



روند مدلسازی تانک ته‌نشینی ثانویه در تصفیه پساب

صغری عباسعلی‌پور^۱، شاهرخ شاه حسینی^۲

تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی

shahrokh@iust.ac.ir و abbasalipour_ne@chemeng.iust.ac.ir

چکیده

تانک‌های ته‌نشینی ثانویه یکی از مهمترین مراحل در تصفیه فاضلاب به شمار می‌روند. بازدهی، توزیع غلظت و سرعت را در این تانک‌ها می‌توان با استفاده از شبیه سازی‌های عددی به دست آورد. هدف از این تحقیق، ارائه روند کامل مدلسازی جعبه شیشه‌ای تانک‌های ته‌نشینی ثانویه می‌باشد. بدین منظور از ترکیب دو تکنیک مدلسازی استفاده می‌شود: دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای شبیه‌سازی هیدرودینامیک تانک ته‌نشینی و مدلسازی موازنه جمعیت برای به حساب آوردن دینامیک لخته ناشی از فرآیند لخته سازی (و نیز شکست لخته). در مدلسازی هیدرودینامیک تانک از معادلات ممنت، پیوستگی و همچنین توربولنسی برای تعیین فیلد جریان و معادله اسکالر برای غلظت استفاده می‌شود که اثر معادله موازنه جمعیت به صورت جمله اضافی در معادله غلظت وارد می‌گردد. به منظور در نظر گرفتن خواص تهنشینی لجن، از معادله سرعت ته‌نشینی مناسب بهره گرفته و تغییرات دانسیته لجن با غلظت، به کمک معادله حالت مناسب لحاظ می‌شود. بعد از ایجاد مدل مناسب، شرایط مرزی و اولیه معرفی شده‌اند. نحوه صحیح مش‌بندی تانک نیز تاثیر بسزایی بر شبیه‌سازی دارد. بدین منظور دو پارامتر اصلی نسبت ابعاد و انحراف از تساوی زاویه برای تعیین کیفیت مش‌بندی معرفی می‌شود. معیار مناسب بودن هر حجم کنترل برای نسبت ابعاد مقدار بین ۱ و ۲ و برای انحراف از تساوی زاویه، زیر ۰/۵ می‌باشد. همچنین به منظور کامل کردن روند مدلسازی، به طور مختصر به کالیبراسیون مدل به منظور تعیین پارامترهای آن اشاره شده و در نهایت روش‌هایی جهت اعتبار سنجی مدل در تانک‌های ته‌نشینی ثانویه بیان گردیده است.

واژه‌های کلیدی: تانک ته‌نشینی، مدلسازی، دینامیک سیالات محاسباتی، موازنه جمعیت

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد

^۲ دانشیار



مقدمه

ته نشینی به واسطه گراویتی قدیمی‌ترین و عمومی‌ترین فرآیند تصفیه پساب می‌باشد. تانک‌های ته نشینی ثانویه یا کلاریفایرها یکی از این سیستم‌ها هستند که در آن لخته‌های بیولوژیکی تولید شده طی فرآیند لجن فعال به واسطه گراویتی از مایع جدا می‌شود. با توجه به اینکه کلاریفایرها یک سوم هزینه سرمایه گذاری کل فرآیند لجن فعال را در برمی‌گیرند، بنابراین بررسی و فهم دقیق فرآیند کلاریفایر از اهمیت قابل ملاحظه‌ای برخوردار است [۱].

مدل‌های کلاریفایر به طور کلی به دو دسته تقسیم می‌شوند: مدل‌های "جعبه سیاه" و مدل‌های "جعبه شیشه‌ای". مدل‌های جعبه سیاه توسط دوبین (۱۹۹۴) توسعه و انتشار یافت. این مدل‌ها بر اساس تقریب‌هایی از رفتار هیدرولیکی کلاریفایر با تکیه بر ساده سازی‌ها و یا عمدتاً بر مبنای معادلات فلاکس جامدات می‌باشند. در این نوع مدلسازی اعتماد بر شبیه سازی ارائه شده توسط مدل شدیداً به شباهت بین کالبراسیون و سناریوهای پیش بینی، وابسته است. اما در نهایت بایستی توجه داشت که استفاده از مدل‌های جعبه سیاه برای پیشگویی رفتار کلاریفایرها با ساختارهای مختلف تحت شرایط عملیاتی اجرایی، شک برانگیز است. طی ۳۰ سال اخیر، پیشرفت‌های بزرگی در دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و سخت افزار کامپیوتر صورت گرفته که امکان شبیه سازی کلاریفایر را تحت مدل‌های جعبه شیشه‌ای فراهم می‌آورد. این مدل‌ها فیلدهای چند بعدی کاملتری برای جریان و جامدات معلق ارائه می‌دهند. مطالعه بر روی کلاریفایر بر مبنای اصول CFD، توسط لارسن (۱۹۷۷) بدعت گذاری شد. وی شبیه سازی عددی دو بعدی را برای تانک ته نشینی در شرایط آب و یا با غلظت جامدات خیلی کم که بتوان تاثیر جامدات در میدان جریان را ناچیز گرفت، انجام داد [۲]. بعد از آن شبیه سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی زیادی به منظور شبیه سازی هیدرودینامیک و تعیین توزیع غلظت تانک‌های ته نشینی انجام شد [۳-۱۱]. با توجه به مدلسازی‌های انجام شده تا کنون، می‌توان نتایج کلی زیر را ارائه کرد:

رفتار کلاریفایر تحت تاثیر حضور جامدات معلق است. بنابراین مدلسازی انتقال سیال نمی‌تواند جدا از انتقال جامدات معلق انجام شود.

عمومی‌ترین روشی که برای لینک رفتار جامدات معلق و سیال استفاده می‌شود، روش شبه دوفازی است. در این روش رفتار جامدات از طریق سرعت ته نشینی که تابعی از غلظت جامدات معلق است، به حساب آورده می‌شود.



کلاریفایرها با جریان‌های توربولنت سروکار دارند. بنابراین برای مدل‌سازی مناسب کلاریفایر بایستی از مدل‌های توربولنسی مناسب استفاده کرد، که عمومی‌ترین آنها علی‌رغم معایب شناخته شده‌اش، مدل $k-\epsilon$ می‌باشد.

البته باید توجه داشت که با وجود اینکه در اغلب شبیه‌سازی‌های صورت گرفته دینامیک لخته‌های بیولوژیکی در نظر گرفته نشده است، نمی‌توان نقش آن را در بازدهی تانک نادیده گرفت [۲]. ته نشینی لخته‌های لجن به سبب لخته و میزان تخلخل وابسته است. بسته به شرایط عملیاتی در کلاریفایر، توزیع سبب لخته‌ها نیز بواسطه فرآیند لخته‌سازی (و نیز شکست لخته) تغییر می‌کند و بازدهی فرآیند ته نشینی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین، به منظور مدل‌سازی دقیق‌تر از زیر مدل‌هایی برای فرآیند لخته‌سازی به همراه مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی استفاده شده است [۱۲]. همچنین اخیراً از مدل‌سازی‌هایی به صورت ترکیب موازنه جمعیت با مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی استفاده می‌شود [۱۵-۱۳]؛ قطعاً این نوع مدل‌سازی به دلیل در بر گرفتن دینامیک لخته موجود در تانک‌های ته نشینی ثانویه، حل دقیق‌تری از آن ارائه می‌کند.

در این مقاله بر آن هستیم تا بر مبنای مطالعات صورت گرفته تاکنون شمای کلی از نحوه مدل‌سازی جعبه شیشه‌ای تانک‌های ته نشینی ارائه کنیم. بدین منظور مراحل مختلف مدل‌سازی یک تانک ته نشینی شامل مدل‌سازی ریاضی فرآیند با در نظر گرفتن شرایط مرزی و اولیه مناسب و نحوه صحیح مش‌بندی تانک، کالیبراسیون و در نهایت اعتبار سنجی مدل، مورد بحث قرار خواهند گرفت.

مدلسازی

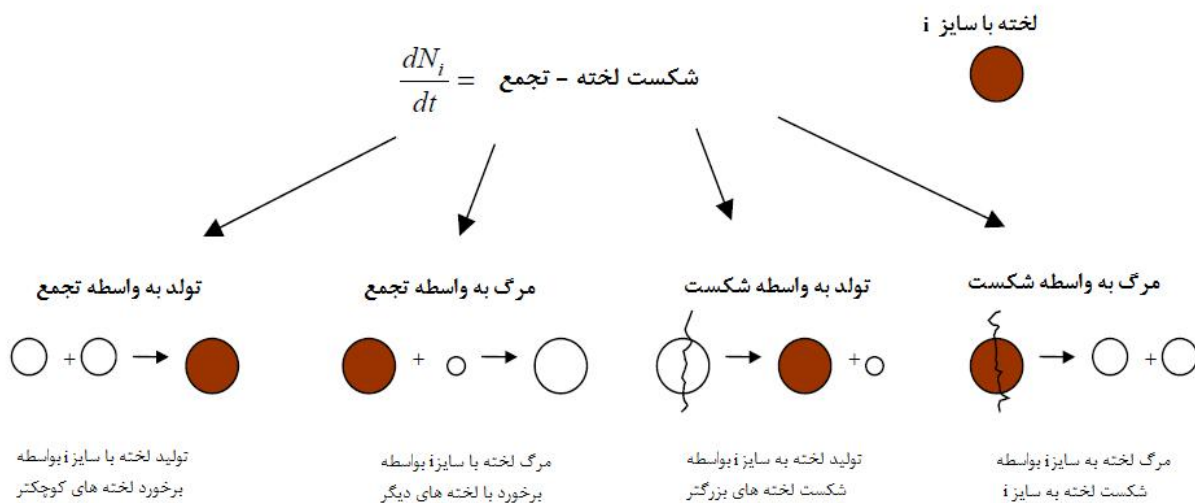
همانطور که در مقدمه اشاره شد به منظور مدل‌سازی مناسب تانک ته نشینی، به دلیل تأثیر حضور جامدات بر رفتار آن، از معادلات انتقال جامدات و ممنتوم به طور همزمان با شرایط مرزی مناسب بهره گرفته می‌شود. همچنین به منظور در نظر گرفتن توانایی ته نشینی لجن از معادله سرعت ته نشینی مربوطه در معادله انتقال جامدات استفاده می‌گردد. در ضمن با توجه به دینامیک مربوط به لخته‌ها در اثر فرآیندهای لخته‌سازی (و شکست لخته)، این اثر نیز بایستی در معادلات در نظر گرفته شود. بنابراین در مدل‌سازی نسبتاً دقیق رفتار کلاریفایر نیاز به دو تکنیک مدل‌سازی مختلف می‌باشد: مدل‌سازی موازنه جمعیت (PBM) برای شبیه‌سازی دینامیک لخته، دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه‌سازی هیدرودینامیک تانک. در ادامه‌ی



این بخش به این مدلسازی‌ها به طور جداگانه پرداخته می‌شود. همچنین از آنجایی که حل مدل شدیداً به کیفیت مش بندی وابسته است، این مبحث نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۲- مدلسازی دینامیک لخته

تجمع و شکست لخته به طور همزمان طی فرآیند لخته سازی لجن فعال اتفاق می‌افتند که هر دو مکانیزم منجر به تغییر در توزیع سایز ذره (PSD) خواهند شد [۱۶]. شمای از این مکانیزم در شکل ۱ ارائه شده است. به منظور مدلسازی این مکانیزم عموماً از موازنه جمعیت استفاده می‌گردد. مدلسازی موازنه جمعیت روشی است که تعداد اشیاء را در یک سیستم خاص تعیین می‌کند. در اینجا، لخته‌ها با اندازه‌های مختلف به عنوان اشیاء در نظر گرفته می‌شوند. یک مدل موازنه جمعیت فقط فرآیندهای انتقال را به حساب نمی‌آورد بلکه فرآیندهای داخلی همچون لخته گذاری (و نیز شکست لخته) را نیز در بر می‌گیرد. این فرآیندهای داخلی تابعی از مشخصات لخته (یعنی سایز و ابعاد فرکتال) و شرایط محیطی (یعنی نرخ برشی، دما، غلظت اکسیژن،...) می‌باشد. ([۱۷]. [۱۸]).



شکل ۱. فرایند لخته سازی [۱۷]

معادلات حاصله از مدلسازی از نوع مشتقات انتگرال- جزئی هستند که به سختی حل می‌شوند. فرم منفصل شده موازنه جمعیت در معادله (۱) ارائه شده است [۱۶].

$$\frac{dN_i}{dt} = \sum_{j=1}^{i-2} 2 \sum_{k=1}^{j-i+} \alpha \beta_{i-k,j} N_{i-1} N_j + \frac{1}{2} \alpha \beta_{i-1,j-1} N_{i-1}^2 - N_i \sum_{j=2}^{i-1} 2^{j-1} \alpha \beta_{i,j} N_j - N_i \sum_{l=1}^{imax} \alpha \beta_{i,l} N_l + \sum_{j=1}^{imax} \Gamma_{i,j} S_j N_j - S_i N_i$$



(۱)

این معادله با این فرض است که حجم کلی ذرات ثابت است. در معادله موازنه جمعیت N_i غلظت عددی لخته‌های سایز i ، ضریب برخورد α ، ضریب فرکانس برخورد برای ذرات به حجم V_i و V_j ، نرخ تکه تکه شدن لخته‌های سایز i و i تابع توزیع شکست می‌باشد. تابع توزیع شکست کسر حجمی قطعات تولید شده به سایز i را از لخته‌های سایز j نشان می‌دهد [۱۶]. دو ترم اول سمت راست معادله (۱) افزایش در غلظت عددی بواسطه تولد ذره به سایز i ناشی از برخورد ذرات، دو ترم دوم کاهش در غلظت عددی بواسطه مرگ ذره به سایز i ناشی از برخورد ذرات، ترم چهارم افزایش در غلظت عددی بواسطه شکسته شدن ذرات بزرگتر از سایز i و ترم آخر کاهش در غلظت عددی را بواسطه شکست ذره به سایز i بیان می‌کند. برای جزئیات بیشتر به مقاله [۱۶] مراجعه نمایید.

۲-۲- دینامیک سیالات محاسباتی

به منظور مدل‌سازی انتقال لخته‌ها در کلاریفایر و همچنین هیدرودینامیک درون تانک از مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی استفاده می‌شود. در مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی از یکسری معادلات ریاضی برای بیان فرآیند استفاده می‌شود. در مورد تانک‌های ته نشینی ثانویه، هرچند که جریان شامل آب و لخته‌های جامد است و حالت دو فازی دارد ولی میتوان آن به صورت مساله تک فاز و چگالی لایه‌ای در نظر گرفت. در یک سیستم مختصات استوانه‌ای که محور آن به صورت عمودی در راستای x می‌باشد، معادلات حاکم برای جریان دو بعدی، ناپایا، لایه‌ای ارائه شده‌اند.

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial}{\partial x}(ur) + \frac{\partial}{\partial r}(rv) = 0$$

(۱)

معادلات ممتم در راستای x و r :



$$\frac{\partial}{\partial t}(up) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(ruup) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(ruvp) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}[rpr_{eff}(2\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3}(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r}))] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}[rpr_{eff}(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x})] - \frac{\partial P}{\partial x} - \rho g; \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(vurp) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rvvp) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}[r\rho v_{eff}(2\frac{\partial v}{\partial r} - \frac{2}{3}(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r}))] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}[r\rho v_{eff}(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x})] - \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{2}{3} \frac{\rho v_{eff}}{r} (\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r}) - 2\rho v_{eff} \frac{v}{r^2}; \quad (3)$$

که u و v مولفه های سرعت در جهت های x و r هستند. P فشار ترمودینامیکی منهای فشار هیدرواستاتیک در چگالی مرجع (آب تمیز) می باشد و g شتاب گرانش، ρ چگالی توده و v_{eff} ویسکوزیته مؤثر است که به صورت مجموع ویسکوزیته کنیماتیک و ویسکوزیته گرانی می شود:

(۴)

ترم چشمه در معادله ممنتم در راستای x نیروی گرانشی را بیان می کند. برای محاسبه دانسیته نیز از رابطه (۵) استفاده می شود که دانسیته توده را به دانسیته مایع و جامد و کسر حجمی لجن، ϕ ، مرتبط می کند. البته با توجه به اینکه در کلاریفایرها با سایزهای مختلفی از ذرات مواجه هستیم، در رابطه زیر از ϕ_i که کسر حجمی متناظر با سایز ذره را نشان می دهد، استفاده می گردد.

$$1 - \sum \phi_i \left(1 - \frac{\rho_l}{\rho_s} \right)$$

(۵)

برای مدلسازی ته نشینی ذرات لخته نیز، نیاز به معادله انتقال اضافی داریم که معادله اسکالر نامیده می شود. با بکارگیری اصل بقا جرم برای یک المان حجمی دیفرانسیلی، می توان معادله جابجایی- انتشار را درون جریان بدست آورد. این معادله انتقال هر لخته به سایز i را توصیف می کند و شامل فلاکس ته نشینی ذرات لخته و سنتیک لخته گذاری (و نیز شکست لخته) می باشد:



$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \phi_i + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} r \rho \phi_i (u - v_{si}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \phi_i \rho v = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left(r \frac{v_{eff}}{\sigma_s} \frac{\partial}{\partial x} \rho \phi_i \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{v_{eff}}{\sigma_s} \frac{\partial}{\partial r} \rho \phi_i \right) + m p_i r_i \quad (۶)$$

که در آن σ_s عدد اشمیت، توصیف کننده انتقال توربولنت جامدات می باشد که مؤلفان عموماً آن را بین ۱ و ۰/۵ در نظر می گیرند و r_i طرف راست معادله موازنه جمعیت (معادله (۱)) و $m p_i$ ضریب تبدیل غلظت عددی به غلظت جرمی است. همچنین v_{si} سرعت ته نشینی متناظر با سایز لخته می باشد که تاکنون معادلات مختلفی برای محاسبه آن ارائه شده است. در حال حاضر معادله سرعت دو اکسپوننسیالی تاکاس و همکاران (۱۹۹۱) به دلیل در نظر گرفتن هر دو ناحیه ته نشینی مجزا و بازداشته و نیز سادگی، پرکاربردترین معادله می باشد [۱۹].

در تانک های ته نشینی با وجود سرعت های کم موجود در تانک به دلیل ابعاد بزرگ با توربولنسی مواجه هستیم بنابراین علاوه بر معادلات ارائه شده نیاز به مدلسازی توربولنسی نیز داریم. راه های مختلفی به منظور در نظر گرفتن توربولنسی ارائه شده است. تاکنون عمومی ترین و معتبرترین مدل توربولنسی مدل $k-\epsilon$ استاندارد بوده است. در این مدل ویسکوزیته توربولنت به عنوان تابعی از انرژی جنبشی آشفتگی، k ، و نرخ اتلاف آن، ϵ ، در نظر گرفته می شود (معادله (۷)). معادلات مرتبط در زیر ارائه شده اند. [۲۰]

$$v_t = c \frac{k^2}{\mu \epsilon} \quad (۷)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} (r \rho \epsilon u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho \epsilon v) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \rho \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \right] + C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + \quad (۸)$$

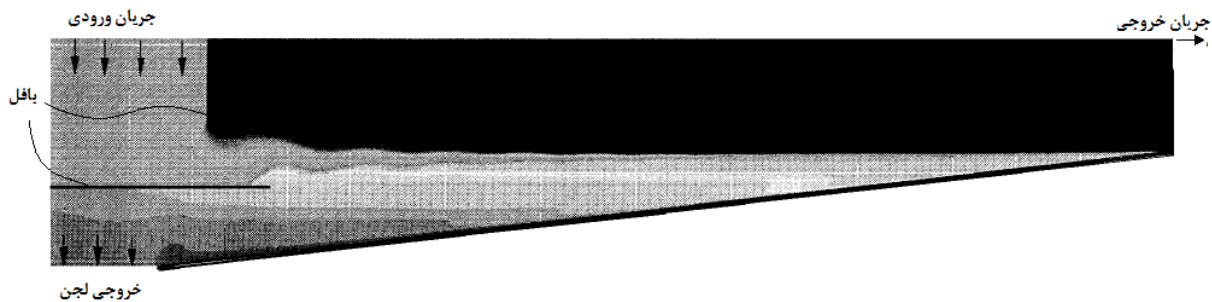
$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \rho \frac{\partial \epsilon}{\partial r} \left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \right] + C_{1\epsilon} P_s \frac{\epsilon}{k};$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} (r \rho k u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho k v) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \rho \frac{\partial k}{\partial x} \left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \right] + P_s - \rho \epsilon + \quad (۹)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \rho \frac{\partial k}{\partial r} \left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \right];$$



که در آن P_s تولید انرژی بواسطه برش و σ_k ، σ_{\square} ، C_1 و C_2 ثوابت تجربی هستند.
مثالی از توزیع غلظت به دست آمده توسط مدلسازی فوق برای نصف قطاع عمودی از یک تانک ته نشینی استوانه ایی در شکل ۳-۲ ارائه شده است.



شکل ۳. ۲. میدان جریان محاسبه شده در قطاعی از تانک ته نشینی استوانه ایی [۷]

مدلسازی ارائه شده به صورت دوبعدی است. شبیه سازی های زیادی هم به صورت سه بعدی انجام شده است. ولی به دلیل زمان های محاسباتی طولانی اغلب سعی می شود تا با حذف ساختارهایی همچون مکانیزم بازیابی لجن و کاهش ابعاد سیستم، مسئله مورد نظر در حد امکان ساده شود. مثلاً در مورد تانک های ته نشینی شرط تقارن محوری در نظر گرفته میشود که این به معنی عدم حضور فلاکس های مماسی است در حالی که در عمل چنین نیست. در بعضی از انواع شکاف های ورودی، نمی توان چنین فرضی را به کار گرفت. برای شبیه سازی فیلد جریان در چنین ورودی هایی، از مدل های سه بعدی استفاده می شود. اما در تانک هایی که از بافل های ورودی استفاده می کنند (شکل ۲)، می توان به صورت یک تقریب از مدلسازی دو بعدی استفاده کرد. باید توجه داشت که توربولنسی ایجاد شده بواسطه ساختار ورودی عموماً فیلد جریان را درون ناحیه ورودی تعیین می کند [۱۲].

آخرین مسئله ایی که در مدلسازی بایستی در نظر گرفت شرایط مرزی و اولیه است. شرایط مرزی متفاوت منجر به حل های کاملاً متفاوتی می شود، از این رو بایستی به دقت به کار گرفته شوند. در شرط مرزی ورودی، معمولاً یک جریان موازی ورودی و یکدست در نظر گرفته می شود که در آن سرعت افقی ورودی به بزرگی u_{in} و پروفایل غلظت C_0 برقرار است. انرژی سینتیک توربولنس برابر ۱۰٪ مربع سرعت ورودی در نظر گرفته می شود و نرخ اتلاف نیز از معادله (۱۰) محاسبه می گردد.



(۱۰)

$$\varepsilon = c_{\mu}^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l_m}$$

سطح آزاد به صورت مرز متقارن فرض می‌شود که در آن گرادیان نرمال متغیرها صفر می‌باشد. مقادیر مرزی خروجی نیز، از نقاط شبکه مجاور مرز خروجی با ارضاء پیوستگی کلی جرم محاسبه می‌شوند. کف تانک می‌تواند به صورت مرز جاذب کامل عمل کند که امکان تعلیق ذرات بواسطه جریان سیال در آن شامل نشده است. جزئیات شرایط مرزی در تحقیقات قبلی ارائه شده است ([۲۱]، [۲۲]). از طرف دیگر شرایط اولیه برای حوزه محاسباتی، حل نهایی را تغییر نخواهد داد؛ در عوض تاثیر قابل توجهی روی سرعت همگرایی دارد. اگر حدس‌های اولیه میدان جریان نامعلوم باشند، بهترین حل در شبیه سازی ناپایا با یک تانک خالی که بتدریج از لجن پر می‌شود، بدست می‌آید.

معادلات انتقال به دست آمده به روش حجم محدود انفصال سازی می‌شوند. این معادلات به وسیله الگوریتم‌های حل مختلفی همچون SIPELC و PISO حل می‌گردند که بدین منظور از نرم افزارهای شبیه سازی مختلفی می‌توان بهره گرفت که عمومی ترین آن نرم افزار فلوئنت و کامسول می‌باشند. البته باید توجه داشت که قبل از حل مدل، مش بندی سیستم مورد نظر به منظور وارد کردن هندسه تانک در نرم افزار و تعیین پارامترهای مدل در مرحله کالیبراسیون مطرح است که در بخش‌های بعدی به آن پرداخته می‌شود.

۲-۳- مش بندی سیستم

بعد از انتخاب سیستم مدل شده، هندسه تانک وارد نرم افزار می‌گردد. بدین منظور حوزه محاسباتی بایستی به سلول‌هایی تقسیم بندی شود؛ این روش مش بندی نامیده می‌شود. اینکه مش بندی چگونه انجام شود اثر قابل توجهی روی دقت عددی و زمان همگرایی خواهد داشت. عموماً از مش‌های مستطیلی برای مدلسازی تانک‌های ته نشینی با کف افقی و شیبدار استفاده می‌گردد (افقی: [۲۱]، شیبدار: [۲۲]). همچنین در بعضی موارد که وجود بافل‌ها و دیواره ناموازی مش بندی سیستم را سخت می‌سازد، استفاده از مش مثلثی نیز دیده شده است. باید توجه داشت که در هر صورت در همه انواع مش بندی بررسی دو پارامتر انحراف از تساوی زاویه (Equiangle Skew) و نسبت ابعاد (Aspect Ratio) بسیار حایز اهمیت است [۲۳]. پارامتر انحراف از زاویه میزان یکدست بودن زوایا را در هر حجم کنترل مورد بررسی قرار می‌دهد؛ برای مش های مثلثی این پارامتر انحراف از زاویه ۶۰ درجه را بیان می‌کند. این پارامتر بایستی در حد



امکان کم باشد؛ در سل هایی که بخوبی ایجاد شده اند مقدار آن زیر 0.5 می باشد. همچنین پارامتر نسبت ابعاد برای یک سل مناسب بایستی مقداری بین 1 و 2 داشته باشد. در یک مش بندی مناسب سعی می شود تا بیش از $99/9$ درصد از سل ها مقادیر پرامترهای مناسب را داشته باشند. بعلاوه حل نهایی بایستی مستقل از سایز مش باشد و هیچ خطای عددی به واسطه مش خیلی درشت اتفاق نیافتد. لازم به ذکر است که مش بندی مناسب برای رسیدن به همگرایی ضروری است؛ حتی یک سلول که به طور نامناسبی ایجاد شده است می تواند دلیلی برای واگرایی باشد [۳۳]. از این رو، در صورت مواجه شدن با مشکل واگرایی بایستی خطاهای باقیمانده محلی بین تکرارهای متوالی مورد بررسی قرار گیرد. مقادیر زیاد باقیمانده ها دلالت بر جایی دارد که مشکل از آن ناشی شده و ممکن است در آن ناحیه سل های نامناسبی ایجاد شده باشد. اگر مشکل از این سل ها نباشد بایستی طرح های انفصال عددی مورد بررسی قرار گیرند.

۳- کالیبراسیون مدل

قبل از اینکه مدل حل شود، انواع مختلفی از داده ها مورد نیاز است. اولاً برای تنظیم مش محاسباتی دانستن ابعاد سیستم ضروری است. ثانیاً، مشخصات لجن نیز بایستی موجود باشد. پارامترهای معادله سرعت ته نشینی نیز بسیار مهم هستند که از روی مشخصات ته نشینی لجن تخمین زده می شوند. دانسیته جامدات خشک نیز برای محاسبه دانسیته توده لجن و نیروی شناوری ضروری است. بویانسی در معادله عمودی ممنتم ترم تعیین کننده ایی است و نتیجتاً به طور قابل توجهی بر میدان جریان موثر است. به منظور مدلسازی مناسب فرآیند لخته سازی (و شکست لخته) از آزمایشات مختلف در شرایط محیطی مختلفی استفاده می شود تا پارامترهای مدل از روی آن تخمین زده شوند. بعضی اوقات نیز عامل های لخته سازی همچون پلیمرها و شن برای افزایش دانسیته لخته و از این رو سرعت ته نشینی بکار می روند [۳۴]. آنها به شدت توزیع جامدات را در ته نشین کننده ها تغییر می دهند. بعلاوه، رئولوژی لجن نیز بواسطه لخته سازها تحت تاثیر قرار می گیرد. در این صورت چون تنش های ویسکوز در معادله انتقال ممنتم مهم هستند بنابراین یک مدل مناسب برای رئولوژی لجن مورد نیاز می باشد [۷].

۴- اعتبار سنجی مدل

به منظور بررسی دقت مدل، نتایج شبیه سازی بایستی با داده های تجربی مقایسه شود. بسته به اینکه کدام بخش مدل اعتبار سنجی می شود، از سری داده های مختلفی می توان استفاده کرد. اول از همه پروفایل غلظت جامدات که بعد از شبیه سازی به دست آمده، با



پروفایل اندازه گیری شده طی آزمایشات تجربی مقایسه می شود. بدنبال آن به منظور اعتبارسنجی پروفایل های سرعت روش های مختلفی وجود دارد. این روش ها از روش ساده منحنی های کامل جریان تا اندازه گیری های سه بعدی سرعت، گسترده می شوند ([۲۵]، [۲۶]).

روش منحنی کامل جریان یک راه آسان برای کنترل هیدرولیک کلی ته نشین کننده می باشد. در این روش مواد خنثی، همچون ردیاب به ورودی تانک خورنده می شوند و در موقعیت های مکانی مختلف غلظت ردیاب در زمان اندازه گیری می گردد. روش های پیچیده تر بر مبنای تکنولوژی داپلر صوتی Acoustic Doppler است که سرعت های سه بعدی را اندازه میگیرد [۲۶]. اخیراً از تکنیک داپلر صوتی غیرگریزان به منظور تعیین مشخصات هیدرودینامیکی تانک های ته نشینی استفاده شده است [۲۷]. با این تکنیک ها می توان حتی پروفایل کامل سرعت را در فرکانس نمونه برداری بالا اندازه گرفت. متأسفانه در این اندازه گیری ها، این سرعت ذرات است که محاسبه می شود و نه سرعت سیال؛ میزان افزودنی ذرات، عدم قطعیت در اندازه گیری سرعت سیال را تعیین می کند [۲۷]. برای اجتناب از این عدم قطعیت می توان از تکنیک هایی همچون سرعت سنج های الکترومغناطیسی بهره گرفت. به طور کلی، در هر دو روش می توان تنش های برشی و خواص توربولنسی را تعیین کرد. در نهایت بایستی توجه داشت که اعتبار سنجی ها می تواند تحت شرایط پایا و ناپایا انجام گیرد.

۵- جمع بندی

استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی در تکنولوژی تصفیه پساب از اهمیت قابل ملاحظه ای برخوردار است. طراحی و بهینه سازی واحدهای فرآیندی می تواند به روش های تکنیکی و بدون هیچ نوع ابتکاری انجام شود. این روش های محاسباتی پیچیده مواردی همچون مدلسازی ریاضی، کالیبراسیون و اعتبار سنجی مدل را شامل می شوند. در این مقاله سعی شده تا با در نظر گرفتن دینامیک لخته درون کلاریفایرها به مراحل مختلف فرآیند مدلسازی تانک های ته نشینی ثانویه پرداخته شود.

مراجع

[1] Brennan, D. (2001). " The numerical simulation of tow-phase flow in settling tank", PhD dissertation, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London.

[2] Kleine, D., and Reddy, B. D. (2005). " Finite element analysis of flows in secondary settling tanks", Int. J. Numer. Methods Eng., 64, 849-876.



- [3] Larsen, P. (1977). " on the hydraulic of rectangular settling basins", Report NO. 1001, Department of Water Resource Engineering, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden.
- [4] Imam, E., McCorquodale, Y. A. and Bewtra, J.K. (1983). " Numerical modeling of sedimentation tank", Journal of Hydraulic Engineering, 109, 1740-1745.
- [5] Ceilk, I., Rodi, W. and Stamou , A. (1985). " prediction of hydrodynamic characteristics of rectangular settling tanks", Pro. Int. Symp., Refined flow Modelling and Turbulence Measurements, Iowa City, Iowa, USA.
- [6] Stamou, A., Adams, E. W. and Rodi, W. (1989). " numerical modeling of flow and settling in primary rectangular clarifiers", IAHR, 27, 665-682.
- [7] Lakehal, D., Kerbs, D., Krigman, J., Rodi, W. (1999). " Shear flow and sludge blanket in secondary clarifiers", Journal of Hydraulic Engineering, 125, 253-262.
- [8] Schwarz, M. P., 2002. "CFD modeling of thickeners out worsley Alumina Pty Ltd.", Appl. Math. Modelling, 26, 281-296.
- [9] Jayanti, S. and Narayanan, S. (2004). " Computational study of particle eddy interaction in sedimentation tanks", Journal of Environmental Engineering, 130, 37-49.
- [10] Fan, L., Xu, N., Ke, X. and Shi, H. (2007). " Numerical Simulation of secondary sedimentation tank for urban wastewater", Journal of Chinese Institute of Chemical Engineers, 38, 425-433.
- [11] Dufresne, M., Vazquez, J., Terfons, A., Ghenaim, A. and Poulez, J.B. (2009), " Experimental investigation and CFD modeling sewer detention tank", Computer and Fluids, 38, 1042-1049.
- [12] Lyn, D. A. and Rodi, W. (1990). " Turbulence measurement in model settling tank", Journal of Hydraulic Engineering, 116, 3-21.
- [13] Lyn, D. A., Stamou, A. and Rodi W. (1992). " Density currents and shear-induced Flocculation in sedimentation Tanks", Journal of Hydraulic Engineering, 118, 849-867.
- [14] Heath, A. R. and Koh, P.T.L. (2003). " Combined Population Balance and CFD modeling of particle aggregation by polymeric Flocculation", 3rd International Conference on CFD in Mineral and Process Industries, CSIRO, Australia, 10-12 Desember.
- [15] Nguyen, T., Heath, A., and Witt, P. (2006). " Population balance-CFD modeling of fluid flow, solids distribution and flocculation in thickener feedwalls", 5th International Conference on CFD in Process Industries, CSIRO, Australia, 13th-15th Desember.
- [16] Biggs, C.A. and Lant, P.A., (2002). "Modeling activated sludge flocculation using population balances", Powder Technology , 124 ,pp. 201–211.
- [17] Biggs, S., Habgood, M., Jameson, G.J. and Yan, Y.d., (2000). "Aggregate structures formed via a bridging flocculation mechanism", Chemical Engineering Journal, 80, pp. 13–22.
- [18] Serra T. and Casamitjana X. (1998). " Structure of the aggregates during the process of aggregation and breakup under a shear flow". J Colloid Interface Sci., 206, 505-511.
- [19] Takacs, I., Party, G. G. and Nolasco, D. (1991)." A Dynamic Model of the Thickening/Clarification Process". Wat. Res., 25, 1263-1271.



- [20] Rodi W. (1984). "Turbulence Models and their Application in Hydraulics – a State of the Art Review". 2th edit, International Association for Hydraulic Research (IAHR), 92p.
- [21] McCorquodale J.A. and Zhou S. (1993). "Effects of hydraulic and solids loading on clarifier performance". J. Hydr. Res., 31(4), pp. 461-477.
- [22] Kim H.S., Shin M.S., Jang D.S., Jung S.H. and Jin J.H. (2005), "Study of flow characteristics in a secondary clarifier by numerical simulation and radioisotope tracer technique", Appl. Radiat. Isot. 63, pp. 519–52.
- [23] Bern M. & Plassmann P. (1999). "Mesh Generation". In: Sack J.-R. & Urratia J. (Eds.). Handbook of computational geometry. Elsevier Science.
- [24] Vanderhasselt A., Fuchs A., Vanrolleghem P., Staudinger G. and Verstraete W. (1999). "Monitoring of the effects of additives on sludge separation properties by using sensors". Water Environ. Res., 71, 355-362.
- [25] NCASI (1983). "A review of procedures for conducting conservative tracer studies in the hydraulic characterization of effluent treatment basins". Technical Bulletin No. 408, National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement, Inc, NY, USA.
- [26] Kinnear, D.J. & Deines, K. (2001). "Acoustic Doppler current profiler: clarifier velocity measurement Proceedings". WEFTEC, Atlanta, USA.
- [27] Vanrolleghem, P.A., De Clercq, B., De Clercq, J., Devisscher, M., Kinnear, D.J. and Nopens, I. (2006). "New measurement techniques for secondary settlers: A review". Water Science and Technology, 53, 419-429.

علایم

C, غلظت (kg/m^3)

$C_{10}, C_{20}, C_{30}, C_{40}, C_{50}, C_{60}, C_{70}, C_{80}, C_{90}$ و C_{20} ثوابت تجربی در معادله توربولنسی؛

g, شتاب گرانش (m/s^2)

K, انرژی جنبشی آشفتگی (m^2/s^2)

k, ثابت ون کارمن؛

$\frac{l}{m}$, طول اختلاط (m)

P, فشار ترمودینامیکی منهای فشار هیدرواستاتیک در چگالی مرجع (Pa)؛

P_s , تولید انرژی جنبشی بواسطه برش (kg/ms^3)

u, مولفه سرعت در جهت x (m/s)



v ، مؤلفه سرعت در جهت r (m/s)؛

V_s ، سرعت ته نشینی (m/s).

\mathcal{E} ، نرخ اتلاف انرژی جنبشی (m^2/s^3)؛

ν ، ویسکوزیته کنیما تیکی (m^2/s)؛

ν_t ، ویسکوزیته توربولنت (m^2/s)؛

ρ ، چگالی توده (kg/m^3)؛

ρ_l ، دانسیته مایع (kg/m^3)؛

ρ_s ، دانسیته جامد (kg/m^3)؛

σ_s ، عدد اشویت؛

ϕ ، کسر حجمی؛

