

مطالعه پدیده هجوم آب شور به آبخوان‌های ساحلی در شرایط گذرا با استفاده از پردازش تصویر و مدل‌سازی عددی

عباسعلی رضاپور¹، سید فضل‌الله ساغروانی^{2*} و علیرضا احمدی فرد³

1- دانشجوی دکتری گرایش هیدرولیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود

2- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود

3- دانشیار دانشکده مهندسی برق و رباتیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

*saghrovani@shahroodut.ac.ir

چکیده - شناخت مسئله هجوم آب شور در شرایط گذرا، نقش مؤثری بر مدیریت منابع آب‌های زیرزمینی ساحلی دارد. در این مطالعه، دینامیک گذرای گوه آب شور و ناحیه اختلاط در آبخوانی آزاد با سیستم هد-کنترل شده در مرزها بصورت آزمایشگاهی و عددی بررسی شد. داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از فن پردازش تصویر برداشت شدند و شبیه‌سازی‌های عددی توسط کد SUTRA انجام گرفت. برای بررسی رفتار گوه آب شور در شرایط گذرا، علاوه بر آنالیز شاخص طول پنجه گوه که در اغلب تحقیقات آزمایشگاهی و عددی قبلی مورد استفاده قرار گرفته است، تغییرات شاخص ارتفاع گوه در مرز دریا نیز نسبت به زمان اندازه‌گیری شد. نتایج نشان دادند که الف) در هنگام پیشروی گوه، شاخص ارتفاع گوه به مراتب زودتر از شاخص طول پنجه گوه به شرایط دائمی می‌رسد، این در حالی است که در هنگام بازگشت گوه، هر دو شاخص بطور هم زمان به وضعیت پایدار می‌رسند. ب) بر خلاف طول پنجه گوه که در وضعیت برگشت زودتر از وضعیت پیشروی به شرایط دائمی می‌رسد، شاخص ارتفاع گوه در هر دو وضعیت پیشروی و بازگشت تقریباً مدت زمان یکسانی را برای رسیدن به شرایط دائمی طی می‌کند. همچنین نتایج برای ناحیه اختلاط نشان داد که در اثر فرایندهای شستشو و اختلاط، ناحیه اختلاط در اوایل مرحله بازگشت گوه گسترش می‌یابد و با نزدیک شدن گوه به شرایط دائمی، فرایند شستشو متوقف شده و ناحیه اختلاط کم‌کم منقبض می‌گردد.

کلیدواژگان: هجوم آب شور، گوه آب شور، ناحیه اختلاط، شرایط گذرا، پردازش تصویر، کد SUTRA.

1- مقدمه

در ترازوی بالاتر از سطح دریا قرار دارد، در نتیجه جریان طبیعی از سمت آبخوان به سمت دریا سرازیر است (Bear and Cheng, 2010). در چنین شرایطی آب شور دریا به علت چگالی بیشتر نسبت به آب زیرزمینی به سمت آبخوان هجوم می‌آورد و یک گوه آب شور¹ را در عمق آبخوان ایجاد می‌کند (Kuan et al., 2012; Chang and

آبخوان‌های ساحلی منبع اصلی تأمین آب شیرین در بسیاری از نواحی ساحلی جهان هستند. متأسفانه این منابع به علت مجاورت با دریاها و اقیانوس‌ها در معرض هجوم آب شور¹ قرار گرفته‌اند. عموماً در آبخوان‌های ساحلی شرایط به‌گونه‌ای است که سطح ایستابی آبخوان

² Saltwater wedge

¹ Saltwater intrusion

آبخوانی با سیستم هد-کنترل شده⁵ بررسی نمودند. Chang and Clement (2012) اثر تغییر شار آب زیرزمینی را بر پیشروی و بازگشت گوه آب شور در آبخوانی با سیستم شار-کنترل⁶ شده مطالعه کردند. با اینکه در مطالعات فوق، برداشت داده‌ها از تصاویر آزمایشگاهی به صورت چشمی و در زمان‌های مشخصی انجام گرفت، نتایج آنها به‌عنوان معیاری برای تأیید مدل‌های عددی جریان‌های چگالی-متغیر⁷ ارائه شدند.

آزمایش‌های اندکی برای بررسی تغییرات ضخامت ناحیه اختلاط چه در شرایط دائمی و چه در شرایط گذرا، در مدل‌های فیزیکی انجام شده است. به علت مقیاس کوچک مدل‌های فیزیکی، ناحیه اختلاط نیز در آنها ضخامت کمی دارد (Werner et al., 2013). بنابراین شناسایی چشمی ناحیه اختلاط در مدل‌های آزمایشگاهی، سخت و شاید غیرممکن است (Robinson et al., 2015). از این‌رو در اکثر مطالعات آزمایشگاهی ناحیه اختلاط به صورت یک خط مشترک قاطع⁸ در نظر گرفته شده است. Abarca and Clement (2009) از محدود محققانی بودند که بر شناسایی ناحیه اختلاط در شرایط دائمی تمرکز کردند. آنها با توسعه روش رنگ‌سنجی⁹ نمایش مناسبی از محدوده ناحیه اختلاط، در شرایط دائمی ارائه دادند. اساس روش رنگ‌سنجی، تغییرات رنگ ماده فنول فتالین¹⁰ 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.

Lu et al., (2013) اثر ناهمگنی آبخوان لایه‌بندی شده¹¹ را بر ضخامت ناحیه اختلاط بررسی نمودند. مطالعات آنها در شرایط دائمی 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

(Clement, 2012). در طی فرایند هجوم، در محل خط مشترک آب شور و شیرین، ناحیه اختلاط¹ یا ناحیه انتقالی² شکل می‌گیرد. ناحیه اختلاط مشخصه مهم آبخوان‌های ساحلی است که غلظت نمک در سرتاسر عرض آن از غلظت آب شور دریا تا غلظت آب زیرزمینی آبخوان تغییر می‌کند (Werner et al., 2013). برای آبخوان‌های همگن و در شرایط دائمی، ضخامت ناحیه اختلاط اساساً تابعی از اثرات پراکندگی مکانیکی³ و پخشیدگی مولکولی⁴ ماده حل شده (نمک) است (Lu et al, 2013) درحالی‌که از عوامل بسیاری مانند ناهمگنی آبخوان، جذر و مد، بالآمدگی تراز دریا و پمپاژ تاثیر می‌پذیرد. بررسی‌های میدانی نشان می‌دهد که ناحیه اختلاط می‌تواند از چند متر تا چند کیلومتر گسترش یابد (Barlow, 2003; Cherry, 2006). از جایی که اختلاط مقدار حجم ناچیزی از آب شور با آب شیرین (حتی حدود 1%) موجب از بین رفتن کیفیت آب برای نوشیدن می‌شود، ناحیه اختلاط منطقه‌ای بااهمیت در آبخوان‌های ساحلی محسوب می‌شود (Abarca and Clement, 2009). درک هر چه بهتر رفتار گوه آب‌شور و ناحیه اختلاط در شرایط گذرا نقش مهمی بر بهبود مدیریت منابع آب‌های زیرزمینی ساحلی دارد.

مطالعات آزمایشگاهی بسیاری حرکت گوه آب شور را تحت تأثیر عوامل مختلف بررسی کرده‌اند. در اکثر این مطالعات، داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از مشاهدات چشمی برداشت شده‌اند (از جمله: Goswami and Clement, 2007; Chang and Clement, 2012; Kuan et al., 2014; Mehdizadeh et al., 2014, 2015 and Oz et al., 2014, 2015). برداشت چشمی داده‌ها از پارامترهای هجوم آب شور در شرایط گذرا، کاری سخت، زمان‌بر و همراه با خطای انسانی است (Robinson et al., 2015). لذا محققان برای بررسی رفتار گذرای گوه آب شور بیشتر بر اندازه‌گیری طول پنجه گوه، به‌عنوان شاخصی برای بیان میزان پیشروی گوه آب‌شور، در زمان‌های مشخص و محدود تمرکز داشته‌اند. (Goswami and Clement (2007) اثر تغییر سطح آب زیرزمینی را بر رفتار گوه آب‌شور در

⁵ Head-Controlled system

⁶ Flux-Controlled system

⁷ Variable-density flow

⁸ Sharp interface

⁹ Colorimetric method

¹⁰ Phenolphthalein

¹¹ Stratified aquifer

¹ Mixing zone

² Transition zone

³ Mechanical dispersion

⁴ Molecular diffusion

شایسته‌ای برای بررسی مسئله هجوم آب شور انجام شده است، اما هنوز شکاف‌های علمی در شناسایی و درک فرایندهای گذرای این پدیده وجود دارد (Werner et al., 2013). این پژوهش باهدف روشن کردن رفتار گذرای گوه آب‌شور و ناحیه اختلاط در آبخوان‌های آزاد، با سیستم هد-کنترل شده در مرزها، به دو روش آزمایشگاهی و عددی انجام شده است. به‌منظور بهبود داده‌های آزمایش، مدلی بزرگ‌تر از مطالعات گزارش‌شده قبلی انتخاب شد تا به کمک فن پردازش تصویر شناسایی بهتری از تغییرات ناحیه اختلاط در امتداد سطح مشترک صورت گیرد. برای شناسایی ناحیه اختلاط، از روشی متفاوت با کار (Robinson et al., 2015) که نیازمند صرف هزینه و وقت زیاد است، استفاده شد. برای بررسی کامل‌تر دینامیک گذرای گوه آب شور، علاوه بر بررسی تغییرات شاخص طول پنجه گوه (L) که در اغلب تحقیقات آزمایشگاهی و عددی قبلی از آن استفاده شده است، تغییرات شاخص ارتفاع گوه آب شور در مرز دریا (h) نیز در شرایط گذرا بررسی شدند. برای تفسیر برخی از پدیده‌های مشاهده شده در آزمایشگاه، از شبیه‌سازی عددی استفاده گردید.

2- مواد و روش‌ها

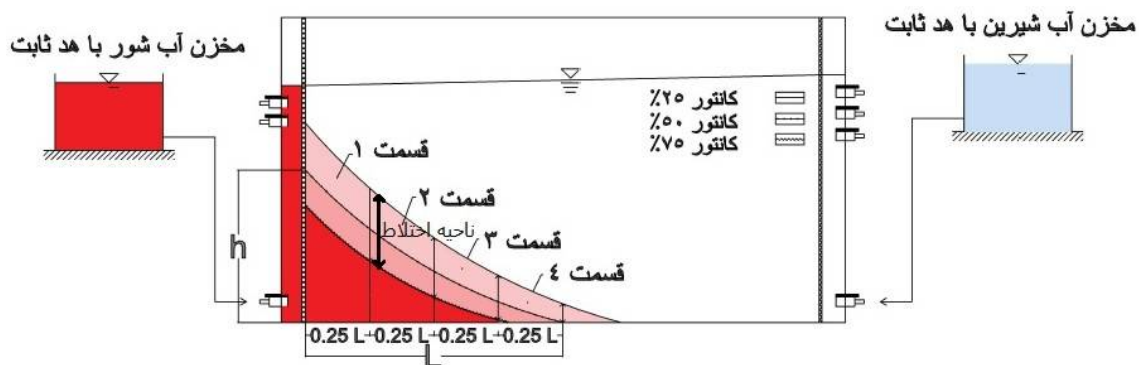
2-1- تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌های تحقیق حاضر در یک مخزن جریان دو بعدی انجام شد. مخزن جریان از جنس شیشه شفاف با ضخامت 10 میلی‌متر ساخته شد و اطراف آن به کمک پروفیل‌های آلومینیومی مهار گردید. 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 5 سانتی‌متر بود (شکل 1). محفظه مرکزی شامل محیط متخلخل (آبخوان) بود. محفظه‌های جانبی شامل آب شور و آب شیرین بود که شرایط مرزی را در طول مدت آزمایش‌ها ایجاد می‌کردند. در محفظه‌های جانبی شیر-هایی پلاستیکی تعبیه شدند که امکان تنظیم به‌موقع هد آب شور و شیرین را فراهم می‌کردند. برای جداسازی محیط متخلخل از محفظه‌های جانبی، از صفحه‌های پلکسی گلاس مشبک استفاده گردید.

در لایه‌ی میانی گسترش می‌یابد. در مقابل، چنانچه یک لایه با هدایت هیدرولیکی بالا در بین دو لایه با هدایت هیدرولیکی نسبتاً کم قرار گیرد، ضخامت ناحیه‌ی اختلاط در لایه‌ی میانی کاهش می‌یابد.

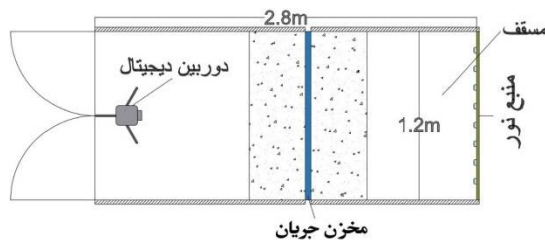
اخیراً (Robinson et al., 2015) با کمک آنالیز خودکار تصاویر، توانستند برخی از محدودیت‌های مطالعات آزمایشگاهی را برای شناسایی دینامیک گوه آب شور و ناحیه اختلاط برطرف کنند. مطالعات آنها در مدلی با ابعاد (طول × ارتفاع × عمق) $1 \times 15 \times 38$ cm انجام گرفت و بیشتر بر استخراج رابطه‌ی کالیبراسیونی متمرکز بود که بر اساس آن بتوانند غلظت محلول را در هر پیکسل تصویر بر اساس شدت روشنایی آن تعیین کنند. استخراج این رابطه مستلزم تهیه نمونه‌هایی از آب‌شور رنگی با غلظت‌های مختلف (از غلظت کم 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 که مختص ساختار آزمایشگاهی خودشان بود، طی فرایندی خودکار نقشه تغییرات غلظت را برای تصاویر متوالی مشخص کردند و از منحنی هم‌تراز غلظت 50% برای تعیین مقدار پیشروی پنجه گوه و از منحنی‌های هم غلظت 25% و 75% برای تعیین ضخامت ناحیه اختلاط استفاده نمودند. در مطالعه‌ی دیگر (Rabinson et al., 2016) اثر تغییر اندازه دانه‌های محیط متخلخل را بر هجوم آب شور، به همان روش مطالعه قبلی و در همان ساختار آزمایشگاهی بررسی نمودند. اگرچه (Robinson et al., 2015) روش جدیدی را برای شناسایی پارامترهای هجوم آب شور در مدل‌های آزمایشگاهی کوچک ارائه کردند، ولی آنها برای 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 $0/2$ تا $0/8$ طول پنجه گوه بسنده کردند. این احتمالاً به علت ابعاد کوچک مدل آزمایشگاهی آنها بوده که ناحیه اختلاط در امتداد سطح مشترک آب شور و شیرین نازک و یکنواخت شکل گرفته است.

مرور منابع علمی نشان می‌دهد، اگر چه تلاش‌های



شکل 1 شماتیکی از مدل آزمایشگاهی و پارامترهای اندازه‌گیری شده در آزمایش‌ها

برای شناسایی رفتار گوه آب شور و ناحیه اختلاط از فن پردازش تصویر استفاده شود، لازم بود تانک جریان درون اتاقکی تاریک قرار گیرد که نور آن فقط از یک منبع روشنایی کنترل‌شده تأمین گردد. با این کار اثر نور محیط پیرامونی بر روی تصویربرداری از محفظه مرکزی به حداقل می‌رسد. لذا یک اتاقک چوبی با طول $2/8$ ، عرض $1/2$ و ارتفاع $1/5$ متر ساخته شد و تانک جریان درون آن بر روی یک میز ثابت شد (شکل 2). اتاق تاریک قابلیت جداسازی از محل قرارگیری تانک به طرفین را داشت. به علت ممانعت از انعکاس نور، جداره‌های داخلی اتاقک توسط رنگ مشکی مات، تیره شدند. در مدت آزمایش، نور یکنواخت از یک منبع نوری شامل 8 لامپ مهتابی فلورسنت 20 وات تأمین می‌شد. لامپ‌ها به طور موازی و با فواصل برابر بر روی یک تابلوی چوبی قرار داشتند. منبع نور در یک سمت اتاقک و بافاصله $1/2$ متری از تانک جریان قرار گرفت. برای ضبط و ثبت فرایند هجوم آب شور درون محفظه مرکزی از دوربین عکاسی دیجیتال Nikon D7100 با رزولوشن 6000×3368 پیکسل که دارای قابلیت عکس‌برداری در فواصل زمانی مشخص بود، استفاده شد.



شکل 2 نمایش قرارگیری مخزن جریان، دوربین و منبع نور درون اتاق تاریک (پلان)

سوراخ‌های $1/5$ میلی‌متری صفحات، توسط توری ریز پوشیده شد تا ضمن عبور جریان از صفحه‌های مشبک از ورود دانه‌های محیط متخلخل به محفظه‌های جانبی ممانعت کند. برای ایجاد محیط متخلخل از دانه‌های شیشه‌ای در محدوده‌ی قطر 1000 تا 1180 میکرون با وزن مخصوص 2400 کیلوگرم بر مترمکعب (تهیه شده از شرکت دانه‌های شیشه‌ای ایران بیدز) استفاده گردید. تخلخل دانه‌های شیشه‌ای از هر دو روش حجمی و وزنی (Goswami and Clement 2007) محاسبه شد. مقدار تخلخل متوسط دانه‌ها پس از چند بار اندازه‌گیری $0/37$ به‌دست آمد. آب شیرین مورد نیاز آزمایش از آب شیر با جرم حجمی $997/30$ کیلوگرم بر مترمکعب، در دمای 24 درجه سانتی‌گراد تأمین شد. برای تمایز آب شور از آب شیرین و پایش آن درون محیط متخلخل، مطابق مطالعات Goswami and Clement (2007), Chang and Clement (2014), Oz et al. (2012)، از رنگ خوراکی استفاده شد. آب شور با افزودن نمک طعام و رنگ خوراکی قرمز به آب شیرین درون بشکه‌های 60 لیتری آماده گردید. جرم حجمی آب شور رنگ‌شده، هم توسط چگالی سنج و هم توسط ترازوی دیجیتال اندازه‌گیری شد که مقدار آن $1021/25$ کیلوگرم بر مترمکعب به‌دست آمد. هدایت هیدرولیکی محیط متخلخل (K) به روش در محل، مشابه روش توصیف شده در منابع علمی (از جمله، Oostrom et al., 1992; Goswami and Clement, 2007) تحت گرادیان‌های هیدرولیکی مختلف اندازه‌گیری شد که پس از میانگین‌گیری، مقدار متوسط آن $0/65$ سانتی‌متر بر ثانیه تخمین زده شد. از آنجا که قرار بود در این تحقیق

2-2- فرایند آزمایش

قبل از شروع آزمایش، دانه‌های شیشه‌ای در شرایط کاملاً اشباع، در لایه‌های 5 سانتی‌متری به داخل محفظه مرکزی ریخته شدند و به صورت یکنواخت متراکم گشتند. با این کار ضمن توزیع یکنواخت دانه‌ها، حباب‌های هوای گیر افتاده بین دانه‌ها از محیط متخلخل حذف شدند. در شرایطی که محیط متخلخل کاملاً از آب شیرین اشباع بود، سطح آب در محفظه‌های راست و چپ به ترتیب در ترازهای 48/8 سانتی‌متری و 46/88 سانتی‌متری تنظیم شدند (کلیه ترازها از کف مخزن جریان محاسبه شده‌اند). آب شیرین از پایین به محفظه سمت راست تزریق شد تا ضمن تثبیت هد در تراز 48/8 سانتی‌متری این محفظه، جریان از درون محیط متخلخل عبور کند و از محفظه چپ که سطح آن در ارتفاع 46/88 سانتی‌متری ثابت شده بود، سرریز کند. پس از رسیدن جریان به شرایط دائمی، آب شور از پایین به محفظه سمت چپ تزریق گردید. آب شور با چگالی بالا به سرعت جایگزین آب شیرین در کف محفظه سمت چپ شد و مازاد آن از تراز 46/88 سانتی‌متری سرریز می‌کرد. با جایگزینی آب شور در محفظه سمت چپ، فرایند 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 توقف گوه، تراز آب شیرین در محفظه سمت راست از 48/8 سانتی‌متر به 48 سانتی‌متر کاهش یافت. همان طور که انتظار می‌رفت، گوه مجدداً شروع به پیشروی کرد و تا رسیدن به شرایط دائمی جدید پیشروی آن ادامه یافت (مرحله دوم یا مرحله پیشروی گوه آب شور، شکل 5). در مرحله آخر آزمایش، هد آب شیرین مجدداً از 48 به 48/8 سانتی‌متر افزایش یافت. در نتیجه گوه شروع به بازگشت به سمت مرز دریا کرد، تا اینکه سرانجام متوقف شد (مرحله سوم یا مرحله بازگشت گوه آب شور، شکل 6).

2-3- جمع‌آوری داده‌ها و پردازش تصاویر

برای بررسی رفتار ناحیه اختلاط در امتداد سطح مشترک، ابتدا طول پنجه گوه به 4 فاصله مساوی تقسیم شد، سپس

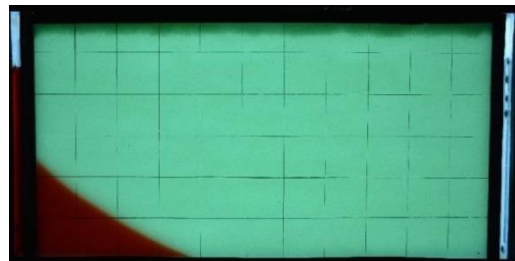
خطوط قائمی رسم گردید تا سطح مشترک را به 4 قسمت مجزا تفکیک کند. سرانجام میانگین ضخامت قائم ناحیه اختلاط در هر قسمت محاسبه و در آنالیزهای بعدی به کار رفت (شکل 1). در شکل 1، L شاخص طول پنجه گوه و h ارتفاع گوه در مرز دریا است که بر مبنای منحنی هم غلظت 50% آب شور در نظر گرفته شده است. قبل از شروع آزمایش‌ها، 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، دوربین در فاصله 1/5 متری مخزن جریان قرار گرفت و سایر پارامترهای دوربین با مقادیر: فاصله کانونی 35 میلی‌متر، سرعت شاتر 0/33 ثانیه، دیافراگم $f/8$ ، ایزو 320 و وایت بالانس فلورسنت تنظیم شدند. حرکت گوه آب شور در فواصل زمانی 60 ثانیه‌ای توسط دوربین عکس‌برداری شد و تصاویر گرفته‌شده در قالب RAW ذخیره شدند. برای استخراج پارامترهای مد نظر در شرایط گذرا، رشته ویدئوی به‌دست آمده از تصاویر دیجیتال به صورت خودکار آنالیز شدند. برای این منظور، الگوریتم پیشنهادی در (R2015b) Matlab پیاده‌سازی شد که در آن مراحل زیر انجام می‌گرفت:

الف) پیش‌پردازش

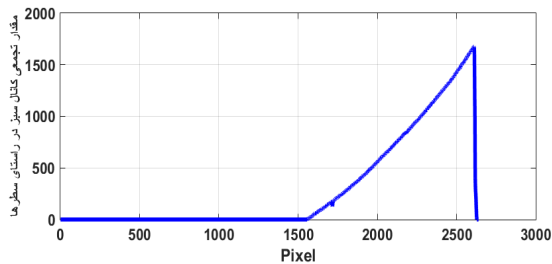
هدف از این مرحله، حذف خودکار نواحی خارج از محفظه مرکزی بود (شکل 3- الف). لذا ابتدا هر فریم از رشته ویدئو که تصویری رنگی است، به تصویر خاکستری تبدیل شد و با اعمال یک آستانه مناسب به تصویر باینری تبدیل گردید (شکل 3- ب). سپس اجزای متصل تصویر استخراج و به کمک عملگر مورفولوژیکی تکه‌های نواحی نزدیک به هم به 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 به‌دست آمده بر روی تک‌تک کانال‌های رنگی RGB اعمال شد و ناحیه مخزن تعیین گردید (شکل 3- ج).



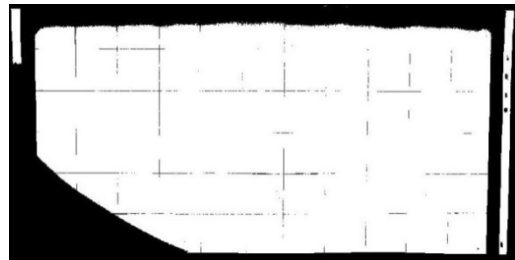
الف - شناسایی مرزهای گوه در دستگاه رنگ HSI



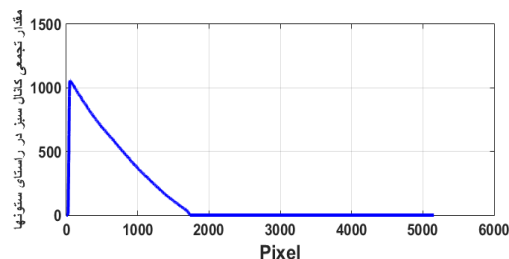
الف - تصویر رنگی عکس‌برداری شده از کل مخزن جریان



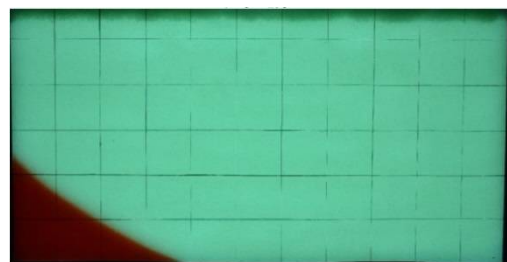
ب - نمودار افکنش عمودی گوه



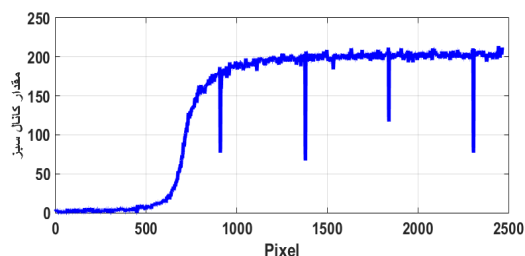
ب - تصویر باینری مخزن جریان



ج - نمودار افکنش افقی گوه



ج - تصویر مجزا شده محفظه مرکزی از مخزن جریان



د - تغییرات پروفایل کانال سبز تصویر

شکل 3 مراحل انجام پیش‌پردازش روی تصاویر آزمایشگاهی

ب) استخراج داده‌ها

با توجه به اینکه در دستگاه رنگ HSI¹، فام رنگ از خلوص و روشنایی مجزا شده است، برای تشخیص مرزهای گوه آب شور، به جای دستگاه رنگ RGB²، 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. لذا نواحی از تصویر که کانال H در آن به طول موج رنگ قرمز نزدیک است و از طرفی غلظت این نواحی از یک آستانه مشخص (منحنی هم غلظت 50% آب شور و شیرین) بیشتر است، به عنوان مرز گوه استخراج گردید (شکل 4-الف). برای تعیین طول پیشروی گوه، ابتدا افکنش عمودی تصویر گوه به دست آمد (شکل 4-ب).

شکل 4 مراحل مختلف جمع‌آوری اطلاعات مورد نظر

سپس از آخرین عنصر بردار افکنش به سمت اولین عنصر آن حرکت نموده، اولین عنصری که دارای مقدار غیر صفر بود، به عنوان طول پیشروی پنجه گوه در نظر گرفته شد. برای تعیین ارتفاع گوه، ابتدا افکنش افقی تصویر گوه به دست آمد (شکل 4-ج)، اولین نقطه از بردار افکنش که دارای مقداری مخالف صفر بود، به عنوان ارتفاع گوه در نظر گرفته شد.

¹ Hue, Saturation, Intensity

² Red, Green, Blue

که در آن ρ چگالی سیال (M/L^3)، S_{0p} فشار مخصوص $[M/(L^2T^2)]^{-1}$ ، فشار سیال P ، $[M/(L^3T^2)]$ ، ε تخلخل خاک [1]، k نفوذپذیری ذاتی خاک $[L^2]$ ، μ لزجت دینامیکی سیال $[M/(L^3T)]$ ، g شتاب ثقل $[L/T^2]$ ، Q_p منبع جرمی سیال $[M/(L^3T)]$ ، V میانگین سرعت سیال (L/T) ، D_m ضریب پخش مولکولی $[L^2/T]$ ، I ماتریس همانی [1]، D ماتریس پراکندگی مکانیکی $[L^2/T]$ ، C غلظت محلول (نسبت جرم ماده محلول به جرم سیال) $[Ms/M]$ و C^* غلظت ماده محلول در منبع سیال $[Ms/M]$ است. حل معادلات در SUTRA بر اساس ترکیب روش‌های المان محدود و تفاضل محدود انجام می‌گیرد. روش المان محدود برای توصیف جمله‌هایی از معادله بکار می‌رود که بیانگر شار جرم سیال، شار جرم محلول (یا شار انرژی) باشند و سایر جمله‌ها بدون شار، با استفاده از روش تفاضل محدود تقریب می‌خورند. برای ارتباط با SUTRA از رابط گرافیکی² ModelMuse استفاده گردید. ModelMuse قابلیت تولید شبکه، ارجاع داده‌ها به گره‌ها و اجزاء، تعریف شرایط مرزی، مشاهده اطلاعات ورودی، ایجاد فایل ورودی، اجرا و نمایش نتایج به‌دست آمده از حل عددی SUTRA را دارد (Winston 2015). برای شبیه‌سازی داده‌های آزمایشگاهی، مستطیلی دو بعدی در مقطع - قائم با ابعاد $110 \times 46/88$ سانتی‌متر به‌عنوان میدان مدل عددی ایجاد گردید. برای مرزهای چپ و راست میدان مدل، شرایط فشار هیدرو استاتیکی اعمال شد. برای مرز پایین، شرط عدم وجود جریان و برای شرط مرزی بالا، سطح ایستابی آبخوان در نظر گرفته شد.

مقادیر پراکنده‌پذیری طولی³ و عرضی⁴ و اندازه اجزاء شبکه میدان محاسباتی توسط فرایند هدفمند آزمون و خطا تعیین شدند. آزمون و خطا با در نظر گرفتن محدوده پیشنهادی پراکنده‌پذیری طولی (α_l) و عرضی (α_T) در مطالعه Abarca and clement (2009) و شرایط پایداری مکانی (Voss and Provost; 2010) SUTRA (به عبارتی $Pe < 4$) آغاز شد. تغییر در پراکنده‌پذیری طولی و عرضی و ریز کردن ابعاد شبکه مادامی ادامه داشت که اولاً

برای شناسایی ناحیه اختلاط در امتداد سطح مشترک، برای هر تصویر ضخامت متوسط قائم هر یک از قسمت‌های 4 گانه (شکل 1) اندازه‌گیری شد. مطالعات این تحقیق نشان داد که کانال سبز در دستگاه رنگ RGB نمایش خوبی از غلظت رنگ در ناحیه اختلاط دارد. لذا برای 5 نقطه روی سطح مشترک پروفایلی از کانال سبز تصویر گوه استخراج شد (شکل 4-د)، سپس میانگین هر دو نقطه متوالی به‌عنوان ضخامت قسمت‌های 4 گانه محاسبه شد. در ناحیه اختلاط، پروفایل کانال سبز از یک مقدار حداقل تا یک مقدار حداکثر افزایش می‌یافت، لذا طبق قرارداد، ضخامت ناحیه اختلاط در هر نقطه، فاصله‌ای در نظر گرفته شد که پروفایل از 25 درصد تا 75 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 فرایند آزمایش انجام شد و داده‌های به‌دست آمده در طول زمان (فاصله تصاویر متوالی 60 ثانیه است) مرتب و رسم شدند

2-4- شبیه‌سازی عددی

در این تحقیق برای شبیه‌سازی آزمایش‌های انجام شده در مدل فیزیکی، از کد (Voss and Provost; 2010) SUTRA 2.2 استفاده شده است. SUTRA¹ یک برنامه رایانه‌ای است که قابلیت شبیه‌سازی حرکت سیال با انتقال ماده محلول (یا انرژی) را در محیط متخلخل در شرایط اشباع و غیراشباع دارد. معادلات اصلی حاکم بر جریان سیال و انتقال ماده محلول در محیط اشباع در مدل عددی SUTRA به ترتیب زیر است (Voss and Provost; 2010).

$$(PS_{0p}) \frac{\partial P}{\partial t} + \left(\varepsilon \frac{\partial \rho}{\partial C} \right) \frac{\partial C}{\partial t} - \nabla \cdot \left[\left(\frac{kP}{\mu} \right) \cdot (\nabla P - \rho g) \right] = Q_p \quad (1)$$

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

² Graphical-Interface

³ Longitudinal dispersivity

⁴ Transverse dispersivity

¹ Saturated-Unsaturated-TRANsport

است. تنها از شرایط دائمی مرحله اول به‌عنوان شرط اولیه‌ای برای مرحله پیشروی گوه استفاده شد.

در شرایط دائمی مرحله اول، طول پنجه گوه (L) برابر $38/24$ سانتی‌متر و ارتفاع گوه در مرز دریا (h) برابر $24/52$ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. شکل‌های 5 و 6 به ترتیب تصاویر دیجیتال پیشروی و بازگشت گوه آب شور را درون محفظه‌ی مرکزی جریان، به همراه نتایج شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهند. به طور کلی تطابق خوبی بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی عددی، خصوصاً در پنجه گوه ایجاد شده است. نتایج شبیه‌سازی عددی انحنای بیشتر سطح مشترک را نسبت به داده‌های آزمایشگاهی، خصوصاً در نزدیکی مرز دریا نشان می‌دهد. Rabinson et al 2015، علت خطی‌تر بودن سطح مشترک را در مدل‌های فیزیکی نسبت به مدل‌های عددی، وجود ناهمگنی‌های جزئی ناشی از تغییرات کوچک قطر دانه‌های محیط متخلخل بیان کردند. کاهش هد آب شیرین در آغاز مرحله پیشروی باعث کاهش نیروهای اندرکنشی اعمال‌شده از طرف آب شیرین بر سطح مشترک شد.

در نتیجه، تعادل موجود در سیستم آبخوان به‌هم خورد و گوه به درون آبخوان تا رسیدن به شرایط تعادل جدید پیشروی کرد (شکل 5). در مقابل، با افزایش هد آب شیرین، نیروهای اندرکنشی آب شیرین بر گوه آب شور افزایش یافت و گوه به سمت دریا عقب رانده شد (شکل 6). شکل 7 نحوه تغییر شاخص‌های طول پنجه گوه (L) و ارتفاع گوه (h) را در شرایط گذرا، بر اساس نتایج آزمایشگاهی و عددی نشان می‌دهد.

نتایج عددی تطابق خوبی با داده‌های آزمایش پیدا کند، ثانیاً 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 32175 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 SUTRA برای شبیه‌سازی آزمایش‌های آزمایشگاهی در جدول 1 ارائه شده است.

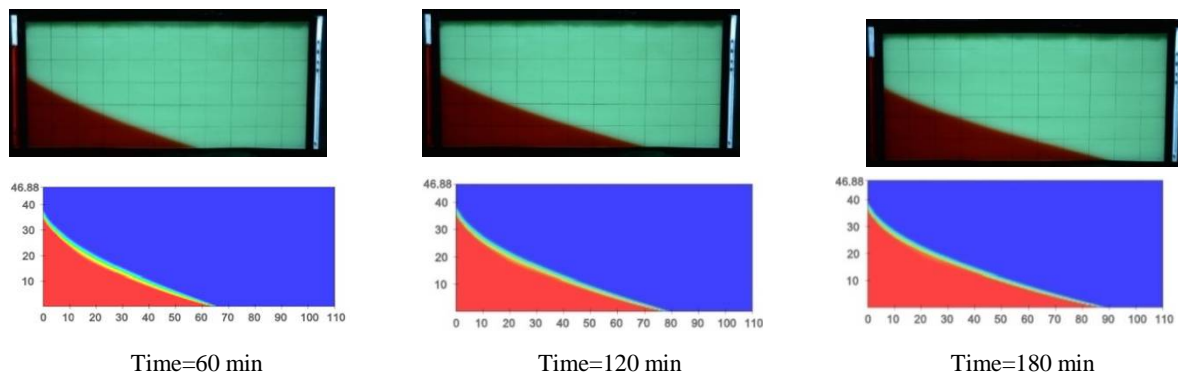
جدول 1 خلاصه‌ای از پارامترهای بکار رفته در مدل

SUTRA		
پارامتر	مقدار	واحد
طول میدان محاسباتی (L)	1/1	m
ارتفاع میدان محاسباتی (H)	0/4688	m
پراکنده پذیری طولی (α_L)	0/001	m
پراکنده پذیری عرضی (α_T)	0/000075	m
تخلخل مؤثر (n)	0/37	-
چگالی آب شور (ρ_s)	1021/25	Kg/m ³
چگالی آب شیرین (ρ_f)	997/30	Kg/m ³
نسبت غلظت جرمی (Cs)	0/035	-
نفوذپذیری ذاتی (k)	6/5E-10	m ²
ذخیره ویژه (S_s)	0/008	1/m

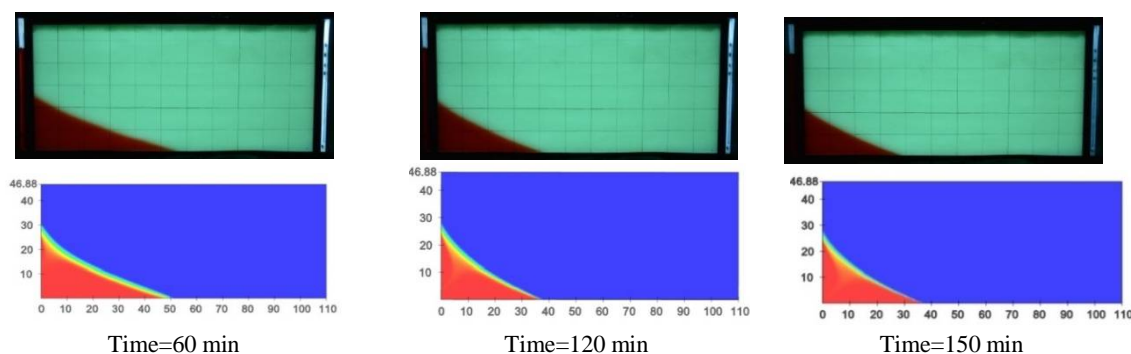
3- نتایج و بحث

3-1- هیدرودینامیک گوه آب شور

به علت نادیده گرفتن اثرات شرایط مرزی در آغاز مرحله اول آزمایش، هجوم آب شور در این مرحله بررسی نشده



شکل 5 نتایج آزمایشگاهی و عددی پیشروی گوه آب شور در اثر کاهش آبی هد آب شیرین از تراز 48/8 به تراز 48 سانتی‌متری



شکل 6 نتایج آزمایشگاهی و عددی بازگشت گوه آب شور در اثر افزایش آبی هد آب شیرین از تراز 48 به تراز 48/8 سانتی متری

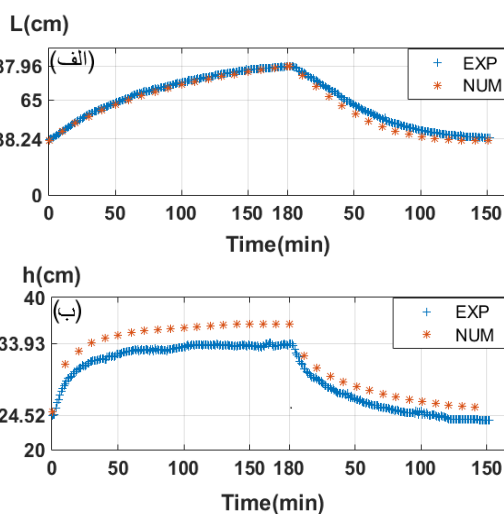
در مدل‌های فیزیکی و عددی بیان کرد.

نگاهی اجمالی به نمودار شکل 7- الف نشان می‌دهد که شاخص طول پنجه، در هنگام بازگشت گوه، نسبت به زمان پیشروی، زودتر به شرایط دائمی می‌رسد. مدت زمان رسیدن به شرایط دائمی در هنگام بازگشت تقریباً 140 دقیقه است، در صورتی که در هنگام پیشروی تقریباً 175 دقیقه است. این پدیده اولین بار در مطالعه آزمایشگاهی و عددی Chang and Clement 2012 مشاهده و بررسی شد و پس از آن نیز در مطالعه عددی Lu and Werner 2013 و مطالعه آزمایشگاهی Rabinson et al 2015 گزارش گردید.

نگاهی دقیق‌تر به نمودارهای شکل 7 نشان می‌دهد که رفتار شاخص‌های طول پنجه گوه و ارتفاع گوه با یکدیگر فرق دارد. برای روشن کردن این موضوع، از جابجایی نسبی هر شاخص (جابجایی هر شاخص تقسیم بر کل تغییر آن شاخص) که پارامتر بدون بعدی است و امکان مقایسه را مستقل از واحد و اندازه کل تغییر فراهم می‌کند، استفاده شد. در ابتدا متغیر a تعریف گردید، به طوری که هر یک از شاخص‌های طول پنجه گوه و ارتفاع گوه در مرز آب شور می‌توانند جانشین آن در رابطه‌ی (3) شوند. رابطه‌ی (3) نحوه محاسبه جابجایی نسبی را در شرایط گذرا ارائه می‌کند.

$$a^*(t) = \frac{|a(t_s) - a(t)|}{\Delta a} \quad (3)$$

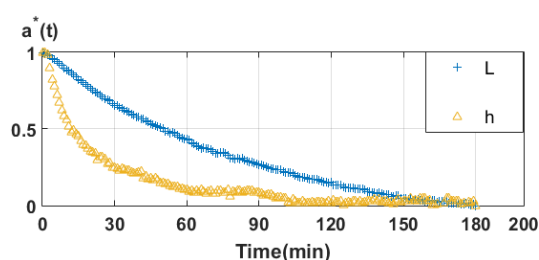
در رابطه (3)، $a^*(t)$ جابجایی نسبی شاخص، پس از مدت زمان t از شروع هر یک از مراحل پیشروی یا بازگشت گوه آب شور است. $a(t_s)$ اندازه هر شاخص در شرایط دائمی هر مرحله و $a(t)$ اندازه هر شاخص پس از



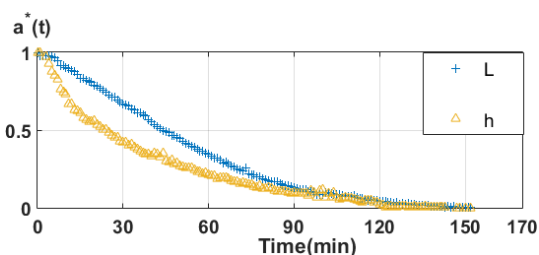
شکل 7 جابجایی شاخص‌های انتخابی گوه آب شور در شرایط گذرا (الف) طول پنجه گوه آب شور (ب) ارتفاع گوه آب شور، آغاز مرحله بازگشت از لحظه $t=180$ دقیقه است

نتایج آزمایشگاهی در فواصل زمانی 1 دقیقه‌ای (به صورت خودکار) و نتایج عددی در فواصل زمانی 10 دقیقه‌ای، بر مبنای منحنی هم غلظت 50 درصد آب شور و شیرین استخراج شده‌اند. در شکل 7- الف انطباق خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و عددی، برای شاخص طول پنجه گوه دیده می‌شود. شکل 7- ب نشان می‌دهد که اختلاف اندکی بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی عددی برای ارتفاع گوه وجود دارد، با این وجود روند تغییرات این شاخص برای هر دو نوع مدل‌سازی عددی و آزمایشگاهی در شرایط گذرا شبیه به هم است. علت این اختلاف را می‌توان ناشی از عدم شرایط کاملاً یکنواخت خصوصیات محیط متخلخل و فقدان اثرات شرایط مرزی کاملاً برابر،

نزدیک شود، در نتیجه هر دو شاخص گوه تقریباً به طور هم زمان به شرایط دائمی می‌رسند. علاوه بر این، چنانچه نرخ نسبی جابجایی ارتفاع گوه برای هر دو مرحله پیشروی و بازگشت در یک شکل رسم شود (شکل 9)، مشخص می‌شود که برخلاف شاخص طول پنجه گوه که در وضعیت بازگشت سریع‌تر از وضعیت پیشروی به شرایط دائمی می‌رسد، شاخص ارتفاع گوه در هر دو مرحله پیشروی و بازگشت در مدت‌زمان تقریباً برابری به شرایط دائمی می‌رسد.

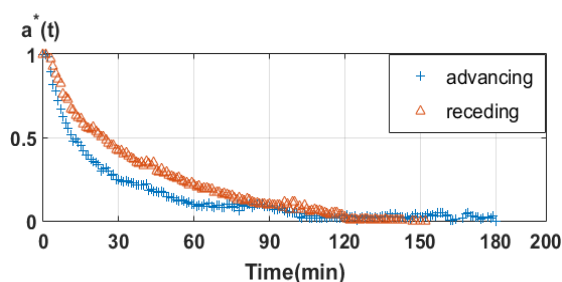


الف) مرحله پیشروی گوه



ب) مرحله بازگشت گوه

شکل 8 جابجایی نسبی طول پنجه گوه و ارتفاع گوه در شرایط گذرا



شکل 9 مقایسه بین جابجایی نسبی ارتفاع گوه در مرحله پیشروی و مرحله بازگشت گوه

3-2- هیدرودینامیک ناحیه اختلاط

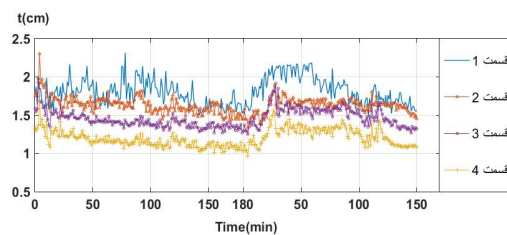
استفاده از فن پردازش تصویر این امکان را فراهم کرد که

مدت‌زمان t از شروع هر مرحله است. Δa عبارت است از کل تغییر شاخص مورد نظر در هر مرحله. شکل 8 جابجایی نسبی طول پنجه گوه و ارتفاع گوه را نسبت به زمان، برای مرحله پیشروی (شکل 8- الف) و مرحله بازگشت (شکل 8- ب) نشان می‌دهد. در این اشکال به وضوح دیده می‌شود که در هنگام پیشروی، ارتفاع گوه با سرعت نسبی به مراتب بالاتری نسبت به طول پنجه به سمت دائمی شدن پیش می‌رود و خیلی زودتر از آن به شرایط دائمی می‌رسد، در صورتی که در وضعیت بازگشت هر دو شاخص تقریباً به طور هم زمان متوقف می‌شوند. علت این رفتار را می‌توان چنین توصیف کرد که در اثر کاهش هد مرز-زمین، میدان فشار دینامیکی آب شیرین در آبخوان کاهش می‌یابد. بنابراین امکان ورود مجدد آب-های شور از مرز دریا به سمت آبخوان فراهم می‌شود و سطح مشترک شروع به پیشروی می‌کند. به علت اختلاف چگالی بین آب شور و شیرین، میزان پیشروی نهایی سطح مشترک با افزایش عمق آبخوان، افزایش می‌یابد. هر چه میزان پیشروی نهایی سطح مشترک افزایش یابد، نرخ نسبی پیشروی آن کاهش می‌یابد. از این رو ارتفاع گوه با بیشترین نرخ نسبی شروع به حرکت می‌کند و زودتر از سایر نقاط سطح مشترک به شرایط دائمی می‌رسد، هر چند که با نزدیک شدن به شرایط دائمی از سرعت آن کاسته می‌شود. به طور عکس، پنجه گوه بیشترین جابجایی را نسبت به سایر نقاط سطح مشترک دارد، بنابراین نرخ جابجایی نسبی آن از همه نقاط کمتر است و دیرتر به شرایط دائمی می‌رسد. از طرفی چون شاخص ارتفاع گوه در مجاورت مرز دریا قرار دارد، در ابتدای مرحله برگشت با سرعت بیشتری نسبت به شاخص طول پنجه گوه جابجا می‌شود. پس از مدتی جریان‌های آب-شیرین به ناحیه اختلاط وارد می‌شوند و شروع به شستن لایه‌های غلیظ آن می‌کنند. جریان‌های لب شور 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. عمل شستشو و انتقال نمک‌های محلول به سمت خروجی جریان مادامی ادامه می‌یابد که پنجه به شرایط دائمی

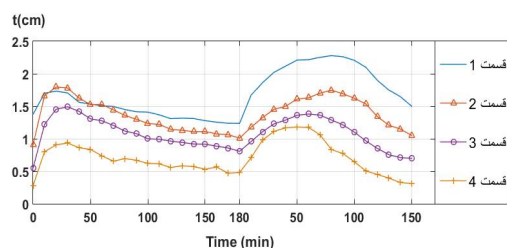
همچنین نتایج نشان می‌دهند که ضخامت ناحیه اختلاط برای تمامی قسمت‌ها در اوایل مرحله بازگشت افزایش می‌یابد و پس از رسیدن به یک مقدار حداکثری، رفته‌رفته از میزان آن کاسته می‌شود. اگر چه این پدیده در آزمایش‌های آزمایشگاهی (Robinson et al. (2015 نیز مشاهده شد، اما آنها با ارائه یک دلیل کلی، وقوع این پدیده را مرتبط با تغییر در میدان جریان در مرحله بازگشت گوه و ایجاد جریان‌های درهم بیان کردند.

در این تحقیق، دلایل وقوع این پدیده با جزئیات بیشتر، با استفاده از نتایج مدل‌سازی عددی تفسیر می‌شود. شکل 12 تغییرات میدان سرعت را به همراه تغییرات ضخامت ناحیه اختلاط در حوالی ارتفاع 20 سانتی‌متری از کف آبخوان، نشان می‌دهد. قبل از شروع مرحله بازگشت، جهت بردارهای سرعت آب‌های شور درون گوه از سمت دریا به سمت آبخوان است. بنابراین درون ناحیه اختلاط جریان‌های لب شوری برقرار است که ناشی از چرخش آب‌های شور درون گوه و آب‌های شیرین آبخوان است. جریان‌های لب شور در امتداد سطح مشترک جریان دارند و ناحیه اختلاط در شرایط تعادل است (شکل 12- الف). 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 از سمت آبخوان به سمت دریا می‌شود (شکل 12- ب). به علت بیشتر بودن سرعت آب‌های شیرین نسبت به سرعت گوه آب شور، مقداری از آب‌های 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. آب‌های شیرین با ورود به ناحیه اختلاط با ذرات لب شور آنها اختلاط کرده و ضمن رقیق کردن ناحیه اختلاط، شروع به شستن لایه‌های غلیظ آن به سمت خروجی جریان بر روی مرز دریا می‌کنند. فرایند شستشو سبب انتقال مقداری از نمک‌های لایه‌های غلیظ (از جمله لایه‌های مجاور منحنی هم‌تراز 75%) به سمت خروجی جریان می‌شود. فرایند شستشو و اختلاط موجب می‌شود که منحنی هم‌تراز 75% به محلی نزدیک‌تر به مرز دریا انتقال یابد.

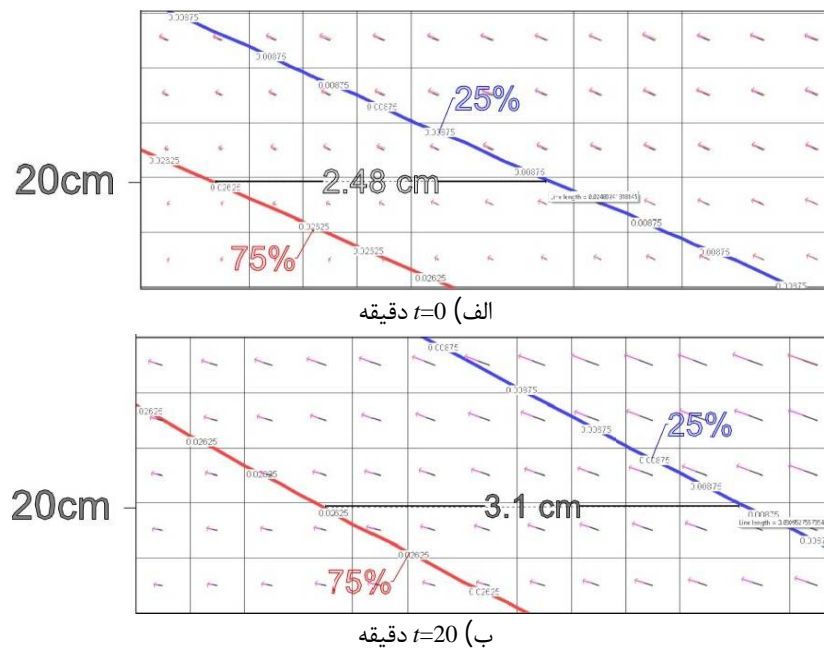
ضخامت ناحیه اختلاط در امتداد سطح مشترک، اندازه‌گیری شود. شکل 10 تغییرات ضخامت ناحیه اختلاط را در مدت‌زمان پیشروی و بازگشت گوه آب شور در مدل فیزیکی، برای 4 قسمت تفکیک‌شده نشان می‌دهد. به دلیل عدم تداخل نتایج شبیه‌سازی عددی با داده‌های آزمایشگاهی، نتایج عددی در شکل 11 رسم شده است. مقایسه شکل 10 با شکل 11 نشان می‌دهد، اختلاف اندکی بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج عددی در بعضی از قسمت‌های تفکیک‌شده ناحیه و در برخی از بازه‌های زمانی وجود دارد. علت این اختلاف بیشتر ناشی از عدم شرایط کاملاً یکسان خصوصیات فیزیکی محیط متخلخل، در مدل فیزیکی و مدل عددی است. با این وجود روند تغییرات ضخامت ناحیه اختلاط برای هر دو نوع مدل‌سازی مشابه هم هستند. این نشان می‌دهد که مدل عددی SUTRA در حد قابل قبولی توانایی شبیه‌سازی ناحیه اختلاط را در شرایط گذرا دارد. نتایج هر دو مدل‌سازی آزمایشگاهی و عددی نشان می‌دهد که ضخامت ناحیه در قسمت 4 (بالای پنجه گوه) کمترین مقدار را دارد و با بالا رفتن در امتداد سطح مشترک، رفته‌رفته به مقدار آن افزوده می‌شود. این نتیجه مطابق با شرایط دائمی مطالعه Abarca and clement (2009) است.



شکل 10 تغییرات ضخامت ناحیه اختلاط در امتداد سطح مشترک در شرایط گذرا، بدست آمده از تصاویر آزمایشگاهی



شکل 11 تغییرات ضخامت ناحیه اختلاط در امتداد سطح مشترک در شرایط گذرا، بدست آمده از مدل عددی



شکل 12 نمایش میدان سرعت و منحنی‌های هم‌غلظت 25% و 75% در محدوده تراز 20 سانتی‌متری از کف آبخوان، در مرحله بازگشت گوه

آزمایشگاهی موجب شده که فرایند گذرای هجوم آب شور در مدل‌های فیزیکی کمتر مورد توجه قرار گیرد. در این تحقیق با استفاده از آنالیز خودکار تصاویر، حرکت گذرای گوه آب شور و ناحیه اختلاط در مدل آزمایشگاهی بررسی شد. برای تفسیر بهتر برخی از پدیده‌های مشاهده شده در آزمایشگاه، شبیه‌سازی عددی از آزمایش‌ها انجام گرفت. نتایج برای گوه آب شور نشان دادند که شاخص ارتفاع گوه در وضعیت پیشروی، زودتر از پنجه گوه به شرایط دائمی می‌رسد. در وضعیت بازگشت گوه، هر دو شاخص تقریباً به طور همزمان پایدار می‌شوند. بعلاوه مشخص شد، بر خلاف طول پنجه گوه که در وضعیت بازگشت نسبت به وضعیت پیشروی گوه خیلی زودتر به شرایط دائمی می‌رسد، شاخص ارتفاع گوه در هر دو وضعیت پیشروی و بازگشت تقریباً مدت زمان یکسانی را برای رسیدن به شرایط پایدار طی می‌کند. همچنین بررسی نتایج برای ناحیه اختلاط نشان داد که فرایند شستشو عامل اصلی گسترش ناحیه در اوایل مرحله بازگشت گوه است. اثر توام شستشو، اختلاط و سرعت محلی سیال باعث شد تا منحنی هم‌تراز 75% از منحنی هم‌تراز 25% فاصله بگیرد و ضخامت ناحیه اختلاط افزایش یابد. با نزدیک شدن گوه به شرایط دائمی در مرحله بازگشت، فرایند شستشو متوقف شد و ضخامت

باوجود اینکه سرعت جریان به سمت دریا در محل منحنی هم‌تراز 25% ناحیه بیشتر از منحنی هم‌تراز 75% است، اثر توأم شستشو و اختلاط به همراه سرعت محلی جریان سیال باعث می‌شود که منحنی هم‌تراز جابجا شده 75% فاصله خود را از منحنی هم‌تراز جابجا شده 25% بیشتر کند و ضخامت ناحیه گسترش یابد. بدیهی است که با توجه به گرادیان غلظت در سرتاسر عرض ناحیه اختلاط، ناحیه اختلاط می‌تواند به لایه‌های کوچک‌تری تقسیم شود و این فرایند به طور پیوسته برای لایه‌های مختلف تکرار شود. پس از مدتی اختلاف سرعت بین آب‌های شیرین مجاور سطح مشترک با سطح مشترک کم می‌شود، در نتیجه فرایند شستشو رفته‌رفته متوقف شده و منحنی هم‌تراز رقیق به منحنی هم‌تراز غلیظ نزدیک می‌شود. به عبارتی ناحیه اختلاط به مرور زمان کوچک می‌شود. با نزدیک شدن گوه به شرایط دائمی در مرحله بازگشت، جریان‌های آب شور درون گوه رفته‌رفته به سمت مرز زمین تغییر جهت می‌دهند که در نتیجه ناحیه اختلاط مجدداً به شرایط تعادل می‌رسد.

4- نتیجه‌گیری

محدودیت‌های انسانی در قرائت و برداشت داده‌های

B. and Li, L., (2012). "Tidal influence on seawater intrusion in unconfined coastal aquifers". *Water Resources Research*. 48:W02502

<https://doi.org/10.1029/2011WR010678>

Lu, C., Chen, Y., Zhang, C. and Luo, J., (2013). "Steady-state freshwater-seawater mixing zone in stratified coastal aquifers". *Journal of Hydrology*. 505, 24–34.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.09.017>

Lu, C. and Werner, A. D., (2013). "Timescales of seawater intrusion and retreat". *Advances in Water Resources*. 59, 39–51.

<https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2013.05.005>

Luyun, R., Momii, K. and Nakagawa, K., (2009). "Laboratory-scale saltwater behavior due to subsurface cutoff wall". *Journal of Hydrology*. 377(3-4), 227–236.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.019>

Mehdizadeh, S. S., Werner, A. D., Vafaie, F. and Badaruddin, S., (2014). "Vertical leakage in sharp-interface seawater intrusion models of layered coastal aquifers". *Journal of Hydrology*, 519, 1097–1107.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.08.027>

Mehdizadeh .S.S., Vafaei, F. and Abolghasemi. H., (2015). "Assessment of sharp-interface approach for saltwater intrusion". *Environ Earth Sci.*, 73, 8345–8355. doi. 10.1007/s12665-014-3996-9

Oz, I., Shalev, E., Yechieli, Y., Gavrieli, I. and 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.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.02.020>

Oz, I., Shalev, E., Yechieli, Y. and 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.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.033>

Robinson, G., Ahmed, A. A. and Hamill, G. A., (2016). "Experimental saltwater intrusion in coastal aquifers using automated image analysis: Applications to homogeneous aquifers". *Journal of Hydrology*. 538, 304–313.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.04.017>

Robinson, G., Hamill, G. A. and Ahmed, A. A., (2015). "Automated image analysis for experimental investigations of salt water intrusion in coastal aquifers". *Journal of Hydrology*. 530, 350–360.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.09.046>

ناحیه اختلاط شروع به کاهش کرد.

5- فهرست علائم

$a^*(t)$	جابجایی نسبی شاخص
$a(t_s)$	اندازه هر شاخص در شرایط دائمی هر مرحله
$a(t)$	اندازه هر شاخص پس از مدت زمان t از شروع هر مرحله
C	غلظت محلول
C^*	غلظت ماده محلول در منبع سیال
D	ماتریس پراکندگی مکانیکی
D_m	ضریب پخش مولکولی
g	شتاب ثقل
I	ماتریس همانی
k	نفوذپذیری ذاتی خاک
P	فشار سیال
Q_P	منبع سیال
S_{0p}	فشار مخصوص
V	میانگین سرعت سیال
Δa	کل تغییر شاخص مورد نظر
ε	تخلخل خاک
μ	لزجت دینامیکی سیال
ρ	چگالی سیال

6- منابع

Abarca, E., Carrera, J., Sánchez-Vila, X. and Dentz, M., (2007). "Anisotropic dispersive Henry problem". *Advances in Water Resources*. 30(4), 913–926.

<https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2006.08.005>

Abarca, E. and Clement, T.P., (2009). "A novel approach for characterizing the mixing zone of a saltwater wedge". *Geophysical Research Letters*. 36(6), 1–5. <https://doi.org/10.1029/2008GL036995>

Chang, S. W. and Clement, T. P., (2012). "Experimental and numerical investigation of saltwater intrusion dynamics in flux-controlled groundwater systems". 48(March), 1–10. <https://doi.org/10.1029/2012WR012134>

Goswami, R. R. and Clement, T. P., (2007). "Laboratory-scale investigation of saltwater intrusion dynamics". *Water Resources Research*. 43(4), 1–11.

<https://doi.org/10.1029/2006WR005151>

Kuan, W. K., Jin, G., Xin, P., Robinson, C., Gibbes,

Vandenbohede, A., Lu, C., Ataie-Ashtiani, B., Simmons C.T. and Barty, D.A., (2013). "Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges". *Advances in Water Resources*. 51, 3–26.
<https://doi.org/10.1016/j.advwatres>.

Voss, C. and Provost, A., (2010). "SUTRA—a Model for saturated–unsaturated, variable density, Ground-water flow with Solute or energy transport, 2010." US Geological Survey Water-Resources Investigations Report, 02-4231

Werner, A. D., Bakker, M., Post, V. E. A.,