

تحلیل حرکت ذرات رسوب و برآورد کارایی تله اندازی در حوضچه ترسیب با استفاده از مدل اولری-لاگرانژی

حسین غفاریان روح پرور^۱، محمود فغفور مغربی^{۲*}، علی نصیریان^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های هیدرولیکی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استاد گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- دانشجوی دکتری عمران-آب، دانشگاه فردوسی مشهد

* مشهد، کد پستی ۹۱۷۷۹۴۸۹۷۴

maghrebi@um.ac.ir

چکیده- پژوهش های متعددی با استفاده از روش های محاسبات دینامیکی جریان^۱ برای مدل سازی روند ته نشینی در مخزن های رسوب گیر انجام گرفته است. این تحقیقات به منظور پیش بینی الگوهای جریان سیال و فرایند پخش ذرات رسوب در طول مخزن انجام می شود. در پژوهش حاضر، با شبیه سازی جریان در مخزن رسوب گیر، به تحلیل حرکت رسوب در داخل مخزن پرداخته شده است. بدین منظور از روش حجم های محدود استفاده شده است. شبیه سازی با فرض حرکت رسوب در داخل مخزن به صورت لاگرانژی انجام شده است. پس از ارائه نتایج شبیه سازی برای به دست آوردن الگوی جریان، تحلیلی از نحوه حرکت ذرات در مخزن و کارایی تله اندازی مخزن رسوب گیر ارائه شده است.

کلیدواژگان: حوضچه ترسیب، رسوب گذاری، شبیه سازی گردابه های بزرگ، کارایی تله اندازی.

۱- مقدمه

آب آشامیدنی باید از منابع عاری از هرگونه آلودگی تهیه شود. آب در حالت نرمال از منابع آب سطحی تهیه می شود که به طور مستقیم قابل استفاده برای نوشیدن نیست. مهم ترین هدف در روند تصفیه آب، تولید آب سالم و آشامیدنی است. مخزن های رسوب گیر مهم ترین و پرکاربردترین جزء پالایش آب هستند. در مخزن های رسوب گیر استفاده از تمام پتانسیل مخزن، بسیار مشکل است (Long et al., 2007). لذا برای ایجاد حاشیه

اطمینان، معمولاً طراحی مخزن ها بزرگ تر از مقادیر نظری احجام بدست آمده صورت می گیرد که منجر به افزایش هزینه ها می شود. طراحی نامناسب و ناکافی منجر به افزایش بار فیلترها شده و دفعات شستشوی فیلترها افزایش می یابد که باعث اتلاف آب در امر تصفیه می شود (Hammer, 2005). به همین دلیل، درک مناسب از روندهای هیدرولیکی موجود در تصفیه آب، برای طراحی بهینه ضروری است. در روند رسوب گذاری ذرات با چگالی

چگالی نسبت به زمان به منظور کنترل روند گسترش تغییرات چگالی و برای مانع شدن از واگرایی کد از مدل گذرا^۱ استفاده کردند. همچنین در حالت حدی مدل به شرایط پایدار^۲ می‌رسید. مدل آنها شامل دو قسمت بود: مدل آماده کننده سرعت و لزجت آشفتگی و مدل انتقال دهنده ذرات برای تعیین غلظت ذرات. شبیه‌سازی به کمک محاسبات دینامیک جریان نیز برای تحلیل انتقال ذرات رسوب با اندازه‌های مختلف استفاده شد. از این مدل برای برآورد اثرات پالایش رسوب در مسیر جریان استفاده شد، که می‌تواند اطلاعاتی را در مورد پخش و انتشار ذرات و نسبت ذرات رسوب نموده در اختیار قرار دهد. اطلاعاتی از این دسته می‌تواند برای برآورد کارایی در روند رسوب‌گذاری استفاده شود.

Adams et al. (1990) با استفاده از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ و روش QUICK جریان را در حوضچه ترسیب مدل‌سازی و پیش‌بینی کردند و با استفاده از این مدل موانعی را درون مخزن رسوب‌گیر مدل کردند که منجر به استخراج نتایج مناسبی شد. آنها برای پیش‌بینی کارایی مخزن رسوب‌گیر از FTC^3 استفاده کردند.

Ashjari et al. (2003) با استفاده از روش $k-\epsilon$ غیر خطی و FTC جریان را درون حوضچه تحلیل کرده و کارایی مخزن رسوب‌گیر را برآورد نمودند. در این زمینه Stamou et al. (2001) با استفاده از روش‌های محاسبات دینامیکی جریان مدل‌سازی‌های عددی برای حوضچه‌ها آramش با هندسه‌های مختلف ارائه کردند. آنها همچنین از FTC برای بررسی تغییرات کارایی مخزن در حالات مختلف قرار گیری مانع درون مخزن رسوب‌گیر استفاده کردند. Maxey (1990) در قسمت حرکت ذره در یک میدان جریان که در یک جریان آشفتگی ایجاد شده است از یک مدل لاگرانژی استفاده نموده، در حالیکه مدل جریان

بالاتر از آب، ذره از مسیر خطوط جریان سیال منحرف شده و در کف مخزن رسوب‌گیر ته‌نشین می‌شود (Anonymous, 2004). بنابراین عملکرد رسوب‌گذاری در مخزن‌های رسوب‌گیر، شدیداً تحت تأثیر چگالی جریان، نیروی ثقل و غلظت سیال بوده و در نتیجه الگوهای جریان و چگالی در مخزن‌ها روی روند ته‌نشست ذرات اثر می‌گذارد (Heath et al., 2003).

شاخص اولیه کارایی مخزن‌های رسوب‌گیر، حذف ذرات جامد است که به وسیله رسوب‌گذاری یا لجن زدایی از آب جدا شده‌اند. از طرفی ضروری است که شرایطی ایجاد شود که مخزن دارای ظرفیت بهینه باشد (Stevenson, 1997).

Stamou (1997) در مورد بهینه‌سازی ابعاد و هندسه حوضچه‌های آرامش تحقیقات خود را ارائه نمود. این مدل به منظور بهینه‌سازی طرح مخزن رسوب‌گیر ثانویه یک طبقه طرح گردید. Imam et al. (1983) معادلات جریان را با فرض وجود گردابه‌های ثابت حل کردند و موفقیت‌هایی در زمینه پیش‌بینی مشخصات جریان بدست آوردند. Shamber and Larock (1981) جریان درون مخزن‌های رسوب‌گیر را به کمک روش اجزای محدود و برای جفت معادلات حاکم بر جریان سیال و رسوب حل کردند. به هر صورت از اثرات اندرکنش ذرات بر سیال و سرعت ته‌نشینی در این مدل صرف‌نظر شد.

Long et al. (2007) روی دینامیک جریان در حوضچه‌های ترسیب ثانویه مطالعه کردند و مدلی برای جریان دوفازه سیال-جامد در جریان آشفتگی درون مخزن به صورت سه بعدی و دو سیال توسعه دادند. سجادی و همکاران (۲۰۰۹) مدلی را برای طراحی حوضچه‌های رسوب‌گیر مطالعه کرده و عملکرد آنها را با داده‌های آزمایشگاهی و میدانی مورد ارزیابی قرار دادند. تصفیه‌کننده دوار دو بعدی به وسیله McCorquodale and Zhou (1993) مدل شد. آنها برای شبیه‌سازی تغییرات

1. Transient
2. Steady State
3. Flow Through Curves

سلولی در آن، خود بوسیله یک دیدگاه اولری تولید شده است.

در این تحقیق، جریان درون مخزن رسوب‌گیر با استفاده از یک مدل محاسباتی دوبعدی که در محیط برنامه نویسی متلب نوشته شده، مطالعه می‌شود. برای این امر نخست با استفاده از مدل عددی حجم محدود با الگوریتم SIMPLE و به کمک شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ جریان آشفته، جریان داخل مخزن مدل شده و خطوط جریان استخراج می‌شود. سپس با تزریق ذرات رسوب که دارای چگالی و قطرهای مشخصی هستند، مسیر حرکت آنها بدست می‌آید و الگوی جریان، مسیر جریان رسوب و نحوه حرکت ذرات با قطرهای مختلف در مخزن استخراج می‌شود. در انتها کارایی حوضچه ترسیب نیز مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این تحقیق مدل سازی با فرض پایداری و یکنواخت بودن تراز سطح آب در مخزن انجام شده است.

۲- معادلات حاکم

مدل مورد مطالعه به دو بخش اصلی تقسیم می‌شود. در قسمت شبیه‌سازی اولری، جریان با مدل‌سازی به روش حجم محدود و به کمک شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ تحلیل شده و خطوط جریان در میدان جریان سیال استخراج گردیدند. به عنوان شرایط مرزی در ورودی و خروجی از توزیع یکنواخت سرعت استفاده گردید. پس از استخراج خطوط جریان و مشخصات جریان در قسمت‌های مختلف شبکه محاسباتی، ذرات رسوب در ورودی با توزیعی یکنواخت و به صورت دانه‌ای و مستقل از یکدیگر با حرکتی لاگرانژی وارد مخزن شده و ادامه حرکت آنها با تبعیت از اثرات جریان سیال، وزن ذرات، نیروهای شناوری و رانش، درون مخزن دنبال می‌شوند. در این مدل‌سازی از فرضیاتی نظیر لغزش ذرات بر روی دیواره‌ها، در نظر گرفتن جرم افزوده و اثرات ذرات بر

یکدیگر صرف‌نظر گردید.

به‌منظور تحلیل جریان سیال، باید بتوان معادلات حاکم بر جریان را در تمام نقاط شبکه محاسباتی حل کرد. معادلات حاکم بر جریان سیال، معادلات پیوستگی و مومنتوم می‌باشند که به معادلات ناویر-استوکس معروفند. معادلات حاکم مورد استفاده در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ^۱ با استفاده از متوسط گیری زمانی معادلات ناویر-استوکس در فضای فیزیکی به‌دست می‌آید. معادلات فیلتر شده ناویر-استوکس به‌صورت زیر می‌باشد (Salveti, 2001):

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + 2 \left(\nu + \nu_{sgs} \right) \frac{\partial \bar{S}_{ij}}{\partial x_j} \quad (1)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$$

در این روابط u_i و u_j به ترتیب نشان دهنده سرعت در راستای افقی و قائم، S_{ij} نرخ کرنش^۲، ν و ρ به ترتیب لزجت سینماتیک و جرم حجمی سیال و ν_{sgs} لزجت مقیاس زیر شبکه^۳ است که در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ با استفاده از مفهوم لزجت گردابه‌ای مقدار آن که خاصیتی از جریان و نه سیال می‌باشد، از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\nu_{sgs} = (C \Delta)^2 |\bar{S}_{ij}| \quad (2)$$

در این رابطه Δ طول فیلتر بکاربرده شده در معادلات ناویر-استوکس می‌باشد که برابر اندازه شبکه در نظر گرفته شده و C ثابت اسماگورینسکی می‌باشد. از طرفی سرعت سقوط ذرات رسوب با فرض حرکت لاگرانژی و با استفاده از معادلات دینامیکی حاکم بر جریان ذره بدست می‌آید. فرض جریان لاگرانژی در حالتی که نسبت حجم ذرات کم باشد و حضور ذرات روی جریان اثرگذار

1. Large Eddy Simulation (LES)
2. Rate of strain
3. Subgrid scale viscosity

رسوب و g شتاب گرانش معادل $9.8m/s^2$ می باشد. در جریان با اعداد رینولدز کمتر از 0.1 ضریب C_D از رابطه زیر محاسبه می شود (Vanoni, 2006):

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad Re < 0.1 \quad (5)$$

همان طور که در شکل ۱ دیده می شود، این رابطه در اعداد رینولدز بزرگتر از 0.1 شروع به انحراف از نتایج آزمایشگاهی می کند. برای برآورد C_D در اعداد رینولدز بالاتر از 0.1 از شکل ۱ استفاده می شود. می توان با تقسیم این نمودار به اجزاء کوچکتر و استخراج معادله خط بدست آمده تحت این شرایط، نمودار را به برنامه شبیه سازی معرفی کرده و در اعداد رینولدز مختلف از مقادیر نظیر C_D استفاده نمود.

۳- صحت سنجی مدل

در سال ۲۰۰۹ در دانشگاه ناتینگهام انگلیس مدل یک مخزن رسوب گیر توسط Sammarrae et al. (2009) مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. برای صحت سنجی مدل در روند رسوبگذاری و مدل کردن حرکت ذرات رسوب، مدلی مشابه مدل Sammarrae et al. (2009) اجرا و نتایج با یکدیگر مقایسه شد. شیب کف مخزن در این مدل برابر 4% بوده که دبی 60 مترمکعب در ساعت در واحد عرض از آن عبور می کند. ورودی در این مدل تمام دیواره سمت چپ بوده و ارتفاع خروجی آن 0.4 متر می باشد. عمق مخزن در مقطع خروجی برابر 1 متر است که با توجه به شیب کف مخزن و طول آن، عمق ورودی برابر $1/8$ متر بدست می آید. ابعاد و هندسه کلی این مدل در شکل ۲ ارائه شده است. ذرات در این مدل بر اساس قطر در 13 کلاس طبقه بندی شده اند. شکل ذرات رسوب کروی در نظر گرفته شد. این طبقه بندی بر اساس اطلاعات اندازه گیری شده از آب خام^۲ با استفاده از روش پراش لیزر^۳ استوار بوده که در جدول ۱ مشخص شده است (Sammarrae et al., 2009).

نباشد فرض مناسبی می باشد (Sammarrae et al., 2009). در مدل سازی حرکت رسوب درون مخزن فرض می شود که ذرات رسوب دارای حرکت لاگرانژی تحت اثر سرعت جریان پایدار سیال در داخل مخزن رسوب گیر به اضافه سرعت ته نشینی ذرات تحت اثر معادله دینامیکی حاکم بر جریان ذره هستند. در روند تحلیل و مدل سازی حرکت ذرات رسوب، از تأثیر متقابل ذرات بر یکدیگر صرف نظر شده و نیروهای حاکم، شامل نیروهای مقاومت در برابر حرکت، سبک کنندگی و وزن ذرات می باشند. در واقع باید گفت تفاضل سرعت مطلق ذره از سرعت جریان سیال که اولی از یک تحلیل لاگرانژی بر روی ذره حاصل می شود و دومی براساس یک تحلیل اولری که بصورت عام در میدان جریان برقرار است بدست می آید، مبنای محاسبه نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر ذره می باشد. یادآوری می شود از آنجا که تفاضل وزن مخصوص ذرات و سیال مجاور منجر به نیروهایی می شود که ذره را از مسیر خطوط جریان خارج می سازد، لذا می توان ادعا کرد که استفاده از سرعت سقوط ذره به عنوان تفاضل سرعت های لاگرانژی و اولری دقیقاً منطبق بر واقعیت است. مقدار نیروی رانش وارد بر ذره در حال سقوط را می توان از رابطه زیر محاسبه کرد (Rubey, 1933):

$$F_D = C_D \frac{1}{2} \rho_w A_p w_s^2 \quad (3)$$

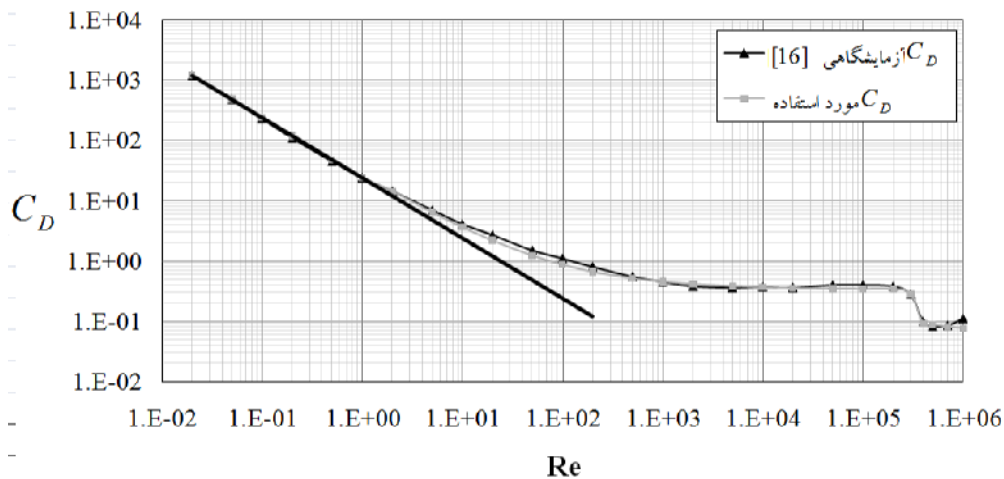
در این رابطه w_s سرعت سقوط ذره، ρ_w جرم حجمی آب، A_p بزرگترین سطح مقطع ذره در برابر جریان و C_D ضریب رانش^۱ است. فرض می شود که سقوط ذره رسوب طی یک فرآیند بدون شتاب صورت گیرد و این به معنای برابر بودن نیروهای ناشی از رانش، وزن و سبک کنندگی می باشد که نهایتاً منجر به استخراج معادله (۴) می شود:

$$w_s = \left[\frac{4gD_s (\rho_s - \rho_w)}{3C_D \rho_w} \right]^{0.5} \quad (4)$$

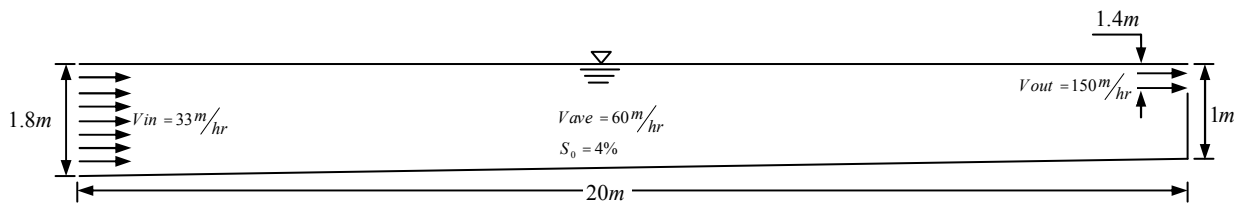
که در این رابطه D_s قطر ذره، ρ_s جرم حجمی ذرات

1. Raw Water
2. Laser Diffraction Technique

4. Coefficient of Drag



شکل ۱ ضریب C_D بصورت تابعی از عدد رینولدز برای ذرات کروی (Rubey, 1933)



شکل ۲ هندسه مدل Sammarrae et al. (2009) به منظور صحت‌سنجی حرکت رسوب

جدول ۱ اندازه ذرات طبقه بندی شده (Sammarrae et al. 2009)

جرم ورودی (gr/s)	نسبت وزنی ذرات ورودی	قطر متوسط ذرات (μm)	کلاس ذرات
۱/۲۵	۰/۰۲۵	۲۰	۱
۱/۳۵	۰/۰۲۷	۵۰	۲
۱/۹۵	۰/۰۳۹	۸۰	۳
۳/۳	۰/۰۶۶	۱۲۰	۴
۴/۷۵	۰/۰۹۵	۱۷۰	۵
۴/۷۵	۰/۱۱۵	۲۰۰	۶
۶/۳۰	۰/۱۲۶	۲۵۰	۷
۶/۲۰	۰/۱۲۴	۳۵۰	۸
۵/۶۵	۰/۱۱۳	۴۵۰	۹
۵/۰۵	۰/۱۰۱	۵۵۰	۱۰
۳/۸۵	۰/۰۷۲	۶۵۰	۱۱
۲/۸۵	۰/۰۵۷	۷۵۰	۱۲
۲/۰۰	۰/۰۴	۸۵۰	۱۳
۵۰/۲۵	۱	جمع	

در این جدول علاوه بر قطر ذرات کلاس بندی شده، نسبت ورودی هر ذره و جرم وارد شده در واحد زمان نیز ارائه شده است. به عنوان مثال ذرات با قطر ۲۵۰ میکرومتر که بیشترین درصد وزنی را به خود اختصاص می‌دهند، شامل ۱۲/۶ درصد از کل ذرات بوده و در هر ثانیه ۶/۳ گرم ذرات با این قطر به مخزن وارد می‌شوند.

در این مدل جرم حجمی آب و ذرات به ترتیب 998.2 kg/m^3 و 2066 kg/m^3 در نظر گرفته شد. در مخزن‌های رسوب‌گیر طولی، رسوبات به طور متناوب از حوضچه تخلیه می‌شوند، لذا تجمع ذرات در کف مخزن مشکلی ایجاد نخواهد کرد (Long et al., 2007).

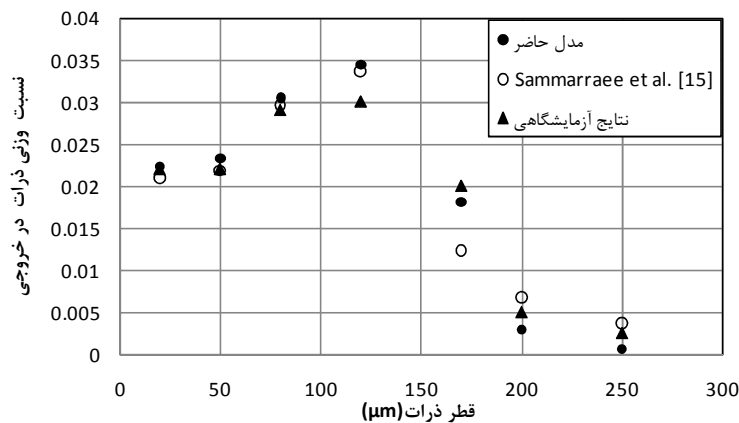
پس از اجرای مدل و تحلیل جریان داخل این مخزن، ذرات رسوب با دانه بندی ذکر شده به مخزن تزریق شد. نتایج ارائه شده توسط Sammarrae et al. (2009) شامل نتایج آزمایشگاهی و تحلیل عددی می‌باشد.

۲۵۰ میکرومتر به بالا، کارایی تله اندازی به صددرصد می‌رسد.

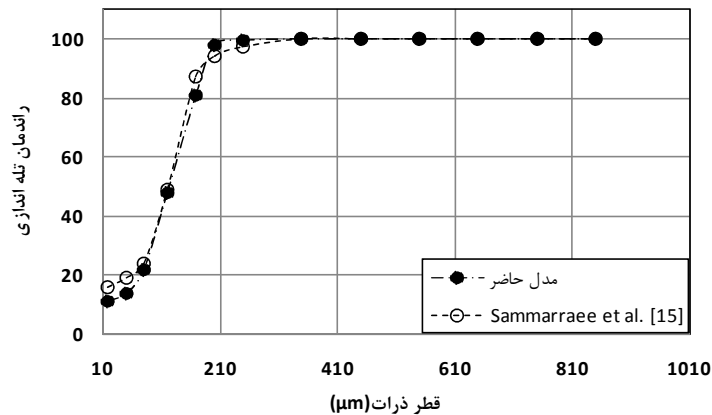
در مدل (Sammarraee et al. (2009) مطالعه روی مخزن رسوب‌گیری با کف شیب‌دار انجام شد. این مدل در محیط نرم افزاری FLUENT 6.3 و بصورت جریان دو فازی سیال-رسوب مدل شد. مدل حاضر که به کمک کد نوشته شده در محیط برنامه نویسی متلب تهیه شد، شامل دو بخش مجزا می‌باشد. در این مدل پس از استخراج مشخصات جریان، ذرات رسوب به مدل وارد شده و با گذشت زمان، ذرات در هر گام ردیابی شده و با توجه به مشخصات جریان در هر نقطه، موقعیت ذره در گام زمانی بعدی پیش بینی می‌شود.

در ادامه مقایسه میان نتایج حاصله از برنامه کامپیوتری با داده‌های آزمایشگاهی، برای دانه بندی ذرات رسوب در خروجی مخزن آورده شده است.

مطابق شکل ۳ پس از وارد نمودن نتایج عددی و مقایسه آن با کار آزمایشگاهی و نتایج عددی (Sammarraee et al. (2009) مشاهده می‌شود که مدل حاضر دارای دقتی مناسب است. می‌توان مشاهده نمود که مدل حاضر در اکثر حالات به نتایج آزمایشگاهی نزدیکتر بوده و انطباق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. نمودار کارایی تله اندازی رسوب برای مدل (Sammarraee et al. (2009) مخزن مدل شده نیز در شکل ۴ مشاهده می‌شود. در کل دو مدل دارای تطابق مناسبی هستند و در هر دو مدل، از ذرات



شکل ۳ مقایسه دانه بندی ذرات در خروجی مخزن با نتایج آزمایشگاهی



شکل ۴ مقایسه کارایی تله اندازی رسوب به منظور صحت سنجی مدل

۴- معرفی هندسه مدل آزمایشگاهی

ابعاد و هندسه کلی مدل این تحقیق بر گرفته از مدل آزمایشگاهی موجود در دانشگاه Karlsruhe در آلمان است که توسط (Stamou (2001 و Tamayol et al. (2008) استفاده شده است. این تحقیقات در مورد بهینه سازی ابعاد حوضچه‌های رسوب‌گیر و اثرات استفاده از مانع درون مخزن رسوب‌گیر می‌باشد. مدل شامل یک مخزن طولی به طول ۴۱ متر، ارتفاع کل ۲/۸ متر و ارتفاع ورودی ۱/۴ متر می‌باشد (شکل ۵). مقادیر پیشنهادی برای سرعت حرکت آب داخل حوضچه ترسیب، مقداری کمتر از ۸ سانتیمتر بر ثانیه پیشنهاد شده است (DE Clercq, 2003). در این تحقیق سرعت جریان در مقطع ورودی ۴/۴ سانتیمتر بر ثانیه در نظر گرفته شد.

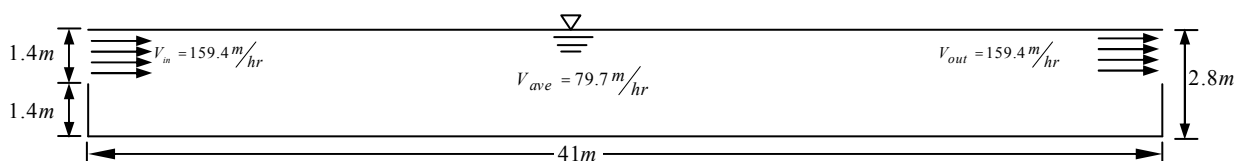
در فرآیند آماده سازی مدل در بخش اولری، ابتدا نسبت به معرفی پارامترهای هندسی و هیدرولیکی مخزن رسوب‌گیر اقدام می‌شود. سپس شرایط اولیه و مرزی مسئله شامل سرعت و فشار در دیواره‌ها و سرعت در سطح آزاد جریان و نیز در مقاطع ورودی و خروجی به مدل معرفی شده و معادلات مومنتوم و پیوستگی با استفاده از روش حجم محدود حل می‌شوند. جهت ایجاد پایداری در روند تحلیل جریانهای با عدد رینولدز بالا از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ استفاده می‌شود. در ادامه جهت بررسی همگرایی کنترل خطا در یک گام زمانی و در کلیه نقاط شبکه برای پارامترهای سرعت و فشار انجام شده و تصحیح مقادیر و آماده‌سازی ماتریس پارامترها جهت تحلیل در گام بعدی صورت می‌گیرد.

سپس در بخش مدل سازی لاگرانژی، مشخصات ذرات رسوب شامل قطر و چگالی، معرفی شده و ذرات که هریک دارای شناسه مستقلی می‌باشند به مخزن وارد می‌شوند. سپس با محاسبه سرعت ناشی از جریان در هر نقطه از شبکه محاسباتی و در جهات افقی و قائم، تحت تاثیر نیروهای رانش، وزن، سبک کنندگی و شتاب حرکت ذره (اینرسی)، نحوه حرکت ذره به گام بعد ردیابی شده و نتایج استخراج می‌شود.

۵- نتایج

در این پژوهش ابتدا الگوی جریان داخل مخزن رسوب‌گیر بررسی شد و خطوط جریان استخراج شده با نتایج (Tamayol et al. (2008) مقایسه شد (شکل ۶).

همانطور که در این شکل مشخص است نتایج از انطباق مناسبی برخوردار هستند. در این شکل، ورودی در حد فاصل ۱/۴ تا ۲/۸ متر نسبت به کف حوضچه ترسیب قرار گرفته است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود طول نواحی چرخشی ایجاد شده در این دو حالت تقریباً یکسان و در حدود $x/h = 3/6$ می‌باشد. با بررسی خطوط جریان مشاهده می‌شود که در ابتدای مخزن، جریان دارای الگوی چرخشی مشابه الگوی پله می‌باشد و در ادامه خطوط جریان بصورت موازی درمی‌آیند، اما تراکم خطوط از بالا به پایین کم می‌شود که این موضوع مبین کاهش سرعت جریان در اعماق پایین‌تر است. از این واقعیت در ادامه برای تحلیل سرعت حرکت ذرات در مخزن استفاده می‌شود.



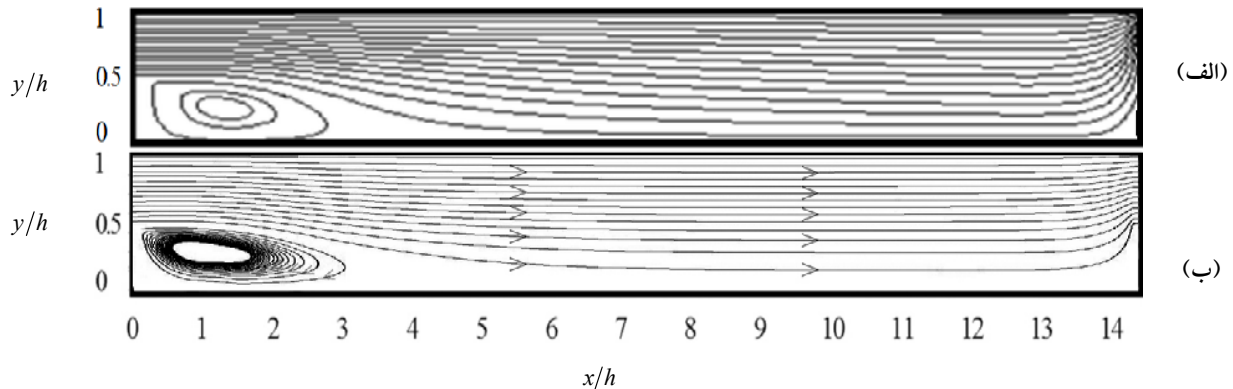
شکل ۵ هندسه مدل مورد مطالعه

هر ذره مشخص است، می‌توان علاوه بر درصد ذرات خروجی نسبت به ورودی، غلظت ذرات را در ورودی و خروجی بدست آورد (شکل ۸). با مقایسه غلظت رسوبات در ورودی و خروجی مخزن رسوب‌گیر، می‌توان به قضاوت خوبی نسبت به نحوه عملکرد مخزن دست یافت، چرا که با افزایش قطر می‌توان کاهش غلظت ذرات در خروجی را به وضوح مشاهده کرد.

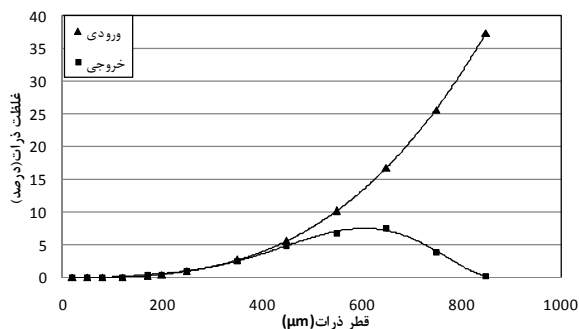
در این شبیه‌سازی، فرض می‌شود هر ذره علاوه بر سرعتی که جریان در دو جهت افقی و قائم به آن دیکته می‌کند، دارای سرعت سقوطی باشد که از معادله دینامیکی حاکم بر جریان ذره بدست می‌آید. در ابتدا که ذرات به مخزن تزریق می‌شوند، تعداد ذرات در خروجی برابر صفر است. با گذشت زمان ذرات رسوب با توجه به قطر ذره شروع به خروج از مخزن نموده و پس از مدتی میزان خروجی از مخزن به تعادل می‌رسد.

با وارد کردن ذرات رسوب در ۱۳ رده قطری مطابق جدول ۱ وضعیت ته نشینی ذرات و توان تله اندازی رسوب در مخزن بررسی شد. شکل ۷ دانه بندی ذرات موجود در مدل را در ورودی و خروجی مخزن رسوب‌گیر نشان می‌دهد. در ورودی مخزن، با توجه به قطر ذرات، دانه‌بندی روندی صعودی دارد. با توجه به این واقعیت که با افزایش قطر، تعداد بیشتری از ذرات رسوب در مخزن به تله می‌افتند، لذا در خروجی نسبت ذرات ریزدانه‌تر در مقابل ذرات درشت دانه، بیشتر است و این افزایش نسبت ذرات موجب ایجاد شکستگی در نمودار دانه بندی ذرات در خروجی می‌شود. پس از این تغییر انحنای در شرایط حاضر و در این مدل، تقریباً در قطر ۶۰۰ میکرومتر روی می‌دهد، نسبت ذرات کاهش یافته تا به صفر برسد.

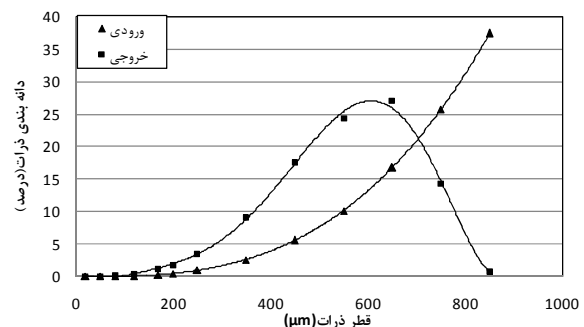
با توجه به اینکه تعداد ذرات ورودی و خروجی و وزن



شکل ۶ خطوط جریان الف- نتایج Tamayol et al (2008) و ب- نتایج محاسباتی کار حاضر



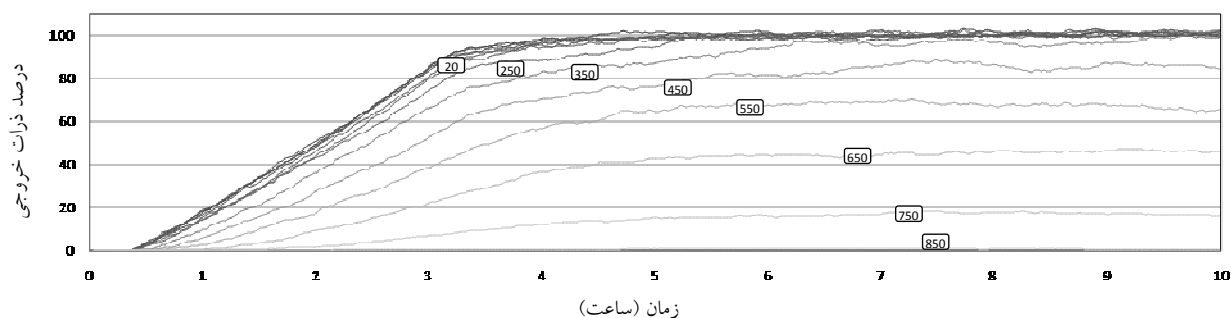
شکل ۸ غلظت ذرات ورودی در مقابل ذرات خروجی



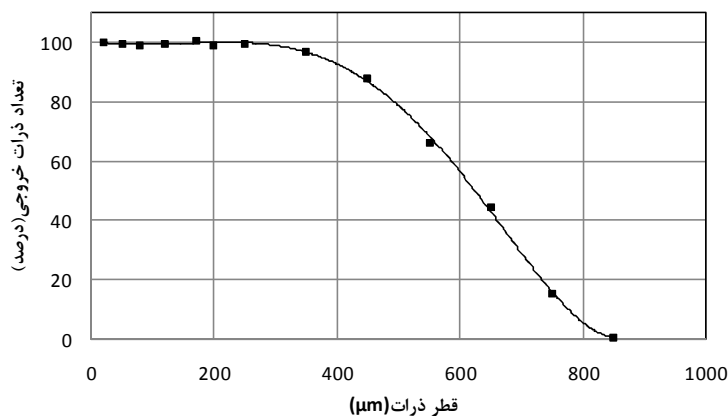
شکل ۷ دانه بندی ذرات ورودی و خروجی

درصد ذرات از مخزن خارج شده و لذا کارایی تله اندازی برابر ۸۵ درصد است. در این مدل تقریباً تمامی ذرات با قطر ۸۵۰ میکرومتر به تله می‌افتند. به طور متوسط، از ۱۰۰٪ ذره رسوب با دانه بندی مشخص شده در شکل ۷، مقدار ۷۲/۳٪ آن در مخزن به تله افتاده و ۲۷/۷٪ ذرات از مخزن خارج می‌شود. درصد ذرات خارج شده از مخزن به تفکیک قطر هر ذره در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که برای ذرات با قطر تا حدود ۲۵۰ میکرومتر، مقدار ذرات ورودی و خروجی برابر است و لذا می‌توان چنین نتیجه گیری کرد که این مخزن توانایی تله اندازی ذرات کوچک‌تر از ۲۵۰ میکرومتر را ندارد. اما با افزایش قطر از ۲۵۰ میکرومتر به بالا کم کم اثرات تله اندازی در مخزن افزایش یافته و ذرات بیشتری در مخزن رسوب می‌کنند.

شکل ۹ روند خروج ذرات از مخزن را نسبت به زمان نشان می‌دهد. در این شکل قطر هر ذره بر روی دیاگرام مربوط نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که ذرات با قطر کوچک‌تر زودتر به خروجی مخزن می‌رسند و زمان رسیدن اولین ذرات به انتهای مخزن تقریباً برابر ۲۵ دقیقه بوده و مدت زمان تقریبی رسیدن به تعادل برابر ۳/۵ ساعت می‌باشد و از این زمان به بعد درصد خروجی ذرات تقریباً به ثبات می‌رسد. اولین ذرات خارج شده از مخزن رسوب گیر، ذرات با قطر ۲۰ میکرومتر بوده و با گذشت زمان ذرات درشت‌تر از مخزن خارج می‌شوند. از طرفی به کمک این نمودار، می‌توان درصد تله اندازی را برای هر قطر در زمانهای مختلف بدست آورد. به عنوان مثال برای ذرات با قطر ۷۵۰ میکرومتر، پس از گذشت حدوداً ۴ ساعت ۱۵



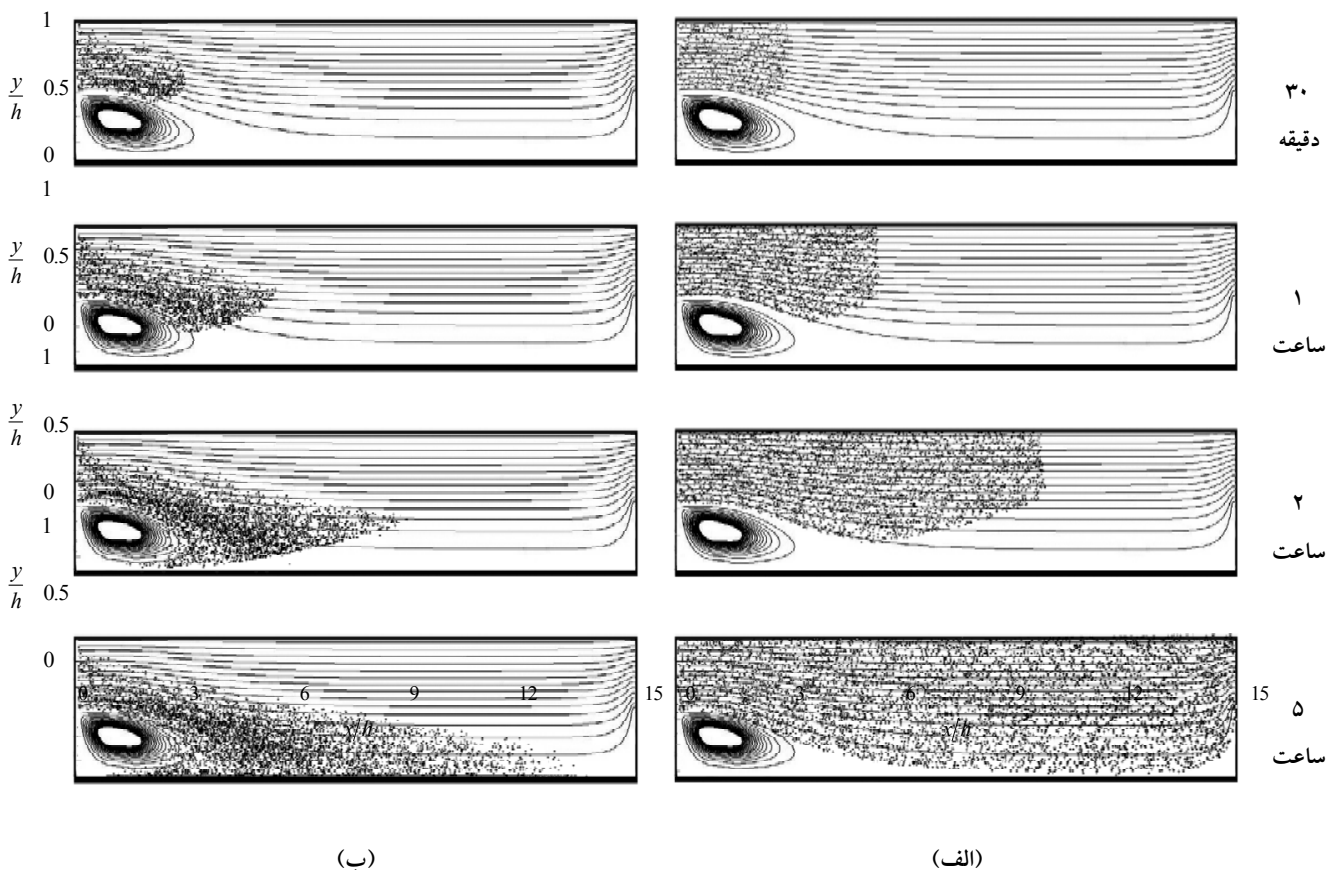
شکل ۹ روند خروج ذرات از مخزن رسوب گیر نسبت به زمان



شکل ۱۰ تعداد ذرات خروجی از مخزن به تفکیک قطر

این شکل مشاهده می‌شود که برای ذرات با کمترین قطر که همان ۲۰ میکرومتر باشد، پس از گذشت ۲ ساعت از شروع حرکت اولین ذرات رسوب، دانه‌های رسوب به فاصله تقریبی ۱۰ برابر ارتفاع مخزن رسوب‌گیر می‌رسند، درحالی‌که با افزایش قطر، این مقدار، برای ذرات با قطر ۸۵۰ میکرومتر تقریباً برابر ۹ برابر ارتفاع مخزن رسوب‌گیر است. علت این امر را می‌توان در تراکم خطوط جریان دانست. همان‌طور که در این اشکال به وضوح مشاهده می‌شود تراکم خطوط جریان در سطح مخزن نسبت به ترازهای پایین‌تر آن بیشتر است و همان‌طور که در بالاتر نیز اشاره شد، این امر نشان دهنده کاهش سرعت افقی جریان در ترازهای پایین نسبت به نواحی بالاتر مخزن است.

پس از ورود ذرات رسوب به داخل مخزن رسوب‌گیر، می‌توان حرکت ذرات را بصورت لحظه به لحظه دنبال کرده و موقعیت توده ذرات را مطابق شکل ۱۱ در زمانهای مختلف نمایش داد. شکل ۱۱ نمونه‌ای از این تصاویر را در زمانهای ۳۰ دقیقه و ۱ و ۲ و ۵ ساعت و برای ذراتی به قطرهای ۲۰ و ۸۵۰ میکرومتر می‌باشد. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود با گذشت زمان، جریان رسوب در مخزن رسوب‌گیر گسترش یافته و به سمت خروجی جهت گرفته است. مطابق نتایج حاصله، میزان سرعت پیشروی و گسترش ذرات، ارتباطی معکوس با قطر ذرات دارد، به طوری که با افزایش قطر ذرات رسوب، حرکت آنها به جلو کاهش یافته و در مقابل سرعت ته‌نشینی ذرات افزایش می‌یابد. به عنوان مثال در



شکل ۱۱ روند ته‌نشینی ذرات درون مخزن رسوب‌گیر در بازه زمان برای قطرهای الف) ۲۰ میکرومتر و ب) ۸۵۰ میکرومتر

کانال خروجی افزایش می‌یابد.

با داشتن تعداد ذرات خروجی از مخزن، می‌توان کارایی تله اندازی مخزن رسوب‌گیر را با توجه به دانه بندی ذرات در ورودی بدست آورد.

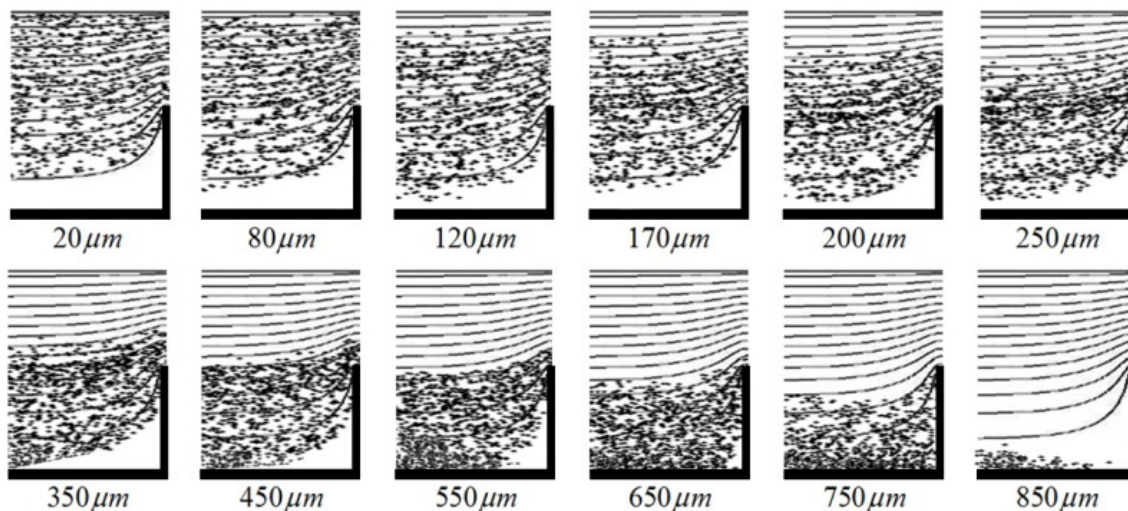
مقدار بار رسوبی ته‌نشین شده در این مطالعه تحت عنوان کارایی تله اندازی با استفاده از رابطه (۶) محاسبه شد (سجادی و همکاران، ۲۰۰۹):

$$Te = \frac{S_i - S_o}{S_i} \times 100 \quad (6)$$

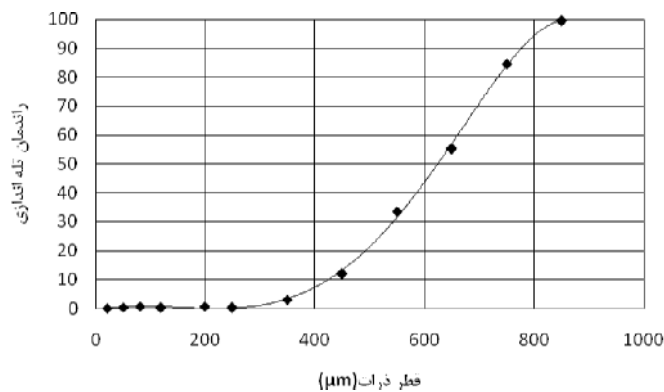
که در این رابطه Te کارایی تله اندازی و S_i و S_o به ترتیب میزان غلظت متوسط رسوبات وارد و خارج شده در واحد زمان از مخزن رسوب‌گیر می‌باشد. شکل ۱۳ کارایی تله اندازی ذرات رسوب را با توجه به قطر آنها نشان داده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، هرچه قطر ذرات به ۲۰۰ میکرومتر نزدیک می‌شود شیب نمودار کم می‌شود. می‌توان چنین برداشت کرد، در قطرهای کمتر از ۲۵۰ میکرومتر، در مخزنی با مشخصات ذکر شده، کارایی تله اندازی رسوب تغییر چندانی نمی‌کند. از طرفی با گرفتن رگرسیون از این داده‌ها، می‌توان مشاهده کرد که در قطرهای بالاتر از ۸۵۰ میکرومتر کارایی تله اندازی مخزن به ۱۰۰ درصد می‌رسد.

با دانستن این واقعیت می‌توان دلیل این امر که زمان رسیدن ذرات بزرگ‌تر به انتهای مخزن بیشتر است، را توجیه کرد، چرا که ذرات درشت دانه زودتر به اعماق مخزن سقوط می‌کنند و در این ترازها سرعت افقی جریان کاهش می‌یابد، لذا این ذرات در زمان طولانی‌تری به انتهای مخزن می‌رسند.

به کمک شکل ۱۲ می‌توان ارتفاع خروج ذرات را در هر قطر بدست آورد. مشاهده می‌شود که در اقطار کوچک‌تر ذرات از تمام ارتفاع خارج می‌شود، البته توزیع آنها یکسان نبوده و تعداد بیشتری از ارتفاع پایین‌تر خارج می‌شوند. از طرفی مشاهده می‌شود که با افزایش قطر در بالای حوضچه ترسیب خطی شکل می‌گیرد که بالای آن آب فاقد ذرات با قطر معین هستند. همان‌گونه که در این اشکال مشاهده می‌شود با افزایش قطر ذرات، دانه‌های رسوب در ترازهای پایین‌تری از مقطع خروجی، خارج می‌شوند. به عنوان مثال، ذرات با قطر ۲۰ میکرومتر از تمام ارتفاع مقطع خروجی، خارج می‌شوند، در حالی که ذرات با قطر ۳۵۰ میکرومتر حداکثر می‌توانند از نیمی از ارتفاع مقطع بالا آیند و به همین ترتیب هرچه قطر ذرات بالاتر می‌رود ذراتی که توانایی خروج از مخزن را دارند از ارتفاع پایین‌تری خارج می‌شوند. لذا با ترکیب ذرات با قطرهای مختلف، در مجموع غلظت و قطر ذرات در کف



شکل ۱۲ عمق و غلظت ذرات در انتهای مخزن و در مقطع خروجی



شکل ۱۳ کارایی تله اندازه‌ای ذرات رسوب

قرار گیرد.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، فرآیند رسوبگذاری در یک مخزن طولی به طول ۴۱ متر و ورودی و خروجی با عمق ۱/۴ متر با استفاده از یک مدل دوبعدی اولری-لاگرانژی مورد مطالعه قرار گرفت. در قسمت شبیه‌سازی اولری جریان، با استفاده از مدل‌سازی به روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ که در حل معادلات ناویر-استوکس بکار گرفته می‌شود، خطوط جریان در میدان جریان مخزن رسوب‌گیر طولی با یک ورودی و یک خروجی استخراج می‌شوند. سپس در قسمت لاگرانژی مدل، ذرات رسوب در ورودی با توزیعی یکنواخت معرفی شده و ادامه حرکت آنها با تبعیت از اثرات جریان سیال، وزن ذرات، نیروهای سبک‌کنندگی و رانش، بصورت مستقل تعیین می‌گردد. با استفاده از برون‌یابی تابع حاصل از کارایی تله‌اندازی رسوب، مشخص گردید که در مخزنی با شرایط ذکر شده، تقریباً تمامی ذرات با قطر بالاتر از ۸۵۰ میکرومتر به تله می‌افتند. از طرفی با استفاده از منحنی برازش داده شده بر اطلاعات می‌توان برآوردی از کارایی تله‌اندازی در دامنه ۲۰ تا ۸۵۰ میکرومتر را پیش‌بینی کرد. با درونیابی اطلاعات مقطع خروجی مخزن رسوب‌گیر معادلاتی جهت پیش‌بینی پارامترهایی نظیر فراوانی، غلظت، قطر و موقعیت ذرات رسوب در مخزن ارائه شد که قطعاً نتایج حاصل می‌تواند راهنمای طراحان مخزن‌های رسوب‌گیر

۷- تشکر و قدردانی

بدینوسیله نویسندگان مقاله تمایل دارند تشکر و قدردانی خود را از معاونت پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد برای حمایت از این طرح تحقیقاتی تحت شماره ۱۷۲۷۲ مورخ ۱۳۸۹/۱۲/۲۰ اعلام دارند.

۸- فهرست علائم

u_i	سرعت در راستای افقی
u_j	سرعت در راستای قائم
S_{ij}	نرخ کرنش
ν	لزجت سینماتیک
ρ	جرم حجمی سیال
ν_{sgs}	لزجت مقیاس زیر شبکه
Δ	طول فیلتر بکاربرده شده در معادلات ناویر-استوکس
C	ثابت اسماکورینسکی
w_s	سرعت سقوط ذره
ρ_w	جرم حجمی آب
A_p	بزرگترین سطح مقطع ذره در برابر جریان
C_D	ضریب رانش
D_s	قطر ذره
ρ_s	جرم حجمی ذرات رسوب
Te	کارایی تله‌اندازی

Long, F., Xu, N., Ke, X., and Shi, H., (2007), "Numerical simulation of secondary sedimentation tank for urban wastewater", *Chemical Engineering Journal*, 38, 425–433.

Maxey, M.R. (1990)., "On the advection of spherical and non- spherical particles in a non-uniform flow", *Phil. Trans. R. Soci. Lond. A. No. 333*, PP. 289-307

McCorquodale, J.A., and Zhou, S., (1993), "Effects of hydraulic and solids loading on clarifier performance", *Journal of Hydraulic. Res.* 31, 461–477.

Rubey, W.W., (1933), "Equilibrium-conditions in debris-laden streams", *Trans. Amer. Geophy. Union*.

Salveti, M.V., (2001), "Investigation of the effect of numerical discretization and physical modeling in reduced-order simulation of turbulent flows". PhD thesis in Aerospace Engineering, University of Pisa.

Shamber, D.R., and Larock, B.E., (1981), "Numerical analysis of flow in sedimentation basins", *Journal of Hydraulic. Div.* 107 (HY5), 575–591.

Stamou, A. Katsiris, I. Georgiadis, S. Kanellopoulou, S. Tzoumerkas, F. and Xenos, D., (2001), "Improving the efficiency of existing water process tanks using flow through curves _FTCs_ and mathematical models", *Proc. Int. Conf. on Environmental Science and Technology*, Syros, Greece.

Stamou, A., (1997), "Optimizing the design of secondary clarifiers using water pollution: modeling, measuring and prediction", *Chemical Engineering Journal*, pp. 681–690.

Stevenson, D.G., (1997), "Water treatment unit process", *Imperial College Press*.

Tamayol, A., Firoozabadi B., and Ahmadi, G., (2008), "Determination of settling tanks performance using an Eulerian-Lagrangian method", *Journal of Applied Fluid Mechanics*, Vol.1, No.1, pp. 43-54.

Vanoni, V.A., (2006), "Sedimentation engineering", ASCE task committee, Manual on sedimentation, The sedimentation committee of hydraulic division.

S_i میزان غلظت متوسط رسوبات وارد شده در واحد زمان

S_o میزان غلظت متوسط رسوبات خارج شده در واحد زمان

g شتاب گرانش

۹- منابع

سجادی، م.، شفافی بجزستان، م.و بینا، م.، (۲۰۰۹)، "ارزیابی مدل‌های طراحی حوضچه‌های رسوب‌گیر آبیاری"، نشریه آب و خاک، ج ۲۳، ش ۳، ۱۱۰-۱۲۱.

Adams, E. W., and Rodi, W., (1990) "Modeling flow and mixing in sedimentation tanks." *Journal of Hydraulic Engineering*, 116_7_, 895–913.

Al-Sammarraee, M., Chan, A., Salim, S.M., and Mahabaleswar, U.S., (2009), "Large-eddy simulations of particle sedimentation in a longitudinal sedimentation basin of a water treatment plant. Part I: Particle settling performance", *Chemical Engineering Journal*, 152, 307–314

Anonymous, (2004), "World Health Organization, Water Treatment and Pathogen Control", IWA Publishing.

Ashjari, M.A., (2003), "Numerical modeling of settling tanks", MS thesis, Sharif Univ. of Technology, Tehran, Iran.

DE Clercq, B., (2003), "Computational fluid dynamics of settling tanks: development of experiments and rheological, settling, and scraper sub-models", PhD thesis in Applied biological sciences, University of Gent.

Hammer, J.M., (2005), "Water and Wastewater Technology", Prentice Hall.

Heath, A.R., Koh, P.T.L., (2003), "Combined population balance and CFD modeling of particle aggregation by polymeric flocculent", *Proc. Third Int. Conf. CFD Miner. Process Ind.*, pp. 339–344.

Imam, E., McCorquodale, J. A., and Bewtra, J. K. (1983), "Numerical modeling of sedimentation tanks." *Journal of Hydraulic Engineering*, 109_12_, 1740– 1754.