

مقاله علمی-پژوهشی

تجریبات ساخت مدل آزمایشگاهی تداخل آب شور و شیرین در آبخوان‌های ساحلی

هانیه جوادی^۱، حجت احمدی^{۲*}، محمد همتی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۰۷

چکیده

آبخوان‌ها به‌عنوان مهم‌ترین منبع آب شیرین در نواحی ساحلی همواره در معرض هجوم آب شور هستند، لذا ارزیابی رفتار آب زیرزمینی در ارتباط با آب شور دریا همیشه مورد توجه محققان بوده است. استفاده از مدل‌های فیزیکی-آزمایشگاهی از روش‌های مرسوم در مطالعه‌ی دینامیک آب‌های زیرزمینی است. تجریبات حاصل از ساخت یک مدل آزمایشگاهی تداخل آب شور و شیرین به صورت تفصیلی در این مقاله ارائه شده است و چالش‌های مراحل ساخت مدل، نحوه ایجاد مخازن جانبی و کنترل چگالی در این مخازن و مخزن اصلی، اندازه‌گیری دبی نشت سیستم، ردیابی گوهی آب شور با استفاده از رنگ‌های ردیاب و روش ثبت داده‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. مدل ساخته شده دارای طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۱۸، ۱۲ و ۶۰ سانتی‌متر بوده و به منظور ایجاد محیط متخلخل از ذرات استاندارد گلس‌بید در دو دانه‌بندی متفاوت استفاده شده است. نتایج تحقیق نشان داد که علیرغم مستقل بودن میزان جذب‌شدگی رنگ‌های ردیاب از اندازه ذرات، انجام آزمایش‌ها در محیط‌های درشت‌دانه موجب کوتاه‌تر شدن مدت زمان آزمایش و افزایش دقت کار و همچنین کاهش تغییرات شوری در طول آزمایش می‌شود. همچنین در صورت استفاده از ذرات درشت‌دانه و سیستم غیر بسته برای تامین آب شور میزان تغییرات چگالی در طول آزمایش به ازای مقادیر اولیه ۱/۰۷۲، ۱/۰۵۷ و ۱/۰۳۴ به ترتیب ۱، ۰/۷۷ و ۰/۵۹ درصد می‌باشد. نتایج بررسی رنگ‌های ردیاب نشان داد در بین تمامی رنگ‌های شیمیایی و غذایی استفاده شده‌ی مرسوم، رنگ سان‌ست‌یلو هماهنگی بسیار خوبی برای حرکت همزمان با آب شور دارد. نتایج این تحقیق می‌تواند در طراحی و ساخت مدل‌های آزمایشگاهی و همچنین در انجام آزمایش‌های تداخل آب شور و شیرین بسیار موثر باشد.

واژه‌ها کلیدی: آب زیرزمینی، گلس‌بید، رنگ، سان‌ست‌یلو، ردیابی

مقدمه

اولین اثر مضر پیشروی آب شور کاهش دسترسی به ذخایر آب شیرین و آلودگی آب‌چاه‌ها است (Werner et al., 2013). از این رو شناخت صحیح رفتار آب زیرزمینی در ارتباط با دریاها و به‌خصوص دریاچه‌های آب شور که در معرض تغییرات شدید تراز سطح آب و متعاقباً تغییرات شدید چگالی هستند حائز اهمیت است.

مطالعات تداخل آب شور و شیرین عموماً به یک یا ترکیبی از روش‌های مدل‌های ریاضی، مطالعات میدانی و یا آزمایشگاهی صورت می‌گیرد (Abd-Elhamid et al., 2022; Chang and Clement., 2012; Robinson et al., 2016; Ahmadi et al., 2022; Dalai and Dhar, 2022). از بین روش‌های اشاره شده مدل‌های آزمایشگاهی به دلیل قطعیت بالا در مطالعات پایه‌ای دینامیک تداخل آب شور و شیرین از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. ژانگ و همکاران به منظور مطالعه‌ی آزمایشگاهی انتقال آلودگی در آب‌های زیرزمینی، به بررسی تجربی رفتار توده‌های آلودگی با چگالی متفاوت در یک آبخوان ساحلی نامحصور پرداختند. آزمایش‌ها در یک مخزن پر از دانه‌های شیشه‌ای گلس‌بید، با طول ۱۶۵، عرض ۱۰ و ارتفاع ۶۰

بیش از نصف جمعیت جهان در مناطق ساحلی و در فاصله‌ی ۶۰ کیلومتری از سواحل زندگی می‌کنند (محمودزاده و همکاران ۱۳۹۴؛ Hussain et al., 2019). در این مناطق سفره‌های ساحلی از مهم‌ترین منابع تامین آب شیرین می‌باشند. امروزه این آبخوان‌ها به دلیل پیشروی آب شور دریا به سمت آن‌ها در معرض خطر قرار گرفته‌اند (Ketabchi et al., 2014). پیشروی آب شور یک مسئله‌ی جهانی است که با افزایش تقاضا برای آب شیرین در مناطق ساحلی تشدید می‌شود و متاثر از افزایش سطح آب دریا و تغییرات اقلیم است.

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
 - ۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
 - ۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
- *- نویسنده مسئول: (Email:h.ahmadi@urmia.ac.ir)

متری از کف و در فاصله ۰/۲ متری از مرز آب شور گزارش شد. مطلبیان و همکاران طی یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی یک رویکرد جایگزین برای کنترل نفوذ آب شور در آبخوان‌های ساحلی غیرمحصور، با استفاده از یک کانال تغذیه ارائه کردند. مدل آزمایشگاهی آن‌ها دارای ابعاد ۱،۶۷، ۸ و ۱۰۰ سانتی‌متر به ترتیب طول، عرض و ارتفاع بود. محیط متخلخل از ذرات گلس‌بید با قطر ۷۲۵ الی ۱۲۵ میکرومتر تشکیل شده و تخلخل و هدایت هیدرولیکی اشباع آن به ترتیب ۰/۳ و ۰/۰۵۶ سانتی‌متر در ثانیه گزارش شده است. آب شور مورد استفاده از ترکیب آب لوله‌کشی با نمک دریاچه‌ی ارومیه به دست آمد و برای ردیابی آن از پتانسیم پرمگنات بنفش رنگ با نسبت ۰/۱ گرم در لیتر استفاده شد (Motallebian et al., 2022).

با توجه به اینکه جزئیات تکنیک‌های به کار رفته در مدل‌های آزمایشگاهی به صورت شفاف ارائه نشده است در این تحقیق تجربیات حاصل از ساخت مدل آزمایشگاهی تداخل آب شور و شیرین و همچنین تاثیر روش‌های مختلف به کار رفته در اجزای مدل مورد بررسی قرار گرفته و خطاها و ایرادات احتمالی در انجام آزمایش‌ها با منبع آن ارائه شده است.

مواد و روش‌ها

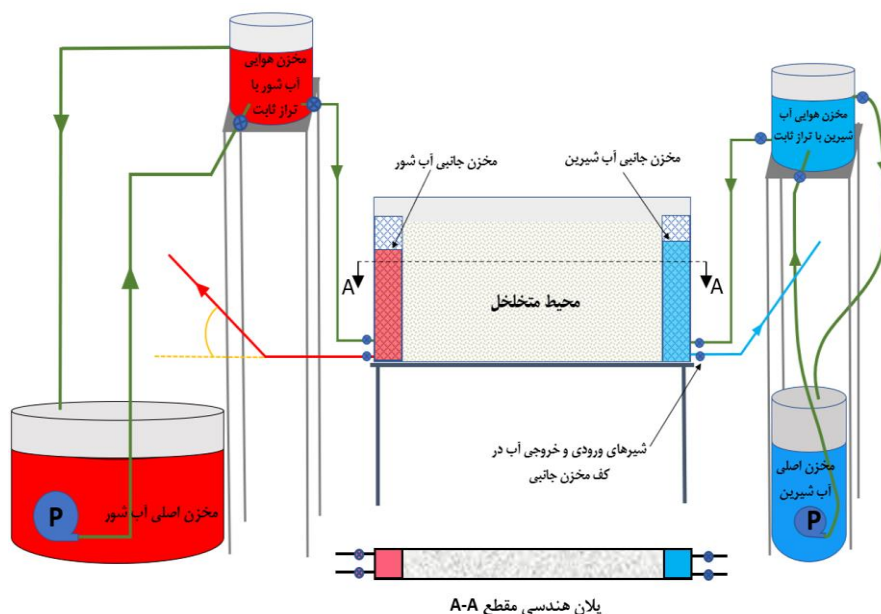
مخزن آزمایش

به منظور مشاهده و ردیابی توده آب شور، با توجه به مستندات علمی و نمونه‌های ساخته شده در مقالات علمی معتبر دیگر (Chang and Clement, 2012; Goswami and Clement, 2007; Memari et al., 2019)، کل بدنه مدل از شیشه نشکن به شکل مستطیل با ابعاد داخلی ۱۱۸، ۱۲ و ۶۰ سانتی‌متر (به ترتیب طول، عرض و ارتفاع) ساخته شد. لازم به ذکر است طبق نظر بیر به منظور وارد شدن بعد سوم در آزمایشات لازم است عرض مدل بیش از ۱۵ برابر قطر متوسط ذرات باشد (خیراندیش، ۱۳۹۰). با توجه به حداکثر قطر ذرات به کار رفته برای ایجاد محیط متخلخل در این تحقیق (۷۱۵ میکرومتر)، بر اساس نظر بیر حداقل عرض مدل آزمایشگاهی برابر با ۱/۷۲۵ میلی‌متر محاسبه شد. به منظور سهولت پر و تخلیه کردن مدل آزمایشگاهی عرض آن ۱۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. برای پیشگیری از خمش و تغییر شکل فضای داخلی تانک در اثر نیروهای وارده، بخش بالایی تانک شیشه‌ای توسط یک گیره مهار شد. فضای داخلی مدل با نصب توری با اندازه منافذ متناسب با قطر ذرات، به سه بخش شامل مخزن جانبی آب شیرین، قسمت میانی حاوی محیط متخلخل و مخزن جانبی آب شور تقسیم شد. توری‌ها بر روی یک فریم ناودانی صلب هم‌عرض با تانک نصب شده و به همراه درزگیر در حاشیه آن در مخزن قرار داده شدند. این توری‌ها به راحتی قابل جدا شدن از سیستم بودند. طول مخازن جانبی آب شور و شیرین

سانتی‌متر، انجام شد. قطر متوسط ذرات گلس‌بید ۰/۷۲۵ میلی‌متر و تخلخل و هدایت هیدرولیکی اشباع محیط به ترتیب ۰/۳۷ و ۴ میلی‌متر بر ثانیه محاسبه شد. در این آزمایش برای ردیابی آب شور از رنگ قرمز فرموله شده از رنگ غذا و سازگار با محیط زیست، استفاده شد (Zhang et al., 2002). مک کوئن طی ساخت یک مدل فیزیکی دوبعدی، برای مطالعه‌ی تداخل آب شور و شیرین، یک آبخوان آزاد با دو چاهک پمپاژ و شرایط مرزی تغذیه، آب شور و رنگی را مدل‌سازی کرد و با شدت پمپاژهای مختلف وضعیت حرکت آب شور را با ردیاب رنگ بررسی کرد (McCuen, 2003). گوسامی و کلمنت به منظور بررسی الگوهای انتقال گوه‌ی آب شور از یک مدل آزمایشگاهی از جنس پلکسی‌گلس با ضخامت ۶ میلی‌متر به ابعاد داخلی ۵۳، ۲/۷ و ۳/۵ سانتی‌متر، به ترتیب طول، عرض و ارتفاع استفاده نمودند. در تحقیق ایشان جهت ردیابی آب شور گوه‌ی از رنگ قرمز خوراکی بدون عنوان کردن نام علمی یا تجاری آن استفاده شد. مواد تشکیل دهنده محیط متخلخل ذرات یکنواخت گلس‌بید به قطر متوسط ۱/۱ میلی‌متر بوده و تخلخل و هدایت هیدرولیکی سیستم به ترتیب ۰/۳۸۵ و ۱۰۵۰ متر در روز گزارش شده است (Goswami and Clement, 2007). لویون و همکاران با استفاده از یک مدل فیزیکی به ابعاد داخلی ۹۰، ۶۰ و ۸ سانتی‌متر (به ترتیب طول، ارتفاع و عرض) و پس از نصب دیواره‌ی حائل با ارتفاع‌های مختلف (۴۰ و ۲۰ سانتی‌متر) به شبیه‌سازی دینامیک آب شور باقی‌مانده در منطقه ذخیره‌سازی، در یک آبخوان نامحصور پرداختند. برای ایجاد محیط متخلخل از دانه‌های گلس‌بید با قطر ۱/۲ میلی‌متر استفاده شد. هدایت هیدرولیکی سیستم با دیواره‌های حائل ۲۰ و ۴۰ سانتی‌متری به ترتیب ۱/۲۷ و ۱/۱۸ سانتی‌متر بر ثانیه و تخلخل آن از هر دو روش حجمی و وزنی ۰/۴ محاسبه شد (Luyun et al., 2009). ربانیها و همکاران (۱۳۹۹) تاثیر آب شور و توزیع نمک در لایه‌های خاک را در اثر ورود آب شور به کمک مدل فیزیکی مورد ارزیابی قرار دادند.

ظهربابی مطلق و همکاران (۱۴۰۰) در طی یک مطالعه آزمایشگاهی به بررسی تاثیر دیوار آب‌بند در کاهش نفوذ شوری در یک آبخوان ساحلی پرداختند. مدل آزمایشگاهی استفاده شده از جنس پلکسی‌گلس و دارای ابعاد ۱۳۰، ۶۰ و ۱۰ سانتی‌متر به ترتیب طول، ارتفاع و عرض بود. به منظور ایجاد محیط متخلخل از ذرات گلس‌بید استفاده شد. تخلخل محیط و هدایت هیدرولیکی آن به ترتیب ۰/۳۷ و ۰/۵۵ سانتی‌متر بر ثانیه گزارش و به منظور ردیابی آب شور از رنگ غذای قرمز استفاده شده است. نتایج تحقیق ایشان نشان داد در محیط ناهمگن میزان پیشروی گوه آب شور بیشتر بوده و میزان تاثیرگذاری دیوار آب‌بند در محیط همگن بیشتر از محیط ناهمگن می‌باشد. همچنین حداکثر تاثیر اجرای دیوار آب‌بند در کاهش درصد پیشروی گوه آب شور در محیط همگن ۱۰۰٪ و در محیط ناهمگن ۹۲٪ به دست آمده و بهترین محل قرارگیری دیوار آب‌بند در ۰/۸

شکل ۳ نشان داده شده است. در این حالت با تنظیم ارتفاع سرریز در ترازهای مختلف، ارتفاع آب در مخازن جانبی تنظیم می‌گشت. دقت تنظیم تراز سطح آب در مخازن جانبی در هر دو حالت یک میلی‌متر بود. جهت ایجاد جریان ماندگار در مخازن جانبی، از مخازن هوایی با تراز ثابت استفاده شد. روش ثابت نگه‌داشتن ارتفاع آب در داخل مخازن هوایی به این طریق صورت گرفت که آب از مخزن زمینی به مخزن هوایی پمپاژ می‌شد، آب مازاد داخل مخزن هوایی از طریق سرریز نصب شده در آن مجدداً وارد مخزن زمینی می‌شد و به این ترتیب همواره ارتفاع آب داخل مخزن هوایی ثابت مانده و مقدار ثابتی جریان وارد سیستم می‌گشت. شکل ۱ شمای کلی مدل آزمایشگاهی ساخته شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱- تصویر شماتیک از اجزا و کلیات مدل آزمایشگاهی (شکل بدون مقیاس است)

سیستم بر آن اعمال شدند. در ادامه و در بخش کنترل چگالی به توضیح این تفاوت‌ها پرداخته خواهد شد.

آماده سازی محیط متخلخل

آماده‌سازی محیط متخلخل به دو روش مختلف انجام شد. در حالت اول ذرات کاملاً خشک در لایه‌های نازک ۵ سانتی‌متری داخل تانک ریخته شد و به کمک یک میله به قطر ۱۰ میلی‌متر تلاش شد محیطی بدون اثر لایه‌بندی ایجاد شود. در حالت دوم تانک شیشه‌ای تا نصف با آب پر گردید سپس ذرات گلس‌بید کم‌کم داخل آن ریخته شد. پس از شکل‌گیری هر لایه ۵ سانتی‌متری از گلس‌بید با حرکت مداوم میله اسلامپ در داخل تانک از بوجود آمدن لایه‌بندی جلوگیری

و طول محیط متخلخل ۱۰۰ سانتی‌متر انتخاب شد. در طرفین تانک شیشه‌ای، یعنی در کف هر یک از مخازن جانبی دو شیر قابل تنظیم، یکی برای ورود آب از مخزن هوایی و دیگری برای خروج و تنظیم تراز آب، کار گذاشته شد. کنترل تراز سطح آب در مخازن جانبی ابتدا به روش تنظیم تراز دهانه خروجی شیر تخلیه در دانه‌بندی ریز و بعد از اصلاح عملکرد سیستم در دانه‌بندی درشت، به روش نصب سرریز نیلوفری در داخل مخزن جانبی انجام گرفت. کنترل تراز در مخازن جانبی به روش تنظیم دهانه تراز خروجی شیر تخلیه در شکل ۲ نشان داده شده است. در این حالت دهانه‌ی شیر تخلیه به صورت زاویه‌ای قابل تنظیم بود و با افزایش مقدار زاویه آن نسبت به افق تراز آب در مخزن جانبی افزایش و با کاهش زاویه، کاهش می‌یافت. کنترل تراز در مخازن جانبی به روش سرریز نیلوفری در

دانه بندی محیط متخلخل

به منظور بررسی تاثیر قطر ذرات بر روند پیشروی گوهی آب شور از ذرات گلس‌بید در دو دانه‌بندی مختلف، اولی با قطر متوسط ۳۲۰ و دیگری با قطر متوسط حدود ۶۰۰ میکرومتر استفاده شد. دانه‌بندی‌های منتخب در محدوده‌ی دانه‌بندی ماسه‌ی ساحلی، موجود در بازار ایران و همچنین در محدوده‌ی دانه‌بندی ذرات استفاده شده توسط سایر محققان بود (Zhang et al., 2002; Goswami and Clement, 2007; Motallebian et al., 2022). آزمایش‌ها ابتدا در دانه‌بندی ریز و سپس در دانه‌بندی درشت انجام شدند. لازم به ذکر است که سیستم مورد استفاده در آزمایش‌های مربوط به دانه‌بندی ریز و درشت با یکدیگر تفاوت‌هایی داشتند که جهت بهبود عملکرد

طول زمان ایجاد گردد. ارتفاع کل محیط متخلخل در هر دو حالت ۴۵ سانتی متر بود. مشخصات محیط متخلخل با دانه‌بندی‌های به کار رفته در جدول ۱ ارائه شده است.

شد. با لرزش میز فولادی و ذرات گلس‌بید به کمک میله و بیراتور بتن برای لایه‌های ۱۵ سانتی متری از گلس‌بید کاملاً اشباع (سه لایه ۵ سانتی متری اجرا شده) تلاش شد حداکثر میزان تراکم در لایه گلس‌بید ایجاد شده و یک محیط همگن و همروند بدون تغییر در

جدول ۱- مشخصات گلس‌بید بکار رفته در آزمایش‌های تداخل آب شور و شیرین

وزن مخصوص خشک gr/cm ³	چگالی gr/cm ³	هدایت هیدرولیکی m/day	تخلخل (n)	اندازه ذرات (μm)			نوع ذرات
				حداکثر	متوسط	حداقل	
۱/۷۵	۲/۵	۴۸/۴	۰/۳	۱۲۰	۴۱۵	۷۱۵	ریزدانه
۱/۶	۲/۵	۳۱۵	۰/۳۶	۵۰۰	۶۰۰	۷۱۵	درشت دانه

شور در مخزن اصلی با دقت بالا به کمک پیکنومتر و هیدرومتر کنترل می‌شد و با توجه به اهمیت ثابت ماندن چگالی در طول زمان انجام آزمایش، تغییرات آن قابل چشم‌پوشی نبود. برای تثبیت شوری در این مخزن در این حالت، از یک مخزن مجزا با عنوان مخزن غلظت مضاعف حاوی آب شور با غلظتی دو برابر غلظت آب شور مورد استفاده در آزمایش استفاده شد. آب شور غلیظ‌تر از این مخزن به صورت لوله ماریوت با دقت بالا، دبی ثابت و برابر با دبی نشست آب شیرین، به مخزن اصلی اضافه می‌شد (شکل ۲). تفاوت دیگر سیستم استفاده شده در دانه‌بندی ریز با دانه‌بندی درشت، نحوه‌ی کارگذاری و عملکرد سرریزهای مخازن جانبی بود. با توجه به شکل ۲ در دانه‌بندی ریز تخلیه‌ی آب مازاد مخازن جانبی از طریق شیرهای تعبیه شده در کف اتفاق می‌افتاد، حال آن که در دانه‌بندی درشت سرریزهای نیلوفری در داخل مخازن جانبی کار گذاشته شد (شکل ۳) که باعث بهبود عملکرد سیستم شد و همچنین با تسریع تخلیه‌ی آب شیرین نشستی از سطح نشست باعث توزیع یکنواخت‌تر شوری در عمق مخزن جانبی آب شور شد.

دانه‌بندی درشت

در آزمایش‌های مربوط به این دانه‌بندی به علت افزایش هدایت هیدرولیکی سیستم و متعاقباً کاهش مدت زمان انجام آزمایش، از سیستم غیربسته برای تامین آب شور استفاده شد به طوری که آب شور رقیق خروجی از مخزن جانبی وارد مخزن اصلی آب شور نمی‌شد و به صورت جداگانه جمع‌آوری می‌گشت؛ لذا در این حالت نیازی به کنترل شوری مخزن اصلی نبود. لازم به ذکر است به علت کوتاه شدن مدت زمان آزمایش حجم مخزن اصلی پاسخگوی تامین آب شور یک آزمایش کامل بود.

به دلیل استفاده از گلس‌بیدهای صنعتی دارای جدول مشخصات استاندارد چگالی گلس‌بیدها مشخص بوده و تخلخل محیط به هر دو روش استفاده از روابط

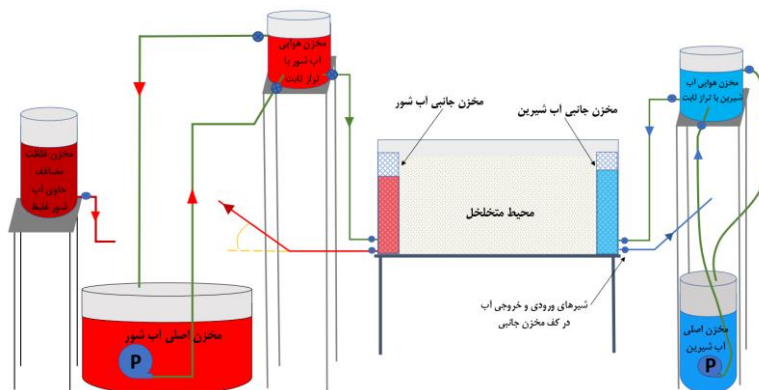
حجمی-وزنی و آزمایشگاهی محاسبه شد. با مشخص بودن وزن و حجم گلس‌بید ریخته شده در مخزن، تخلخل محیط حساب شد. هدایت هیدرولیکی محیط متخلخل به روش مدلسازی معکوس با استفاده از مدل عددی GeoStudio محاسبه گشت. با توجه به عنوان مقاله و عدم نیاز به استفاده از هدایت هیدرولیکی جزئیات محاسبه آن ذکر نشده و این پارامتر صرفاً جهت مقایسه‌ی مشخصات دانه‌بندی ریز و درشت در جدول ۱ ارائه شده است.

سیستم کنترل غلظت و چگالی آب شور

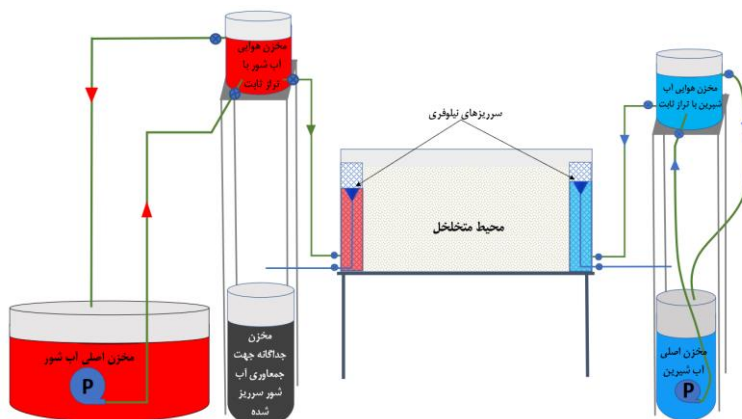
حجم مخزن جانبی آب شور محدود و تقریباً ۴/۵ لیتر و مستعد تغییرات غلظت بر اثر نشست آب شیرین در طول آزمایش بود، لذا آب این مخزن به صورت پیوسته و با جریانی حدود ۱/۵ لیتر در دقیقه از سمت منبع اصلی آب شور تعویض می‌شد.

دانه‌بندی ریز

حجم مخزن اصلی آب شور در این دانه‌بندی حدود ۲۰۰ لیتر بود که به دلیل طولانی شدن زمان آزمایش در مواردی تا ۲۴ ساعت، به اتمام می‌رسید، لذا در تمامی آزمایش‌های مربوط به دانه‌بندی ریز روش تامین آب شور به صورت یک سیستم بسته انتخاب شد و جریان مازاد خروجی از مخزن جانبی دوباره وارد منبع اصلی می‌شد. در چنین حالتی به علت نشست تدریجی آب شیرین در طول زمان آزمایش به داخل مخزن جانبی آب شور و بازگشت آن به مخزن اصلی، مشکل کاهش تدریجی غلظت مخزن اصلی آب شور ایجاد شد. چگالی آب



شکل ۲- جزئیات مدل آزمایشگاهی در آزمایش‌های مربوط به دانه‌بندی ریز



شکل ۳- جزئیات مدل آزمایشگاهی در آزمایش‌های مربوط به دانه‌بندی درشت

مقدار آن در آزمایش مقدماتی در نظر گرفته شده و از تغییرات آن در طول زمان انجام آزمایش به دلیل رشد گوهی آب شور چشم پوشی شد. کنترل چگالی آب خروجی از مخزن جانبی پس از اعمال این روش، حاکی از تثبیت مقدار چگالی با دقت بالا در طول زمان انجام آزمایش بود.

ردیابی گوهی آب شور

ردیابی گوهی آب شور مستلزم رنگی شدن آب شور بود. با توجه به تحقیقات دیگر پژوهشگران رنگ مورد استفاده در این آزمایش باید دارای دو ویژگی باشد، اولاً نرخ پخش رنگ در محیط متخلخل باید با نرخ پخش آب شور یکسان باشد تا از صحیح بودن موقعیت مکانی گوه اطمینان حاصل شود، ثانیاً این رنگ نباید جذب ذرات گلس‌بید شود تا در طول آزمایش غلظت رنگ ثابت مانده و پس از شستشوی سیستم اثر رنگ بر روی ذرات گلس‌بید باقی نماند (Zhang et al., 2002). رنگ‌های انتخابی از نظر اقتصادی مقرون به صرفه و در بازار ایران موجود بوده و شامل رنگ شیمیایی پتاسیم پرمنگنات و متیلن‌بلو و چهار رنگ غذایی زرد، نارنجی، قرمز و آبی بود. این رنگ‌ها برای

سیستم اندازه‌گیری دبی نشت

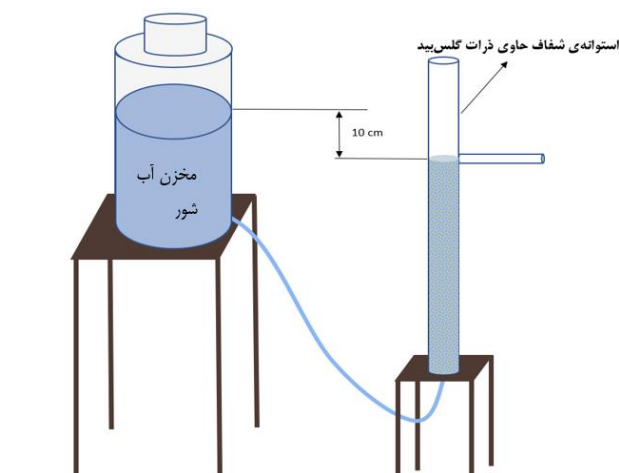
به منظور کنترل شوری مخزن اصلی و تزریق آب شور غلیظ به آن، تخمین مقدار نشت آب شیرین به داخل مخزن جانبی آب شور ضروری بود، از این رو قبل از شروع هر آزمایش اصلی، یک آزمایش مقدماتی تنها با استفاده از آب شیرین در هر دو مخزن انجام شد. در این آزمایش‌ها تراز آب در مخازن جانبی راست و چپ مساوی مقادیر تراز در آزمایش اصلی انتخاب شد. سیستم آب شیرین به صورت یک سیستم بسته بود که تنها خروجی آن مقدار آبی بود که به واسطه نشت وارد مخزن آب شور می‌شد، لذا پس از گذشت یک ساعت از شروع آزمایش، کاهش حجم آب مخزن آب شیرین محاسبه و میزان دبی نشت تعیین می‌گردید. این دبی عامل کاهش غلظت در مخزن آب شور بوده و مبنای تنظیم دبی ورودی آب شور غلیظ به مخزن اصلی در آزمایش‌ها قرار گرفت. با برابر در نظر گرفتن مقدار دبی ورودی آب شور غلیظ و دبی نشت، آب شور غلیظ‌تر با دقت قابل قبولی اثر نشت آب شیرین را خنثی کرد. به دلیل عدم وجود روش عملی برای تخمین دقیق میزان نشت آب شیرین پس از تشکیل گوهی آب شور، به ناچار مقدار دبی نشت در طول آزمایش برابر با

درشت انجام شد. ابتدا استوانه با ذرات گلس بید و آب شرب به صورت همزمان در سه لایه به ارتفاع ۴۲ سانتی متر پر شد تا محیط اشباع حاصل شود. با اتصال مخزن حاوی آب شور رنگی از کف استوانه، آب شور وارد محیط شد. در بخش فوقانی استوانه، منفذی برای خروج آب شور در نظر گرفته شد. بلافاصله بعد از شروع آزمایش و ورود آب شور، نمونه‌گیری از آب خروجی از منفذ فوقانی انجام شد. با کنترل هدایت الکتریکی آب خروجی، زمان رسیدن آب شور از کف به بالای استوانه تعیین و حرکت ماده‌ی رنگی با تصویربرداری دیجیتال ثبت شد. تراز بکار رفته برای آب شور در همه آزمایش‌ها ۱۰ سانتی‌متر بالاتر از تراز نقطه خروجی آب بود. این فاصله همواره با تغذیه‌ی دستی ثابت نگه‌داشته می‌شد. گرادیان هیدرولیکی آزمایش‌ها ۰/۲۴ و غلظت نمک بکار رفته ۳۵ گرم در لیتر محاسبه شد. شکل ۴ جزئیات سیستم به کار رفته برای انجام آزمایش‌های منحنی رخنه را نشان می‌دهد.

تامین دو ویژگی مورد نیاز، صحت‌سنجی شدند. برای صحت‌سنجی شرط اول، آزمایش‌های منحنی رخنه برای رنگ‌های غذایی سانستیلو (کد تجاری ۷-۰۱-۲۴۷) تارترازین (کد تجاری ۶-۰۲-۰۲۱۵)، بریلیانت‌بلو (کد تجاری ۳-۰۴-۷۱۲) و رنگ قرمز کارموزین (کد تجاری ۱-۰۹-۲۴۵) تولیدی شرکت Symrise در دو دانه‌بندی، انجام شد. در این تحقیق برای ثبت نفوذ آب شور از تصویر برداری منظم به کمک دوربین دیجیتال GoPro Hero10 با فاصله زمانی حداقل ۱ و حداکثر ۵ دقیقه و با قدرت تفکیک ۲۴ مگاپیکسل (۴۱۷۶*۵۵۶۸) استفاده شد.

آزمایش‌های منحنی رخنه

آزمایش‌های رخنه روش استاندارد برای تعیین ضریب پخشیدگی و مقایسه‌ی این ضریب برای نمک و ماده‌ی رنگی می‌باشد. این آزمایش‌ها جهت صحت‌سنجی رنگ‌ها در یک استوانه شفاف به طول ۶۰ سانتی‌متر انجام شد. این آزمایش‌ها در هر دو نوع دانه‌بندی ریز و



شکل ۴- جزئیات سیستم به کار رفته جهت انجام آزمایش‌های منحنی رخنه

است.

مخزن اصلی

پس از انجام آزمایش‌های منحنی رخنه در استوانه‌ی شفاف، جهت بررسی و اطمینان بیشتر از نحوه‌ی عملکرد رنگ‌ها، هماهنگی حرکت رنگ‌ها با آب شور و همچنین میزان جذب‌شدگی آن‌ها در شرایط آزمایش طولانی مدت، برای استفاده در آزمایش‌های اصلی، در داخل تانک شیشه‌ای نیز آزمایش‌های ردیابی پیشروی آب شور در ترازهای متفاوت برای آب شور و شیرین انجام شد. همچنین یک بعدی بودن جریان در آزمایش‌های منحنی رخنه و دو بعدی بودن آن در مخزن اصلی نیز باعث ایجاد ضرورت بررسی عملکرد رنگ‌ها در مخزن اصلی گشت. تصاویر حاصل از بررسی عملکرد رنگ‌های ردیاب در تانک شیشه‌ای به صورت دقیق‌تر در بخش نتایج ارائه شده

نتایج و بحث

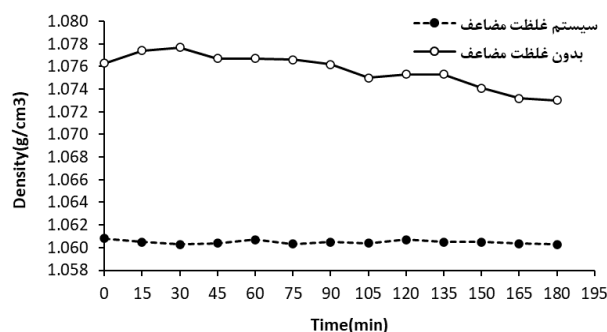
کنترل چگالی و غلظت

دانه بندی ریز

یکی از شرایط مهم در انجام آزمایش‌های تداخل آب شور و شیرین، حفظ شرایط ثابت برای شرایط مرزی می‌باشد. این شرایط شامل تراز سطح آب و غلظت آب شور است. کنترل غلظت آب شور به دقت بالایی نیاز داشته و به نوع تغذیه و سیستم تنظیم آب شور بستگی دارد. در شرایطی که دانه‌بندی محیط متخلخل ریز و هدایت هیدرولیکی آن کم باشد مدت زمان آزمایش می‌تواند تا ۲۴ ساعت

میدهد. بررسی مطالعات قبلی نشان می‌دهد که در همه تحقیقات آزمایشگاهی برای جلوگیری از اثر آب شیرین نشتی به مخزن جانبی و کاهش غلظت در آن، باید آب این مخزن با حداکثر سرعت، با آب شور مخزن اصلی جایگزین شود (Dalai and Dhar, 2022; Motallebian et al., 2022). با این حال معیار مشخصی برای سرعت جایگزینی ارائه نشده است. در صورت تعبیه شیر خروجی در کف مخزن آب شور جانبی، سرعت تخلیه آب از این مخزن را می‌توان به مقدار قابل توجهی افزایش داد و در عین حال با تنظیم تراز خروجی لوله تخلیه اقدام به تنظیم تراز سطح آب در مخزن نمود. در این روش برای جلوگیری از تجمع آب شیرین در بخش فوقانی مخزن به کمک یک پمپ هوا و قرار دادن سنگ هواده در کف مخزن امکان چرخش آب و توزیع یکنواخت شوری در عمق مخزن جانبی فراهم شد.

افزایش یابد (Motallebian et al., 2022; Crestani et al., 2022). لذا به دلیل محدودیت‌های حجم مخازن و کاهش هزینه‌های آزمایش، از سیستم بسته بصورت چرخش آب شور بین مخزن اصلی و مخزن جانبی در دانه بندی ریز استفاده شد. طبیعی است که در این حالت با افزایش حجم مخزن آب شور قدرت آن در خنثی نمودن اثر آب شیرین نشتی بیشتر شده و از ثابت بودن غلظت در طول آزمایش اطمینان بیشتری حاصل خواهد شد. در این تحقیق به دلیل محدودیت در انتخاب حجم مخزن اصلی آب شور، به منظور حذف اثر آب شیرین نشتی، از مخزن غلظت مضاعف به صورتی که در بخش مواد و روش‌ها گفته شد استفاده گشت. پس از تخمین دبی جریان آب شیرین نشتی، آب شور با غلظت دو برابر آب شور مورد استفاده در آزمایش تهیه و با دبی برابر با دبی نشت به سیستم تزریق شد. شکل ۵ نتیجه بررسی تغییرات چگالی آب شور را در مخزن اصلی نسبت به زمان در دو حالت بکارگیری سیستم کنترل غلظت و بدون آن نشان



شکل ۵- تغییرات چگالی آب شور در طول آزمایش با گذشت زمان در دو حالت وجود و عدم وجود سیستم کنترل شوری

صورت گرفت. شکل ۶ نمودار مربوط به تغییرات غلظت آب شور برای چند مورد از تست‌های انجام گرفته را نشان می‌دهد. همانگونه که مشخص است تغییرات رخ داده در مقدار چگالی آب شور در خروجی مخزن جانبی در طول زمان تقریباً ثابت می‌باشد. در واقع به علت کاهش دبی نشت آب شیرین به سبب شکل گیری گوه-ی آب شور، این آب نشتی اثر قابل ملاحظه‌ای بر تغییرات چگالی ندارد. با این حال بررسی اولیه نتایج این بخش از تحقیق نشان می‌دهد که میزان اختلاف چگالی آب شور برای مقادیر اولیه چگالی ۱/۰۷۲، ۱/۰۵۷ و ۱/۰۳۴ به ترتیب ۱، ۰/۷۷ و ۰/۵۹ درصد است. چگالی آب شور خروجی از مخزن جانبی تغییرات واقعی‌تری را نشان می‌دهد لذا ملاک عمل قرار گرفتن این چگالی در مطالعات آزمایشگاهی و همچنین در مدلسازی عددی این پدیده انتخاب چگالی آب شور منبع اصلی به عنوان شرایط مرزی می‌تواند منجر به ایجاد نتایج غیرواقعی شود. نکته دیگر اینکه به دلیل تاثیر بسیار بالای چگالی آب شور بر موقعیت نهایی گوه (Motallebian et al., 2022)، تغییرات

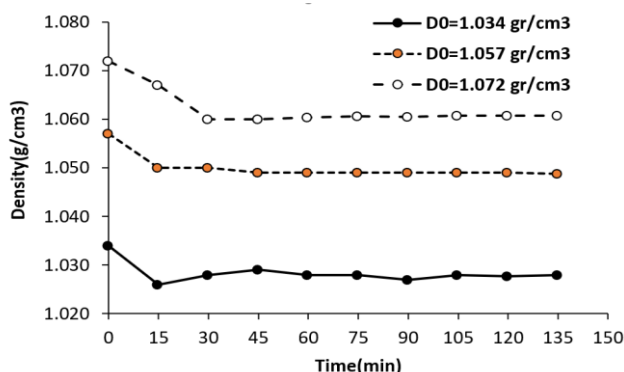
این شکل نشانگر کاهش نشت آب شیرین از سمت راست به سمت چپ در طول زمان به دلیل تشکیل گوه‌ی آب شور و عملکرد آن به صورت یک سد هیدرولیکی می‌باشد که در نتیجه‌ی آن با گذشت زمان آزمایش‌ها چگالی آب خروجی از سیستم به چگالی منبع آب شور نزدیک‌تر شده است. همچنین کاهش چشمگیر نوسانات چگالی آب شور خروجی در صورت استفاده از مخزن غلظت مضاعف مشهود می‌باشد.

دانه بندی درشت

در دانه بندی درشت با افزایش چشمگیر هدایت هیدرولیکی و کاهش مدت زمان به تعادل رسیدن آزمایش‌ها، نیاز به استفاده مجدد از آب شور خروجی از مخزن مدل برطرف شد. به این ترتیب که آب شور خروجی از سرریز مخزن جانبی، به داخل مخزن اصلی باز گردانده نشده و بصورت جداگانه جمع آوری شد. در واقع منبع اصلی آب شور به اندازه‌ی تامین آب شور مورد نیاز برای یک تست کامل کافی بود. در چنین حالتی چگالی آب شور ورودی به داخل سیستم تقریباً ثابت ماند و کنترل چگالی به وسیله‌ی پیکنومتر از آب خروجی سرریز

آب شیرین نشستی که توسط بسیاری از محققان صورت می‌گیرد قابل توجهی نمی‌باشد.

جزئی در مقدار شوری در طول آزمایش از ایجاد شرایط پایدار جلوگیری می‌کند. لذا صرف نظر کردن از تغییرات شوری بر اثر ورود



شکل ۶- تغییرات چگالی آب شور خروجی از مخزن جانبی نسبت به زمان در حالت مخزن مجزا برای مقادیر مختلف چگالی آب شور

گرفت. برای ثبت نحوه‌ی پیشروی گوه از تصویر برداری دیجیتالی استفاده شد. با توجه به اینکه عملکرد پتاسیم پرمنگنات در آزمایش‌های قبلی توسط محققان دیگر تایید شده بود (Motallebian et al., 2022) نتیجه آزمایش با آن چه که پیش‌بینی می‌شد مطابقت کامل نشان داد. شکل ۸ توسعه و جابه‌جایی گوه‌ی آب شور را در سه زمان مختلف از شروع آزمایش نشان می‌دهد.

به منظور مطالعه تاثیر افزایش غلظت آب شور بر دینامیک تداخل آب شور و شیرین و بررسی نحوه جابجایی پنجه آب شور در برخورد با آب شیرین در ادامه همین آزمایش غلظت آب شور به صورت آبی به مقدار ۱۳۷ گرم بر لیتر افزایش داده شد. این تغییر بصورت ناگهانی در کوتاه‌ترین زمان حدوداً ۳۰ ثانیه صورت گرفت. با تهیه‌ی آب شور با غلظت ۱۳۷ گرم در لیتر در مخزن مشابه دیگر، در لحظه‌ی تعویض غلظت آزمایش پمپ آب از مخزن اول به دوم منتقل و به دلیل ظرفیت بالای شیرهای تعبیه شده در سیستم برای ورود و خروج آب تعویض غلظت در زمان بسیار کوتاه میسر شد. به دلیل کنتراست بهتر رنگ بنفش با رنگ آبی از رنگ آبی متیلن‌بلو برای رنگ آمیزی استفاده شد. شکل ۹ تغییرات و جابجایی زبانه و پنجه گوه‌ی آب شور حاصل از این بررسی را نشان می‌دهد.

توری‌های مورد استفاده در دانه‌بندی ریز بر اثر برخورد با پتاسیم پرمنگنات که دارای خاصیت خوردگی می‌باشد دچار اکسایش شدید شدند. لازم به ذکر است که متیلن‌بلو یک رنگ شیمیایی و حاوی ترکیبات فلزی می‌باشد که در صورت برخورد با اکسید فلز و به طور کلی در حالت‌های اکسید و احیا بی‌رنگ می‌شود. از این رو در ادامه‌ی این آزمایش که با استفاده از رنگ متیلن‌بلو انجام شد پس از ورود آب شور آبی رنگ حاوی متیلن‌بلو با غلظت بیشتر و تاثیر آن بر موقعیت آب شور و پیشروی آن و عقب نشینی آب شیرین، به علت برخورد رنگ متیلن‌بلو با اکسید آهن، این رنگ در داخل سیستم نه به رنگ

ردیابی آب شور

آزمایش‌های منحنی رخنه

مدت زمان رسیدن آب شور به انتهای استوانه در صورت به‌کارگیری ذرات درشت‌دانه و ریزدانه به ترتیب ۴ و ۲۱ دقیقه طول کشید. در این آزمایش‌ها به‌جز رنگ برلیانت‌بلو، حرکت بقیه رنگ‌ها در دانه‌بندی درشت منطبق با حرکت آب شور بود به طوری‌که توده‌ی رنگی هم‌زمان با آب شور به نقطه خروجی استوانه رسید. در دانه‌بندی ریز فقط رنگ سان‌ست‌یلو هم‌زمان با آب شور به نقطه خروجی رسید. رنگ برلیانت‌بلو با گذشت یک ساعت از آزمایش‌ها فقط ۶ سانتی‌متر جابجا شد و سپس با وجود برقراری جریان آب شور حرکت آن متوقف شد. رنگ کارموزین به‌عنوان یکی از رایج‌ترین رنگ‌های ردیاب با تاخیر ۶ دقیقه‌ای نسبت به آب شور به انتهای استوانه رسید. شکل ۷ نحوه‌ی حرکت رنگ‌های مختلف در استوانه حاوی گلس‌بید ریزدانه را نشان می‌دهد. مقایسه حرکت رنگ‌ها در مقایسه با حرکت رنگ زرد بعنوان رنگی که با آب شور بطور یکسان حرکت کرده نشان می‌دهد که در دقایق اولیه رنگ کارموزین متناسب با آب شور حرکت کرده ولی با گذشت زمان و کاهش انرژی هیدرولیکی جریان از سرعت حرکت آن نسبت به آب شور کم شده و در نهایت با گذشت زمان این فاصله بیشتر شده است.

مخزن اصلی

دانه بندی ریز

آزمایش اول تحت غلظت شوری ۵۱ گرم بر لیتر و انحلال یک دهم گرم در لیتر پتاسیم پرمنگنات انجام شد. در این آزمایش آب شور در مخزن جانبی در تراز ۳۸ و آب شیرین در تراز ۳۹/۲ سانتی‌متر قرار

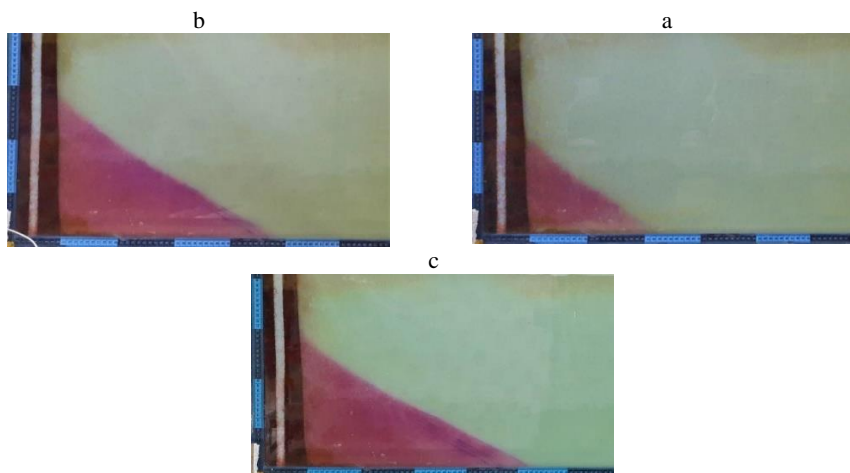
و پمپ‌ها، این رنگ با کارموزین جایگزین شد. نتیجه کاربرد کارموزین با شوری ۱۰۶ گرم در لیتر از نمک دریاچه ارومیه در ترازهای آب شور و شیرین به ترتیب ۳۷/۵ و ۴۰/۲ سانتی‌متر در شکل ۱۰ نشان داده شده است. نتیجه‌ی آزمایش حاکی از آن است که حرکت ماده رنگی با آب شور یکنواخت نبوده و حالت دندان‌های در جبهه آب شور مشاهده شده است. لذا بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی، علی‌رغم حرکت صحیح این رنگ در آزمایش منحنی رخنه، این ماده نیز به منظور استفاده در مخزن اصلی حاوی گلس بید ریزدانه مناسب تشخیص داده نشد.

آبی بلکه بی‌رنگ مشاهده شد. همچنین با توجه به شکل ۹ آثار اکسید آهن منتقل شده به داخل سیستم و آثار باقی‌ماندن رد پتاسیم پرمنگنات بنفش بر روی دانه‌های گلس بید در داخل سیستم، به دلیل ریزدانی محیط متخلخل و متعاقباً طولانی شدن زمان آزمایش، کاملاً مشهود است.

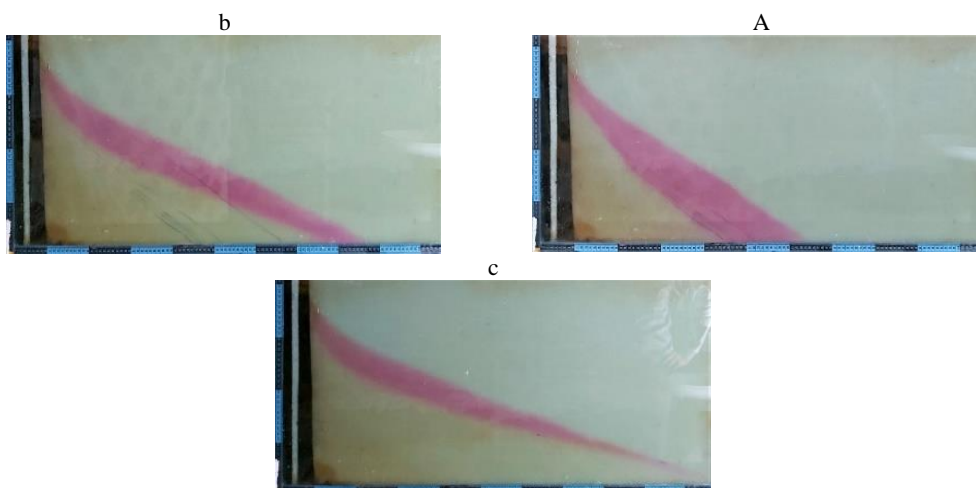
در آزمایش شماره ۲ به دلیل خاصیت خوردگی پتاسیم پرمنگنات بعنوان یک نمک با خاصیت اکسایش بسیار بالا و همچنین جذب آن توسط محیط، ضمن تعویض توری‌ها و جایگزینی آن‌ها با توری‌هایی از جنس استیل ضد رنگ، به منظور جلوگیری از آسیب دیدن سیستم



شکل ۷- نحوه حرکت آب شور رنگ آمیزی شده با انواع مختلف رنگ‌ها نسبت به زمان در استوانه حاوی گلس بید ریزدانه



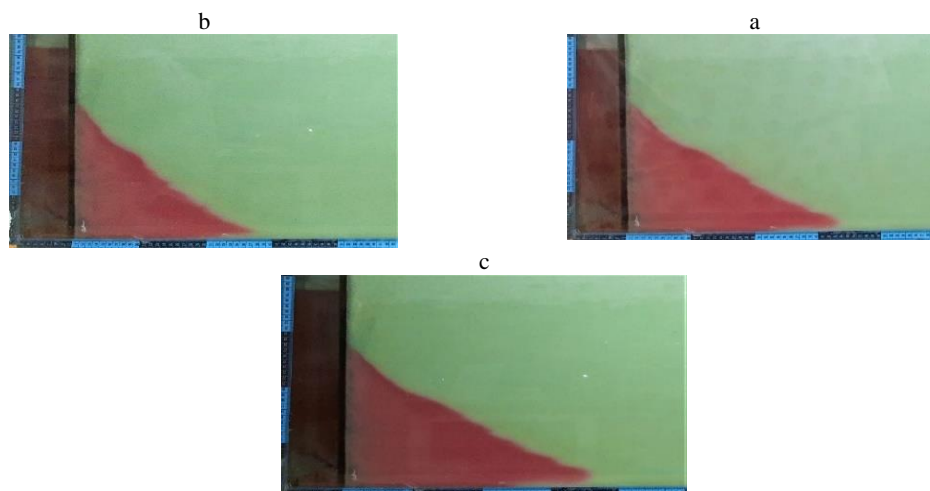
شکل ۸- الگوی ثبت شده برای حرکت گوهی آب شور تحت رنگ پرمنگنات پتاسیم. a بعد از ۳ ساعت ، b. بعد از ۵ ساعت و c. بعد از ۶ ساعت از شروع آزمایش



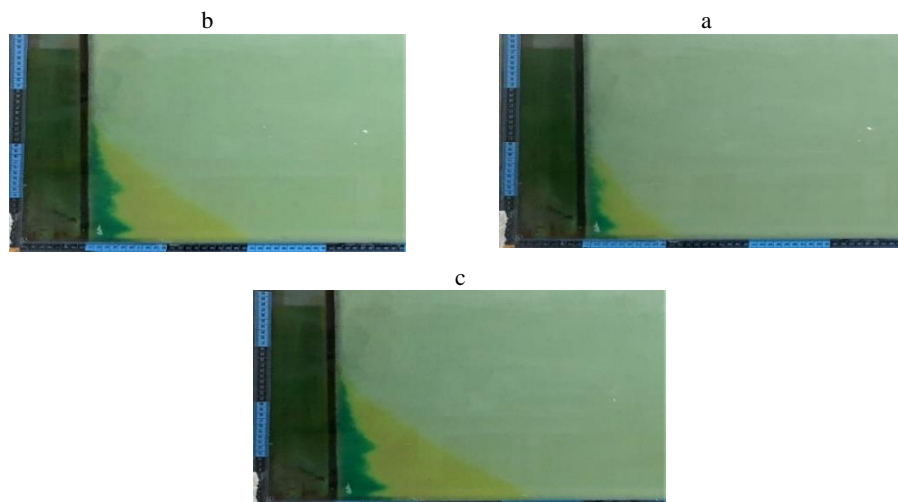
شکل ۹- الگوی ثبت شده برای حرکت گوهی آب شور تحت رنگ پرمنگنات پتاسیم با غلظت کم آب شور و متیلن بلو با غلظت بالای آب شور a. بعد از ۱/۵ ساعت ، b. بعد از ۳/۵ ساعت و c. بعد از ۶ ساعت از شروع آزمایش

متخلخل، به هنگام ورود آب شور رنگی به تانک پر از گلس بید، این رنگ‌ها به علت سرعت پخش غیر یکسان و ضریب جذب متفاوت، از هم تفکیک شدند. این مسئله درباره‌ی ترکیب رنگ‌های کارموزین و سان‌ست یلو که رنگ نارنجی را به وجود می‌آوردند نیز صادق بود. آزمایش ۴ با کاربرد رنگ سان‌ست یلو انجام شد. شکل ۱۲ نتیجه آزمایش صورت گرفته تحت شوری ۷۵ گرم در لیتر و ترازهای آب شور و شیرین به ترتیب ۳۹ و ۴۰/۷ سانتی‌متر را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل‌های مورد نظر نشان داده شده است حرکت گوه و جابجایی آن از یکنواختی مناسبی برخوردار بوده و از نظر فرم و الگو با نتایج سایر محققان مطابقت کامل دارد (Goswami and Clement, 2007; Motallebian et al., 2022).

آزمایش ۳ با بکارگیری ترکیب دو رنگ سان‌ست یلو و بریلیانت بلو انجام شد. ترکیب رنگ زرد و آبی مربوطه منجر به رنگ سبز یشمی شد که به لحاظ کنتراست در محیط سفید رنگ گلس بید از تفکیک بالایی برخوردار بود. این آزمایش تحت غلظت شوری ۱۰۶ گرم در لیتر و ترازهای آب شور و شیرین به ترتیب ۳۷/۵ و ۴۰/۵ سانتی‌متر انجام شد. نتیجه حرکت و نفوذ آب شور به سیستم به همراه ترکیب این دو رنگ با نسبت مساوی و با غلظت ۲ گرم در ۱۰۰ لیتر، در شکل ۱۱ نشان داده شده است. نتیجه‌ی آزمایش نشانگر آن است که علیرغم ترکیب شدن این رنگ‌ها در خارج از محیط متخلخل، پس از وارد شدن به محیط متخلخل رنگ آبی از رنگ زرد جدا شده است. بنابراین ترکیب رنگ‌ها برای ایجاد رنگ جدید فاقد نتیجه‌ی معتبر است چرا که علیرغم ترکیب شدن رنگ‌ها در خارج از محیط



شکل ۱۰- الگوی ثبت شده برای حرکت گوهی آب شور در اثر استفاده از رنگ خوراکی کارموزین. a. بعد از ۲,۵ ساعت، b. بعد از ۵ ساعت و c. بعد از ۷,۵ ساعت از شروع آزمایش



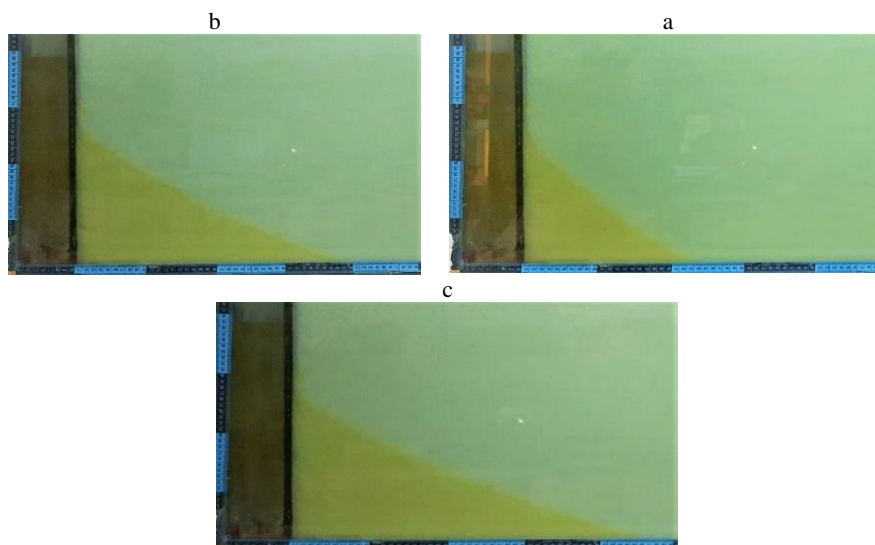
شکل ۱۱- الگوی ثبت شده برای حرکت گوهی آب شور در اثر ترکیب دو رنگ سان‌ست یلو و بریلیانت یلو. a. بعد از ۱۵ دقیقه ، b. بعد از ۳۰ دقیقه و c. بعد از ۴۵ دقیقه از شروع آزمایش

ناهماهنگ رنگ ردیاب با آب شور در تحقیقات آزمایشگاهی، اندازه ذرات عنوان شده است (جعفری، ۱۳۸۸). بنابراین سری دوم آزمایش‌ها با استفاده از ذرات گلس‌بید درشت‌دانه و با استفاده از دو رنگی که نتایج بهتری نسبت به رنگ‌های دیگر از خود نشان دادند (سان‌ست یلو و رنگ کارموزین) انتخاب شدند که در ادامه نتایج حاصل از این بررسی ارائه شده است.

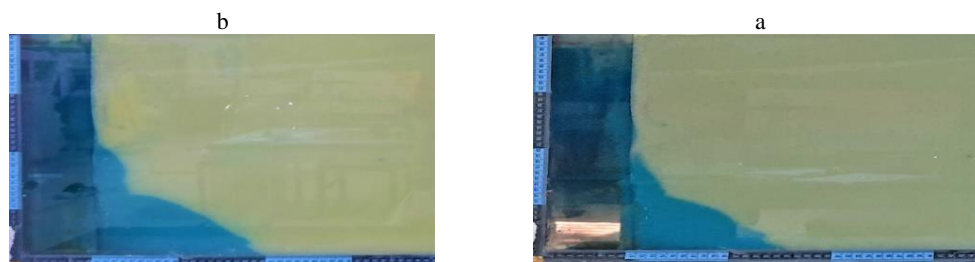
آزمایش ۵ با استفاده از رنگ بریلیانت‌بلو و با غلظت شوری ۵۱ گرم در لیتر و تراز آب شور و شیرین به ترتیب برابر با ۳۸ و ۴۰/۵ سانتی‌متر انجام شد. نتایج این بررسی در شکل ۱۳ حاکی از آن است که این رنگ به تنهایی نیز از کیفیت مناسب برای پیش‌بینی و حرکت آب شور برخوردار نبوده و با توجه به نتیجه آزمایش رخنه انجام شده، این نتیجه دور از انتظار نبود.

دانه‌بندی درشت

در مطالعات انجام شده قبلی نیز یکی از عوامل موثر بر حرکت



شکل ۱۲- الگوی ثبت شده برای حرکت گوه ی آب شور تحت استفاده از رنگ سانستیلو. a. بعد از ۷۵ دقیقه، b. بعد از ۳ ساعت و c. بعد از ۵ ساعت از شروع آزمایش

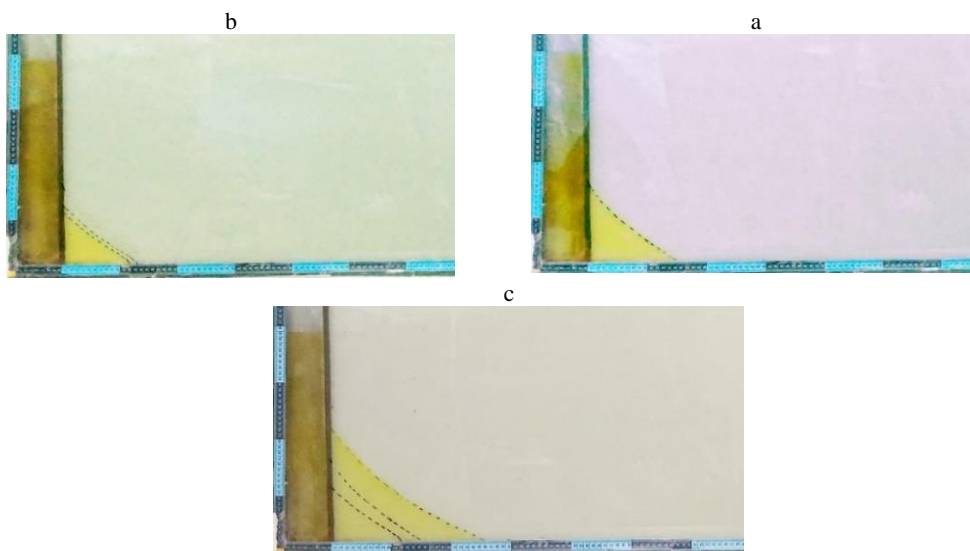


شکل ۱۳- نتایج استفاده از رنگ بریلینانتیلو برای ردیابی حرکت آب شور. a. یک ساعت پس از شروع آزمایش، b. سه ساعت پس از شروع آزمایش

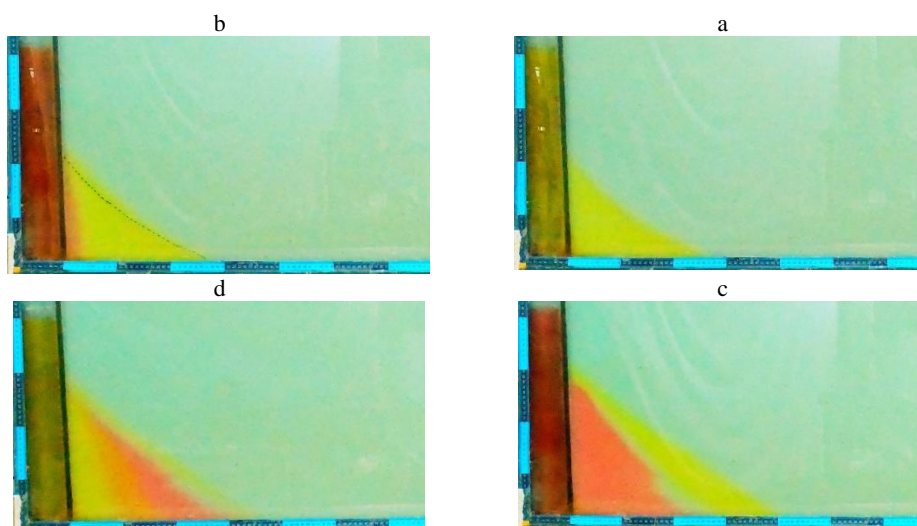
سانستیلو و کارموزین و در سه غلظت متفاوت انجام شد. غلظت آب شور در این آزمایش‌ها به ترتیب برابر با $5/5$ ، 72 و 106 گرم در لیتر بود. تراز آب شیرین در هر سه مرحله برابر با $43/5$ سانتی‌متر و تراز آب شور در آزمایش ۹ و ۱۰ برابر با $41/5$ و در آزمایش یازدهم برابر با 40 سانتی‌متر بود. پس از متعادل شدن سیستم تحت شرایط آزمایش نهم (شکل ۱۵-a)، آب شور غلیظ‌تر به رنگ قرمز بدون ایجاد تغییر در مقادیر ترازهای آب شور و شیرین وارد سیستم شد (آزمایش دهم). شکل ۱۵-b لحظه‌ی ورود آب شور حاوی کارموزین را نشان می‌دهد. در ادامه این آزمایش آب شور سوم با غلظت 106 گرم در لیتر و آغشته به رنگ زرد به سیستم تزریق شد (آزمایش یازدهم). نتیجه حاصل از فرم حرکت گوه‌ی آب شور در این حالت در شکل ۱۵-d نشان داده شده است.

آزمایش‌های ۶، ۷ و ۸ تنها با استفاده از رنگ سانستیلو و در دو غلظت متفاوت انجام شد. آزمایش‌های ۶ و ۷ با غلظت 35 و آزمایش ۸ با غلظت 55 گرم در لیتر انجام شد. در هر سه آزمایش ارتفاع آب شیرین $42/5$ سانتی‌متر و ارتفاع آب شور به ترتیب در ترازهای 40 سانتی‌متر برای آزمایش شماره ۶ و 39 سانتی‌متر برای آزمایش‌های ۷ و ۸ در نظر گرفته شد. به منظور مشاهده تاثیر توام افزایش غلظت و کاهش تراز آب شور بر روند حرکت پتجه آب شور، پس از به تعادل رسیدن سیستم تحت شرایط آزمایش ششم، آزمایش هفتم با ورود آب شور غلیظ‌تر بدون ایجاد تغییر در ترازهای آب شور و شیرین انجام شد. غلظت آب شور اولیه آغشته به رنگ زرد برابر با 50 گرم در لیتر بوده که در ادامه‌ی آزمایش، بدون تغییر در مقدار تراز آب شور و شیرین و به صورت ناگهانی به 82 گرم در لیتر افزایش داده شد. شکل ۱۴ نتیجه این بررسی را نشان می‌دهد.

آزمایش‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ با استفاده از دو رنگ متفاوت



شکل ۱۴- بکارگیری رنگ سان ست یلو در ردیابی آب شور در غلظت‌ها و ترازهای مختلف آب شور



شکل ۱۵- بکارگیری رنگ سان ست یلو و کارموزین در ردیابی آب شور در غلظت‌ها و ترازهای مختلف آب شور. a. آب شور حاوی رنگ سان ست یلو، b. ورود آب شور با غلظت بالاتر حاوی رنگ کارموزین، c. یک ساعت بعد از ورود آب شور حاوی کارموزین، d. ورود مجدد آب شور غلیظ‌تر حاوی سان ست یلو

حرکت یکسان رنگ سان ست یلو با آب شور می‌باشد. در حالی که شکل پله‌ای و دندان‌های در آب شور حاوی کارموزین به روشنی در جبهه‌ی آن دیده می‌شود. لذا نمی‌توان اندازه ذرات و نوع دانه‌بندی محیط را عامل اصلی در جذب رنگ و یا حرکت غیر عادی آن عنوان کرد. این موضوع می‌تواند به تاثیر انواع مختلف کاتیون‌ها و یا آنیون‌های موجود در آب دریاچه ارومیه ارتباط داشته باشد.

همانگونه که در شکل ۱۵- c مشاهده می‌شود بین رنگ زرد و رنگ قرمز کارموزین در بخش‌های پایینی گوه فاصله وجود دارد. این فاصله به دلیل کند بودن سرعت حرکت رنگ کارموزین در مقایسه با سرعت حرکت آب شور می‌باشد. در واقع با وجود دو برابر شدن قطر ذرات، رفتار و شکل گوه‌ی آب شور حاوی کارموزین مشابه محیط ریزدانه است. با توجه به شکل ۱۰- d میتوان گفت که در زمان‌های مختلف از ورود آب شور نهایی زرد رنگ به داخل سیستم، هیچ فاصله‌ای بین رنگ قرمز و زرد مشاهده نمی‌شود که تایید کننده

نتیجه گیری

در انجام آزمایش‌های ردیابی آب شور لازم است در انتخاب مواد و روش انجام آزمایش دقت کافی صورت بگیرد. ردیابی گوهی آب شور به عنوان مهم‌ترین بخش این آزمایش‌ها به کمک رنگ‌هایی با انحلال پذیری بالا در آب شور صورت گرفت. بررسی رنگ‌های مختلف در این تحقیق نشان داد که آزمایش‌های رخنه به عنوان رایج‌ترین روش در بررسی خصوصیات جابجایی و پخشیدگی رنگ، به دلیل ماهیت یک بعدی حرکت آب در آن، برای صحت‌سنجی نحوه‌ی حرکت رنگ در آزمایش‌های تداخل آب شور و شیرین کافی نیست. به طوری که در آزمایش رخنه، با وجود مشاهده حرکت یکنواخت کارموزین، در آزمایش‌های اصلی تداخل آب شور و شیرین که از ماهیت دو بعدی برخوردار بود غیر یکنواختی قابل ملاحظه‌ای در جبهه آب شور مشاهده شد. همچنین نتایج این بررسی نشان داد که ترکیب رنگ‌های مختلف به منظور تولید رنگ‌های جدید جهت ردیابی آب شور در مخزن اصلی فاقد نتیجه معتبر است، زیرا علی‌رغم ترکیب شدن رنگ‌ها در خارج از محیط متخلخل، به دلیل ضریب جذب متفاوت رنگ‌ها، تفکیک رنگ‌ها در محیط متخلخل رخ می‌دهد. ذرات پرمنگنات پتاسیم با وجود کاربرد گسترده بعنوان ردیاب در منابع آب، در محیط‌های آزمایشگاهی جذب ذرات گلس‌بید شده و به دلیل شفافیت اولیه ذرات، باعث کدر شدن رنگ ذرات گلس‌بید می‌شود. رنگ سان‌ستیلو بهترین کارایی را در بین انواع مختلف رنگ‌های غذایی و شیمیایی از خود نشان داد و بدون جذب شدن به ذرات محیط متخلخل، در آزمایش‌های رخنه و آزمایش‌های اصلی، منطبق بر آب شور حرکت کرد. بررسی عملکرد مواد رنگی در محیط‌های متخلخل با اندازه ذرات مختلف نشان داد که ذرات درشت‌دانه به دلیل حرکت بهتر مواد رنگی به همراه آب شور برای انجام آزمایش‌های تداخل آب شور و شیرین مناسب‌تر می‌باشند. در محیط‌های ریزدانه به دلیل پایین بودن سرعت حرکت آب، زمان آزمایش بسیار طولانی شده و منجر به استفاده‌ی مجدد از آب شور خروجی به دلیل محدودیت حجم آب شور و نمک مصرفی می‌گردد. در چنین شرایطی لازم است تاثیر آب شیرین ورودی به مخزن آب شور با اضافه کردن متناسب نمک جبران شود؛ ولی از آنجاییکه که با گذشت زمان آزمایش و شکل گیری گوهی آب شور میزان جریان آب شیرین ورودی کاهش پیدا می‌کند (Motallebian et al., 2022) کنترل شوری و غلظت به راحتی میسر نمی‌باشد. در صورت استفاده از دانه بندی درشت و کاهش زمان آزمایش می‌توان بدون بازگرداندن آب شور خروجی سیستم به مخزن اصلی آب شور اقدام به انجام آزمایش نمود. در این حالت همواره آب شور با چگالی ثابت وارد سیستم گشته و تغییرات چگالی آب شور بسیار اندک و قابل اغماض است. در صورت عدم کنترل غلظت آب شور به دلیل تغییرات پیوسته شوری، گوهی آب شور

هرگز به تعادل نرسیده و حالت ماندگار ایجاد نمی‌شود. علاوه بر این آنچه محققان در تحقیقات قبلی بدان توجه نداشته‌اند این است که ارزیابی و تحلیل آزمایش‌های دینامیک تداخل آب شور و شیرین نه تنها با غلظت و چگالی منبع اصلی آب شور بلکه باید با غلظت و چگالی آب شور خروجی از سیستم نیز ارزیابی شود.

منابع

جعفری، ف. ۱۳۸۸. بررسی مقایسه‌ای ویژگی‌های برخی از ردیاب‌ها در برابر شرایط محیطی به منظور کاربرد در مطالعات ردیابی منابع آب. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی زیست محیطی و آب‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

خیراندیش، ع. ۱۳۹۰. مدیریت آبهای زیرزمینی در مناطق متاثر از تداخل آب شور و شیرین، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، پردیس کشاورزی مهندسی منابع آب، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

ربانیها، ح.، لیاقت، ع. و سلطانی، م. ۱۳۹۹. مطالعه آزمایشگاهی تداخل آب شور و شیرین کم عمق بر توزیع شوری در ناحیه اشباع و غیراشباع با استفاده از مدل فیزیکی. آبیاری و زهکشی ایران. ۵ (۱۴): ۱۶۷۷-۱۶۸۵

ظهرابی مطلق، ع.، شهربانوزاده، م. و مهدی‌زاده محلی، س.س. ۱۴۰۰. بررسی آزمایشگاهی تأثیر دیوار آب‌بند بر کاهش نفوذ شوری در آبخوان‌های ساحلی با استفاده از تکنیک پردازش تصویر. تحقیقات آب ایران. ۱۷(۳): ۳۰۲-۳۱۶

محمودزاده، د.، کتابچی، ح. و عطایی آشتیانی، ب. ۱۳۹۴. بررسی اثر افزایش سطح آب دریا و تغییرات نرخ تغذیه بر پیشروی آب شور در آبخوان محصور. هیدرولیک. ۱۰ (۴): ۱-۱۵

Abd-Elhamid, H.F., Abdel-Aal, G.M., Fahmy, M., Sherif, M., Zelenáková, M. and Abd-Elaty, I. 2022. Experimental and Numerical Study to Investigate the Impact of Changing the Boundary Water Levels on Saltwater Intrusion in Coastal Aquifers. *Water*, 14(4), p.631.

Ahmadi, H., Hemmati, M. and Motallebian, M. 2022. Numerical modeling of Saltwater Wedge under Intruding and Receding Conditions (Case Study: Kahriz Aquifer, Lake Urmia). *Water Resources* 49 (2): 249-258.

Chang, S.W. and Clement, T.P. 2012. Experimental and numerical investigation of saltwater intrusion dynamics in flux-controlled groundwater systems. *Water Resources Research*. 48. W09527: doi: 10.1029/2012WR012134, 2012

- Memari, S.S., Bedekar, V.S. and Clement, T. P. 2019. Laboratory and Numerical Investigation of Saltwater Intrusion Processes in a Circular Island Aquifer. *Water Resources Research*. 56(2): p.e2019WR025325.
- Motalleblian, M., Ahmadi, H., Raoof, A. and Cartwright, N. 2022. Impacts of Receding of the Lakes Located in the Arid and Semi-arid Areas on the Coastal Groundwater: Integrated Modeling and Experimental Study. *Water Resources Management*. 36: 4057-4080
- 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: pp.304-313.
- Werner, A.D., Bakker, M., Post, V.E.A., Vandenbohede, A., Lu, C., Ataie-Ashtiani, B., Simmons, C.T. and Barry, D.A. 2013. Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges. *Advances in Water Resources*. 51: 3-26.
- Zhang, Q., Volker, R. E. and Lockington, D.A. 2002. Experimental investigation of contaminant transport in coastal groundwater. *Advances in Environmental Research*. 6(3) :229-237.
- Crestani, E., Camporese, M., Belluco, E., Bouchedda, A., Gloaguen, E. and Salandin, P. 2022. Large-Scale Physical Modeling of Salt-Water Intrusion. *Water*. 14(8): p.1183.
- Dalai, C. and Dhar, A. 2022. Two-Dimensional Laboratory-Scale Experiments on Saltwater Intrusion Dynamics. *Groundwater and Water Quality*: 303-311
- Goswami, R.R. and Clement, T.P. 2007. Laboratory-scale investigation of saltwater intrusion dynamics. *Water Resources Research*. 43: W04418, doi: 10.1029/2006WR005151, 2007
- Hussain, M.S., Abd-Elhamid, H.F., Javadi, A.A. and Sherif, M.M. 2019. Management of seawater intrusion in coastal aquifers: a review. *Water*. 2019(11): 2467
- Ketabchi, H., Mahmoodzadeh, D., Ataie Ashtiani, B., Werner, A.D. and Simmons, C.T. 2014. Sea level rise impact on fresh groundwater lenses in two layer small islands. *Hydrological Processes*. 28(24): 5938-5953.
- Luyun, R.J., Momii, K. and Nakagawa, K. 2009. Laboratory-scale saltwater behavior due to subsurface cutoff wall. *Journal of Hydrology*. 377(3-4): 227-236.
- McCuen, R.H. 2003. Modeling hydrologic change, Statistical methods. Lewis Publishers, pp. 433.

Experiences of Construction of an Experimental Setup for Saltwater Intrusion around Coastal Aquifers

H. Javadi¹, H. Ahmadi^{2*}, M. Hemmati³

Received: Jan.30, 2023

Accepted: July.29, 2023

Abstract

Aquifers, as the primary source of freshwater in coastal zones, are always threatened by saltwater intrusion, so assessing groundwater behavior in response to seawater has always been of interest to researchers. Employing physical-laboratory models is a conventional method of studying groundwater dynamics in contact with saltwater. In this paper, the experiences of building a laboratory model for seawater intrusion simulation are presented in detail as also the challenges of construction, creating side chambers and how to keep the salinity of saltwater constant in them and the main tank, estimation of seepage flow rate and tracking saltwater wedge using tracer colors have been studied. The model is 118 cm long, 12 cm wide, and 60 cm high, and uniform Glass beads are used as the porous medium in two different granularity. The Results showed that the amount of absorption of the tracer dyes is independent of the size of the Glass bead particles, however, conducting the experiments in the coarse-grained medium makes the system reach the steady state faster than the fine-grained one with more accuracy which leads to less salinity variation during the test. Also, in the case of using coarse-grained glass beads as porous medium and non-closed system to supply saltwater, the amount of density variation during the test is equal to 1, 0.77, and 0.59 percent for the initial values of 1.072, 1.057, and 1.034 gr/cm^3 , respectively. The results of tracer dyes analysis demonstrated that among all employed chemical and food dyes, Sunset-Yellow is the best match to move at the same rate of saltwater in the medium. Current research findings present a useful guideline for carrying out relevant experiments and designing a successful setup.

Keywords: Dye, Glass bead, S Groundwater, unset-Yellow, Tracing

1- MSc student in hydraulic structures, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

2- Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

3- Associate professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University Urmia, Iran

(*- Corresponding author Email: h.ahmadi@urmia.ac.ir)