



مطالعه و بررسی تانک ته‌نشینی ثانویه مجهز به لاملا با استفاده از مدل فاز گسسته (DPM)

صابر دلداری^۱، علی جعفریان^{۲*} و امید مهدوی کشاور^۱^۱ کارشناسی ارشد، گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران^۲ دانشیار، گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

مقاله مستقل؛ تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۹/۱۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۱۲/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۲۸

چکیده

فرایند پیش‌تصفیه‌ی آب‌های مورد استفاده در بخش‌های صنعتی به منظور سختی‌زدایی و جلوگیری از تشکیل رسوب در تبخیرکننده‌ها، دارای اهمیت است. زلال‌سازهای مجهز به لاملا، باعث بهبود فرآیند تصفیه و کاهش هزینه می‌شود. در پژوهش حاضر با بهره‌گیری از ابزار CFD جریان داخل تانک، ته‌نشینی مجهز به لاملا مورد مطالعه قرار گرفته است. با استفاده از مدل فازگسسته (DPM) و با توجه به کوپلینگ دو طرفه بین فاز اصلی (سیال) و فاز گسسته (ذرات)، مسیر حرکت ذرات ردیابی شده‌اند. مدل توربولانس RNG k-ε به منظور شبیه‌سازی جریان چرخشی موجود داخل تانک استفاده شده است. محاسبه بازدهی حذف تانک ته‌نشینی در حالت حضور یا عدم حضور لاملا، اندازه مختلف ذرات و زوایای مختلف لاملا، از جمله مطالعات و بررسی‌های صورت گرفته در پژوهش حاضر است. نتایج پژوهش نشان می‌دهد، وجود لاملا، با بهبود مشخصات تاثیرگذار بر فرآیند ته‌نشینی، از جمله سرعت بالاروندگی آب، انرژی توربولانسی جریان و کاهش حجم ناحیه چرخش، باعث افزایش بازدهی حذف ناخالصی تانک به میزان ۶/۴۷ درصد می‌شود. از سویی دیگر وجود لاملا ثابت در میزان بازدهی حذف ناخالصی در دبی‌های مختلف را به دنبال دارد. مطالعه پارامتری روی زوایای مختلف لاملا نشان می‌دهد، تغییر زاویه از ۶۰ به ۴۵ درجه، افزایش ۱۴/۶۶ درصدی در میزان بازدهی را در پی دارد.

کلمات کلیدی: پیش‌تصفیه؛ تانک ته‌نشینی؛ لاملا؛ بازدهی حذف ناخالصی؛ مدل فاز گسسته

Study and Investigation of Secondary Sedimentation Tank Equipped with Lamella using Discrete Phase Model (DPM)

S. Deldar¹, A. Jafarian^{2,*}, O. Mahdavi keshavar¹¹ M.Sc. Graduate, Energy Conversion Department, Mechanical Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.² Assoc. Prof., Energy Conversion Department, Mechanical Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Abstract

Water softening and preventing of scaling in evaporators are very important in industrial water treatment processes. Lamella clarifiers improve the treatment process and decrease its related costs. In the present study, by using a CFD approach, the flow inside the sedimentation tank equipped with lamella has been studied. By using the Discrete Phase Model (DPM) and due to the two-way coupling between the main phase (fluid) and the discrete phase (particles), the particles motion has been traced. The turbulence model k-ε RNG is used to simulate the flow inside the sedimentation tank. The influence of employing lamella plates and their inclination angle as well as size of particles have been conducted. Results showed that using lamella inside the tank, by tuning the rising velocity of water, turbulent flow energy, and reduction of the rotational area volume, leads to increase of the tank particle removal efficiency by 6.47 percent. In addition, the presence of lamella causes a stability in the removal efficiency of sedimentation tank at different flow rates. A parametric study with the aim of investigating the effect of different angles of lamella on the tank efficiency shows that changing the angles of the plates from 60 to 45 degrees increases the efficiency by 14.66 percent.

Keywords: Pretreatment; Sedimentation Tank; Lamella; Particle Removal Efficiency; Discrete Phase Model.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۲۱-۸۲۸۸۴۹۱۸

آدرس پست الکترونیک: jafarian@modares.ac.ir

۱- مقدمه

تأمین آب یکی از نیازهای اولیه و ضروری بشر بوده است و از جمله موضوعات مهم در کشورهای در حال توسعه محسوب می‌شود [۱]. تصفیه آب از آن جهت مهم است که آب در دسترس محدود است و باید دوباره به چرخه مصرف برگردد. پیش‌بینی‌ها حاکی بر این است که در سال ۲۰۲۵ میلادی به علت بحران بی‌آب از هر سه انسان یک نفر با مشکل کمبود آب مواجه خواهد بود [۲]. از دیگر دلایل اهمیت فرآیند تصفیه، سختی زدایی آب و پیشگیری از تشکیل رسوب و خوردگی در بویلرها و دستگاه‌های خنک‌کننده است. یکی از واحدهای فرآیندی معمول در تصفیه آب، ته‌نشینی است. فرآیند ته‌نشینی برای حذف مواد قابل ته‌نشین شدن با کمک نیروی جاذبه طراحی می‌شود. اندازه برخی ذرات آلودگی ممکن است، به قدر کافی بزرگ نبوده و مناسب برای فرآیند ته‌نشینی نباشند؛ همچنین برخی آلودگی‌ها موجود در آب به صورت مواد محلول هستند که قابلیت ته‌نشینی ندارند. این مسائل باعث کاهش کیفیت آب خروجی و افزایش زمان تصفیه آب خواهد شد. به منظور سرعت بخشیدن به فرآیند ته‌نشینی و حذف آلودگی‌ها، از انعقاد و لخته‌سازی با کمک تزریق مواد شیمیایی جهت به هم پیوستن ذرات موجود در آب و بزرگ نمودن اندازه آنها، استفاده می‌شود [۳]. از جمله تکنولوژی‌هایی که از فرآیند انعقاد و لخته‌سازی بهره می‌برد، زلال‌سازهای مجهز به لاملا^۱ است (شکل ۱). در این تکنولوژی، آب‌های آلوده به سمت مخزن اولیه پمپ می‌شود که مواد منعقدکننده^۲ اضافه می‌شود. سپس آب به مخزن تزریق وارد می‌شود و در این مخزن، پلیمرها^۳ و میکروسندها^۴ به آب اضافه می‌شود تا لخته‌ها را ایجاد کنند.

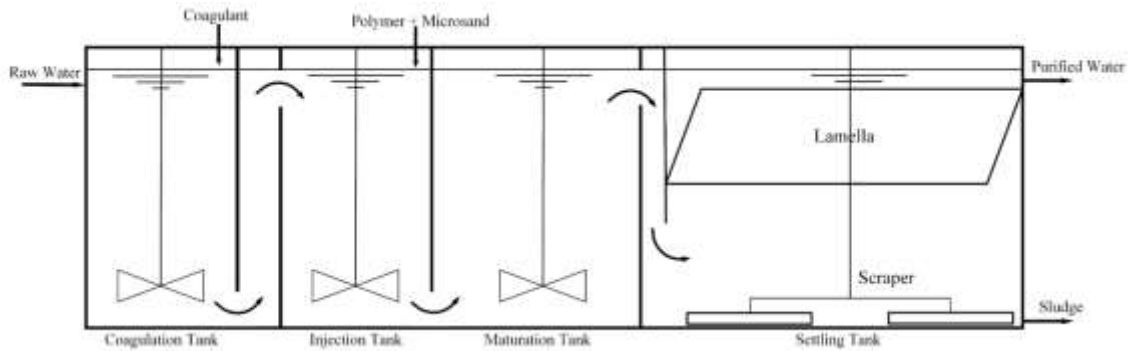
در ادامه فرآیند زلال‌سازی، سیال و جامد (میکروسند، پلیمر و ذرات آلودگی موجود در آب) از دریچه‌ای در پایین مخزن تزریق وارد مخزن بلوغ^۵ می‌شود. از این مرحله سیال و ذرات آلاینده که به طور کامل لخته شده و سنگین شده‌اند، وارد تانک ته‌نشینی می‌گردند. در این تانک که به منظور

تسریع فرآیند ته‌نشینی مجهز به صفحات شیبدار هستند، ذراتی که برای فرآیند ته‌نشینی مهیا شدند (لخته و میکروسند لجن)، ته‌نشین می‌گردند و به پایین تانک جریان پیدا می‌کنند. ذرات ته‌نشین شده در پایین تانک ته‌نشینی به کمک جاروب^۶ جمع شده و از طریق پمپ خارج می‌شوند؛ همچنین از بالای صفحات شیبدار نیز آب زلال با جریان آرام خارج می‌شود.

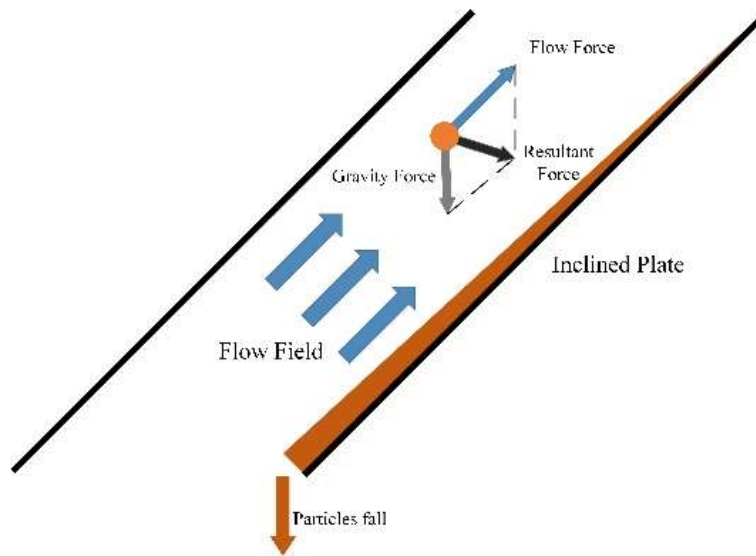
در زلال‌سازها به منظور افزایش راندمان جداسازی، از صفحات شیبداری به نام لاملا استفاده می‌شود. این صفحات فاصله ذره برای ته‌نشین شدن و برخورد با صفحه ته‌نشین‌کننده را کم کرده و به عبارتی شرایط ته‌نشینی را مهیا می‌کنند و سرعت تصفیه آب را افزایش می‌دهند. دیاگرام نیروهای وارد به ذره بین صفحات لاملا، در شکل ۲ نشان داده شده است. به ذره دو نیروی گرانش و جریان وارد می‌شود؛ برآیند نیروها، ذره را به سمت دیوارهای پایینی منحرف می‌کند. مسیر حرکت جریان در این صفحات از پایین به بالا و جریان عموماً آرام است [۴].

پژوهش‌های زیادی در زمینه تحلیل جریان و مدل‌های ته‌نشینی در تانک ته‌نشینی ثانویه^۷ صورت گرفته است. هاگر و آبریل [۵] با استفاده از ابزار اندازه‌گیری آزمایشگاهی، توزیع سرعت و غلظت داخل تانک ته‌نشینی ثانویه را بدست آوردند. در پژوهش آنها یکی از تانک‌های ته‌نشینی مورد آزمایش، به عنوان مرجع مقایسه در نظر گرفته شده است و در سایر تانک‌ها تغییراتی از قبیل، طول، نوع ورودی و خروجی داده شد. اصغرزاده و همکاران [۶] با استفاده از ابزار آزمایشگاهی، پژوهشی در زمینه تحلیل تانک‌ته‌نشینی و تاثیر حضور بافل تکی و چندتایی بر میدان جریان سیال و توزیع غلظت در تانک ته‌نشینی مستطیلی انجام دادند. اتانسیاگولا و همکاران [۷]، با بررسی تانک ته‌نشینی به کمک ابزار CFD^۸، تاثیر دما ورودی بر میزان عملکرد تانک ته‌نشینی را بررسی کردند. آنها نشان دادند که بازدهی تانک برای ذرات با قطر ۲۵۰ میکرومتر با افزایش دما، از ۹۹/۵ درصد کاهش پیدا کرده و به میزان ۷۶ درصد می‌رسد. تمایل و فیروزآبادی [۸] به شبیه

^۱ Lamella^۲ Coagulant^۳ Polymer^۴ Microsands^۵ Maturation^۶ Scraper^۷ Secondary Clarifier^۸ Computational Fluid Dynamics



شکل ۱- شماتیک فرآیند زلال‌سازهای مجهز به لاملا



شکل ۲- شماتیک نیروهای وارد بر ذره در بین صفحات لاملا

شبیه‌سازی عددی میدان جریان با استفاده از مدل چند فازی مخلوط^۲ داخل تانک ته‌نشینی پرداختند. آنها همچنین تأثیر حضور بافل از لحاظ فاصله از ورودی و عمق قرار گرفتن داخل تانک را مورد سنجش قرار داده و پیش‌بینی کردند که انتخاب فاصله مناسب بافل از ورودی بازدهی، حذف تانک ته‌نشینی را به میزان ۹/۹۷ درصد افزایش خواهد داد. شاهرخی و همکاران [۱۱] به بررسی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی تانک ته‌نشینی مستطیلی و تأثیر حضور بافل بر میدان جریان و کاهش حجم جریان چرخشی پرداختند.

سازی دو بعدی حوضچه اولیه در نرم افزار فلوئنت^۱ پرداختند و نتایج مدل‌های آشفتگی $k - \epsilon$ استاندارد و RNG را مقایسه نمودند و مدل RNG را در پیش‌بینی طول نواحی چرخشی مناسب‌تر یافتند. تارپاکوگاو و همکاران [۹]، با تحلیل سه بعدی هیدرودینامیک میدان با استفاده از مدل اویلری-لاگرانژی و با در نظر گرفتن تأثیر کوپلینگ دوطرفه (تأثیر فاز سیال بر فاز گسسته و بالعکس)، میزان تأثیر قطر و کسر حجمی ذرات بر مشخصه‌های مهم جریان از جمله توربولانس را بررسی کردند. لیو و همکاران [۱۰]، به پژوهش تجربی و

^۲ Mixture

^۱ FLUENT

حذف تانک‌ته‌نشینی در شرایط ورودی مختلف بیان شده است و به منظور بهبود عملکرد لاملا، زاویه بهینه معرفی شده است. پژوهش حاضر با بهره‌گیری از ابزار CFD، نرم‌افزار فلونت و با استفاده از مدل فاز گسسته (DPM)، به تحلیل میدان جریان حاوی ذره داخل تانک‌ته‌نشینی می‌پردازد. مدل توربولانسی RNG k-ε به منظور تحلیل جریان مغشوش داخل تانک‌ته‌نشینی، در نظر گرفته شده است؛ همچنین اثر توربولانس بر فاز گسسته با استفاده از مدل گام‌زنی گسسته تصادفی (DRW) لحاظ گردیده است.

۲- روش پژوهش، معادلات حاکم

امروزه تحلیل جریان‌های دو فازی و چندفازی در گستره وسیعی از سیستم‌های مهندسی کاربرد دارد. از جمله رویکردها در تحلیل جریان‌های چندفازی، روش اولری-لاگرانژی است. در این روش حرکت فاز پیوسته در چهارچوب اولری مدل می‌شود؛ حرکت ذرات فاز پراکنده (خط مسیر) نیز به طور صریح در یک چهارچوب لاگرانژی شبیه‌سازی می‌گردد و میانگینی از تعداد خطوط مسیر برای بدست آوردن اطلاعات لازم جهت مدلسازی تاثیر فاز پراکنده بر فاز پیوسته استخراج می‌شود. این موضوع دیدگاه اولری-لاگرانژی را در دسته ابزارهای مناسب در تحلیل جریان‌های حاوی ذره جامد، مانند جریان سیال حاوی ذره در تانک‌ته‌نشینی، قرار می‌دهد.

۱-۲- معادلات حاکم

سیال مورد تحلیل به صورت پیوسته و تراکم ناپذیر رفتار می‌کند. فاز سیال توسط معادلات ناویر-استوکس شبیه‌سازی می‌شود. معادله پیوستگی (۱) و معادله اندازه حرکت خطی (۲) به صورت زیر است:

$$\nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (1)$$

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u_i' u_j'} \right) + S_{dp} \quad (2)$$

مسیر حرکت فاز گسسته (ذرات) به وسیله انتگرال‌گیری روی معادله حرکت هر ذره در چارچوب مرجع لاگرانژی محاسبه می‌شود. معادله (۳) نیروهای وارد شده به ذره است [۴]:

رامین و همکاران [۱۲] با استفاده از ابزار CFD به شبیه‌سازی دوبعدی تقارن محوری تانک‌ته‌نشینی استوانه‌ای پرداختند. ایشان مدل جدیدی برای سرعت‌ته‌نشینی^۱ ذرات داخل تانک‌ته‌نشینی ارائه دادند و غلظت ذرات در نواحی مختلف تانک را پیش‌بینی کردند. گکسولی و استمو [۱۳]، به بررسی تأثیر جریان باد بر عملکرد تانک‌ته‌نشینی با استفاده از مدل چندفازی VOF^۲ و یک‌فازی پرداختند و دریافتند، وزیدن جریان باد بازدهی تانک‌ته‌نشینی را از میزان ۸۵/۴ درصد به میزان ۸۳/۴ درصد کاهش می‌دهد. دلدار و همکاران [۱۴]، به بررسی تانک‌ته‌نشینی با استفاده از ابزار CFD و مدل فاز گسسته^۳ پرداختند. در پژوهش آنها به تاثیر موقعیت ورودی جریان به تانک‌ته‌نشینی و تاثیر حضور بافل در ورودی جریان در موقعیت‌های مختلف پرداخته شده است.

به منظور بهبود عملکرد تانک‌ته‌نشینی، پژوهشگرانی به بررسی تاثیر صفحات شیبدار داخل تانک‌های ته‌نشینی پرداختند. صالح و همودا [۱۵]، با استفاده از صفحات شیبدار میزان عملکرد تانک‌ته‌نشینی را در دبی بالا افزایش دادند. سرکار و همکاران [۱۶] به صورت پارامتریک، به تاثیر صفحات شیبدار بر عملکرد تانک‌ته‌نشینی پرداختند. در پژوهش آنها، از جمله پارامترهای مهم و تاثیرگذار در صفحات شیبدار به طول صفحات، زبری، زاویه و تعداد صفحات اشاره شده است. صلاح [۱۷] با ابزار آزمایشگاهی تاثیر حضور صفحات شیبدار بر میزان عملکرد تانک‌ته‌نشینی را بررسی کرده است. آنها تاثیر زوایای مختلف صفحات شیبدار (۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه) و دبی جریان ورودی را مطالعه کرده‌اند.

بررسی پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که غالب پژوهش‌ها صرفاً به شبیه‌سازی و اندازه‌گیری میدان جریان داخل تانک‌های ته‌نشینی پرداخته‌اند. در این مطالعات روی بازده حذف ذرات با اندازه‌های متفاوت در حضور صفحات شیبدار به صورت خاص پژوهشی انجام نشده است. در پژوهش حاضر، بازدهی حذف ذرات با اندازه‌های متفاوت در حضور یا عدم حضور لاملا پرداخته شده است و نتایج با یکدیگر مقایسه شده‌اند؛ همچنین تأثیر لاملا بر میزان بازدهی

¹ Settling Velocity Model

² Volume of Fluid

³ Discrete Phase Model

$$\alpha = \frac{C_p}{\rho_p} \approx 10^{-4} \quad (9)$$

با توجه به کسر حجمی، فرض کوپلینگ دو طرفه لحاظ گردیده است. به عبارتی علاوه بر اثر فاز اصلی بر فاز ثانویه، اثر فاز ثانویه بر فاز اصلی نیز در نظر گرفته می‌شود. این موضوع به کمک ترم چشمه فاز گسسته (S_{dp}) در رابطه مومنوم سیال (رابطه (۲)) لحاظ شده است.

۲-۳- توربولانس

با توجه به شرایط مسئله و هندسه مورد مطالعه، مدل توربولانسی ϵ -RNG k برای تحلیل توربولانس مسئله در نظر گرفته شده است. معادلات عمومی انتقال برای انرژی جنبشی توربولانس k (رابطه (۱۰)) و برای نرخ اضمحلال توربولانس ϵ (رابطه (۱۱)) به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود [۲۲]:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(a_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(a_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon \quad (11)$$

۲-۴- گام زنی گسسته ی تصادفی^۱

مشهورترین روش برای مدل کردن نوسانات سرعت فاز سیال بر فاز گسسته، روش گام‌زنی گسسته تصادفی است. بزرگترین ویژگی این روش، نمونه‌سازی نوسانات سرعت ذره از طریق توزیع گوسین با میانگین صفر و واریانس میانگین مجذور سرعت آشفتگی، است. در این نمونه‌سازی سرعت، آشفتگی همسانگرد فرض می‌شود؛ در نتیجه سه مولفه سرعت آنی با یکدیگر برابر خواهند بود (رابطه (۱۲)).

$$m_p \frac{du_p}{dt} = F_{fr} + F_g + F_b + F_{br} + F_s + F_{pg} + F_{vm} \quad (3)$$

بردارهای سمت راست رابطه (۳)، از چپ به راست به ترتیب نیروی اصطکاک، گرانش، شناوری، بروانی، برای-سافمن، گرادیان فشاری و جرم مجازی هستند. از بین نیروهای شناخته شده، تنها نیروهای برای سافمن و بروانی در این پژوهش، قابل صرفنظر کردن است.

نیروی اصطکاک مهم‌ترین نیروی موجود در تحلیل حاضر به حساب می‌رود و با توجه به فرض کروی بودن ذرات با کمک رابطه (۴) بدست می‌آید [۱۸]:

$$F_{fr} = \frac{1}{2} C_d A_f \rho_f |u_r|^2 \vec{\lambda}_{u_r} \quad (4)$$

نیروی گرانش وابسته به شتاب گرانشی زمین و متناسب با جرم ذره است. برای جرم ذره و نیروی گرانشی وارد بر آن رابطه (۵) بیان شده است [۱۹]:

$$F_g = \frac{\pi \rho_p d_p^3}{6} g \quad (5)$$

نیروی شناوری (نیروی ارشمیدسی)، ناشی از مجموع اختلاف فشار سیال در اطراف جسم است (رابطه (۶)) [۲۰]:

$$F_b = -\frac{\pi \rho_f d_p^3}{6} g \quad (6)$$

نیروی جرم مجازی زمانی که نسبت چگالی سیال به ذره بیشتر از ۰/۱ است، با کمک رابطه (۷) محاسبه می‌شود [۲۱]:

$$F_{vm} = \frac{1}{2} \frac{\rho_f}{\rho_p} \frac{d}{dt} (u_f - u_p) \quad (7)$$

نیروی گرادیان فشار از معادلات ناویر استوکس کامل مشتق شده است و نشان‌دهنده نیروی وارد شده به سیالی است که اگر ذرات نبودند، میدان را اشغال می‌کرد (رابطه (۸)) [۲۰]:

$$F_{PG} = m_p \frac{\rho_f}{\rho_p} \left(\frac{du_f}{dt} - \nu_f \Delta u_f \right) \quad (8)$$

۲-۲- اندرکنش سیال و ذره

مهمترین فرض برای شبیه‌سازی جریان‌های چندفازی و جریان‌های حاوی ذره در تانک ته‌نشینی، اندرکنش بین فازهای اصلی (آب) و ثانویه (ذره) است. در این پژوهش، غلظت ورودی ذرات ($\frac{kg}{m^3}$) ۰/۲ در نظر گرفته شده است. کسر حجمی با کمک رابطه (۹) محاسبه می‌شود:

^۱ Random Walk Model

شده است. ذرات در نظر گرفته شده به عنوان فاز ثانویه، کروی و با چگالی $(\frac{kg}{m^3})$ ۲۶۵۰ هستند؛ همچنین توزیع قطری ذرات، به صورت جدول ۱ در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- توزیع قطری ذرات

توزیع قطری ذرات جریان ورودی (%)	قطر ذرات (mm)	کلاس‌های جرمی ذرات بر اساس اندازه
۲	۰/۰۰۱ ~ ۰/۰۰۵	۱
۸	۰/۰۰۵ ~ ۰/۰۱	۲
۱۷	۰/۰۱ ~ ۰/۰۲۵	۳
۲۲	۰/۰۲۵ ~ ۰/۰۵	۴
۲۰	۰/۰۵ ~ ۰/۱	۵
۱۴	۰/۱ ~ ۰/۲۵	۶
۱۱	۰/۲۵ ~ ۰/۵	۷
۶	۰/۵ ~ ۱	۸

۲-۶- پارامترهای بررسی و سنجش عملکرد ته‌نشینی برای آگاهی از میزان عملکرد تانک ته‌نشینی پارامتری به نام بازدهی حذف^۶ ناخالصی در تانک ته‌نشینی تعریف می‌شود. این پارامتر در تانک با رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود [۲۵]:

$$\eta = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \quad (14)$$

در تانک‌های ته‌نشینی، یکی از پارامترهای سنجش، میزان عملکرد تانک، حجم ناحیه‌ی چرخش^۷ است. به همین منظور کمیت C.V به کمک رابطه (۱۵) محاسبه می‌شود. هر چه مقدار این پارامتر کمتر باشد (حجم ناحیه‌ی چرخش به کل تانک کمتر باشد)، عملکرد ناحیه ته‌نشینی بهتر خواهد بود [۱۱].

$$C.V = \frac{\text{حجم ناحیه چرخشی}}{\text{حجم کل تانک}} \quad (15)$$

$$\sqrt{u'^2} = \sqrt{v'^2} = \sqrt{w'^2} = V_{rms} = \sqrt{\frac{2k}{3}} \quad (12)$$

$$u_f = (\bar{u} + \xi\sqrt{u'^2})\hat{i} + (\bar{v} + \xi\sqrt{v'^2})\hat{j} + (\bar{w} + \xi\sqrt{w'^2})\hat{k} \quad (13)$$

ξ در رابطه (۱۳) یک عدد تصادفی با توزیع طبیعی یا گاوسی است که مقدار میانگین و انحراف معیار تعریف آن در این روش به ترتیب برابر ۰ و ۱ است [۲۳].

۲-۵- هندسه و مشخصات تانک ته‌نشینی مورد مطالعه

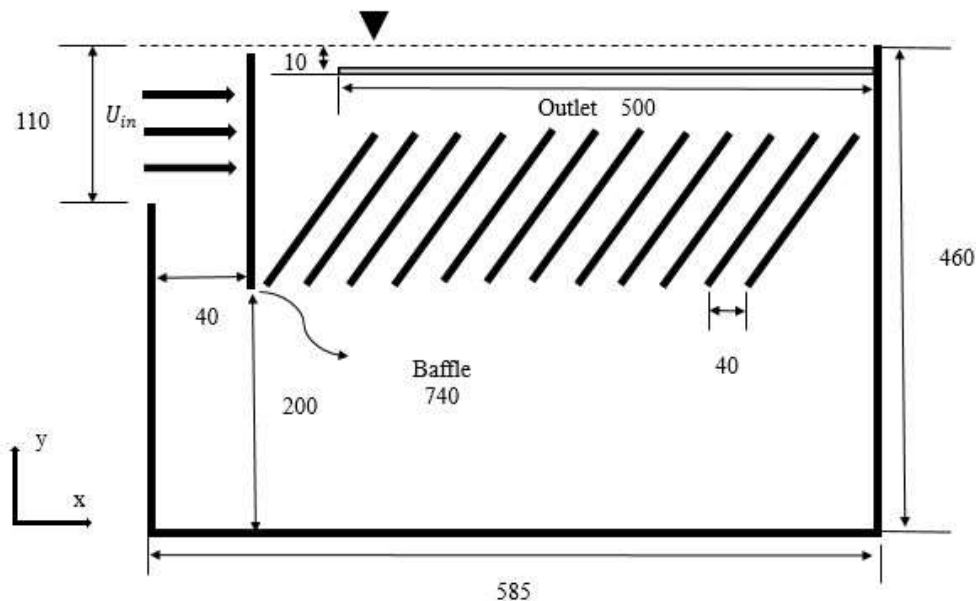
شکل ۳ شماتیک دوبعدی تانک ته‌نشینی را به همراه مشخصات فیزیکی و چگونگی نحوه چینش صفحات لاملا را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۳، تعداد ۱۲ عدد صفحه شیبدار (لاملا) به منظور پوشش کامل ناحیه ته‌نشینی که عملکرد مناسب تانک را در پی دارد، در نظر گرفته شده است. بر اساس مراجع طراحی تانک ته‌نشینی، فاصله بین صفحات لاملا ۲ تا ۵ سانتی‌متر است که در پژوهش حاضر این فاصله ۴ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. زاویه صفحات لاملا با محور افقی، برابر ۶۰ درجه در نظر گرفته شده است. طول صفحات لاملا نیز، ۱۸ سانتی‌متر و متناسب با ابعاد تانک تعبیه شده‌اند [۲۴]. برای ورودی و خروجی تانک ته‌نشینی به ترتیب شرط مرزی سرعت ورودی^۱ و فشارخروجی^۲ در نظر گرفته شده است. سطح آزاد تانک نیز دارای شرط مرزی تقارن است؛ همچنین برای فاز گسسته در ورودی شرط مرزی رهایی^۳، برای کف تانک شرط تله^۴ و برای دیوارها شرط بازتاب^۵ در نظر گرفته شده است.

در پژوهش حاضر از آب در شرایط استاندارد (دمای ۲۹۸/۱۵K و فشار ۱۰۰ kPa)، به عنوان سیال (فاز اصلی) استفاده شده است. فاز اصلی آب با چگالی $(\frac{kg}{m^3})$ ۹۹۸/۲ و ویسکوزیته سیال آب $(\frac{kg}{m.s})$ ۰/۰۱۰۰۳ است. سرعت جریان ورودی به تانک ته‌نشینی $(\frac{cm}{s})$ $V_{in} = 1/0.45$ در نظر گرفته

¹ Velocity-inlet
² Pressure-outlet
³ Escape
⁴ Trap
⁵ Reflect

⁶ Removal Efficiency

⁷ Circulation Volume



شکل ۳- شماتیک تانک ته‌نشینی مورد مطالعه (ابعاد به میلی‌متر)

۳-۲- استقلال از تعداد تلاش‌ها

برای حل فاز گسسته در جریان سیال در حالت پایا، بایستی از تعداد تلاش‌ها در مدل گام‌زنی تصادفی به دلیل تعیین وضعیت ذره در سیال، استقلال گرفته شود. به همین منظور با تزریق ذرات، بازدهی تانک در تعداد تلاش‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده است (شکل ۶). با توجه به شکل ۶، از تعداد تلاش بیشتر از ۱۰۰، افزایش تعداد تلاش‌ها تاثیری بر نتیجه بازدهی ذرات نداشته است؛ بنابراین برای کاهش زمان شبیه‌سازی، می‌توان تعداد تلاش ۱۰۰ را برای شبیه‌سازی در نظر گرفت.

۳-۳- صحت سنجی

به منظور اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی پژوهش حاضر، از داده‌های آزمایشگاهی در دسترس [۱۱] استفاده شده است. اندازه‌گیری آزمایشگاهی میزان سرعت توسط شاهرخی و همکاران [۱۱] در یک تانک ته‌نشینی مستطیلی بدون بافل صورت گرفته است؛ همچنین در پژوهش تجربی آنها سرعت ورودی ثابت، رینولدز ورودی $Re_{in}=3972$ و غلظت ورودی ذرات $C_{in}=0/2$ (kg/m^3) لحاظ شده است. اندازه‌گیری سرعت میدان جریان داخل تانک ته‌نشینی نیز، توسط روش

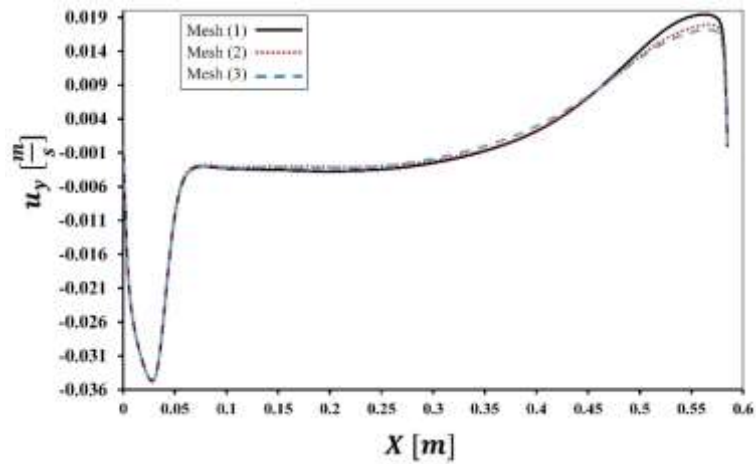
۳- نتایج و بحث

نتایج شبیه‌سازی تانک ته‌نشینی حاوی ذره، در این بخش آورده شده است. ابتدای این بخش اختصاص به اعتبارسنجی نتایج و روش شبیه‌سازی و بررسی استقلال از شبکه و تعداد تلاش‌ها^۱ در حل را دارد؛ همچنین با هدف بهبود عملکرد تانک، مطالعه پارامتریک روی تانک انجام شده است.

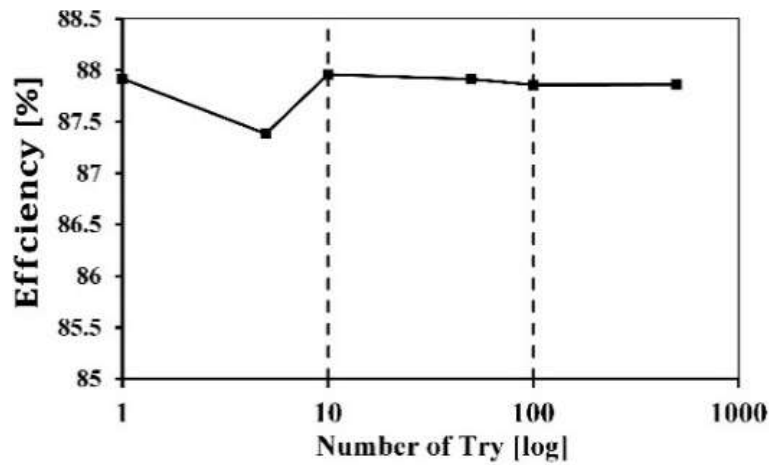
۳-۱- استقلال از شبکه‌بندی

به منظور استقلال نتایج شبیه‌سازی از شبکه‌بندی، نمودار توزیع سرعت در جهت y و در راستای طولی تانک ته‌نشینی (راستای x)، در سه شبکه‌بندی مختلف میدان حل (اندازه شبکه‌ها: $Mesh(1)=204530$ ، $Mesh(2)=480560$ و $Mesh(3)=1100600$) با یکدیگر مقایسه شده‌اند (شکل ۵). شکل ۵ نشان می‌دهد، افزایش شبکه‌ها از $Mesh(2)$ به $Mesh(3)$ ، در نتایج سرعت در راستای طولی تانک تغییری ایجاد نمی‌کند؛ بنابراین می‌توان برای کاهش زمان محاسبات از $Mesh(2)$ استفاده کرد.

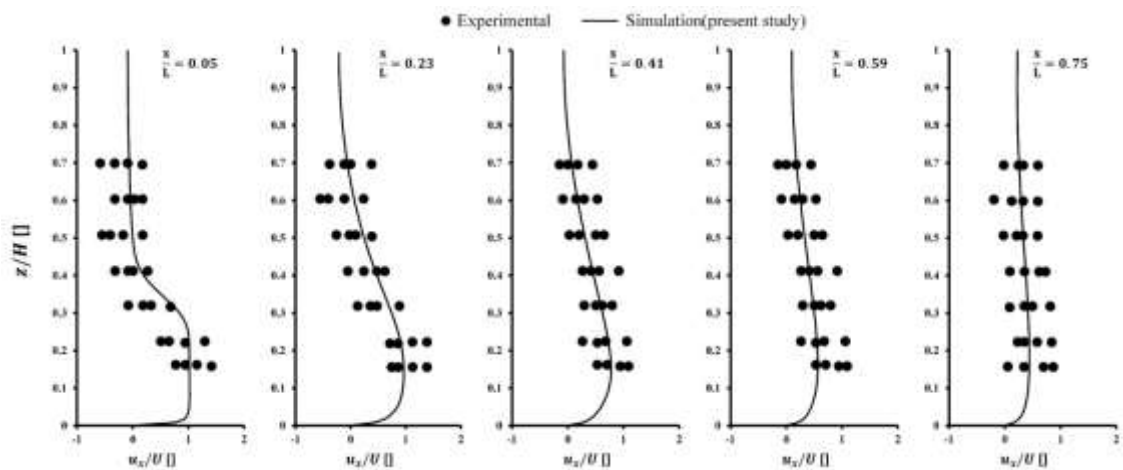
^۱ Number of Tries



شکل ۵- توزیع سرعت در جهت y در راستای طول تانک

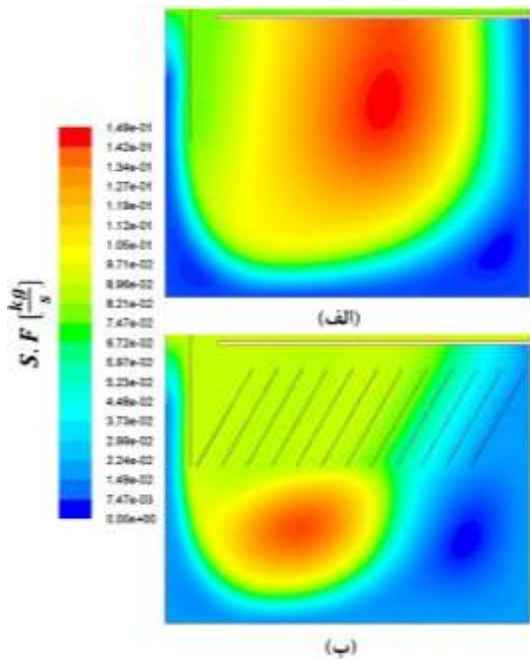


شکل ۶- بازدهی ته‌نشینی ذرات برای تعداد تلاش مختلف



شکل ۷- مقایسه نتایج شبیه‌سازی حاضر و داده‌های آزمایشگاهی [۸]

در شکل ۹ میدان جریان سیال در دو حالت با لاملا و بدون لاملا مقایسه شده است. کمیت $C.V$ برای حالت با لاملا و بدون لاملا به ترتیب ۱۷/۵ و ۴۳/۲ درصد است. این کمیت نشان می‌دهد، حجم ناحیه چرخش در حالت بدون لاملا بیشتر از حالت با لاملا است؛ همچنین مطابق شکل ۹ ناحیه چرخش در حالت بدون لاملا در کل تانک و نزدیک به خروجی است که این موضوع باعث دوباره معلق شدن ذرات ته نشین شده و خروج ذرات از تانک می‌گردد؛ در صورتی که در حالت با لاملا این ناحیه دورتر از خروجی (نزدیک به کف تانک) قرار دارد و ذرات پس از تعلیق فرصت دوباره ته نشین شدن را دارند. برآیند این موارد، کاهش میزان عملکرد حذف ناخالصی تانک را به دنبال خواهد داشت.



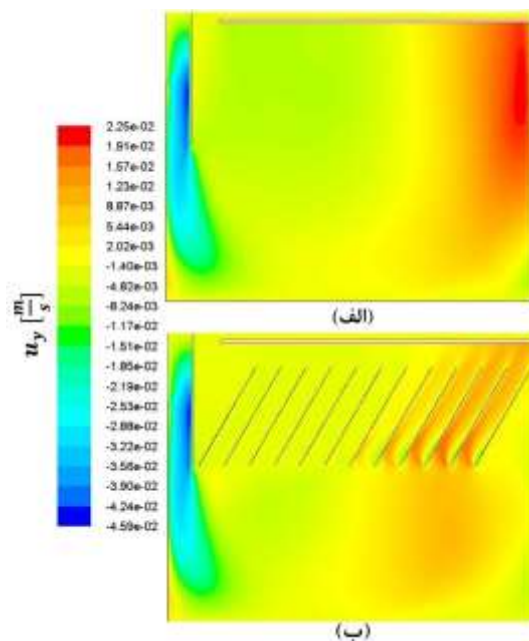
شکل ۹- خطوط جریان برای حالت:
الف) بدون لاملا و ب) با لاملا

شکل ۱۰ انرژی توربولانس جریان در دو حالت با لاملا و بدون لاملا را نشان می‌دهد. در حالت بدون لاملا انرژی جنبشی توربولانسی در کل تانک توزیع شده است؛ در حالیکه وجود صفحات لاملا از نفوذ انرژی توربولانسی جریان ورودی به کل تانک جلوگیری می‌کند؛ در نتیجه بخش کمتری از تانک نسبت به حالت بدون لاملا شامل، انرژی جنبشی

سرعت سنج صوتی داپلر^۱ انجام شده است. در شبیه‌سازی حاضر مدل توربولانسی $k-\epsilon$ RNG به منظور مدل‌سازی آشفتگی جریان استفاده شده است. نمودار سرعت شبیه‌سازی شده و نتایج آزمایشگاهی مورد نظر که در شکل ۷ نشان داده شده‌اند، با یکدیگر مطابقت خوب و مناسبی دارند.

۳-۴- نتایج شبیه‌سازی و مطالعه تانک ته‌نشینی

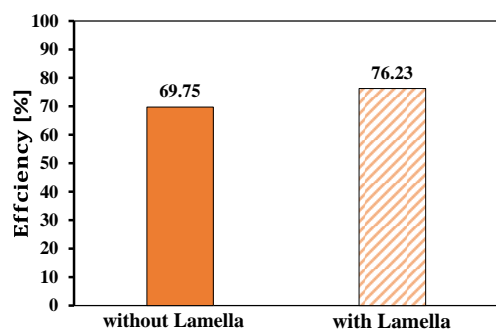
شکل ۸ سرعت سیال در راستای y را برای دو حالت با لاملا و بدون لاملا نشان داده است. وجود لاملا از میزان سرعت سیال در راستای y می‌کاهد که مهمترین عامل در خروج ذرات از تانک و کاهش میزان عملکرد حذف ناخالصی تانک می‌باشد؛ همچنین مطابق شکل ۸ صفحات شیب‌دار باعث اشغال بخش کمتری از فضای تانک با سرعت در راستای y بالا می‌شود و بیشینه سرعت بالاروندگی کاهش پیدا کرده است. مجموع موارد ذکر شده، باعث کاهش میزان خروج ذرات از تانک می‌شود و در نتیجه بازدهی حذف تانک ته‌نشینی افزایش پیدا می‌کند.



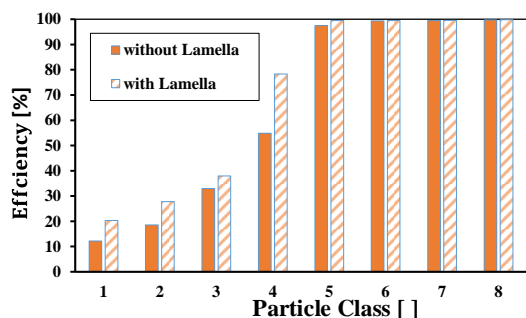
شکل ۸- توزیع سرعت در راستای y برای حالت:
الف) بدون لاملا و ب) با لاملا

^۱ Acoustic Doppler Velocimeter

بازدهی بهتری دارند. وجود صفحات لاملا بازدهی ته‌نشینی کلاس ۴ (ذرات ۲۵۰-۵۰ میکرون) را به میزان ۲۳/۵۱ درصد افزایش می‌دهد و این کلاس ذرات، بیشترین تأثیر را از وجود لاملا می‌گیرد. در این محدوده مکانیزم اصلی و حاکم، نیروی گرانش است. در کلاس‌های پایین تر و ذرات ریزتر، تأثیر این مکانیزم کاهش پیدا می‌کند، در نتیجه مشاهده می‌شود با کاهش قطر، ته‌نشینی کاهش پیدا می‌کند و پخش آشفتگی اهمیت پیدا می‌کند. این کاهش مکانیزم گرانش تا جایی ادامه پیدا می‌کند که اثر و نیروی براونی اهمیت پیدا می‌کند و خارج از ناحیه عملکردی تانک‌های ته‌نشینی است، این ناحیه تقریباً از قطر ۵ میکرون آغاز می‌شود.



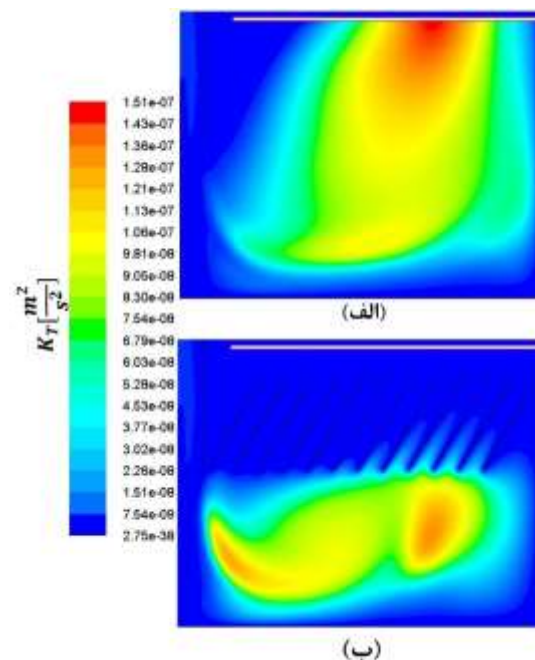
شکل ۱۱- بازدهی ته‌نشینی برای دو حالت با لاملا و بدون لاملا



شکل ۱۲- مقایسه بازدهی ته‌نشینی برای کلاس مختلف ذرات در دو حالت با لاملا و بدون لاملا

شکل ۱۳ توزیع غلظت در راستای طولی تانک (راستای x) در دو حالت با لاملا و بدون لاملا را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱۳، وجود لاملا باعث افزایش غلظت ذرات (فاز نانویه)

توربولانسی بالا می‌شود (مطابق شکل ۱۰). این موضوع شرایط ته‌نشینی مناسب (شرایط آرام) را برای ناخالصی موجود در جریان مهیا می‌کند؛ همچنین کاهش انرژی توربولانسی از تعلیق دوباره ذرات ته‌نشین شده نیز جلوگیری می‌کند.

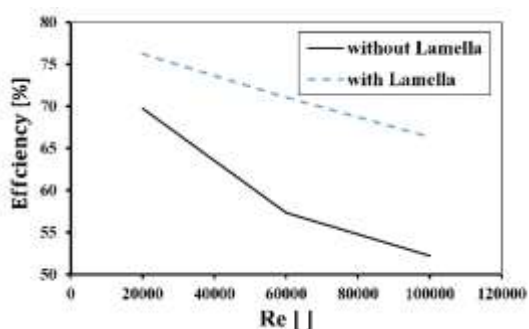


شکل ۱۰- کانتور انرژی جنبشی توربولانسی برای حالت: (الف) بدون لاملا و (ب) با لاملا

شکل ۱۱ بازدهی ته‌نشینی در دو حالت با لاملا و بدون لاملا را نشان می‌دهد. وجود صفحات لاملا، باعث کاهش بیشینه سرعت بالاروندگی در داخل تانک ته‌نشینی می‌شود؛ همچنین انرژی توربولانسی جریان داخل تانک ته‌نشینی کاهش پیدا می‌کند و شرایط برای فرآیند ته‌نشینی (جریان آرام) مهیا می‌شود. علاوه بر این، میزان ناحیه چرخش جریان در کل تانک نیز کاهش پیدا می‌کند و از باز چرخانی ذرات ته‌نشین شده جلوگیری می‌شود. مجموع این عوامل تأثیرگذار، باعث بهبود عملکرد ته‌نشینی تانک به میزان ۶/۴۷ درصد می‌گردد.

در شکل ۱۲ بازدهی ته‌نشینی برای هر یک از کلاس‌های ذرات برای دو حالت با لاملا و بدون لاملا، نشان داده شده است. کلاس ذرات ۱ تا ۵ که در حالت بدون لاملا دارای بازدهی ته‌نشینی زیر ۹۹ درصد هستند، در حضور لاملا

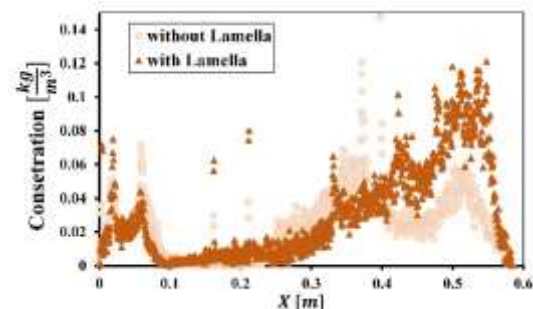
در کف تانک و موجب بهبود ته‌نشینی شده است؛ همچنین مقایسه بین دو حالت نشان می‌دهد، توزیع غلظت در حالت با لاملا هموارتر از حالت بدون لاملا است. در حالت بدون لاملا، نمودار توزیع به غیر از ورودی تانک که در ابتدای نمودار می‌باشد، دو نقطه بیشینه دارد؛ اما در حالت با لاملا تنها یک نقطه وجود دارد. بیشینه سمت راست نمودار مربوط به تاثیر دیواره عمودی تانک است؛ زیرا ذره نمی‌تواند روی دیواره قرار بگیرد و سقوط می‌کند. در حالت بدون لاملا بیشینه‌ای که در وسط تانک ایجاد شده است، ناشی از خطوط میدان جریان و ماهیت توربولانسی جریان است. وجود صفحات از توربولانس جریان می‌کاهد و در نتیجه گرادین غلظت کمتر خواهد بود که از خواص جریان تاثیر مستقیم می‌گیرد.



شکل ۱۴- بازدهی ته‌نشینی در رینولدزهای مختلف برای دو حالت بدون لاملا و با لاملا

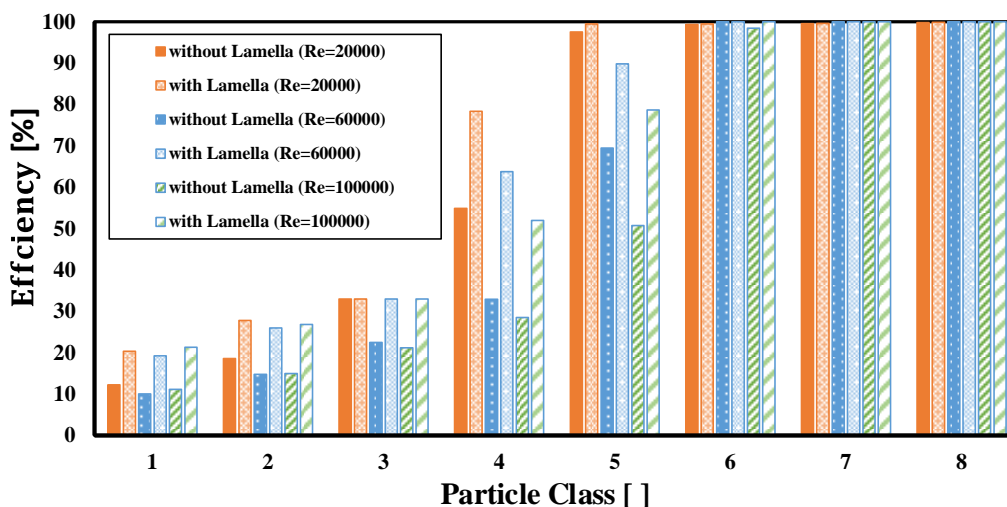
در شکل ۱۵ بازدهی ته‌نشینی برای کلاس ذرات مختلف در دو حالت بدون لاملا و با لاملا با یکدیگر مقایسه شده‌اند. با توجه به شکل ۱۵ می‌توان دریافت، با افزایش رینولدز جریان ورودی، کلاس ذرات ۱ تا ۳، در حالت بدون لاملا و با لاملا، افت میزان بازدهی حذف دارند، ولی این افت بازدهی بین سه رینولدز مختلف آنچنان متفاوت نیست، همچنین کلاس ذرات ۶ تا ۸ در رینولدزهای مختلف و در دو حالت بدون لاملا و با لاملا، دارای بازدهی حذف ۱۰۰ درصد هستند؛ اما دو کلاس ذرات ۴ و ۵ بیشتر تحت تاثیر دبی جریان ورودی هستند (با توجه به شکل ۱۵). کلاس ۵ در رینولدز ۲۰۰۰۰ دارای بازدهی ۱۰۰ درصد است؛ ولی با افزایش دبی این بازدهی کاهش پیدا می‌کند و باعث می‌شود، در خروجی جریان از تانک ته‌نشینی ذراتی با قطر ذرات ۵۰ تا ۱۰۰ میکرون مشاهده شود.

به منظور بررسی تاثیر زاویه لاملا بر عملکرد تانک ته‌نشینی، سه نوع لاملا با زاویه‌های مختلف (زاویه: Lamella 60، Lamella 45 و Lamella 52) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. شکل ۱۶ بررسی بازدهی تانک را در زوایای مختلف نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱۶ لاملا با زاویه ۴۵ درجه بیشترین



شکل ۱۳- توزیع غلظت در راستای طولی تانک در دو حالت با لاملا و بدون لاملا

به منظور بررسی تاثیر سرعت ورودی بر عملکرد تانک ته‌نشینی، شبیه‌سازی در سه رینولدز مختلف ورودی (رینولدزهای ۲۰۰۰۰، ۶۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰) با هم مقایسه شده است. شکل ۱۴ تاثیر سرعت ورودی برای دو حالت بدون لاملا و با لاملا را نشان می‌دهد. در واقع افزایش سرعت باعث کاهش بازدهی ته‌نشینی ذرات می‌شود؛ زیرا افزایش سرعت به منزله افزایش مومنوم جریان است و در نتیجه به ذره نیروی بیشتری وارد خواهد شد و این عامل موجب ته‌نشین شدن کمتر ذره می‌شود. نکته دیگر در مورد شکل ۱۴، اختلاف بین حالت رینولدز ۲۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ است. اختلاف در این حالت برای دو رینولدز برابر با ۱۷/۵۵ درصد است؛ به عبارتی با افزایش رینولدز میزان بازدهی نیز به میزان ۲۵/۱۶ درصد کاهش پیدا می‌کند. در حالت با لاملا نیز، افزایش سرعت باعث افزایش مومنوم جریان و کاهش بازدهی به میزان

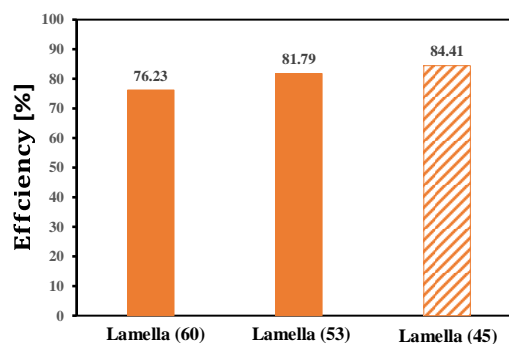


شکل ۱۵- بازدهی حذف کلاس‌های مختلف ذرات برای رینولدزهای ورودی مختلف در حالت بدون لاملا و با لاملا

۴- نتیجه‌گیری

تانک‌های ته‌نشینی یکی از تکنولوژی‌های پرکاربرد به منظور تصفیه آب‌های صنعتی به‌شمار می‌روند. پژوهش حاضر با بهره‌گیری از ابزار CFD و مدل فاز گسسته (DPM) به تحلیل جریان حاوی ذره داخل تانک ته‌نشینی می‌پردازد؛ همچنین با توجه به کسر حجمی ذرات ورودی به تانک، کوپلینگ دو طرفه (تاثیر جریان روی ذرات و بالعکس) در نظر گرفته شده است. تحلیل و بررسی پارامترهای تاثیرگذار بر تانک ته‌نشینی مجهز به لاملا نشان می‌دهد، استفاده از لاملا باعث ایجاد تغییرات در میدان جریان داخل تانک ته‌نشینی می‌شود. این تغییرات که شامل کاهش سرعت جریان در راستای y، کاهش حجم ناحیه چرخش و کاهش میزان انرژی توربولانسی میدان جریان است، باعث بهبود عملکرد تانک ته‌نشینی می‌شود. استفاده از لاملا بازدهی حذف ناخالصی تانک ته‌نشینی را به میزان ۶/۴۷ درصد افزایش می‌دهد. سرعت ورودی به تانک‌های ته‌نشینی مشخصه‌ای مهم و تاثیرگذار بر عملکرد آنها است. بالا بودن میزان سرعت ورودی به تانک، کاهش بازدهی را به دنبال دارد. نتایج نشان می‌دهد، افزایش سرعت ورودی به تانک باعث کاهش بازدهی می‌شود؛ در صورتی که استفاده از لاملا از روند کاهش میزان بازدهی در این شرایط جلوگیری می‌کند (۲۵/۱۶ به ۱۲/۸۹ درصد) و عملکرد تانک را بهبود می‌بخشد. با توجه به دبی ورودی متغیر جریان در کاربردهای واقعی و صنعتی، استفاده از صفحات شیبدار منجر

بازدهی را به میزان ۸۴/۴۱ درصد دارد و این مقدار نسبت به حالت لاملا با زاویه ۶۰ درجه به میزان ۸/۱۸ درصد بهبود پیدا کرده است. صفحات شیبدار با زاویه کمتر، خطوط جریان را بیشتر تغییر می‌دهند و از میزان مومنتوم در راستای y می‌کاهد. به عبارتی ذره تحت تاثیر جریان بالارونده در تانک، در صورتیکه در معرض مسیر جریان مستقیم به سمت بالا قرار بگیرد، احتمال ته‌نشینی آنها کمتر می‌شود؛ زیرا نیروی مومنتوم ناشی از جریان بیشتری به آن در راستای y وارد می‌شود. کمتر شدن لاملا با زاویه با کاهش مومنتوم سیال در راستای y، نیروی جریان به سمت بالا را می‌کاهد و در نتیجه ذره بهتر ته‌نشین می‌شود.



شکل ۱۶- بازدهی لاملا برای زوایای مختلف ۶۰، ۵۳، و ۴۵ درجه

به ثبات در عملکرد و بازدهی تانک ته‌نشینی می‌شود که در نتیجه سیستم تصفیه آب در برابر نوسانات جریان ورودی واکنش پایدارتری خواهد داشت. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد، کمتر شدن زاویه صفحات شیبدار به علت کاهش میزان مومنتوم جریان در راستای y ، باعث بهبود عملکرد تانک ته‌نشینی می‌شود و افزایش $8/18$ درصدی میزان بازدهی را در پی دارد.

۵- فهرست علائم

چگالی، kg/m^3	ρ	مساحت، m^2	A
ویسکوزیته، $kg/m.s$	μ	سرعت، m/s	u
نرخ اتلاف انرژی آشفته، m^2/s^3	ε	سرعت، m/s	u', v', w'
کسر حجمی	α	انرژی جنبشی آشفته، m^2/s^2	k
لزوجت دینامیکی مؤثر سیال، m/s	μ_{eff}	نرخ تولید انرژی توربولانسی	G
عدد تصدفی بل توزیع طبیعی	ζ	ثوابت مدل توربولانسی	$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$
	زیرنویس	انحنای ناگهانی جریان	R_ε
جهت‌های اصلی	i, j, k	بردار سرعت نسبی ذره و سیال، m/s	u_r
ذره	p	سرعت متوسط، m/s	U
سیال	f	چشمه فازگسسته	S_{dp}
مدل تنش رینولدزی	rms	فشار، N/m^2	P
ورودی	in	جرم، kg	m
خروجی	out	نیرو، N	F
اصطکاک	fr	غلظت، kg/m^3	C
جرم مجازی	vm	شتاب گرانش، m/s^2	g
گرانشی	g	قطر	d
برونی	br	ضریب اصطکاک	C_d
شناوری	b	دبی سیال، m^3/s	Q
گرادیان فشاری	pg	عدد بدون بعد رینولدز	Re
مؤثر	eff	عدد بدون بعد فرود	Fr

۶- منابع

- [۱] پورمویذ ع، رحمتی ر، برخورداری ه- (۱۳۹۶) آنالیز تولید آنتروپی موضعی برای یک آب شیرین‌کن خورشیدی شیبدار یک طرفه (بررسی عددی). *مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها* ۲۹۱-۲۷۹: ۷(۴).
- [۲] پورمویذ ع، رحمتی ر، غلامی م (۱۳۹۷) یک مدل جدید برای جریان دو فازی درون یک آب شیرین‌کن خورشیدی اصلاح

- شده با یک لایه متخلخل. مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و سازه‌ها ۱۸۲-۱۷۱: ۸(۱).
- [3] Plum V, Dahl CP, Bentsen L, Petersen CR, Napstjert L, Thomsen N (1998) The actiflo method. *Water Sci Technol* 37(1): 269-275.
- [4] Tarpagkou R, Pantokratoras A (2014) The influence of lamellar settler in sedimentation tanks for potable water treatment—a computational fluid dynamic study. *Powder Technol* 268: 139-149.
- [5] Ueberl J, Hager WH (1997) Improved design of final settling tanks. *J Environ Eng* 123(3): 259-268.
- [6] Asgharzadeh H, Firoozabadi B, Afshin H (2011) Experimental investigation of effects of baffle configurations on the performance of a secondary sedimentation tank. *Scientia Iranica* 18(4): 938-949.
- [7] Goula AM, Kostoglou M, Karapantsios TD, Zouboulis AI (2008) The effect of influent temperature variations in a sedimentation tank for potable water treatment—A computational fluid dynamics study. *Water Res* 42(13): 3405-3414.
- [8] Tamayol A, Firouzabadi B (2006) Effects of turbulent models and baffle position on the hydrodynamics of settling tanks.
- [9] Tarpagkou R, Pantokratoras A (2013) CFD methodology for sedimentation tanks: The effect of secondary phase on fluid phase using DPM coupled calculations. *Appl Math Model* 37(5): 3478-3494.
- [10] Liu Y, Zhang P, Wei WJD, Treatment W (2016) Simulation of effect of a baffle on the flow patterns and hydraulic efficiency in a sedimentation tank. *57(54): 25950-25959.*
- [11] Shahrokhi M, Rostami F, Said MAM (2013) Numerical modeling of baffle location effects on the flow pattern of primary sedimentation tanks. *Appl Math Model* 37(6): 4486-4496.
- [12] Ramin E *et al.* (2014) A new settling velocity model to describe secondary sedimentation. 66: 447-458.
- [13] Gkesouli A, Stamou AJEW (2017) CFD modelling of wind effect on rectangular settling tanks of water treatment plants. 58: 61-67.
- [14] Deldar S, Jafarian Dehkordi A, Kharinezhad Arani HJTPNMS (2018) Investigating the effect of flow entrance and existence of baffle on sedimentation efficiency using Discrete Phase Model (DPM). 6: 29-36.
- [15] Saleh AM, Hamoda MF (1999) Upgrading of secondary clarifiers by inclined plate settlers. *Water Sci Technol* 40(7): 141-149.
- [16] Sarkar S, Kamilya D, Mal B (2007) Effect of geometric and process variables on the performance of inclined plate settlers in treating aquacultural waste. *Water Res* 41(5): 993-1000.
- [17] Salah AL-kizwini R (2015) Improvement of sedimentation process using inclined plates. *Mesop Environ J* 2(1): 100-114.
- [18] Gouesbet G, Berlemont AJPIE, Science C (1999) Eulerian and lagrangian approaches for predicting the behaviour of discrete particles in turbulent flows. 25(2): 133-159.
- [19] Mahdavianesh M, Noghrehabadi A, Behbahaninejad M, Ahmadi G, Dehghanian MJLSJ (2013) Lagrangian particle tracking: Model development. 10(8s): 34-41.
- [20] Song G, Song B, Guo Z, Yang Y, MJM Song (2018) Separation of non-metallic inclusions from a Fe-Al-O melt using a super-gravity field. 49(1): 34-44.
- [21] Odar F, Hamilton WSJJOFM (1964) Forces on a sphere accelerating in a viscous fluid. 18(2): 302-314.
- [22] Choudhury D (1973) Introduction to the renormalization group method and turbulence modeling. Fluent incorporated.
- [23] Graham D, James PJIJOMF (1996) Turbulent dispersion of particles using eddy interaction models. 22(1): 157-175.
- [24] Hendricks DW (2006) Water treatment unit processes: physical and chemical. CRC press.
- [25] Jover-Smet M, Martín-Pascual J, Trapote AJW (2017) Model of suspended solids removal in the primary sedimentation tanks for the treatment of urban wastewater. 9(6): 448.