

شبیه سازی CFD انتقال نیوماتیک ذرات پرلیمر و محاسبه سرعت ته نشینی آنها

امین حسنونند، سید حسن هاشم آبادی*⁺

تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی، آزمایشگاه تحقیقاتی دینامیک سیالات محاسباتی

چکیده: در این پژوهش سرعت ته نشینی ذرات پرلیمر هنگام انتقال نیوماتیک با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به دست آمده است. شبیه سازی با استفاده از دیدگاه اولرین - لاگرانژین انجام شده است. برای حل عددی معادله های حاکم بر سامانه انتقال نیوماتیک در حالت پایا از روش حجم محدود برای فاز پیوسته و روش رانگ کوتا مرتبه پنجم برای فاز ناپیوسته استفاده شده است. مقایسه نتیجه های به دست آمده از شبیه سازی با رابطه تجربی موجود برای محاسبه افت فشار در خطوط انتقال نیوماتیک نشان می دهد که سرعت ته نشینی پیش بینی شده توسط شبیه سازی CFD به طور متوسط ۱۷٫۶ درصد نسبت به رابطه تجربی خطا دارد. تأثیر افزایش سرعت ظاهری گاز بر افت فشار و همچنین تأثیر در نظر گرفتن توزیع اندازه ذره ها بر سرعت ته نشینی مطالعه شده است. نتیجه های به دست آمده از شبیه سازی CFD نشان می دهد که با در نظر گرفتن توزیع اندازه ذره ها، سرعت ته نشینی و افت فشار خط انتقال افزایش می یابد.

واژه های کلیدی: انتقال نیوماتیک، شبیه سازی CFD، اولرین لاگرانژین، جریان های گاز جامد، ته نشینی.

KEY WORDS: Pneumatic conveying, CFD, Euler/Lagrange approach, Gas solid flow, Saltation velocity.

مقدمه

یکی از محدودیت ها در طراحی خطوط انتقال نیوماتیک، ته نشینی پودر ضمن انتقال می باشد. طراحی غلط خطوط انتقال می تواند در سرعت های بالای گاز باعث ایجاد خوردگی مکانیکی شدید ناشی از برخورد ذره ها به دیواره شود و بر عکس سرعت کم گاز حامل می تواند باعث ته نشینی بار و در نتیجه بسته شدن خط انتقال شود. بنابراین همیشه یک مهندس طراح به دنبال انجام یک پیش بینی به نسبت دقیق از این دو حد بحرانی در طراحی می باشد. هر چند می توان به صورت به نسبت محدودی رابطه های تجربی برای موارد خاص خطوط انتقال پیدا کرد ولی همیشه

جابه جایی ذره های جامد به وسیله یک گاز حامل را انتقال نیوماتیک می نامند. از انتقال نیوماتیک در بسیاری از صنایع همچون صنایع نفت، پتروشیمی، کشاورزی و ... استفاده می شود. در صنایع پتروشیمی برای تولید پلی اتیلن به طور معمول از انتقال نیوماتیک برای حمل کاتالیست یا پرلیمر به راکتور بستر سیال استفاده می شود. همچنین با استفاده از این روش پلیمر تولید شده در راکتور بستر سیال را به سیلوها منتقل می کنند. یکی از مشکلاتی که به طور معمول در طراحی خطوط انتقال نیوماتیک پرلیمر وجود دارد ته نشینی ذره ها هنگام انتقال نیوماتیک می باشد [۱].

*عهده دار مکاتبات

+E-mail: hashemabadi@iust.ac.ir

با توجه به کارهای انجام شده در زمینه شبیه‌سازی CFD، انتقال نیوماتیک دیدگاه اولرین - لاگرانژین دیدگاه مناسب برای شبیه‌سازی خط انتقال نیوماتیک می‌باشد [۷ - ۵].

یکی از مباحث مهم در شبیه‌سازی جریان‌های گاز - جامد، با استفاده از دیدگاه اولرین - لاگرانژین مدل‌سازی برخورد ذره با دیوارهای موجود در فضای شبیه‌سازی است. توجه نکردن به این مهم می‌تواند خطای زیادی را در شبیه‌سازی این نوع جریان‌ها وارد کند. با توجه به کارهای انجام شده در زمینه مدل‌سازی برخورد ذره با دیواره می‌توان دو مکانیسم گوناگون برای مدل‌سازی برخورد ذره با دیواره در نظر گرفت [۹، ۸]:

۱- برخورد لغزشی^(۱): در این نوع برخورد ذره‌ها جامد بعد از برخورد با دیواره اندکی روی دیواره می‌لغزند و سپس دیواره را ترک می‌کنند.

۲- برخورد غیرلغزشی^(۲): در این نوع برخورد ذرات جامد بعد از برخورد با دیواره بدون هیچ‌گونه لغزشی، دیواره را ترک می‌کنند. هدف از این پژوهش تعیین سرعت ته‌نشینی خط انتقال نیوماتیک با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی می‌باشد. به منظور تعیین سرعت ته‌نشینی باید برهمکنش بین ذره‌ها و دیواره به‌طور دقیق لحاظ شود. بنابراین در این پژوهش این جمله‌های برهمکنش در نظر گرفته شده است.

شبیه‌سازی CFD انتقال نیوماتیک پودر پر پلیمر در فرایند تولید پلی اتیلن

ساختار هندسی مورد استفاده شبیه سازی

در این شبیه‌سازی لوله‌ای به قطر ۵ سانتی متر به طول ۴ متر برای انتقال پودر و محاسبه سرعت ته‌نشینی در نظر گرفته شده است. برای مش زدن خط انتقال نیوماتیک از مش منظم^(۳) استفاده شده است. از آنجایی که در نزدیکی دیواره و ابتدای لوله تغییرهای سرعت زیاد می‌باشد در این منطقه‌ها از مش ریزتر استفاده شده است (شکل ۱).

توزیع اندازه ذرات

در جدول ۱ توزیع اندازه ذره‌های پرپلیمر آمده است. در این جدول درصد وزنی ذره‌هایی نشان داده شده است که اندازه آنها کمتر از اندازه داده شده می‌باشد. برای تعریف این توزیع اندازه ذره‌ها

میزان تأثیر عامل‌های گوناگونی مانند ویژگی‌های فیزیکی و سرعت گاز، ساختار هندسی خط انتقال و همچنین اتصالات داخل خط و تغییر جهت جریان، جنس، اندازه و نسبت بار جامد به هوا و بسیاری دیگر از عامل‌های مؤثر برای مهندس طراح نامشخص باقی می‌ماند. در این مطالعه سعی شده است به‌صورت خیلی مختصر توانمندی فنون CFD و میزان دقت آنها در طراحی خطوط انتقال نیوماتیک نشان داده شود.

در هنگام انتقال نیوماتیک بر هر ذره جامد نیروهای درگ، گرانث و شناوری وارد می‌شود. در انتقال نیوماتیک افقی جهت نیروی گرانث عمود بر جهت جریان می‌باشد. در این حالت بین نیروی گرانث از یک طرف و نیروهای شناوری و درگ از طرف دیگر رقابتی برای ته‌نشینی ذره‌ها جامد وجود دارد. اگر نیروی گرانث بر دو نیروی دیگر غلبه کند ذره‌ها ته‌نشین می‌شوند و در غیر این‌صورت ذره‌ها توسط جریان حمل می‌شوند. از آنجا که نیروی شناوری در هر سیال مقدار ثابتی می‌باشد پس تنها راه برای جلوگیری از ته‌نشینی شدن ذره‌ها، افزایش نیروی درگ می‌باشد برای افزایش نیروی درگ باید سرعت گاز (سیال حامل) را افزایش داد. با افزایش سرعت فاز گاز از سرعت‌های کم (در این سرعت‌ها نیروی گرانث حاکم می‌باشد) به سرعتی می‌رسیم که در آن نیروهای درگ، گرانث و شناوری در حالت تعادل قرار می‌گیرند این سرعت فاز گاز را سرعت ته‌نشینی می‌نامند. در سرعت‌های کمتر از سرعت ته‌نشینی نیروی گرانث بر نیروهای درگ و شناوری غلبه می‌کند و ذرات ته‌نشین می‌شوند [۲].

برای به‌دست آوردن سرعت ته‌نشینی می‌توان از فنون CFD استفاده کرد. در ضمن افت فشار بر واحد طول خط انتقال به ازای سرعت ته‌نشینی کمینه می‌باشد [۳]، بنابراین برای به‌دست آوردن این سرعت در یک شدت جریان مشخص جامد، باید افت فشار بر واحد طول خط انتقال را در سرعت‌های گوناگون گاز به‌دست آورد. برای شبیه‌سازی CFD سامانه‌های گاز - جامد دو دیدگاه کلی وجود دارد: دیدگاه اولرین - اولرین و دیدگاه اولرین - لاگرانژین. معیار انتخاب هر یک از این دو دیدگاه درصد جرمی فاز ثانویه می‌باشد. اگر درصد جرمی فاز ثانویه کم باشد (کمتر از ۱۰٪) از دیدگاه اولرین - لاگرانژین و اگر درصد جرمی فاز ثانویه زیاد باشد (بیشتر از ۱۰٪) از دیدگاه اولرین - اولرین استفاده می‌شود. در ادامه هر دو دیدگاه مورد بررسی قرار می‌گیرد [۴].

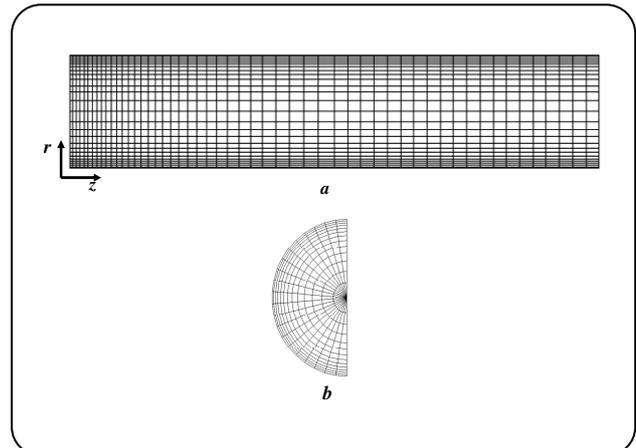
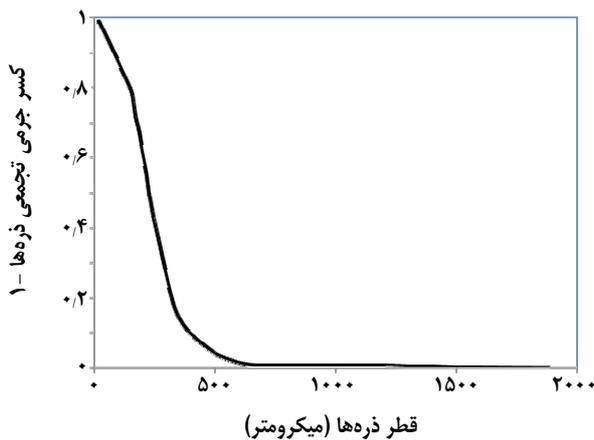
(۱) Sliding collision

(۳) Structure

(۲) Non sliding collision

جدول ۱- توزیع اندازه ذره‌های پرپلیمر (میکرومتر).

اندازه ذرات (μm)	درصد جرمی تجمعی	اندازه ذرات (μm)	درصد جرمی تجمعی	اندازه ذرات (μm)	درصد جرمی تجمعی
۱۸۸۰	۱۰۰	۶۳۲	۹۸٫۷	۲۲۹	۵۰٫۲
۱۶۶۰	۹۹٫۷	۵۸۸	۹۸٫۱	۲۱۳	۴۴
۱۵۱۲	۹۹٫۶	۵۴۷	۹۷٫۲	۱۹۸	۳۸٫۳
۱۴۰۶	۹۹٫۴	۵۰۸	۹۶	۱۸۴	۳۳٫۱
۱۳۰۷	۹۹٫۳	۴۷۳	۹۴٫۴	۱۷۱	۲۸٫۴
۱۲۱۶	۹۹٫۲	۴۴۰	۹۲٫۶	۱۵۹	۲۴٫۲
۱۱۳۱	۹۹٫۲	۴۰۹	۹۰٫۸	۱۴۸	۲۰٫۴
۱۰۵۱	۹۹٫۱	۳۸۰	۸۸٫۸	۲۴	۱٫۷
۱۰۰۰	۹۹٫۱	۳۵۴	۸۶	۲۰٫۸	۱٫۳
۹۰۹	۹۹٫۱	۳۲۹	۸۱٫۶	۱۹٫۳	۱٫۱
۸۴۵	۹۹٫۱	۲۸۴	۶۹٫۸		
۷۸۶	۹۹٫۱	۲۶۴	۶۳٫۳		
۶۸۰	۹۹	۲۵۰	۵۸٫۲		



شکل ۱- هندسه خط انتقال نیوماتیک پودر، a: شبکه تولیدی برای طول خط انتقال، b: شبکه تولیدی برای نصف سطح مقطع.

شکل ۲- توزیع اندازه ذره‌های پودر پر پلیمر در فرایند تولید پلی اتیلن.

مقدار Y_d برابر 0.368 شود برای به دست آوردن n از معادله زیر استفاده می‌شود.

$$n = \frac{\ln(-\ln Y_d)}{\ln(d/\bar{d})} \quad (2)$$

برای هر Y_d و d در جدول ۱ مقدار n محاسبه شده است، میانگین این مقادارها نشان می‌دهد که n برابر 1.894 می‌باشد. شکل ۲ توزیع ذره‌های به دست آمده توسط این دیدگاه را نشان می‌دهد.

از روش روزین - راملر استفاده شده است. در روش روزین - راملر از تابعی به فرم شکل (۱) برای برازش نقاط استفاده می‌شود [۱۰]:

$$Y_d = e^{-\left(\frac{d}{\bar{d}}\right)^n} \quad (1)$$

در معادله (۱) Y_d نشان دهنده کسر وزنی از ذره‌ها می‌باشد که اندازه آنها از d کوچکتر می‌باشد. \bar{d} نشان دهنده قطر متوسط ذره‌ها می‌باشد. برای به دست آوردن \bar{d} در معادله (۱) به جای d ، \bar{d} قرار می‌دهیم. یعنی قطر متوسط قطری است که در آن

پنج ثابت مربوط به مدل از کارهای تجربی به دست آمده است و به صورت زیر گزارش شده است [۱۱].

$$\sigma_\varepsilon = 1/3, \sigma_k = 1/0, C_\mu = 0/9, C_{r\varepsilon} = 1/92, C_{1\varepsilon} = 1/44$$

در نتیجه حل معادله‌های (۵) و (۶) مقدار انرژی جنبشی k و تلفات انرژی ε مشخص می‌شود که با استفاده از آنها می‌توان ویسکوزیته مربوط به جریان درهم را به صورت زیر محاسبه کرد.

$$\mu_t = \rho_f C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

برای شبیه‌سازی فاز ناپیوسته^(۲) قانون دوم نیوتن بر روی هر ذره اعمال می‌شود:

$$m_p \frac{dV_p}{dt} = F_t \quad (8)$$

در معادله بالا F_t نشان‌دهنده برآیند نیروهای وارد بر هر ذره می‌باشد. این جمله شامل نیروی درگ F_D ، نیروهای شناوری F_G و نیروی جرم مجازی F_A می‌باشد [۶]:

$$F_A = -\frac{1}{12} \pi d_p^3 \rho_f \frac{du_p}{dt} \quad (9)$$

$$F_D = \frac{1}{\lambda} \pi d_p^2 \rho_f C_D |u_R| u_R \quad (10)$$

$$C_D = \frac{24}{Re_p} (1 + 0/15 Re_p^{0.687}) \quad (11)$$

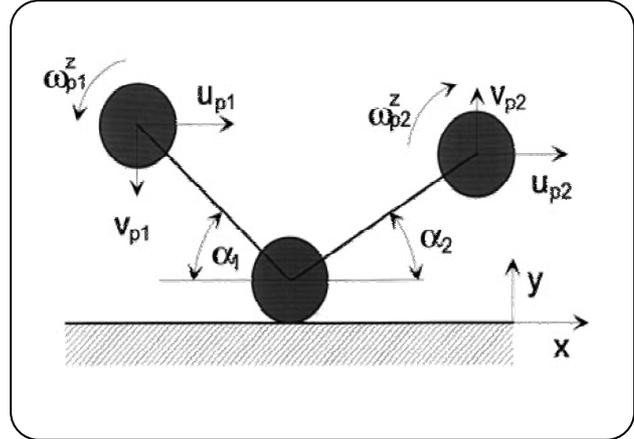
$$Re_p = \frac{\rho_p d_p |u - V_p|}{\mu}$$

$$F_G = g \frac{(\rho_p - \rho_f)}{\rho_p} \quad (12)$$

ملاک تشخیص اینکه کدام یک از مکانیسم‌های برخورد ذره با دیواره حاکم است معادله زیر می‌باشد [۱۲]:

$$|u_{R1}| \geq \frac{Y}{\mu} (1+e) v_{p1} \quad (13)$$

اگر معادله بالا برقرار باشد مکانیسم برخورد لغزشی می‌باشد و در غیر این صورت مکانیسم برخورد غیر لغزشی می‌باشد. در رابطه بالا اندیس ۱ نشان‌دهنده مولفه سرعت قبل از برخورد می‌باشد و e ضریب بازگشتی (نسبت مولفه سرعت نرمال ذره بعد از برخورد به مولفه سرعت نرمال ذره قبل از برخورد) می‌باشد. μ_0 و v_{p1}



شکل ۳- نحوه برخورد ذره جامد با دیواره در حالت دوبعدی.

فرمولاسیون مسئله

در این دیدگاه گاز به عنوان فاز پیوسته و جامد به عنوان فاز پراکنده در نظر گرفته می‌شود. از آنجایی که در انتقال نیوماتیک به طور معمول رژیم جریان درهم می‌باشد معادله‌های پیوستگی و مومنتم برای فاز پیوسته به ترتیب عبارتند از:

$$\nabla \cdot (\rho_f u) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{D\rho_f u}{Dt} = -\nabla P - \nabla \cdot (\tau^v + \tau^t) + S_{ui}$$

$$\tau^v = -\mu (\nabla u + \nabla u^T) \quad (4)$$

$$\tau^t = -\mu_t (\nabla u + \nabla u^T)$$

جمله S_{ui} در معادله (۴) جمله چشمه^(۱) مومنتم می‌باشد این جمله تأثیر حضور ذره‌ها بر روی مومنتم فاز پیوسته را نشان می‌دهد. در این پژوهش برای شبیه‌سازی جریان درهم و محاسبه ادی ویسکوزیته μ_t از مدل استاندارد $k-\varepsilon$ استفاده شده است [۱۱]. مدل استاندارد $k-\varepsilon$ مدلی نیمه تجربی می‌باشد این مدل شامل دو معادله یکی برای انرژی جنبشی k و دیگری برای تلفات انرژی ε می‌باشد:

$$\rho_f \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho_f \varepsilon - Y_M \quad (5)$$

$$\rho_f \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \quad (6)$$

$$C_{r\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{rk} G_b) - C_r \rho_f \frac{\varepsilon}{k}$$

(۱) Particle source term

(۲) Dispersed phase

$$\omega_{P_r}^x = -\frac{2u_{P_r}}{D_p} \quad (28)$$

شرایط مرزی مسئله

در ورودی سرعت جریان فاز گاز به داخل لوله پروفیل سرعت توسعه یافته به‌عنوان شرط مرزی در نظر گرفته شده است. این پروفیل به‌صورت زیر می‌باشد:

$$u = \frac{6}{49} u_{avg} \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/7} \quad (29)$$

در معادله بالا u_{avg} ، R و u به ترتیب سرعت متوسط فاز گاز، شعاع لوله و سرعت فاز گاز در شعاع‌های گوناگون می‌باشند. در خروجی فاز گاز شرط مرزی فشار ثابت وارد شده است. برای شرط مرزی برخورد ذره با دیواره از مدل گفته شده استفاده شده است. برای کم کردن حجم محاسبه به دلیل وجود تقارن فقط نصف میدان جریان حل می‌شود و در وسط لوله از شرط مرزی تقارن استفاده می‌شود. به این معنی که تغییرهای کلیه متغیرهای موجود روی سطح تقارن برابر صفر است.

در این پژوهش برای حل عددی معادلات حاکم بر فاز پیوسته روش حجم محدود به کار گرفته شده است. در این روش جمله‌های نفوذ معادلات بقای حاکم به روش اختلاف مرکزی^(۱) و جمله‌های جابه‌جایی به روش طرح اختلاف بالادست^(۲) جدا شدند. سپس برای حل همزمان معادلات سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل^(۳) استفاده شده است [۱۳]. معادله حاکم بر فاز ناپیوسته یک معادله دیفرانسیل معمولی می‌باشد که برای حل آنها از روش رانگ کوتا مرتبه پنجم استفاده شده است [۱۴].

الگوریتم کلی حل معادله‌ها به‌صورت زیر می‌باشد:

- ۱- ابتدا معادله‌های حاکم بر فاز گاز بدون در نظر گرفتن جمله چشمه مربوط به ذره‌های جامد حل می‌شوند.
- ۲- تعداد زیادی از ذره‌ها در میدان جریان ره‌گیری شده و سپس میانگین جمله چشمه در معادله حرکت فاز پیوسته محاسبه می‌شود.
- ۳- دوباره میدان جریان با در نظر گرفتن جمله چشمه محاسبه می‌شود.
- ۴- مراحل دوم و سوم را آنقدر تکرار می‌شوند تا معادله‌ها همگرا شوند.

به ترتیب ضریب اصطکاک سکون و سرعت نرمال ذره قبل از برخورد می‌باشد. در معادله بالا u_{R_1} از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$u_{R_1} = \sqrt{\left(u_{P_1} + \frac{D_p}{\gamma} \omega_{P_1}^x\right)^2 + \left(W_{P_1} - \frac{D_p}{\gamma} \omega_{P_1}^x\right)^2} \quad (14)$$

در معادله (۱۴) u_{P_1} ، W_{P_1} ، $\omega_{P_1}^x$ ، $\omega_{P_1}^z$ و D_p به ترتیب سرعت ذره در راستای محور x ، سرعت ذره در راستای محور z ، سرعت زاویه‌ای ذره حول محور x و قطر ذره می‌باشند. شکل ۳ شیوهی برخورد ذره جامد با دیواره در حالت دوبعدی را نشان می‌دهد.

برای به‌دست آوردن مولفه‌های سرعت ذره بعد از برخورد با دیواره در حالت برخورد لغزشی از معادله‌های زیر استفاده می‌شود [۹]:

$$u_{P_r} = u_{P_1} + \mu_d \varepsilon_x (1+e) v_{P_1} \quad (15)$$

$$v_{P_r} = -e v_{P_1} \quad (16)$$

$$W_{P_r} = W_{P_1} + \mu_d \varepsilon_z (1+e) v_{P_1} \quad (17)$$

$$\omega_{P_r}^x = \omega_{P_1}^x - \delta \mu_d \varepsilon_z (1+e) \frac{v_{P_1}}{D_p} \quad (18)$$

$$\omega_{P_r}^y = \omega_{P_1}^y \quad (19)$$

$$\omega_{P_r}^z = \omega_{P_1}^z + \delta \mu_d \varepsilon_x (1+e) \frac{v_{P_1}}{D_p} \quad (20)$$

$$\varepsilon_x = \left(u_{P_1} + \frac{D_p}{\gamma} \omega_{P_1}^x\right) / u_{R_1} \quad (21)$$

$$\varepsilon_z = \left(W_{P_1} - \frac{D_p}{\gamma} \omega_{P_1}^x\right) / u_{R_1} \quad (22)$$

برای به‌دست آوردن مولفه‌های سرعت ذره بعد از برخورد با دیواره در حالت برخورد غیرلغزشی از معادله‌های زیر استفاده می‌شود:

$$u_{P_r} = \frac{\delta}{\gamma} \left(u_{P_1} - \frac{D_p}{\delta} \omega_{P_1}^x\right) \quad (23)$$

$$v_{P_r} = -e v_{P_1} \quad (24)$$

$$W_{P_r} = \frac{\delta}{\gamma} \left(W_{P_1} + \frac{D_p}{\delta} \omega_{P_1}^x\right) \quad (25)$$

$$\omega_{P_r}^x = \frac{\gamma W_{P_r}}{D_p} \quad (26)$$

$$\omega_{P_r}^y = \omega_{P_1}^y \quad (27)$$

(۱) Central difference

(۲) First order upwind

(۳) Simple

جدول ۱- مقایسه نتیجه‌های به دست آمده از CFD و رابطه تجربی.

درصد خطا	افت فشار CFD (Pa/m)	افت فشار رابطه تجربی (Pa/m)	سرعت (m/s)
۵۷٫۸	۵۷	۹۰	۸
۲۱٫۴	۴۷	۵۷٫۱	۱۰
۱۵٫۹	۴۴	۵۱	۱۲
۱۱٫۴	۵۱٫۱	۵۷	۱۴
۷٫۶	۶۳٫۴	۶۸٫۲	۱۶
۵٫۱	۷۷٫۱	۸۱٫۱	۱۸
۳٫۷	۹۲٫۴	۵۹٫۹	۲۰
۱۷٫۶	خطای متوسط		

بنابراین نتیجه‌های به دست آمده از شبیه‌سازی CFD به رابطه تجربی نزدیک می‌شود. در کل شبیه‌سازی CFD دارای ۱۷٫۶ درصد خطا می‌باشد که خطایی قابل قبول است.

تحلیل نتیجه‌ها

یکی از نکته‌های مهم در مورد به‌دست آوردن سرعت ته‌شینی، سرعت ذرات جامد در هنگام ورود به فضای محاسباتی می‌باشد. اگر سرعت ذرات در هنگام ورود به دامنه محاسباتی کم فرض شود (در حدود یک متر بر ثانیه) در ابتدای لوله بخش زیادی از انرژی سیال صرف شتاب‌دهی به ذره‌ها می‌شود و افت فشار در ناحیه ورودی لوله بسیار بیشتر از انتهای لوله می‌باشد. شکل ۴ افت فشار لوله در سرعت پایین ذره‌های عددی را نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل پیداست در ابتدای لوله افت فشار بسیار بیشتر از انتهای لوله می‌باشد و جریان به توسعه یافتگی نرسیده است. در این پژوهش برای رفع این مشکل سرعت ورودی ذره‌های جامد در ورودی برابر سرعت فاز گاز در نظر گرفته شده است (ذره‌های جامد با گاز در حال تعادل می‌باشند). با این فرض در ابتدای لوله انرژی سیال صرف شتاب‌دهی ذره‌ها نمی‌شود و افت فشار به‌دست آمده از شبیه‌سازی CFD، افت فشار جریان توسعه یافته می‌باشد و می‌توان از معادله (۳۰) برای اثبات درستی حل استفاده کرد. شکل ۵ افت فشار خط انتقال نیوماتیک برای وقتی که سرعت ذره‌ها برابر سرعت گاز باشد را نشان می‌دهد همانطور که از این شکل پیداست جریان به توسعه یافتگی رسیده است. شکل ۶ تغییرهای فشار در طول لوله به ازای مقادیرهای گوناگون

معتبرسازی شبیه‌سازی CFD

برای اثبات درستی شبیه‌سازی CFD از رابطه تجربی زیر استفاده شده است [۱۵]:

$$\frac{\Delta P}{L} = \quad (30)$$

$$\rho g \left(\frac{\lambda}{\gamma} Fr^2 + 0.000927 \mu_d^{0.24} Fr_p^{0.82} \gamma^{0.2} \frac{1}{Fr^{0.73}} \right)$$

برای به‌دست آوردن سرعت ته‌نشینی یک ذره از معادله‌های زیر استفاده می‌شود [۲]:

$$u_s = \frac{d_p^2 (\rho_p - \rho) g}{18 \mu} \quad Re_p < 2 \quad (31)$$

$$u_s^{1/4} = 0.72 \frac{d_p^{1/6} (\rho_p - \rho)}{\rho^{1/4} \mu^{1/6}} \quad 2 < Re_p < 500 \quad (32)$$

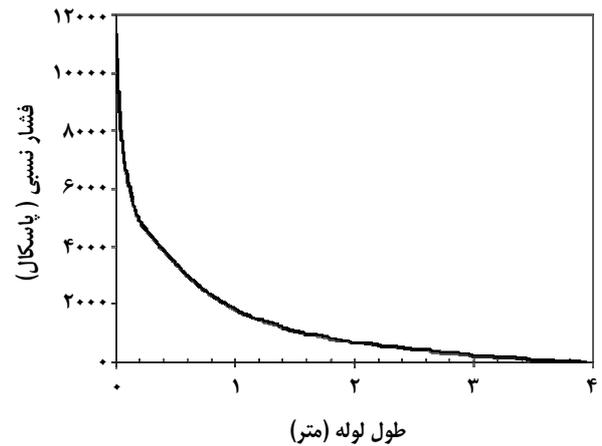
$$u_s^2 = 3.03 \frac{d_p (\rho_p - \rho) g}{\rho} \quad 500 < Re_p < 10^5 \quad (33)$$

برای به‌دست آوردن سرعت ته‌نشینی برای یک ذره ابتدا فرض می‌شود که معادله (۳۱) برقرار باشد با استفاده از این فرض مقدار u_s محاسبه می‌شود سپس بر اساس آن Re_p محاسبه می‌شود. اگر Re_p در بازه معادله (۳۱) باشد که فرض درست است وگرنه از معادله (۳۲) یا (۳۳) استفاده می‌شود. برای ذره پرپلیمر با اندازه متوسط ۲۵۷ میکرومتر مقدار u_s برابر ۰٫۷۷۷ متر بر ثانیه می‌باشد. از آنجایی که معادله (۳۰) برای ذرات هم‌اندازه ارایه شده و تأثیر توزیع اندازه ذرات بر روی افت فشار در نظر گرفته نمی‌شود، حل عددی یک‌بار برای اندازه متوسط ذره‌ها انجام شده و نتیجه به دست آمده با مقدار به‌دست آمده از معادله (۳۰) مقایسه شده است. وقتی که از درستی حل اطمینان حاصل شد آنگاه شبیه‌سازی برای توزیع اندازه ذرات به‌دست آمده برای ذرات پرپلیمر، معادله (۱)، انجام شده است. در جدول ۲ نتیجه‌های به دست آمده از شبیه‌سازی CFD با معادله تجربی (۳۰) مقایسه شده است، همانطور که از این جدول پیداست با کاهش سرعت اختلاف بین شبیه‌سازی CFD و رابطه تجربی افزایش می‌یابد. افزایش اختلاف به این دلیل است که در شبیه‌سازی CFD برهمکنش بین ذره‌ها در نظر گرفته نمی‌شود. در سرعت‌های پایین گاز، شدت جریان حجمی گاز پایین است بنابراین در خط انتقال نیوماتیک غلظت جامد بالاست و بر همکنش ذره‌ها نقش اساسی را اعمال می‌کند. با افزایش سرعت گاز غلظت جامد در جریان کاهش می‌یابد

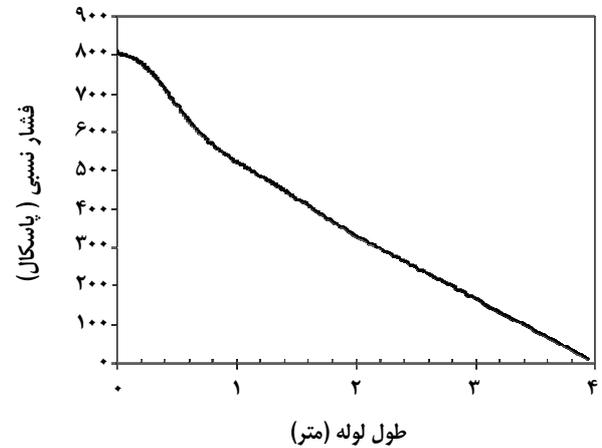
سرعت ظاهری گاز برای حالت بدون ذره‌های جامد را نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل پیداست افت فشار در طول لوله خطی است، همچنین با افزایش سرعت افت فشار افزایش می‌یابد. و این روند تغییرات فشار به طور کامل منطبق بر افت فشار به دست آمده از رابطه ضریب اصطکاک می‌باشد [۱۶].

$$\Delta P = \frac{4fL}{D} \left(\frac{\rho \bar{u}^2}{8} \right) \quad (34)$$

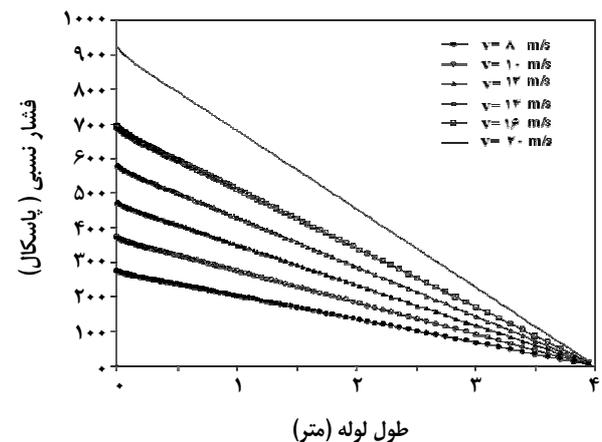
که در این رابطه f ضریب اصطکاک می‌باشد میزان افت فشار به دست آمده با استفاده از شبیه‌سازی (CFD) و معادله (۳۴) خطای کمتر از ۱٫۵٪ را نشان می‌دهد. شکل ۷ مقایسه بین تغییرات سرعت نسبت به شعاع در فاصله ۲ متری از ورودی لوله در حالت‌های با جامد و بدون جامد در سرعت ظاهری گاز (۲۰ m/s) را نشان می‌دهد همانطور که در این شکل پیداست در حالت با جامد نقطه بیشینه سرعت از مرکز لوله به سمت راست جابه‌جا می‌شود. این انتقال نقطه بیشینه به خاطر این است که ذره‌های جامد تمایل به ته نشین شدن دارند و به سمت پایین لوله منتقل می‌شوند بنابراین در این قسمت تبادل مومنتم بین دو فاز زیاد می‌باشد و سرعت فاز گاز کم می‌شود از طرفی باید معادله پیوستگی ارضاء شود از این رو سرعت در بالای لوله افزایش می‌یابد. در شکل ۸ تغییرات افت فشار در واحد طول لوله به ازای مقدارهای گوناگون سرعت ظاهری گاز به دست آمده از شبیه‌سازی و رابطه تجربی/وچسی [۱۰] برای پودر با اندازه متوسط ۲۵۷ میکرومتر نشان داده شده است. سرعت ته‌نشینی سرعتی است که خط انتقال دارای کمترین افت فشار می‌باشد و سرعت بهینه در طراحی خطوط انتقال نیوماتیک اندکی بالاتر از این سرعت می‌باشد. با توجه به این توضیحات، مقدار سرعت ته‌نشینی به تقریب برابر ۱۲ m/s می‌باشد. مطابق شکل ۸ مدل CFD توانسته است مقدار سرعت ته‌نشینی را با دقت خوبی مطابق با رابطه تجربی پیش‌بینی کند، اما مقدار افت فشار به ازای واحد طول به دست آمده از شبیه‌سازی به ازای سرعت ته‌نشینی به تقریب ۱۷٫۶٪ خطا نشان می‌دهد. علت این خطا نیز به خاطر لحاظ نشدن برهم کنش بین ذره‌ای در مدل‌سازی و همینطور خطاهای عددی موجود می‌باشد. شکل ۸ همچنین نشان می‌دهد که نتیجه‌های به دست آمده از شبیه‌سازی CFD با افزایش سرعت به رابطه تجربی نزدیک می‌شوند که این به خاطر کاهش اثر بر همکنش ذره‌ها بر هیدرودینامیک انتقال نیوماتیک می‌باشد. بنابراین می‌توان از شبیه‌سازی CFD برای به دست آوردن سرعت ته‌نشینی در توزیع اندازه ذرات گفته شده



شکل ۴- افت فشار خط انتقال نیوماتیک در سرعت پایین ذره‌های عددی.



شکل ۵- افت فشار خط انتقال نیوماتیک برای وقتی که سرعت ذره‌ها برابر سرعت گاز باشد.

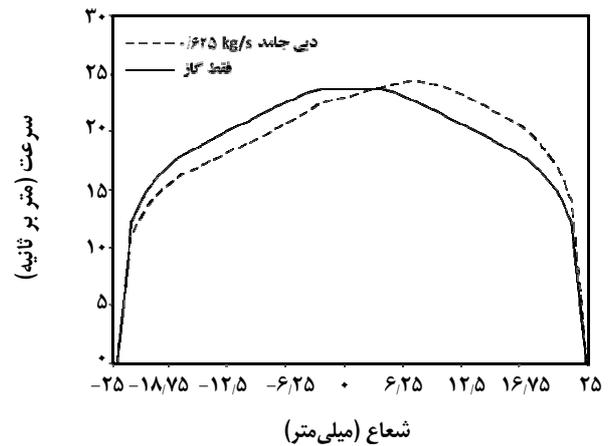


شکل ۶- تغییرات افت فشار در واحد طول نسبت به تغییرات سرعت ظاهری فاز گاز برای حالت بدون جامد.

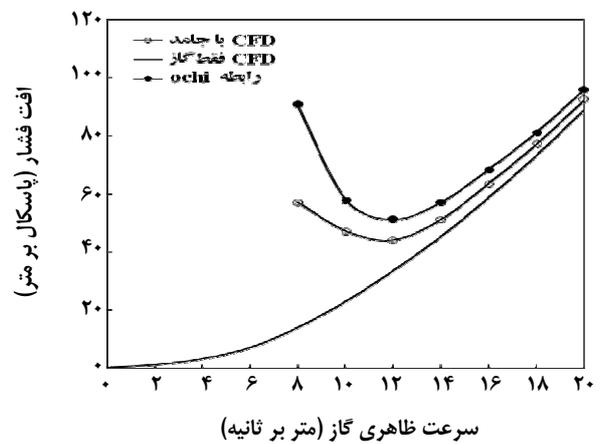
استفاده کرد. شکل ۹ نمودار افت فشار بر واحد طول خط انتقال نسبت به سرعت فاز گاز برای توزیع اندازه ذره‌های پرپلیمر (معادله (۱)) را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل ۹ پیداست با اعمال توزیع اندازه ذره‌ها سرعت ته نشینی به 14 m/s افزایش می‌یابد. دلیل افزایش سرعت ته نشینی این است که تأثیر نیروی درگ اعمال شده بر ذره‌های درشت بیشتر از ذره‌های ریز می‌باشد یا به عبارتی ذره‌های درشت بیشتر انرژی جریان را می‌گیرند و باعث افزایش افت فشار می‌شوند. با توجه به این نتیجه‌ها می‌توان گفت که توزیع اندازه ذره‌ها نقش مهمی در تعیین سرعت ته نشینی در فرایند انتقال داراست.

نتیجه‌گیری

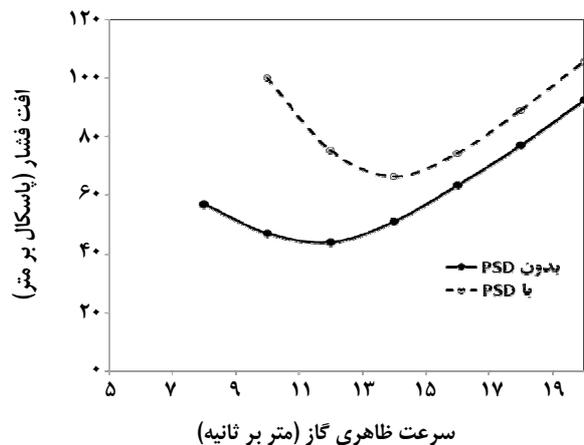
در این پژوهش شبیه‌سازی CFD خط انتقال نیوماتیک افقی پرپلیمر به قطر 0.0508 متر، طول 4 متر و شدت جریان پرپلیمر 0.625 kg/s با استفاده از دیدگاه اولرین - لاگرانژین انجام شده است. نتیجه‌های به دست آمده از شبیه‌سازی CFD به‌طور متوسط خطایی در حدود 17.6 درصد با رابطه تجربی را نشان می‌دهند. بنابراین با استفاده از شبیه‌سازی CFD می‌توان سامانه‌های انتقال نیوماتیک را با دقت بسیار خوبی شبیه‌سازی کرد. در این پژوهش ته‌نشینی ذره‌ها در سامانه انتقال که به‌طور معمول یکی از مشکلات عملیاتی این واحدها می‌باشد، مورد مطالعه قرار گرفته است و تأثیر توزیع اندازه ذره‌ها بر روی سرعت ته نشینی بررسی شده است. نتیجه‌های به دست آمده از شبیه‌سازی CFD نشان می‌دهد که با کاهش سرعت اختلاف بین شبیه‌سازی CFD و رابطه تجربی افزایش می‌یابد. این افزایش اختلاف به این دلیل است که در شبیه‌سازی CFD برهمکنش بین ذره‌ها در نظر گرفته نمی‌شود. در شدت جریان‌های حجمی پایین گاز غلظت جامد در خط انتقال نیوماتیک بالاست و بر همکنش ذرات نقش اساسی را بازی می‌کند. با افزایش سرعت گاز غلظت جامد در جریان کاهش می‌یابد بنابراین نتیجه‌های به دست آمده از شبیه‌سازی CFD به رابطه تجربی نزدیک می‌شود. نتیجه‌های به دست آمده از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با اعمال توزیع اندازه ذره‌ها سرعت ته نشینی افزایش می‌یابد. دلیل افزایش سرعت ته نشینی این است که تأثیر نیروی درگ اعمال شده بر ذره‌های درشت بیشتر از ذره‌های ریز می‌باشد یا به عبارتی ذره‌های درشت بیشتر انرژی جریان را می‌گیرند و باعث افزایش افت فشار می‌شوند. با توجه به این نتیجه‌ها می‌توان گفت که توزیع اندازه ذره‌ها نقش مهمی در تعیین سرعت ته نشینی در فرایند انتقال داراست.



شکل ۷- مقایسه بین پروفایل سرعت در فاصله ۲ متری از ورودی لوله در حالت‌های با جامد و بدون جامد در سرعت ظاهری گاز 2.0 m/s .



شکل ۸ - نمودار افت فشار بر واحد طول خط انتقال نسبت به سرعت فاز گاز در دبی جامد 0.625 (kg/s) .



شکل ۹- تأثیر توزیع اندازه ذرات روی افت فشار بر واحد طول خط انتقال نسبت به سرعت فاز گاز در دبی جامد 0.625 (kg/s) .

فهرست نمادها

u_p	سرعت ذره جامد		
u_R	سرعت نسبی ذره جامد $(u - u_p)$	CD	ضریب درگ
u_s	سرعت ته‌نشینی برای یک ذره جامد	\bar{d}	قطر متوسط ذرات
W_{P1}	سرعت ذره در راستای محور z	d_p	قطر ذره جامد
Y_d	جزء جرمی از ذرات	e	ضریب بازگشتی
ρ_f	دانسیته سیال	f	ضریب اصطکاک
ρ_p	دانسیته ذره جامد	F_t	برایند نیروهای وارد بر ذره
γ	نسبت دبی جرمی جامد به دبی جرمی گاز	F_A	نیروی جرم مجازی
λ	ضریب اصطکاک خط انتقال برای گاز	F_D	نیروی درگ
μ	ویسکوزیته سیال	F_G	نیروی ناشی از جاذبه
μ_t	ویسکوزیته سیال در جریان درهم	Fr	عدد فرود: $u_a / (gD)^{1/2}$
μ_0	ضریب اصطکاک سکون	Fr_p	عدد فرود ذره جامد $\omega_s / (gd_p)^{1/2}$
μ_d	ضریب اصطکاک دینامیک	g	شتاب جاذبه
ω_{p1}^x	سرعت زاویه‌ای ذره حول محور x	G_k	نرخ تولید انرژی جنبشی
ω_{p1}^z	سرعت زاویه‌ای ذره حول محور z	k	انرژی جنبشی آشفته‌گی (در واحد جرم)
$\frac{\Delta P}{L}$	افت فشار بر واحد طول خط انتقال نیوماتیک	m_p	جرم ذره جامد
		Re_p	عدد رینولدز برای ذره جامد $Re_p = \frac{\rho_f d_p u_R }{\mu}$
		S_{ui}	جمله چشمه ذرات

تاریخ دریافت: ۱۳۸۶،۲،۳۱ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹،۷،۵

مراجع

- [1] Ullman, "Encyclopedia of Industrial Chemistry", **33**, p. 482 (1996).
- [2] Liang S.F., Chao Z., "Principle of Gas- Solid Flow", Cambridge University Press, (1998).
- [3] Fokeer S., Kingman S., Lowndes I., Reynolds A., Characterization of the Cross Sectional Particle Concentration Distribution in Horizontal Dilute Flow Conveying a Review, *Chem. Eng. Process.*, **43**, p.677 (2004).
- [4] Ranade, V., "Computational Flow Modeling for Chemical Reactor Engineering", Academic Press (2002).
- [5] Huber N., Summerfield M., Modeling and Numerical Calculation of Dilute Phase Pneumatic Conveying in Pipe Systems, *Powder Technol.*, **99**, p. 90 (1998).
- [6] Bilirgen H., Levy E., Mixing and Dispersion of Ropes in Lean Phase Pneumatic Conveying, *Powder Technol.*, **119**, p. 37 (2001).
- [7] Bilirgen H., Levy E., Prediction of Pneumatic Conveying Flow Phenomena Using Commercial CFD Software, *Powder Technol.*, **95**, p. 37(1998).

- [8] Tsuji Y., Morikawa Y., Tanaka T., Nakatsukasa N., Nakatani M., Numerical Simulation of Gas-Solid Two-Phase Flow in a Two-Dimensional Horizontal Channel, *Int. J. Multiphas Flow*, **13**, p. 671, (1987).
- [9] Sommerfeld M., Modelling of Particle/Wall Collisions in Confined Gas-Particle Flows, *Int. J. Multiphas Flow*, **18**, p. 905 (1992).
- [10] Vesilind A., The Rosin-Rammler Particle Size Distribution, *Resource Recovery and Conservation*, **3**, p. 275, (1980).
- [11] Launder B.E., Spalding D.B., The Numerical Computation of Turbulent Flow, *Comp. Meth. App. Eng.*, **3**, p. 269 (1974).
- [12] Sommerfeld M., Analysis of Collision Effect for Turbulent Gas Particle Flow in Horizontal Channel: Part I. Particle Transport, *Int. J. Multiphas Flow*, **29**, p. 675(2003).
- [13] Patankar S.V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", McGraw-Hill, (1980).
- [14] Gerald C.F., "Applied Numerical Analysis", Addison Wesley Longman, (1999)
- [15] Tashiro H., Peng Y., Tomita Y., Numerical Prediction of Saltation Velocity for Gas-Liquid Two-Phase Flow in Horizontal Pipe, *Powder Technol.*, **91**, p. 141 (1997).
- [16] Bird R.B., Warren E. Stewart, Edwin N. Lightfoot, "Transport Phenomena", John Wiley & Sons, (2002).