

مقایسه مدل های مختلف رئولوژی لجن های فعال در تانک ته نشینی ثانویه استوانه ای

شبیدار به کمک مدلسازی CFD*

شاهرخ شاه حسینی^(۲)صغرا عباسعلی پور^(۱)

چکیده تانک های ته نشینی ثانویه در فرآیند تصفیه فاضلاب به روش لجن فعال به منظور جداسازی آب تصفیه شده از توده بیولوژیکی خروجی از تانک هوادهی، مورد استفاده قرار می گیرند. در این تحقیق یک مدل تک فازی، دو بعدی و ناپایا به منظور پیش بینی توزیع غلظت و سرعت در تانک های ته نشینی ثانویه ارائه و حل شد. نتایج تطابق خوبی با داده های تجربی نشان داد. با توجه به غیر نیوتنی بودن لجن های فعال و تاثیر آنها بر میدان جریان به دست آمده، مدل های ویسکوزیته همچون بینگهام، کازن، هرشل بالکلای تعمیم یافته، بوکیل و ویسکوزیته ثابت آب در مدلسازی استفاده شد و نتایج حاصل از آنها مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج به دست آمده از مدل های مختلف نشان می دهد که مدل های غیر نیوتنی، تاثیر بسزایی بر محاسبه توزیع غلظت و سرعت دارند. مدل های بینگهام و کازن به دلیل ارائه کردن تنش های برشی بالاتر نسبت به سایر مدل ها، ارتفاع توده لجن را بیشتر از حد واقعی تخمین می زنند و نتایج قابل قبولی را ارائه نمی دهند.

واژه های کلیدی فاضلاب، لجن فعال، دینامیک سیالات محاسباتی، سیال غیر نیوتنی، تانک ته نشینی

Comparison of Different Rheological Models for Activated Sludge in a Secondary Steep Cylindrical Settling Tank Using CFD Modeling Method

S. Abasali Pour

Sh. Shah Hosseini

Abstract The secondary settling tanks are used in activated sludge wastewater treatment processes to separate treated water from the microbial mass leaving the aeration tank. In this study, a single-phase, 2dimensional, and unsteady state model was presented and solved to predict the concentration and velocity distribution in secondary settling tanks. The results showed a good agreement with the experimental data. Due to the non-Newtonian nature of activated sludge and its influence on the obtained flow field, the viscous models such as Bingham, Casson, modified Herschel-Bulkley, Bokil, and constant water viscosity model were used in modeling and their results were compared. The results obtained from different models show that the non-Newtonian models have a considerable effect on the determination of concentration and velocity distribution. The Bingham and Casson models overestimate the sludge blanket depth due to higher shear stress than other models and don't present acceptable results.

Key Words Wastewater, Activated Sludge, Computational Fluid Dynamics, Non-Newtonian Fluid, Settling Tank.

* نسخه نخست مقاله در تاریخ ۸۹/۱۲/۲۳ و نسخه پایانی آن در تاریخ ۹۰/۶/۸ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران

(۲) نویسنده ی مسوول: دانشیار، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران

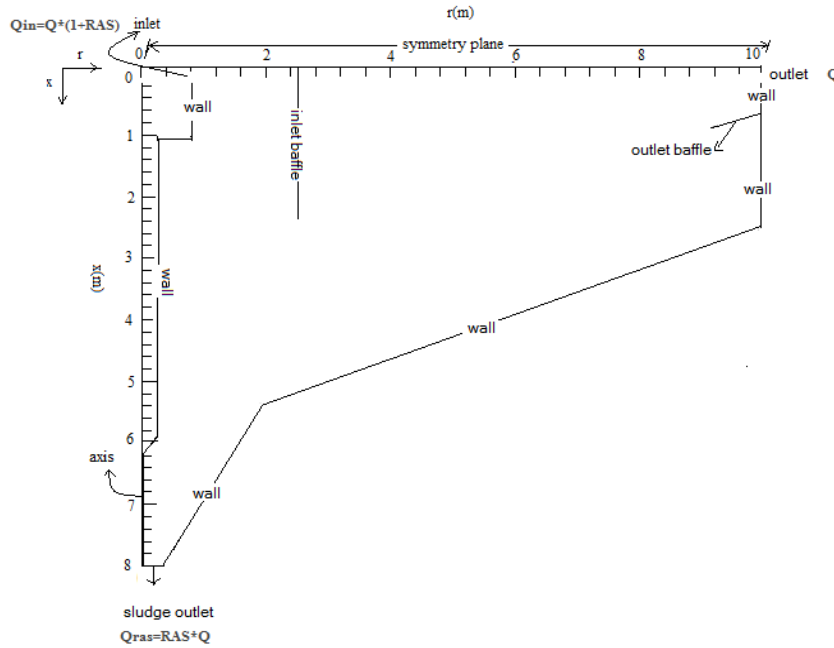
مقدمه

تانک‌های ته نشینی نهایی که در واحدهای تصفیه فاضلاب به دنبال راکتورهای هوازی قرار می‌گیرند، یک جزء اصلی از فرآیند تصفیه لجن فعال را تشکیل می‌دهند. در این تانک‌ها جداسازی سیال تصفیه شده از لجن فعال، به واسطه ته‌نشینی تحت تاثیر نیروی ثقل صورت می‌گیرد. از آنجا که این تانک‌ها تقریباً یک چهارم هزینه سرمایه‌گذاری کل واحد تصفیه پساب را تشکیل می‌دهند، بنابراین ارزیابی عملکرد آنها از اهمیت بسزایی برخوردار است [1]. مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی می‌توانند برای کلاریفایرهای ثانویه به منظور شبیه‌سازی هیدرودینامیک سیال مورد استفاده قرار گیرند. بخصوص در ۳۰ سال اخیر، پیشرفت‌های قابل توجهی در دینامیک سیالات محاسباتی (Computational Fluid Dynamics) (CFD) صورت گرفته که امکان ارائه میدان‌های سرعت و غلظت را به صورت چند بعدی فراهم می‌کند. نخستین مطالعه بر روی کلاریفایرهای نهایی بر مبنای اصول CFD، توسط لارسن صورت گرفت [2]. وی شبیه‌سازی عددی دو بعدی را برای کلاریفایر ثانویه در شرایط آب و یا غلظت جامدات خیلی کم به طوری که بتوان تاثیر جامدات را در میدان جریان ناچیز شمرد، انجام داد. شامبر و لارک، از مدل k-ε برای شرایط آب تمیز استفاده کردند [3] و آدامز و رودی به منظور تکمیل کار آنها، اثرات شناوری را به مدل مذکور اضافه کردند [4]. همچنین لین و همکارانش تاثیر لخته‌سازی را روی کلاریفایرهای نهایی و میدان جریان مورد بحث قرار دادند [5]. در سال‌های گذشته، مدلسازی تانک‌های ته‌نشینی به پیشرفت‌های قابل توجهی رسیده است. 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 ته‌نشینی که تابعی از غلظت جامدات معلق است، به حساب آورده می‌شود.
- کلاریفایرها با جریان‌های آشفته سروکار دارند. بنابراین برای اینکه مدلسازی کلاریفایر به نحو مطلوبی انجام گیرد، بایستی از مدل‌های آشفستگی مناسب استفاده کرد که عمومی‌ترین آنها علی‌رغم معایب شناخته شده‌اش، مدل k-ε می‌باشد. از آنجا که با افزایش غلظت سیال ویسکوزیته نیز زیاد می‌شود، محققانی همچون لکهال و همکارانش [3]، دی‌کلرک [6] و ویز و همکارانش [7]، زیرمدل‌هایی برای در نظر گرفتن این رفتار غیر نیوتنی لجن ارائه دادند. در این مقاله سعی شده تا ضمن ارائه تعدادی از مدل‌های غیرنیوتنی ارائه شده، به مقایسه آنها با هم پرداخته شود. کلاریفایر دایروی شیدار مورد بررسی در این مقاله همان کلاریفایر بکار رفته در کار دی‌کلرک می‌باشد و از داده‌های تجربی ارائه شده توسط وی برای ارزیابی اعتبار مدل استفاده شده است.

مدلسازی

مشخصات هندسی کلاریفایر مورد نظر به همراه شرایط مرزی که در ادامه توضیح داده می‌شود، در شکل (۱) آورده شده است. در شکل (۱)، Q_{in} دبی سیال ورودی به تانک، Q دبی جریان سرریز خروجی، و RAS نسبت جریان لجن فعال بازگشتی را نشان می‌دهد.



شکل ۱ هندسه کلاریفایر ثانویه استوانه‌ای شیبدار

معادلات حاکم. به منظور مدل‌سازی ریاضی فرآیند از (۳)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(up) + \frac{\partial}{\partial y}(vup) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rup) \\ & = \frac{\partial}{\partial y}[\rho v_{\text{eff}} \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \rho v_{\text{eff}} \left(\frac{\partial u}{\partial r}\right) \right] \\ & - \frac{\partial P}{\partial r} - \frac{\rho u}{r^2} \end{aligned}$$

معادله پیوستگی با رابطه (۱) و معادلات مومتم در راستای محور و شعاع به ترتیب با روابط (۲) و (۳) بیان می‌شوند. این معادلات در ترم‌های متغیرهای متوسط جریان ارائه شده‌اند، که u و v به ترتیب سرعت‌های متوسط جریان در راستای شعاع و محور می‌باشند. همچنین t زمان، P فشار، ρ دانسیته مخلوط، g ثابت شتاب گرانشی، v_{eff} ویسکوزیته موثر (مجموع ویسکوزیته آشفته و ویسکوزیته مولکولی) می‌باشد. در این معادلات دانسیته مخلوط سیال به صورت تابعی از غلظت لجن می‌باشد که از رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

معادلات بقاء مومتم و جرم کمک گرفته می‌شود. در این جا از تغییرات دمایی و همچنین فرآیند لخته سازی که منجر به اندازه مختلف ذرات در کلاریفایرها خواهد شد، صرف‌نظر شده است. همچنین گرچه در نزدیکی ورودی کلاریفایر اثرات سه بعدی حاکم است، برای سادگی کار از مدل‌سازی دو بعدی استفاده شده است. معادلات ناویر استوکس برای جریان دو بعدی، متقارن محوری، ناپایا، دانسیته لایه‌ای و آشفته در زیر ارائه شده است.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial r} + \frac{\rho u}{r} = 0 \quad (1)$$

(۲)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(vp) + \frac{\partial}{\partial y}(vvp) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rvvp) \\ & = \frac{\partial}{\partial y}[\rho v_{\text{eff}} \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \rho v_{\text{eff}} \left(\frac{\partial v}{\partial r}\right) \right] \\ & - \frac{\partial P}{\partial y} - \rho g \end{aligned}$$

استاندارد بوده است. در این مدل ویسکوزیته آشفته به عنوان تابعی از انرژی جنبشی آشفته‌گی، k و نرخ اتلاف آن، ε ، در نظر گرفته می‌شود (معادله ۶). معادلات مرتبط در زیر ارائه شده اند.

$$v = c \frac{k^2}{\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\mu}{r} \frac{\partial}{\partial r}(k \rho r)} \quad (6)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x}(rvk\rho) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}[r\rho(v + \frac{v_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial r}] + \frac{\partial}{\partial x}[\rho(v + \frac{v_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x}] + P_s + G - \rho\varepsilon; \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\varepsilon\rho r) + \frac{\partial}{\partial y}(v\varepsilon\rho) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}[r\rho(v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial r}] + \frac{\partial}{\partial x}[\rho(v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x}] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}; \quad (8)$$

$$P_s = \mu_1 [2(\frac{\partial u}{\partial x})^2 + 2(\frac{\partial v}{\partial r})^2 + 2(\frac{v}{r})^2 + (\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial y})^2] \quad (9)$$

$$G = - \left| \beta g \frac{v_t}{\sigma_t} \frac{\partial \rho}{\partial x} \right| \quad (10)$$

که در آن P_s ، تولید انرژی جنبشی آشفته‌گی در نتیجه گرادیان متوسط سرعتی است که بواسطه برش ایجاد می‌گردد و G ، متناظر با تولید انرژی جنبشی آشفته‌گی بواسطه شناوری است و σ_k ، σ_ε ، C_1 و C_2 ثوابت تجربی هستند که به صورت زیر در نظر گرفته شده‌اند.

$$C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, \sigma_\varepsilon = 1.3, \sigma_k = 1.0$$

شرایط مرزی. شرط تقارن محوری برای سطح آزاد

$$\rho = \rho_f + C(1 - S_s^{-1}) \quad (4)$$

که در آن C غلظت ذرات جامد و S_s چگالی مخصوص ذرات جامد می‌باشد که مقدار $1/45$ برای آن انتخاب شده است [6]. همچنین ρ_f دانسیته آب می‌باشد. عبارت آخر در معادله (۲) اثرات شناوری را روی میدان جریان وارد می‌کند به طوری که میدان جریان و غلظت به واسطه این عبارت به هم کویل می‌شوند. معادله انتقال ذرات به صورت رابطه (۵) ارائه می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial \psi}(\phi\rho\psi) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho}(\rho v \phi \rho) = \frac{\partial}{\partial \psi} [\frac{v_{eff}}{\sigma_{\psi\phi}} (\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial \psi}) - \rho\phi\sigma_{\psi\phi}] + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} [\frac{\rho v_{eff}}{\sigma_{\rho\phi}} (\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial \rho})]; \quad (5)$$

که در آن ϕ کسر جرمی جامدات را بیان می‌کند، بطوری که غلظت جامدات حاصلضرب دانسیته در کسر جرمی جامدات می‌باشد. عدد اشمیت، σ_s ، توصیف‌کننده انتقال آشفته جامدات است که محققان مختلف معمولاً مقداری بین 0.5 و 1 را برای آن در نظر می‌گیرند؛ در اینجا با مقدار 1 برای هر دو راستای شعاعی و محوری نتایج قابل قبولی بدست آمد. همچنین v_s تابع سرعت ته نشینی ذره است که تابعیتی از غلظت ذرات جامد دارد و در ادامه مورد بحث قرار خواهد گرفت. در معادله (۵)، v_{eff} ویسکوزیته موثر است که به صورت مجموع ویسکوزیته مولکولی و آشفته در نظر گرفته می‌شود.

در تانک‌های ته نشینی با وجود سرعت‌های کم موجود در تانک، به دلیل ابعاد بزرگ با آشفته‌گی مواجه هستیم. بنابراین علاوه بر معادلات ارائه شده نیاز به مدلسازی آشفته‌گی نیز داریم. راه‌های مختلفی به منظور در نظر گرفتن آشفته‌گی ارائه شده است. تاکنون عمومی‌ترین و معتبرترین مدل آشفته‌گی مدل $k-\varepsilon$

تاکاس و همکاران با در نظر گرفتن دو نکته فوق، مدلی را ارائه کردند که اثرات برهم کنش ذرات و تجمع ذرات با سرعت سقوط بالا را در کف تانک، یعنی نواحی با غلظت بالا، در بر می‌گرفت. این مدل به صورت معادله‌ای دارای دو تابع نمایی رابطه (۱۲) ارائه شد [8]:

$$V_s = V_0[\exp(-r_h(C - C_{min})) - \exp(-r_p(C - C_{min}))] \quad (12)$$

که در معادله فوق V_0 حداکثر سرعت ته‌نشینی ذره (سرعت ته‌نشینی ذره در آب تمیز) است که از قانون استوکس بدست می‌آید و C_{min} غلظت جامدات غیر قابل ته‌نشینی، r_p پارامتر مشخص کننده ناحیه ته‌نشینی مجزا و r_h پارامتر مشخص کننده ناحیه ته‌نشینی بازداشته می‌باشد. پارامترهای معادله (۱۲) برای لجن مورد استفاده در این مقاله در جدول (۱) ارائه شده‌اند [8].

جدول ۱ پارامترهای معادله سرعت ته‌نشینی [8]

V[m/hr]	r_h [1/g]	r_p [1/g]	C_{min} [g/l]
۱۹/۸۸	۰/۲۶	۳/۸۹	۰/۰۱۴

رئولوژی لجن فعال. رئولوژی لجن تغییر شکل جسم تحت تاثیر استرس را توصیف می‌کند. محققان بسیاری به بررسی مدل‌های سیال غیر نیوتنی در لجن فعال پرداخته‌اند و غلظت را به عنوان مهمترین پارامتر در محاسبه ویسکوزیته لجن معرفی کردند. در عین حال بیان داشتند که این پارامتر به تنهایی کافی نیست. بنابراین پارامترهای دیگری نیز بررسی شد ولی در نهایت استفاده از غلظت جامدات عملی‌ترین و ساده‌ترین راه جهت محاسبه ویسکوزیته جریان لجن می‌

بکار گرفته شده است که به معنی در نظر گرفتن مقدار صفر برای مؤلفه سرعت عمودی و گرادیان سرعت افقی می‌باشد. قابل ذکر است که در نتیجه بکارگیری این شرط، از اثرات باد و موج‌های سطحی بر میدان جریان چشم‌پوشی می‌شود. در شرط مرزی ورودی، معمولاً یک جریان ورودی یکدست در نظر گرفته می‌شود که در آن سرعت افقی ورودی به بزرگی u_{in} و پروفایل غلظت C_0 برقرار است. انرژی جنبشی آشفته‌گی برابر ۱۰٪ مربع سرعت ورودی در نظر گرفته می‌شود و نرخ اتلاف نیز از معادله (۱۱) محاسبه می‌گردد.

$$\varepsilon = \frac{c^{3/4} k^{3/2}}{\mu} \quad (11)$$

مقادیر در خروجی با درونیابی از قلمرو محاسباتی، بدست می‌آیند. دیواره‌ها نیز به عنوان شرط مرزی غیر قابل نفوذ عمل می‌کنند و شرط عدم لغزش برای سرعت و گرادیان غلظت صفر در دیواره‌ها بکار گرفته می‌شود. توابع استاندارد دیواره نیز برای مدل‌سازی آشفته‌گی بکار گرفته می‌شوند.

سرعت ته‌نشینی ذرات. به منظور ایجاد یک مدل مناسب برای سرعت ته‌نشینی بایستی دو واقعیت مهم را در نظر داشت:

- ذرات با سرعت سقوط زیاد، در نواحی با غلظت بالا، یعنی نزدیک کف تانک وجود دارند و ذرات با سرعت سقوط پایین‌تر، نواحی با غلظت کم یعنی در نزدیکی سطح تانک را اشغال می‌کنند.
- غلظت زیاد ذرات، برهم کنش بین آنها را افزایش می‌دهد و سبب کاهش سرعت ته‌نشینی ذرات می‌گردد.

ترتیب $9.71 \times 10^{-4} \text{ kg/m.s}^2$ و $0.98 \text{ m}^3/\text{kg}$ می‌باشند. مدل هرشل بالکلی (مدل شبه پلاستیک) نیز از جمله مدل‌هایی است که در تعیین ویسکوزیته لجن فعال بکار گرفته شده است. دی‌کلرک، مدل هرشل بالکلی اصلاح شده را به صورت زیر معرفی کرد [6]:

$$\mu_p = \frac{\tau_{HB}}{\dot{\gamma}} (1 - e^{-m\dot{\gamma}}) + \mu_{HB} \dot{\gamma}^{n-1} \quad (18)$$

در معادله (18)، τ_{HB} و μ_{HB} تنش تسلیم و ویسکوزیته هرشل بالکلی می‌باشند که به ترتیب در معادلات (19 و 20) آمده‌اند.

$$\tau_{HB} = \beta_1 C^{\beta_2} \quad (19)$$

$$\mu_{HB} = \mu_w + c_{pl} C^2 \quad (20)$$

که در آن β_1 و β_2 به ترتیب $9.0364 \times 10^{-4} \text{ kg/m.s}^2$ و $1.12 \text{ m}^3/\text{kg}$ ، $m=169.47$ ، $n=0.7748$ و $c_{pl}=2.49338 \text{ e-4 m}^5/(\text{kg.S}^2)$ ثابت‌های معادله هستند. مهمترین ویژگی کار دی‌کلرک این بود که نشان داد که با استفاده از این مدل در نرخ‌های برش کم، تنش تسلیم ظاهر نخواهد شد و این مدل می‌تواند به خوبی برای لجن‌های فعال درون تانک‌های ته‌نشینی بکار گرفته شود.

یکی دیگر از مدل‌هایی که جهت جریان لجن فعال بکار گرفته می‌شود، مدل کازن می‌باشد. ارتباط بین تنش برشی و نرخ برش در نرخ‌های برش کمتر از 50 s^{-1} از مدل کازن پیروی می‌کند. معادله کازن برای ویسکوزیته لجن به صورت رابطه (21) نوشته می‌شود به طوری که K_1 پارامتر تنش تسلیم کازن و K_2 پارامتر ویسکوزیته کازن می‌باشد. آزمایشات رئولوژی ویز و همکارانش نشان داد که K_1 مطابق معادله (22) به

یکی از مدل‌هایی که به صورت متداول به عنوان مدل رئولوژیکی لجن فعال استفاده می‌شود مدل بوکیل می‌باشد. در این مدل ویسکوزیته ظاهری به صورت توانی به غلظت جامدات وابسته است. بوکیل معادله (13) را پیشنهاد کرد. قابل ذکر است که معادله فوق برای غلظت جامدات بالای 0.7 g/l می‌باشد. از این نظر، لکهال و همکارانش به صورت خطی این معادله را به ویسکوزیته آب در غلظت جامدات صفر برون‌یابی کردند. برون‌یابی ارائه شده توسط لکهال و همکارانش در معادله (14) ارائه شده است [3].

$$\frac{\tau}{\dot{\gamma}} = 0.00327 \times 10^{0.132C} \quad (13)$$

$$\mu = 0.001 + (0.003045/0.7) \times C \quad (14)$$

که در این معادلات $\dot{\gamma}$ نرخ برشی و τ تنش برش می‌باشد. مدل بینگهام نیز از جمله مدل‌هایی است که توسط محققانی همچون لکهال و همکارانش بکار گرفته شده است. در این مدل تنش برشی سیال به صورت معادله (15) نوشته می‌شود:

$$\tau = \tau_B + \mu_B \dot{\gamma} \quad (15)$$

در این رابطه، τ_B تنش تسلیم بینگهام و μ_B ویسکوزیته بینگهام است که به ترتیب با معادلات (16 و 17) محاسبه می‌شوند.

$$\mu_B = \mu_w + c_{pl} C^2 \quad (16)$$

$$\tau_B = \beta_1 \cdot \exp(\beta_2 C) \quad (17)$$

در معادله (16)، $c_{pl}=2.437 \times 10^{-4} \text{ m}^5/\text{kg.s}^2$ یک ثابت می‌باشد و μ_w ویسکوزیته آب تمیز است. در معادله (17)، β_1 و β_2 ثابت‌هایی هستند که به طبیعت لجن وابسته‌اند. با توجه به کار لکهال، این ثابت‌ها به

روش حل. معادلات حاکم در مسئله مورد نظر به منظور یافتن مؤلفه‌های سرعت و غلظت بر روی یک شبکه جابجا شده به روش حجم محدود حل شده‌اند. از طرح کوئیک (Quick) به دلیل دقت بالاتر در مسائل با سایز مش بزرگتر و پایداری بیشتر در مسائل جریان دانسیته (Density current) برای منفصل سازی ترم-های جابجایی استفاده شده است. الگوریتم PISO به منظور اجتناب از واگرایی‌های عددی برای کوپل کردن (Coupling) معادلات سرعت- فشار بکار گرفته شده است. همچنین برای رسیدن به همگرایی از ضرایب ترمیم متناسب بهره گرفته شده است. معیار همگرایی در اینجا ۴-۱۰ می‌باشد. به منظور جلوگیری از واگرایی، در ابتدای حل گام زمانی را از مرتبه ۳-۱۰ در نظر گرفته و با پیشرفت حل افزایش داده می‌شود. همچنین حل اولیه ابتدا با تانک حاوی سیال تمیز انجام می‌گیرد. به دلیل حضور دیواره‌های ناموازی در هندسه تانک، جهت سادگی از مش بندی غیر منظم مثلثی استفاده شد که در شکل (۲) نشان داده شده است.

صورت مربعی به غلظت وابسته است [7].

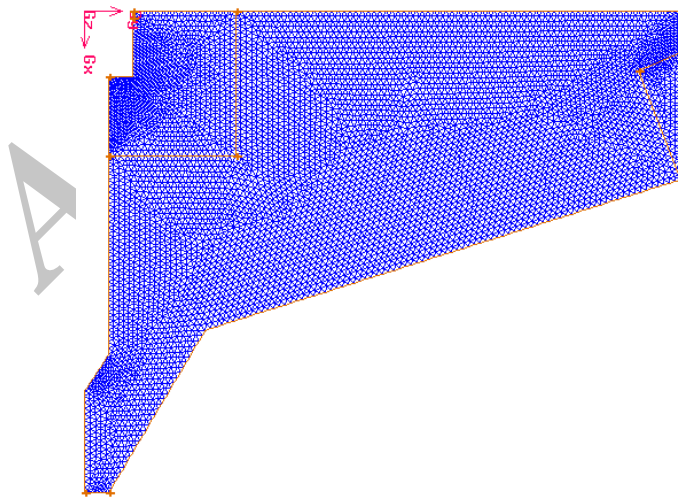
$$\mu_p = \left(\frac{K_1}{\gamma^{1/2}} + K_2 \right)^2 \quad (21)$$

$$K_1 = AC^2 + BC \quad (22)$$

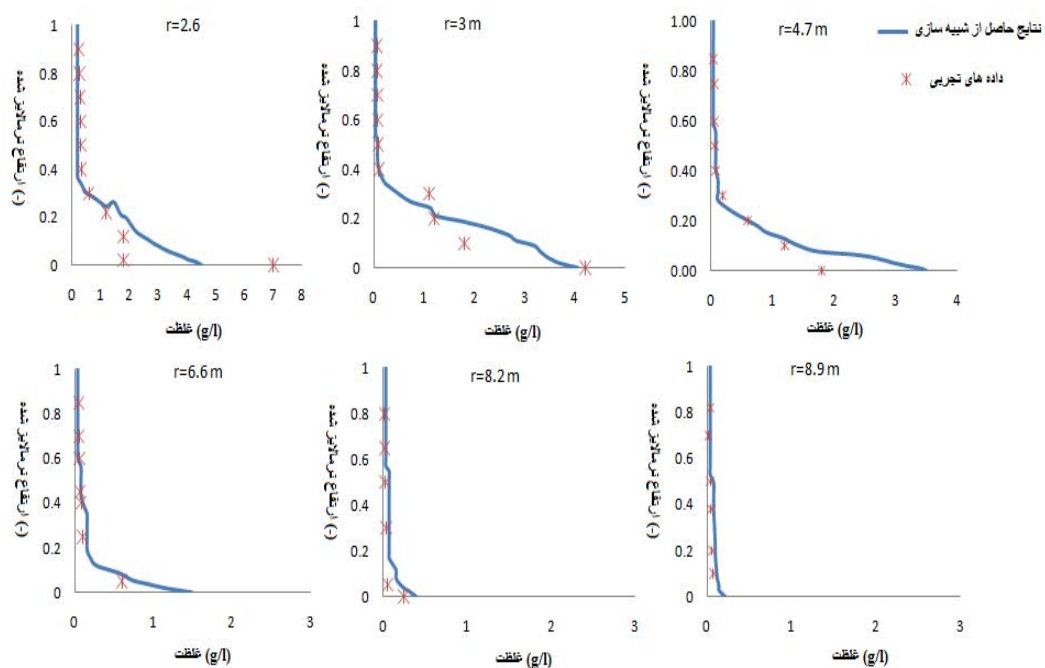
در معادله (۲۲)، $A=0.00319m^{11/2}kg^{-3/2}s^{-1}$ و $B=0.0146 m^{5/2}kg^{-1/2}s^{-1}$ ویز و همکارانش، فرض می‌شود که برای $C \geq C^*=2$ K_2 مستقل از غلظت است و برابر با مقدار متوسط $K_{2,ave}=0.0436 kg^{1/2}m^{-1/2}s^{-1/2}$ می‌باشد. برای اینکه ویسکوزیته آب وقتی که غلظت به صفر میل می‌کند به دست آید، فرض شده است که K_2 در بازه $0 \leq C < C^*$ طبق معادله (۲۳) به صورت خطی با غلظت تغییر می‌کند [7]:

$$K_2 = \mu^{1/2} + \left(\frac{K_{2,ave} - \mu^{1/2}}{C^*} \right) C \quad (23)$$

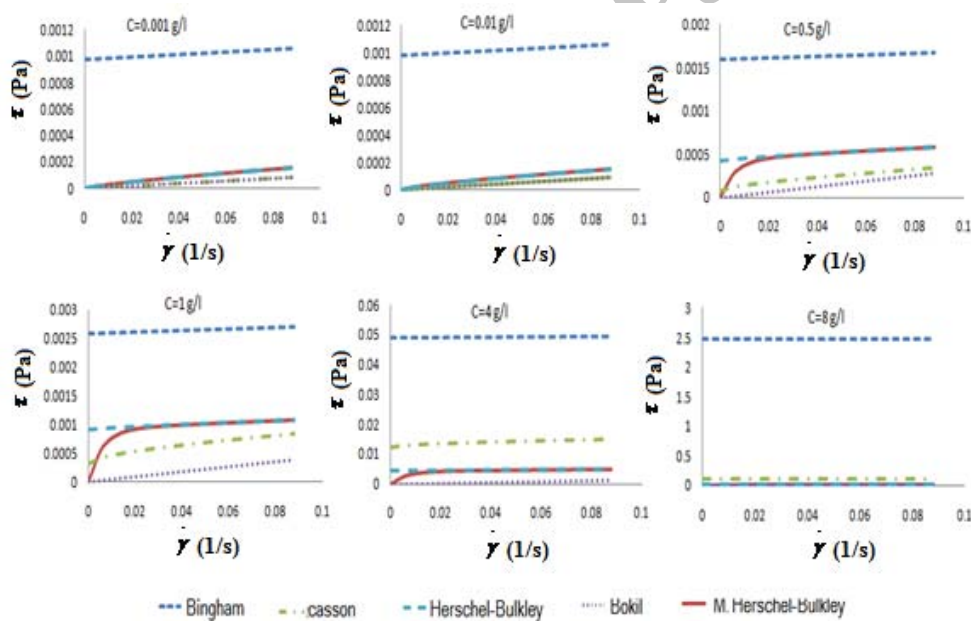
در این مقاله مدل‌های ویسکوزیته ثابت، بوکیل، هرشل بالکلی اصلاح شده، کازن و بینگهام مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.



شکل ۲ هندسه مش بندی شده تانک ته نشینی



شکل ۳ مقایسه داده‌های تجربی با نتایج شبیه سازی



شکل ۴ نمودارهای تنش برشی بر حسب نرخ برش در غلظت‌های مختلف برای مدل‌های غیر نیوتنی مختلف

بعد از بررسی اندازه‌های مختلف سلول‌ها و تایید عدم وابستگی حل به مش‌بندی که به منظور خلاصه محاسباتی ۱۵۰۰۰ انتخاب شد. قابل ذکر است که در تعداد سلول‌های

هرشل بالکلی یک تنش تسلیم را ارائه می دهد. در بین این مدل ها، مدل بوکیل کمترین تنش برشی را در همه غلظت ها ارائه می دهد.

بعد از مقایسه انجام شده، نتایج شبیه سازی جهت مقایسه عملکرد تانک در مدل های رئولوژیکی مختلف در شکل های (۶ و ۵) ارائه شده اند. با توجه به شکل (۵) سیال بینگهام و کازن ارتفاع های توده لجن را در شعاع های مختلف تانک به صورت قابل توجهی بیشتر از حد واقعی ارائه می دهند. این رفتار را می توان بدین صورت توجیه کرد که مدل بینگهام همانطور که از شکل (۴) پیداست تنش های برشی بالاتری را نسبت به سایر مدل ها می دهد. بنابراین تخمین فراتر از حد واقعی ارتفاع لجن توسط این مدل می تواند به واسطه ویسکوزیته بالایی باشد که ارائه می دهد.

ارتفاع لجن در روی سطح شیب دار کف تانک هم به نیروهای ویسکوز و هم به نیروی ثقلی وابسته است. باید توجه داشت که افزایش غلظت هم نیروهای ویسکوز و هم نیروی ثقلی را افزایش می دهد که در صورت بکارگیری مدل بینگهام افزایش نیروهای ویسکوز خیلی بیشتر از نیروی ثقلی است؛ همین امر سبب حرکت کندتر سیال بینگهام روی سطح شیب دار می شود که از پروفایل سرعت افقی ارائه شده در شکل (۶) نیز مشهود است؛ حرکت کندتر سیال به معنی تجمع بیشتر لجن در کف و افزایش ارتفاع لجن می باشد. در مورد مدل کازن روند تغییر تقریباً با مدل بینگهام یکی است. این مدل همچون مدل بینگهام دارای تنش تسلیم می باشد و در غلظت های رو به بالا تنش های برشی بالاتری می دهد (شکل ۴). با توجه به شکل (۵) این مدل نیز نمی تواند در تعیین توزیع مناسب غلظت درون تانک مفید واقع شود. همچنین با توجه به شکل (۶) سیال کازن همچون بینگهام در کف تانک سرعت های کمتری را ارائه می دهد.

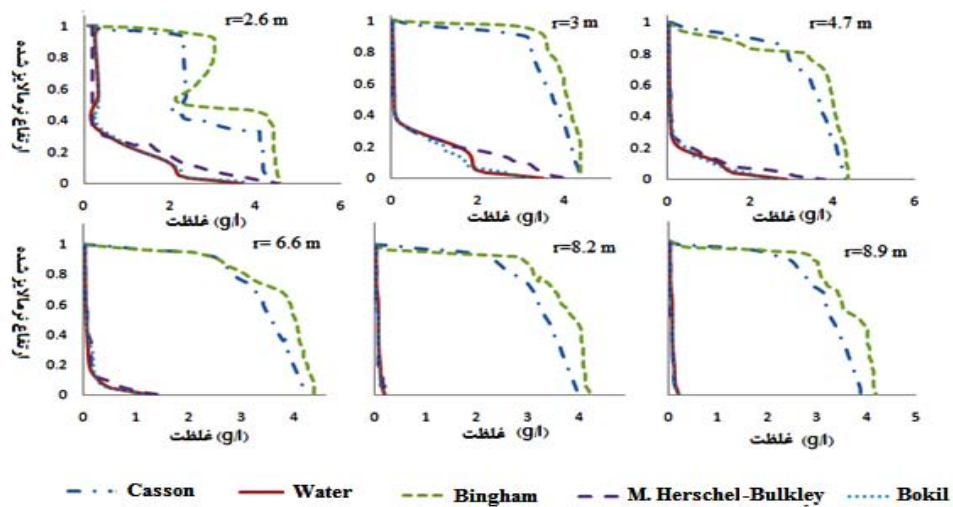
تمامی محاسبات، دبی سیال ورودی $0.191 \text{ m}^3/\text{s}$ و نسبت جریان برگشتی، RAS، 0.41 و غلظت سیال ورودی 2 g/l در نظر گرفته شده است.

نتایج و بحث

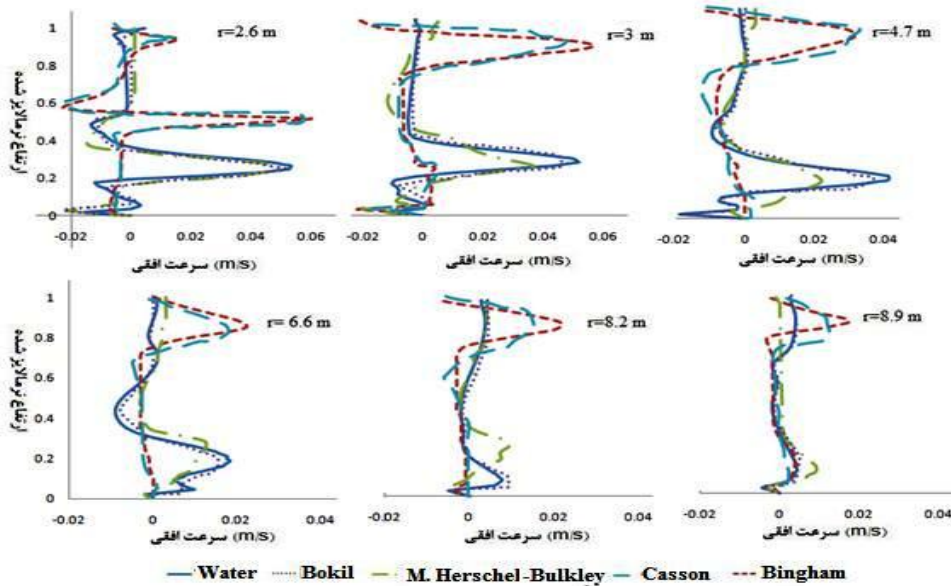
نتایج حاصل از شبیه سازی برای توزیع غلظت در شکل (۳) ارائه شده است. در این شکل، نتایج با داده های تجربی ارائه شده در پژوهش دی کلرک، مورد مقایسه قرار گرفته است. ارتفاع نرمال شده، نسبت ارتفاع نقطه مورد بررسی به ارتفاع کل تانک در شعاع مورد نظر می باشد. انحراف مشاهده شده در کف تانک را می توان ناشی از عدم مدلسازی مناسب تراکم لجن در این ناحیه دانست. در این مطالعه از وجود اسکرابر یا لجن روب در کف تانک صرف نظر شده است که آن نیز می تواند منبعی برای خطای ایجاد شده باشد.

به منظور تعیین اثر مدل های رئولوژیکی مختلف روی عملکرد تانک ته نشینی، شبیه سازی های CFD مختلفی با بکارگیری مدل های مختلف ویسکوزیته انجام شد. قبل از مقایسه عملکرد تانک در مدل های رئولوژیکی مختلف، ابتدا نمودار تنش برشی در مقابل نرخ برشی برای غلظت های مختلف لجن رسم شده است تا مقایسه این مدل ها امکان پذیر باشد (شکل ۴).

شکل (۴) نشان می دهد که مدل بینگهام بیشترین تنش برشی را در غلظت های ارائه شده داراست. تفاوت بین مدل هرشل بالکلی استاندارد و اصلاح شده را در شکل مشاهده می نمایید. مدل هرشل اصلاح شده هیچ تنش تسلیمی را نمی دهد؛ که این بواسطه ترم نمایی است که به تنش تسلیم اضافه شده است. همچنین رفتار مدل کازن در مقابل تغییرات غلظت نیز به گونه ایی است که با افزایش غلظت تنش برشی افزایش می یابد. این مدل نیز مانند مدل بینگهام و مدل



شکل ۵ پروفایل توزیع غلظت در مدل‌های مختلف نیوتنی و غیر نیوتنی



شکل ۶ پروفایل سرعت افقی در مدل‌های مختلف نیوتنی و غیر نیوتنی

(ویسکوزیته آب) و مدل بوکیل که هر دو بدون هیچ تنش تسلیمی هستند منجر به ارتفاع توده لجن پایین می‌شوند؛ این در حالی است که مدل بینگهام تنش تسلیم بالایی را ارائه می‌دهد. همچنین در مورد مدل

برای حالت آب، غلظت‌های بالاتر فقط نیروی ثقل را بیشتر می‌کنند؛ چون ویسکوزیته در این حالت ثابت است. نتیجتاً سرعت در این حالت افزایش می‌یابد. همانطور که مشاهده می‌کنید مدل ویسکوزیته ثابت

اصلاح شده و بوکیل مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج نشان داد که به علت وجود تنش تسلیم در مدل‌های کازن و بینگهام، ویسکوزیته بیش از حد معقول محاسبه می‌شود که سبب پیش‌بینی بیش از حد ارتفاع لجن فعال می‌گردد.

در محدوده‌هایی که غلظت سیال کم است با نرخ-های پرشی کمتری مواجه هستیم و مدل غیرنیوتنی مناسب‌تری بتواند تنش تسلیم مناسبی را در این نواحی ارائه دهد؛ در غیر اینصورت ویسکوزیته پیش‌بینی شده فراتر از حد واقعی خواهد بود. در مدل هرشل بالکلی اصلاح شده با اضافه نمودن یک تابع نمایشی به تنش تسلیم موجود در رابطه هرشل بالکلی استاندارد، در واقع تنش تسلیم در نواحی غلظت پایین، کاهش می‌یابد. لذا به نظر می‌رسد که مدل هرشل بالکلی استاندارد صحیح‌ترین مدل جهت پیش‌بینی جریان لجن فعال در تانک‌ها نشینی ثانویه باشد. از طرفی مدل بوکیل نیز نتایج خوبی را ارائه کرده است. با توجه به ساده‌تر بودن این مدل و اینکه تعداد پارامترهای کمتری را لازم دارد، استفاده از این مدل بیشتر از سایر مدل‌ها توصیه می‌شود.

فهرست علائم

غلظت (kg/m^3)	C
ثوابت تجربی در معادله آشفستگی	$\sigma_\varepsilon, \sigma_k, C_\mu, C_2$ و C_1
شتاب گرانش (m/s^2)	g_a
انرژی جنبشی آشفستگی (m^2/s^2)	K_a
ثوابت مدل هرشل بالکلی	n, m
فشار ترمودینامیکی مه‌های فشار	P_y
هیدرواستاتیک در چگالی مرجع (kg/ms^2)	P_s
تولید انرژی جنبشی به واسطه	

هرشل بالکلی اصلاح شده، باید گفت که این مدل همانطور که گفته شد فاقد تنش تسلیم است؛ بنابراین برخلاف مدل‌های بینگهام و کازن در غلظت‌های کم ویسکوزیته در آن زیاد نیست و این سبب می‌شود که ارتفاع کمتری را پیش‌بینی کند. همچنین به دلیل اینکه اثر رئولوژی را بر حرکت سیال به حساب می‌آورد، نتایج مناسبی ارائه می‌دهد و به نظر می‌رسد که صحیح‌ترین مدل جهت پیش‌بینی جریان لجن فعال در تانک‌ها نشینی حاضر باشد. در کل می‌توان بیان کرد که انتخاب مدل رئولوژیکی مناسب بسته به مشخصات لجن دارد و در حالی که مثلاً در غیاب مواد منعقدکننده نیروی وزنی کمتر است مدل‌های نیوتنی جواب‌های بهتری ارائه می‌دهند. چون در این حالت اگر از مدل‌های غیرنیوتنی و دارای تنش تسلیم استفاده شود به دلیل افزایش ویسکوزیته لجن با غلظت و کم بودن نیروی ثقل، ارتفاع لجن به صورت غیر واقعی افزایش می‌یابد. حالتی که در این مقاله نیز با آن مواجه هستیم.

جمع بندی

در این مقاله، جریان لجن فعال در یک تانک‌ها نشینی دایروی شبیدار مورد استفاده در تصفیه فاضلاب، به صورت عددی حل و بررسی شد. ابتدا حل عددی با داده‌های تجربی ارائه شده توسط دی‌کلرک مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج بجز در نواحی نزدیک کف تانک، توافق خوبی با داده‌های تجربی ارائه داد. این اختلاف را می‌توان ناشی از عدم مدل‌سازی مناسب تراکم لجن در کف تانک و یا عدم در نظر گرفتن لجن روبر دانست.

با توجه به نظر اکثر محققان، لجن فعال موجود در تانک‌های ته‌نشینی ثانویه ماهیتی غیر نیوتنی دارند. لذا در این مقاله چهار مدل بینگهام، کازن، هرشل بالکلی

سرعت ته نشینی (m/s)	v_s	برش (kg/ms^3)	
نرخ اتلاف انرژی جنبشی (m^2/s^3)	ε	مؤلفه سرعت در جهت محور (m/s)	u
ویسکوزیته موثر (m^2/s)	ν_{eff}	مؤلفه سرعت در جهت شعاع (m/s)	v
چگالی توده (kg/m^3)	ρ	تنش برشی (kg/ms^2)	τ
عدد اشمیت	σ_s	ویسکوزیته مولکولی (kg/ms)	μ
کسر حجمی	ϕ	نرخ برشی (1/s)	γ

مراجع

1. D. Brennan, "The numerical simulation of tow-phase flow in settling tank", PhD dissertation, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London, (2001).
2. S. Zhou, W.L. Bevis, M. Echo Leong, H.S. Kan, S.K. Lp, and T.K. Li, "Optimized Center-feed clarifier design for the Tai Po Sewage Treatment Works, Hong Kong", Water and Environment Journal, vol. 24, pp. 140-146, (2010).
3. D. Lakehal, P. Krebs, J. Krijgsman, W. Rodi, "Computing shear flow and sludge blanket in secondary clarifiers", Journal of Hydraulic Engineering, vol. 125(3), pp. 253-262, (1999).
4. E. W. Adams, and W. Rodi, "Modeling flow and mixing in sedimentation tanks", Journal of Hydraulic Engineering, vol. 116(7), pp. 895-913, (1990).
5. D. A. Lyn, A. Stamou, and W. Rodi, "Density currents and shear-induced flocculation in sedimentation tanks", Journal of Hydraulic Engineering, vol. 118, pp. 849-867, (1992).
6. B. De Celercq, "Computational Fluid Dynamics of settling tanks: Developments of experiments and rheological, settling, and scraper sub-models", PhD Thesis, The University of Gent, pp. 324, (2003).
7. M. Weiss, B. Plósz, K. Essemiani, and J. Meinhold, "Suction-lift sludge removal and non-Newtonian flow behaviour in circular secondary clarifiers: Numerical modeling and measurements", J. Chem. Eng., vol. 132, pp. 241-255, (2007).
8. I. Taka'cs, G. G. Patry, and D. Nolasco, "A dynamic model of the clarification-thickening process" Water Res., vol. 25(10), pp. 1263-1271, (1991).