

بررسی تاثیر شرایط مخزن بر اختلاط مصنوعی لایه بندی حرارتی

بیژن کیانوش¹، داود احمدیار²

1- کارشناسی ارشد مهندسی عمران آب-گرایش هیدرولیک، تقاطع میرداماد و ولیعصر، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

2- استادیار گروه مهندسی عمران، تقاطع میرداماد و ولیعصر، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

چکیده

پدیده لایه بندی حرارتی که بیشتر در ماه های گرم سال رخ می دهد، پارامترهای کیفی آب مخزن را در ترازهای مختلف آبگیری به شدت تحت الشعاع قرار می دهد. روش مرسوم برای حذف این پدیده مخرب حذف آن توسط هوادهی از کف مخزن می باشد. در این مطالعه از یک مدل کاملاً سه بعدی دینامیک سیالات محاسباتی برای مطالعه پدیده لایه بندی حرارتی در یک مخزن و همچنین بر هم زدن مصنوعی آن استفاده شد. دلیل ترجیح مدل کاملاً سه بعدی به مدل های یک و دو بعدی، جزییات بسیار بیشتر قابل تولید توسط آنهاست به طوری که درک را نسبت به پدیده فیزیکی چند برابر می نماید. نتایج تولید شده توسط مدل تطابق بسیار خوبی با داده های تجربی دارد. بر اساس نتایج به دست آمده با تغییر هندسه مخزن و چیدمان هواده ها، تغییرات پروفیل حرارتی و عملکرد فرآیند هوادهی متفاوت خواهد بود.

واژه های کلیدی: لایه بندی حرارتی، اختلاط مصنوعی، دینامیک سیالات محاسباتی، پلوم حباب

1. مقدمه

تغییرات دما و توسعه لایه‌بندی دمایی در دریاچه‌های مناطق معتدل و مخازن سد‌های بزرگ معمولاً در فصول زمستان و تابستان اتفاق می‌افتد. در طی این دوره ستون آب معمولاً به سه لایه عمودی مجزا شامل 1- اپیلیمنیون 2- متالیمنیون (ترموکلاین) و 3- هیپلیمنیون تقسیم می‌شود. این لایه بندی به علت تفاوت در چگالی آب (ناشی از اختلاف دما) در ترازهای مختلف حاصل می‌شود [1]. همچنین تغییر در چگالی آب‌های ورودی و تنش‌های ناشی از سرعت باد می‌تواند در ایجاد لایه‌بندی و عمق لایه اختلاط موثر باشد [2]. بدیهی است در فصولی که لایه‌بندی اتفاق می‌افتد، تغییر در درجه حرارت لایه‌ها، کیفیت فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آب مخزن در ترازهای مختلف، را تغییر می‌دهد [3]. دمای آب بر روی نوع و میزان فعالیت گونه‌های بیولوژیکی، انحلال گازها، سرعت واکنش‌های شیمیایی و سرعت رسوب‌گذاری تاثیر می‌گذارد، به طوری که به ازای افزایش هر 10 درجه سانتیگراد دما، سرعت کلیه واکنش‌های شیمیایی و بیوشیمیایی دو برابر می‌شود. در فصل تابستان به علت بالا بودن درجه حرارت و شدت تابش نور خورشید، رشد جلبک‌ها در لایه‌های سطحی به شدت افزایش می‌یابد که این امر می‌تواند کیفیت آب را از نظر رنگ، بو و طعم دچار تغییرات زیادی نماید. از طرفی دیگر به دلیل کاهش انحلال اکسیژن در آب و زیاد شدن سرعت تجزیه مواد تجمع یافته در رسوبات، شرایط در ترازهای عمقی آب می‌تواند کاملاً بی‌هوایی شده و منجر به تشکیل ترکیبات مولد بوها و یا طعم نامطبوع گردد [4]. آبگیری از ترازهای مختلف مخزن و یا تصفیه آب خروجی از مخزن از روش‌های مرسوم هستند. هیچ‌کدام از این روش‌ها لایه‌بندی را حذف نمی‌کنند و تنها تلاش برای کم کردن اثرات آن را دارند. تصفیه آب خود باعث افزوده شدن مواد شیمیایی به آب شده و همچنین هزینه بالایی دارد. روش مناسب‌تر برای حذف این پدیده مخرب و کم کردن اثرات آن، ایجاد اختلاط مصنوعی در مخزن می‌باشد. در بین دو روش موجود برای اختلاط مصنوعی، هوادهی به قسمت‌های تحتانی مخزن روش معمولتر برای نیل به این هدف می‌باشد. در روش هوادهی، با نصب تاسیساتی در کف مخزن و پمپاژ هوا، سیال داخل مخزن به حرکت درآمده و از قسمت‌های پایینی به قسمت‌های بالایی انتقال داده می‌شود. در جایی که نیروی شناوری رو به بالای تولید شده توسط پلوم حباب برابر با نیروی شناوری رو به پایین تولید شده از سیال سبک‌تر لایه‌های بالاتر شود، سیال همراه پلوم شروع به نفوذ افقی در لایه‌های سیال اطراف خود می‌کند. این فرایند تا هنگامی که هر دسته حباب‌ها به کف برسند ادامه پیدا خواهد کرد. در صورتیکه فرایند هوادهی به مدت طولانی ادامه پیدا کند قادر به اختلاط کامل مخزن خواهد بود [5]. روش دوم ایجاد جت‌های بزرگ و نیرومند در مخزن توسط تجهیزات مکانیکی می‌باشد که به علت نیاز به تجهیزات پیشرفته و همچنین بازده کمتر نسبت به روش هوادهی مرسوم نمی‌باشد.

تاریخچه بررسی وضعیت لایه‌بندی و تکنیک‌های تحلیل سیستم‌ها به منظور کنترل کیفیت آب در بهره‌برداری از مخازن به اوایل دهه هشتاد میلادی باز می‌گردد. از آن زمان تا کنون از انواع مدل‌های ریاضی یک بعدی و دو بعدی برای مطالعه اثرات این پدیده و همچنین راه کارهای کم کردن اثرات مخرب آن بهره‌جسته شده است. از معروف‌ترین مدل‌های دو بعدی می‌توان به CE-QUAL-W2 و از معروف‌ترین مدل‌های یک بعدی می‌توان به DYRESM اشاره کرد که این مدل یک بعدی توانایی مدل‌سازی فرایند اختلاط مصنوعی را نیز دارا می‌باشد [5]. استفاده از مدل‌های سه بعدی برای مطالعه این پدیده بسیار محدود بوده و تا کنون تنها در یک کار پژوهشی گزارش شده است [6]. جزئیات گزارش شده توسط یک مدل سه بعدی بسیار گسترده‌تر از مدل‌های یک بعدی و دو بعدی خواهد بود اما به دلیل نیاز این گونه مدل‌ها به منابع عظیم رایانه‌ای، استفاده از آنها برای کارها با مقیاس بزرگ گران قیمت جلوه خواهد کرد.

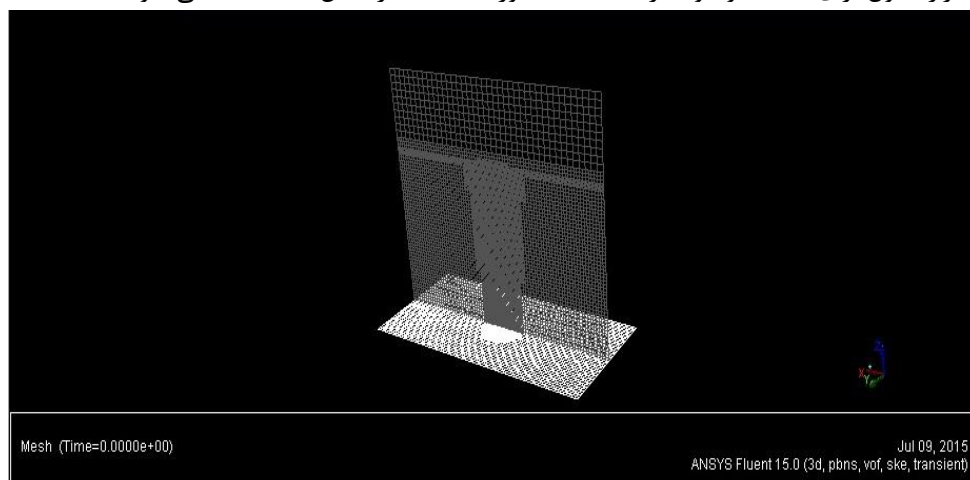
در این پژوهش از یک مدل کاملاً سه بعدی دینامیک سیالات محاسباتی¹ با استفاده از نرم افزار حجم محدود Fluent برای مدل سازی پدیده اختلاط مصنوعی بهره گرفته شده است. برای مدل سازی پلوم حباب از مدل فاز گسسته² و برای لحاظ کردن تغییرات سطح تماس آب با هوای بالای آن از مدل حجم سیال³ استفاده شده است.

2. جزئیات مدل دینامیک سیالات محاسباتی

برای مدل سازی پلوم حباب از ترکیب مدل فاز گسسته و مدل حجم سیال استفاده شد. در ادامه جزئیات ساخت هندسه، شبکه بندی و معادلات حاکم بر مدل ریاضی آمده است.

1.2. هندسه و شبکه بندی

دو مخزن به شکل مکعب مستطیل مورد مطالعه قرار گرفت. مخزن اول با ابعاد 1 متر طول، 50 سانتیمتر عرض و 60 سانتیمتر ارتفاع می باشد که در آن تنها یک هواده جاگذاری شده است. مخزن دوم با ابعاد 2 متر طول، 50 سانتیمتر عرض و 60 سانتیمتر ارتفاع می باشد که در آن دو هواده به فاصله 60 سانتیمتر از هم جاگذاری شده اند [6]. ساخت هندسه و شبکه بندی در نرم افزار Gambit انجام شد. ابعاد اولیه در نظر گرفته شده برای 5 سانتی متر می باشد که در مناطق دارای گرادیان های بالای سرعت تا 3 درجه شبکه اولیه ریز تر شده است که تعداد نهایی سلول ها را به 318 هزار سلول برای حالت تک هواده و 524 هزار سلول برای حالت دو هواده رساند. شبکه مورد استفاده در شکل 1 مشاهده می شود.



شکل 1 - شبکه مورد استفاده برای آزمایش تک هواده

2.2. معادلات حاکم بر مدل ریاضی

¹ Computational Fluid Dynamics

² Discrete Phase Method

³ Volume of Fluid

معادله استاندارد بقای جرم عبارت است از [7]:

(1)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0$$

بقای مومنتوم:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) =$$

(2)

$$-\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F}$$

مومنتوم⁴ اضافه شده از سوی حباب ها به محیط سیال از طریق ترم \vec{F} صورت می پذیرد. برای لحاظ کردن اثرات آشفتگی، مدل دو معادله ای $k - \varepsilon$ با ضرایب اصلاح شده به کار گرفته شد. علاوه بر حل این معادلات، معادله حجم سیال برای ردیابی سطح تماس بین آب و هوا به کار گرفته می شود.

از آنجایی که استفاده از روش حجم سیال برای مدل سازی تک تک حباب ها هزینه محاسباتی بسیار بالایی دارد، برای مدل سازی پلوم از روش فاز گسسته استفاده گردید. این روش برای مدل سازی رژیم جریان حبابی با غلظت کم بسیار کارآمد می باشد. در این روش حباب ها در چهارچوب لاگرانژی⁵ به ذرات کروی با حجم تهی مدل می شوند. از این رو با افزایش غلظت رژیم جریان دقت روش کم خواهد شد. معادله تعادل نیرویی که برای هر ذره حل می شود عبارت است از [7]:

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} =$$

(3)

$$F_D(\vec{u} - \vec{u}_p) + \frac{\bar{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F}_p$$

اندیس p در این فرمول اشاره به فاز گسسته دارد. این رابطه بیان می کند که شتاب ذرات ناشی از نیروی دراگ⁶، نیروی جاذبه و هر نیروی اضافی دیگری است. از نیروهای اضافی دیگر می توان به نیروی لیفت⁷ و نیروی جرم اضافه شده⁸ اشاره کرد. از بین تمام این نیروها نیروی جاذبه و نیروی دراگ نقش اساسی تری را دارند؛ لذا از تاثیر بقیه نیروها می توان صرف نظر کرد. برای تاثیر نیروی دراگ با توجه به اینکه حباب ها در طول حرکت خود دچار تغییر شکل خواهند شد و از شکل کروی به شکل بیضوی در خواهند آمد، از قانون دراگ ذرات غیر کروی موجود در نرم افزار استفاده شد.

برای لحاظ کردن اثر تغییر دما روی مشخصات آب، با استفاده از توابع از تعریف شده توسط کاربر⁹ برنامه نویسی لازم انجام گردید. تغییرات چگالی، کشش سطحی، ویسکوزیته و انتقال حرارت آب لحاظ شدند. بدون برنامه نویسی های انجام شده قطعا نتایج تولید شده توسط مدل عددی دارای خطای بسیاری می بودند. همچنین برای کم کردن هزینه محاسباتی حباب هایی که به سطح آب می رسیدند از دامنه محاسباتی حذف شده و اطلاعات آنها در لحظه ترکیدن در سطح آب در یک فایل متنی ذخیره می گردد. شرایط اولیه¹⁰ در نظر گرفته شده برای مدل مطابق کار آزمایشگاهی آقایان Yum, K., et al. (2008) می

⁴ Momentum

⁵ Lagrangain

⁶ Drag Force

⁷ Lift Force

⁸ Added Mass Force

⁹ User Defined Function

¹⁰ Initial Condition

باشد. دیواره ها اطراف مخزن از جنس شرط مرزی دیوار¹¹ و شرط مرزی بالای هوا از جنس فشار خروجی¹² در نظر گرفته شد. بقیه شرایط اعم از مقادیر فشار عملکردی، آشفتگی در مرز خروجی و غیره مطابق کار Yum, K., et al. (2008) می باشد.

3. بحث روی نتایج

حجم مخزن مورد بررسی برای تک هواده 300 لیتر و برای دو هواده 600 لیتر می باشد. نازل های هوا با قطر 3 سانتیمتر و با فاصله 5 سانتی متری از کف جانمایی شده است. از آنجایی که هدف آزمایشات بررسی تفاوت اختلاط مصنوعی با تک هواده و دو هواده می باشد لذا شرایط انجام دو آزمایش یکسان می باشد. این شرایط شامل پروفیل دمایی، قدرت لایه بندی و میزان شار هوای خارج شده از هر هواده می باشد. در مورد آزمایش با دو هواده این نکته قابل ذکر است که هوای خارج شده از هر هواده معادل هوای خارج شده از آزمایش تک هواده می باشد. قدرت لایه بندی را می توان مطابق فرمول 4 برآورد نمود که این عدد به فرکانس استغراق معروف است¹³ [6]:

$$N = \left(-\frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz} \right) \quad (4)$$

اطلاعات مربوط به آزمایشات در جدول 1 آمده است. عمق آب در مخزن برای تمامی آزمایشات برابر 60 سانتیمتر می باشد. همچنین لایه بندی در ابتدای شروع حل عددی به صورت خطی به آن اعمال شد؛ به طوری که دمای سطح آزاد معادل حداکثر دما در جدول 1 و دمای کف معادل حداقل دما ذکر شده در این جدول جاگذاری شده است. در این جدول حرف A اشاره به آزمایش تک هواده و حرف B اشاره به آزمایش دو هواده دارد.

جدول 1 - مشخصات آزمایشات

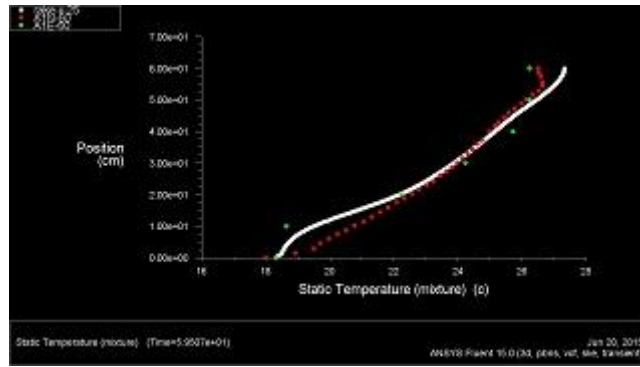
شدت جریان هوا (میلی لیتر بر دقیقه)	$N(s^{-1})$	حداقل دما (سانتیگراد)	حداکثر دما (سانتیگراد)	آزمایش
200	0.197	18	28	A-1
200	0.189	19	28	B-1

همانطور که از نتایج آزمایشگاهی مشخص است هیچ گاه فرایند اختلاط مصنوعی لایه های تحتانی مخزن را تحت تاثیر قرار نمی دهد و این لایه تا انتهای کار دست نخورده باقی می ماند. لذا در مدل سازی عددی این تحقیق برای محاسبه زمان لازم برای اختلاط کامل از 15 سانتی متر پایین مخزن صرف نظر شده است. در ادامه نتایج کار آزمایشگاهی آقایان Yum, K., et al. (2008) و مدل عددی مربوط به آزمایش های A1 و B1 آورده شده است. شکل های 2 الی 5 بیانگر سری های زمانی دما در مخزن می باشند که در حد فاصل بین پلوم و دیواره کناری به فاصله 25 سانتیمتر از پلوم برای حالت تک هواده و در نقطه میانی مخزن برای حالت دو هواده اندازه گیری و مدل سازی شده اند. در تمامی نمودار های ارائه شده نقاط سبز رنگ معرف داده های حاصل از کار آزمایشگاهی، نقاط قرمز حاصل کار عددی آقایان Yum, K., et al. (2008) نقاط سفید رنگ معرف نتیجه تحقیق حاضر است.

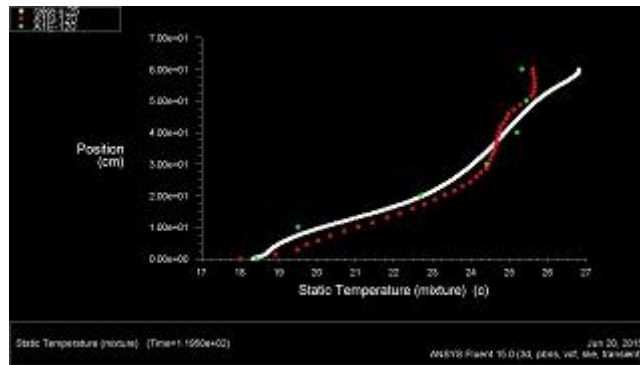
¹¹ Wall Boundry Condition

¹² Pressure Outlet Boundry Condition

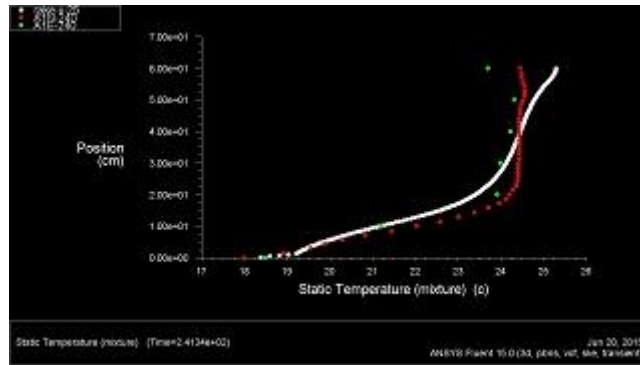
¹³ Buoyancy Frequency



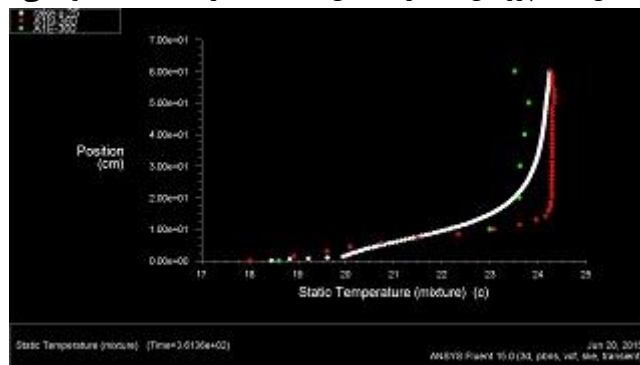
شکل ۱ - پروفیل دما برای مدل A-1 بعد از 60 ثانیه هوادهی



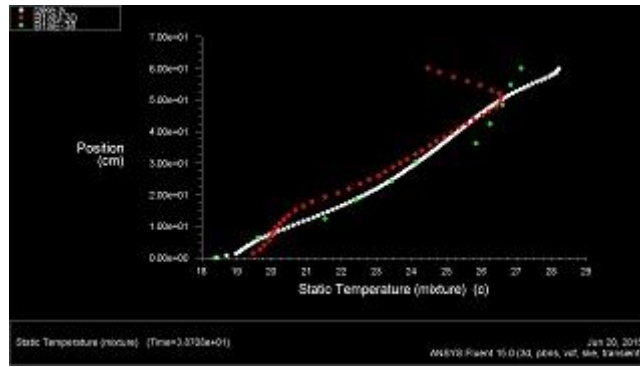
شکل ۲ - پروفیل دما برای مدل A-1 بعد از 120 ثانیه هوادهی



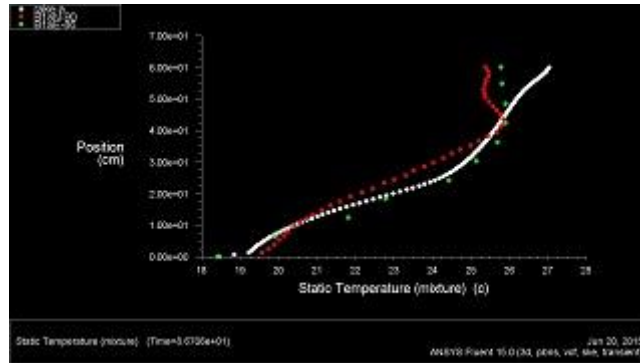
شکل 3 - پروفیل دما برای مدل A-1 بعد از 240 ثانیه هوادهی



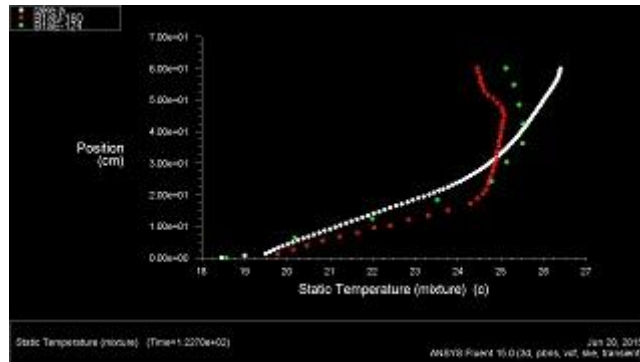
شکل 4 - پروفیل دما برای مدل A-1 بعد از 360 ثانیه هوادهی



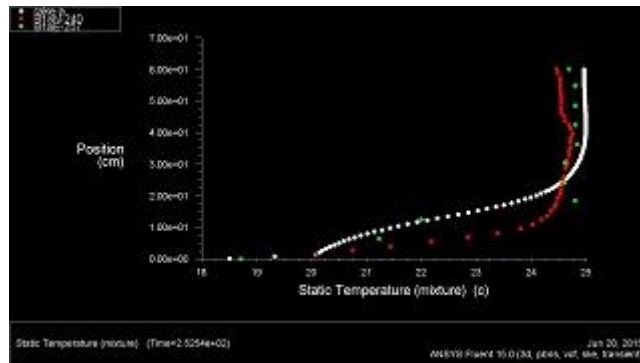
شکل ۵ - پروفیل دما برای مدل B-1 بعد از 38 ثانیه هوادهی



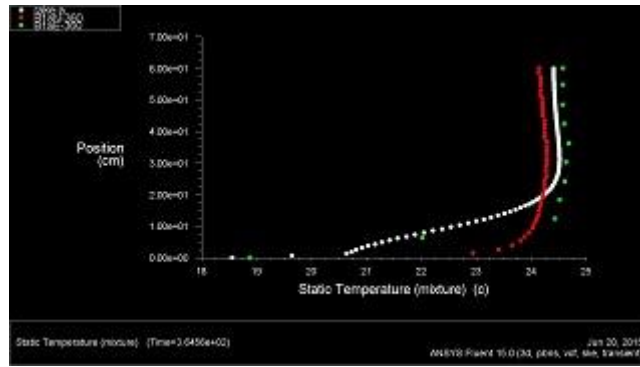
شکل 6 - پروفیل دما برای مدل B-1 بعد از 86 ثانیه هوادهی



شکل 7 - پروفیل دما برای مدل B-1 بعد از 124 ثانیه هوادهی



شکل 8 - پروفیل دما برای مدل B-1 بعد از 257 ثانیه هوادهی



شکل 9 - پروفیل دما برای مدل B-1 بعد از 360 ثانیه هوادهی

همانطور که از نمودار های ارایه شده مشخص است نتایج حاصل از تحقیق حاضر نسبت به تحقیق قبلی برتری محسوسی را از خود نشان می دهند. در هر دو آزمایش پس از سپری شدن حدود 360 ثانیه لایه بندی حرارتی در مخزن بر هم خورده است. اما در آزمایش با دو هواده بر خلاف انتظار با توجه به اینکه انرژی تزریق شده به سیستم دو برابر می باشد اما باز هم زمان لازم برای حذف لایه بندی معادل تک هواده بوده است. لذا بازده اختلاط مصنوعی در این آزمایش طبیعتاً کمتر از حالت تک هواده می باشد. معیار سنجش بازده فرایند هوادهی به مخزن فرمول زیر می باشد :

$$\eta = \frac{\Delta E_p}{\rho^* Q_0 H_A \ln(1 + \frac{H}{H_A}) \Delta t} \quad (5)$$

در این رابطه ΔE_p بیانگر تغییرات در میزان انرژی پتانسیل مخزن و Δt مدت زمان لازم برای کامل شدن فرایند اختلاط می باشد. عبارت $\rho^* Q_0 H_A \ln(1 + \frac{H}{H_A})$ بیانگر کار لازم برای فشرده کردن هوا در عمق H با شدت جریان Q_0 در فشار اتمسفر می باشد. لذا رابطه (5) برابر نسبت انرژی پتانسیل به انرژی جنبشی می باشد [6]. با توجه به این فرمول بازده اختلاط مصنوعی برای هر دو آزمایش محاسبه شده است:

جدول 2 - مشخصات آزمایشات

آزمایش	قطر حباب (میلیمتر)	سرعت لغزش حباب(متر بر ثانیه)	مدت زمان اختلاط(ثانیه)	بازده اختلاط (درصد)
A-1	1.01	0.15	368.2	6.4
B-1	1.01	0.15	362.6	2.5

همانطور که از مقدار به دست آمده برای بازدهی مشخص است در حالت دو هواده بازده اختلاط مصنوعی کاهش یافته است. دلیل آن نزدیکی دو پلوم به یکدیگر است طوری که بخشی از انرژی تزریقی به سیستم صرف اندرکنش بین دو پلوم شده و انرژی جنبشی تولیدی توسط پلوم در نقاطی که سیال تحت تاثیر هر دو پلوم می باشد صرف اصطکاک و در نهایت تلف شده است. لذا به نظر می رسد جاگذاری هواده ها به نحوی باشد که ترجیحاً خطوط جریان ناشی از آنها تداخل نداشته باشند تا هر پلوم بتواند انرژی خود را صرف اختلاط مصنوعی نماید.

در این پژوهش از یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی به منظور بررسی اختلاط مصنوعی در یک مخزن با لایه بندی پایدار استفاده گردید. با توجه به محدودیت های مدل های یک بعدی و دو بعدی در لحاظ کردن هندسه مخزن و دیگر فیزیک های پیچیده موجود در فرایند اختلاط مصنوعی از یک مدل کاملا سه بعدی استفاده گردید. همچنین به دلیل اینکه مدل های سه بعدی جزئیات بیشتری از فرایند اختلاط ارائه می دهند، به خوبی می توانند درک ما را از فیزیک پیچیده فرایند اختلاط مصنوعی در مخزن بالا ببرند. با توجه به اینکه نتایج به دست آمده از مدل تطابق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند، می توان آن را تکمیل کننده مناسبی برای آزمایشات هزینه بر در سناریو های مختلف دانست. نتایج این تحقیق نشان می دهد که با تغییر شرایط مخزن و اضافه نمودن هواده به آن الزاما منجر به افزایش راندمان اختلاط مصنوعی نخواهد شد. بهتر است جانمایی هواده ها طوری باشد تا کمترین تداخل را با یکدیگر داشته باشند تا انرژی تزریقی به مخزن بتواند با بازده هر چه تمام تر صرف اختلاط مصنوعی شود. همچنین بررسی جانمایی های مختلف هواده ها به طوری که بتواند با حداکثر کارایی به فعالیت پردازند نیاز به بررسی بیشتر دارد که موضوع مقالات آتی خواهد بود.

مراجع

- [1] Reynolds, C.S. 1992. Dynamics, selection and composition of phytoplankton in relation to vertical structure in lakes. *Arch Hydrobiol. Beih Ergbn. Limnol.* 35, 13-31.
- [2] Armengol, J., Crespo, M., Morgui, J. A., and Vidal, A. 1986. Phosphorus budget and forms of phosphorus in the Sau Reservoir sediment: an interpretation of the limnological record. *Hydrobiologia*. Vol. 143, pp 331-336.
- [3] Ford, D. E., and Thornton, K.W. 1979. Time and length scales for the one-dimensional assumption and its relation to ecological models. *Water Resources Res.*, Vol. 15, pp 113-120.
- [4] حمیدرضا توحیدی. 1377. تحقیق در رابطه با عوامل موثر در تغییرات کیفی آب مخزن سد طرق و ارائه بهینه کردن آب دریاچه. کمیته تحقیقات کاربردی شرکت آب منطقه ای خراسان رضوی (وزارت نیرو).
- [5] Etemad-Shahidi, A., Faghihi, M., & Imberger, J. (2010). Modelling thermal stratification and artificial de-stratification using DYRESM; case study: 15-Khordad Reservoir.
- [6] Yum, K., Kim, S. H., & Park, H. (2008). Effects of plume spacing and flowrate on destratification efficiency of air diffusers. *Water research*, 42(13), 3249-3262.
- [7] A. FLUENT, "ANSYS FLUENT Theory Guide," 2011.
- [8] Asaeda, T., & Imberger, J. (1993). Structure of bubble plumes in linearly stratified environments. *Journal of Fluid Mechanics*, 249, 35-57.