نشده اند.



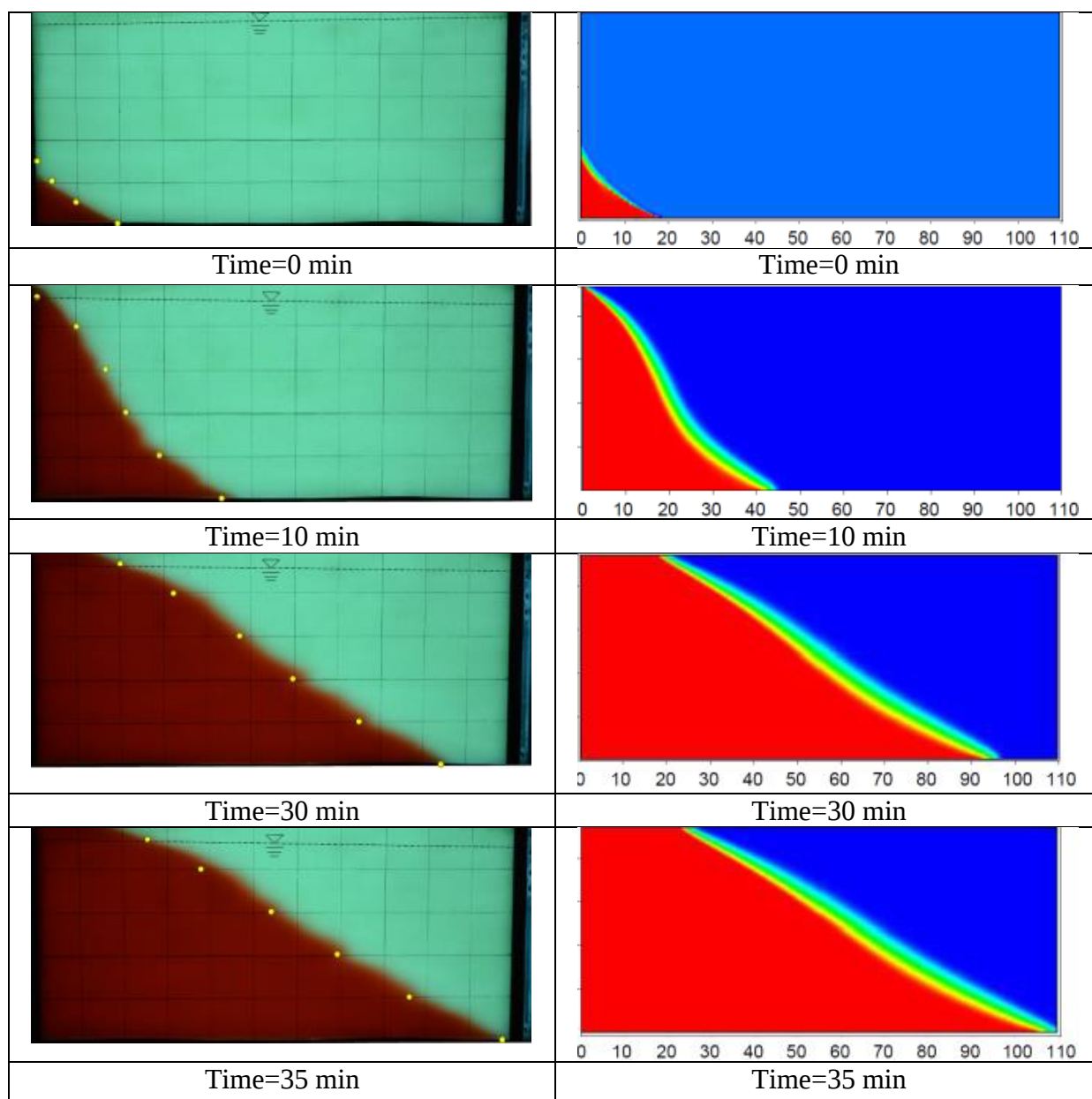
شکل ۴-۱۶ تصاویری پیشروی آب شور در مدل فیزیکی به همراه نتایج شبیه‌سازی عددی در غلظت ۵ گرم بر لیتر، نقاط زرد رنگ نتایج عددی کانتر شوری ۵۰٪ را بر روی تصاویر دیجیتال نشان می‌دهد.

علت عدم انطباق در این غلظت خاص، شاید ناشی از خطاهای بسیار کوچک در هنگام اندازه‌گیر چگالی آب-های شور و شیرین در آزمایشگاه باشد و یا شاید ناشی از نوسانات بسیار کوچک سطح آب در محفظه‌های جانبی مدل آزمایشگاهی باشد. نتایج آزمایشگاهی و عددی در شکل ۴-۱۶ و شکل ۴-۱۷ به ترتیب برای غلظت‌های ۵ و ۱۵ گرم بر لیتر نشان می‌دهند که تا پایان مرحله دوم آزمایش (Time=0)، هجوم آب شور به داخل محفظه مرکزی (آبخوان) امکان‌پذیر نبوده است.



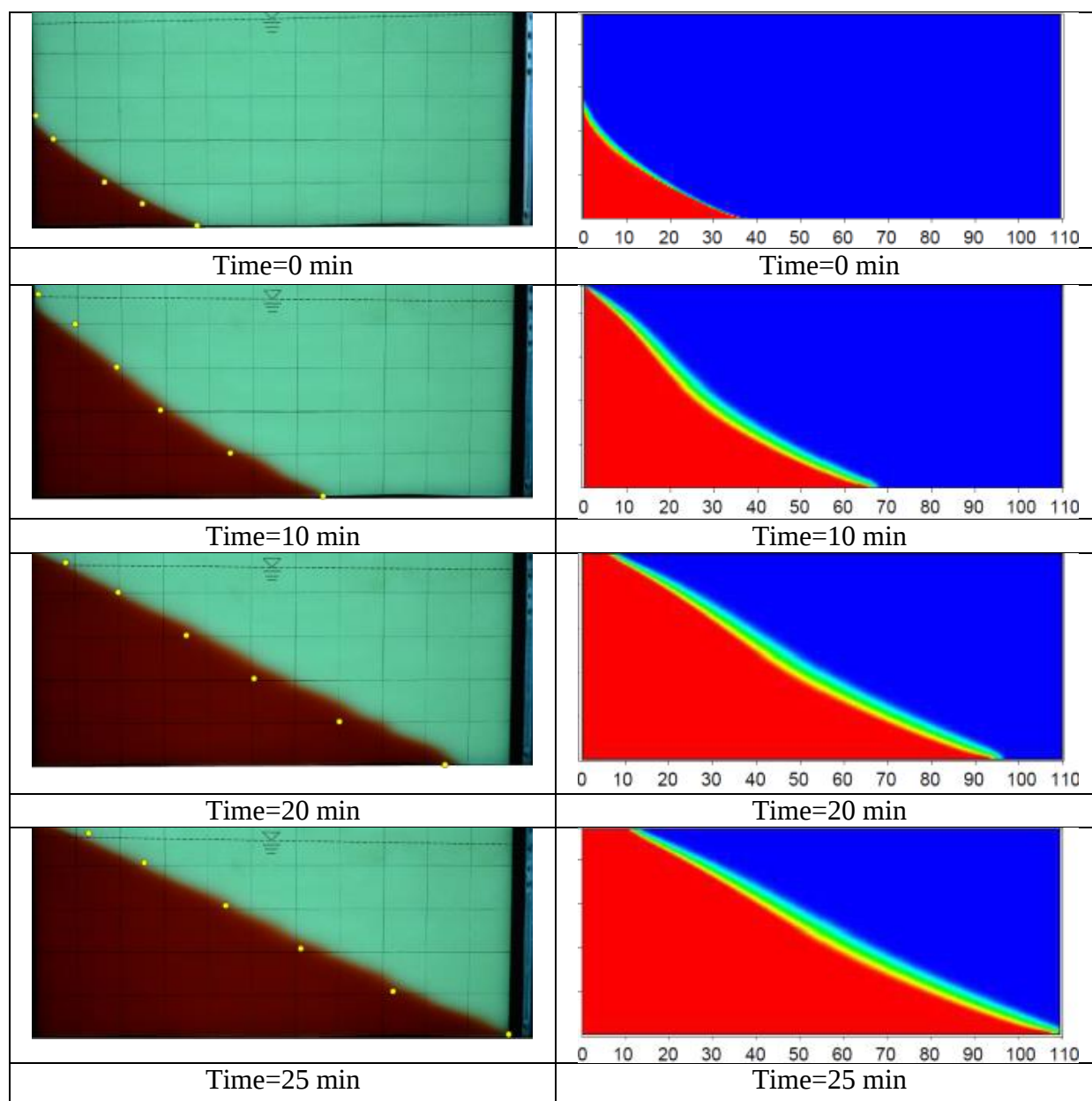
شکل ۴-۱۷ تصاویری پیشروی آب شور در مدل فیزیکی به همراه نتایج شبیه‌سازی عددی در غلظت ۱۵ گرم بر لیتر، نقاط زرد رنگ نتایج عددی کانتور شوری ۵۰٪ را بر روی تصاویر دیجیتال نشان می‌دهد.

همان طور که مشخص شد در مرحله دوم آزمایش ارتفاع مرزی آب شیرین بیشتر از ارتفاع مرزی آب شور است. بنابراین در این مرحله، عامل اصلی هجوم آب شور به آبخوان اختلاف چگالی بین آب شور و شیرین است. از طرفی در این شرایط، عامل اصلی جلوگیری از هجوم آب شور، شدت جریان طبیعی آبخوان که ناشی از گرادیان هیدرولیکی موجود در سیستم آبخوان است، می‌باشد. با توجه به شیب هیدرولیکی ایجاد شده در محیط متخلخل، نیروی ناشی از اختلاف چگالی آب شور و شیرین در غلظت‌های ۵ و ۱۵ گرم بر لیتر، نمی‌تواند بر نیروی هیدرودینامیکی شدت جریان آب شیرین (نیروی پس‌زدگی آب شور) غلبه کند.



شکل ۴-۱۸ تصاویری پیشروی آب شور در مدل فیزیکی به همراه نتایج شبیه‌سازی عددی در غلظت ۲۵ گرم بر لیتر، نقاط زرد رنگ نتایج عددی کانطور شوری ۵۰٪ را بر روی تصاویر دیجیتال نشان می‌دهد.

بنابراین امکان ورود آب شور با این غلظت‌ها، به محیط متخلخل فراهم نمی‌شود. با افزایش چگالی آب شور، امکان غلبه نیروی هجوم آورنده بر نیروی پس‌زدگی افزایش می‌یابد، در نتیجه امکان پیشروی گوه آب شور به محفظه مرکزی (آبخوان) بیشتر می‌شود. این موضوع برای غلظت‌های ۲۵ و ۳۵ گرم بر لیتر به وضوح در شکل ۴-۱۸ و شکل ۴-۱۹ دیده می‌شود، به طوری که مقدار پیشروی پنجه گوه برای غلظت ۲۵ گرم بر لیتر برابر ۱۹/۱۵ سانتی‌متر است در حالی که برای غلظت ۳۵ گرم بر لیتر این مقدار برابر ۳۸/۲۴ سانتی‌متر می‌باشد.

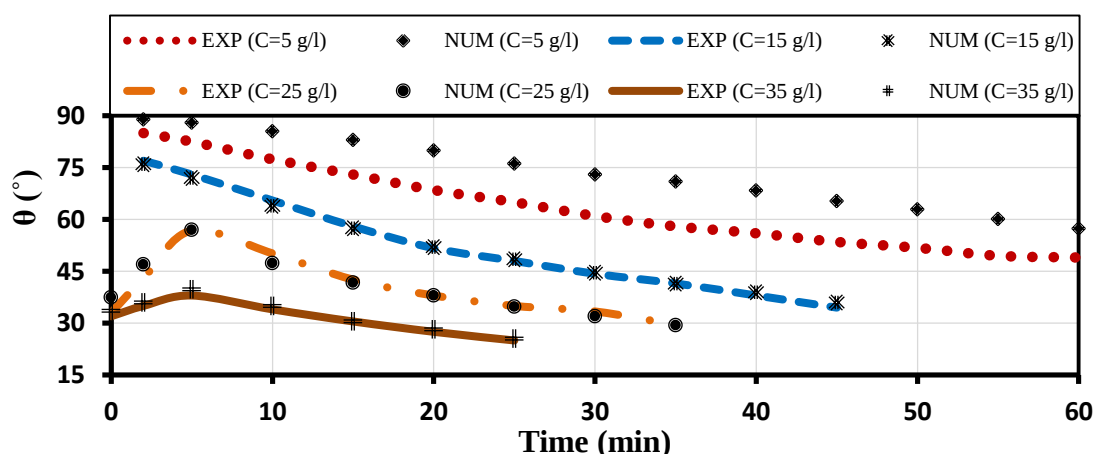


شکل ۴-۱۹ تصاویری پیشروی آب شور در مدل فیزیکی به همراه نتایج شبیه‌سازی عددی در غلظت ۳۵ گرم بر لیتر، نقاط زرد رنگ نتایج عددی کانتور شوری ۵۰٪ را بر روی تصاویر دیجیتال نشان می‌دهد.

۴-۳-۱-۱ رفتار سطح مشترک

افت آنی ارتفاع مرزی آب شیرین در آغاز مرحله سوم آزمایش از تراز ۴۸/۸ سانتی‌متری به تراز ۴۵/۳۵ سانتی‌متری، باعث شکل‌گیری شیب هیدرولیکی معکوس در محفظه مرکزی (محیط متخلخل) شد. در نتیجه جهت جریان در محفظه مرکزی تغییر کرد و آب‌های شور از محفظه چپ به سمت محفظه مرکزی هجوم آوردند. با نگاه به تصاویر پیشروی آب شور در غلظت‌های مختلف (شکل ۴-۱۶ تا شکل ۴-۱۹) چنین برداشت می‌شود که الف: با تغییر غلظت، شکل پیشروی آب شور و یا به عبارتی شیب سطح مشترک تغییر می‌کند،

به طوری که هر چه میزان غلظت آب شور افزایش می یابد، سطح مشترک با شیب کمتری (زاویه هجوم کوچکتری) به سمت مرز زمین حرکت می کند. ب: در یک غلظت ثابت نیز، هر چه از زمان شروع فرآیند هجوم می گذرد از شیب سطح مشترک کاسته می شود. جهت مطالعه دقیق تر شکل پیشروی سطح مشترک در غلظت های مختلف و در زمان های متفاوت، رفتار گذرای زاویه هجوم آب شور (θ) برای ۴ غلظت انتخاب شده مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۴-۲۰ نمودار تغییرات زاویه هجوم آب شور (θ) را نسبت به زمان در مدل سازی آزمایشگاهی و عددی نشان می دهد. همان طور که در بالا به آن پرداخته شد در غلظت ۵ گرم بر لیتر، اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و عددی مشهود است ولی در سایر غلظت ها انطباق خوبی بین نتایج دو مدل سازی به وجود آمده است.



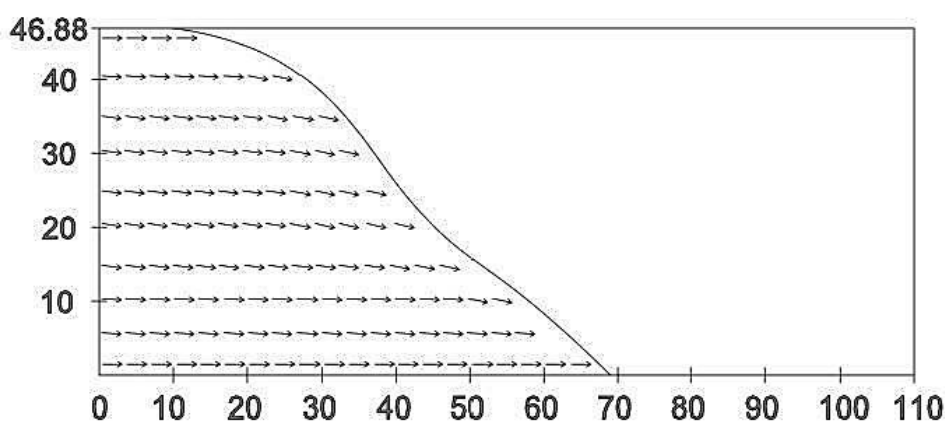
شکل ۴-۲۰ تغییرات زاویه هجوم نسبت به زمان در غلظت های مختلف آب شور

نمودارهای شکل ۴-۲۰ به وضوح نشان می دهد که چنانچه زمان طی شده از آغاز فرآیند هجوم برای تمامی غلظت ها برابر باشد، با افزایش غلظت آب شور، شیب سطح مشترک کاهش می یابد. همچنین نمودار تغییرات زاویه هجوم نسبت به زمان، برای دو غلظت ۵ و ۱۵ گرم بر لیتر، یک روند نزولی را با گذشت زمان نشان می دهد. زاویه هجوم (θ) برای این دو غلظت در ابتدا مرحله پیشروی به ترتیب برابر ۸۵ و ۷۷ درجه است و در انتهای آزمایش به مقادیر ۴۹ و ۳۴/۵ درجه می رسد. اما سطح مشترک برای غلظت های آب شور ۲۵ و ۳۵ گرم بر لیتر که توانسته بودند در مرحله دوم آزمایش به شکل یک گوه به داخل محیط متخلخل پیشروی کنند، رفتار پیچیده تری را در شرایط گذرا نشان می دهد. همان طور که در شکل ۴-۲۰ دیده می شود، در

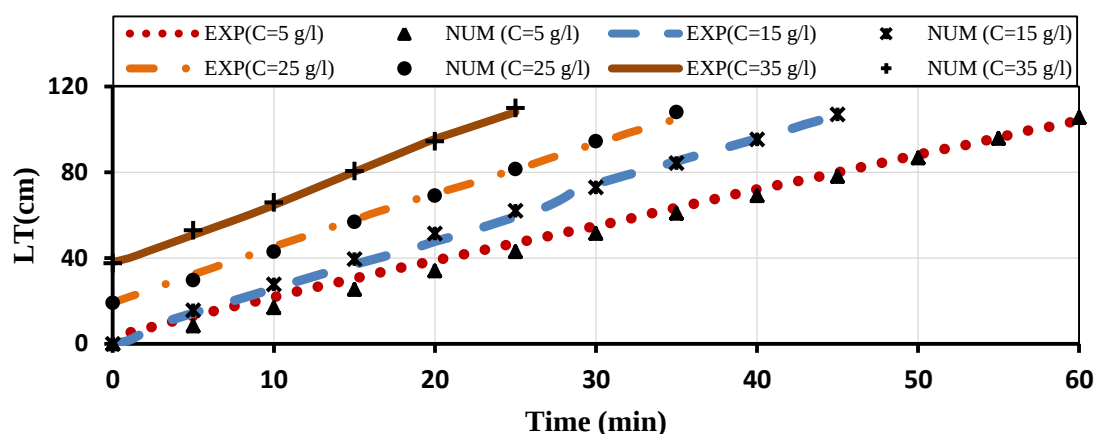
شرایط دائمی مرحله دوم ($\text{Time} = 0$)، زاویه هجوم برای غلظت‌های ۲۵ و ۳۵ گرم بر لیتر به ترتیب برابر ۳۳ و ۳۲ درجه است. با شروع مرحله سوم و پیشروی مجدد سطح مشترک در داخل آبخوان، به علت حرکت رو به بالای رأس سطح مشترک بر روی مرز آب شور، مادامی که رأس سطح مشترک به سطح ایستابی (تراز ۴۶/۸۸ سانتی‌متری) می‌رسد زاویه هجوم افزایش می‌یابد ولی از آن به بعد که ارتفاع رأس سطح مشترک ثابت می‌شود و پنجه سطح مشترک همچنان به پیشروی ادامه می‌دهد، از مقدار زاویه هجوم به تدریج کاسته می‌شود تا در انتهای آزمایش به مقدار ۲۹/۵ و ۲۵ درجه می‌رسند. البته برای غلظت‌های ذکر شده، افزایش زاویه هجوم و رسیدن به مقدار حداکثری آن، در همان اوایل فرآیند هجوم (حدوداً ۵ دقیقه بعد آغاز مرحله سوم) رخ می‌دهد و پس از آن زاویه هجوم روند نزولی را تا انتهای آزمایش طی می‌کند. بنابراین به عنوان یک نتیجه کلی می‌توان بیان کرد که در شرایط کاهش سطح ایستابی به تراز پایین‌تر از سطح آب شور، ضمن حرکت سطح مشترک به سمت مرز زمین از شیب آن کاسته می‌شود.

علت کاهش شیب سطح مشترک را در اثر افزایش غلظت آب شور می‌توان چنین توصیف کرد: در شرایطی که سطح ایستابی آبخوان پایین‌تر از سطح آب شور کویر قرار می‌گیرد دو عامل اصلی به صورت توأم بر پیشروی آب شور اثر می‌گذارند (هر چند اثرات پراکندگی مکانیکی و پخشیدگی مولکولی نیز بر توزیع شوری و گسترش ناحیه اختلاط موثر هستند). عامل اول، اختلاف چگالی بین آب شور و شیرین است (مشابه آبخوان ساحلی) و عامل دوم شیب هیدرولیکی موجود در سیستم آبخوان است. در اثر اختلاف چگالی، پدیده انتقال آزاد محلول رخ می‌دهد، بنابراین آب‌های شور تمایل به پیشروی از عمق آبخوان را به سمت مرز زمین دارند. درحالی‌که در اثر شیب هیدرولیکی، انتقال اجباری محلول رخ می‌دهد که در نتیجه آن آب‌های شور تمایل به پیشروی در راستای شیب هیدرولیکی و از سرتاسر مقطع جریان را در داخل آبخوان دارند. در یک سیستم آبخوان با شیب هیدرولیکی ثابت، هر چه غلظت آب شور بیشتر شود، اثر اختلاف چگالی بر انتقال محلول بیشتر می‌شود. این باعث می‌شود که شدت جریان ورودی آب شور از عمق به داخل آبخوان بیشتر شود و همچنین آب‌های شوری که از ارتفاعات بالاتر به داخل آبخوان هجوم آورده‌اند، به علت چگالی بیشتر با سرعت بالاتری نسبت به آب‌های شور رقیق به عمق آبخوان نفوذ می‌کنند (شماتیکی از فرآیند انتقال آزاد در شکل ۴-۲۱ دیده می‌شود). بنابراین هر چه غلظت آب شور بیشتر شود، سرعت پیشروی نقاط پایینی سطح

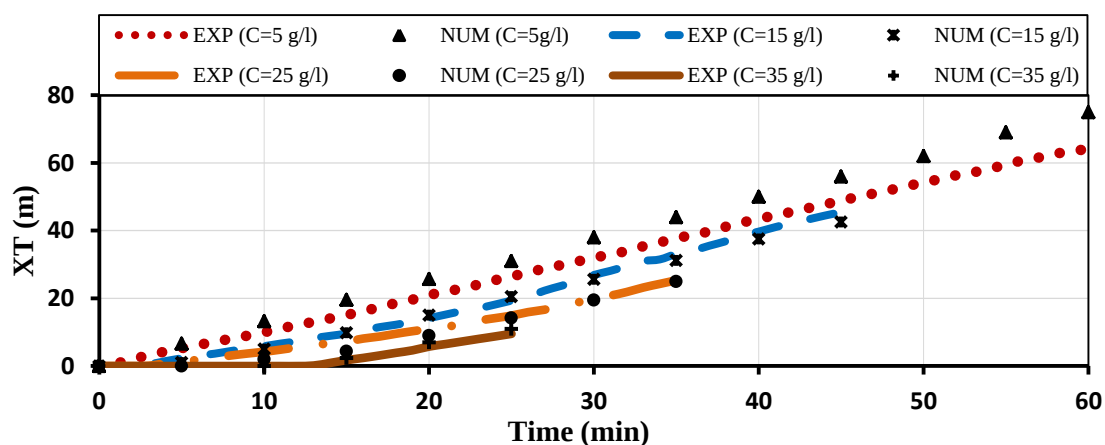
مشترک (به طور مشخص پنجه سطح مشترک) زیادتر می‌شود در حالی که بسته به میزان اثر هر یک از عوامل اختلاف چگالی و شیب هیدرولیکی، از یک ارتفاع مشخصی روی سطح مشترک به بالا از سرعت پیشروی نقاط بالایی آن (به طور مشخص رأس سطح مشترک) کاسته می‌شود. این موضوع در شکل ۴-۲۲ که موقعیت پنجه و رأس سطح مشترک را برای غلظت‌های مختلف، در شرایط گذرا نشان می‌دهد بهتر نمایان است. نمودارهای شکل ۴-۲۲ نشان می‌دهند، در شرایطی که مدت‌زمان طی شده از آغاز مرحله هجوم یکسان باشد، افزایش غلظت آب شور موجب می‌شود که از طرفی پنجه سطح مشترک مسافت بیشتری را طی کند و از طرفی دیگر رأس سطح مشترک پیشروی کمتری داشته باشد. بنابراین هر چه غلظت آب شور بیشتر شود، اختلاف فاصله افقی بین پنجه و رأس سطح مشترک بیشتر می‌شود و در نتیجه سطح مشترک با شیب کمتری به سمت مرز زمین حرکت می‌کند.



شکل ۴-۲۱ شماتیکی از وقوع پدیده انتقال آزاد هنگام پیشروی آب شور به آبخوان مجاور کویر



(الف)



(ب)

شکل ۴-۲۲ موقعیت شاخص‌های پنجه و راس سطح مشترک نسبت به زمان در غلظت‌های مختلف آب شور، الف) شاخص پنجه سطح مشترک ب) شاخص راس سطح مشترک.

برای درک نسبت توانایی هر یک از فرآیندهای انتقال آزاد و انتقال اجباری بر حرکت آب شور، بیر (Bear, 1972) رابطه (۴-۲) را پیشنهاد کرد. این رابطه نشان‌دهنده نسبت سرعت جریان انتقالی آزاد به سرعت جریان انتقالی اجباری است.

$$M = \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_0} \right) / \left(\frac{\Delta h}{\Delta L} \right) \quad (۴-۲)$$

در رابطه فوق $\Delta\rho$: اختلاف چگالی بین آب شور و شیرین، ρ_0 : چگالی آب شیرین و Δh اختلاف ارتفاع هیدرولیکی بین دو نقطه با فاصله طولی ΔL است. با توجه به رابطه فوق اگر $M \gg 1$ باشد، انتقال آزاد بر حرکت آب شور غالب است. اگر $M \ll 1$ باشد، انتقال اجباری بر حرکت آب شور غالب است و اگر مقدار $M \cong 1$ باشد، هر دو انتقال به مقدار یکسانی بر حرکت محلول آب شور موثرند. مقدار عددی M برای گرادیان هیدرولیکی و غلظت‌های مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۴-۱ ارائه شده است. در تمامی آزمایش‌های انجام گرفته، مقدار چگالی آب شیرین برابر $997/3$ کیلو گرم بر متر مکعب در نظر گرفته شده است.

جدول ۴-۱ اندازه شاخص M برای غلظت‌های مختلف و شیب هیدرولیک این تحقیق

$C (g/l)$	۵	۱۵	۲۵	۳۵
$\rho_c (kg/m^3)$	$1000/3$	$1007/3$	$1014/3$	$1025/25$
$\Delta\rho$	۳	۱۰	۱۷	$23/95$
$\frac{\Delta\rho}{\rho_0}$	$0/003008$	$0/01$	$0/017$	$0/024$
$\frac{\Delta h}{\Delta L}$	$0/0139$	$0/0139$	$0/0139$	$0/0139$
M	$0/216$	$0/721$	$1/11$	$1/727$

با توجه به جدول فوق، در غلظت ۵ گرم بر لیتر که مقدار عددی M به مراتب کمتر از یک است، رفتار سطح مشترک توسط انتقال اجباری کنترل می‌شود. بنابراین راستای حرکت سطح مشترک (از پنجه تا راس) زاویه کوچکی با جهت اصلی جریان (افق) می‌سازد. در حالی که در غلظت ۳۵ گرم بر لیتر که مقدار M به مراتب بزرگتر از یک است، رفتار سطح مشترک تحت تاثیر انتقال آزاد است. بنابراین راستای حرکت سطح مشترک با جهت اصلی جریان زاویه نسبتاً بزرگی ایجاد می‌کند.

علت کاهش شیب سطح مشترک را در طول زمان نیز می‌توان ناشی از وقوع پدیده انتقال آزاد دانست. همان طور که در بالا اشاره شد، آب‌های شور وارد شده به آبخوان از سطوح فوقانی، در اثر نیروی شناوری به سمت عمق آبخوان نفوذ می‌کنند و باعث حرکت سریع‌تر پنجه می‌شوند. این فرآیند در طول مدت زمان هجوم ادامه

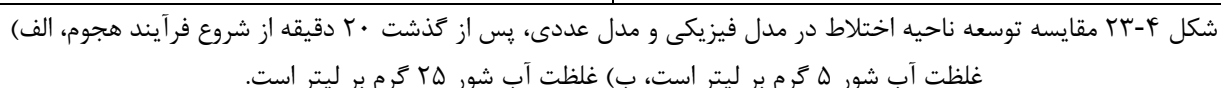
می‌یابد، بنابراین همواره پنجه سطح مشترک از رأس آن فاصله می‌گیرد و در نتیجه شیب سطح مشترک با گذشت زمان کاهش می‌یابد.

موضوع مهم دیگری که در تصاویر شکل ۴-۱۶ تا شکل ۴-۱۹ دیده می‌شود، مسئله شوری سطح ایستابی^۱ آبخوان است. شوری سطح ایستابی در اثر ورود راس سطح مشترک به داخل آبخوان رخ می‌دهد. شوری سطح ایستابی از آن نظر حائز اهمیت است که می‌تواند تهدید جدی برای از بین رفتن منابع آب سطوح بالایی آبخوان و همچنین شوری لایه‌های بالایی خاک باشد. تصاویر شکل ۴-۱۶ تا شکل ۴-۱۹ و نمودارهای شکل ۴-۲۰ ب نشان می‌دهند که پدیده شوری سطح ایستابی در آبخوان‌های مجاور کویر به شکل وسیع‌تری نسبت به آبخوان‌های ساحلی رخ می‌دهد. نتایج آزمون‌ها ما نشان می‌دهد که این پدیده در غلظت‌های پایین سطح بیشتری را نسبت به غلظت‌های بالاتر تهدید می‌کند. به طوری که اگر زمان هجوم برای غلظت‌های مختلف یکسان در نظر گرفته شود، مشاهده می‌شود که راس سطح مشترک در غلظت‌های پایین پیشروی بیشتری نسبت به غلظت‌های بالاتر داشته‌اند (شکل ۴-۲۲ ب). البته این نتیجه با تغییر در مقیاس آبخوان و میزان اثر هر یک از عوامل، اختلاف چگالی، شیب هیدرولیکی و مقدار پراکندگی مکانیکی ممکن است، تغییر کند.

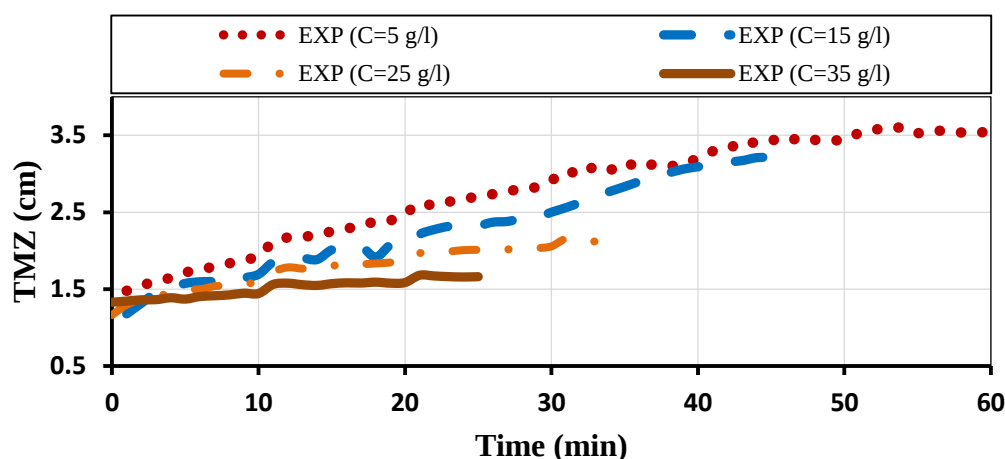
۴-۳-۱-۲ رفتار ناحیه اختلاط

ناحیه اختلاط توسعه یافته در مدل فیزیکی، خصوصاً در غلظت‌های پایین، دارای شکل نسبتاً ناهمواری در امتداد سطح مشترک بود، در حالی که در مدل عددی این ناحیه به شکل هموارتری شبیه‌سازی گردید. به عنوان مثال، شکل ناحیه اختلاط برای غلظت‌های ۵ و ۲۵ گرم بر لیتر پس از مدت‌زمان ۲۰ دقیقه از شروع مرحله هجوم، در شکل ۴-۲۳ نشان داده شده است. توسعه ناهموار ناحیه اختلاط در مدل فیزیکی می‌تواند به علت اثرات ناهمگنی‌های جزئی، در نقاط مختلف محیط متخلخل باشد. در صورتی که در مدل عددی، شبیه‌سازی ناحیه اختلاط با در نظر گرفتن محیط متخلخلی کاملاً همگن انجام گرفته است.

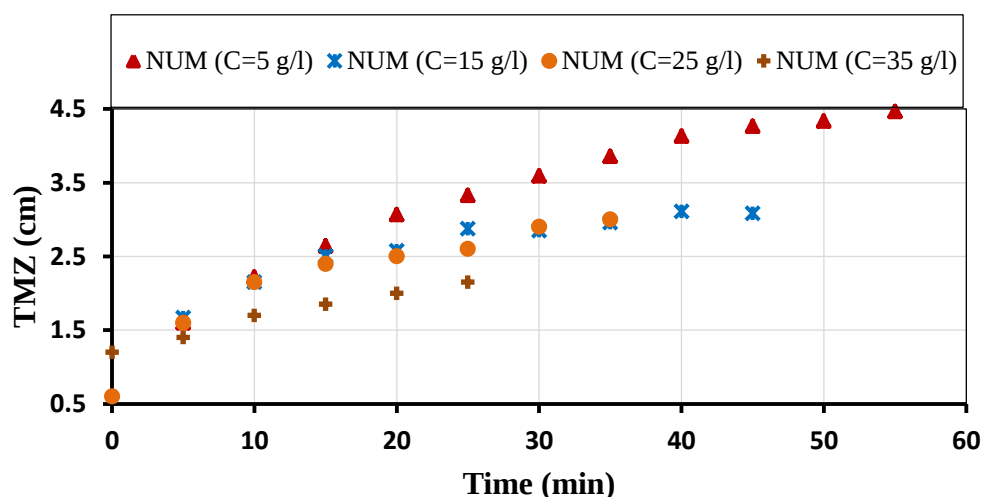
¹ Water table salinization



جهت بررسی رفتار ناحیه اختلاط در شرایط گذرا، ضخامت متوسط آن در غلظت‌های مختلف و در زمان‌های متفاوت اندازه‌گیری شد. شکل ۴-۲۴ و شکل ۴-۲۵ تغییرات ضخامت ناحیه اختلاط (TMZ) را در مدت زمان هجوم آب شور به ترتیب در مدل فیزیکی و مدل عددی نشان می‌دهد. نتایج آزمایشگاهی در بازه‌های زمانی ۱ دقیقه‌ای، با استفاده از فن پردازش تصویر، و نتایج عددی در فواصل ۵ دقیقه‌ای از مدل سوترا استخراج شده‌اند. اگر چه اختلاف اندکی بین نتایج دو مدل‌سازی دیده می‌شود ولی به طور کلی روند تغییرات هر دو نوع مدل‌سازی، برای هر ۴ غلظت، مشابه هم هستند. علت این اختلاف می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی از قبیل: عدم ساختار کاملاً یکسان محیط متخلخل در مدل فیزیکی و یا اختلاف بسیار کوچک مقادیر پراکنده‌پذیری طولی و عرضی در مدل‌های فیزیکی و عددی باشد.



شکل ۴-۲۴ تغییرات ضخامت متوسط ناحیه اختلاط در شرایط گذرا در مدل فیزیکی



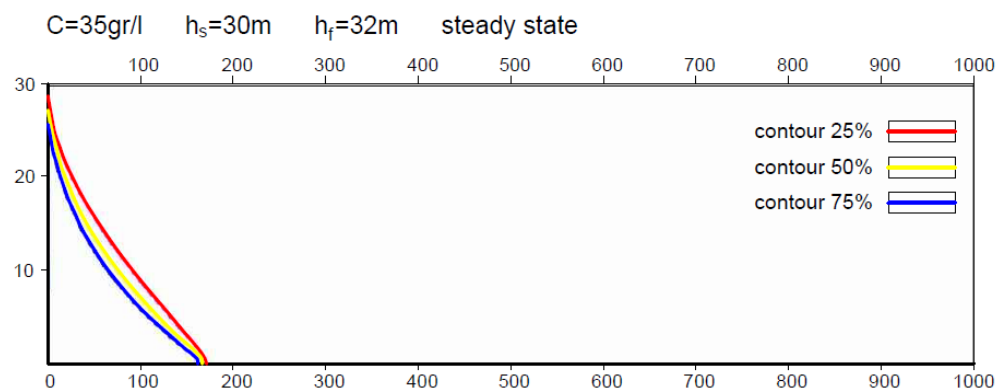
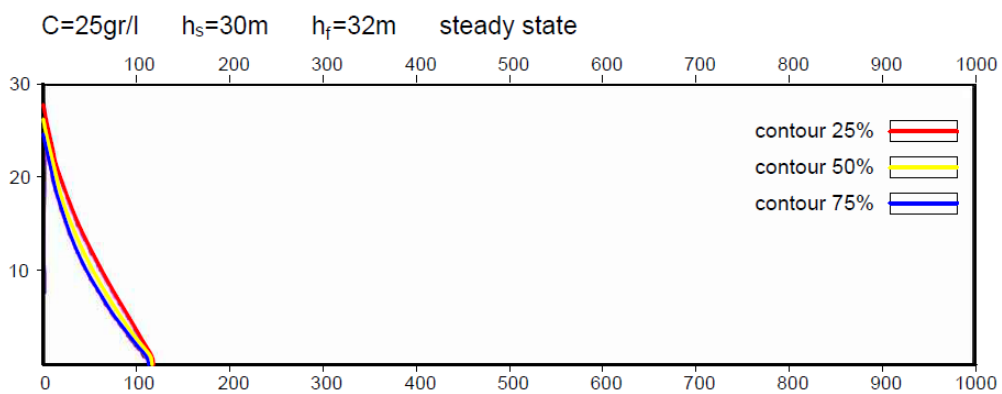
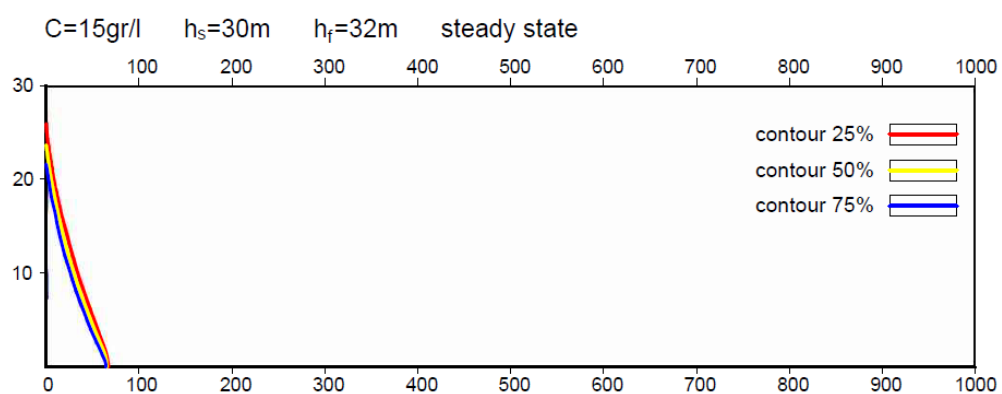
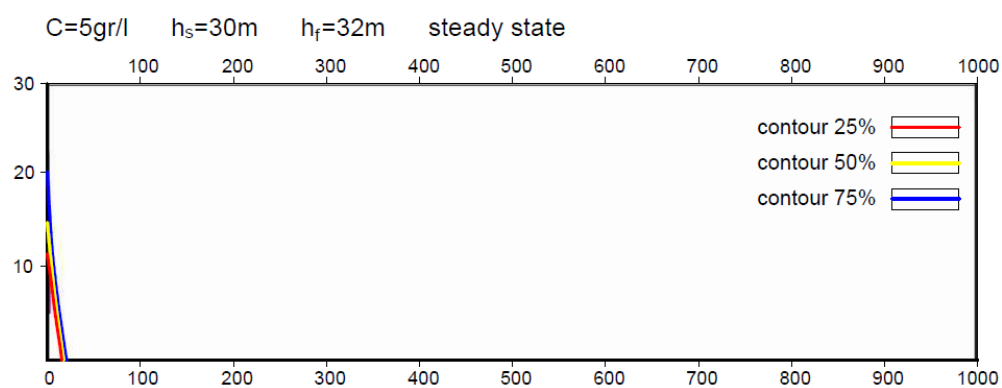
شکل ۴-۲۵ نتایج شبیه‌سازی عددی ضخامت متوسط ناحیه اختلاط در شرایط گذرا

نتایج هر دو مدل‌سازی نشان می‌دهند که ضخامت متوسط ناحیه اختلاط در غلظت ۵ گرم بر لیتر دارای بیشترین مقدار است و در غلظت ۳۵ گرم بر لیتر کمترین مقدار را دارد. تغییرات ضخامت ناحیه اختلاط برای دو غلظت ۱۵ و ۲۵ گرم بر لیتر در مدل عددی تقریباً با هم برابرند، ولی در مدل آزمایشگاهی مقدار ضخامت ناحیه اختلاط برای غلظت ۲۵ گرم بر لیتر (از دقیقه ۲۰ به بعد) مقدار کمی بیشتر از غلظت ۱۵ گرم بر لیتر است. اما به هر حال دامنه تغییرات این دو غلظت در حد فاصل مقادیر دو غلظت ۵ و ۳۵ گرم بر لیتر قرار دارند. همان طور که قبلاً بیان گردید، شکل‌گیری ناحیه اختلاط در درجه اول ناشی از اثرات پراکندگی مکانیکی و پخشیدگی مولکولی ماده محلول است، و پارامترهای مهم دیگری نظیر: شیب هیدرولیکی، اختلاف چگالی بین آب شور و شیرین، مشخصات هندسی و هیدرولوژیکی آبخوان و اثرات پمپاژ نیز بر توسعه و

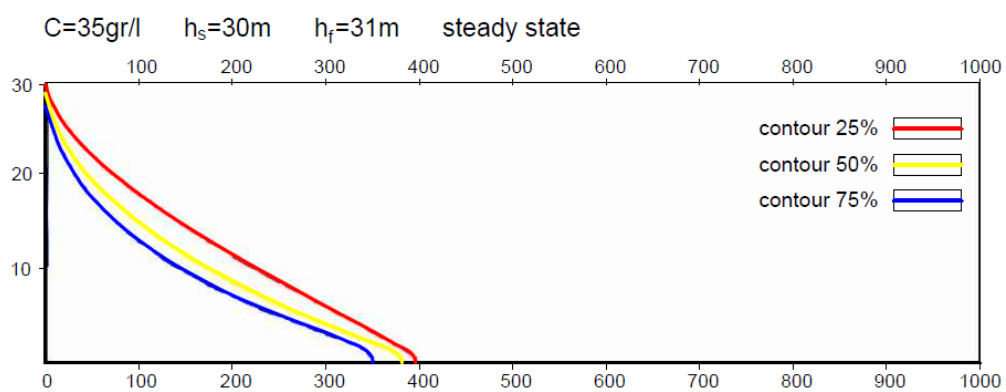
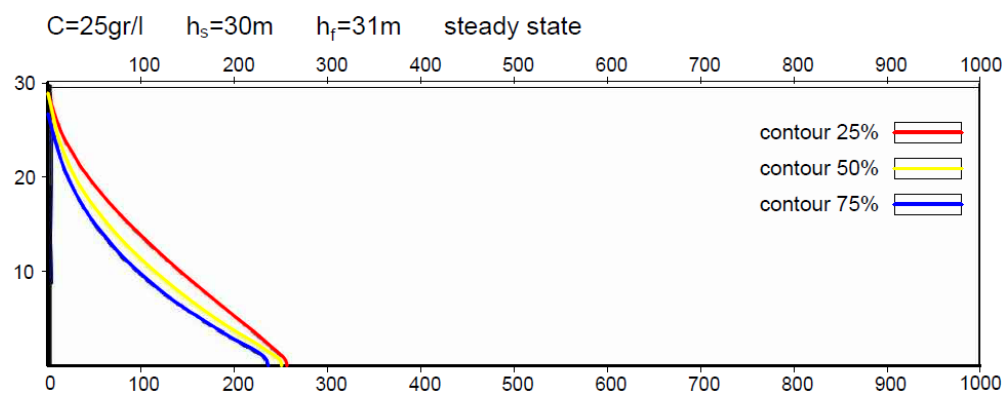
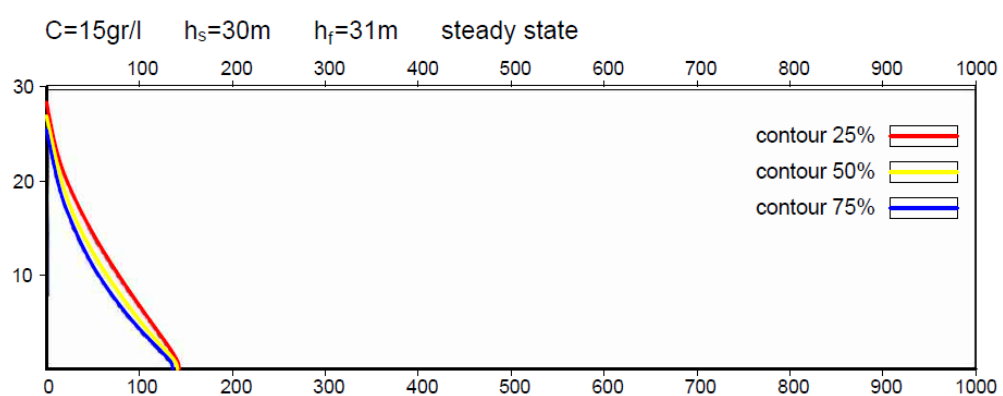
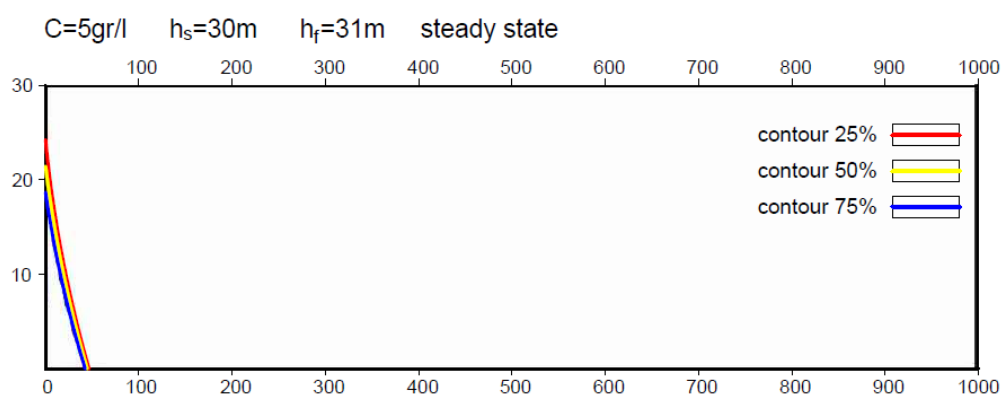
گسترش آن موثر باشند (Werner et al., 2013). عوامل فوق‌الذکر به صورت ترکیبی عمل می‌کنند و تا کنون هیچ توافق جامعی از نظر میزان اثرگذاری هر کدام از این عوامل بر گسترش ناحیه اختلاط صورت نگرفته است (Werner et al., 2013). در آزمایش‌های این تحقیق احتمالاً پراکنده‌پذیری طولی، نقش موثرتری را نسبت به فاکتورهای دیگر از جمله پراکنده‌پذیری عرضی و اختلاف چگالی داشته‌اند. چون در غلظت ۵ گرم بر لیتر، مولفه افقی سرعت سطح مشترک، بزرگتر از مولفه افقی سرعت سطح مشترک در غلظت‌های بالاتر بوده، اثرات پراکنده‌پذیری طولی وابسته سرعت منجر به توسعه بیشتر ناحیه اختلاط شده است.

۴-۳-۲ نتایج آزمون‌های عددی در مقیاس میدانی

به منظور بررسی رفتار سطح مشترک و ناحیه اختلاط در مقیاس-میدانی، آبخوانی با مشخصات هندسی و هیدرولوژیکی آبخوان مسئله مبنا که از آن در بررسی پدید هجوم آب دریا (قسمت ۳-۵-۲)، استفاده شد در نظر گرفته شد. شبیه‌سازی‌های عددی برای ۴ غلظت ۵، ۱۵، ۲۵ و ۳۵ گرم بر لیتر به ترتیب زیر انجام گرفت: ابتدا ارتفاع آب شیرین در مرز راست آبخوان، در تراز ۳۲ متری و ارتفاع آب شور در مرز چپ آبخوان در تراز ۳۰ متر تنظیم شدند. با این شرایط مرزی، شبیه‌سازی تا زمانی ادامه یافت که پیشروی گوه آب شور در داخل آبخوان متوقف شد و سیستم به شرایط دائمی رسید (مرحله اول). سپس ارتفاع آب شیرین از تراز ۳۲ متری به تراز ۳۱ متری به طور آنی افت کرد، در نتیجه گوه تا رسیدن شرایط دائمی جدید به داخل آبخوان پیشروی کرد (مرحله دوم). سرانجام ارتفاع آب شیرین از تراز ۳۱ متر به تراز ۲۹ متری به صورت آنی کاهش یافت تا پدیده هجوم آب شور در داخل آبخوان مجاور کویر شبیه‌سازی شود. شکل ۴-۲۶ و شکل ۴-۲۷ مقدار پیشروی گوه آب شور را در غلظت‌های مختلف آب شور، به ترتیب برای شرایط دائمی مرحله اول ($h_f = 32\text{m}$) و شرایط دائمی مرحله دوم ($h_f = 31\text{m}$) متر نشان می‌دهد. همان طور که انتظار می‌رفت، هم افزایش غلظت آب شور کویر و هم کاهش ارتفاع آب شیرین مرزی موجب افزایش پیشروی گوه به داخل آبخوان شده است.



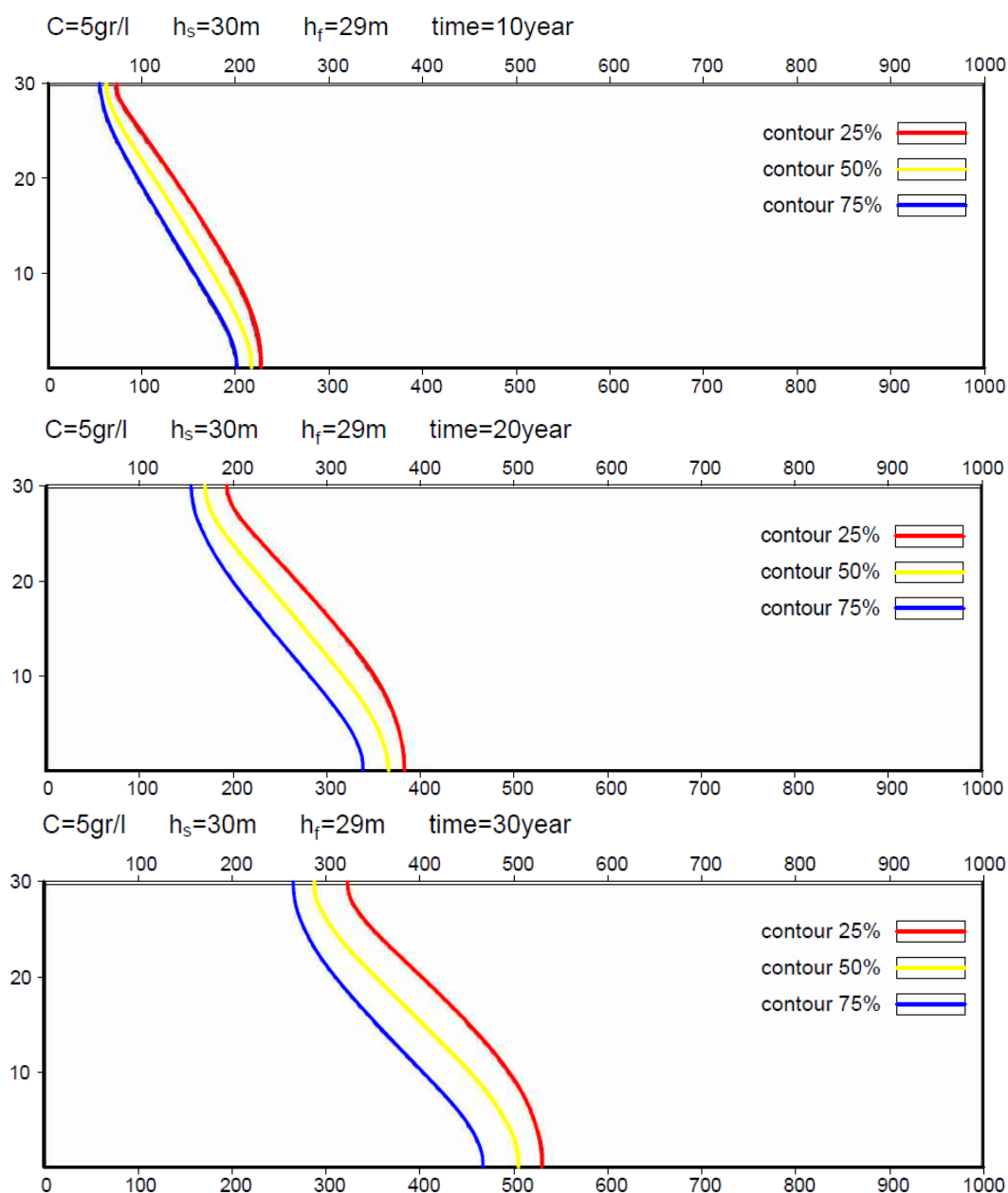
شکل ۴-۲۶ پیشروی نهایی گوه آب شور در غلظت‌ها مختلف با شرایط مرزی $h_s=30\text{m}$ و $h_f=32\text{m}$



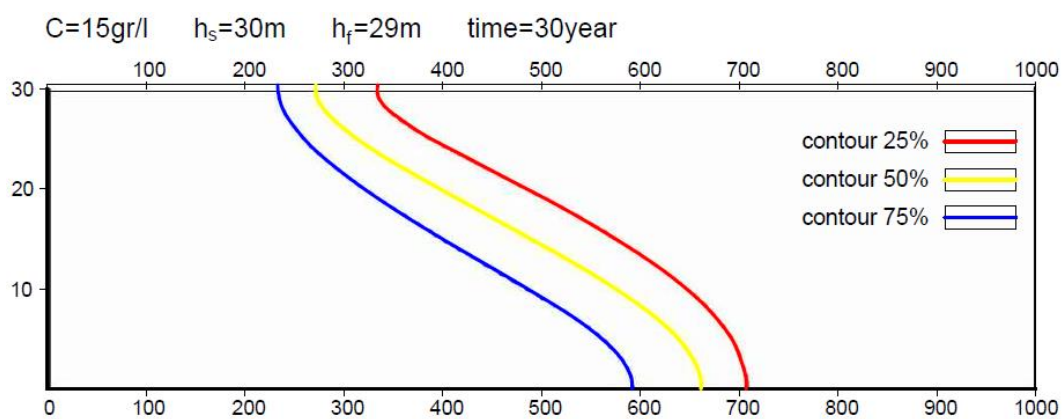
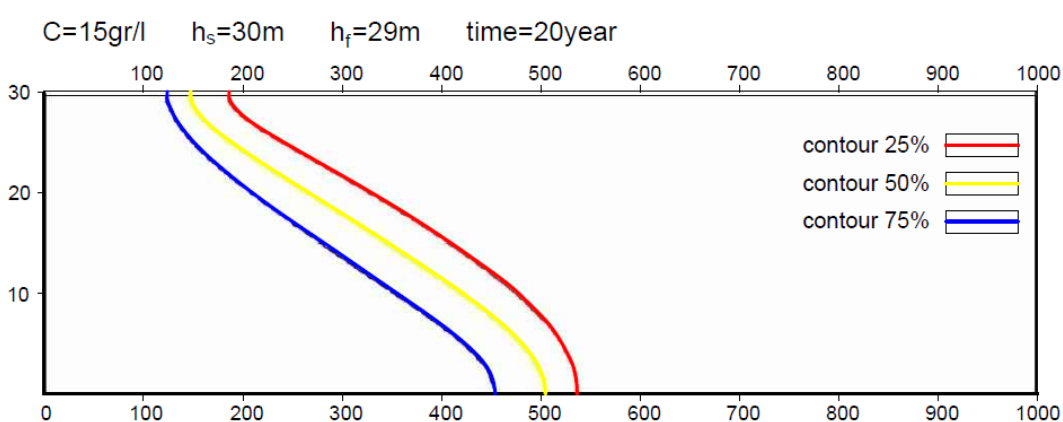
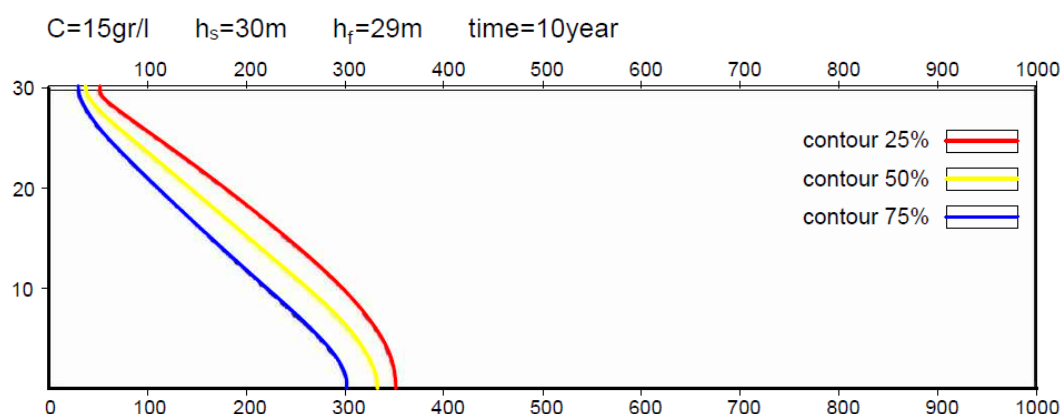
شکل ۴-۲۷ پیشروی نهایی گوه آب شور در غلظت‌ها مختلف با شرایط مرزی $h_s=30\text{m}$ و $h_f=31\text{m}$

۴-۳-۱ رفتار سطح مشترک

با کاهش آبی ارتفاع آب شیرین در مرز سمت راست از تراز ۳۱ متری به ۲۹ متر، جریان از سمت مرز آب شور به سمت آبخوان تغییر جهت و گوه آب شور به داخل آبخوان هجوم آورد. شکل ۴-۲۸ تا شکل ۴-۳۱ حرکت گذرای سطح مشترک را به ترتیب برای غلظت‌های ۵، ۱۵، ۲۵ و ۳۵ گرم برلیتر، پس از گذشت ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سال از لحظه آغاز فرآیند هجوم، نشان می‌دهد.

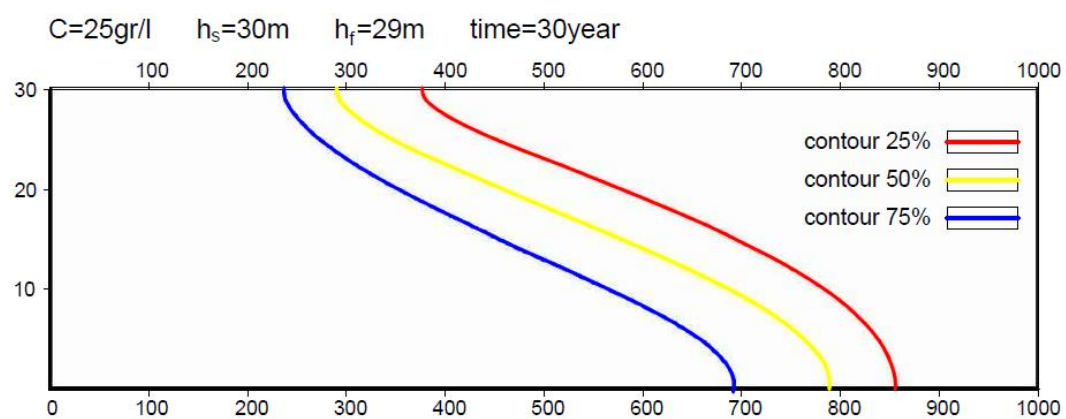
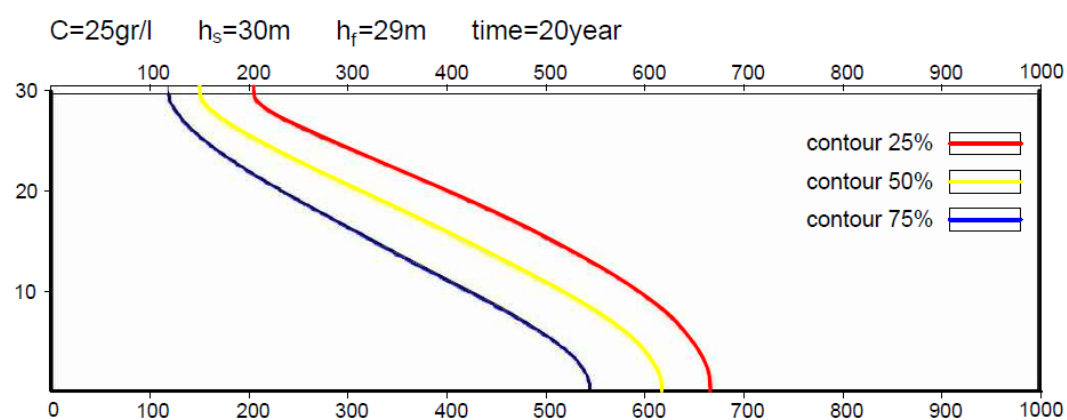
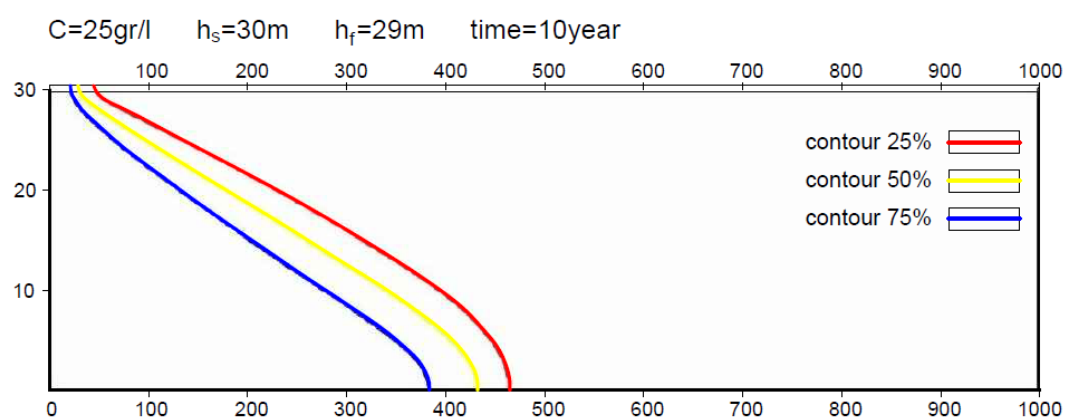


شکل ۴-۲۸ رفتار گذرای سطح مشترک برای غلظت آب شور ۵ گرم بر لیتر.

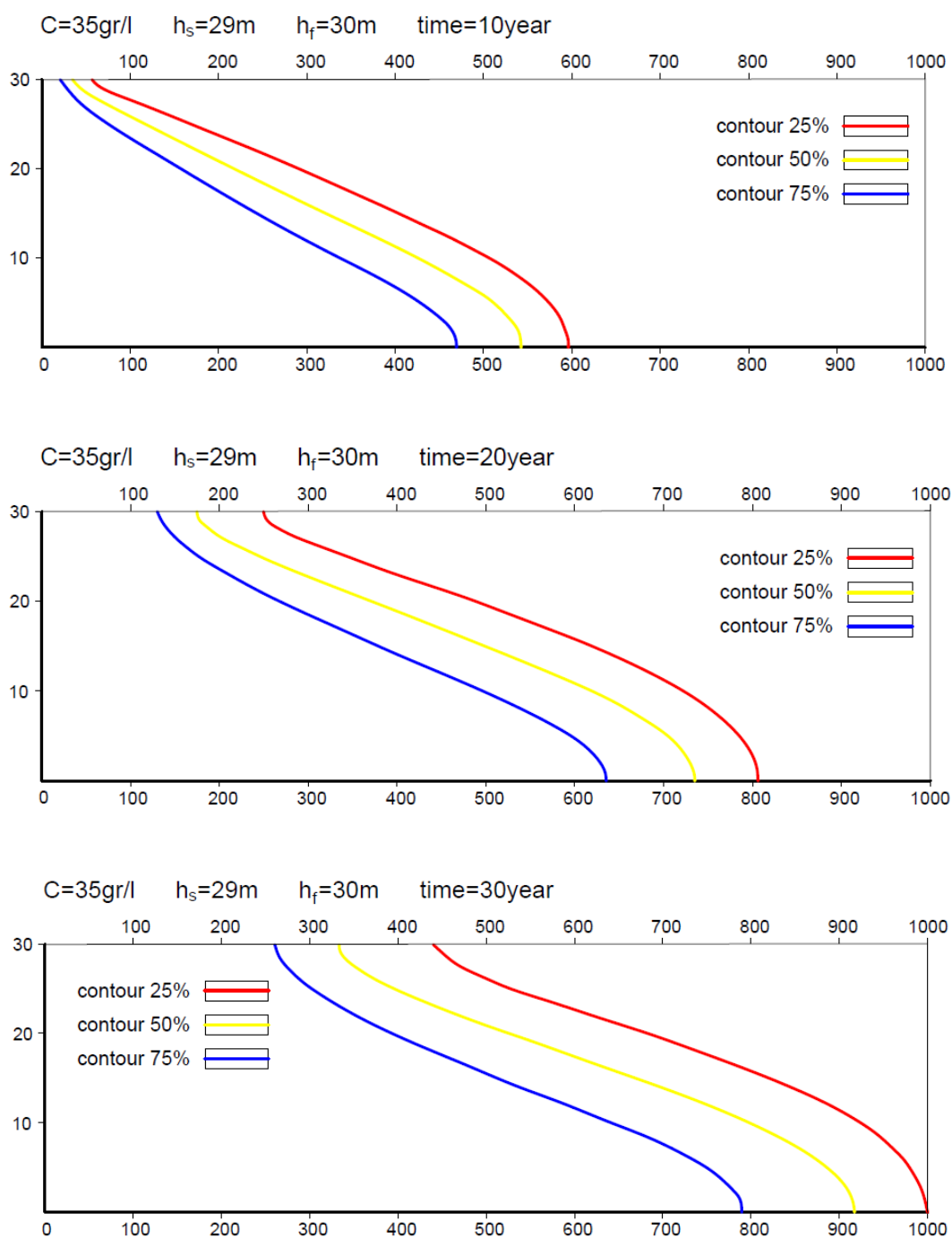


شکل ۴-۲۹ رفتار گذرای سطح مشترک برای غلظت آب شور ۱۵ گرم بر لیتر.

مشاهده می‌شود که در غلظت آب شور ۳۵ گرم بر لیتر، پنجه سطح مشترک پس از ۳۰ سال تقریباً به انتهای آبخوان رسیده است در حالی که برای غلظت‌های پایین‌تر چون اثر اختلاف چگالی بر پیشروی سطح مشترک کمتر می‌شود، مدت زمان رسیدن پنجه سطح مشترک به مرز آبخوان بیشتر می‌شود. برای مقایسه بهتر رفتار سطح مشترک در همه غلظت‌ها، نتایج در فواصل زمانی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سال نمایش داده شده‌اند.

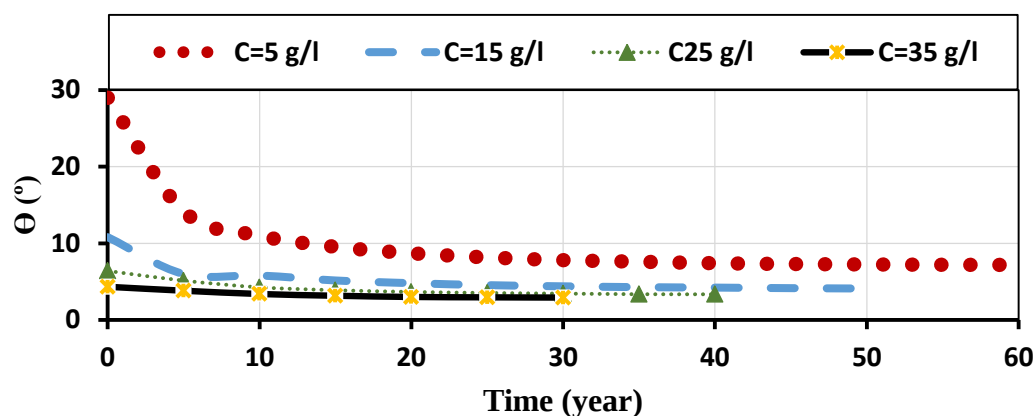


شکل ۴-۳ رفتار گذرای سطح مشترک برای غلظت آب شور ۲۵ گرم بر لیتر.

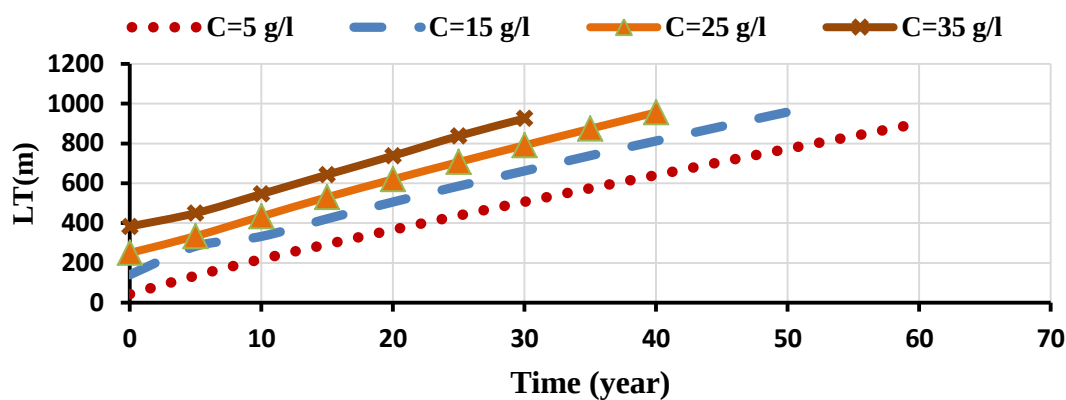


شکل ۴-۳۱ رفتار گذرای سطح مشترک برای غلظت آب شور ۳۵ گرم بر لیتر.

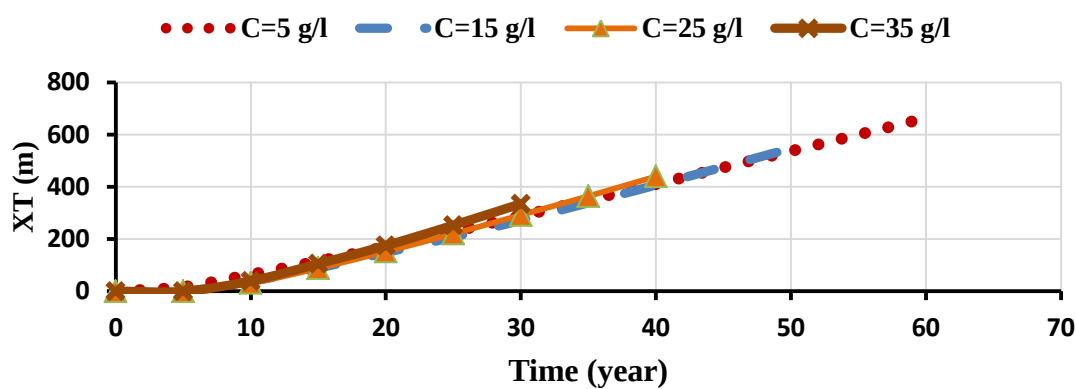
برای بررسی دقیق‌تر رفتار سطح مشترک در غلظت‌های مختلف، نمودار تغییرات شاخص‌های اصلی سطح مشترک یعنی زاویه هجوم، موقعیت پنجه سطح مشترک و موقعیت راس سطح مشترک، در طول مدت زمان هجوم آب شور، به ترتیب در شکل ۴-۳۲ تا شکل ۴-۳۴ نشان داده شده‌اند.



شکل ۳۲-۴ تغییرات زاویه هجوم نسبت به زمان در غلظت‌های مختلف آب شور (مقیاس میدانی).



شکل ۳۳-۴ موقعیت شاخص‌های پنجه سطح مشترک نسبت به زمان در غلظت‌های مختلف آب شور (مقیاس میدانی).



شکل ۳۴-۴ موقعیت شاخص‌های راس سطح مشترک نسبت به زمان در غلظت‌های مختلف آب شور (مقیاس میدانی).

نمودارهای تغییرات زاویه هجوم در شکل ۳۳-۴ بعلاوه نمودارهای شکل ۲۸-۴ تا شکل ۳۱-۴ نشان می‌دهند که نتایج بدست آمده برای رفتار سطح مشترک در مقیاس میدانی با نتایج بدست آمده در مقیاس-آزمایشگاهی هم‌خوانی دارد (عبارتی: الف) هر چه غلظت آب شور افزایش یابد، سطح مشترک با شیب کمتری به سمت مرز زمین حرکت می‌کند. ب) در یک غلظت ثابت هر چه از مدت زمان فرآیند هجوم می‌گذرد از شیب سطح مشترک کاسته می‌شود. شایان ذکر است که در مقیاس میدانی به علت نسبت به مراتب کوچکتر ضخامت به طول آبخوان، تغییرات زاویه هجوم در محدوده‌ای با مقادیر کوچکتر رخ می‌دهد.

فصل ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱ مقدمه

در فصل چهارم نتایج آزمایشگاهی و عددی به‌دست آمده از این پژوهش ارائه و تفسیر شد. در این فصل ضمن جمع‌بندی این نتایج، پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی بیان می‌شود. مطابق فصل‌های قبلی ابتدا به مسئله هجوم آب دریا به آبخوان‌های ساحلی و پس از آن به مسئله هجوم آب شور به آبخوان‌های مجاور کویر پرداخته می‌شود.

۵-۲ هجوم آب دریا به آبخوان‌های ساحلی در شرایط گذرا

در این تحقیق رفتار گوه آب شور و ناحیه اختلاط در اثر تغییرات ارتفاع مرزی آب شیرین، به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی شد. در هر دو روش مدل‌سازی، برداشت نتایج به صورت خودکار انجام گرفت. برای بررسی کامل‌تر رفتار گوه آب شور، سه شاخص: طول پنجه (L_T)، مساحت (S_{SW}) و ارتفاع (h_{SW}) برای گوه در نظر گرفته شد و تغییرات آن‌ها در شرایط گذرا آنالیز گردید. جهت تایید و تفسیر بیشتر نتایج بدست آمده در مقیاس-آزمایشگاهی، شبیه‌سازی‌های عددی در مقیاس میدانی انجام شد. مهمترین یافته‌های این تحقیق در ادامه آمده است.

۵-۲-۱ نتیجه‌گیری

۱- نرخ نسبی تغییرات مساحت گوه آب شور (S_{SW}) با نرخ نسبی تغییرات طول پنجه گوه (L_T)، در شرایط گذرا برابر است.

۲- در هنگام هجوم آب دریا، شاخص ارتفاع گوه (h_{SW}) خیلی زودتر از شاخص‌های پنجه گوه (L_T) و مساحت گوه (S_{SW}) به شرایط دائمی می‌رسد، چون سرعت نسبی تغییرات ارتفاع گوه بیشتر از سرعت نسبی تغییرات دو شاخص دیگر است.

۳- در اوایل مرحله بازگشت، شاخص ارتفاع گوه (h_{SW}) با سرعت نسبی بیشتری نسبت به پنجه گوه کاهش می‌یابد. اما پس از مدتی، جریان‌های آب‌های شیرین وارد ناحیه اختلاط می‌شوند و شروع به شستن این ناحیه می‌کنند. جریان‌های لب شور در امتداد سطح مشترک، به سمت خروجی جریان

(روی مرز دریا) حرکت می‌کنند، در نتیجه از سرعت افت ارتفاع گوه کاسته می‌شود. فرآیند شستشو و حرکت ذرات لب شور به سمت خروجی جریان مادامی ادامه می‌یابد که پنجه گوه متوقف شود، در نتیجه هر سه شاخص تقریباً با هم متوقف می‌شوند.

۴- اگر چه در اوایل مرحله بازگشت گوه، سرعت جریان در محل منحنی‌های رقیق ناحیه اختلاط بیشتر از سرعت جریان در محل منحنی‌های غلیظ‌تر آن است، اما فرآیند شستشو و اختلاط موجب می‌شود که لایه‌های غلیظ‌تر ناحیه اختلاط رقیق‌تر شوند و ناحیه اختلاط گسترش یابد. با نزدیک شدن گوه به شرایط دائمی، فرآیند شستشو کاهش می‌یابد در نتیجه منحنی‌های رقیق ناحیه به کانتورهای غلیظ‌تر آن نزدیک می‌شوند و ناحیه اختلاط مجدداً منقبض می‌شود. سرانجام با رسیدن گوه به شرایط دائمی، ضخامت متوسط ناحیه اختلاط با مقدار آن در ابتدای مرحله پیشروی برابر می‌شود.

۵- نرخ کاهش و افزایش ارتفاع مرزی آب شیرین تأثیری بر ضخامت ناحیه اختلاط در شرایط دائمی ندارد. اما هر چه سرعت افزایش ارتفاع آب شیرین کمتر شود، از میزان افزایش ناحیه اختلاط که در ابتدای مرحله بازگشت رخ می‌دهد کاسته می‌شود.

۶- نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی نشان داد که ضخامت ناحیه اختلاط در پنجه گوه نازک است و با بالا رفتن در امتداد سطح مشترک بر مقدار آن افزوده می‌شود. ولی در مقیاس میدانی، تغییرات ضخامت ناحیه اختلاط در امتداد سطح مشترک متفاوت از مقیاس آزمایشگاهی بود. این نشان می‌دهد که رفتار ناحیه اختلاط در شرایط مختلف، ممکن است متفاوت باشد.

۵-۲-۲ پیشنهادهای آتی

نتایج آزمایشگاهی و عددی این تحقیق می‌تواند دید مناسبی را از حرکت گوه آب شور و ناحیه اختلاط در شرایط گذرا فراهم کند. با این وجود، این نتایج برای یک آبخوان دوبعدی همگن با شرایط مرزی ایده‌ال بدست آمده‌اند. بنابراین برای مطالعات بعدی می‌تواند موارد ذیل پیشنهاد گردد:

۱- بررسی آزمایشگاهی و عددی، اثر نوسانات سطح آب بر توسعه ناحیه اختلاط، نوسانات سطح آب دریا می‌تواند ناشی از اثرات جذر و مد باشد و نوسانات سطح ایستابی می‌تواند در اثر برداشت و تغذیه ایجاد شود.

۲- بررسی اثرات ناهمگنی محیط متخلخل بر رفتار گوه آب شور و ناحیه اختلاط در شرایط گذرا، بررسی‌های انجام گرفته می‌توانند از شکل دوبعدی به شکل سه بعدی نیز توسعه یابند.

۳- بررسی آزمایشگاهی و عددی، رفتار گذرای گوه آب شور و ناحیه اختلاط برای یک سیستم شار- کنترل شده و مقایسه نتایج آن با نتایج این تحقیق

۵-۳ هجوم آب شور به آبخوان‌های مجاور کویر

برای شناسایی شکل پیشروی سطح مشترک آب شور و شیرین و توسعه ناحیه اختلاط در آبخوان‌های مجاور کویر، مطالعاتی به صورت آزمایشگاهی و عددی انجام گرفت. چون غلظت آب شور کویر می‌تواند از مکانی به مکان دیگر متغیر باشد، بررسی‌ها برای چهار غلظت ۵، ۱۵، ۲۵ و ۳۵ گرم بر لیتر انجام شد. در این تحقیق برای شناسایی ناحیه اختلاط در مدل فیزیکی و برداشت سایر نتایج در شرایط گذرا، از فن پردازش تصویر استفاده گردید. در ادامه نتایج اصلی این تحقیق بیان می‌شود.

۵-۳-۱ نتیجه‌گیری

۱- هر چه غلظت آب شور کویر افزایش یابد، اثر اختلاف چگالی بر انتقال آزاد محلول بیشتر می‌شود. هر چه فرآیند انتقال آزاد با شدت بیشتر رخ دهد، سرعت حرکت پنجه سطح مشترک افزایش می‌یابد. در نتیجه فاصله پنجه از راس بیشتر می‌شود و سطح مشترک با شیب کمتری به سمت مرز زمین حرکت می‌کند.

۲- فارغ از اینکه مقدار غلظت آب شور کویر چند است، هر چه از زمان آغاز فرآیند هجوم بگذرد، از شیب سطح مشترک کاسته می‌شود.

۳- پدیده شوری سطح آب در آبخوان‌های مجاور کویر در سطح وسیع‌تری نسبت به آبخوان‌های ساحلی رخ می‌دهد.

- ۴- مقایسه نتایج مدل‌سازی آزمایشگاهی و عددی نشان داد که به علت وجود ناهمگنی جزئی در محیط متخلخل مدل فیزیکی، شکل ناحیه اختلاط در آن نسبت به مدل عددی ناهموارتر و پراکنده‌تر است.
- ۵- بر خلاف آبخوان‌های ساحلی که پراکنده‌پذیری عرضی عمدتاً نقش مهم‌تری را نسبت به پراکنده‌پذیری طولی در گسترش ناحیه اختلاط دارد، در آبخوان مجاور کویر به علت سرعت بالای پیشروی آب شور نسبت به آبخوان‌های ساحلی، احتمالاً پراکنده‌پذیری طولی تأثیر بیشتر بر توسعه ناحیه اختلاط نسبت به پراکنده‌پذیری عرضی داشته باشد، که البته نیاز به بررسی بیشتر است

۵-۳-۲ پیشنهادهای آتی

- ۱- بررسی رفتار سطح مشترک و ناحیه اختلاط در مقیاس میدانی و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی و همچنین انجام آنالیز حساسیت به پارامترهای مختلف
- ۲- بررسی اثر آبخوان‌های لایه‌بندی شده با هدایت‌های هیدرولیکی مختلف بر شکل پیشروی آب شور و ناحیه اختلاط
- ۳- بررسی آزمایشگاهی و عددی، دینامیک بازگشت سطح مشترک و ناحیه اختلاط در شرایطی که سطح ایستابی آبخوان در اثر عواملی مثل تغذیه مجدداً بالاتر از سطح آب شور کویر قرار گیرد.
- ۴- بررسی تغییرات فصلی آب و هوا بر رفتار سطح مشترک و ناحیه اختلاط

منابع

- Abarca, E., Carrera, J., Sánchez-Vila, X., Dentz, M., 2007. Anisotropic dispersive Henry problem. *Advances in Water Resources*, 30(4): 913-926.
- Abarca, E., Clement, T.P., 2009. A novel approach for characterizing the mixing zone of a saltwater wedge. *Geophysical Research Letters*, 36(6).
- Ataie-Ashtiani, B., Werner, A.D., Simmons, C.T., Morgan, L.K., Lu, C., 2013. How important is the impact of land-surface inundation on seawater intrusion caused by sea-level rise? *Hydrogeology Journal*, 21(7): 1673-1677.
- Bakker, M., 1998. Transient Dupuit interface flow with partially penetrating features. *Water resources research*, 34(11): 2911-2918.
- Bakker, M., 2006. Analytic solutions for interface flow in combined confined and semi-confined, coastal aquifers. *Advances in water resources*, 29(3): 417-425.
- Barlow, P., 2003. Ground water in freshwater-saltwater environments of the Atlantic Coast: US Geological Survey Circular 1262, 113 p. Also available at <http://pubs.usgs.gov/circ/2003/circ1262/pdf/circ1262.pdf>.
- Bear, J., 1972. Dynamics of fluids in porous media. Courier Corporation.
- Bear, J., Cheng, A.H.-D., 2010. Modeling groundwater flow and contaminant transport, 23. Springer Science & Business Media.
- Bertorelle, E., 2014. Laboratory experiments on the saltwater intrusion process.
- Boufadel, M., Suidan, M., Venosa, A., 1999. Numerical modeling of water flow below dry salt lakes: effect of capillarity and viscosity. *Journal of Hydrology*, 221(1-2): 55-74.
- Briere, P.R., 2000. Playa, playa lake, sabkha: Proposed definitions for old terms. *Journal of Arid Environments*, 45(1): 1-7.
- Carretero, S., Rapaglia, J., Bokuniewicz, H., Kruse, E., 2013. Impact of sea-level rise on saltwater intrusion length into the coastal aquifer, Partido de La Costa, Argentina. *Continental Shelf Research*, 61: 62-70.
- Chang, S.W., Clement, T.P., 2012. Experimental and numerical investigation of saltwater intrusion dynamics in flux - controlled groundwater systems. *Water Resources Research*, 48(9).
- Chang, S.W., Clement, T.P., 2013. Laboratory and numerical investigation of transport processes occurring above and within a saltwater wedge. *Journal of contaminant hydrology*, 147: 14-24.
- Chang, S.W., Clement, T.P., Simpson, M.J., Lee, K.-K., 2011. Does sea-level rise have an impact on saltwater intrusion? *Advances in water resources*, 34(10): 1283-1291.
- Cherry, G.S., 2007. US Geological Survey Georgia Water Science Center and City of Brunswick-Glynn County Cooperative Water Program-Summary of Activities, July 2005 through June 2006. 2331-1258.
- Dagan, G., Zeitoun, D.G., 1998. Seawater-freshwater interface in a stratified aquifer of random permeability distribution. *Journal of Contaminant Hydrology*, 29(3): 185-203.
- Duffy, C.J., Al - Hassan, S., 1988. Groundwater circulation in a closed desert basin: topographic scaling and climatic forcing. *Water Resources Research*, 24(10): 1675-1688.
- Fan, Y., Duffy, C.J., Oliver Jr, D.S., 1997. Density-driven groundwater flow in closed desert basins: field investigations and numerical experiments. *Journal of Hydrology*, 196(1-4): 139-184.
- Freeze, R., Cherry, J., 1979, Groundwater. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 604 p.

- Goswami, R.R., Clement, T.P., 2007. Laboratory - scale investigation of saltwater intrusion dynamics. *Water Resources Research*, 43(4).
- Held, R., Attinger, S., Kinzelbach, W., 2005. Homogenization and effective parameters for the Henry problem in heterogeneous formations. *Water resources research*, 41(11).
- Henry, H.R., 1964. Effects of dispersion on salt encroachment in coastal aquifers, in "Seawater in Coastal Aquifers". US Geological Survey, Water Supply Paper, 1613: C70-C80.
- Holzbecher, E., 2005. Groundwater flow pattern in the vicinity of a salt lake. *Hydrobiologia*, 532(1-3): 233-242.
- Hussain, M.S., Javadi, A.A., 2016. Assessing impacts of sea level rise on seawater intrusion in a coastal aquifer with sloped shoreline boundary. *Journal of Hydro-Environment Research*, 11: 29-41.
- Ketabchi, H., Mahmoodzadeh, D., Ataie-Ashtiani, B., Simmons, C.T., 2016. Sea-level rise impacts on seawater intrusion in coastal aquifers: Review and integration. *Journal of Hydrology*, 535: 235-255.
- Kuan, W.K. et al., 2012. Tidal influence on seawater intrusion in unconfined coastal aquifers. *Water Resources Research*, 48(2).
- Lu, C., Chen, Y., Zhang, C., Luo, J., 2013. Steady-state freshwater-seawater mixing zone in stratified coastal aquifers. *Journal of hydrology*, 505: 24-34.
- Lu, C., Werner, A.D., 2013. Timescales of seawater intrusion and retreat. *Advances in water resources*, 59: 39-51.
- Luyun Jr, R., Momii, K., Nakagawa, K., 2009. Laboratory-scale saltwater behavior due to subsurface cutoff wall. *Journal of Hydrology*, 377(3-4): 227-236.
- Luyun Jr, R., Momii, K., Nakagawa, K., 2011. Effects of recharge wells and flow barriers on seawater intrusion. *Groundwater*, 49(2): 239-249.
- Mehdizadeh, S.S., Werner, A.D., Vafaie, F., Badaruddin, S., 2014. Vertical leakage in sharp-interface seawater intrusion models of layered coastal aquifers. *Journal of hydrology*, 519: 1097-1107.
- Morgan, L.K., Bakker, M., Werner, A.D., 2015. Occurrence of seawater intrusion overshoot. *Water Resources Research*, 51(4): 1989-1999.
- Morgan, L.K., Stoeckl, L., Werner, A.D., Post, V.E., 2013. An assessment of seawater intrusion overshoot using physical and numerical modeling. *Water Resources Research*, 49(10): 6522-6526.
- Oz, I., Shalev, E., Yechieli, Y., Gavrieli, I., Gvirtzman, H., 2014. Flow dynamics and salt transport in a coastal aquifer driven by a stratified saltwater body: Lab experiment and numerical modeling. *Journal of Hydrology*, 511: 665-674.
- Oz, I., Shalev, E., Yechieli, Y., Gvirtzman, H., 2015. Saltwater circulation patterns within the freshwater-saltwater interface in coastal aquifers: Laboratory experiments and numerical modeling. *Journal of Hydrology*, 530: 734-741.
- Paster, A., Dagan, G., 2007. Mixing at the interface between two fluids in porous media: a boundary-layer solution. *Journal of Fluid Mechanics*, 584: 455-472.
- Post, V.E., Simmons, C.T., 2010. Free convective controls on sequestration of salts into low-permeability strata: insights from sand tank laboratory experiments and numerical modelling. *Hydrogeology journal*, 18(1): 39-54.
- Prinos, S.T., Wacker, M.A., Cunningham, K.J., Fitterman, D.V., 2014. Origins and delineation of saltwater intrusion in the Biscayne aquifer and changes in the distribution of saltwater in Miami-Dade County, Florida. 2328-0328, US Geological Survey.
- Reilly, T.E., Goodman, A.S., 1985. Quantitative analysis of saltwater-freshwater relationships in groundwater systems—A historical perspective. *Journal of Hydrology*, 80(1-2): 125-160.

- Robinson, G., Hamill, G., Ahmed, A.A., 2015. Automated image analysis for experimental investigations of salt water intrusion in coastal aquifers. *Journal of Hydrology*, 530: 350-360.
- Rosen, M.R., 1994. The importance of groundwater in playas: A review of playa classifications and. Paleoclimate and basin evolution of playa systems, 289: 1.
- Shiklomanov, I.A., 1998. World water resources. A new appraisal and assessment for the 21st century.
- Simmons, C.T., Narayan, K.A., Wooding, R.A., 1999. On a test case for density - dependent groundwater flow and solute transport models: The Salt Lake Problem. *Water Resources Research*, 35(12): 3607-3620.
- Simpson, M.J., Clement, T.P., 2004. Improving the worthiness of the Henry problem as a benchmark for density - dependent groundwater flow models. *Water Resources Research*, 40(1).
- Strack, O., 1976. A single - potential solution for regional interface problems in coastal aquifers. *Water Resources Research*, 12(6): 1165-1174.
- Tweed, S., Leblanc, M., Cartwright, I., Favreau, G., Leduc, C., 2011. Arid zone groundwater recharge and salinisation processes; an example from the Lake Eyre Basin, Australia. *Journal of Hydrology*, 408(3-4): 257-275.
- Vásquez, C., Ortiz, C., Suárez, F., Muñoz, J.F., 2013. Modeling flow and reactive transport to explain mineral zoning in the Atacama salt flat aquifer, Chile. *Journal of hydrology*, 490: 114-125.
- Voss, C., Provost, A., 2002. SUTRA, a model for saturated–unsaturated, variable-density ground-water flow with solute or energy transport. *Water-Resour. Invest. Rep.* 2002-4231. USGS, Reston, VA. SUTRA, a model for saturated–unsaturated, variable-density ground-water flow with solute or energy transport. *Water-Resour. Invest. Rep.* 2002-4231. USGS, Reston, VA.: -.
- Watson, T.A., Werner, A.D., Simmons, C.T., 2010. Transience of seawater intrusion in response to sea level rise. *Water Resources Research*, 46(12).
- Werner, A.D., 2017. On the classification of seawater intrusion. *Journal of Hydrology*, 551: 619-631.
- Werner, A.D. et al., 2013. Seawater intrusion processes, investigation and management: recent advances and future challenges. *Advances in Water Resources*, 51: 3-26.
- Werner, A.D., Simmons, C.T., 2009. Impact of sea - level rise on sea water intrusion in coastal aquifers. *Groundwater*, 47(2): 197-204.
- Werner, A.D. et al., 2012. Vulnerability indicators of sea water intrusion. *Groundwater*, 50(1): 48-58.
- Wheater, H.S., Mathias, S.A., Li, X., 2010. Groundwater modelling in arid and semi-arid areas. Cambridge University Press.
- Winston, R.B., 2014. Modifications made to ModelMuse to add support for the Saturated-Unsaturated Transport model (SUTRA). 2328-7055, US Geological Survey.
- Wooding, R., Tyler, S.W., White, I., 1997a. Convection in groundwater below an evaporating salt lake: 1. Onset of instability. *Water Resources Research*, 33(6): 1199-1217.
- Wooding, R., Tyler, S.W., White, I., Anderson, P., 1997b. Convection in groundwater below an evaporating salt lake: 2. Evolution of fingers or plumes. *Water Resources Research*, 33(6): 1219-1228.
- Yechieli, Y., Wood, W.W., 2002. Hydrogeologic processes in saline systems: playas, sabkhas, and saline lakes. *Earth-Science Reviews*, 58(3-4): 343-365.

نظری، عطیه. نخعی، محمد. صادقی راد، محمد علی و عرب بافرانی، علیرضا. (۱۳۸۹)، " بررسی رخداد نفوذ آب شور دریاچه نمک به آبخوان دشت قم با استفاده از مدل سازی کمی آبخوان"، دومین کنفرانس سراسری مدیریت جامع منابع آب، کرمان.

جعفری عظیم آبادی، هادی. (۱۳۹۰)، " بررسی کاهش کیفیت منابع آب زیرزمینی در ارتباط با افت سطح ایستابی ناشی از پمپاژ، آبخوان هرات در استان یزد"، هفتمین کنفرانس زمین شناسی و محیط زیست ایران، شاهرود.

محمدی، اعظم و کرمی، غلامحسین، (۱۳۹۲)، " بررسی هجوم آب شور از کویر مرکزی به آبخوان اسفراین (خراسان شمالی)"، فصلنامه زمین شناسی کاربردی، شماره ۱، سال ۹: ص ۵۳.

شیخ وائلو، محمود و لشکری پور، غلامرضا، (۱۳۹۲)، " بررسی و ارزیابی پیشروی آب شور در آبخوان دشت درونه و تعیین الگوی اختلاط آن بر اساس نمودارهای ترکیبی"، پنجمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، تهران.

ملکی فرد، مهری. نیکوکاران، غلامرضا. بیات، حسین و حسینی، سعید، (۱۳۹۲)، " بررسی افزایش شوری در جنوب شرق دشت قزوین و مدیریت کنترل آن"، پنجمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، تهران.

کاردان مقدم، حمید و بنی حبیب، محمد ابراهیم، " بررسی اثرات زیست محیطی هجوم آب شور به آبخوان- های کویری (مطالعه موردی: استان خراسان جنوبی-آبخوان سرایان)"، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، شماره ۳، جلد ۳۰، ص ۶۷۳.

بهرامی جوی، احسان و حسینی، سید محمود، (۱۳۹۲)، " مقایسه سازماندار روش های زمین آماری برای برآورد شوری آب زیرزمینی در مناطق کویری- مطالعه موردی: دشت فیض آباد-مهولات"، مجله تحقیقات منابع آب ایران، شماره ۲، سال ۱۱، ص ۱.

محمودیان شوشتری، محمد، (۱۳۹۲)، " هیدرولیک آبهای زیرزمینی"، جلد اول، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه شهید چمران، اهواز، ۳۸۴

Aquifers are the main source of freshwater supply in many parts of the world. Unfortunately, these natural reserves are vulnerable to saltiness due to their proximity and the hydraulic contact to saline water, whether in the coastal area or adjacent to the deserts. In the coastal regions, the seawater concentration is almost constant and the water table is generally higher than the sea level. While in arid and semi-arid areas, the saline water concentration of desert varies from place to place, and there is the possibility of a drop in the aquifer water table to a level lower than the desert saline water, due to groundwater excessive extraction. The objectives for this research are: a) Evaluation of the transient movement of saltwater wedge and the mixing zone in coastal aquifers, b) Study on the shape of the interface of saline and fresh water and the mixing zone in the aquifers adjacent to deserts, in which the water table is lower than the saline water level of the desert. Seawater intrusion into coastal aquifers is inherently a transient process. But due to the limitations in acquiring and analysis of numerical and experimental results, less attentions has been paid to this transitory behavior. In this research data was collected automatically and without human intervention in both laboratory experiments and numerical model. Image processing techniques was used for acquiring of laboratory data and the results of numerical simulations was acquiring by algorithmic implementations. The results for saltwater wedge showed that: 1) Behavior of wedge area index is significantly similar to the index of toe wedge length in transient conditions. 2) In the advancing case, the wedge height reaches the steady state condition much sooner than the saltwater wedge toe length and the saltwater wedge area, while in the receding case, all three index stop at the same time. Also, the results for the mixing zone showed that: 1) at the early stages of the wedge receding due to washing and mixing processes, the thickness of the mixing zone increases. But continuing the receding stage, washing process is

reduced and gradually stops. As a result, the dilute regions get closer to the dense regions of the mixing zone and thickness of the mixing zone is reduced again. 2) Speed of advancing and receding of saltwater wedge does not affect the mixing zone thickness in the steady state condition. The results of experimental and numerical studies on saltwater intrusion problem into the aquifers adjacent to the desert showed that: 1) as the concentration of desert saline water increases, the interface moves toward the aquifer with lower slope. Regardless of how much desert saline water concentration is, the slope of interface decreases over time

Keywords: Saltwater intrusion, Coastal aquifers, Aquifers adjacent to deserts, Saltwater wedge, Mixing zone, Interface slope



Shahrood University of Technology

Faculty of Civil Engineering

Ph.D. Thesis in Hydraulic Engineering

**Experimental and numerical investigation on interaction between
salt and fresh water in porous media**

By: Abbasali Rezapoor

**Supervisor:
Dr Seyed Fazlolah Saghravani**

**Advisor:
Dr Alireza Ahmadifard**

September 2018