

بررسی اثر قدرت لایه‌بندی حرارتی بر بازده اختلاط مصنوعی در مخازن سدها

بیژن کیانوش¹، داود احمدیار^{2*}

1- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی آب (گرایش هیدرولیک)، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
2- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

*Ahmadyar@kntu.ac.ir

چکیده - پدیده‌های لایه‌بندی و اختلاط در مخزن سد می‌توانند پارامترهای کیفی آب را در طول سال در ترازهای مختلف آبیگری به مقدار زیادی تحت‌الشعاع قرار دهند. یک روش مرسوم برای از بین بردن لایه‌بندی و ایجاد اختلاط در مخزن، هوادهی به بدنه آبی از کف مخزن می‌باشد. در صورت طراحی صحیح سیستم هواده با توجه به قدرت لایه‌بندی می‌توان بازده فرایند را تا حد امکان افزایش داد. در این پژوهش از یک مدل تجاری کاملاً سه‌بعدی دینامیک سیالات محاسباتی (Fluent) برای مطالعه اختلاط مصنوعی لایه‌بندی حرارتی در یک مخزن آزمایشگاهی استفاده شده است. زیربرنامه‌هایی به منظور حل دقیق مسأله مورد بررسی، تحت عنوان توابع UDF به کد اصلی نرم‌افزار اضافه گردیدند. بر اساس نتایج حاصل شده از مدل عددی، قدرت لایه‌بندی عامل تعیین کننده‌ای در میزان انرژی لازم برای اختلاط کامل در مخزن می‌باشد. همچنین با بررسی اختلاط در دو مخزن با قدرت لایه‌بندی برابر، مشخص گردید که با کاهش میزان هوای تزریق شده به سیستم، میزان کم‌تری از انرژی ورودی به سیستم طی آشفتگی اضمحلال می‌یابد و در نتیجه آن، بازده اختلاط مصنوعی افزایش پیدا خواهد کرد. با توجه به نتایج پژوهش حاضر توصیه می‌شود طراحی سیستم هواده به گونه‌ای باشد که عدد پلوم در محدوده بیش از 400 قرار گیرد.

کلیدواژگان: لایه‌بندی حرارتی، اختلاط مصنوعی، دینامیک سیالات محاسباتی، پلوم حباب.

1- مقدمه

(Reynolds, 1992). همچنین تغییر در چگالی آب مخزن به دلیل آب‌های ورودی و تنش‌های برشی ناشی از سرعت باد، می‌تواند در ایجاد لایه‌بندی و عمق لایه اختلاط موثر باشد (Armengol et al., 1986). 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 (Ford et al., 1979). دمای آب بر روی نوع و میزان فعالیت گونه‌های بیولوژیکی، انحلال گازها، سرعت واکنش‌های شیمیایی و سرعت رسوب‌گذاری تأثیر می‌گذارد، به طوری که به ازای افزایش

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 آب درون مخزن معمولاً به سه لایه عمودی مجزا شامل 1- اپیلمنیون¹، 2- متالیمنیون² و 3- هیپولیمنیون³ تقسیم می‌شود. این لایه‌بندی به علت تفاوت در چگالی آب (ناشی از اختلاف دما) در ترازهای مختلف حاصل می‌شود

1. Epilimnion
2. Metalimnion
3. Hypolimnion

نیرومند در بالای مخزن توسط تجهیزات مکانیکی می‌باشد که به علت نیاز به تجهیزات پیشرفته و همچنین بازده کمتر نسبت به روش هوادهی مرسوم نمی‌باشد.

بررسی وضعیت لایه‌بندی حرارتی در مخازن سدها و ارائه روش‌هایی به منظور کنترل کیفیت آب و کاهش اثرات این پدیده مخرب، به طور ویژه از اوایل دهه هشتاد میلادی مورد توجه محققان قرار گرفته و از آن زمان تاکنون از انواع مدل‌های ریاضی یک بعدی و دو بعدی و همچنین مدل‌های آزمایشگاهی و میدانی برای مطالعه اثرات این پدیده و همچنین راه کارهای مقابله با آن بهره گرفته شده است. از معروف‌ترین مدل‌های ریاضی دو بعدی برای مطالعه پارامترهای دخیل در تشکیل لایه‌بندی حرارتی می‌توان به مدل CE-QUAL-W2 اشاره نمود. همچنین از مدل‌های یک بعدی می‌توان به مدل DYRESM اشاره کرد که این مدل یک بعدی توانایی مدل‌سازی فرایند اختلاط مصنوعی را نیز دارا می‌باشد. اعتماد شهیدی و همکاران (Etemad Shahidi et al., 2010) مخزن سد پانزده خرداد را توسط مدل یک بعدی DYRESM شبیه‌سازی نمودند. طبق نتایج مدل مشخص گردید که در طول 210 روز از هر سال، در مخزن لایه‌بندی حرارتی حضور دارد. همچنین این محققان اختلاط مصنوعی توسط هوادهی و تاسیسات مکانیکی را بررسی نمودند و طبق نتایج مشخص گردید که بازده سیستم هوادهی بسیار بیشتر از تاسیسات مکانیکی می‌باشد.

سلیمانی و همکاران (1391)، لایه‌بندی حرارتی و رقوم مناسب آبیگری از سد کرخه را با به کارگیری مدل دو بعدی CE-QUAL-W2 مورد بررسی قرار دادند. مخزن سد برای مدت 15 سال مورد شبیه‌سازی قرار گرفت که طبق نتایج مشخص گردید که در فصول بهار تا پاییز لایه‌بندی حرارتی در مخزن وجود دارد. همچنین طبق نتایج این پژوهش به منظور کنترل شرایط دمایی پایین دست بهتر است که دریاچه در تراز 181 متری نسبت به سطح تراز آب دریا منظور گردد. در پژوهشی دیگر توسط سعیدی و همکاران (1392)، مخزن سد شهید رجایی با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 مورد مطالعه قرار گرفت. رژیم حرارتی مخزن و اکسیژن محلول سال‌های 1389 تا

هر 10 درجه سانتی‌گراد دما، سرعت کلیه واکنش‌های شیمیایی و بیوشیمیایی دو برابر می‌گردد. 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 سوی دیگر به دلیل کاهش انحلال اکسیژن در آب و افزایش سرعت تجزیه مواد تجمع یافته در رسوبات، فرایندهای موجود در ترازهای عمیق آب می‌توانند کاملاً بی‌هوازی صورت گرفته و منجر به تشکیل ترکیبات مولد بوها و یا طعم نامطبوع شود (توحیدی، 1377). آبیگری از ترازهای مختلف مخزن و یا تصفیه هزینه‌بر آب خروجی از لایه‌های نامطلوب مخزن از روش‌های مرسوم افزایش کیفیت آب خروجی از مخزن می‌باشند. هیچ کدام از این روش‌ها لایه‌بندی را حذف نمی‌کنند و تنها تلاشی برای کم کردن اثرات آن دارند. بعلاوه تصفیه آب خود باعث افزوده شدن مواد شیمیایی به آب شده و همچنین هزینه بالایی دارد (Sherman, 2000).

روش مناسب‌تر برای حذف این پدیده مخرب و کم نمودن اثرات آن، ایجاد اختلاط مصنوعی در مخزن می‌باشد. روش‌های ایجاد اختلاط مصنوعی در مخزن عبارت‌اند از هوادهی در کف مخزن و ایجاد جت سیال در بالای مخزن. از بین این دو روش، هوادهی به قسمت‌های تحتانی مخزن روش معمول‌تر برای نیل به این هدف می‌باشد. در این روش، با نصب تاسیساتی در کف مخزن و پمپاژ هوا، سیال داخل مخزن به حرکت درآمده و از قسمت‌های پایینی به قسمت‌های بالاتر مخزن 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 سطح آزاد آب برسند ادامه پیدا خواهد کرد. در صورتی که فرایند هوادهی به مدت طولانی ادامه پیدا کند قادر به اختلاط کامل مخزن خواهد بود (Etemad Shahidi et al., 2010). روش دوم اختلاط مصنوعی، ایجاد جت‌های بزرگ و

علی‌رغم داشتن هزینه محاسباتی بالاتر، توان ارائه جزئیات از فیزیک‌های پیچیده از جمله هیدرودینامیک پلوم، شامل میدان سرعت و آشفتگی شکل گرفته ناشی از آن، اندرکنش پلوم با سیال مخزن و همچنین سطح آزاد، نحوه ایجاد اختلاط در مخزن با توجه به ابعاد و هندسه آن و ناحیه تأثیر پلوم را دارا می‌باشند. همان‌طور که ذکر شد نیاز این مدل‌ها به منابع رایانه‌ای قابل توجه و همچنین ضعف مدل‌های آشفتگی کلاسیک (تک فاز) در توصیف پدیده‌های دو فازی باعث شده است که این موضوع کمتر مورد توجه پژوهشگران قرار گیرد. پژوهش انجام شده توسط یام و همکاران (Yum et al., 2008) از جمله معدود تحقیقات شاخص در این مقوله می‌باشد. این محققان پدیده اختلاط مصنوعی در یک مخزن با مقیاس آزمایشگاهی را به روش‌های فیزیکی و عددی مورد بررسی قرار دادند. در مدل‌سازی عددی انجام شده توسط این محققان با وجود به کارگیری یک مدل سه بعدی مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی با دیدگاه اولری¹، اثرات سطح آزاد بر هیدرودینامیک جریان داخل مخزن و همچنین اثر حرکت حباب‌ها بر میدان آشفتگی لحاظ نگردیده که منابع اصلی خطا در مدل‌سازی‌های انجام گرفته توسط آنها می‌باشند.

در ادامه و در جهت تکمیل تحقیقات پیشین، در این پژوهش از یک مدل کاملاً سه بعدی دینامیک سیالات محاسباتی با استفاده از نرم‌افزار حجم محدود فلونت برای مدل‌سازی پدیده اختلاط مصنوعی بهره گرفته شده است. برای مدل‌سازی حباب‌های داخل پلوم از مدل فاز گسسته² و برای لحاظ نمودن تغییرات سطح آب در طول زمان از مدل حجم سیال³ استفاده شده است. همچنین برای در نظر گرفتن اثرات آشفتگی بر میدان جریان از مدل استاندارد $k-\epsilon$ استفاده گردید. به دلیل تأثیرپذیری میدان آشفتگی سیال از حرکت حباب‌ها، ضرایب استاندارد مدل آشفتگی اصلاح گردیدند. با بررسی رویکرد عددی انتخاب شده مشخص گردید که این رویکرد قادر به ارائه جزئیات دقیق‌تر نسبت به پژوهش انجام شده توسط یام و

1393 با دو فرض استمرار وضع موجود و افزایش 50 درصدی نیاز آبی شبیه‌سازی گردید. طبق نتایج مشخص گردید که در زمان شکل‌گیری لایه‌بندی، غلظت اکسیژن محلول در کف مخزن به صفر می‌رسد. طبق نتایج مدل در صورت افزایش 50 درصدی نیاز آبی، به جهت کاهش مدت زمان ماندآب از شدت شرایط بی‌هوازی در کف مخزن کاسته می‌شود.

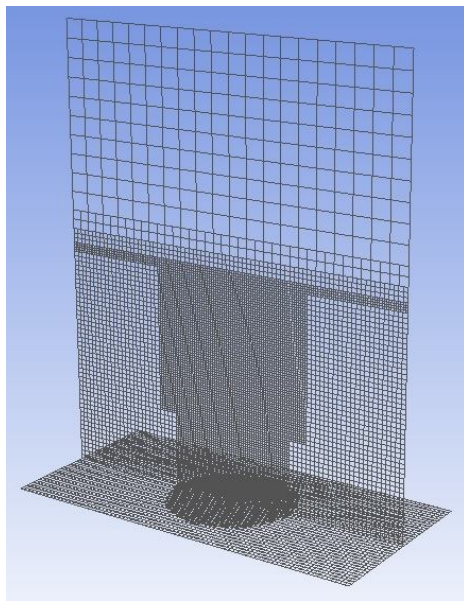
مدل‌های یک بعدی و دو بعدی به منظور شناخت نحوه شکل‌گیری لایه‌بندی حرارتی در فصول مختلف سال، عوامل مؤثر بر شدت آن و همچنین پیامدهای احتمالی به جهت هزینه اجرای پایین، کاربردی جلوه می‌نمایند. اما در این قبیل مدل‌ها، پدیده‌های پیچیده از قبیل نحوه شکل‌گیری لایه‌بندی حرارتی و تأثیرپذیری آن از هندسه مخزن، شکل‌گیری پلوم ایجاد شده توسط تاسیسات اختلاط مصنوعی و اندرکنش آن با سیال داخل مخزن، اندرکنش چند پلوم در یک مخزن و غیره تا حد امکان ساده‌سازی شده‌اند که این موضوع می‌تواند منجر به ناتوانی آنها در ارائه یک توصیف جامع و دقیق از جزئیات نهفته موجود در مکانیزم‌ها و اندرکنش‌های داخل مخزن گردد. در مدل یک بعدی DYRESM مخزن به لایه‌های عمودی تقسیم شده و لذا علی‌رغم توانایی آن در مدل‌سازی اختلاط مصنوعی، این مدل درکی نسبت به شکل هندسی مخزن، جانمایی تاسیسات اختلاط و لذا اندرکنش آنها با یکدیگر ندارد. مدل دو بعدی CE-QUAL-W2 نیز تنها قادر به مدل‌سازی پدیده لایه‌بندی حرارتی و عوامل وابسته به آن بوده و مدل‌سازی اختلاط مصنوعی در آن پیش‌بینی نشده است. ماهیت پدیده اختلاط مصنوعی به روش هوادهی و اندرکنش پلوم با سیال داخل مخزن که مد نظر پژوهش حاضر می‌باشد، پیچیده و سه بعدی بوده و برای دستیابی به درک عمیق پیرامون آن، استفاده از مدل‌های عددی پیشرفته سه بعدی ضروری به نظر می‌رسد.

با وجود محدودیت‌های ذکر شده برای مدل‌های یک و دو بعدی، مدل‌های سه بعدی قابلیت ارائه جزئیات گسترده‌تری از مکانیزم‌ها و اندرکنش‌های مرتبط با اختلاط در مخزن را دارا می‌باشند. مدل‌های سه بعدی

1. Eulerian

2. Discrete Phase Method (DPM)

3. Volume of Fluid



شکل 1 شبکه مورد استفاده

همکاران (Yum et al., 2008) بوده و همچنین مدل‌سازی حباب‌ها با دیدگاه لاگرانژی¹ کمک نموده تا هزینه اجرای مدل با توجه به توان پردازشی رایانه‌های کنونی در حد معقول نگاه داشته شود.

2- جزئیات مدل دینامیک سیالات محاسباتی

از یک مدل سه بعدی و وابسته به زمان برای مدل‌سازی اختلاط مصنوعی بهره گرفته شد. برای مدل‌سازی حباب‌های داخل پلوم از مدل فاز گسسته² و برای لحاظ نمودن تغییرات سطح آب در طول زمان از مدل حجم سیال³ استفاده شده است. همچنین برای در نظر گرفتن اثرات آشفتگی بر میدان جریان از مدل استاندارد $k-\varepsilon$ استفاده گردید. به دلیل تاثیرپذیری میدان آشفتگی سیال از حرکت حباب‌ها، ضرایب استاندارد مدل آشفتگی اصلاح گردیدند. با بررسی رویکرد عددی انتخاب شده مشخص گردید که این رویکرد قادر به ارائه جزئیات دقیق‌تر نسبت به پژوهش انجام شده توسط یام و همکاران (Yum et al., 2008) بوده و همچنین مدل‌سازی حباب‌ها با دیدگاه لاگرانژی⁴ کمک نموده تا هزینه اجرای مدل با توجه به توان پردازشی رایانه‌های کنونی در حد معقول نگاه داشته شود.

1-2- هندسه و شبکه‌بندی

مخزن مورد مطالعه مطابق تحقیقات انجام شده توسط یام و همکاران (Yum et al., 2008)، به شکل مکعب مستطیل با ابعاد 1 متر طول، 50 سانتی‌متر عرض و 1 متر ارتفاع می‌باشد که تنها 60 سانتی‌متر آن از آب پر شده است. ساخت هندسه و شبکه‌بندی در نرم‌افزار Gambit انجام و سپس شبکه اولیه در مناطق دارای گرادیان‌های بالای سرعت برای حصول دقت کافی در مدل‌سازی ریزتر گردید. تعداد نهایی سلول‌های محاسباتی پس از طی فرایند رسیدن به جواب‌های مستقل از شبکه، 510000 هزار سلول می‌باشد (شکل 1).

2-2- معادلات حاکم و مفروضات مدل‌سازی عددی

معادله استاندارد بقای جرم، مومنتم و انرژی توسط نرم‌افزار حل شدند که عبارت هستند از (FLUENT, 2013):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + p)) = \nabla \cdot \left(k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\bar{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + S_E \quad (3)$$

معادله (1) بیانگر بقای جرم بوده و در سمت چپ آن، جمله⁵‌های گذرا⁶ و جریان خالص خروجی⁷ در واحد حجم حجم قرار دارند. جمله‌های موجود در معادله بقای مومنتم (معادله (2)) به ترتیب از چپ به راست عبارت‌اند از: جمله گذرا، جمله جابجایی، جمله گرادیان فشار⁸، جمله پخش⁹، پخش⁹، (تنش‌های اصطکاکی و رینولدز $\bar{\tau}$)، جمله جاذبه $(\rho \vec{g})$ و جمله چشمه نیروهای خارجی (\vec{F}) . جمله‌های چشمه نیروهای خارجی نقش با اهمیتی را در پژوهش

5. Term

6. Transient

7. Net flow of v out of the fluid element

8. Pressure source term

9. Diffusion term

1. Lagrangian

2. Discrete Phase Method (DPM)

3. Volume of Fluid

4. Lagrangian

ذره حل می‌شود عبارت است از (FLUENT, 2013):

$$m_p \frac{d\vec{u}_p}{dt} = F_D(\vec{u} - \vec{u}_p) + \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F}_p \quad (5)$$

جملات موجود در رابطه (5) به ترتیب از چپ به راست تساوای عبارتند از جمله گذرا سرعت ذره یا به عبارتی شتاب ذره، ضرب نیروی دراگ در سرعت نسبی ذره، جمله تأثیر نیروی جاذبه و در آخر باقی نیروهایی که ممکن است بر حرکت ذره تأثیر بگذارند. m_p بیانگر جرم ذره، u_p سرعت ذره، F_D نیروی دراگ، u سرعت سیال اطراف ذره، ρ_p چگالی ذره، ρ چگالی سیال اطراف ذره و F_p بیانگر باقی نیروهایی که بر حرکت ذره تأثیرگذار هستند، می‌باشد. اندیس p در این فرمول اشاره به فاز گسسته دارد. این رابطه بیان می‌کند که شتاب ذرات، ناشی از نیروی دراگ⁶، نیروی جاذبه و نیروهای اضافی دیگری می‌باشد. از جمله نیروهای اضافی دیگر می‌توان به نیروی بالا بر⁷ و نیروی جرم اضافه شده⁸ اشاره کرد. مطابق پژوهش السن و واپسکو (Olsen and Popescu, 2010) اثر نیروی لیفت ناچیز و قابل صرف نظر کردن می‌باشد. نیروی جرم مجازی (F_{VM}) باعث شتاب یافتن حباب نسبت به سیال اطراف آن در چهارچوب لاگرانژی می‌گردد که این نیرو توسط رابطه زیر محاسبه شده و اعمال می‌گردد (FLUENT, 2013).

$$F_{VM} = \frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_p} \frac{d}{dt} (u_f - u_p) \quad (6)$$

در رابطه (6)، u_f سرعت سیال اطراف ذره و u_p سرعت ذره می‌باشد. از بین تمام این نیروها، نیروی جاذبه و نیروی دراگ نقش اساسی تری را در دینامیک حرکت حباب‌ها دارند؛ از بین مدل‌های دراگ پیشنهاد شده، مدل دراگ تومیاما و همکاران (1999) برای رژیم جریان مورد بررسی در پژوهش حاضر مناسب تشخیص داده شد. این مدل ضریب دراگ را برای گستره بزرگی از ابعاد و اشکال حباب محاسبه می‌نماید که عبارت است از (FLUENT, 2013):

$$C_D = \max \left(\min \left(\frac{24}{Re} \left(1 + 0.15 Re^{0.687} \right), \frac{72}{Re} \right), \frac{8}{3} \frac{E_o}{E_o + 4} \right)$$

حاضر ایفا می‌کند؛ زیرا منبع مومنتم ایجاد شده توسط حرکت حباب‌ها توسط این جمله به معادلات حرکت سیال اضافه می‌گردد. معادله (3) بیانگر بقای انرژی بوده و جملات موجود در آن از چپ به راست عبارت‌اند از: جمله گذرا، جمله جابجایی، جمله پخش (به ترتیب پخش انرژی توسط رسانش¹ $(k_{eff} \nabla T)$ ، تبادل اجزا² $(\sum_j h_j \bar{J}_j)$ و اتلاف اتلاف ناشی از لزجت³ $(\overline{\overline{\tau_{eff}} \cdot \vec{v}})$ و جمله چشمه (S_E).

برای مدل‌سازی چندفازی مسأله مورد بررسی از ترکیب مدل حجم سیال (برای ردیابی سطح تماس بین سیال داخل مخزن و هوای اتمسفری بالای آن) و ذرات گسسته (حباب‌های داخل پلوم) استفاده گردید.

مدل حجم سیال برای جریانات چند فازی که در آنها سطح تماسی مشخصی بین فازها وجود دارد، طراحی شده است. تغییرات سطح تماس بین دو فاز در طول زمان با فرض جریان تراکم ناپذیر توسط حل صریح معادله کسر حجمی⁴ صورت می‌پذیرد که عبارت است از (FLUENT, 2013):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \mathbf{u}_q) = 0 \quad (4)$$

جملات موجود در معادله (4) از چپ به راست عبارت‌اند از جمله گذرا کسر حجمی فاز ثانویه و جمله انتقال آن. α_q بیانگر کسر حجمی فاز ثانویه و u_q بیانگر سرعت آن است. با توجه به اینکه این معادله فقط برای فاز ثانویه حل می‌گردد، لذا اندیس q در این معادله اشاره به فاز ثانویه دارد. برای گسسته‌سازی صریح این معادله از روش بازسازی هندسی⁵ که بالاترین دقت را دارد، استفاده شد.

از آنجا که استفاده از روش حجم سیال برای مدل‌سازی تک تک حباب‌ها هزینه محاسباتی بسیار بالایی دارد، برای مدل‌سازی حباب‌های داخل پلوم از روش فاز گسسته استفاده گردید. این روش برای مدل‌سازی رژیم جریان حبابی با غلظت کم (کسر حجمی کمتر از 12 درصد) بسیار کارآمد می‌باشد (FLUENT, 2013). در این روش حباب‌ها در چهارچوب لاگرانژی به صورت ذرات کروی با حجم تهی مدل می‌شوند. معادله تعادل نیرویی که برای هر

6. Drag Force
7. Lift Force
8. Added Mass Force

1. Conduction
2. Species transfer
3. Viscous dissipation
4. Volume Fraction equation
5. Geo-Reconstruct Scheme

این معادلات k بیانگر انرژی جنبشی آشفتگی³، ε نرخ اضمحلال انرژی جنبشی آشفتگی⁴، u_i جمله سرعت سیال، μ و μ_t به ترتیب لزجت آرام و آشفته، σ_k و σ_ε عدد پراختل آشفته، S_k و S_ε جملات چشمه، G_b تولید آشفتگی در اثر نیروهای شناوری و G_k بیانگر تولید آشفتگی در اثر گرادیان‌های میدان سرعت می‌باشند. همچنین $C_{1\varepsilon}$ ، $C_{2\varepsilon}$ و $C_{3\varepsilon}$ ضرایب مدل می‌باشند که از آزمایش‌های تجربی به دست آمده‌اند. طبق نتایج آزمایشگاهی محققان پیشین، حرکت حباب‌ها بر میدان آشفتگی سیال تأثیر می‌گذارد. لکن مدل‌های آشفتگی موجود از جمله مدل دو معادله‌ای $k - \varepsilon$ به طور پیش فرض قادر به لحاظ نمودن این اثرات نمی‌باشند. بدین منظور ضریب رشد در معادله انتقال نرخ اضمحلال انرژی جنبشی آشفتگی ($C_{1\varepsilon}$) از مقدار پیش‌فرض $1/44$ به مقدار $1/34$ تغییر داده شد. این اصلاحیه با مقایسه جواب‌های تولید شده توسط مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی یام و همکاران (Yum et al., 2008) اعمال گردید.

برای لحاظ کردن اثر تغییر دما بر مشخصات آب از جمله چگالی، کشش سطحی، لزجت و ضریب انتقال حرارت، یک کد UDF نوشته شده و به نرم‌افزار اضافه گردید. بدون برنامه‌نویسی‌های انجام شده قطعاً نتایج تولید شده توسط مدل عددی دارای خطای بسیاری می‌بودند. همچنین برای کم نمودن هزینه محاسباتی، حباب‌هایی که به سطح آب می‌رسیدند توسط کد UDF از دامنه محاسباتی حذف گردیدند. شرایط اولیه⁵ دما در عمق مخزن برای مدل عددی مطابق کار آزمایشگاهی یام و همکاران (Yum et al., 2008) می‌باشد. دیواره‌های اطراف مخزن، شرط مرزی دیوار⁶ و شرط مرزی بالای هوای اتمسفری، فشار خروجی⁷ خروجی در نظر گرفته شد.

با توجه به حل مسأله به صورت وابسته به زمان، گام زمانی برابر $\Delta t = 0.035 \text{ sec}$ منظور گردید. معیار انتخاب این گام زمانی، عدد کورانت و همچنین پایداری حل بوده

(7)

در رابطه (7) عدد رینولدز ذره و E_o عدد بی بعد اتووس می‌باشد که برابر است با (FLUENT, 2013):

$$E_o = \frac{g(\rho_l - \rho_g)d_b^2}{\sigma} \quad (8)$$

در رابطه (8)، d_b بیانگر قطر حباب و σ برابر کشش سطحی بین حباب و سیال اطراف آن می‌باشد. عدد بی بعد اتووس اثر تغییر شکل حباب بر میزان نیروی دراگ اعمال شده به آن را لحاظ می‌کند. این مدل دراگ به طور پیش فرض در نرم‌افزار وجود نداشته و توسط توابع تعریف شده توسط کاربر یا به اصطلاح کد UDF ¹ به هسته‌ی اصلی نرم‌افزار اضافه گردیده است.

برای لحاظ نمودن اثرات آشفتگی بر میدان جریان از مدل استاندارد $k - \varepsilon$ استفاده گردید. مدل استاندارد $k - \varepsilon$ از کاربردی‌ترین مدل‌های آشفتگی است که اولین بار توسط لاندرو اسپالدینگ² (1972) ارائه گردید. همگرایی آسان و سریع، نیاز کم به منابع رایانه‌ای و دقت قابل قبول برای گستره وسیعی از مسائل مهندسی، از خواص آن می‌باشد. معادله انتقال برای انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اضمحلال آن عبارت است از (FLUENT, 2013):

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon + S_k \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) \\ - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (10)$$

در روابط (9) و (10)، جملات موجود در معادله به ترتیب از چپ به راست معادله عبارتند از جمله گذرا، جمله جابجایی، جمله پخش و باقی جملات موجود بیانگر چشمه‌ها و چاه‌هایی است که ممکن است در فیزیک مسأله حضور داشته و بر میدان آشفتگی تأثیر بگذارند. در

3. Turbulence kinetic energy

4. Turbulence kinetic energy dissipation rate

5. Initial Condition

6. Wall Boundry Condition

7. Pressure Outlet Boundry Condition

1. User Defined Function

2. Launder and Spalding

سانتی‌متر در نظر گرفته شد. لایه‌بندی حرارتی توسط یک شبکه لوله که از داخل آن آب عبور می‌کند، ایجاد گردید. این مکانیزم قابلیت تغییر موقعیت حرارت‌دهی به ارتفاعات مختلف مخزن و همچنین ایجاد بازه دمایی از 18 تا 45 درجه سانتی‌گراد را دارا می‌باشد.

برای هوادهی، از نازلی به قطر 3 سانتی‌متر استفاده گردید. از دو دسته دماسنج که هر کدام شامل یازده واحد اندازه‌گیری دما در عمق بودند، استفاده گردید. هر دسته از دماسنج‌ها با قابلیت تغییر موقعیت در صفحه افق، توان اندازه‌گیری روند تغییرات میدان دما را در طی آزمایش دارا می‌باشند.

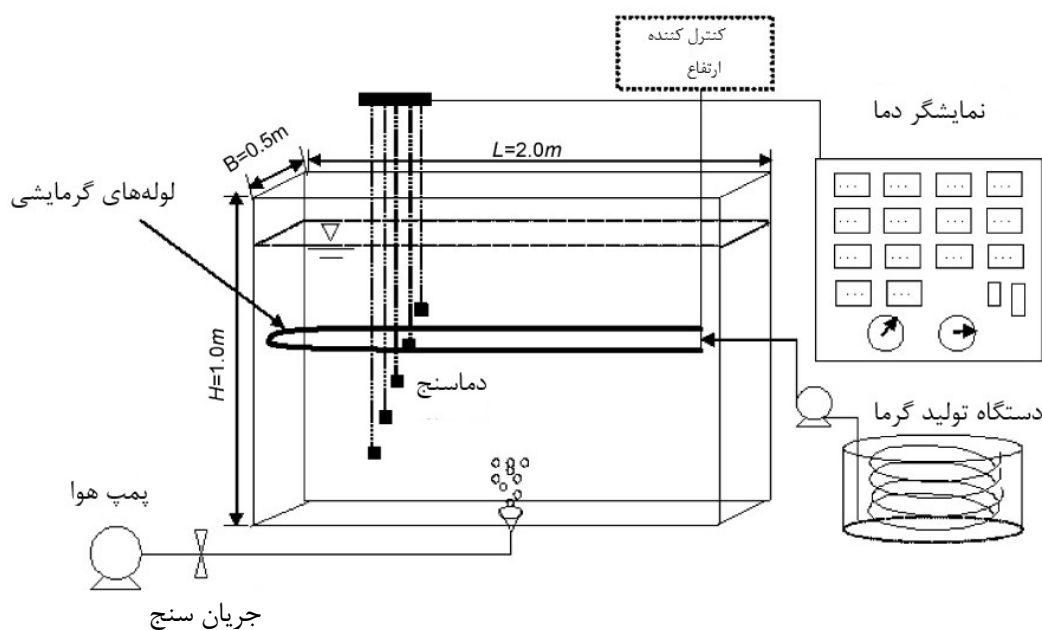
با توجه به جدول 1، در دو آزمایش A1 و A2، میزان نرخ گاز تزریق شده به مخزن یکسان بوده، در حالی که قدرت لایه‌بندی در آزمایش A2 قوی‌تر می‌باشد. در آزمایش‌های A3 تا A5 قدرت لایه‌بندی برابر بوده و نرخ تزریق گاز به مخزن متفاوت می‌باشد. قدرت لایه‌بندی را می‌توان مطابق فرمول (11) برآورد نمود (Mcdougall, 1978):

$$N = \left(-\frac{g \, d\rho}{\rho \, dz}\right) \quad (11)$$

است. انتخاب گام زمانی بزرگ‌تر از مقدار در نظر گرفته شده، منجر به حل ناپایدار و کوچک‌تر از آن منجر به طولانی شدن بیش از حد فرایند حل می‌گردید. همچنین معیار همگرایی معادلات عددی مطابق پیش فرض نرم‌افزار، همگی برابر 0/001 لحاظ گردیدند. معیار توقف حل نیز هنگامی در نظر گرفته شد که تفاوت دمای بالاترین دماسنج و پایین‌ترین دماسنج در مخزن کمتر از 1 درجه سانتی‌گراد باشد. این معیار به عنوان کامل شدن فرایند اختلاط در مخزن در نظر گرفته شد. پس از ارضا شدن این شرط، حل متوقف و نتایج استخراج گردیدند.

3- نتایج و بحث

حجم مخزن مورد بررسی 300 لیتر می‌باشد. یک نازل هوا در مرکز آن با قطر 3 سانتی‌متر و با فاصله 5 سانتی‌متری از کف جانمایی شده است. شکل شماتیک آزمایش‌های انجام شده توسط (Yum et al. (2008 که مبنای پژوهش عددی حاضر می‌باشد، در شکل 2 نشان داده شده است. آزمایش‌ها در یک مخزن آزمایشگاهی با جنس بدنه اکریلیک انجام گرفت. عمق آب برای تمامی آزمایش‌ها 60



شکل 2 نمای شماتیکی از تجهیزات مورد استفاده در آزمایش‌های انجام شده توسط (Yum et al. (2008

جدول 1 شرح مشخصات 5 آزمایش مورد بررسی

آزمایش	فاصله پلوم‌ها (سانتی‌متر)	شدت لایه‌بندی (s ⁻¹)	نرخ تزریق گاز (میلی‌لیتر بر دقیقه)	دما (سانتی‌گراد) عمق آب حداقل حداکثر (متر)	P _N	M _H (میلی‌متر)	قطر حباب
A1	تک پلوم	0/197	200	18 28	30	0/175	1/01
A2	تک پلوم	0/308	200	19 39	115	0/175	1/01
A3	تک پلوم	0/303	58	20 39	400	0/102	0/85
A4	تک پلوم	0/303	39	20 39	600	0/088	0/80
A5	تک پلوم	0/313	20	18 39	1300	0/066	0/73

و M_H بیان‌کننده قدرت منبع حباب در مقایسه با کل هد فشار می‌باشد. آسایدا و ایمبرگر (Asaeda and Imberger, 1993) مشاهده نمودند که مشخصات پلوم در محیط لایه‌بندی شده بستگی به سرعت جریان حباب‌ها با توجه به شدت لایه‌بندی دارد و 3 نوع پلوم قابل مشاهده می‌باشد:

- پلوم نوع اول: $(\frac{N^3 H^4}{Q_B g} < 3 \times 10^2)$ ، با سرعت زیاد جریان حباب‌ها در لایه‌بندی ضعیف (شکل 3- الف)؛

- پلوم نوع دوم: $(3 \times 10^2 < \frac{N^3 H^4}{Q_B g} < 3 \times 10^3)$ ، با سرعت معتدل جریان حباب‌ها در لایه‌بندی معتدل (شکل 3- ب)؛

- پلوم نوع سوم: $(\frac{N^3 H^4}{Q_B g} > 3 \times 10^3)$ ، با سرعت کم جریان حباب‌ها در لایه‌بندی قوی (شکل 3- ج).

طبق یافته‌های آسایدا و ایمبرگر (Asaeda and Imberger, 1993) با افزایش عدد پلوم بازده اختلاط مصنوعی افزایش می‌یابد و با توجه به محدوده ارائه شده در جدول 1 برای M_H، پس از رسیدن به مقدار حداکثر خود با افزایش عدد پلوم تغییرات چندانی را از خود نشان نمی‌دهد.

شکل 4 نشان می‌دهد که برای آزمایش‌های مد نظر پژوهش حاضر (جدول 1) میزان بازده اختلاط به ازای اعداد پلوم در نظر گرفته شده تغییرات قابل ملاحظه‌ای را از خود نشان نمی‌دهند و تنها انتظار می‌رود که با افزایش عدد پلوم، بازده اختلاط افزایش نسبی از خود نشان دهد. طبق نتایج آزمایشگاهی محققان پیشین، هیچ‌گاه فرایند اختلاط مصنوعی، لایه‌های تحتانی مخزن را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد و این لایه‌ها تا انتهای فرایند هوادهی، پروفیل دمایی خود را حفظ می‌کنند. لذا در مدل‌سازی

برای ارزیابی فرایند اختلاط مصنوعی در طول زمان، اطلاعات مربوط به ناحیه مابین پلوم حباب و دیواره کناری مد نظر قرار گرفت (Yum et al., 2008). معیار سنجش بازده فرایند هوادهی به مخزن فرمول (12) می‌باشد (Asaeda and Imberger, 1993):

$$\eta = \frac{\Delta E_p}{\rho^* Q_0 H_A \ln(1 + \frac{H}{H_A}) \Delta t} \quad (12)$$

در این رابطه ΔE_p بیانگر تغییرات در میزان انرژی پتانسیل مخزن و Δt مدت زمان لازم برای کامل شدن فرایند اختلاط می‌باشد. 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 Q₀ در فشار اتمسفر می‌باشد. لذا رابطه (12) برابر نسبت تغییرات انرژی پتانسیل به انرژی جنبشی تزریق شده به سیستم می‌باشد (Yum et al., 2008).

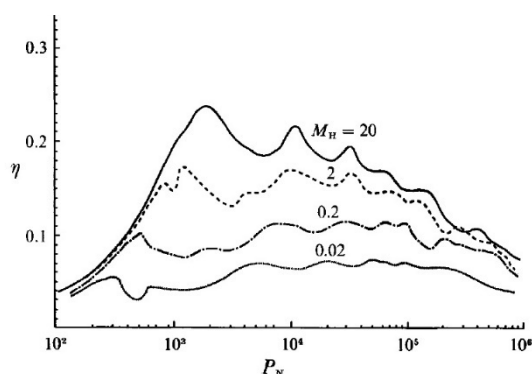
آسایدا و ایمبرگر (Asaeda and Imberger, 1993) برای توصیف رفتار پلوم حباب، دو عدد بی بعد ارائه دادند که عبارت اند از:

$$P_N = \frac{N^3 H^4}{Q_B g} \quad (13)$$

$$M_H = \frac{Q_B g}{4\pi\alpha^2 H u_s^3} \quad (14)$$

در این روابط، u_s سرعت لغزش حباب¹، α ضریب افزودنی حباب²، N قدرت لایه‌بندی و Q_Bg قدرت منبع گاز در کف کف می‌باشد. عدد P_N بیانگر نسبت انرژی پتانسیل مورد نیاز برای بالا بردن سیال از کف به انرژی شناوری موجود حباب‌هاست. بنابراین P_N نشان دهنده تعادل بین شناوری حباب‌ها، القای حرکت رو به بالا و قدرت لایه‌بندی است

1. Bubble Slip Velocity
2. Entrainment Coefficient



شکل 4 بازده اختلاط مصنوعی در برابر عدد پلوم (Asaeda and Imberger, 1993)

نتایج کار آزمایشگاهی یام و همکاران (Yum et al., 2008) و مدل عددی این محققان همراه با نتایج مدل عددی حاضر مربوط به آزمایش‌های ذکر شده در جدول 1 آورده شده است.

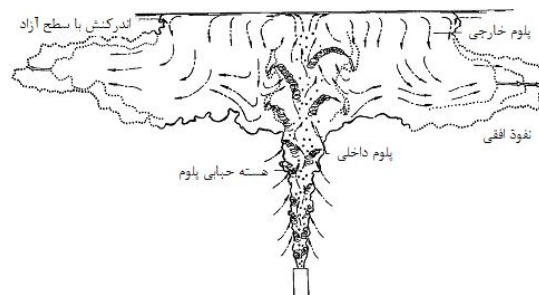
قابل ذکر است که نرم‌افزار مورد استفاده محققان قبلی نسخه 4/4 نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی CFX می‌باشد.

در شکل 5 (آزمایش A1)، با توجه به میزان تغییرات دما در ارتفاع مخزن و همچنین میزان هوای تزریقی، پلوم ایجاد شده به اصطلاح قوی بوده و پس از طی مدت حدود 6 دقیقه عملاً موفق به حذف لایه‌بندی شده است. با ثابت ماندن میزان هوای تزریقی و افزایش تغییرات دما در ارتفاع (شکل 6- آزمایش A2) قدرت پلوم به منظور تخریب لایه‌بندی مانند حالت قبل نبوده و عملاً اضمحلال لایه‌بندی مدت زمان بیشتری را طلب می‌نماید.

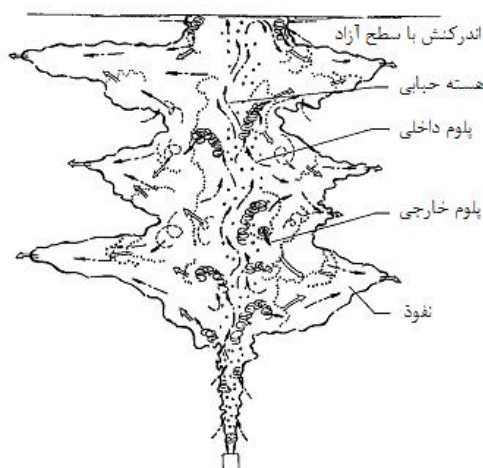
با توجه به جدول 1، اختلاف دما در آزمایش A1 به میزان 10 درجه و در آزمایش A2 دو برابر این مقدار است. نسبت مدت زمان لازم برای اضمحلال لایه‌بندی این دو آزمایش نیز با توجه به نتایج جدول 3 (400 به 700 ثانیه) از این نسبت (10 درجه به 20 درجه اختلاف) تبعیت می‌کند.

در آزمایش‌های A3 تا A5 (شکل‌های 7 تا 9) به ترتیب با ثابت ماندن قدرت لایه‌بندی، میزان هوای تزریقی به مخزن کاهش یافته، لذا در نتیجه آن قدرت پلوم نیز کاهش می‌یابد. با توجه به عدد پلوم برای این آزمایش‌ها، پیشاپیش واضح است که در این حالات پلوم به مدت زمان بسیار طولانی‌تری برای اضمحلال لایه‌بندی نسبت به دو

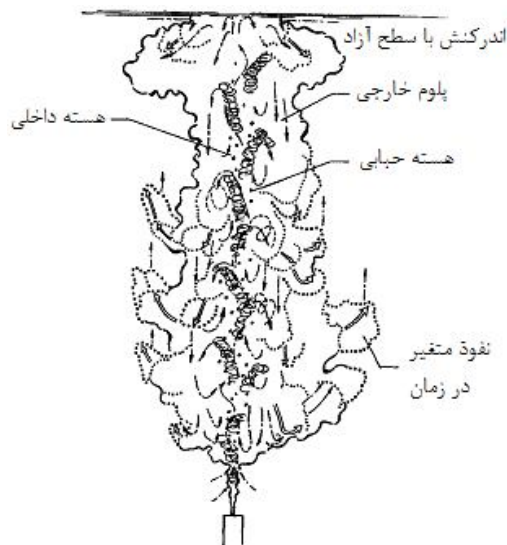
عددی این تحقیق برای محاسبه زمان لازم برای اختلاط کامل از 20 سانتی‌متر پایین مخزن صرف‌نظر شده است.



الف) پلوم نوع اول



ب) پلوم نوع دوم

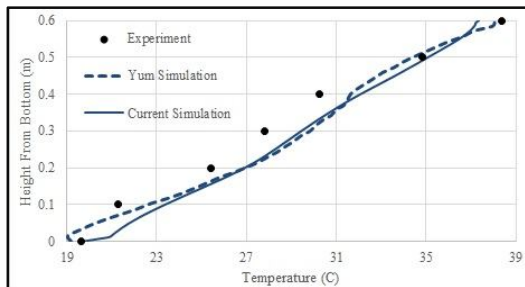


ج) پلوم نوع سوم

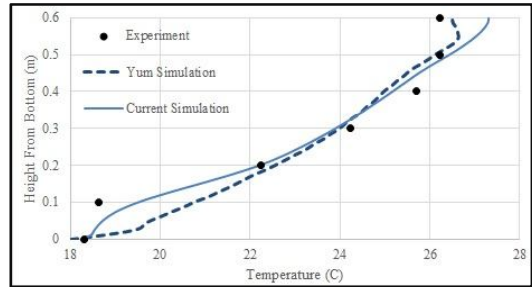
شکل 3 انواع پلوم (Asaeda and Imberger, 1993)

با توجه به سری های زمانی دما مربوط به این 3 آزمایش و مقایسه آن با دو آزمایش قبلی، تفاوت های آشکاری در الگوی رفتاری پلوم مشاهده می گردد.

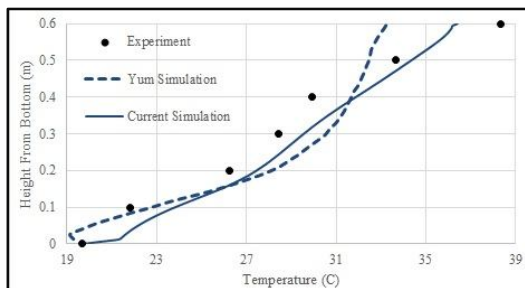
آزمایش اول نیاز دارد. تحقیق بیشتر پیرامون رفتار پلوم در اعداد پلوم بالاتر و بررسی روند تغییرات بازده اختلاط از اصلی ترین اهداف طراحی و اجرای این 3 آزمایش است.



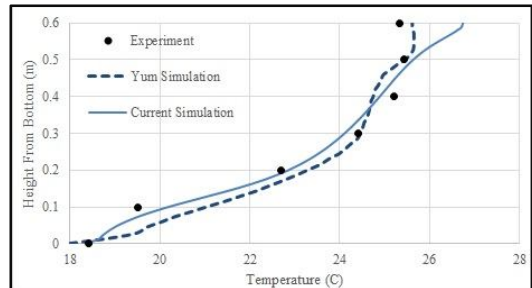
الف) 60 ثانیه



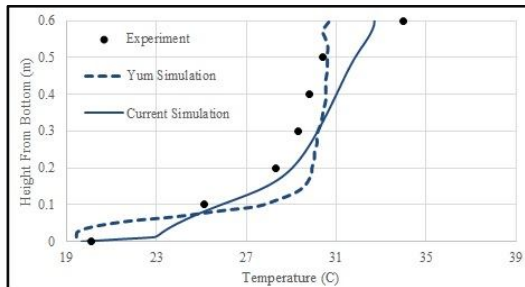
ب) 60 ثانیه



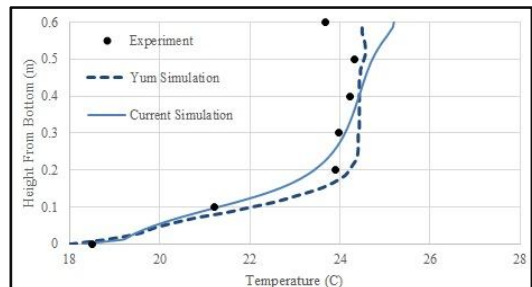
ب) 120 ثانیه



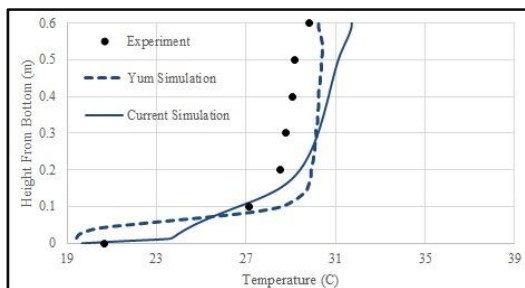
ب) 120 ثانیه



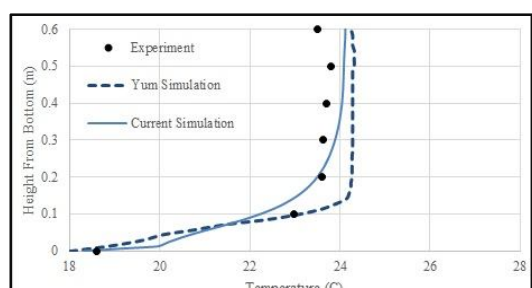
ج) 360 ثانیه



ج) 240 ثانیه



د) 460 ثانیه



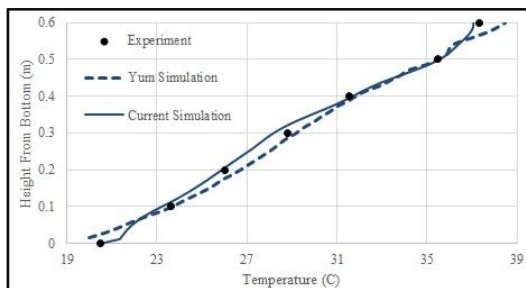
د) 360 ثانیه

شکل 6 مقایسه نتایج مدل عددی حاضر و مدل عددی پام و همکاران (2008) با نتایج آزمایشگاهی پس از گذشت زمان های متفاوت از هوادهی برای آزمایش A2

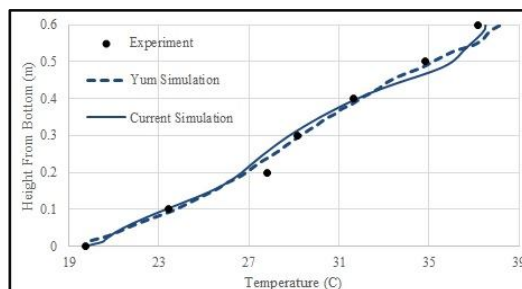
شکل 5 مقایسه نتایج مدل عددی حاضر و مدل عددی پام و همکاران (2008) با نتایج آزمایشگاهی پس از گذشت زمان های متفاوت از هوادهی برای آزمایش A1

لکن این موضوع در سه آزمایش بعدی مشاهده نشده و تا مدت زمان قابل توجهی پس از شروع فرایند تزریق گاز، پلوم تنها توانسته قسمت‌های پایینی مخزن را تحت تأثیر قرار دهد.

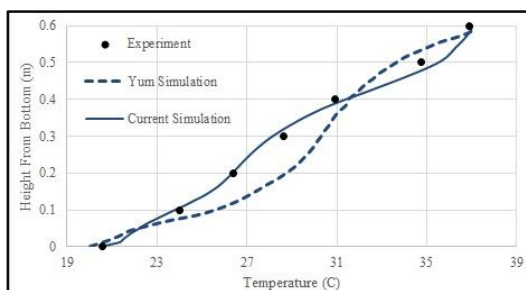
در آزمایش‌های A1 و A2 مشاهده می‌گردد از همان لحظات ابتدایی شروع تزریق گاز، پلوم توانسته خود را به سطح آزاد رسانده و پروفیل دمایی قسمت‌های بالاتر مخزن را نیز دستخوش تغییر نماید.



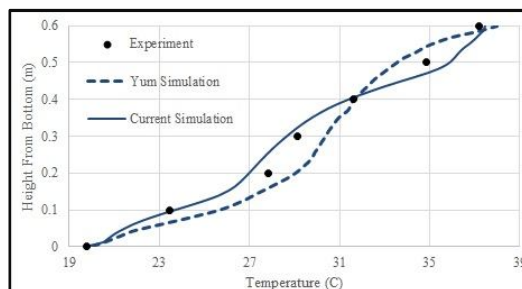
الف) 120 ثانیه



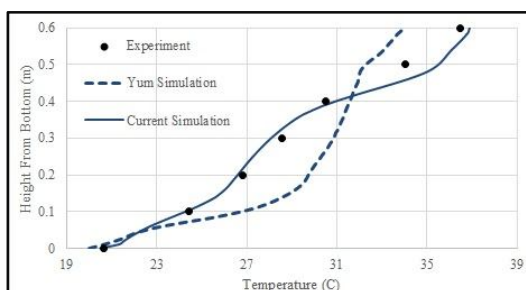
الف) 120 ثانیه



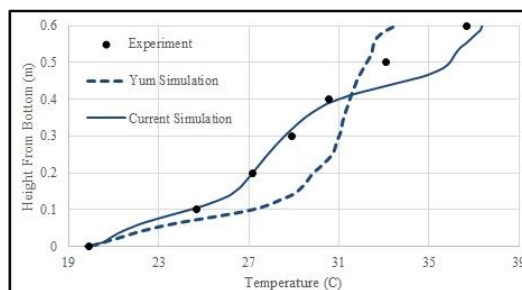
ب) 240 ثانیه



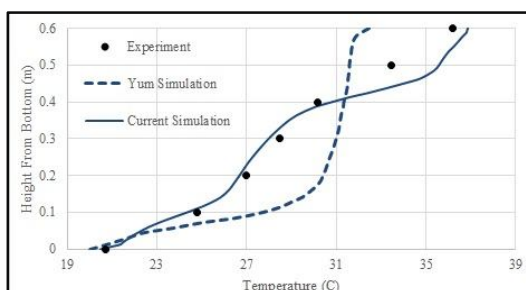
ب) 240 ثانیه



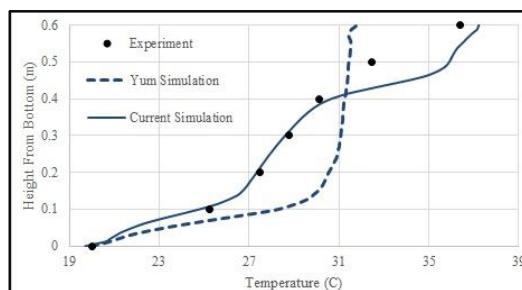
ج) 360 ثانیه



ج) 360 ثانیه



د) 480 ثانیه



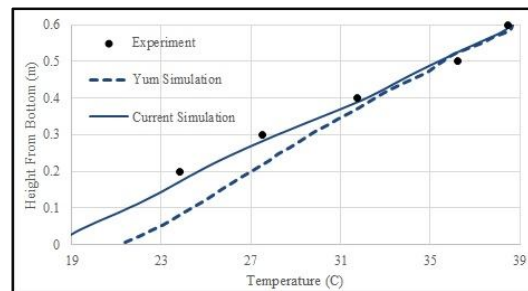
د) 480 ثانیه

شکل 8 مقایسه نتایج مدل عددی حاضر و مدل عددی بام و همکاران با نتایج آزمایشگاهی پس از گذشت زمان‌های متفاوت از هوادهی برای آزمایش A4

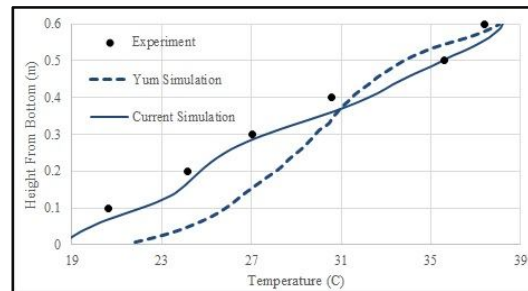
شکل 7 مقایسه نتایج مدل عددی حاضر و مدل عددی بام و همکاران با نتایج آزمایشگاهی پس از گذشت زمان‌های متفاوت از هوادهی برای آزمایش A3

الگوی رفتاری رابطه مستقیم با عدد پلوم آزمایش داشته و لذا از آزمایش A3 تا A5 با توجه به کاهش نرخ تزریق گاز (افزایش عدد پلوم) به صورت بیشتری خود را نشان می‌دهد. بارزترین نمونه در بروز این رفتار آزمایش A5 بوده که در شکل 10 سری زمانی میدان سرعت و میدان دما در صفحه‌ای که از مرکز پلوم می‌گذرد نشان داده شده است. مطابق این اشکال با گذشت زمان از ابتدای شروع فرایند تزریق گاز، لایه‌بندی در مخزن از حالت خطی اولیه به شکل دو قسمتی درآمد است. با گذشت زمان و ضعیف‌تر شدن لایه‌بندی در نواحی پایین‌تر، پلوم توانسته به قسمت‌های بالاتر صعود کرده و لایه‌بندی آن نواحی را نیز تضعیف نماید. پس از تضعیف نسبی لایه‌بندی در هر دو ناحیه، پلوم می‌تواند کل مخزن را تحت تأثیر قرار دهد. علی‌رغم روند فوق، به طور مثال برای آزمایش A5 فرایند تأثیرپذیری کل مخزن از اختلاط حتی تا زمان 4200 ثانیه از تزریق گاز نیز مشاهده نمی‌گردد (شکل 10-د).

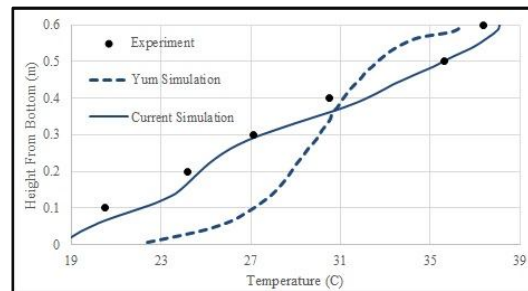
در مقوله مقایسه نتایج مدل عددی حاضر با پژوهش پیشین و با توجه به شکل‌های 5 تا 9، برتری مدل عددی حاضر نسبت به مدل عددی یام و همکاران (Yum et al., 2008) کاملاً آشکار می‌باشد. در بیشتر آزمایش‌ها، مدل عددی حاضر به خوبی توانسته روند تغییرات دما در مخزن را پیش‌بینی نماید و تنها در آزمایش A1 به نظر می‌رسد که نتایج مدل عددی حاضر در ترازهای بالاتر مخزن با نتایج آزمایشگاهی تفاوت قابل توجهی را از خود نشان می‌دهد. در این رابطه می‌توان گفت که اثر سطح آزاد آب بر روی میدان آشفتگی نزدیک این سطح هنوز به درستی شناخته نشده است. آنچه که تاکنون برای محققان آشکار شده، آن است که اثر سطح آزاد آب تا حدودی شبیه اثر دیواره صلب با شدت پایین‌تر می‌باشد. طبق تحقیقات انجام شده توسط سوگا و رهمن (Soga and Rehmann, 2004) برای حباب‌هایی که به سطح آزاد آب می‌رسند افزایش اضمحلال آشفتگی در سطح وجود دارد. هنگامی که گردابه‌های آشفتگی به سطح می‌رسند و شکل سطح آزاد آب را تغییر می‌دهند، یک افزایش در نرخ آشفتگی رخ می‌دهد که در نهایت منجر به افزایش نرخ اضمحلال انرژی جنبشی آشفتگی می‌شود.



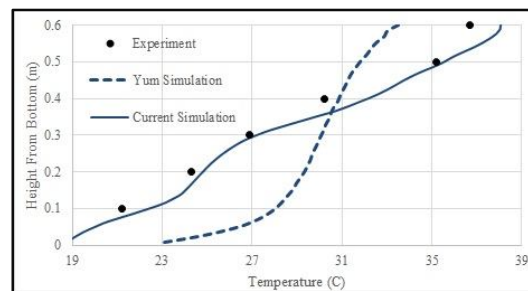
الف) 60 ثانیه



ب) 330 ثانیه



ج) 360 ثانیه

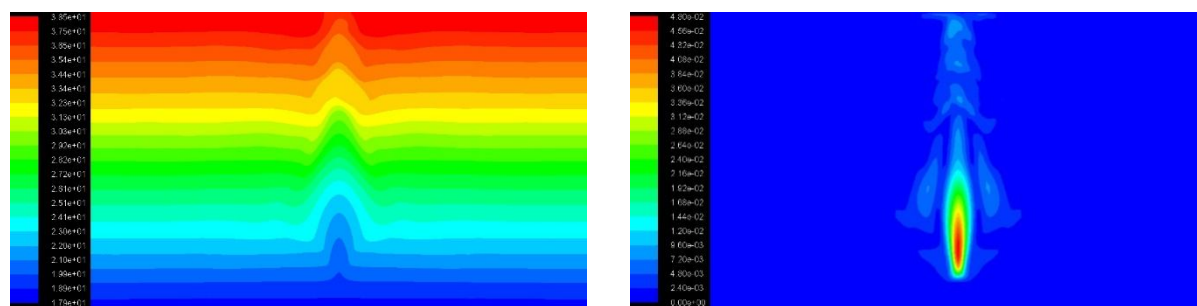


د) 480 ثانیه

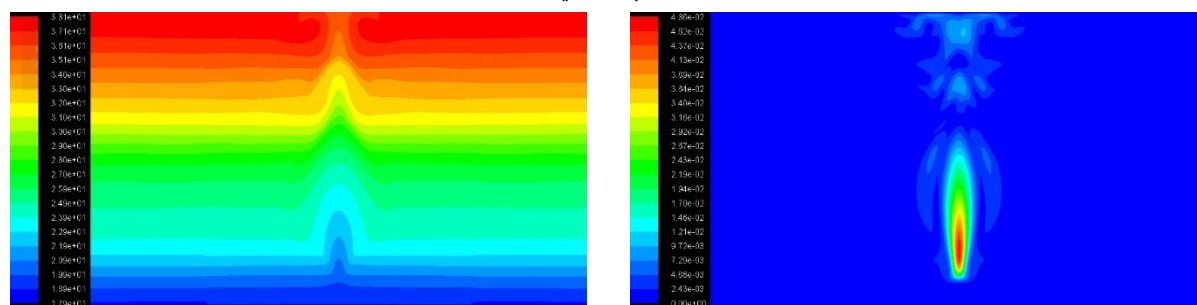
شکل 9 مقایسه نتایج مدل عددی حاضر و مدل عددی یام و همکاران با نتایج آزمایشگاهی پس از گذشت زمان‌های متفاوت از هوادهی برای آزمایش A5

لذا نوعی دو قسمت شدن اختلاط در مخزن مشاهده می‌شود، به طوری که حدود 30 درصد ناحیه بالایی مخزن تا مدت زیادی حضور پلوم را حس نکرده است. پس از ایجاد یک اختلاط نسبی در نواحی پایین‌تر، پلوم قدرت نسبی برای رساندن خود به نواحی بالاتر را پیدا می‌کند. این

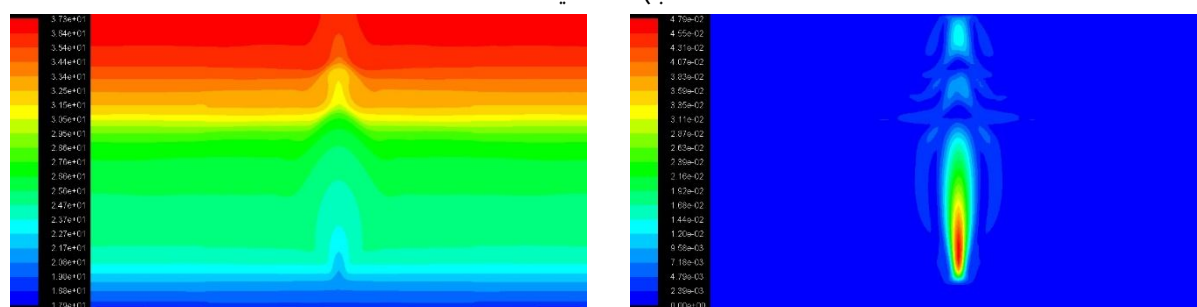
1. Turbulent energy cascade



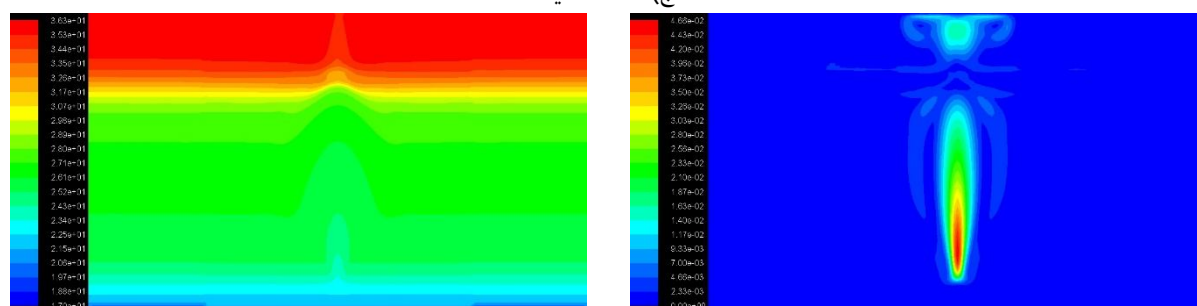
الف) 60 ثانیه



ب) 480 ثانیه



ج) 1500 ثانیه



د) 4200 ثانیه

شکل 10 میدان سرعت (بر حسب متر بر ثانیه - ستون راست) و میدان دما (بر حسب درجه سانتی گراد - ستون چپ) در مخزن برای آزمون A5 پس از گذشت زمان‌های متفاوت از شروع فرایند هوادهی

باشد.

چشم پلوم ناحیه‌ای است که در آن سیال همراه شده با پلوم که از ترازهای پایینی مخزن (نواحی سردتر) با پلوم همراه شده، پس از فاصله گرفتن افقی از پلوم، وارد نواحی میانی مخزن (نواحی گرم‌تر) شده و با حرکت به ترازهای

مدل $k - \epsilon$ استاندارد نمی‌تواند این پدیده را در محاسبات خود لحاظ کند. به عبارتی مدل $k - \epsilon$ میزان انرژی جنبشی آشفتگی در ناحیه چشم پلوم را بیش از مقدار آن در واقعیت مدل‌سازی می‌نماید و این امر سبب شده تا میدان سرعت در این ناحیه با تقریب پایین دستی همراه

گشته که در مدت کوتاهی پس از شروع فرایند هوادهی توانسته لایه‌بندی در مخزن را حذف نماید. همچنین حذف اثرات سطح آزاد در مدل‌سازی عددی صورت گرفته توسط این محققان که می‌تواند الگوی جریان در مخزن را تغییر دهد، از عوامل دیگر ایجاد خطا در نتایج این محققان می‌باشد. در مدل‌سازی عددی این محققان، سطح آزاد به صورت شرط مرزی دیوار بدون لغزش¹ در نظر گرفته شده است.

به عنوان نمونه در آزمون A5، قدرت پلوم موجود در مخزن در مقایسه با لایه‌بندی به حدی کم است که پلوم نمی‌تواند سیال اطراف خود را حرکت داده و به قسمت‌های بالاتر مخزن هدایت نماید که این فرایند در شکل 10 قابل مشاهده می‌باشد. لذا تا مدت زیادی پس از شروع هوادهی، لایه‌بندی همچنان پابرجا باقی مانده است. طبق نتایج آزمایشگاهی نیز پس از گذشت 480 ثانیه، اثری از اختلاط در لایه‌ها در مخزن مشاهده نشده است. در حالی که نتایج مدل عددی یام و همکاران (Yum et al., 2008) حاکی از آن است که پس از 480 ثانیه عملیات اختلاط حدوداً بیش از 50 درصد در حذف لایه‌بندی موفق بوده است. در جدول 2 ضریب همبستگی بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج مدل عددی آمده است. برای تمامی آزمایش‌ها، این مقدار بالاتر از 0/93 بوده که حاکی از دقت بسیار خوب مدل عددی در پیش‌بینی روند تغییرات میدان دما در طی فرایند هوادهی می‌باشد.

نتایج مدل‌سازی عددی مرتبط با بازدهی هر کدام از آزمایشات هوادهی در جدول 3 آمده است. برای محاسبه بازده هر آزمایش از فرمول شماره (12) استفاده شده است. با توجه به نتایج جدول 3 این نتیجه حاصل می‌گردد که بازده اختلاط مصنوعی روی هم رفته کم می‌باشد. علت این است که بخش زیادی از انرژی تزریق شده به سیستم طی لغزش حباب‌ها در محیط سیال صرف تولید آشفستگی گشته که در نهایت اضمحلال می‌یابد. در پلوم نوع اول (آزمایش A1) که قدرت منبع بالا می‌باشد، بخش زیادی از انرژی شناوری حباب‌ها به آشفستگی تبدیل گشته است. با افزایش عدد پلوم و قدرت لایه‌بندی (آزمایش A2)، اتلاف

پایین‌تر، در مخزن پخش می‌گردد (شکل 3-الف). با تقریب پایین‌دستی میدان سرعت در چشم پلوم، عملاً فرایند انتقال و انتشار سیال همراه شده پلوم تضعیف می‌گردد و لذا سیال سردتر نمی‌تواند خود را به نواحی گرم‌تر برساند.

با توجه به اینکه سری‌های زمانی دما در فاصله 25 سانتی‌متری از مرکز پلوم برداشت شده‌اند، با توجه به شکل 6 مشاهده می‌شود تا مدت زمان زیادی پس از شروع فرایند تزریق گاز به مخزن، همچنان ترازهای بالایی مخزن دست نخورده باقی مانده‌اند که علت آن همین تضعیف فرایند اختلاط در اثر تضعیف میدان سرعت در چشم پلوم می‌باشد.

در آزمایش A2 به علت قدرت بیشتر لایه‌بندی و در سه آزمایش A3 الی A5 به علت پایین بودن نرخ تزریق گاز نسبت به آزمایش A1، پدیده تشریح شده نمود بسیار کمتری دارد. در نتیجه طبق شکل‌های 6 تا 9 مشاهده می‌شود که از شروع آزمایش، پلوم توانسته اثرات خود را بر نواحی اطراف خود آشکار سازد؛ هر چند که این اثرات بسته به عدد پلوم این آزمایشات کمتر می‌باشد.

با توجه به آزمایش‌های تنظیم و انجام شده توسط یام و همکاران (Yum et al., 2008)، در آزمایش A2 در قیاس با آزمایش A1، لایه‌بندی قدرت بیشتری داشته، لذا مدت زمان بیشتری لازم است تا اختلاط کامل گردد. در آزمایش A2 مشاهده می‌شود که بعد از گذشت 120 ثانیه از شروع فرایند هوادهی تغییر قابل ملاحظه‌ای در پروفیل دما در عمق، نسبت به ابتدای آزمایش مشاهده نمی‌شود. این در حالی است که مدل عددی یام و همکاران (Yum et al., 2008) نشان می‌دهد پس از گذشت 120 ثانیه از شروع آزمایش، فرایند اختلاط پیشرفت قابل ملاحظه‌ای داشته است. با افزایش عدد پلوم (آزمایش‌های A3 الی A5) دقت پاسخ‌های مدل عددی حاضر حفظ شده، در حالی که دقت پاسخ‌های مدل عددی یام و همکاران (Yum et al., 2008) به طرز چشمگیری کاهش یافته است. به نظر می‌رسد ضعف مدل عددی این محققان در تخمین درست میدان آشفستگی، منجر به تولید خطای قابل توجهی گشته است. در نظر نگرفتن سهم آشفستگی تولیدی توسط حباب‌ها منجر به ایجاد میدان سرعت با قدرتی

1. No slip wall boundry condition

مدت زمان حذف لایه‌بندی مد نظر نباشد، فرایند اختلاط مصنوعی طوری طراحی شود که عدد پلوم از 400 بزرگتر باشد.

4- نتیجه گیری

در این پژوهش از یک مدل سه بعدی دینامیک سیالات محاسباتی به منظور بررسی اختلاط مصنوعی در یک مخزن با لایه‌بندی پایدار استفاده گردید. برتری مدل سه بعدی در لحاظ نمودن هندسه مخزن و دیگر عوامل فیزیکی پیچیده موجود در فرایند اختلاط مصنوعی نسبت به مدل‌های یک و دو بعدی بسیار قابل توجه می‌باشد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که الزاماً با افزایش میزان هوای تزریق شده به مخزن بازده اختلاط مصنوعی افزایش نمی‌یابد. لذا در طراحی سیستم‌های هوادهی برای مخزن سدها می‌توان این نکته را مد نظر داشت که اگرچه با افزایش میزان هوای تزریقی سرعت اختلاط بالا می‌رود، اما همزمان میزان اتلاف انرژی صرف شده برای فشرده کردن هوا و انتقال آن به قسمت‌های تحتانی مخزن نیز افزایش می‌یابد. حداکثر بازدهی این فرایند طبق نتایج تحقیقات گذشته 12 الی 20 درصد گزارش شده است که با نتایج ارائه شده در پژوهش حاضر تطابق دارد. مطابق نتایج پژوهش حاضر برای افزایش بازده اختلاط مصنوعی بهتر است سیستم طوری طراحی گردد که عدد پلوم از 400 بیشتر باشد. همچنین در صورتی که حذف لایه‌بندی در کوتاه مدت مد نظر باشد، می‌توان در ابتدا نرخ تزریق گاز به مخزن را بالا در نظر گرفت (عدد پلوم کمتر از 400 باشد) و پس از ضعیف شدن لایه‌بندی برای افزایش بازده، نرخ تزریق گاز را کاهش داد.

5- فهرست علائم

C_D	ضریب درآگ
$C_{1\varepsilon}$	ضریب ثابت در مدل $k - \varepsilon$ برابر 1/44
d_b	قطر حباب
E	انرژی
E_o	عدد اتووس
\vec{F}	بردار نیروهای اضافی
g	شتاب گرانش

انرژی جنبشی تزریق شده به مخزن که صرف تولید آشفته‌گی می‌گردد، کاهش یافته است.

جدول 2 میزان تطابق نتایج مدل عددی حاضر با نتایج

آزمایشگاهی یام و همکاران (Yum et al., 2008)

با محاسبه ضریب همبستگی

آزمایش	ضریب همبستگی
A1	0/9515
A2	0/9303
A3	0/973
A4	0/9598
A5	0/9661

جدول 3 محاسبه بازده اختلاط برای مدل عددی حاضر و

مقایسه با نتایج آزمایشگاهی یام و همکاران (2008)

آزمایش	نوع آزمایش	زمان اختلاط (ثانیه)	بازده (درصد)
A1 ($P_N = 30$)	آزمایشگاهی	360	6/3
	مدل عددی حاضر	400	9/9
A2 ($P_N = 115$)	آزمایشگاهی	540	9/8
	مدل عددی حاضر	700	12/94
A3 ($P_N = 400$)	آزمایشگاهی	1800	15/3
	مدل عددی حاضر	2010	14/44
A4 ($P_N = 600$)	آزمایشگاهی	2400	14/9
	مدل عددی حاضر	3190	13/24
A5 ($P_N = 1300$)	آزمایشگاهی	3000	39/4
	مدل عددی حاضر	6000	13/51

با کاهش تولید آشفته‌گی، بخش بیشتری از انرژی شناوری حباب‌ها صرف اختلاط در مخزن می‌گردد. در پلوم نوع دوم (آزمایش‌های A3 الی A5)، قدرت منبع در برابر لایه‌بندی بسیار کم بوده و لذا مدت زمان بسیار زیادی لازم است تا تغییراتی در پروفیل دمایی مخزن پدید آورده شود. در این سه آزمایش عملاً قسمت بسیار ناچیزی از انرژی جنبشی تزریق شده به مخزن صرف تولید آشفته‌گی گشته و لذا علی‌رغم طولانی شدن مدت زمان لازم برای کامل شدن فرایند اختلاط مصنوعی، بازده افزایش یافته است. لذا این نتیجه حاصل می‌گردد که در صورتی که

6- مراجع

توحیدی، ح. (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).

سعیدی، پ، مهرداد، ن، آقاشاهی، م. و افضل، ل. (1391). "شبیه‌سازی دو بعدی رژیم حرارتی مخزن سد شهید رجایی"، ششمین همایش ملی مهندسی محیط زیست، دانشگاه تهران، دانشکده محیط زیست.

سلیمانی، ش، بزرگ حداد، ا. و سعادت پور، م. (1394). "شبیه‌سازی لایه بندی حرارتی و تعیین رقم درجه آبگیری مخزن سد کرخه با استفاده از مدل دو بعدی CE-QUAL-W2"، دومین همایش یافته‌های نوین در محیط‌زیست و اکوسیستم‌های کشاورزی، دانشگاه تهران، پژوهشکده انرژی‌های نو و محیط زیست.

کیانوش، ب. (1394). "استفاده از روش عددی حجم محدود جهت مدل‌سازی سه بعدی اختلاط مصنوعی در مخازن سدها با لایه‌بندی حرارتی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب (هیدرولیک)، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

Armengol, J., Crespo, M., Morgui, J. A., and Vidal, A. (1987). "Phosphorus budget and forms of phosphorus in the Sau Reservoir sediment: an interpretation of the limnological record". In *Paleolimnology IV* (pp. 331-336). Springer Netherlands.

Asaeda, T., and Imberger, J. (1993). "Structure of bubble plumes in linearly stratified environments". *Journal of Fluid Mechanics*, 249, pp. 35-57.

Cloete, S. W. P., et al. (2013). "A numerical modelling investigation into design variables influencing mixing efficiency in full scale gas stirred ladles". *Minerals Engineering* 46, pp. 16-24.

Etemad-Shahidi, A., Faghihi, M., and Imberger, J. (2010). "Modelling thermal stratification and artificial de-stratification using DYRESM", Case Study: 15-Khordad Reservoir.

FLUENT, "ANSYS FLUENT Theory Guide," (2013).

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.*, 15(1), pp. 113-120.

Mcdougall, T. J. (1978). "Bubble plumes in

\vec{g}	بردار شتاب گرانش
G_b	تولید آشفتگی در اثر شناوری
G_k	تولید آشفتگی در اثر گرادیان میدان سرعت
H	ارتفاع آب در مخزن
H_A	فشار هوا بر حسب ستون آب
h_j	آنتالپی
J_j	شار پخش فاز زام
k	انرژی جنبشی آشفتگی
k_{eff}	هدایت حرارتی موثر
m_p	جرم حباب
N	شدت (قدرت) لایه‌بندی
p	فشار
Q_0	نرخ تزریق گاز به مخزن
Re	عدد رینولدز حباب
S_k	جمله چشمه برای انرژی جنبشی آشفتگی
S_ε	جمله چشمه برای نرخ اضمحلال آشفتگی
t	زمان
T	دما
u_q	سرعت فاز q
\vec{u}_p	بردار سرعت حباب
u_f	سرعت سیال
u_s	سرعت لغزش حباب
ΔE_p	تغییر در انرژی پتانسیل مخزن
\vec{v}	بردار سرعت سیال
ρ	چگالی
ρ_t	چگالی سیال
ρ_p	چگالی ذرات
ρ^*	چگالی میانگین سیال در مخزن
α	ثابت افزودنی حباب
α_q	کسر حجمی
π	عدد پی
σ	کشش سطحی
σ_k	عدد پراوتل انرژی جنبشی آشفتگی
σ_ε	عدد پراوتل نرخ اضمحلال آشفتگی
μ_t	لزجت آشفته
ε	نرخ اضمحلال انرژی جنبشی آشفتگی
η	بازده فرایند اختلاط مصنوعی
∇	اپراتور دل
\bar{t}	تانسور تنش
$\overline{\overline{t}}_{eff}$	تانسور تنش مؤثر

Sherman, B. (2000). *Scoping options for mitigating cold water discharges from dams*, Canberra, CSIRO Land and Water.

Soga, C. and C. Rehmann (2004). "Dissipation of turbulent kinetic energy near a bubble plume". *Journal of Hydraulic Engineering* 130(5), pp. 441-449.

Yum, K., Kim, S. H., and Park, H. (2008). "Effects of plume spacing and flowrate on destratification efficiency of air diffusers". *Water Research*, 42(13), pp. 3249-3262.

stratified environments". *Journal of Fluid Mechanics*, 85(04), pp. 655-672.

Olsen, J. E., and Popescu, M. (2012, December). "On the effect of lift forces in bubble plumes". In *proceedings of Ninth International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*.

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.