

Numerical Investigation of Hydrodynamic Interaction of Outlet Discharge Process in Stratified Reservoirs

SHERVIN FAGHIHIRAD^{1*}, HAMIDREZA HAJIAGHAMIR², FOUAD KILANEHEI², HOSSEIN ARDALAN¹

1. Department of Hydraulic Engineering and Hydro-Environment, Water Research Institute, Ministry of Energy, Tehran, Iran.

2. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

3. Department of Hydraulic Engineering and Hydro-Environment, Water Research Institute, Ministry of Energy, Tehran, Iran.

(Received: March. 15, 2021- Revised: Apr. 24, 2021- Accepted: May. 17, 2021)

ABSTRACT

The problem of flow discharge from outlet in stratified reservoirs and its interactions in the stratification environment is one of the most important problems in hydraulics of gates and conduits. Investigation and modeling of different behavior of the flow pattern during discharge from the outlet despite stratified reservoir is an objective of this paper. The use of numerical modeling makes it possible to approach optimal management in stratified reservoirs. In this paper, firstly, the evaluation of the numerical model was carried out by the result of a laboratory outlet model in a similar manner. By comparing the results between the two models, the ability of the mathematical model was acceptable. After that, the numerical model was run with six selected flow rates in real scale to investigate the hydrodynamic interaction of the discharge process in the stratified reservoir. According to the numerical results, three modes containing stable, poor and heavy mixing among layers was occurred. The results showed up to discharge rate of 10 CMS (cubic meters per second), only the layer in front of the outlet is evacuated and no mixture is formed among other layers. However, the start of instability and mixing layers found in the discharge rate of 40 CMS and by increasing up to 90 CMS, the intensive mixing among layers was observed and all dense layers were involved in the discharge process. In this case, flow will not feel stratification.

Keywords: Numerical Modelling, Stratified Reservoirs, Outlet Discharge, Salinity.

* Corresponding Author's Email: sh_faghihirad@yahoo.com

بررسی عددی اندرکنش هیدرودینامیکی فرآیند تخلیه از مجرا در مخازن لایه‌بندی شده

شروین فقیهی راد^{۱*}، حمیدرضا حاجی آقامیر^۲، فواد کیلانتهئی^۳، حسین اردلان^۱

۱. پژوهشکده مهندسی هیدرولیک و محیط‌های آبی، موسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو، تهران، ایران.

۲. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۲۵ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۲/۴ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۲/۲۷)

چکیده

موضوع تخلیه جریان از مجاری در مخازن لایه‌بندی شده و اثرات متقابل آن در محیط لایه‌بندی، یکی از مباحث مهم در هیدرولیک مجاری و دریچه‌ها می‌باشد. مدل‌سازی رفتار متفاوت الگوی جریان در هنگام تخلیه دبی جریان از مجرای تعبیه شده در بدنه سد با وجود لایه‌بندی در مخزن، هدف مهم این تحقیق می‌باشد. بهره‌مندی از مدل‌سازی عددی، این امکان را فراهم می‌سازد که به مدیریت بهینه در مخازن لایه‌بندی شده نزدیک شد. در این تحقیق، نخست توانمندی مدل ریاضی در یک سناریو مشابه با مدل آزمایشگاهی یک مجرای تخلیه مورد ارزیابی قرار گرفت. با مقایسه میان نتایج میان دو مدل، عملکرد مدل ریاضی قابل قبول تشخیص داده شد. بعد از ارزیابی مدل و تایید عملکرد آن، مدل‌سازی عددی با شش دبی انتخابی در مقیاس واقعی به منظور بررسی اندرکنش هیدرودینامیکی فرآیند تخلیه در مخزن لایه‌بندی شده انجام گردید. مطابق نتایج مدل به تفکیک مومنتم ایجاد شده در مخزن ناشی از میزان دبی تخلیه، سه حالت لایه‌ای پایدار، اختلاط ضعیف و اختلاط شدید مابین لایه‌ها مشاهده گردید. نتایج نشان داد که تا دبی به میزان ۱۰ مترمکعب بر ثانیه، تنها تخلیه از لایه روبروی مجرا در مخزن صورت گرفته و به بیان دیگر اختلاطی میان لایه‌های مخزن شکل نمی‌گیرد (حالت لایه‌ای پایدار). این در حالی است که شروع ناپایداری و اختلاط لایه‌ها در دبی تخلیه ۴۰ مترمکعب بر ثانیه وقوع یافت و با افزایش دبی تا ۹۰ مترمکعب بر ثانیه شاهد وقوع اختلاط شدید مابین لایه‌ها بوده و به نوعی همه لایه‌ها با چگالی متفاوت در فرآیند تخلیه درگیر شدند. در این حالت به عبارتی جریان لایه بندی چگالی را حس نمی‌کند.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی عددی، مخزن لایه‌بندی شده، دبی تخلیه، شوری.

مقدمه

امروزه در سراسر جهان، کمبود آب یکی از معضلات اصلی توسعه و پیشرفت کشورها است و منابع آب شیرین و مدیریت بهینه در بهره‌برداری از این منابع با ارزش، امری مهم و استراتژیک است. یکی از عوامل بسیار مهمی که خصوصیات آب دریاچه‌ها و مخازن سدها را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد، لایه‌بندی مخازن آب می‌باشد. در مخازن و بدنه‌های آبی لایه‌بندی شده، سه لایه عمودی مجزا شامل: اپیلیمنیون^۱، متالیمنیون^۲ و هیپیلیمنیون^۳ وجود دارد (Reynolds, 1992). اپیلیمنیون یا رولایه که بالاترین لایه دریاچه می‌باشد که به دلیل مجاورت با باد و هوای آزاد دارای اکسیژن بیشتر و دمای متغیر می‌باشد. متالیمنیون یا میان‌لایه که لایه میانی کم عمقی است که نرخ تغییر دما و چگالی نسبت به عمق به شکل چشم‌گیر و قابل توجهی بالا می‌باشد که این پدیده انتقال

عمودی گرما و مواد داخل دریاچه را محدود می‌کند، از این رو باعث جدایی مشخصه‌های هیدرولیکی، دمایی و اکولوژیکی در دو لایه دریاچه می‌شود. لایه سوم، هیپیلیمنیون یا زیرلایه پایین‌ترین لایه در دریاچه است که اکسیژن کمتری نسبت به دیگر لایه‌ها دارد و دارای کمترین درجه حرارت و بیشترین چگالی است. براساس مجموع مطالعات و تحقیقات محققان، انواع دریاچه‌ها و بدنه‌های آبی بر اساس نوع ساختار درونی و اختلاط و لایه‌بندی معرفی شده‌اند (Lewis & William 1983; Hutchinson & Löffler, 1956). یک نوع از این دریاچه‌ها، دریاچه مرومیکتیک^۴ هستند که به‌طور کامل مخلوط نمی‌شوند و یک لایه کاملاً ساکن و عمیق دارند. اختلاط در این دریاچه‌ها ممکن است بر اثر پدیده‌های شیمیایی و بیولوژیک و یا فیزیکی اتفاق بیفتد (Wetzel, 2001). رافائل از پیشگامان عرصه شبیه‌سازی مخازن بوده که برای

* نویسنده مسئول: sh_faghihrad@yahoo.com

۱ Epilimnion

۲ Hypolimnion

۳ Metalimnion

۴ Meromictic

دیگر محققان آن با کمک مدل‌سازی عددی به بررسی پدیده لایه‌بندی حرارتی مخزن سد کارون پرداختند که نشان دادند این مخزن دارای لایه‌بندی حرارتی تابستانه می‌باشد که در مدت ۸ ماه ادامه دارد (Behmanesh *et al.*, 2012). در یک مطالعه آزمایشگاهی و عددی روی یک مخزن با لایه‌بندی حرارتی در جنوب مدیترانه، محققان آن پژوهشی ارائه دادند که به این نتیجه رسیدند ارتفاع تخلیه آب تا حد زیادی انتقال حرارت به ویژه در طی لایه‌بندی حرارتی را کنترل می‌کند و تخلیه‌های عمیق باعث افزایش ضخامت میان‌لایه و تضعیف ثبات لایه‌بندی می‌شوند (Zouabi-Aloui *et al.*, 2015). گروهی از محققان بر روی شبیه‌سازی لایه‌بندی حرارتی، شوری و اکسیژن محلول در مخزن سد شیرین‌دره خراسان شمالی با استفاده از مدل عددی پژوهشی را ارائه دادند که نتایج آن‌ها، نشان می‌دهد مخزن سد شیرین‌دره دارای یک چرخه لایه‌بندی حرارتی سالیانه می‌باشد (Khosravi *et al.*, 2015). اخیراً در یک پژوهش برای دستیابی به زاویه و سرعت بهینه در تخلیه پساب شور به دریا، آزمایش‌هایی بر روی جت‌ها با زوایا و سرعت‌های مختلف تخلیه انجام شد که مشاهده کردند در سه زاویه بررسی شده استفاده از زاویه ۶۰ درجه تخلیه کننده‌های دریایی، مناسب‌تر بوده و مخاطرات زیست محیطی کمتری خواهد داشت (Ardalan *et al.*, 2018). در آخرین پژوهشی که بر عملکرد مجرای تخلیه و الگوی جریان از مجرای مربوطه در مخزن لایه‌بندی شده با استفاده از مدل فیزیکی معطوف است، محققان این تحقیق به این نتیجه رسیدند که در محدوده دبی‌های تخلیه کم و محدود، الگوی خطوط جریان شکل یافته به سمت مجرا در داخل مخزن، به شکل الگوی تخلیه در حالت جریان لایه‌ای پایدار می‌باشد. به عبارت دیگر در دبی‌های تخلیه کم، تنها لایه روبروی مجرا در حال تخلیه بوده و لایه بندی مخزن تغییری نمی‌کند (Faghihirad *et al.*, 2020).

در این تحقیق تلاش شده تا با مدل‌سازی عددی، الگوی پایداری یا ناپایداری لایه‌بندی در هنگام تخلیه جریان از مجرای تعبیه شده در بند سد در مخزن لایه‌بندی شده مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد. تاثیر مقدار دبی تخلیه جریان از این مجرا بر الگوی لایه بندی مخزن از عمده موارد مهم این تحقیق به شمار می‌رود. برای این منظور، مدل عددی بر پایه مدل آزمایشگاهی ساخته شده از یک مجرای تخلیه برپا شده است که نتایج آن با نتایج مدل آزمایشگاهی، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و سپس در دبی‌های متفاوت، در مقیاس واقعی، نتایج الگوی تخلیه ارائه و بحث می‌شود. طراحی سناریوهای این پژوهش به منظور بررسی اثرات متقابل میزان دبی تخلیه بر موضوع لایه‌بندی در مخزن با شرایط پیچیده‌تر در مخزن سد و با ۷ لایه انجام می‌پذیرد و در گام پایانی این پژوهش، نتایج سناریوهای

مخازنی با عمق کم که لایه‌بندی در اثر باد یا جریان از بین رفته و کاملاً دچار اختلاط شده‌اند، روش استفاده از بیلان انرژی را توصیه کرد (Raphael, 1962). در مدل‌سازی دیگری، مدلی یک بعدی در راستای قائم برای شبیه‌سازی آب مخازن ارائه داد که در آن تاثیر موقعیت آبگیر بر کیفیت آب خروجی بررسی شد. از مدل‌سازی فوق این نتیجه دست یافت که موقعیت آبگیر تاثیر قابل توجهی بر لایه‌بندی گرمایی آب مخزن دارد اما تاثیر چشم‌گیری روی دمای آب خروجی مخزن ندارد (Gaillard, 1984). در مطالعه‌ای، محققان آن دریافتند که آب‌های محصور شده در مخزن سدها یا دریاچه‌ها در اکثر سال‌ها با تغییرات دما و شوری، دچار لایه‌بندی می‌شوند. این لایه‌بندی، از حرکات عمودی درون دریاچه جلوگیری می‌کند (Graeme *et al.*, 1988). در مبحث مدل‌سازی پارامترهای کیفیت آب، روش‌های تشخیص و اندازه‌گیری لایه‌بندی حرارتی در دو دسته تقسیم‌بندی شده است، یک روش اندازه‌گیری مستقیم در لایه‌های مختلف مخزن که در مورد مخازن موجود به کار می‌رود و روش دوم، استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی کیفی دما و کیفیت آب برای تخمین پتانسیل لایه‌بندی حرارتی که این مورد برای سدهای پیشنهادی یا مخازن فاقد اندازه‌گیری‌های میدانی کاربرد دارد (Palmer, 2001). یک پژوهش در خصوص اثر برآمدگی کف در یک محیط لایه‌بندی خطی بر جریان خروجی از یک چشمه در مدلی مشابه مخزن انجام شد و یک مفهوم جدید به نام ضخامت چگال به جای مفهوم ضخامت لایه خروجی پیشنهاد شد (Jamali *et al.*, 2005). در پژوهشی بر روی تئوری برای جریان‌های گرانشی پایدار یک محیط لایه‌بندی شده کار شد که این تئوری راه‌حل‌های پایدار را فقط برای طیفی از ضخامت جریان گرانشی و سرعت انتشار رو به جلو پیش‌بینی می‌کند (White & Helfrich, 2007). در پژوهشی که محققان آن با دو روش حجم سیالی و رویکرد دو میدانی در نرم افزار انسیس، ناپایداری را در جریان لایه‌بندی شده مطالعه و مقایسه کردند، با بررسی بر روی کشش سطحی و نسبت چگالی بر روی رشد ناپایداری به این نتیجه رسیدند که روش حجم سیالی دارای دقت بیشتری می‌باشد (Bartosiewicz *et al.*, 2008). در پژوهشی، آزمایش‌های برداشت انتخابی در یک مخزن از طرح مستطیلی و سطح مقطع حاوی یک محلول نمکی لایه‌ای خطی و یک سینک نقطه‌ای در یک انتهای دیوار انجام پذیرفت که محققان آن به این نتیجه رسیدند که از آنجا که برداشت از مخزن محدود ساخته شده و در آن جایگزینی مایعات در لایه تخلیه وجود ندارد، با کاهش سطح آب، یک میان‌لایه با ضخامت صفر در سطح سینک ایجاد می‌شود (Spigel & Farrant, 2010). در پژوهشی

برای مدل سازی آشفتگی از مدل توربولانس K-Epsilon RNG که یکی از مدل های بهبود یافته K-Epsilon بر اساس مدل K-Epsilon Standard می باشد. این مدل آشفتگی، در شبیه سازی جریان های آشفته با کرنش های سریع^۴ دقت بالایی دارد و همچنین، اثر چرخش جریان روی لزجت آشفتگی لحاظ شده است در نتیجه افزایش دقت شبیه سازی در شبیه سازی جریان های چرخشی مشاهده می شود. با توجه به بررسی دقت نتایج و هزینه زمانی مدل سازی در انواع روش های حل معادله حاکم، روش حل SIMPLE برای محاسبات بکار گرفته شده است که از نظر دقت با دیگر روش ها یکسان است ولی در زمان حل، سرعت بیشتری نسبت به بقیه روش ها دارد.

از جمله مسائل مهم در مدل سازی عددی، در نظر گرفتن شرایط مرزی مناسب برای دامنه حل می باشد. شرایط مرزی در فلوننت، متغیرهای حرارتی و جریان سیال را روی مرزهای دامنه محاسباتی را مشخص می کند. بنابراین تعیین شرایط مرزی در فلوننت یک موضوع حساس در شبیه سازی عددی جریان سیال بوده و تعریف مناسب آن از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. در این مدل سازی^۴ نوع شرایط مرزی تعریف شده است. شرط مرزی دیواره که در مرزهایی که سیال توسط یک جامد، محصور می گردد، استفاده می شود. در جریان های لزج، شرط غیرلغزشی چسبیده به دیواره، در پیش فرض نرم افزار فلوننت منظور شده است. شرط مرزی سطح آزاد که در این شرط مرزی سطح آزاد آب و کف آن به منظور انجام محاسبات پارامترهای فشار اعمال می شود. شرط مرزی سرعت خروجی که برای تعیین سرعت خروجی در مدل سازی از روش Magnitude And Direction استفاده شده است. در نهایت تعریف شرایط عملیاتی که در واقع شرایط محیطی مدل می باشد که شامل شتاب گرانش، فشار هوا و چگالی هوا در محیط مدل سازی است.

مواد و روش ها

فرآیند ساخت و ارزیابی مدل عددی با مدل آزمایشگاهی

این پژوهش بر اساس مدل تخلیه از مخزن لایه بندی شده یک مدل آزمایشگاهی که مطالعات آن توسط نویسندگان اول این تحقیق در موسسه تحقیقات آب انجام گردیده (Faghihirad et al, 2020)، برپاشده و مورد ارزیابی قرار گرفته است. مدل آزمایشگاهی ساخته شده بر اساس بخش تحتانی از مخزن لایه بندی شده و اجزای تخلیه کننده و دریچه کنترل آن با مقیاس ۱/۴۰ می باشد. در شکل (۱) مدل سه بعدی ساخته شده از

طراحی شده تحلیل و بررسی می گردد. در این پژوهش از نرم افزار انسیس فلوننت نسخه ۲۰۱۹ ورژن ۲ برای شبیه سازی عددی این پدیده استفاده شده است.

بررسی معادلات حاکم و شرایط مرزی مدل

نرم افزار فلوننت که یک برنامه کامپیوتری قدرتمند برای تحلیل و شبیه سازی جریان سیال و انتقال حرارت در هندسه های پیچیده می باشد. این نرم افزار، مدلی عددی است که برای شبیه سازی سه بعدی جریان، معادلات ناویه استوکس متوسط گیری شده رینولدز را به روش حجم محدود بر روی شبکه متناوب حل می نماید. سرعت بالای محاسبات، قابلیت تعریف فازهای متعدد از سیال، امکان استفاده از مدل های آشفتگی مختلف و نیز امکان استفاده از چگالی متغیر در عمق از دلایل انتخاب این نرم افزار می باشد. برای شبیه سازی جریان لایه بندی شده دو دیدگاه اولیرین- اولیرین^۱ و اولیرین - لاگرانژین^۲ پیشنهاد می کند که در این پژوهش از دیدگاه اولیرین- اولیرین و فرمولاسیون حجم سیالی VOF^۳ و به روش صریح استفاده شده است. هنگام استفاده از طرح صریح، حل به صورت وابسته به زمان انجام خواهد شد. دقت حل عددی در صورت استفاده از روابط صریح نسبت به روابط ضمنی، بیشتر خواهد بود. مدل VOF روشی برای ردیابی سطح بوده که بر روی شبکه اولیرین ثابت شده، اعمال می گردد. این روش برای دو یا تعداد بیشتری سیال مخلوط نشدنی طراحی شده که موقعیت سطح مشترک بین فازها را دنبال می کند. از کاربردهای مدل VOF، مدل سازی دو با چند سیال مخلوط نشدنی با فصل مشترک واضح است. مدل VOF با قابلیت حرکت شبکه، دقت بالایی در تغییر شکل کوچک سطح آزاد دارد. ردیابی فصل مشترک های میان فازها با حل معادله پیوستگی برای کسر حجمی یکی از فازها انجام می گیرد که معادله ی بقا فاز q به شکل زیر است:

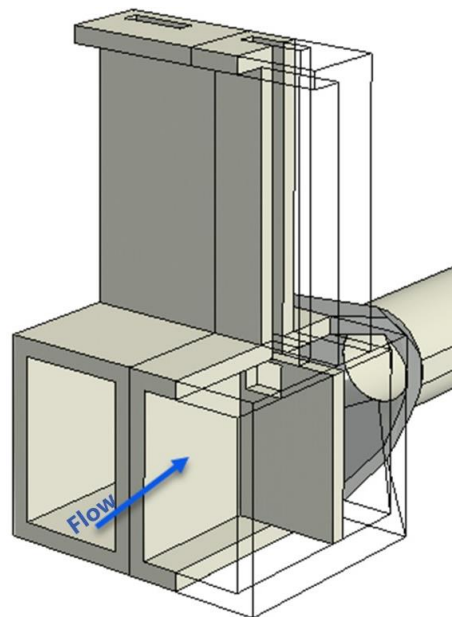
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{u}) = S_q + \sum_{p=1}^n \dot{m}_{pq} \quad (\text{رابطه ۱})$$

در معادله فوق S_q منبع چشمه خارجی بوده که به فاز q وارد می شود و \dot{m}_{pq} نرخ انتقال جرم از فاز p به فاز q می باشد. ρ_q و μ_q نشان دهنده چگالی، ویسکوزیته و بردار سرعت فاز q می باشند، t بیانگر زمان و α_q کسر حجمی فاز q بین صفر و یک، بیانگر فصل مشترک بین دو فاز می باشد و ردیابی فصل مشترک بین فازها، توسط حل معادله کسر حجمی برای یک یا چند فاز انجام می شود. به صورت پیش فرض ترم چشمه در سمت راست معادله برابر صفر است.

عددی منتخب (ANSYS FLUENT 2019 R2)، تحت شرایط مشابه مدل آزمایشگاهی از لحاظ ژئومتری و خصوصیات هیدرولیکی (شرایط اولیه و مرزی) اطلاعات ورودی مدل عددی تنظیم و ساخته شد. در واقع با اعمال شرایط یکسان از منظر هندسی و هیدرولیکی در دو مدل (آزمایشگاهی و ریاضی) بستر مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شرایطی که عدد رینولدز در هر دو مدل یکسان باشد، فراهم گشته و مدل عددی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

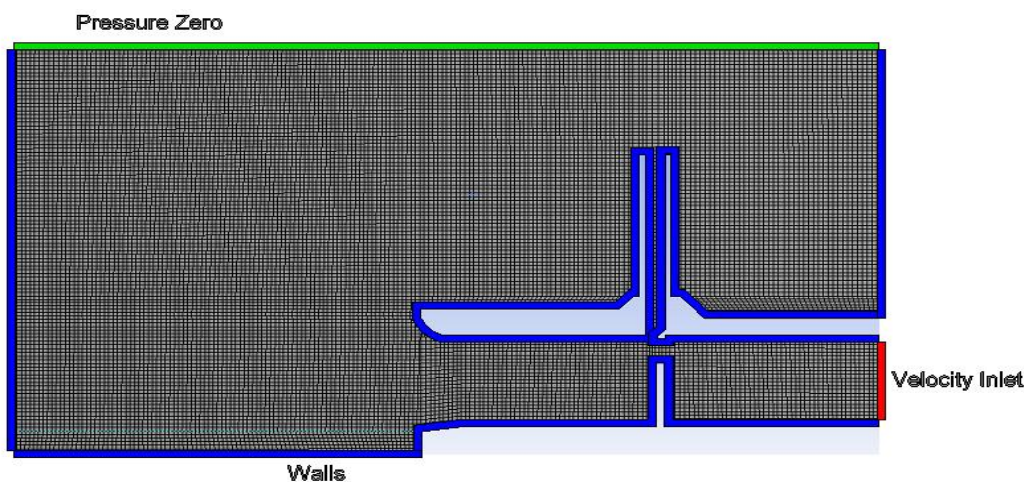
محدوده و ابعاد هندسی مدل‌سازی در این سناریو، مشابه مدل آزمایشگاهی، شامل تعداد و تراز لایه‌ها با شوری متفاوت، اجزاء مجرای تخلیه، براساس مقیاس $1/40$ و محدودیت‌های موجود در مدل آزمایشگاهی به ابعاد 60×60 میلیمتر انتخاب و به مدل عددی اعمال گردید. به منظور کاهش زمان محاسباتی و وجود فرآیند غالب تخلیه از مجرا در بعد قائم نسبت به افق، شبیه‌سازی عددی به صورت دوبعدی در جهت قائم انجام پذیرفته است. شکل (۲) ابعاد مدل و الگوی المان‌بندی و جدول (۱) نیز اطلاعات و مشخصات هیدرولیکی (شرایط اولیه و مرزی) مربوط به سناریو ارزیابی را ارائه می‌دهند.

سیستم تخلیه کننده و دریچه مزبور نمایش داده شده است. این سیستم از دو مجرای در کنار هم، هر کدام با عرض $0/125$ متر و ارتفاع $0/238$ متر تشکیل شده است (شکل ۱).



شکل ۱- مدل سه بعدی از مجرای مدل آزمایشگاهی

ارزیابی توانمندی مدل عددی براساس نتایج مدل آزمایشگاهی در گام نخست این پژوهش به منظور سنجش توانمندی نرم‌افزار



شکل ۲- الگوی المان‌بندی و شرایط مرزی در سناریو ارزیابی

$0/126$ می‌باشد و نسبت کیفیت تعامد المان‌ها عدد $0/996$ می‌باشد. جدول (۱) اطلاعات هیدرولیکی و هندسی مدل عددی را در سناریو ارزیابی ارائه می‌دهد.

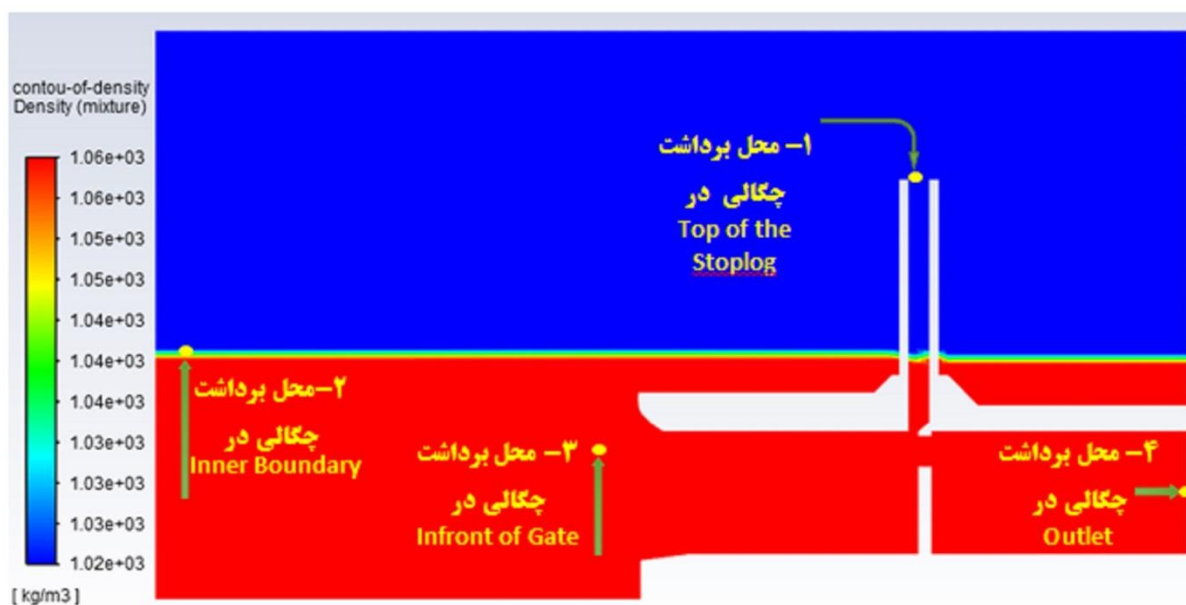
برای شبکه‌بندی هندسه مدل از شبکه سازمان‌یافته با المان‌های مربعی به ابعاد یک سانتی‌متری استفاده شده است. نسبت ناهمواری المان‌ها در شبکه‌بندی مدل ارائه شده عدد

جدول ۱- اطلاعات هیدرولیکی و هندسی مدل عددی در سناریوی ارزیابی

مشخصات	هدایت الکتریکی (ms/cm)	چگالی (kg/m ³)	ارتفاع لایه (cm)	دبی خروجی از مجرا (l/s)	ملاحظات
لایه فوقانی	۵۲/۸	۱۰۲۳	۶۳	۰/۰۷۹۱	در نقاط متناظر با برداشت شوری در مدل
لایه تحتانی	۱۰۹/۸۷	۱۰۵۹	۴۷	(معادل ۸۰۰ لیتر در ثانیه در پروتوتیپ)	آزمایشگاهی، تغییرات چگالی نسبت به زمان از مدل عددی اخذ شده است

و جانبی شرط مرزی دیوار (wall) به مدل اعمال شده است. شکل (۳) برپایی مدل عددی در سناریو ارزیابی به همراه جزئیات نقاط برداشت داده‌های تغییرات چگالی نسبت به زمان در زمان صفر مدل را نشان می‌دهد.

همانطور که از جدول (۱) مشخص است، دبی مرز خروجی از مدل ۰/۰۷۹۱ لیتر بر ثانیه (معادل تخلیه ۸۰۰ لیتر بر ثانیه در پروتوتیپ) که با اعمال سرعت متناظر ۰/۰۱۳۳ متر بر ثانیه به مدل عددی اعمال شده است. در مرز بالایی مدل که نقش سطح آزاد را دارد، شرایط فشار صفر (pressure inlet) و مرزهای داخلی



شکل ۳- برپاسازی مدل عددی و خصوصیات مربوطه

عبور از مجرا ایجاد شده می‌گردد. با گذشت زمان این الگو توسعه می‌یابد بطوریکه در زمان انتهای مدل‌سازی (۱۲۰۰ ثانیه)، کاملاً لایه کم چگال در حال عبور از مجرا می‌باشد. بنابراین نتایج مدل‌سازی عددی مشابه مدل آزمایشگاهی نشان می‌دهد که اختلاطی بین لایه‌ها در این سناریو (معادل تخلیه ۸۰۰ لیتر بر ثانیه در پروتوتیپ)، ایجاد نشده و تخلیه لایه‌های آب شور به صورت لایه‌ای منظم و پایدار خواهد بود.

بررسی نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی نشان می‌دهد که شروع تخلیه لایه کم‌چگال از مجرا پس از ۱۲۰ دقیقه از شروع آزمایش اتفاق افتاده و در این زمان در مخزن مدل آزمایشگاهی، لایه چگال تر ۱۲/۵ سانتیمتر افت می‌کند. به منظور امکان مقایسه کمی نتایج دو مدل تغییرات چگالی نسبت به زمان در موقعیت‌های یکسان نسبت به مدل آزمایشگاهی (نقاط برداشت مشخص شده در شکل (۴))، در مدل عددی نیز در هنگامی که لایه چگال تر ۱۲/۵ سانتیمتر در مدل عددی افت پیدا می‌کند، نتایج چگالی برداشت شده و به شوری متناظر تبدیل می‌گردد. مدت زمان سپری شده معادل این مقدار افت تراز، ۵۳۰ ثانیه در مدل عددی محاسبه شده است. پارامتر بی بعد زمان که حاصل زمان برداشت

نتایج و بحث

بدلیل حذف بعد عرضی مخزن مدل آزمایشگاهی در مدل‌سازی ریاضی دو بعدی قائم، مدت زمانی تخلیه بدست آمده در مدل‌سازی ریاضی با مدل آزمایشگاهی به لحاظ شروع و خاتمه با یکدیگر تطبیق نداشته و کل زمان تخلیه در مدل ریاضی از مدل آزمایشگاهی به مراتب کمتر می‌باشد. به منظور امکان مقایسه کمی نتایج متناظر شوری (نتایج چگالی در مدل عددی و تبدیل آن به شوری مطابق پارامتر اندازه‌گیری شده در مدل آزمایشگاهی) در موقعیت‌های مشابه نسبت به زمان، پارامتر زمان را با روش خاصی که در ادامه توضیح داده خواهد شد، بی بعد می‌گردد. نخست الگوی کیفی تخلیه از مجرا و بررسی اثرات آن در مخزن به شکل کیفی مورد بحث قرار می‌گیرد.

الگوی تخلیه لایه آب شور به توالی زمانی ثانیه در شکل (۴) ارائه شده است. بر اساس شکل‌های ارائه شده با شروع فرآیند تخلیه، لایه آب چگال‌تر (شورتر) که مقابل دریچه را احاطه کرده، به صورت لایه‌ای پایدار، تخلیه می‌گردد. این روند تا زمان ۵۳۰ ثانیه ادامه می‌یابد. با ادامه روند تخلیه، تراز لایه چگال‌تر به شکل منظم و پایدار افت پیدا کرده و لایه کم چگال جایگزین آن در

داده به نسبت کل مدت زمان در هر دو دسته نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی محاسبه و مشخص می‌گردد. شکل (۵) چگونگی الگوی تخلیه در زمان ۵۳۰ ثانیه پس از اجرا در مدل عددی را نشان می‌دهد. معادله (۲) نحوه محاسبه پارمتر بی بعد زمان را نشان می‌دهد.

(رابطه ۲)

$$\text{Dimensionless Time} = \left(\frac{\text{Time for reading data (EC)}}{\text{Total test time}} \right)_{L.M} = \left(\frac{\text{Time for reading data (density to EC)}}{\text{Total test time}} \right)_{N.M}$$

که در آن:

$\text{Time for reading data (EC)}$ = زمان برداشت داده شوری

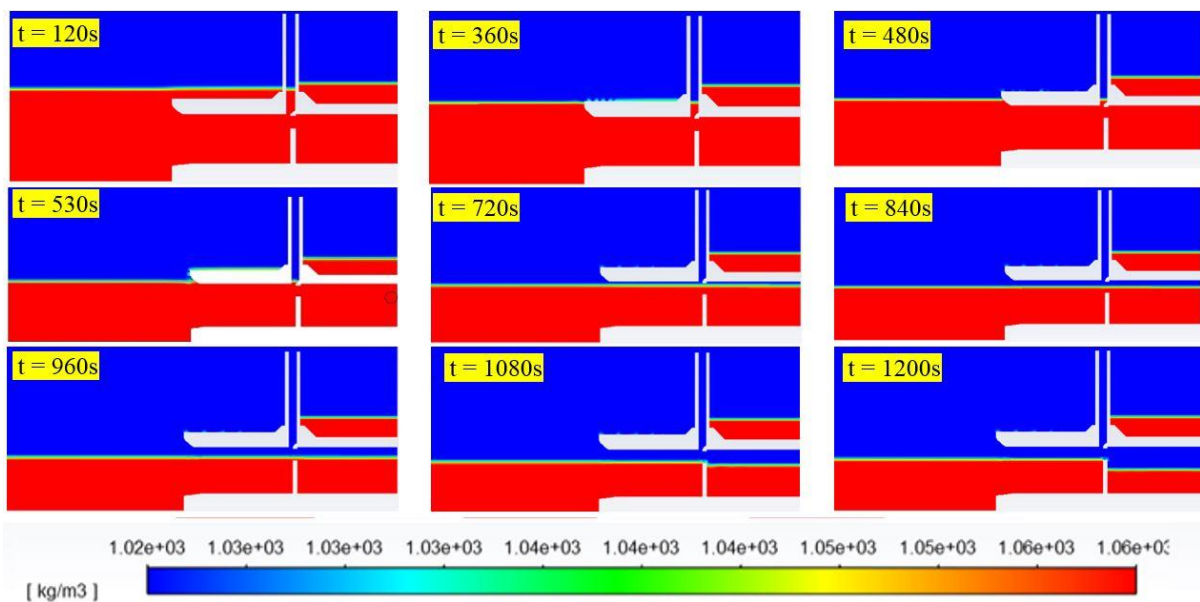
در مدل آزمایشگاهی و متناظر آن زمان برداشت چگالی و تبدیل آن به شوری در مدل عددی)

Total test time = کل زمان طی شده تا شروع تخلیه لایه کم

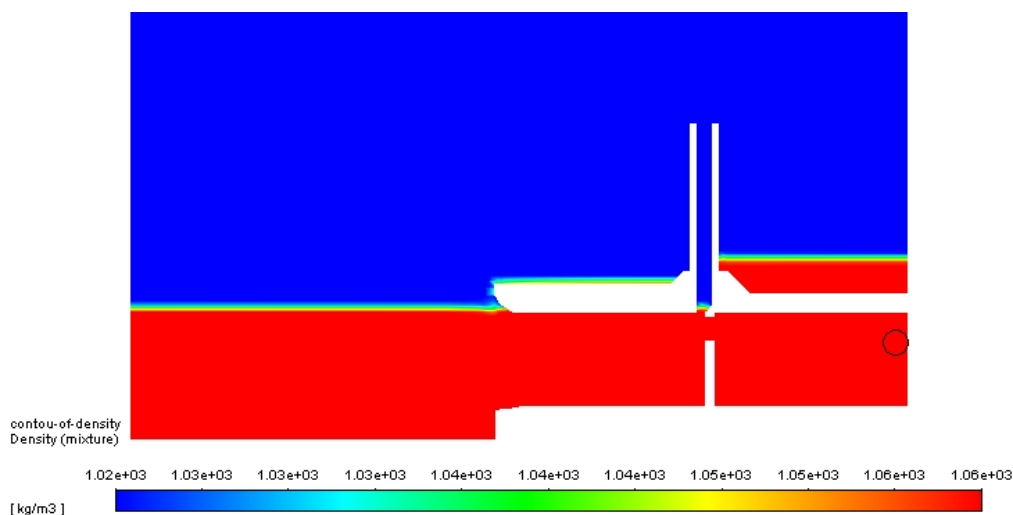
چگال در مدل آزمایشگاهی و متناظر آن در مدل ریاضی

$L.M$ = مدل آزمایشگاهی (Lab Model)

$N.M$ = مدل عددی (Numerical Model)



شکل ۴- روند تخلیه لایه‌ها از مجرا در سناریو ارزیابی در مدل عددی

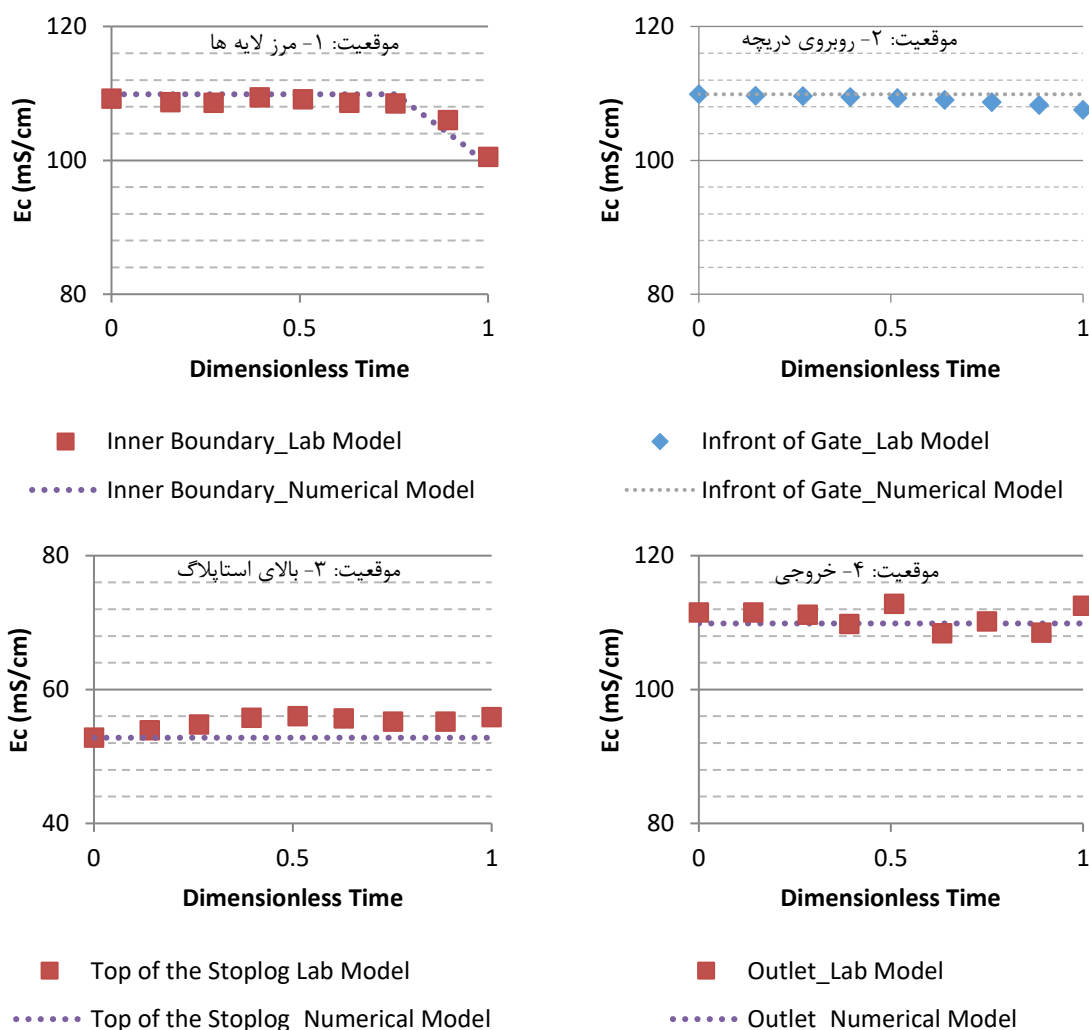


شکل ۵- وضعیت الگوی لایه‌بندی در مخزن و تخلیه از مجرا در t=530 s

با دو معیار مجذور میانگین مربع خطا (RMSE) و میانگین قدرمطلق درصد خطا (MAPE) صورت پذیرفته و نتایج در جدول (۲) ارائه شده است.

مجموعه نمودارهای شکل (۶) مقایسه کمی نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی و عددی مطابق روش توضیح داده شده را نشان می‌دهد.

برآورد کمی خطا مابین داده‌های آزمایشگاهی و مدل عددی



شکل ۶- مقایسه نتایج کمی شوری در موقعیت‌های یکسان در مدل عددی و آزمایشگاهی

جدول ۲- برآورد خطا میان نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی و عددی

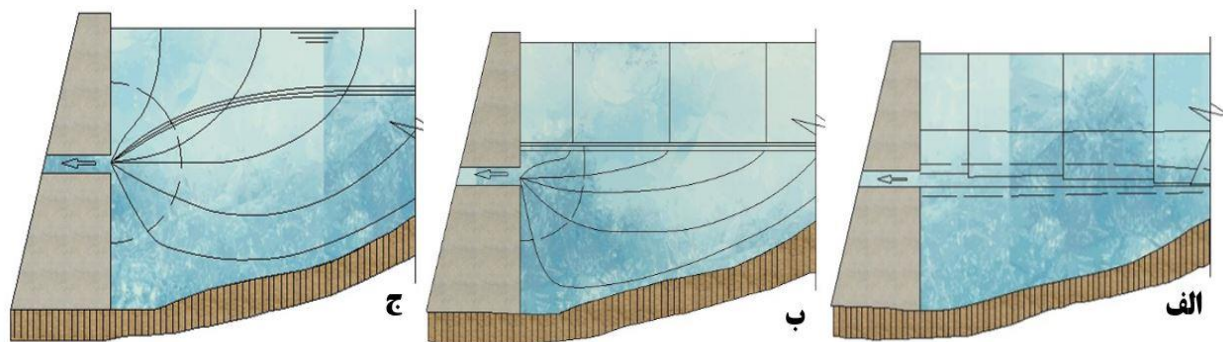
MAPE	RMSE	شماره موقعیت	موقعیت برداشت داده
۱/۲۹۹	۱/۶۹۹۲	۱	میان لایه
۰/۷۶۴	۱/۰۸۹۹	۲	روبروی دریچه
۴/۰۲۵	۲/۴۴۹۵	۳	بالای استاپلاگ
۱/۳۳۸	۱/۷۲۳۶	۴	خروجی

تخلیه و گرادبان چگالی بین لایه‌ها از مهم‌ترین عوامل تغییرات هیدرودینامیکی در محیط پیرامون مجرا تخلیه می‌باشد. بر اساس تئوری‌های موجود در فرآیند تخلیه از مخازن لایه‌بندی شده، سه حالت الگوی جریان در مخزن لایه‌بندی شده محتمل است. حالت اول، حالتی است که لایه‌بندی در مخزن قوی (پایدار) بوده و یک دبی جریان خروجی کم وجود داشته باشد، در واقع مؤلفه قائم جریان محدود شده و خطوط جریان منحنی در مخزن شکل نمی‌گیرد. در این وضعیت جریان عبوری از دریچه نمی‌تواند بر لایه‌های پایین‌تر از دریچه اثر گذارده و جریان خروجی از لایه مقابل دریچه تخلیه می‌گردد. حالت دوم، حالتی است که اغلب

همانطور که از مقدار برآورد خطا به دو روش مجزا مشخص است، مدل عددی توانسته است با تطابق قابل قبولی با نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی فرآیند تخلیه را شبیه‌سازی نماید. منبع این خطا را می‌توان به ماهیت سه بعدی جریان در مدل آزمایشگاهی و شبیه‌سازی دو بعدی متوسط گیری شده در عمق در مدل عددی نسبت داد، هر چند که تقریب سازی عددی و خطای دستگاه‌های اندازه‌گیری نیز در مسئله تاثیرگذار است.

طراحی سناریوهای پیش‌رو، اهداف و سیاست‌ها فرآیند تخلیه از مجرا در یک مخزن لایه‌بندی شده از پیچیدگی‌های خاصی برخوردار است. به طور عمده عواملی مانند مقدار دبی

نزدیکی دهانه خروجی خطوط جریان به شکل شعاعی خواهد بود و با جریان بالقوه‌ای در طول مخزن سد به شکل هندسی شعاعی دیکته می‌شود. این حالت از جریان به ندرت اتفاق افتاده و در بیشتر مواقع لایه بندی چنان قوی است که بر جریان خروجی اثر بگذارد (Imberger and Patterson, 1980). شکل (۷) چگونگی الگوی تخلیه در در مخازن لایه بندی شده در سه حالت ذکر شده را نشان می‌دهد.



شکل ۷- الگوی تخلیه در سه حالت تخلیه، الف) با لایه‌بندی پایدار یا دبی ضعیف ب) لایه‌بندی غیر یکنواخت ج) حالت تخلیه با دبی بیشینه (Imberger & Patterson, 1980)

یک، با بررسی تصاویر برداشت شده از الگوی لایه‌ها در فرآیند تخلیه می‌باشد.

نتایج اجرای سناریوهای موجود

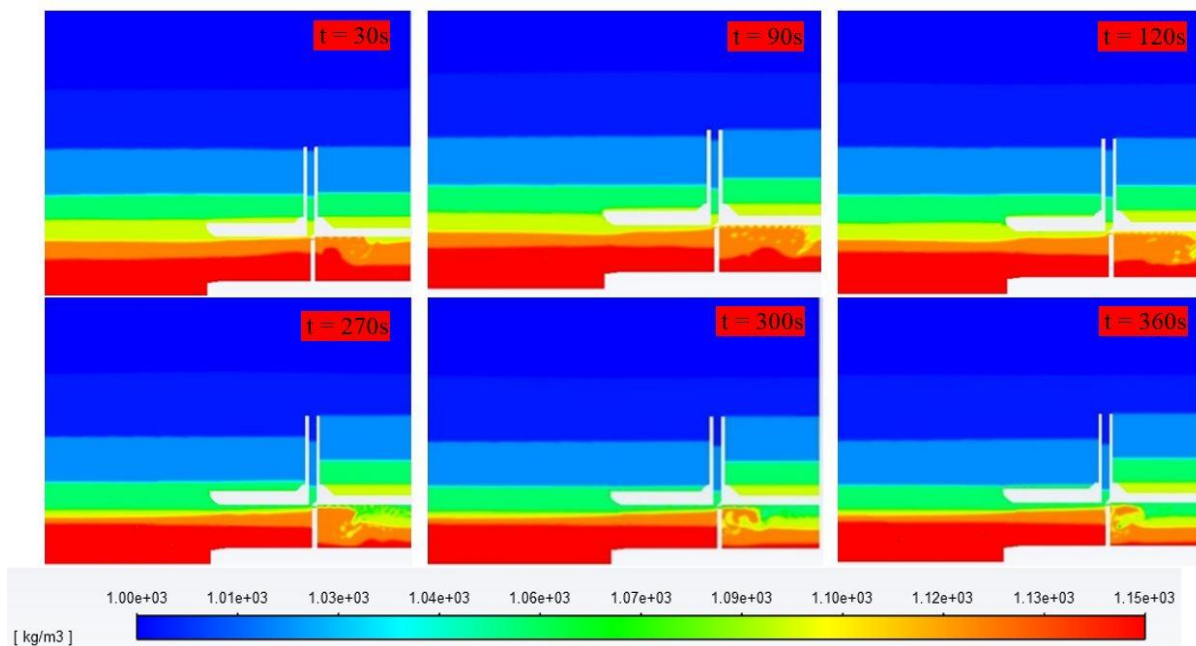
با اجرای ۵ سناریو موجود در این تحقیق که به ترتیب با دبی‌های ۱۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۹۰ مترمکعب بر ثانیه اجرا شده است، حالت‌های مختلف تخلیه از مجرا در یک مخزن لایه‌بندی شده مدل‌سازی و نمایش داده شد. در سناریو نخست که در شکل (۸) الگوی لایه‌ها در زمان تخلیه آن با دبی ۱۰ مترمکعب بر ثانیه نشان داده شده است، پایداری لایه‌ها در این دبی حفظ شد و لایه‌ها به صورت پایدار قبل از دریچه حرکت قائم دارند. توجه به نتایج تصاویر تخلیه، مقدار چگالی جریان عبوری از مجرا تقریباً به لایه مقابل آن وابسته بوده و لایه‌های دیگر نقش چندانی در مقدار چگالی تخلیه شده از مجرا را ندارند. الگوی خطوط جریان تشکیل یافته به سمت مجرا خروجی از نوع لایه‌ای پایدار بوده که این موضوع در نتایج مدل به‌وضوح مشاهده گردید. همچنین انتشار و تبادلات مؤثری مابین لایه‌های آب در جهت قائم در این سناریو مشاهده نگردید.

اوقات لایه‌بندی در مخازن به صورت یکنواخت نمی‌باشد اما به وسیله ترکیبی از یک لایه بالایی یکنواخت (قوی) با افزایش مشهود در چگالی نسبت به عمق و یک لایه بندی ضعیف در لایه پایینی مشخص می‌گردد. در حالت سوم حالتی است که دبی جریان خروجی در حالت بیشینه قرار داشته و نیروی مومنتوم جریان خروجی بسیار بزرگ‌تر از نیروی شناوری باشد در این حالت به عبارتی جریان لایه بندی چگالی را حس نمی‌کند. در

جدول ۳- اطلاعات چگالی و تراز هر لایه در مدل عددی

ردیف	تراز (متر)	چگالی آب (کیلوگرم بر متر مکعب)	هدایت الکتریکی (میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر)
۱	۸۶	۱۱۴۷/۵۰	۱۹۵/۵۰
۲	۹۰	۱۱۲۵	۱۷۵
۳	۹۵	۱۰۹۷/۵۰	۱۴۵
۴	۱۰۰	۱۰۶۱/۵۰	۹۷/۵۰
۵	۱۱۰	۱۰۲۸	۵۲/۵۰
۶	۱۲۳	۱۰۱۱	۲۴
۷	۱۴۰	۱۰۰۰	۱/۷۰

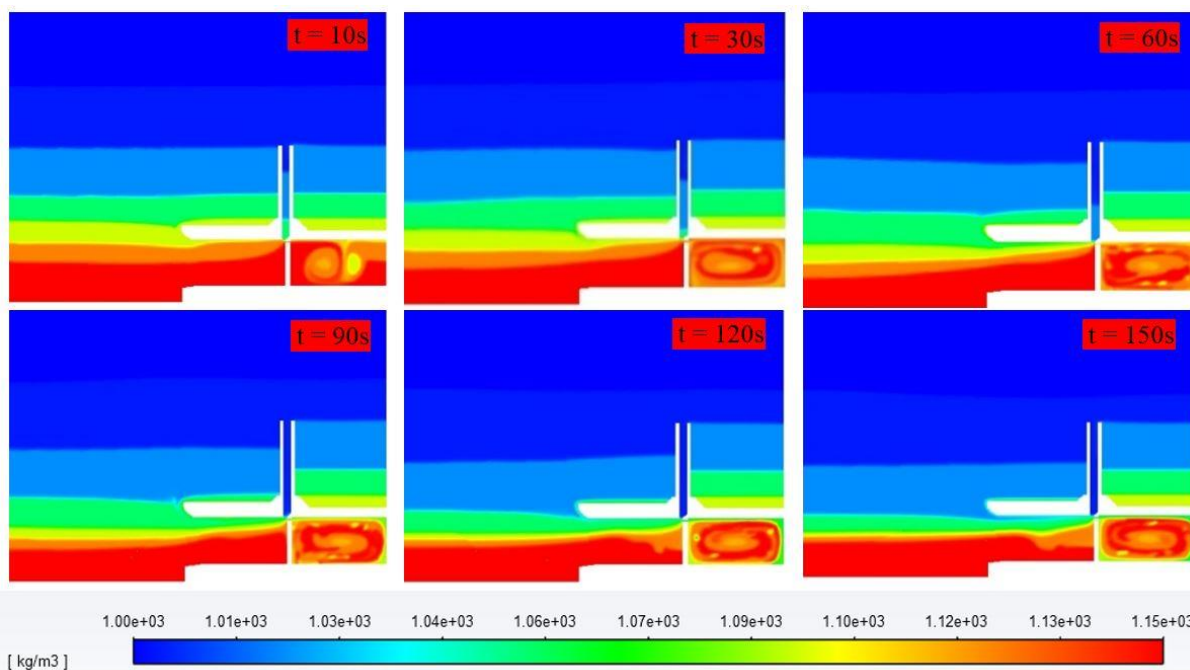
با توجه به تئوری موجود، باید سناریوهایی مطرح شود که به تئوری‌های فوق در قالب مدل عددی دست پیدا کرد. برای این منظور ۴ دبی ۱۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۹۰ متر مکعب بر ثانیه انتخاب شده تا سناریوهای پیش رو بر اساس آن‌ها طراحی گردد. سناریوهای عددی پیشرو بر اساس هندسه واقعی مجرا طرح ریزی شده است. مشخصات و تراز لایه‌ها در محیط لایه بندی شده در جدول (۳) ارائه گردیده است. هدف از تبیین این سناریوها بررسی میزان اختلاط لایه‌ها در دبی‌های مطرح شده و مقایسه شدت هر



شکل ۸- نتایج الگوی تخلیه با دبی ۱۰ متر مکعب بر ثانیه

دیگر به لایه مقابل آن وابسته نیست و لایه‌های زیرین در مقدار چگالی تخلیه شده از مجرا نقش دارند. در شکل (۹) الگوی لایه-بندی مخزن در هنگام تخلیه با دبی ۴۰ متر مکعب بر ثانیه نشان داده شده است.

در سناریو دوم که با دبی ۴۰ مترمکعب بر ثانیه اجرا شد، لایه‌بندی مخزن به‌طور خفیفی دچار اختلاط شد و می‌توان این دبی را مرز (حالت بینابینی) بین اختلاط و پایداری در نظر گرفت. توجه به نتایج مدل عددی، مقدار چگالی جریان عبوری از مجرا



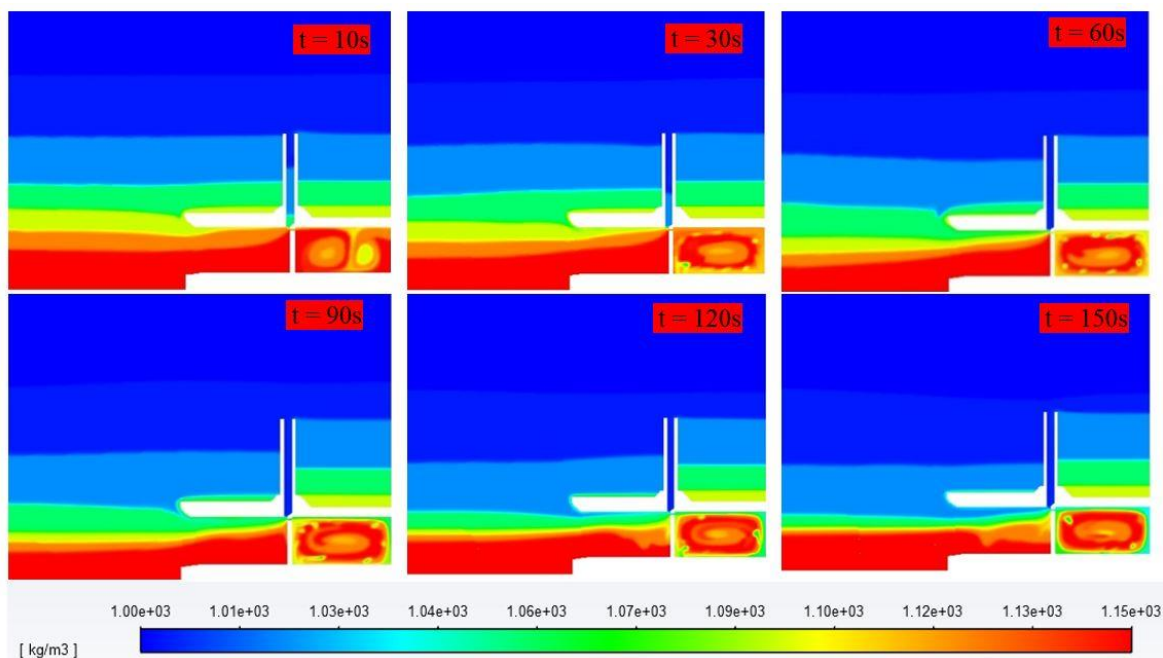
شکل ۹- نتایج الگوی تخلیه با دبی ۴۰ متر مکعب بر ثانیه

در هنگام تخلیه می‌گردد. عملاً اختلاط موثری بعد از دیواره هدایت مجرا اتفاق می‌افتد. در شکل (۱۰) الگوی لایه‌بندی مخزن در هنگام تخلیه با دبی ۵۰ متر مکعب بر ثانیه نشان داده شده است.

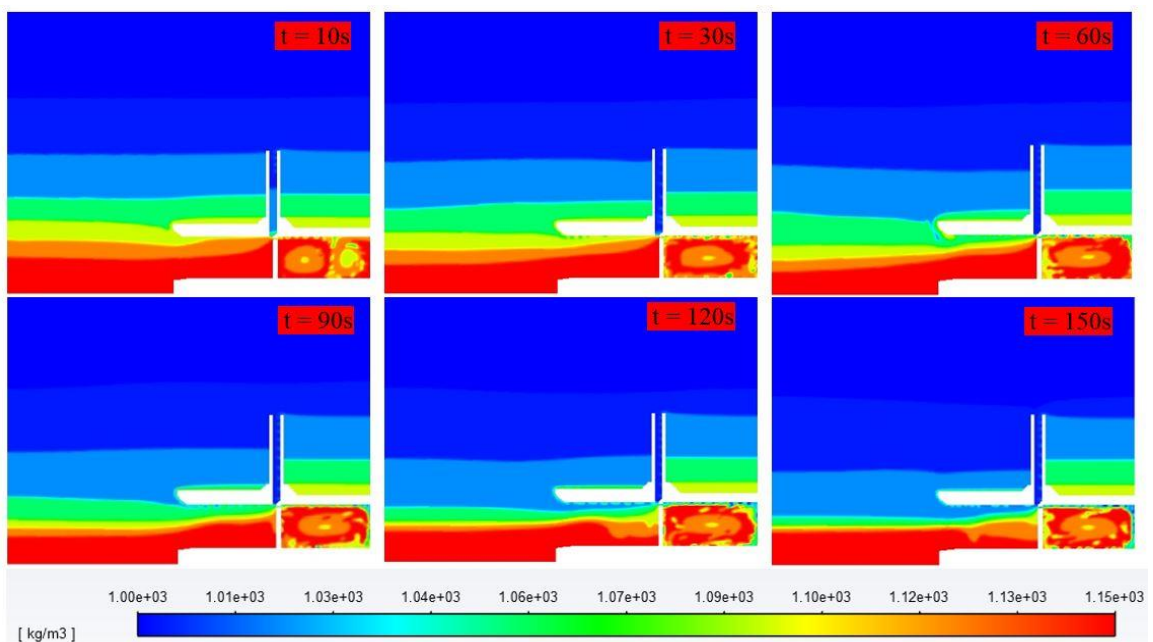
در سناریو سوم که با دبی ۵۰ مترمکعب بر ثانیه اجرا شد، با توجه به حرکت لایه‌ها در هنگام تخلیه، می‌توان نتیجه گرفت که در محدوده این دبی لایه‌بندی دچار اختلاط نسبتاً مشهودی

بر اساس چگالی لایه‌های بالایی، پایینی و مقابل مجرا می‌باشد و عملاً دیگر به لایه مقابل آن وابسته نیست. در شکل (۱۱) الگوی لایه‌بندی مخزن در هنگام تخلیه با دبی ۶۰ متر مکعب بر ثانیه نشان داده شده است.

در سناریو چهارم که با دبی ۶۰ مترمکعب بر ثانیه اجرا شد، در هنگام تخلیه و در محدوده‌ای بالاتر از محدوده سناریو قبلی، مخزن دچار اختلاط شده و لایه‌بندی روبروی مجرای ورودی دستخوش تغییر می‌گردد. مقدار چگالی جریان عبوری از مجرا



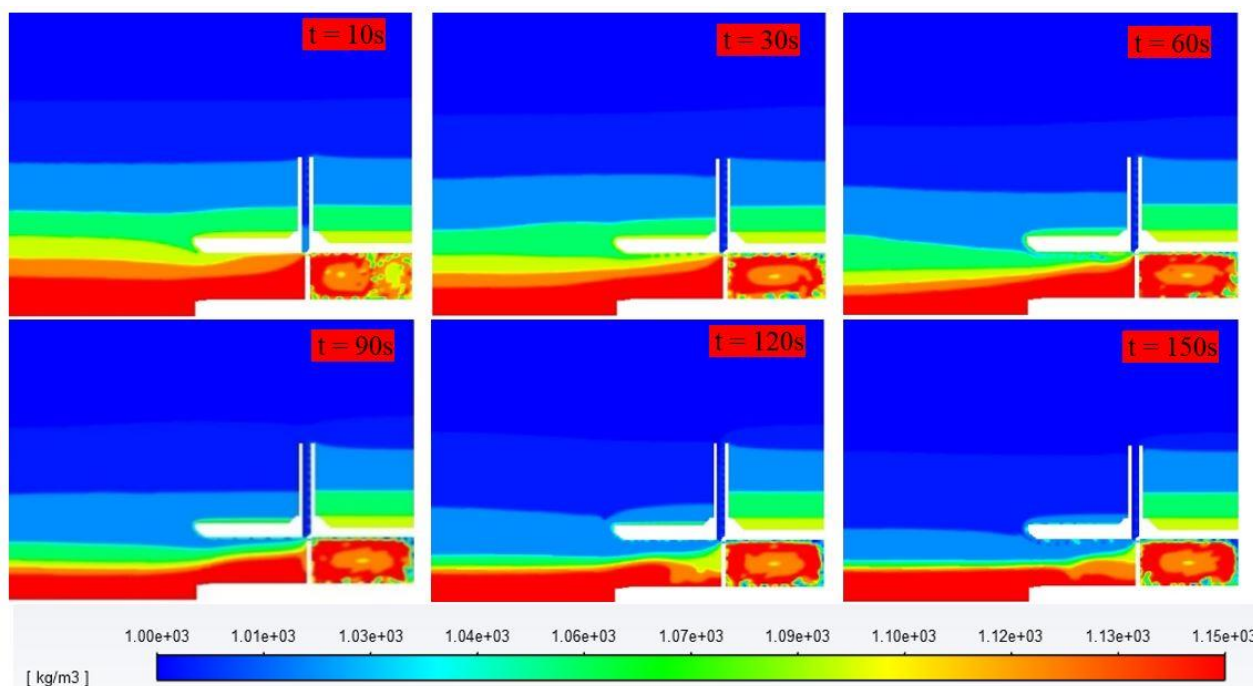
شکل ۱۰- نتایج الگوی تخلیه با دبی ۵۰ متر مکعب بر ثانیه



شکل ۱۱- نتایج الگوی تخلیه با دبی ۶۰ متر مکعب بر ثانیه

وجود نمی‌آید و فقط سرعت سقوط لایه‌ها و تخلیه آن‌ها بیشتر شده و در زمان کمتری نسبت به دبی ۶۰ مترمکعب بر ثانیه تخلیه می‌شود. در شکل (۱۲) الگوی لایه‌بندی مخزن در هنگام تخلیه با دبی ۹۰ متر مکعب بر ثانیه نشان داده شده است.

در سناریو پنجم که با دبی ۹۰ مترمکعب بر ثانیه اجرا شده، مخزن با شدت و سرعت بیشتری دچار اختلاط می‌شود. با توجه به نتایج سناریو چهارم و پنجم می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش دبی از ۶۰ مترمکعب به بالاتر، تقریباً تغییری در الگوی تخلیه به



شکل ۱۲- نتایج الگوی تخلیه با دبی ۹۰ متر مکعب بر ثانیه

نتیجه گیری

- شرایط الگوی اختلاط لایه‌ها خصوصا در مقابل مجرا در دبی‌های خروجی ۵۰ و ۶۰ متر مکعب بر ثانیه مشاهده می‌شود.
- شرایط اختلاط شدید لایه‌ها در دبی ۹۰ متر مکعب بر ثانیه و بالاتر مشاهده می‌گردد.
- دبی ۱۰ متر مکعب بر ثانیه مجاری تخلیه توانایی برداشت از لایه زیرین دریاچه را ندارد ولی از دبی ۴۰ متر مکعب بر ثانیه به بعد، از لایه‌های زیرین نیز برداشت می‌شود که هرچه قدرت تخلیه بیشتر باشد، مقدار این برداشت نیز بیشتر است.

نتایج نشان می‌دهد به منظور عبور ایمن لایه چگال‌تر بدون امکان اختلاط با لایه‌های کم چگال محدود ساختن دبی تخلیه به میزان کمتر از ۴۰ متر مکعب بر ثانیه انتخاب هوشمندانه‌ای می‌تواند باشد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

در این پژوهش تلاش شد تا اندرکنش هیدرودینامیکی فرآیند تخلیه از مجرا با محیط پیرامون در مخازن لایه‌بندی شده و تأثیر مومنتم (دبی) جریان تخلیه در این پدیده مورد مطالعه قرار گیرد. مدل‌سازی این پدیده در نرم افزار انسیس فلونت انجام شده و از مدل VOF و روش SIMPLE و گسسته‌سازی صریح استفاده شده است. مدل آشفتگی مورد نظر K-Epsilon RNG می‌باشد. با انجام این پژوهش، در گام نخست توانمندی مدل عددی در سناریو مشابه با مدل آزمایشگاهی مورد تایید قرار گرفت. با توسعه سناریوها در مدل عددی و تحلیل نتایج آن، موارد زیر ارائه می‌گردد:

- شرایط الگوی لایه بندی پایدار تا دبی خروجی ۱۰ متر مکعب بر ثانیه در مخزن مشاهده می‌شود.
- شرایط الگوی حالت بینابینی در مرز اختلاط لایه‌ها در دبی خروجی ۴۰ متر مکعب بر ثانیه در مخزن مشاهده می‌گردد.

REFERENCES

- Ardalan, H., Vafaeim F., Azizi, M., Gohary Kamel, D. and Kalateh Arabi, A., (2018). 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*, 9(33), pp.51-58.
- Bartosiewicz, Y., Lavieville, J., Seynhaeve, J. M. (2008). A first assessment of the NEPTUNE-CFD code: Instabilities in a stratified flow comparison between the VOF method and a two-field approach.
- Behmanesh J., Hamzhepour S., Mohammadnejad B. (2012). Evaluation of water quality conditions in dam reservoirs using two-dimensional model CE-QUAL-W2. *11th Iran Hydraulic Conference*, Urmia University, Iran, November 17-18 (InFarsi)

- Faghihirad S., Ardalan H., Nikkhah A., Esfandiarnajad A. (2020). 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): 1-23 (In Farsi)
- Gaillard, J., (1984). Multilevel Withdrawal and water Quality. *Journal of Environmental Engineering*. ASCE, Vol. 110, No. I. February, PP. 123-130.
- Graeme C. Hocking, Bradford S. Sherman, and John C. Patterson. (1988). algorithm for selective withdrawal from stratified reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*. Ng. Vol. 114, No. 7, July, 1988.
- Hutchinson, G. E.; Löffler, H. (1956). The Thermal Classification of Lakes. *PNAS*. 42 (2): 84-86. Bibcode:1956PNAS...42...84H.
- Imberger, J. and Patterson, J. C. (1980). "Dynamic Reservoir Simulation Model-DYRESM:5. In Transport Models for Inland and Coastal Waters". *Academic Press New York*. Proceedings of a Symposium on Predictive Ability, Berkeley, California, August 18-20, 1980. p 310-361, 12 fig, 36 ref
- Jamali, M., Seymour, B, and Kasaiian, R., (2005). Numerical and experimental study of flow of a stratified fluid over a sill towards a sink, *Physics of Fluids*, 17 (057106).
- Khosravi J., Hashemi Mofrad A., Azhdari Moghaddam M., Khajepour A. (2015). Simulation of thermal, salinity and dissolved oxygen layering in Shirin Dareh dam reservoir using two-dimensional model CE-QUAL-W2. *10th International Congress of Civil Engineering*. Faculty of Civil Engineering, Iran, Tabriz. (In Farsi)
- Lewis, William M., Jr. (1983). A revised classification of lakes based on mixing. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 40 (10): 1779-1787. doi:10.1139/f83-207. Archived from the original (PDF) on 6 March 2009.
- Palmer, M. (2001). *Water Quality Modeling: A Guide to Effective Practice*. Washington, DC: World Bank. © World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/13914> License: CC BY 3.0 IGO."
- Raphael, J.M. (1962). Prediction of temperatures in rivers and reservoirs. *J. Power Div., Proc. ASCE*, 88:p.157-181.
- Reynolds, C.S. (1992). "Daynamics, selection and composition of phytoplankton in relation to vertical structure in lakes". *Arch Hydrobiol. Beih Ergbn. Limnologie*, 35, pp. 13-31.
- Spigel, R., Farrant, B. (2010) Selective Withdrawal Through A Point Sink And Pycnocline Formation In A Linearly Stratified Flow. *Journal of Hydraulic Research*.
- Wetzel, Robert G. (2001). *Limnology: Lake and River Ecosystems* (Third ed.). New York: Academic Press. ISBN 978-0-12-744760-5.
- White, B.L. Helfrich, K, R. (2007). Gravity Currents and Internal Waves in a Stratified Fluid. *Journal of Fluid Mechanics*.
- Zouabi-Aloui, B., Adelana, M., Gueddari, M. (2015). Effects of selective withdrawal on hydrodynamics and water quality of a thermally stratified reservoir in the southern side of the Mediterranean Sea: a simulation approach. *Environ Monit Assess*