

شبیه‌سازی فیزیکی تخلیه جریان از مجرای عمقی در مخازن چگال (با لحاظ استفاده در اداره لوله عمقی سد گتوند)

شروین فقیهی‌راد^{۱*}، حسین اردلان^۲، آرش نیکخواه^۳، امیر اسفندیار نژاد^۴

^۱ استادیار، موسسه تحقیقات آب، تهران، ایران

^۲ کارشناس ارشد پژوهشی، موسسه تحقیقات آب، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۱۰-۲۵

بازنگری: ۱۳۹۷-۱۲-۲۱

پذیرش: ۱۳۹۷-۱۲-۲۱

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۱۲-۲۷

کلمات کلیدی:

مدلسازی فیزیکی

جریان لایه‌بندی شده

تخلیه

مجرای تحتانی

شوری

خلاصه: شکل‌گیری مخازن چگال و وجود لایه‌بندی در سدهای بزرگ ناشی از پدیده‌های طبیعی همچون ورود رسوبات به شکل جریان غلیظ و یا تغییر قابل توجه در پارامترهای کیفی آب همچون شوری، اکسیژن محلول، فلزات سنگین و ... همراه است. فهم فرآیند الگوی تخلیه و اثرات متقابل آن در وضعیت لایه‌بندی مخزن با توجه به مقدار دبی خروجی از مجرای عمقی و بهره‌مندی از نتایج آن در موضوع اداره مجرای عمقی سد گتوند با استفاده از ابزار مدل فیزیکی یکی از اهداف مهم این تحقیق است. بدین منظور یک مدل فیزیکی با مقیاس مستقیم ۱:۴۰ از سازه مجرای تحتانی سد با جزئیات مربوطه برپا گردید. این مقیاس بر اساس عدد ریچاردسون و بر پایه شرایط چگالی یکسان در مدل و طبیعت بسط داده شده است. سناریوهای آزمایشگاهی مدل فیزیکی در دو بخش اجازه تغییر در تراز مخزن و ثابت نگهداشتن آن طراحی و اجرا گردید. نتایج حاصل از آزمایشهای مدل با دبی‌های متفاوت نشان داد که میزان شوری لایه مقابل مجرای عمقی، نقش موثر در شوری جریان تخلیه شده از آن را داشته و دیگر لایه‌ها در موقعیت‌های متفاوت نقش چندانی در تغییر این مقدار ندارند. همچنین الگوی خطوط جریان تشکیل یافته به سمت حفره خروجی از نوع لایه‌ای پایدار است. این موضوع علاوه بر اندازه‌گیری با تصویربرداری از مدل نیز به وضوح ثبت گردید. با توجه به خروج آب شور از لایه مقابل مجرای عمقی، به مرور از لایه‌های بالایی کم چگال جایگزینی صورت می‌گیرد و اختلاط موثری در دیگر لایه‌ها مشاهده نشد.

۱- مقدمه

سالیان اخیر در مسایل همچون تجزیه و تحلیل حوادث در محیط‌های صنعت نفت و گاز، انتقال حرارت و محیط‌هایی که به نوعی با موضوع شناوری^۲ مرتبط هستند نیز مورد توجه محققان بوده است. مانریکوز^۳ و همکاران (۲۰۰۵) در زمینه وقوع جریان چگال در سیستم رودخانه شیکاگو تحقیقات مبسوطی را انجام دادند. در این مطالعه به منظور شبیه‌سازی فرآیند مربوطه یک مدل فیزیکی با مقیاس کج مبتنی بر عدد فرود چگال^۴ و با مقیاس افقی ۱:۲۵۰ و مقیاس عمودی آن ۱:۲۰ ساخته شده و گزارش گردیده که این مقیاس بدلیل محدودیت اندازه‌گیری عمق جریان در آزمایشگاه بوده

مدل‌های چگال^۱ در مدل‌های فیزیکی به محیط‌هایی که در آن‌ها سیال با چگالی‌های مختلف در حال حرکت هستند، اطلاق می‌گردد. کاربرد عمومی این گونه مدل‌ها در محیط‌هایی است که جریان سیال به صورت سطح آزاد حرکت کرده و تغییرات جرم حجمی در محدوده کمی تغییر می‌کنند. چنین مدل‌هایی در موضوعات مهندسی همچون آبگیری و یا خروجی آب مصرفی در نیروگاه‌های کنار ساحل، جریان غلیظ رسوب در بدنه‌های آبی، نفوذ شوری در مخازن سدها و تخلیه آب شور از مجراهای عمقی سدها مورد استفاده قرار گرفته است. در

2 Buoyancy
3 Manriquez
4 Densimetric Froude Number

1 Density Models

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: sh_faghihrad@yahoo.com



است. تغییرات چگالی مابین شاخه شمالی و رودخانه شیکاگو در مدل نیز نسبت به مقدار واقعی ۱:۱۰۰ در نظر گرفته شده و بر این اساس و روابط مدل‌های مقیاس کج دیگر پارامترها نظیر دبی و سرعت به مقیاس محاسبه شده است. آزمایش‌های متعددی در مدل بر اساس شرایط متفاوت مرزی نظیر تراز سطح آب در رودخانه شیکاگو و اختلاف چگالی ناشی از شوری در شاخه شمالی اجرا شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که یک جریان دو طرفه میان شاخه شمالی و رودخانه شیکاگو به علت تغییر چگالی صورت می‌گیرد [۱].

جمالی و همکاران (۲۰۰۴) یک مطالعه تئوری و آزمایشگاهی در خصوص اثر برآمدگی کف در یک محیط لایه‌بندی خطی بر جریان خروجی از یک نقطه (چشمه) در محیطی مشابه مخزن را انجام دادند. در این پژوهش، معادلات غیرخطی جریان با استفاده از روش تفاضلات محدود در سیستم مختصات منحنی به صورت دو بعدی حل شده و تکامل جریان خروجی انتخابی در محیط لایه‌بندی شده در شرایط جریان دائمی مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین با استفاده از نتایج مدل عددی، اصلاحاتی بر معادلات پیشنهادی گذشته برای ضخامت لایه خروجی در بالای یک برآمدگی اعمال گردیده و یک مفهوم جدید به نام ضخامت چگال به جای مفهوم سنتی ضخامت لایه خروجی پیشنهاد شده است. معادلات تجربی برای عدد بحرانی فرود و ضخامت چگال در وضعیت وجود یک برآمدگی در کف بر اساس نتایج مدل عددی بسط داده شده است. یک سری مطالعات آزمایشگاهی نیز به منظور تایید نتایج تئوری انجام پذیرفته و در مطالعات آزمایشگاهی از تکنیک PIV^۱ به منظور رصد تکامل لایه خروجی استفاده شده است. نتایج تطابق خوبی را مابین سرعت اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در مدل ریاضی نشان داد. به طور معمول برآمدگی در کف باعث ضخیم‌تر شدن لایه خروجی در بالادست نسبت به شرایط کف صاف می‌شود. در این تحقیق، معادلات پیشنهادی برای ضخامت لایه خروجی توسط نتایج آزمایشگاهی مورد تایید قرار گرفت. در ادامه راه تحقیق، جمالی و آقسایی (۲۰۰۷) یک مطالعه تئوری و آزمایشگاهی در خصوص اثر تنگ‌شدگی جریان در یک محیط لایه‌بندی خطی بر جریان خروجی از یک نقطه (چشمه) در محیطی مشابه مخزن را انجام دادند. در مبحث تئوری در مدلسازی ریاضی معادلات حرکت نسبت به عرض جریان متوسط‌گیری شده است. تکامل جریان خروجی انتخابی

در محیط لایه‌بندی شده در شرایط جریان دائمی مورد مطالعه قرار گرفت و معادلاتی برای ضخامت لایه خروجی با در نظر داشتن اثر چگالی در بالادست محل تنگ‌شدگی جریان پیشنهاد گردید. پژوهش با انجام یک سری مطالعات آزمایشگاهی به منظور تایید نتایج تئوری همراه بوده و مطالعات نشان داد که به علت تنگ‌شدگی مقطع جریان، لایه خروجی ضخیم‌تر از زمانی است که جریان در مخزن یکنواخت (بدون تنگ‌شدگی) است و نازک‌تر از زمانی است که یک برآمدگی قابل انعطاف در کف مخزن وجود دارد. محققین محدوده کاربردی مطالعات خود را برای دریچه‌های تحتانی سدها می‌دانند هر چند که تحقیق یاد شده بر اساس جریان خروجی از عمق میانی از مخازن طراحی شده است.

اردلان و همکاران (۱۳۹۷) پژوهش آزمایشگاهی به منظور یافتن زاویه و سرعت بهینه در تخلیه پساب شور به محیط دریا انجام دادند برای این منظور در آن مطالعه سری آزمایش‌های مسبوسی بر روی جت‌های سنگین و مایل با زوایای ۳۰°، ۴۵° و ۶۰° و سرعت‌های مختلف تخلیه انجام گرفته است. نتایج مدل آشکار نمود که در سه زاویه بررسی شده استفاده از زاویه ۶۰° در تخلیه‌کننده‌های دریایی در صورت عدم وجود محدودیت‌های عمق، مناسب‌تر بوده و ترفیق نهایی بیشتری با محیط صورت گرفته و در نتیجه مخاطرات زیست‌محیطی کمتری خواهد داشت.

جریان‌های چگال ناشی از ورود جریان غلیظ رسوبات به مخزن سد نیز در آزمایشگاه یکی از میدان‌های وسیع فعالیت‌های محققین مختلف امروزی است که در برخی موارد از جریان آب شور به جای جریان آب و رسوب در آزمایشگاه استفاده می‌گردد. چگونگی اداره بهینه دریچه‌های تخلیه عمقی در هنگام ورود جریان غلیظ به مخزن سد و فراهم ساختن بهترین شرایط هیدرولیکی برای خروج آن قبل از ته‌نشست در سد یکی از محورهای مهم پژوهش‌های عصر حاضر در این عرصه هست. منطق طراحی مدل‌های فیزیکی در این موضوع رسوبات غلیظ نیز شباهت بسیاری با محیط‌های لایه‌بندی شده با آب شور و مکانیسم تخلیه آن از مجاری عمقی دارد. در این شاخه می‌توان به تحقیقات محمدنژاد (۱۳۸۷) در قالب مشخصه‌های جریان چگال و نقش آن در رسوب‌گذاری دریاچه پشت سدها اشاره نمود. در یک بررسی آزمایشگاهی که پروفیل‌های سرعت و غلظت در جریان‌های شبه‌همگن، رسوب‌گذار و بدون رسوب‌گذاری بررسی شده، نتایج نشان

در خصوص اتخاذ راهکارهای مناسب برای مدیریت کیفیت آب دریاچه سد انجام شده که مدیریت کیفیت آب مخزن سد را در پی داشته است [۱۰، ۱۴، ۱۷ و ۱۸].

ندرخلانو و همکاران (۱۳۹۶) شبیه‌سازی شرایط کیفی آب مخزن گتوند را در اثر اندرکنش با سازندهای نمکی و در طول زمان با استفاده از مدل سازی عددی سه بعدی انجام دادند. برای واسنجی نرخ انحلال از داده‌های اندازه‌گیری شده غلظت در مخزن در اعماق مختلف از تاریخ ۱۳۹۰/۰۵/۰۷ تا ۱۳۹۲/۰۲/۳۰ استفاده شده است. بر این اساس؛ نرخ انحلال از ۰/۵ تا ۷ سانتی‌متر بر ساعت واسنجی شده که در آن نرخ انحلال نهایی تعادلی برابر با ۰/۵ سانتی‌متر بر ساعت به دست آمده است. در خصوص لایه‌بندی حرارتی و شوری آنها بیان کردند که در بعضی مواقع از سال اختلاف دمای آب‌های سطحی با آب‌های عمیق به مقدار ۸ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته و بدین ترتیب مخزن دچار لایه‌بندی دمایی (ترموکلاین) می‌گردد. نکته مهم دیگر این که با در نظر گرفتن نرخ انحلال تعادلی ۰/۵ سانتی‌متر در ساعت، همچنین شوری وارده از مرز بالادست و رودخانه‌های شور منتهی به مخزن در زمان انجام این تحقیق تجمع نمک در مخزن به میزان ۸۷۵ کیلوگرم در ثانیه پیش‌بینی شده است. یکی از راهکارهایی که در حاشیه مباحث مدیریت بهینه کیفیت آب مخزن سد گتوند پیشنهاد شده، تخلیه آب شور لایه‌های پایینی از طریق مجرای عمقی ایجاد شده و انتقال آن بوسیله لوله برای استفاده صنعتی و تجاری است. فهم فرآیند الگوی تخلیه و اثرات متقابل آن در وضعیت لایه‌بندی مخزن با توجه به مقدار دبی خروجی و استمرار شوری در خروجی برای صنعت حائز اهمیت است. در این تحقیق با استفاده از ابزار مدل فیزیکی به بررسی این موضوع و نقش لایه‌های با شوری متفاوت در تخلیه از طریق مجرای عمقی پرداخته می‌شود.

۲- اصول شبیه سازی فیزیکی

۲-۱- بررسی تئوری‌های حاکم و اعداد بدون بعد

جهت شبیه سازی هر پدیده هیدرولیکی لازم است که تشابه هندسی، سینماتیکی، دینامیکی به نحو ممکن بین مدل و پروتوتیپ برقرار شود. کاربرد عمومی مدل‌های چگال در محیط‌هایی است که جریان سیال به صورت سطح آزاد حرکت کرده و تغییرات جرم حجمی در محدوده کمی تغییر می‌کنند ($\Delta\rho/\rho \ll 1$). اصطلاح

داده است که نیروی ثقل مؤثر، نیروی محرک اصلی برای سرعت در یک جریان غلیظ لایه‌ای است و توزیع سرعت بسیار وابسته به پروفیل‌های غلظت است [۶]. وو^۱ و همکاران (۲۰۰۴) با استفاده از جریان شور به جای جریان با بار رسوب، آزمایش با بستر افقی در فلوام انجام دادند. بررسی غلظت خروجی در طی تخلیه $Q_{outav} > Q_{inav}$ (حالتی که متوسط دبی تخلیه بیشتر از متوسط دبی ورودی است) انجام شد. نتایج نشان داد که در این مورد، برای محاسبه غلظت خروجی، با دانستن دبی جریان و غلظت آن نزدیک به سد، می‌توان از معادله پیوستگی جرمی بهره برد. تحقیقات متعدد در سدها نشان داده است که مهمترین پارامترهای مؤثر در موضوع بازده عملیات تخلیه جریان چگال از تخلیه کننده تحتانی، دبی تخلیه، زمان بازگشایی مناسب دریچه نسبت به ورود جریان غلیظ به مخزن سد و ارتفاع دریچه خروجی هستند و این موضوع به طور خاص برای سدهایی که ظرفیت تخلیه کننده‌های عمقی آنها محدود است حیاتی به نظر می‌رسد [۸].

تاکنون تحقیقات مختلفی در خصوص موضوع شوری در سد گتوند انجام شده است که می‌توان به کار حسینیان و همکاران (۱۳۸۵)، زارعی و آخوندی علی (۱۳۸۵)، زارعی و اژدری (۱۳۸۵)، مظفری زاده و چیت‌سازان (۱۳۸۶)، حائری و رضاییه (۱۳۸۶)، داموغ و زارعی (۱۳۸۹)، بقا دشتکی و همکاران (۱۳۸۹)، حسونود و همکاران (۱۳۸۹)، مایده حسونود (۱۳۹۰)، هاشمی حیدری و همکاران (۱۳۹۱)، ندرخلانو و همکاران (۱۳۹۶)، منصورنژاد و همکاران (۲۰۱۵)، محبوب و همکاران (۲۰۱۴) و اجمال و همکاران (۲۰۱۵) اشاره نمود. تحقیقات اشاره شده عمدتاً در زمینه پارامترهای محیط زیستی رودخانه کارون، عوامل مؤثر در تغییرات کیفی مخازن، کیفیت آب‌های زیرزمینی منطقه گتوند، نرخ انحلال پذیری سازندهای نمکی گچساران و مدل‌سازی عددی و فیزیکی انحلال در سازندهای نمکی و سازند گچساران گتوند هستند. از مهم‌ترین چالش‌های ایجاد شده پیرامون سد گتوند، بحث وجود سازندها و رگه‌های نمکی در اطراف محل آبگیری سد بوده است که پس از آبگیری سد به زیر آب رفته و منجر به شوری بیش از حد لایه‌های پایینی آب دریاچه سد شده است. این موضوع پیش از آبگیری سد و از سال ۱۳۸۳ مورد مطالعه قرار گرفته است. تاکنون به همین منظور پروژه‌ها و مطالعات مختلفی

عدد فرود در مدل‌های هیدرولیکی نقش عمده‌ای دارد و غالباً وقتی اثر نیروی ثقل قابل توجه باشد، اهمیت زیادی پیدا می‌کند. این عدد در تمام جریان‌هایی که دارای سطح آزاد باشند کاربرد زیادی دارد، زیرا در این جریان‌ها، حرکت آب تحت اثر نیروی ثقل بوده و اثر نیروهای دیگر در مقابل آن اندک می‌باشند. لازم به ذکر است که با مساوی قرار دادن هر یک از این اعداد در مدل و نمونه اصلی می‌توان به قوانین تشابه و روابط معینی بین مشخصه‌های هیدرولیکی مدل و نمونه اصلی دست یافت. معمولاً در مدل‌های فیزیکی مقیاس به اندازه‌ای بزرگ انتخاب می‌گردد که اثرات نیروی لزجت ($F \propto \mu VL$) و کشش سطحی حداقل شود. عدد رینولدز بیانگر نسبت میان نیروی اینرسی به نیروی لزجت است ($Re = VL/\nu$). اثرات مقیاس به طور معمول از منظر عدد رینولدز مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در مدل‌های چگال از عدد ریچاردسون^۹ (Ri) هم استفاده می‌شود. عدد ریچاردسون در واقع معکوس به توان دوم عدد فرود چگال بوده و بیانی است که بیشتر در جریانهای لایه‌ای چگال و یا وزنی از آن استفاده می‌شود [۲۲]:

$$Ri = \frac{g \Delta \rho h}{U^2} = \frac{1}{Fr_D^2} \quad (۶)$$

که در آن:

h عمق لایه به متر، $\Delta \rho$ اختلاف جرم حجمی مابین لایه‌ها، g شتاب ثقل جاذبه به متر بر مجذور ثانیه و U سرعت متوسط در مقطع (لایه) مورد نظر به متر بر ثانیه است.

عدد ریچاردسون بیانگر مفهوم پایداری در جریان‌های لایه‌ای است. مقادیر بزرگ عدد ریچاردسون معرف پایداری بیشتر لایه‌بندی ایجاد شده است. پایداری لایه‌بندی با افزایش گرادیان عدد ریچاردسون افزایش می‌یابد (و یا به عبارتی این حالت بیانگر مقادیر بزرگ گرادیان جرم حجمی یا کاهش گرادیان سرعت در عمق نسبت به عرض است).

منابع و مراجع متعدد ذکر می‌نمایند که شبیه‌سازی دینامیکی در جریان‌های لایه‌ای بهتر است با برابری این عدد در مدل و نمونه اصلی برقرار گردد و همچنین تاکید دارند که در برقراری یکسان عدد ریچاردسون در مدل و نمونه اصلی لزومی به یکسانی نسبت $\Delta \rho/\rho$ در مدل و نمونه اصلی نیست [۲۳].

بطور معمول در مطالعات مدل‌های هیدرولیکی معمول نیست هر

جریان لایه‌بندی شده^۱ اغلب برای اینگونه جریان سیالی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در بیشتر موارد این‌گونه محیط‌ها در محدوده $\Delta \rho/\rho$ برابر و یا کمتر از 10^{-2} قرار گرفته اگرچه در مواردی همچون انتشار دود^۲، شناوری نفت بر روی آب^۳ و رهاسازی گاز^۴ مقدار نسبت $\Delta \rho/\rho$ بزرگتر از 10^{-1} نیز قرار می‌گیرد [۲۲].

در مدل‌های چگال اثر نیروی شناوری بسیار حائز اهمیت است. نیروی شناوری^۵ (به صورت زیر بیان شده است [۲۲]):

$$F_b \propto L^3 g \Delta \rho \quad (۱)$$

که در آن:

L مشخصه بعد، $\Delta \rho$ اختلاف جرم حجمی مابین لایه‌ها و یا سیالات مورد بررسی و g شتاب ثقل جاذبه است.

در اغلب موارد نیروهای گرانشی (جاذبه) نقش مهمی دارند و تحت تاثیر سرعت محیط جریان^۶ و اثرات امواج و غیره هستند. نیروهای گرانشی به شکل رابطه زیر بیان می‌گردند [۲۲]:

$$F_g \propto L^3 g \rho \quad (۲)$$

علاوه بر نیروهای گرانشی و شناوری، نیروهای اینرسی^۷ نیز مهم هستند که در قالب رابطه (۳) بیان می‌گردد [۷]:

$$F_i \propto \rho L^2 V^2 \quad (۳)$$

که در آن V برابر با سرعت مشخصه هست.

با به دست آوردن نسبت نیروی اینرسی به سایر نیروها اعداد بدون بعدی حاصل می‌گردند که در تشابه هیدرولیکی کاربرد فراوانی دارند. نسبت میان نیروی اینرسی و نیروی گرانشی بیانگر عدد فرود و نسبت میان نیروی اینرسی به نیروی شناوری بیانگر عدد فرود چگال^۸ است [۲۲]:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (۴) \text{ عدد فرود}$$

$$Fr_D = \frac{v}{\sqrt{g \frac{\Delta \rho}{\rho} L}} \quad (۵) \text{ عدد فرود چگال}$$

- 1 Stratified Flow
- 2 Tailings Plumes
- 3 Oil Slicks
- 4 Gas Releases
- 5 Buoyance Force
- 6 Ambient Currents
- 7 Inertial Forces
- 8 Densimetric Froude

9 Richardson Number

که این دو محدودیت در مدل فیزیکی برپاشده در این تحقیق کاملاً رعایت شده به طوری که هم عمق جریان در مخزن و هم ابعاد حفره ایجاد شده در استاپلاگ^۲ به منظور تخلیه لایه‌های شور مخزن از قیود فوق تبعیت می‌کند.

۲-۳ مقیاس انتخابی و مقادیر تشابهی

آنالیز ابعادی بر اساس پارامترهای درگیر در مسئله، $\rho, \Delta\rho, U, g, h, \nu$ (ویسکوزیته کینماتیکی، عمق جریان، شتاب ثقل، سرعت متوسط جریان، اختلاف جرم حجمی لایه‌ها و جرم حجمی سیال) همچنین پارامترهای تکراری در مسئله که بیانگر مشخصه هندسی، جریان و سیال باشند به ترتیب ρ, U, h انتخاب شده‌اند. بدین شکل خواهیم داشت:

$$\Pi = \rho^{x1} \Delta\rho^{x2} U^{x3} g^{x4} h^{x5} \nu^{x6} \quad (7)$$

و سه بعد اصلی M, L, T (زمان، طول و جرم)

$$\Pi = (ML^{-3})^{x1} (ML^{-3})^{x2} (LT^{-1})^{x3} (LT^{-2})^{x4} (L)^{x5} (L^2T^{-1})^{x6} \quad (8)$$

که بر اساس تئوری باکینگهام و مرتب‌سازی دو عدد بدون بعد زیر بدست می‌آید:

$$\Pi_1 = \frac{\nu}{Uh} = \frac{1}{Re} \quad (9)$$

$$\Pi_2 = \frac{\Delta\rho hg}{\rho U^2} = \frac{1}{FrD^2} = Ri \quad (10)$$

روابط فوق نشان می‌دهند که مهمترین اعداد بدون بعد درگیر در مسئله اعداد ریچاردسون (Ri) و رینولدز (Re) هستند. با توجه به اصول تشابهی و بر اساس برقراری یکسان عدد ریچاردسون و در نظر گرفتن محدودیت‌های عدد رینولدز در مدل و نمونه اصلی، مقیاس پیشنهادی برای مدل فیزیکی $\frac{1}{40}$ انتخاب گردید. در مدل فیزیکی به منظور برقراری شرایط آزمایشگاهی همگون با طبیعت، نسبت $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ (نسبت اختلاف جرم حجمی لایه‌ها به جرم حجمی محیط) در مدل و نمونه اصلی یکسان و بر اساس داده‌های حاصل از اندازه‌گیری و منطبق بر لایه‌بندی موجود در مخزن سد گتوند در مدل اعمال شده است. این نسبت در طول آزمایش در محیط آزمایشگاهی مابین لایه‌بندی ایجاد شده، اندازه‌گیری و مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و در

دو عدد رینولدز و عدد فرود و یا عدد فرود چگال (و به بیانی دیگر عدد ریچاردسون) در مدل و نمونه اصلی یکسان فرض شوند (با فرض یکسانی سیال مور استفاده در مدل و نمونه اصلی). در مدل‌سازی با عدد فرود مقدار عدد رینولدز نسبت به نمونه اصلی کاهش پیدا می‌کند. میزان عدد رینولدز در مدل بر اساس مقیاس انتخابی باید طوری باشد که همان رفتار ایجاد شده در طبیعت در مدل نیز حاکم باشد. بدین شکل که اگر در طبیعت جریان آشفته، انتقالی و لایه‌ای است در مدل نیز همان شرایط حاکم باشد. در طیف گسترده‌ای از پدیده‌های مورد بررسی جریان در نمونه اصلی به صورت آشفته بوده و به منظور برقراری این شرایط در مدل، مراجع متعدد مقدار عدد رینولدز در مدل را بیشتر از ۴۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ و حتی کمتر نیز پیشنهاد کرده‌اند [۱].

۲-۲ محدودیت‌های مدل‌سازی

در انتخاب صحیح مقیاس مدل فیزیکی علاوه بر قوانین فیزیکی و تشابهات موجود، محدودیت‌های دیگری نیز مدنظر محققین و مهندسين این رشته هست. از جمله مهمترین آن‌ها عبارتند از فضای آزمایشگاهی، تامین دبی مورد نیاز و گردش سیال در گردش بسته جریان، ایمنی سازه‌های ساخته شده، ابزار اندازه‌گیری و محدوده دقت آن‌ها و از همه مهم‌تر ایجاد شرایط پایدار برای آزمایش‌های مدل فیزیکی است. انتخاب مقیاس بدون توجه به موارد فوق مدیریت آزمایش‌های مدل را سخت و غیرممکن خواهد ساخت. انتخاب صحیح جنس مصالح و توان شکل‌پذیری آن‌ها نیز امری بسیار مهم است.

نواک^۱ (۲۰۱۰) جهت نیل به یک شبیه‌سازی مطمئن و به منظور کاهش اثرات مقیاس توصیه‌های جامعی ارائه نموده است که در زیر دو مورد مرتبط با مسئله حال حاضر آورده می‌شود [۲۴]:

به منظور جلوگیری از اثرات کشش سطحی و تأثیر جریان‌های لایه‌ای حداقل عمق آب در مدل بایستی بزرگتر از ۱۵ میلی‌متر در نظر گرفته شود [۲۵]. این مقدار تا ۳۰ میلی‌متر نیز پیشنهاد شده است [۲۶]. به جهت رعایت شرط مذکور در بعضی مواقع ناگزیر مدل‌های کج گزینه انتخابی خواهد بود.

برای بسط نتایج حاصل از مدل در بچه‌ها به طبیعت می‌بایست حداقل بعد در بچه ۶۰ میلی‌متر در نظر گرفته شود.

جدول ۱. مقادیر تشابهی در مدل

Table 1. Similarity parameters for the physical model

پارامترهای هیدرولیکی	نسبت تشابه assuming $\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_r = 1$ and $h_r = L_r$ فرض یکسانی نسبت اختلاف چگالی به چگالی محیط و مستقیم بودن مدل
طول	$L_r = L_r$
ارتفاع	$h_r = L_r$
شیب	$S_r = 1$
سرعت	$U_r = (L_r)^{1/2}$
دبی	$Q_r = (L_r)^{5/2}$
زمان	$T_r = (L_r)^{1/2}$
غلظت نمک	$(C_{salt})_r = 1$
دانسیته نمک	$(\rho_{salt})_r = 1$

$$(\rho_{salt})_r = 1 \quad (15)$$

غلظت نمک در مدل و نمونه اصلی یکسان خواهد بود. بنابراین

$$(C_{salt})_r = 1 \quad (16)$$

با توجه به روابط فوق نسبت‌های تشابه در مدل در جدول (۱) ارائه شده است. انتخاب ابعاد مدل و اینکه تا چه محدوده‌ای الگوی جریان در مخزن متأثر از سازه‌های تخلیه کننده است یکی از موارد مهمی است که باید در فرآیند مدلسازی فیزیکی مورد توجه قرار گیرد. همچنین اثر دیواره‌ها و کف مدل در موضوع زبری نیز از دیگر پارامترهای قابل بررسی خواهد بود. در مدل مورد تحقیق (میدان نزدیک) به دلیل شرایط مخزن و عمق ارتفاع آب پیشنهادی بیش از یک متر (معادل ۴۰ متر در طبیعت) در مدل، اثرات زبری کف بسیار ناچیز خواهد بود. همچنین با توجه مقادیر دبی عبوری از لوله GRP^۱ و ابعاد محدود مجرای موجود برآوردهای تحلیلی نشان می‌دهد سرعت در مجاورت مجرای ورودی تونل میانی بسیار ناچیز خواهد بود. به منظور حصول اطمینان از برآورد تحلیلی مدلسازی ریاضی نیز در دستور کار قرار گرفت. برای شبیه‌سازی عددی سناریوی فوق از نرم‌افزار Ansys fluent 17.2، بعد از بررسی‌های فنی و نیز مدل‌سازی با مدل‌های Mixture و VOF استفاده گردید که نتایج دقیق‌تری را برای این نوع جریان پیش‌بینی می‌کند. برای مدل‌سازی

صورت تغییر این نسبت در محاسبات تصحیحات لازم اعمال می‌گردد. با توجه به مقیاس روابط به شرح زیر بسط داده می‌شود (اندیکس m, p به ترتیب بیانگر مقدار پارامتر مورد نظر در پروتوتیپ، مدل و اندیکس r معرف نسبت تشابهی پارامتر مورد نظر به مقیاس هست):

$$Ri_r = \frac{Rip}{Rim} = \frac{\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_r h_r}{U_r^2} = 1 \quad (10)$$

$$U_r = \left[\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_r h_r \right]^{1/2} \quad (11)$$

$$\text{assuming } \left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_r = 1 \text{ and } h_r = L_r$$

$$U_r = [L_r]^{1/2} \quad (12)$$

جهت تعیین میزان غلظت نمک در مدل، از رابطه بین دبی حجمی نمک (Q_{salt})، غلظت رسوبات (C_{salt}) دبی جریان (Q) و دانسیته نمک (ρ_{salt}) به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$Q_{salt} = (C_{salt} \cdot Q) / \rho_{salt} \quad (13)$$

$$(Q_{salt})_r = [(C_{salt})_r \cdot (Q)_r] / (\rho_{salt})_r \quad (14)$$

با توجه به برابری نسبت تشابهی دبی و در صورت استفاده از نمک

هم‌جنس در مدل و نمونه اصلی

بالای 50 mS/cm موضوع خوردگی از اهمیت بالایی برخوردار بوده و بهمین جهت جنس لوله‌ها و اتصالات پلی اتیلن و شیرها نیز برنجی و پلی اتیلن انتخاب گردید. شکل ۱: نقشه شماتیک سیستم تهیه آب شور و ملحقات مربوطه را نشان می‌دهد.

شکل ۲: مجموعه سیستم مخزن اصلی مدل و ملحقات مربوطه را نشان می‌دهد.

با توجه به انتخاب مقیاس $\frac{1}{40}$ برای این پژوهش و مستقیم بودن مدل، فرآیند ساخت مجرای مربوطه با تهیه نقشه‌های به مقیاس شده آغاز و سپس با ساخت مجزای قطعات سازه مجرای تحتانی و سپس اتصال آن‌ها به یکدیگر و نصب آن در مخزن در موقعیت تعیین شده دنبال گردید. همچنین حفره ایجاد شده در یکی از استاپلاگ‌های (مجرای راست) سازه مجرای تحتانی با رعایت محدودیت ارائه شده در مدل‌های فیزیکی (حداقل بعد دریاچه و یا مجرای عبور جریان به میزان ۶۰ میلیمتر) ایجاد شد. کل سازه مجرای تحتانی از پلکسی گلاس ساخته شده است (شکل ۳).

شکل ۴: مجموعه سازه مجرای تحتانی به همراه سازه تنگ شونده جهت الحاق به تونل تحتانی مربوطه را در موقعیت نصب شده در مخزن اصلی مدل نشان می‌دهد. همچنین در انتهای مدل شیر تنظیم دبی تخلیه نصب شده است که نقش تنظیم دبی خروجی را بر عهده دارد.

پس از نصب قطعات در مخزن شیشه‌ای مدل نسبت به آب بندی نهایی اقدام شد. ابزار اندازه‌گیری دبی و شاسی جهت نصب سنسورهای اندازه‌گیری EC از دیگر اقدامات آتی است که در بخش بعدی با جزئیات به آن پرداخته خواهد شد.

۳-۲- تجهیزات اندازه‌گیری و واسنجی

انتخاب تجهیزات مناسب اندازه‌گیری برای پارامترهای موثر در مدل امری مهم و تاثیرگذار خواهد بود. آگاهی از محدودیت‌ها و دقت مورد نیاز و همچنین عوامل اقتصادی از مهمترین نکاتی است باید به آن توجه ویژه‌ای گردد. سه پارامتر مهم تراز و یا عمق جریان، دبی جریان و میزان شوری که در قالب اندازه‌گیری EC انجام می‌شود در این مدل فیزیکی می‌بایست به نحو مطلوب و با دقت مناسب اندازه‌گیری گردد. در خصوص تراز و عمق جریان مدرج نمودن مدل به تنهایی کافی است و نیاز به ابزار دیگری نیست. ولی برای دو پارامتر

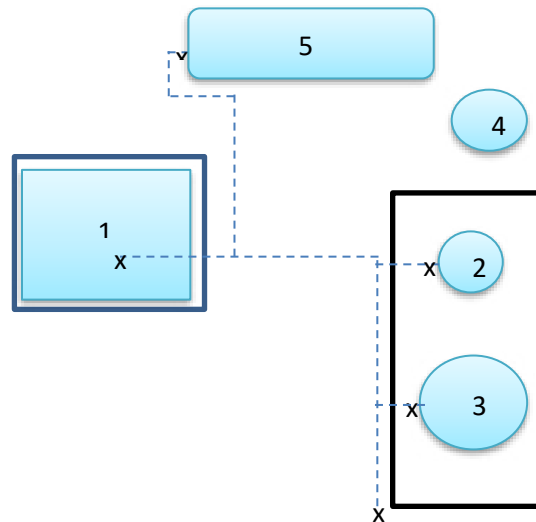
آشفستگی نیز از مدل توربولانس $k-\epsilon$ RNG انتخاب و استفاده شده است. نتایج مدل عددی نشان داد که سرعت جریان با توجه به دبی تخلیه بیشینه (۱ مترمکعب بر ثانیه) در فاصله ۱۰ متری روبروی حفره به کمتر از ۱ سانتی متر بر ثانیه می‌رسد. به همین منظور با توجه به فضای در نظر گرفته شده در مدل فیزیکی، بعد روبروی مجرای تونل میانی حدود $\frac{1}{3}$ متر عدد مناسبی است و این مقدار در طبیعت با توجه به مقیاس مدل ($\frac{1}{40}$)، به بیش از ۵۰ متر می‌رسد. با توجه به موارد فوق مخزنی به ارتفاع ۱ متر و عرض و طول ۲ متر برای محدوده مدل مناسب تشخیص داده شد.

۳- معرفی مدل و اجزاء آن

۳-۱- سیستم هیدرولیکی و سازه مجرای تحتانی

با توجه به محدوده مورد نیاز در مدل و در نظر گرفتن ابعاد، نخست نسبت به برپاسازی مخزنی به ارتفاع ۱ متر و عرض و طول ۲ متر اقدامات لازم انجام شد. مخزن مورد اشاره با سه وجه شیشه و یک وجه پلکسی گلاس و با کف فلزی بر روی یک شاسی مستحکم فلزی برپا گردید. ارتفاع شاسی به نحو مناسبی بالاتر از سطح زمین قرار داده شد که ضمن امکان ورود جریان از کف به مخزن برای تصویربرداری نیز مناسب باشد. محل قرارگیری سازه مجرای تحتانی و ملحقات مربوطه در وجه پلکس گلاس مخزن تعبیه شده و چون سازه مجرای تحتانی نیز از پلکسی گلاس ساخته می‌گردد، این مهم به آب‌بندی بهتر مجموعه کمک خواهد کرد. به منظور تامین آب شور با EC‌های متفاوت سیستم گردش آب با اجزاء زیر تهیه گردید:

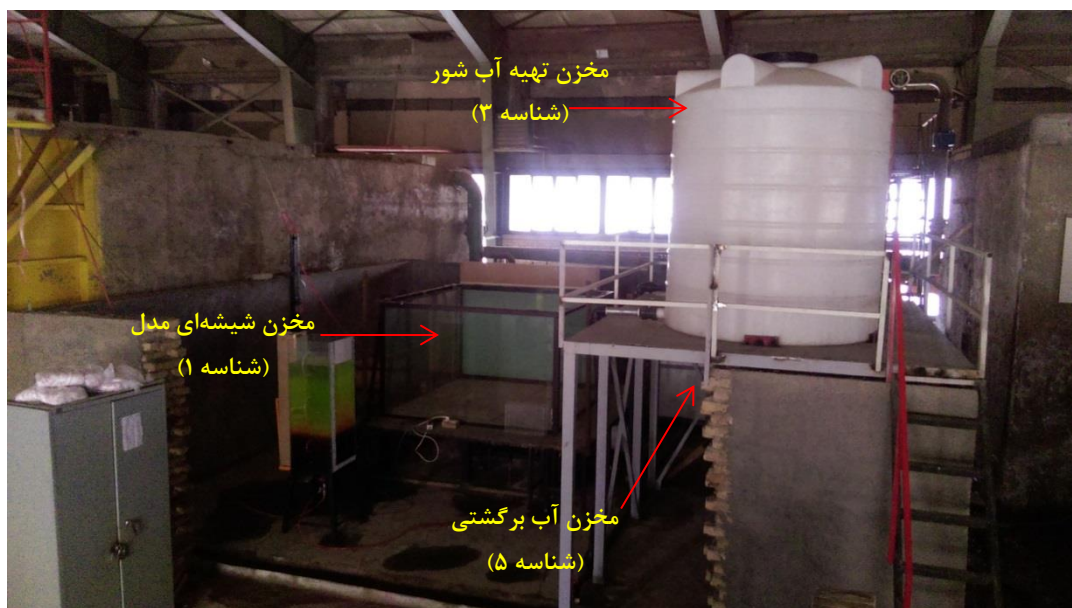
- مخازن موازی برای تامین و ذخیره آب،
- سیستم همزن برای تهیه آب شور و اختلاط یکسان
- مخزن ذخیره حفظ آب شور تخلیه شده از مخزن شیشه‌ای اصلی
- شیرها و لوله‌های انتقال آب
- پمپ کف کش به منظور جابجایی میان مخازن در صورت لزوم
- انتخاب اندازه و جنس مناسب لوله‌ها، مخازن، شیرها و اتصالات مربوطه به نحوی صورت گرفت که حداقل میزان افت را در مجموعه داشته و انتقال آب به مخزن شیشه‌ای به صورت ثقلی و با تامین هد مطلوب صورت پذیرد. همچنین با توجه به تهیه آب شور با EC‌های



شناسه	مشخصات	موقعیت نصب
۱	مخزن شیشه‌ای به ابعاد ۱*۲*۲ متر جهت تست مدل فیزیکی میدان نزدیک	ارتفاع از کف زمین ۶۹ سانتیمتر
۲	مخزن تهیه آب شور (استوانه‌ای) به ظرفیت ۱ مترمکعب	ارتفاع از کف زمین ۲۱۵ سانتیمتر
۳	مخزن تهیه آب شور (استوانه‌ای) به ظرفیت ۳ مترمکعب	ارتفاع از کف زمین ۲۱۵ سانتیمتر
۴	مخزن ذخیره آب (استوانه‌ای با انتهای مخروطی) به ظرفیت ۲/۵ مترمکعب	ارتفاع از کف زمین ۱۷۵ سانتیمتر
۵	مخزن ذخیره آب برگشتی از مدل به ظرفیت ۲ متر مکعب	ارتفاع از کف زمین ۱۵ سانتیمتر
X	شیر فلکه‌های برنجی و پلی اتیلن ۲۵۵ اینچی	
---	لوله‌های انتقال پلی اتیلن ۲.۵ اینچی	

شکل ۱. نقشه شماتیک سیستم تهیه آب شور و انتقال آب مدل میدان نزدیک

Fig. 1. Schematic map of saline water supply and water transfer system for near field model

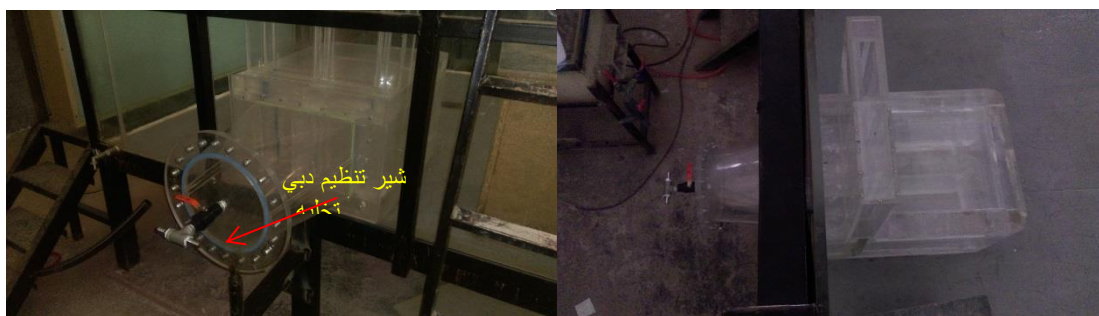


شکل ۲. برپایی مدل فیزیکی و نصب ملحقات مربوطه

Fig. 2. Setting up the physical model and installing the relevant components



شکل ۳. سازه مجزای تحتانی سد گتوند (مقیاس ۱/۴۰) و جزئیات استاپلاگ مربوطه
 Fig. 3. Structure of deep conduit of Gotvand dam (scale 1:40) and relevant stoplog details



شکل ۴. مجرای تحتانی به همراه سازه تنگ شونده در موقعیت نصب شده در مخزن مدل
 Fig. 4. Deep conduit with contraction structure installed for model tank

اندازه‌گیری‌ها در مدل قرار داده شد.

به منظور اندازه‌گیری میزان شوری در مدل که مهمترین پارامتر اندازه‌گیری نیز بوده، تحقیقات مبسوطی بر روی مدل‌های متفاوتی از انواع سنسورها صورت گرفت. چند عامل برای انتخاب سنسور مناسب مد نظر بود که عبارتند از: دامنه برداشت داده برای شوری‌های کم و بالا تا حدود 200 mS/cm ، اندازه مناسب سنسور با توجه به سایز مدل فیزیکی و ابعاد موقعیت‌های برداشت داده مانند مقابل مجرای تحتانی و در راستای حفره ایجاد شده، قیمت و حمایت پس از خرید و قابلیت پرتابل بودن دستگاه. با توجه به محدودیت‌های فنی و اقتصادی و همچنین موقعیت برداشت داده‌ها در حداقل در سه نقطه به صورت همزمان تصمیم بر آن شد که از دو نوع

دبی و شوری ابزار خاص در این مدل می‌بایست تهیه گردد.

با توجه به مقیاس مدل، دبی خروجی کنترل شده از مجرای تحتانی در محدوده $0/6$ تا 6 لیتر بر دقیقه بر مبنای ظرفیت فعلی و آینده طرح متغیر است. این دامنه تغییر امکان اندازه‌گیری دبی را در یک روتامتر میسر نمی‌سازد، بهمین منظور از دو روتامتر به صورت موازی با دامنه اندازه‌گیری $0/5$ تا 4 لیتر بر دقیقه و دیگری با دامنه اندازه‌گیری 1 تا 7 لیتر بر دقیقه در این تحقیق استفاده شده است. روتامتر با دامنه اندازه‌گیری $0/5$ تا 4 لیتر بر دقیقه شیردار انتخاب گردید تا قدرت تنظیم مضاعفی را هنگام آزمایش‌های مدل فیزیکی فراهم سازد. هر دو دستگاه توسط آزمایشگاه ابزار دقیق موسسه تحقیقات آب مورد واسنجی قرار گرفت و نمودار واسنجی مبنای

آن

- اندازه‌گیری شوری در خروجی GRP

پس از بررسی‌های فنی بر روی داده‌های موجود صحرایی و اندازه‌گیری‌های انجام شده در پروتوتیپ، سناریوهای آزمایشگاهی مطابق جدول زیر طراحی گردید.

مرحله اول - اجازه تغییر در تراز مخزن

با توجه به افت تراز مخزن ناشی از دبی خروجی از GRP، مدت زمانی سری آزمایش‌های مرحله اول تا زمان افت تراز مرز لایه بالایی تا تراز حفره ایجاد شده ادامه می‌یابد. زمان رسیدن به این افت تراز با توجه به دبی خروجی از GRP قابل برآورد با دقت بالایی است که در جدول در ستون مدت آزمایش محاسبه و ذکر شده است.

مرحله دوم - ثابت نگهداشتن تراز در مخزن

این مرحله از آزمایش‌ها با استفاده از نتایج مرحله اول طراحی شده است که در بخش ارائه نتایج به آن اشاره خواهد شد. ثابت نگهداشتن تراز در مخزن با تنظیم جریان ورودی از کف در مدل اعمال گردید. این روش کمترین تاثیر را بر شکل لایه‌بندی ایجاد شده در مخزن در طول آزمایش‌ها خواهد داشت.

پس از انجام سری آزمایش‌های فوق با توجه به نتایج بدست آمده در یک شرایط مشخص نیز به منظور حصول اطمینان از الگوی خطوط جریان شکل‌یافته در مخزن به سمت حفره ایجاد شده مواد رنگی تزریق می‌گردد. با توجه به تزریق مواد رنگی از جبهه‌های مختلف الگوی خطوط جریان از مدل تعیین و بر روی آن بحث صورت خواهد گرفت. در ادامه موقعیت نصب سنسورهای اندازه‌گیری شوری ارائه شده است.

انجام سناریوهای آزمایشگاهی در مدل فیزیکی مطابق با اطلاعات و مشخصات ارائه شده در جداول ۲ و ۳: در دو بخش مجزای تراز متغیر و ثابت در مخزن در طول آزمایش طرح‌ریزی و انجام گرفت. پارامترهای شوری، دبی خروجی و تراز لایه‌ها در دو سری سناریوهای آزمایشگاهی اشاره شده برداشت و نتایج آن در ادامه به تفکیک ارائه می‌گردد. دمای متوسط آب مخزن نیز اندازه‌گیری شده و در نتایج ذکر شده است. (M) نشانه نتایج در مقیاس مدل و (P) نشانه نتایج در مقیاس پروتوتیپ هست.

یکی از اهداف طراحی این بخش از آزمایش‌ها دستیابی به الگوی تخلیه لایه چگال مخزن از لوله GRP است. داده‌های اندازه‌گیری

سنسور Inductive (Hach-08398) و (Hach-99582 00) Electrode به شکل توامان استفاده گردد. در طول آزمایش به دلیل دقت و ثبات اندازه‌گیری در سنسور Inductive داده‌های حاصل از برداشت شوری با سنسورهای الکترودی در موقعیت یکسان با هم مقایسه می‌شوند و سعی می‌گردد از سنسور Inductive در لایه‌های با شوری بالا استفاده شود. سنسورهای خریداری شده الکترودی با محلول‌های استاندارد با غلظت بالا توسط شرکت ارائه کننده خدمات مورد واسنجی قرار گرفت. واسنجی سنسور Inductive توسط کارخانه انجام شده بود و دارای گواهی است.

۴- طراحی، اجرا و نتایج آزمایش‌های مدل فیزیکی

برای طراحی سناریوهای آزمایشگاهی ایده‌های مختلفی مطرح شد و پس از بحث و بررسی‌های فنی با توجه به شرایط و امکانات آزمایشگاهی، ابعاد مدل و تجهیزات موجود سعی گردید، بهترین روش انتخاب و در مدل اجرا شود. بعد از حفره ایجاد شده در استاپلاگ سمت راست مجرای تحتانی (شکل ۴): به سمت پایین دست جریان وارد یک مجرای تنگ‌شونده شده و سپس به تونل هدایت می‌گردد و پس از آن توسط لوله احداث شده GRP امکان تخلیه از آن فراهم می‌شود. مدل فیزیکی تا انتهای مجرای تنگ‌شونده ساخته شده و مجرای لوله GRP مدل نشده است و مستقیماً دبی جریان به روتامترها هدایت گردیده است. اداره بهینه خروجی از GRP به نحوی که بیشترین میزان شوری تخلیه گردد از اهداف مهم این پژوهش هست. به همین منظور سناریوها با رعایت موارد زیر دنبال می‌شود:

- اجازه تغییر تراز در مخزن و اداره خروجی از GRP مطابق سناریوهای درخواستی

- ثابت نگهداشتن تراز در مخزن و اداره خروجی از GRP مطابق سناریوهای درخواستی

- برقراری شرایط یکسان شوری در مدل و پروتوتیپ به منظور کاهش اثرات مقیاس (مقادیر شوری در مدل منطبق بر داده‌های اندازه‌گیری شده در طبیعت طراحی شده است)

- نصب سنسور اندازه‌گیری شوری (EC) در موقعیت جلوی تونل تحتانی در روبروی حفره ایجاد شده

- نصب سنسور اندازه‌گیری شوری (EC) در موقعیت مابین لایه‌ها

- کنترل دبی خروجی از GRP توسط شیر تخلیه و اندازه‌گیری

جدول ۲. مشخصات سری آزمایشات مرحله اول

Table 2. Specifications of the first stage test series

مشخصات	EC (ms/cm)	ارتفاع لایه در مدل (cm)	تراز متناظر در پروتوتیپ (m)	دبی خروجی GRP متناظر در پروتوتیپ (liter/sec)	مدت زمان آزمایش در مدل و پروتوتیپ (hr)
لایه فوقانی	۵۷	۶۳	۹۶/۳ تا ۱۲۱/۵	برای ۵ سری آزمایش : ۸۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۶۰۰ و ۱۰۰	برای ۵ سری آزمایش متناظر با ، دبی به ترتیب: ۸، ۷، ۵، ۲/۵ و ۲ (مدل) ۱۵/۸۱ و ۳۱/۶۲، ۴۴/۲۷، ۵۰/۶ (پروتوتیپ) ۱۲/۶۵
لایه تحتانی	۱۳۰	۴۷	۹۶/۳ تا ۷۷/۵		

جدول ۳. مشخصات سری آزمایشات مرحله دوم

Table 3. Specifications of the second stage test series

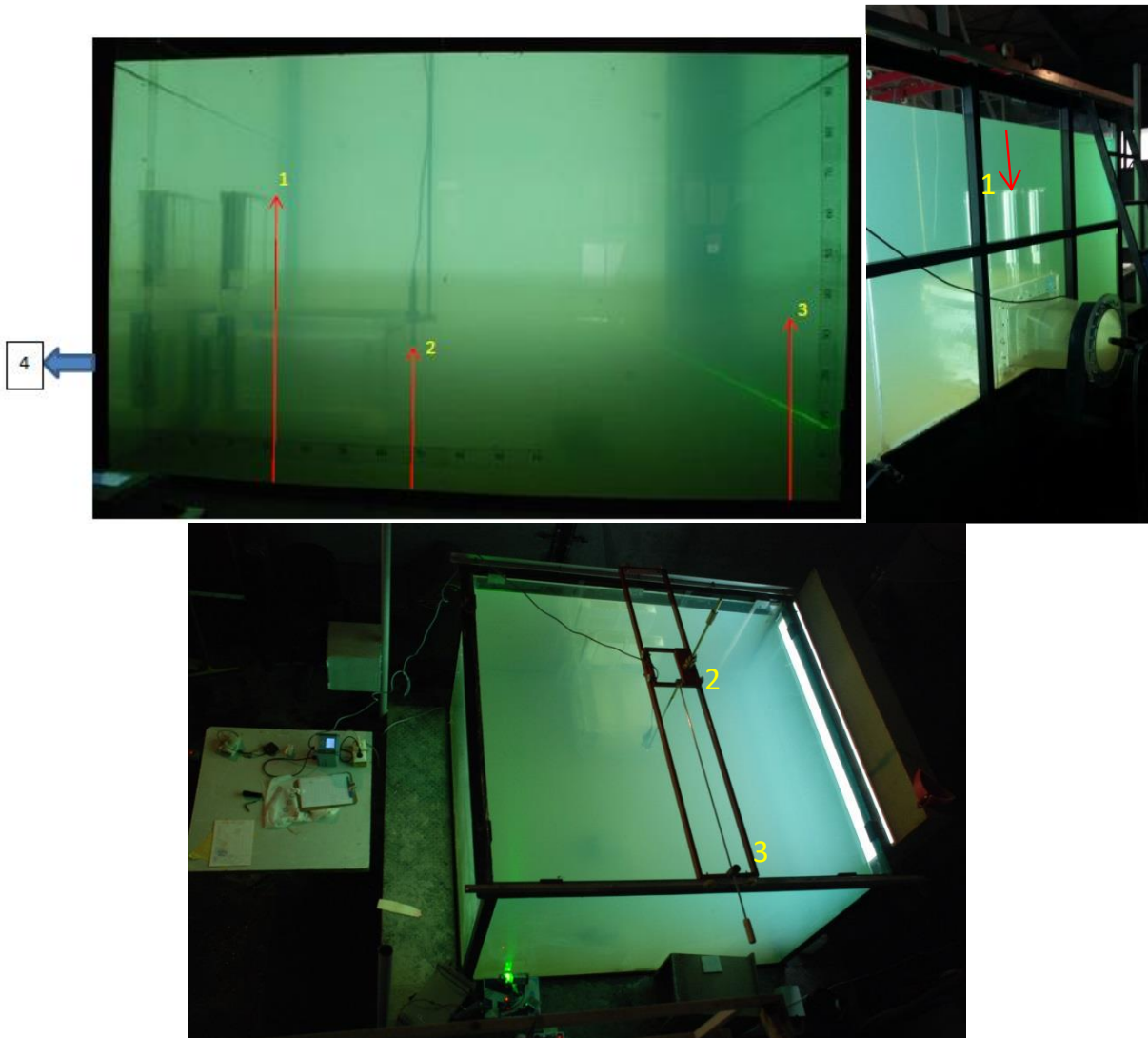
مشخصات	EC (ms/cm)	ارتفاع لایه در مدل (cm)	تراز متناظر در پروتوتیپ (m)	دبی خروجی GRP متناظر در پروتوتیپ (liter/sec)	مدت زمان آزمایش در مدل و پروتوتیپ (hr)
لایه فوقانی	۵۷	۶۳	۹۶/۳ تا ۱۲۱/۵	برای ۲ سری آزمایش : ۲۰۰ و ۵۰۰	برای دو سری آزمایش متناظر با دبی به ترتیب: ۱۲ (مدل)، ۷۵/۸۹ (پروتوتیپ)
لایه تحتانی	۱۳۰	۴۷	۹۶/۳ تا ۷۷/۵		

آزمایش نیز به اندازه کافی در نظر گرفته شود، آیا تغییری در روند میزان شوری در چهار موقعیت برداشت نسبت به سری اول آزمایش‌ها اتفاق می‌افتد؟ و الگوی خطوط جریان تشکیل‌یافته به سمن حفره به چه شکلی است؟ تزریق جریان آب شور از کف مدل به دلیل نقش کلیدی لایه مقابل حفره، در تخلیه از GRP انجام می‌گردد. میزان شوری جریان تزریق شده از کف برابر با میزان شوری لایه تحتانی در مخزن تنظیم می‌گردد. نهایت دقت در طول آزمایش به منظور حفظ این پیوستگی اعمال شده است. در ادامه نتایج آزمایش‌ها سری دوم (ثابت نگهداشتن تراز در مخزن) ارائه می‌گردد. دمای متوسط مخزن نیز در نتایج گزارش شده است.

همانطور که از نتایج پیداست تغییر مشهودی در روند میزان شوری در چهار موقعیت برداشت اتفاق نمی‌افتد و این تحلیل که شوری لایه مقابل حفره بیشترین نقش در شوری جریان خروجی از GRP را دارد در این بخش از آزمایش‌ها نیز در نتایج مدل قابل مشاهده و تأیید است. دوام آزمایش و برقراری پیوستگی در مدل با

شوری در چهار موقعیت برداشت شده به وضوح نشان می‌دهد، مشخصات جریان خروجی از GRP متأثر از مشخصات لایه مقابل حفره ایجاد شده در استاپلاگ بوده و لایه‌های بالایی نقش چندانی در میزان شوری تخلیه شده از خروجی ندارند. در انتهای آزمایش‌های سری اول تصاویر برداشت شده از مخزن نیز تحلیل بالا را به درستی تایید می‌نماید که این تخلیه و افت تراز مخزن تنها از لایه مقابل حفره صورت گرفته و به مرور از لایه‌های فوقانی جایگزینی انجام شده است (شکل ۱۱).

پس از بررسی نتایج سری اول آزمایش‌ها و بررسی فرآیندهای غالب در محیط چگال تشکیل شده به منظور تحقیق بیشتر در خصوص اثر دوام زمانی آزمایش در نحوه تغییرات شوری در مخزن و خروجی GRP دو آزمایش با مشخصات اشاره شده در جدول ۳: طراحی شده است. هدف اصلی در این آزمایش‌ها بررسی دقیق‌تر موضوع بدین شکل است که اگر تراز مخزن در طول آزمایش با تزریق مناسب از کف و برابر با دبی خروجی از GRP ثابت نگه داشته شده و طول زمانی



شماره موقعیت	فاصله از کف (cm)	موقعیت نصب	توضیحات
۱	۸۳	بالای کانال Stoplog (مجرای راست دارای حفره)	اندازه‌گیری با سنسور الکترودی پرتابل
۲	۳۰	جلوی تونل روبروی حفره	اندازه‌گیری با سنسور Inductive
۳	۳۳	مرز بین لایه‌ها	اندازه‌گیری با سنسور الکترودی پرتابل
۴	-	در خروجی روتامتر	اندازه‌گیری با سنسور الکترودی پرتابل

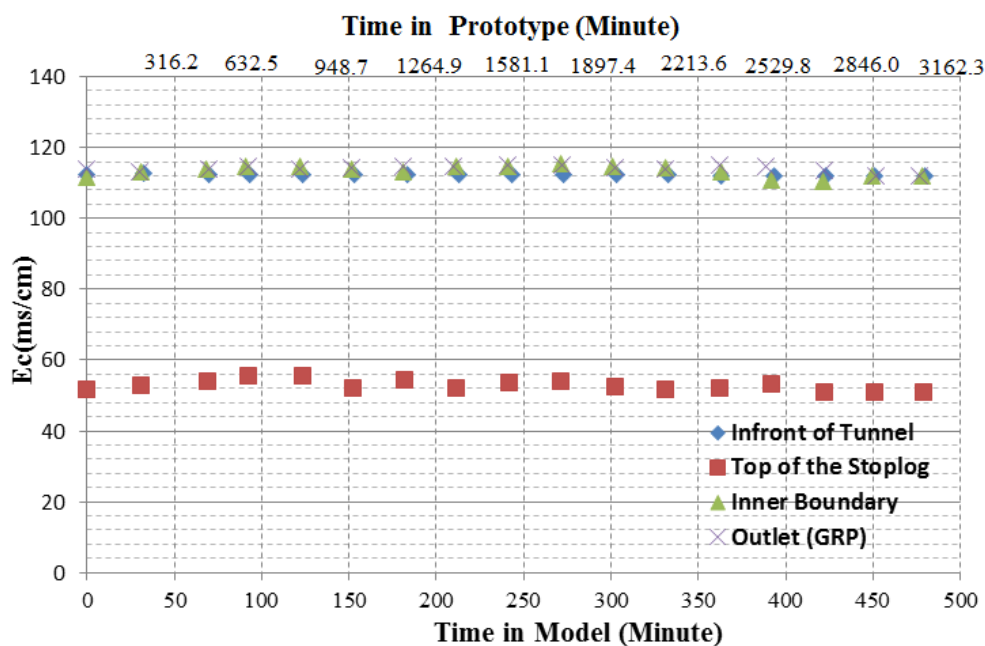
شکل ۵. موقعیت نصب سنسورهای شوری در مدل
 Fig. 5. Location of salinity sensors in the model

چگالی کمتر) در وضعیت موجود با توجه به میزان دبی خروجی از GRP بسیار کم است. برداشت داده‌های شوری از چهار موقعیت مشخص شده این موضوع را تایید می‌کند که جریان به شکل لایه‌ای تنها از لایه مقابل حفره تخلیه شده و لایه‌های دیگر (لایه‌های بالایی) مشارکت چندانی در میزان شوری لایه تخلیه شده ندارند. به منظور

حفظ تراز در مخزن در مدل اعمال گردیده است.

۵- تصویر برداری از مدل با تزریق مواد رنگی و ارائه نتایج آن
 نتایج سناریوهای مرحله اول و دوم آزمایشگاهی مدل فیزیکی نشان دادند که امکان گسترش خطوط جریان به لایه‌های بالاتر (با

Test (1-1) Dynamic Water Level

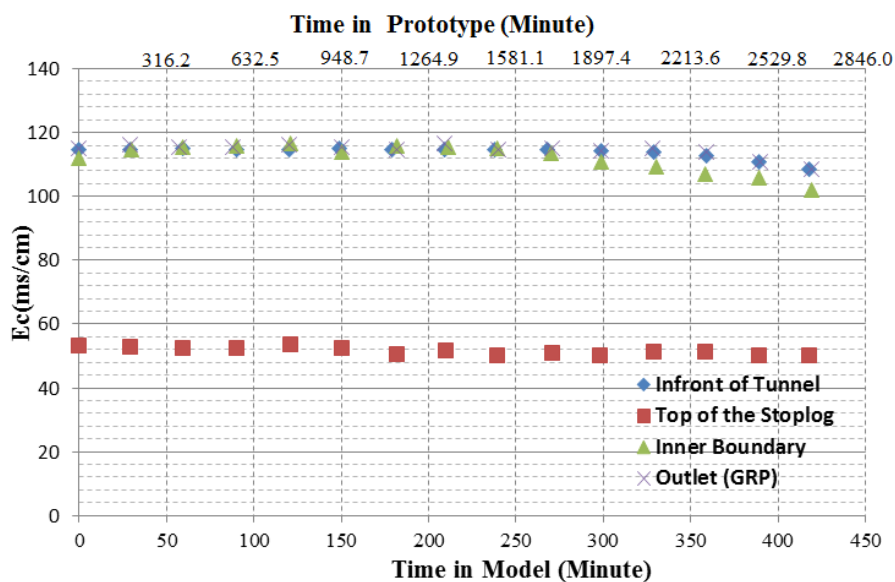


سری آزمایش	شماره آزمایش	دبی خروجی (P) l/s	افت تراز در مخزن (M) cm	مدت آزمایش (M) min	دمای مخزن (M) C
مرحله اول	۱	۱۰۰	۸	۴۸۰	۲۶/۲

شکل ۶. تغییرات شوری در چهار موقعیت برداشت نسبت به زمان، آزمایش ۱-۱

Fig. 6. Salinity changes in four measure points with respect to time, test 1-1

Test (1-2) Dynamic Water Level

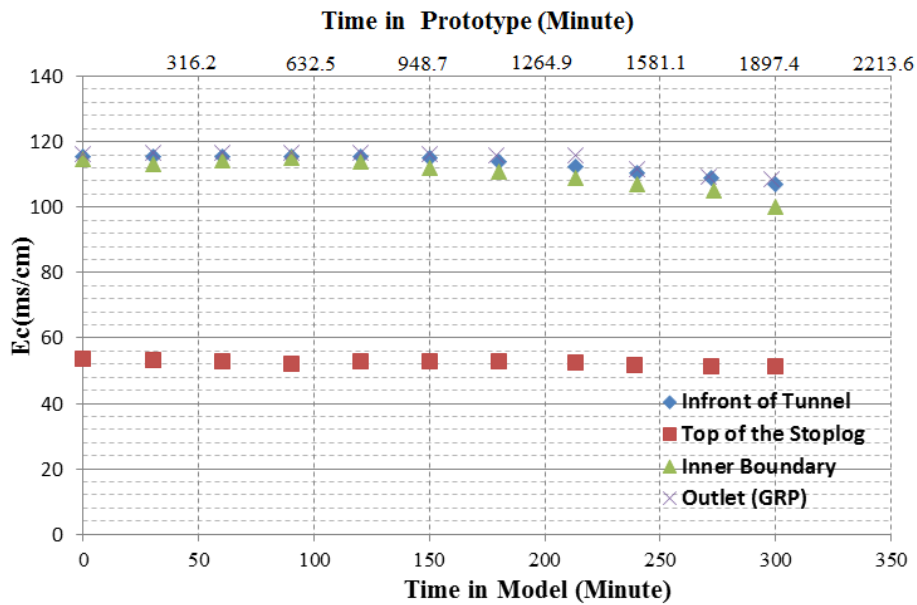


سری آزمایش	شماره آزمایش	دبی خروجی (P) l/s	افت تراز در مخزن (M) cm	مدت آزمایش (M) minute	دمای مخزن (M) C
مرحله اول	۲	۲۰۰	۱۲	۴۲۰	۲۵/۶

شکل ۷. تغییرات شوری در چهار موقعیت برداشت نسبت به زمان، آزمایش ۱-۲

Fig. 7. Salinity changes in four measure points with respect to time, test 1-2

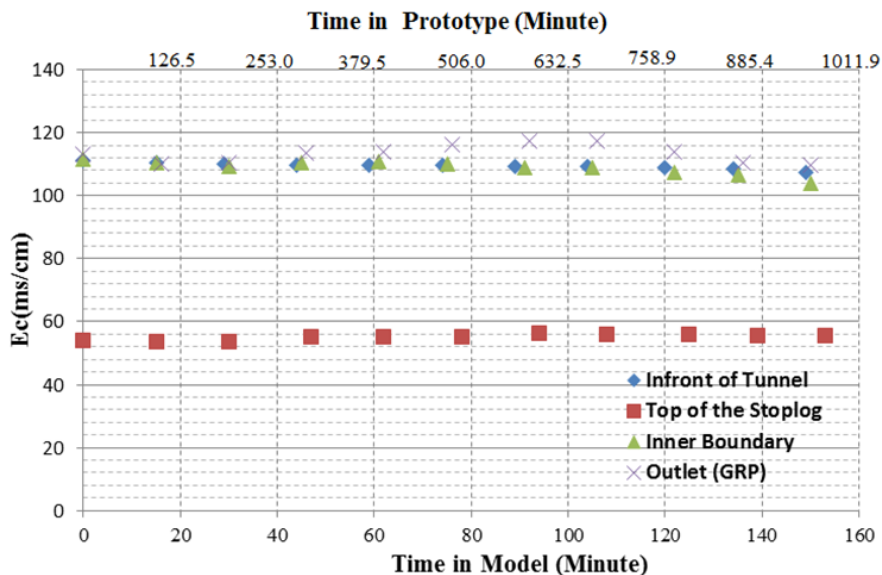
Test (1-3) Dynamic Water Level



سری آزمایش	شماره آزمایش	دبی خروجی (P) l/s	افت تراز در مخزن (M) cm	مدت آزمایش (M) minute	دمای مخزن (M) C
مرحله اول	۳	۳۰۰	۱۲	۳۰۰	۲۵/۷

شکل ۸. تغییرات شوری در چهار موقعیت برداشت نسبت به زمان، آزمایش ۱-۳
Fig. 8. Salinity changes in four measure points with respect to time, test 1-3

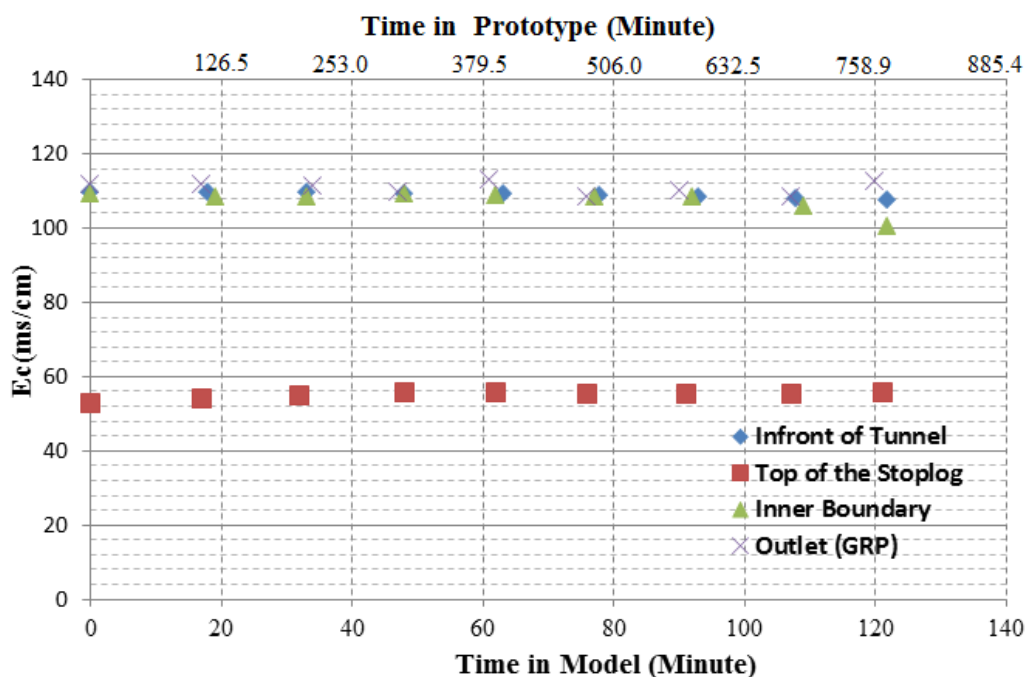
Test (1-4) Dynamic Water Level



سری آزمایش	شماره آزمایش	دبی خروجی (P) l/s	افت تراز در مخزن (M) cm	مدت آزمایش (M) minute	دمای مخزن (M) C
مرحله اول	۴	۶۰۰	۱۲/۵	۱۵۰	۲۵

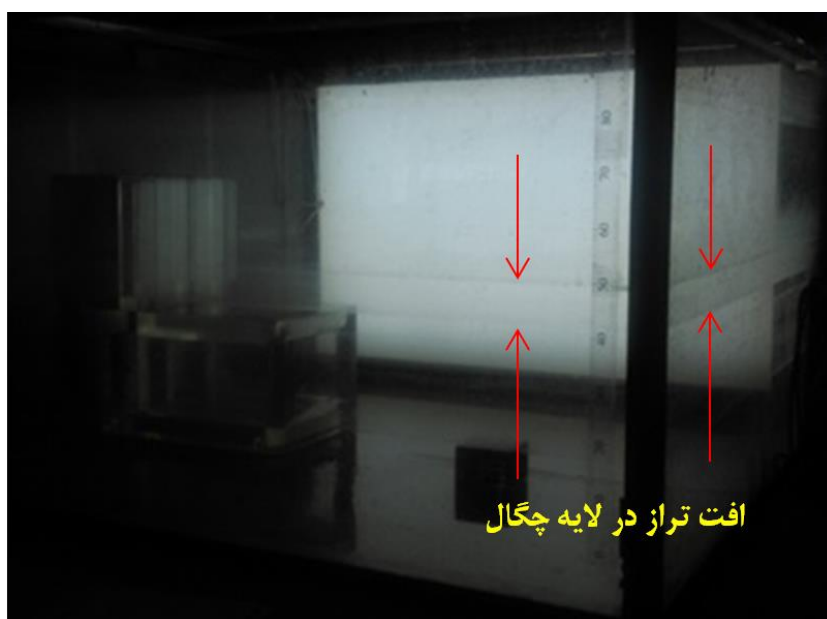
شکل ۹. تغییرات شوری در چهار موقعیت برداشت نسبت به زمان، آزمایش ۱-۴
Fig. 9. Salinity changes in four measure points with respect to time, test 1-4

Test (1-5) Dynamic Water Level

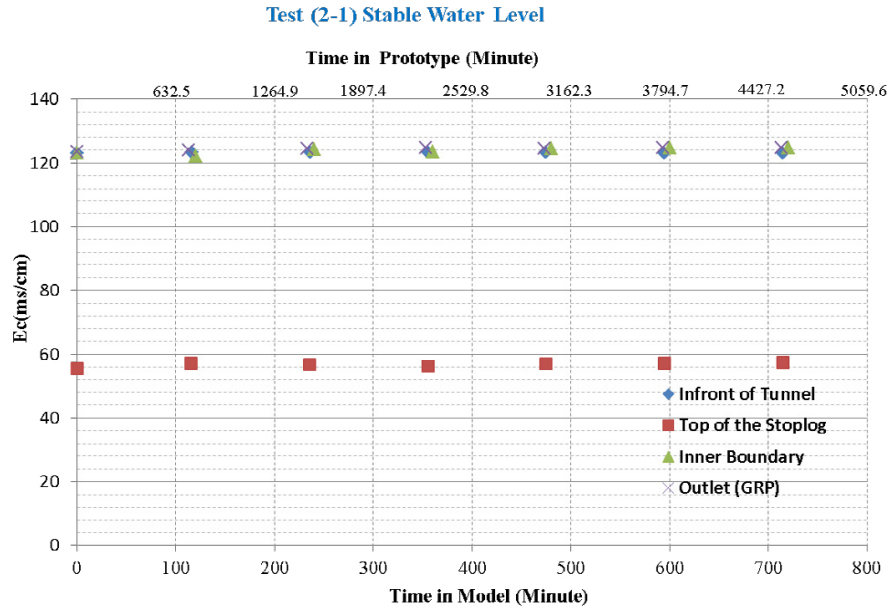


دمای مخزن (M) C	مدت آزمایش (M) minute	افت تراز در مخزن (M) cm	دبی خروجی (P) l/s	شماره آزمایش	سری آزمایش
۲۵/۴	۱۲۰	۱۲/۵	۸۰۰	۵	مرحله اول

شکل ۱۰. تغییرات شوری در چهار موقعیت برداشت نسبت به زمان، آزمایش ۱-۵
Fig. 10. Salinity changes in four measure points with respect to time, test 1-5

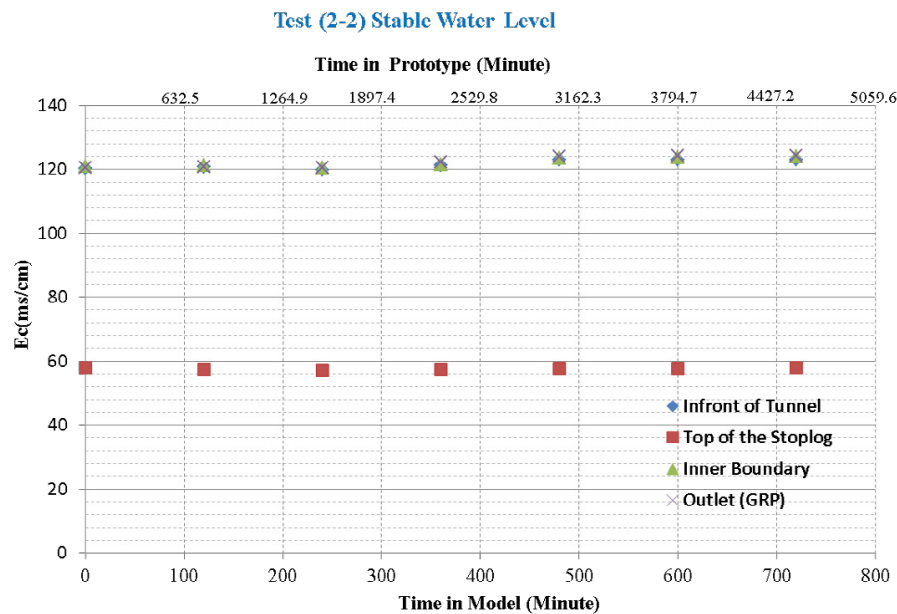


شکل ۱۱. شواهد تخلیه لایه‌ای منظم در پایان سری اول آزمایش‌ها
Fig. 11. Evidence of regular and stable layer discharge at the end of the first series of tests



سری آزمایش	شماره آزمایش	دبی خروجی (P) l/s	افت تراز در مخزن (M) cm	مدت آزمایش (M) minute	دمای مخزن (M) C
مرحله دوم	۱	۲۰۰	۰	۷۲۰	۲۷/۷

شکل ۱۲. تغییرات شوری در چهار موقعیت برداشت نسبت به زمان، آزمایش ۲-۱
Fig. 12. Salinity changes in four measure points with respect to time, test 2-1



سری آزمایش	شماره آزمایش	دبی خروجی (P) l/s	افت تراز در مخزن (M) cm	مدت آزمایش (M) minute	دمای مخزن (M) C
مرحله دوم	۲	۵۰۰	۰	۷۲۰	۲۷/۹

شکل ۱۳. تغییرات شوری در چهار موقعیت برداشت نسبت به زمان، آزمایش ۲-۲
Fig. 13. Salinity changes in four measure points with respect to time, test 2-2

تخلیه از مدل طراحی و اجرا گردید. در این آزمایش نیز مقادیر EC در موقعیت‌های ذکر شده در شکل ۵: به استثنا مرز مابین لایه‌ها برداشت گردید که نتایج آن در شکل ۱۷: آورده شده است. برآوردهای تحلیلی و نتایج حاصل از اجرا مدل ریاضی نشان‌دهنده مقدار عدد رینولدز به بیش از ۱۰۰۰۰ در آزمایش این بخش است.

همانطور که از نتایج شکل ۱۷: مشهود است با وجود رسانیدن دبی تخلیه به بیش از دو برابر مورد نیاز در حالت بیشینه، متعاقب آن افزایش سرعت جریان در نزدیکی ورودی به حفره (به بیش از دو برابر) و برآورد مقدار عدد رینولدز به بیش از ۱۰۰۰۰ در این آزمایش هنوز الگوی تخلیه‌ای لایه‌ای کماکان برقرار هست و تنها میزان شوری لایه مقابل روزنه ایجاد شده در استاپلاگ در شوری آب خروجی از لوله GRP موثر می‌باشد. در این شرایط آشفتگی لازم در مدل برقرار هست.

۶- نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات

به منظور بررسی فرآیند تخلیه و تعیین الگوی جریان در محدوده نزدیک ورودی مجرای تحتانی سد گتوند، مدل فیزیکی با مقیاس $\frac{1}{40}$ و با رعایت محدودیت‌ها ساخته شد. به بیانی دیگر استفاده از نتایج این تحقیق در راستای ترسیم نقشه راه اداره و بهره‌برداری از دبی خروجی از لوله GRP در سد گتوند هست. آزمایش‌های متعددی در دو مرحله بر روی آن صورت پذیرفت. این مقیاس بر اساس عدد ریچاردسون و بر پایه شرایط چگالی یکسان در مدل و طبیعت بسط داده شده است. برقراری شرایط چگالی یکسان لایه‌ها به دقت نتایج مدل افزوده و خطای مقیاس را کاهش می‌دهد. مطالعات، تحقیقات و آزمایش‌های اولیه مبسوطی بر روی چگونگی انجام سناریوهای آزمایشگاهی در مدل فیزیکی صورت گرفت. نحوه ساخت و انتقال لایه‌های آب شور به مخزن مدل با شیرهای تنظیم‌کننده در تمامی طول آزمایش تحت اداره قرار داشت. نهایت دقت در تشکیل لایه‌های چگال در مخزن مدل فیزیکی اعمال گردید. با توجه به نتایج اندازه‌گیری‌ها و برداشت‌های صورت پذیرفته از موقعیت‌های متفاوت در مخزن و خروجی از GRP در دو مرحله سناریوهای آزمایشگاهی با فرض اجازه تغییر در تراز مخزن و ثابت نگهداشتن تراز در مخزن، تحلیل‌های محوری زیر را می‌توان ارائه داشت:

با توجه به دبی‌های آزمایش شده، میزان شوری لایه مقابل حفره

ارائه مستقیم پدیده در قالب نتایج ملموس‌تر با تزریق مواد رنگی و تهیه تصاویر و فیلمبرداری سعی شده است تا فرآیندهای هیدرودینامیکی شکل گرفته در مخزن آشکار گردند تا بتوان دامنه دقت و صحت داده‌ها را گسترش داد. بدین منظور از دو موقعیت متفاوت و به طور مجزا، مواد رنگی به مدل تزریق گردید.

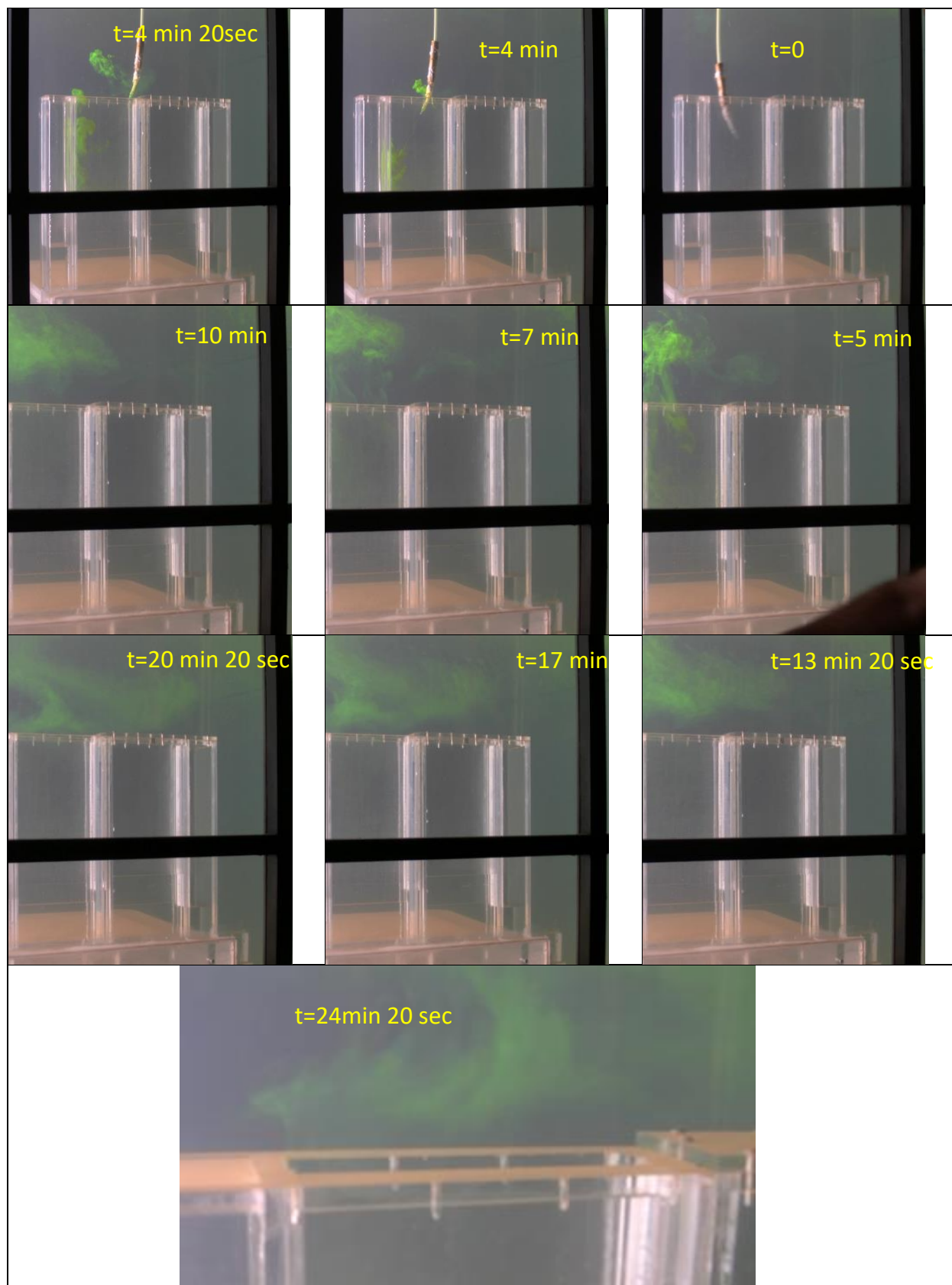
- موقعیت اول: بالای کانال استاپلاگ

- موقعیت دوم: روبروی تونل میانی (مقابل حفره و دورتر از آن) در هر دو حالت دبی خروجی از GRP، ۸۰۰ لیتر بر ثانیه اداره شده است. وضعیت شوری لایه‌ها و ارتفاع آن‌ها نیز مطابق آزمایش‌های سری دوم طرح‌ریزی شده است. انتخاب این دو موقعیت بدین منظور است که بتوان تشخیص داد خطوط جریان تشکیل شده به سمت خروجی GRP از کدام لایه شکل گرفته و آیا لایه‌های فوقانی نیز در میزان شوری جریان خروجی از GRP نقش موثری را دارند یا خیر. در موقعیت اول (بالای کانال استاپلاگ)، مدت زمان ردیابی ۲۴ دقیقه و ۲۰ ثانیه در موقعیت دوم (روبروی تونل میانی مقابل حفره و دورتر از آن) نیز مدت زمان ردیابی ۷۱ دقیقه بوده که در هر دو موقعیت تصاویر هر ۲۰ ثانیه یکبار از فیلم تهیه شده، استخراج گردید که با فاصله زمانی مناسب در ادامه ارائه خواهد شد.

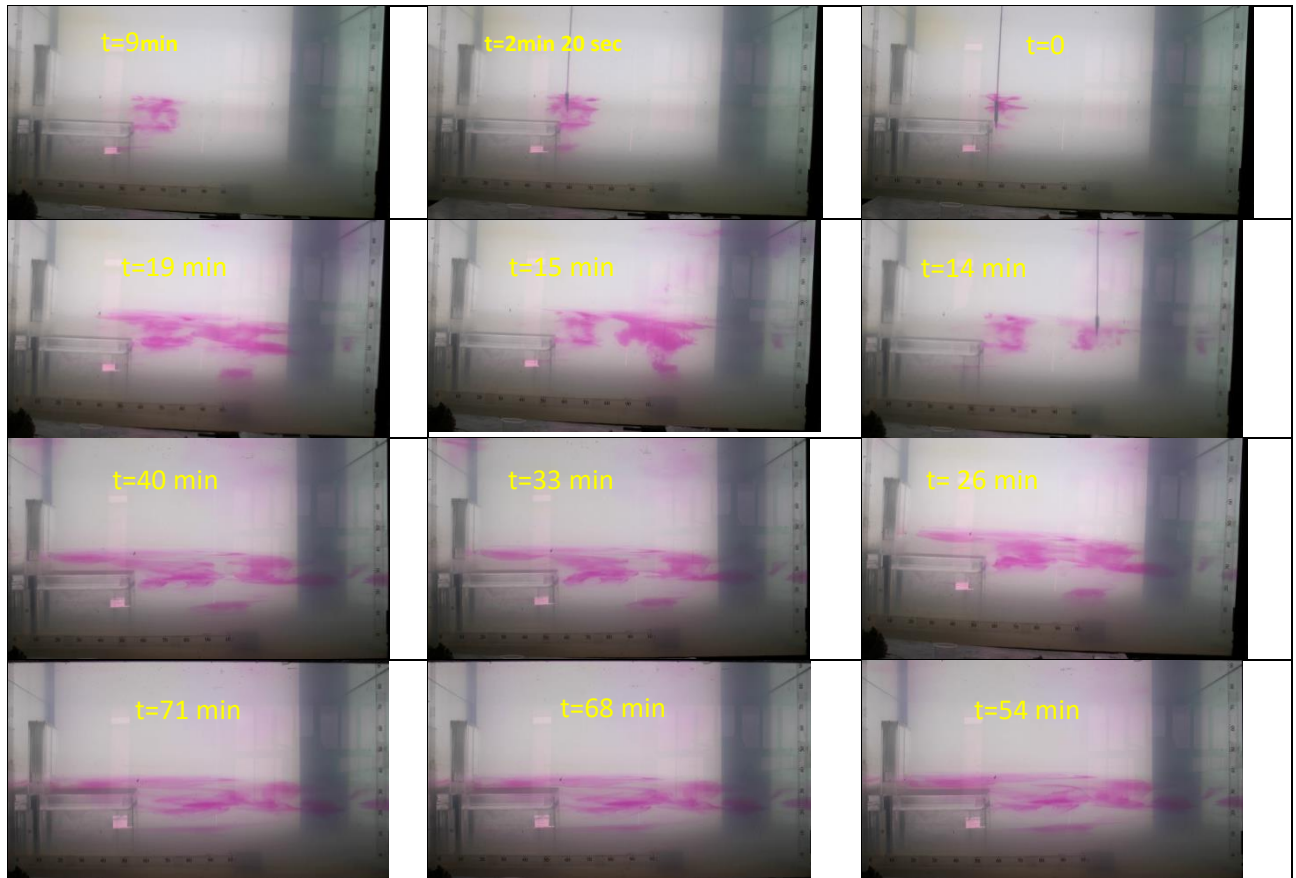
همانطور که از شکل ۱۴. مشخص است جریان مؤثری به سمت پایین در کانال بالای استاپلاگ شکل نمی‌گیرد. این موضوع مؤید نتایج برداشت شوری در مدل نیز هست. مواد رنگی ترریق شده در بالای کانال مزبور به صورت شناور باقی مانده و خط جریانی به سمت حفره تشکیل نمی‌شود.

شکل ۱۵: نشان می‌دهد که الگوی جریانی مؤثری به سمت حفره از لایه مقابل آن شکل می‌گیرد. این موضوع مؤید نتایج برداشت شوری در مدل بوده و بیانگر این مطلب است که مخزن در حالت لایه‌بندی پایدار قرار دارد. پس از اتمام فیلمبرداری از مدل و قرار دادن مدل در حالت پایدار (قطع خروج جریان از GRP) تصویری از مدل پس از گذشت ۱۹ ساعت و ۲۱ دقیقه تهیه گردیده است که در شکل ۱۶: ارائه شده است. همانطور که از تصویر مذکور مشخص است الگوی رنگ تزریق شده وضعیت ثابت جریان لایه‌ای به سمت حفره را به وضوح نمایان ساخته است

به منظور حصول اطمینان از حالت آشفتگی لازم در مدل (عدد رینولدز بالای ۲۰۰۰) یک آزمایش مشخص با بیشینه دبی ممکن،



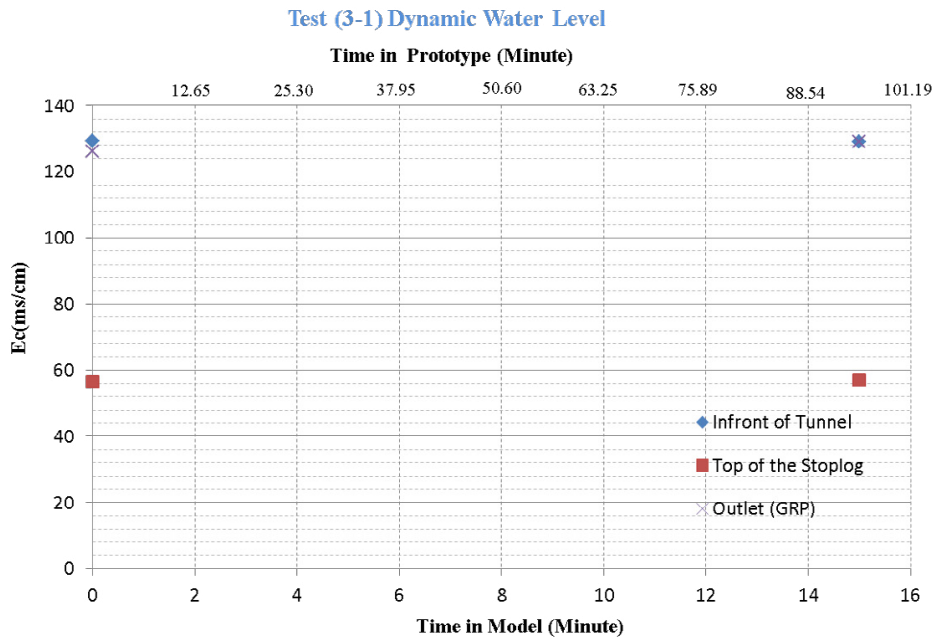
شکل ۱۴: تزریق مواد رنگی و شکل‌گیری خطوط جریان در موقعیت اول و زمان‌های مختلف
Fig. 14. Injection tracer and formation of streamlines in the first position at different time



شکل ۱۵. تزریق مواد رنگی و شکل گیری خطوط جریان در موقعیت دوم و زمان های مختلف
Fig. 15. Injection tracer and formation of streamlines in the second position at different times



شکل ۱۶. الگوی رنگ تزریق شده در موقعیت دوم، ۱۹ ساعت و ۲۱ دقیقه پس از پایان آزمایش
Fig. 16. Pattern of tracer(streamline) in the second position, 19 hours and 21 minutes after the end of the test



سری آزمایش	شماره آزمایش	دبی خروجی (P)	دبی خروجی (M)	مدت آزمایش (M)	دمای مخزن (M)
		l/s	l/m	minute	C
مرحله سوم	۱	۱۶۷۷/۵	۹/۹۴۶	۱۵	۷

شکل ۱۷. تغییرات شوری در سه موقعیت برداشت نسبت به زمان، آزمایش ۳-۱ (دبی بیشینه تخلیه)

Fig. 17. Salinity changes in three measure points with respect to time, test 3-1 (maximum discharge flow)

قائم^۱ (مابین لایه‌ها) بسیار ناچیز است. تغییرات بسیار جزئی در مرز لایه‌های چگال تشکیل یافته صورت گرفته که در دقت نتایج مدل تأثیری ندارد.

نتایج سری آزمایش‌های مرحله اول (اجازه تغییر تراز در مخزن) نشان داد که با توجه به خروج آب شور از لایه مقابل حفره ایجاد شده در استاپلاگ، به مرور از لایه‌های بالایی کم چگال جایگزینی صورت می‌گیرد و اختلاط موثری در دیگر لایه‌ها مشاهده نگردید.

باتوجه به نتایج مربوط به دبی بیشینه تخلیه و اطمینان از آشفتگی کامل جریان در مدل فیزیکی الگوی تخلیه در این حالت نزدیک به حدی نیز در مخزن به شکل لایه‌ای مشاهده گردید.

با توجه به اینکه بدلیل محدودیت‌های ساخت مدل فیزیکی کل عمق موجود از تراز کف تا تراز نرمال مخزن در مدل فیزیکی مورد شبیه‌سازی قرار نگرفته است بهتر است این موضوع در مدل‌سازی ریاضی مورد توجه قرار گرفته و اثر تراز و افزایش عمق جریان و

تشکیل شده در استاپلاگ نقش موثر در میزان شوری لایه تخلیه شده از GRP را داشته و دیگر لایه‌ها در موقعیت‌های متفاوت نقش چندانی در مقدار شوری تخلیه شده ندارند (نتایج حاصله از هر دو سری آزمایش‌های: اجازه تغییر تراز در مخزن و ثابت نگهداشتن تراز مخزن).

الگوی خطوط جریان تشکیل یافته به سمت حفره خروجی از نوع لایه‌ای پایدار بوده این موضوع در طول تصویربرداری از مدل به وضوح مشاهده گردید.

در محدوده تغییرات دبی از ۱۰۰ تا بیش از ۸۰۰ لیتر بر ثانیه، الگوی جریان در نزدیک ورودی حفره ایجاد شده و داخل مخزن، به شکل جریان لایه‌ای پایدار بوده و در محدوده دبی‌های فوق تغییرات چندانی در این الگو مشاهده نگردید. به عبارت دیگر تنها لایه روبروی حفره در حال تخلیه هست.

انتشار و تبادلات موثری مابین لایه‌های آب شور در جهت قائم در طول آزمایش‌ها مشاهده نگردید و به عبارتی دیگر ضریب پخشیدگی

1 Vertical Diffusion

- [2] M. Jamali, B. Seymour, R. Kasaiian, Numerical and experimental study of flow of a stratified fluid over a sill towards a sink, *Physics of Fluids*, 2005) (057106)17).
- [3] M. Jamali, P. Aghsaee, Effect of a contraction on selective withdrawal of a linearly stratified fluid from a line sink, *Physics of Fluids*, 2007) (106602) 19).
- [4] H. Ardalan, V. F., M. Azizi, D. Gohary Kamel, A. Kalateh Arabi, Investigation of the Velocity and Angle Effects on the Behavior of Brine Discharge by Inclined Jet into the Stationary and Homogenize Ambient, *Journal of Oceanography*, 58-51 (2018) (33)9.
- [5] B. Mohammadnejad, Investigation of 3D Particle Laden Density Currents with Supercritical Inflow, Sharif University of Technology, 2008.
- [6] W.S. Yu, H.Y. Lee, S.M. Hsu, Experiments on the deposition behavior of fine sediment in a reservoir, *Journal of Hydraulic Engineering*, 920-912 (2000) (12)126.
- [7] W.S. Yu, S.M. Hsu, K.L. Fan, Experiments on selective withdrawal of a codirectional two-layer flow through a line sink, *Journal of Hydraulic Engineering*, (12)130 1166-1156 (2004).
- [8] S. Chamoun, G. De Cesare, A.J. Schleiss, Managing reservoir sedimentation by venting turbidity currents: A review, *International Journal of Sediment Research*, 31 204-195 (2016).
- [9] S. Hassanian, P. Moobed, N. Hosseini zare, H. Akhourdzadeh, Y. Hamid, N. Saadati, H. Kamaei, Classification of Karoon and Deze river in limit of Gutvand to Khoramshahr and Dezful to Bamdeje with use of water quality index (WQI) and study of enterobacteriaceae that separation of this sites, in: 7th International River Engineering Conference, Shahid Chamran University, Ahwaz, Iran, 2007. (In Persian)
- [10] A. Zarei, A.M. Akhoundali, Investigation of temporal and spatial variations of Karun River water quality in Gotvand-Shushtar and the effect of Saline River on its quality, in: The first regional conference on optimal utilization of water resources in Karoon and Zayandeh Rood basins, Shahrekord University, Sharekord, Iran, 2007. (In Persian)
- [11] H. Zarei, A. Azhdari, Chemical quality of water resources of Abol-Fars dam and effect of formation Gachsaran on it,

متعاقب آن تعداد لایه‌ها در امکان تغییر الگوی جریان تشکیل یافته به سمت حفره مورد بررسی قرار گیرد.

بررسی امکان افزایش تعداد لایه‌های چگال در مدل فیزیکی به منظور بررسی بیشتر می‌تواند در ادامه تحقیق مورد توجه قرار گیرد. همچنین این موضوع می‌تواند با ترکیبی از یک مدل‌سازی فیزیکی و ریاضی (مورد اشاره شده در بند قبل) و توجه به افزایش دامنه شبیه‌سازی به کل عمق از کف تا تراز سطح آب و افزایش تعداد لایه‌های چگال، ترسیم دقیق‌تری از شرایط مخزن را ارائه نموده و به مدیریت بهره‌برداری مخزن کمک نماید.

امکان بررسی حالات حدی و افزایش دبی تخلیه و بررسی الگوی جریان در مخزن نیز می‌تواند با افزایش ابعاد مخزن و ظرفیت پمپ در ادامه تحقیق در میدان وسیع‌تری مورد بحث قرار گیرد.

علائم انگلیسی

L	مشخصه بعد
$\Delta\rho$	اختلاف جرم حجمی مابین لایه‌ها و یا سیالات مورد بررسی، N / m^3
V	سرعت مشخصه، m/s
g	شتاب ثقل جاذبه، m / s^2
T	مشخصه زمان، s
ρ	جرم حجمی سیال، N / m^3
Fr	عدد فرود
Fr_D	عدد فرود چگال
Ri	عدد ریچاردسون
C_{salt}	غلظت نمک، gr/l
ρ_{Salt}	جرم حجمی نمک، kg / m^3
Q	دبی جریان، m^3 / s
Ec	هدایت الکتریکی، mS/cm

منابع و مراجع

- [1] C.P. Manriquez, C.M. Garcia, P.R. Jackson, M.H. Garcia, Hydraulic Model Study of Chicago River Density Currents, *Civil Engineering Studies Hydraulic Engineering Series* No. 2005) ,77).

- [18] V. Naderkhanloo, M. Mazaheri, J. Samani, Investigating and Modeling of Gotvand-Olya Dam Challenge and Management Solutions, *Journal of Environmental Studies*, 265-251 (2017) (2)43. (In Persian)
- [19] M. Mansournejad, B. Kalantari, M. Mahdavi, The Investigation of Negative Effects of Salt Dome on the Quality of Water in Gotvand Olya Dam and the Use of Cut-off Wall as Treatment, *American Journal of Civil Engineering*, 56-53 (2015) (2-2)3.
- [20] D. Mahjoob, A. Sadatifard, H. Hassani, A. Zia, Upper Gotvand Dam and Hydro Power Plant Dealing With Salinity in Reservoir, Challenges, Remedies and Evaluations. , in: *International Symposium on Dams in a Global Environmental Challenges*, Bali, Indonesia, 2014.
- [21] M. Ajaml, M.R. Sabour, G.A. Dezvareh, The Examination of Effect of Salt Water on Mechanical Properties Clay Soil Around the Dam Gotvand Using Response Surface Method (RSM), *Journal of Applied Environmental and Biological Sciences*, 7(5S) (211-203 (2015).
- [22] R. Martins, *Recent Advances in Hydraulic Physical Modelling*, Kluwer Academic Publishers and Published in Cooperation with NATO Scientific Affairs Division,, 1988.
- [23] R. Ettema, R. Arndt, P. Roberts, T. Wahl, *Hydraulic Modeling Concepts and Practice*, U.S.A, 2000.
- [24] P. Novak, A. Jeffrey, G. V., D.E. Reeve, *Hydraulic Modelling-an Introduction Principles, methods and Applications*, Spon Press, U.S.A, 2010.
- [25] P. Novak, J. Cábeka, *Models in Hydraulic Engineering – Physical Principles and Design Applications*, Pitman, London, 1981.
- [26] H. Kobus, *Fundamentals. In Hydraulic Modelling*, Verlag Paul Parey/Pitman, Hamburg/London, 1980.
- in: *Tenth Congress of Iranian Geological Society*, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, 2007. (In Persian)
- [12] J. Mozaffarizadeh, M. Chitsazan, Investigating the Effect of Geological Formations on the Quality of Groundwater Resources in Gotvand Plain, in: *First Conference on Environmental and Medical Geology*, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, 2008. (In Persian)
- [13] S.M. Haeri, F. Rezaeiye, Investigating and laboratory analysis of dissolution and scouring of salt karsts in dams reservoirs, in: *Third National Congress of Civil Engineering*, Tehran, Iran, 2007. (In Persian)
- [14] N. Damugh, H. Zarei, Extending thick saline layers Gachsaran in the Gotvand Aliya dam and its effect on the quality of water, in: *First national conference on water resources research in Iran*, Kermanshah, Iran, 2010. (In Persian)
- [15] B. Baghdashtaki, M. Khamehchian, M.H. Nazari, Determination of solubility of salt mass Anbil located at Gotvand dam and its effect on the quality of the reservoir water, in: *First national conference on water resources research in Iran*, Kermanshah, Iran, 2010. (In Persian)
- [16] M. Hassanvand, B. Dahrazma, N. Hafezi Moghadas, Assessment formations area in reservoir of Gotvand Dam and quality variations of water in levels several, in: *Seventh Conference on Geology of Engineering and Environment of Iran*, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran, 2011. (In Persian)
- [17] S.M. Hashemi Heydari, M.R. Jalili Ghazizadeh, D. Mahjub, Numerical study of the effect of salt dissolution coefficient on salinity distribution in reservoir salt formation, in: *Ninth international Congress of Civil Engineering*, Isfahan University of Technology, Isfahan Iran, 2012. (In Persian)

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Sh. Faghihirad, H. Ardalan, A. Nikkhah, A. Esfandiarnejad, *Physical Simulation of Discharge Flow from Deep Conduit in Dense Reservoir (In Terms of Use in the Gotvand Dam Deep Pipe)*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(7) (2020) 1743-1764.

DOI: [10.22060/ceej.2019.15645.5982](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15645.5982)

