# شبیه سازی CFD انتقال نیوماتیک ذرات پرپلیمر و محاسبه سرعت تهنشینی آنها

امین حسنونا، سیل 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 پرپلیمر 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 در صد نسبت به رابطه تجربی خطا دارد. تأثیر افزایش سرعت ناهری 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 نه نشینی و حالت افت فشار خط انتقال افزایش می یابد.

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

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

#### مقدمه

یکی از محدودیتها در طراحی خطوط انتقال نیوماتیک، تهنشینی پودر ضمن انتقال میباشد. طراحی غلط خطوط انتقال میتواند در سرعتهای بالای گاز باعث ایجاد خوردگی مکانیکی شدید ناشی از برخورد ذرمها به دیواره شود و بر عکس سرعت کم گاز حامل میتواند باعث ته نشینی بار و در نتیجه بسته شدن خط انتقال شود. بنابراین همیشه یک مهندس طراح بهدنبال انجام یک پیش بینی به نسبت دقیق از این دو حد بحرانی در طراحی میباشد. هر چند میتوان به صورت به نسبت محدودی رابطههای تجربی برای موارد خاص خطوط انتقال پیدا کرد ولی همیشه جابهجایی ذرههای جامد بهوسیله یک گاز حامل را انتقال نیوماتیک مینامند. از انتقال نیوماتیک در بسیاری از صنایع همچون صنایع نفت، پتروشیمی، کشاورزی و ... استفاده میشود. در صنایع پتروشیمی برای تولید پلیاتیلن بهطور معمول از انتقال نیوماتیک برای حمل کاتالیست یا پرپلیمر به راکتور بستر سیال استفاده میشود. همچنین با استفاده از این روش پلیمر تولید شده در راکتور بستر سیال را به سیلوها منتقل میکنند. یکی از مشکلاتی که بهطور معمول در طراحی خطوط انتقال نیوماتیک پرپلیمر وجود دارد تهنشینی ذرهها هنگام انتقال نیوماتیک می باشد [۱].

#### علمی \_ پژوهشی

www.SID.ir

<sup>+</sup>E-mail: hashemabadi@iust.ac.ir

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 به صورت 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، گرانش وشناوری وارد می شود. در انتقال نیوماتیک افقی جهت نیروی گرانش عمود بر جهت جریان میباشد. در این حالت بین نیروی گرانش از یک طرف و نیروهای شناوری و درگ از طرف دیگر رقابتی برای تهنشینی ذرهها جامد وجود دارد. اگر نیروی گرانش بر دو نیروی دیگر غلبه کند ذرهها تهنشین میشوند و در غیر اینصورت ذرهها توسط جریان حمل می شوند. از آنجا که نیروی شناوری در هر سیال مقدار ثابتی میباشد پس تنها راه برای جلوگیری از تهنشین 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 گرانش حاکم میباشد) به سرعتی میرسیم که در آن نیروهای درگ، گرانش و شناوری در حالت تعادل قرار می گیرند این سرعت فاز گاز را سرعت تهنشینی مینامند. در سرعتهای کمتر از سرعت تهنشینی نیروی گرانش بر نیروهای درگ وشناوری غلبه می کند وذرات تهنشین می شوند [۲].

ردت آوردن سرعت تهنشینی میتوان از فنون CFD استفاده کرد. درضمن 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 می شود. در ادامه هر دو دیدگاه مورد بررسی قرار می گیرد [۴].

(۳) Structure

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<sup>(۱)</sup>: در این نوع برخورد ذرهها جامد بعد از برخورد با دیواره اندکی روی دیواره میلغزند و سپس دیواره را ترک میکنند.

۲\_ برخورد غیرلغزشی<sup>(۲)</sup>: در این نوع برخورد ذرات جامد بعد از برخورد با دیواره بدون هیچگونه لغزشی، دیوراه را ترک میکنند.

هدف از این پژوهش تعیین سرعت تهنشینی خط انتقال نیوماتیک با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی می باشد. به منظور تعیین سرعتته نشینی 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 هندسي مورد استفاده شبيه سازي

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

# توزيع 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

(1) Sliding collision

(Y) Non sliding collision

اندازه ذرات (µm)	درصد جرمی تجمعی	اندازه ذرات (μm)	درصد جرمی تجمعی	اندازه ذرات (μm)	درصد جرمی تجمعی					
۱۸۸۰	١٠٠	577	$\Lambda_{/V}$	४४९	۵+/۲					
188.	૧૧ <sub>/</sub> γ	۵۸۸	۹۸/۱	717	44					
1017	૧૧ <sub>/</sub> ۶	۵۴۷	٩٧/٢	۱۹۸	۳۸٫۳					
14.8	٩٩ <sub>/</sub> ۴	۵۰۸	٩۶	١٨۴	۳۳٫۱					
١٣٠٧	<b>૧</b> ૧ <sub>/</sub> ૪	۴۷۳	٩۴٫۴	۱۷۱	۲۸٬۴					
1718	<b>૧</b> ૧ <sub>/</sub> ૪	44.	٩٢,۶	۱۵۹	74,7					
1171	<b>૧</b> ૧ <sub>/</sub> ૪	<b>۴</b> •٩	٩٠,٨	۱۴۸	۲۰٫۴					
۱۰۵۱	<b>૧</b> ૧ <sub>/</sub>	۳۸۰	$AA_{/}A$	74	١,٢					
۱۰۰۰	<b>૧</b> ૧ <sub>/</sub> )	۳۵۴	٨۶	۲۰٫۸	١٫٣					
٩٠٩	<b>૧</b> ૧ <sub>/</sub>	٣٢٩	٨١,۶	۱۹٫۳	١,١					
٨۴۵	<b>૧</b> ૧ <sub>/</sub> )	۲۸۴	۶۹٫۸							
۲۸۶	<b>૧</b> ૧ <sub>/</sub> )	754	۶۳٫۳							
۶۸۰	૧૧	۲۵.	۵۸٫۲							

جدول ۱- توزیع اندازه ذرههای پرپلیمر(میکرومتر).



شکل ۱\_ هندسه خط انتقال نیوماتیک پودر،a: شبکه تولیدی برای طول خط انتقال، d: شبکه تولیدی برای نصف سطح مقطع.

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

$$\mathbf{Y}_{d} = e^{-\left(\frac{d}{\overline{d}}\right)^{n}} \tag{1}$$

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

#### علمی \_ پژوهشی



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

مقدار  $Y_d$  برابر  $\gamma$ ۶۸ شود برای بهدست آوردن n از معادله زیر استفاده می شود.

$$n = \frac{\ln\left(-\ln Y_d\right)}{\ln\left(d/\overline{d}\right)} \tag{7}$$

برای هر  $Y_d$  و b در جدول ۱ مقدار n محاسبه شده است، میانگین این مقدارها نشان می دهد که n برابر ۱/۸۹۴ می باشد. شکل ۲ توزیع ذرههای به دست آمده توسط این دیدگاه را نشان می دهد.



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

## فرمولاسيون مسئله

در این دیدگاه گاز بهعنوان فاز پیوسته وجامد بهعنوان فاز پراکنده در نظر گرفته می شود. از آنجایی که در انتقال نیوماتیک به طور معمول رژیم جریان درهم می باشد معادله های پیوستگی و مومنتم برای فاز پیوسته به ترتیب عبارتند از:

$$\begin{split} \nabla \cdot \left( \rho_{f} u \right) &= \circ & (\texttt{Y}) \\ \frac{D \rho_{f} u}{D t} &= -\nabla P - \nabla . \left( \tau^{v} + \tau^{t} \right) + S_{ui} \\ \tau^{v} &= -\mu \left( \nabla u + \nabla u^{T} \right) & (\texttt{Y}) \\ \tau^{t} &= -\mu_{t} \left( \nabla u + \nabla u^{T} \right) \end{split}$$

جمله  $S_{ui}$  میباشد این جمله جشمه<sup>(۱)</sup> 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  $\mu_1$  از مدل استاندارد k- $\epsilon$  استفاده شدهاست [۱۱]. مدل استاندارد k- $\epsilon$  مدلی نیمهتجربی میباشد این مدل شامل دو معادله یکی برای انرژی جنبشی k ودیگری برای تلفات انرژی میباشد: میباشد:

$$\rho_{f} \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_{i}} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_{t}}{\sigma_{k}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_{i}} \right] + G_{k} + G_{b} - \rho_{f} \varepsilon - Y_{M} \qquad (\Delta)$$

$$\rho_{f} \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_{i}} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_{t}}{\sigma_{\epsilon}} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_{i}} \right] +$$

$$C_{v\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_{k} + G_{vk}G_{b}) - C_{v}\rho_{f} \frac{\epsilon}{k}$$
(8)

(Y) Dispersed phase

پنج ثابت مربوط به مدل از کارهای تجربی بهدست آمده است  
و بهصورت زیر گزارش شده است [۱۱].  
$$\sigma_{\epsilon} = 1/7$$
،  $\sigma_{k} = 1/7$ ،  $C_{\mu} = 1/97$ ،  $C_{\gamma\epsilon} = 1/97$ ،  $C_{\gamma\epsilon} = 1/97$   
در نتیجه حل معادههای (۵) و (۶) مقدار انرژی جنبشی k و  
در نتیجه حل معادههای (۵) و (۶) مقدار انرژی جنبشی k و  
تلفات انرژی ع مشخص میشود که با استفاده از آنها میتوان  
ویسکوزیته مربوط به جریان درهم را بهصورت زیر محاسبه کرد.

$$\mu_{t} = \rho_{f} C_{\mu} \frac{k^{v}}{\epsilon} \tag{Y}$$

برای شبیهسازی فاز ناپیوسته<sup>(۲)</sup> قانون دوم نیوتن بر روی هر ذره اعمال میشود:

$$m_{p} \frac{dV_{p}}{dt} = F_{t} \tag{A}$$

در معادله بالا  $F_t$  نشان دهنده بر آیند نیروهای وارد بر هر ذره  $F_G$  میباشد. این جمله شامل نیروی درگ  $F_D$ ، نیروهای شناوری  $F_G$  و نیروی جرم مجازی  $F_A$  میباشد  $[\mathcal{F}]$ :

$$F_{\rm A} = -\frac{\gamma}{\gamma\gamma} \pi d_{\rm p}^{\rm r} \rho_{\rm f} \, \frac{du_{\rm p}}{dt} \tag{9}$$

$$F_{\rm D} = \frac{1}{\Lambda} \pi d^{\rm r} \rho_{\rm f} C_{\rm D} \left| u_{\rm R} \right| u_{\rm R} \tag{1.}$$

$$C_{\rm D} = \frac{\gamma \varphi}{Re_{\rm p}} \left( 1 + \frac{1}{\sqrt{\Delta}} Re_{\rm p}^{\gamma \beta AV} \right)$$

$$Re_{\rm p} = \frac{\rho d_{\rm p} \left| u - V_{\rm p} \right|}{\mu}$$
(11)

$$F_{\rm G} = g \frac{\left(\rho_{\rm p} - \rho_{\rm f}\right)}{\rho_{\rm p}} \tag{17}$$

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

$$|\mathbf{u}_{\mathrm{R}_{\lambda}}| \ge \frac{\gamma}{\gamma} \mu_{\cdot} (\lambda + e) \mathbf{v}_{\mathrm{P}_{\lambda}}$$
(13)

اگر معادله بالا برقرار باشد مکانیسم برخورد لغزشی میباشد و در غیر اینصورت 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. μο و ν<sub>P</sub>

به ترتیب ضریب اصطکاک سکون و سرعت نرمال ذره قبل از برخورد می باشد. در معادله بالا  $u_{R_1}$  از معادله زیر محاسبه می شود:

$$\mathbf{u}_{\mathbf{R}_{\lambda}} = \sqrt{\left(\mathbf{u}_{\mathbf{P}_{\lambda}} + \frac{\mathbf{D}_{\mathbf{P}}}{\mathbf{\gamma}} \boldsymbol{\omega}_{\mathbf{P}_{\lambda}}^{z}\right)^{r} + \left(\mathbf{W}_{\mathbf{P}_{\lambda}} - \frac{\mathbf{D}_{\mathbf{P}}}{\mathbf{\gamma}} \boldsymbol{\omega}_{\mathbf{P}_{\lambda}}^{x}\right)^{r}}$$
(14)

در معادله (۱۴)  $(\mathbf{D}_{P}, \mathbf{w}_{P_{1}}^{X}, \mathbf{w}_{P_{1}}^{X}, \mathbf{w}_{P_{1}}^{X}, \mathbf{u}_{P_{1}}$  و  $\mathbf{D}_{P}$  به ترتیب سرعت ذره در راستای محور x، سرعت ذره در راستای محور z، سرعت راویهای ذره حول 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 می شود [۹]:

$$u_{P\gamma} = u_{P\gamma} + \mu_d \varepsilon_x (\gamma + e) v_{P\gamma}$$
(12)

$$\mathbf{v}_{\mathbf{P}\gamma} = -\mathbf{e} \, \mathbf{v}_{\mathbf{P}\gamma} \tag{18}$$

$$W_{P\gamma} = W_{P\gamma} + \mu_{d} \epsilon_{z} \left(1 + e\right) v_{P\gamma}$$
(1Y)

$$\omega_{P\tau}^{x} = \omega_{P\tau}^{x} - \Delta \mu_{d} \epsilon_{z} \left( \nu + e \right) \frac{v_{P\nu}}{D_{P}}$$
 (1A)

$$\omega_{P\gamma}^{y} = \omega_{P\gamma}^{y} \tag{19}$$

$$\omega_{P\gamma}^{z} = \omega_{P\gamma}^{z} + \Delta \mu_{d} \epsilon_{x} \left( \gamma + e \right) \frac{v_{P\gamma}}{D_{P}}$$

$$(\Upsilon \cdot)$$

$$\varepsilon_{x} = \left(u_{P_{1}} + \frac{D_{P}}{r}\omega_{P_{1}}^{z}\right)/u_{R_{1}}$$
(Y1)

$$\varepsilon_{z} = \left( W_{P_{1}} - \frac{D_{P}}{\gamma} \omega_{P_{1}}^{x} \right) / u_{R_{1}}$$
(YY)

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

$$u_{P\gamma} = \frac{\Delta}{\gamma} (u_{P\gamma} - \frac{D_P}{\Delta} \omega_{P\gamma}^z)$$
 (YY)

$$\mathbf{v}_{\mathbf{P}\boldsymbol{\gamma}} = -\mathbf{e}\,\mathbf{v}_{\mathbf{P}\boldsymbol{\gamma}} \tag{(\Upsilon \mathbf{F})}$$

$$W_{P\gamma} = \frac{\Delta}{\gamma} (W_{P\gamma} + \frac{D_P}{\Delta} \omega_{P\gamma}^x)$$
 (YD)

$$\omega_{P\gamma}^{x} = \frac{\gamma W_{P\gamma}}{D_{P}} \tag{78}$$

(Y) First order upwind

(**\***) Simple

 $\omega_{P_{Y}}^{y} = \omega_{P_{Y}}^{y}$ 

#### علمی \_ پژوهشی

(۲۷)

$$\omega_{\rm P\gamma}^{\rm x} = -\frac{\gamma \, u_{\rm P\gamma}}{D_{\rm P}} \tag{$\Upsilon A$} \label{eq:phi_point}$$

# شرايط مرزي 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:

$$u = \frac{\varsigma}{\varsigma} u_{avg} \left( v - \frac{r}{R} \right)^{1/v}$$
 (Y9)

در معادله بالا R ، u<sub>avg</sub> و u به ترتیب سرعت متوسط فاز گاز، شعاع لوله و سرعت فاز گاز در شعاعهای گوناگون می باشند.

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 بهروش اختلاف مرکزی<sup>(۱)</sup> و جملههای جابهجایی بهروش طرح اختلاف بالادست<sup>(۲)</sup> جدا شدند. سپس برای حل همزمان معادلات سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل<sup>(۳)</sup> 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 به صورت زیر می باشد:

۱\_ ابتدا معادلههای حاکم بر فاز گاز بدون در نظر گرفتن جمله چشمه مربوط به ذرههای جامد حل می شوند.

۲\_ تعداد زیادی از ذرهها در میدان جریان رهگیری شده و سپس میانگین جمله چشمه در معادله حرکت فاز پیوسته محاسبه می شود.

۳\_ دوباره میدان جریان با در نظر گرفتن جمله چشمه محاسبه می شود.

۴\_ مراحل دوم وسوم را آنقدر تکرار می شوند تا معادلهها همگرا شوند.

## معتبرسازی شبیهسازی CFD

برای اثبات درستی شـبیهسازی CFD از رابطـه تجربـی زیـر استفاده شده است [۱۵]:

$$\frac{\Delta P}{L} = (\gamma \cdot)$$

$$\rho g \left( \frac{\lambda}{\gamma} Fr^{\gamma} + \cdot_{\prime} \cdot \cdot \cdot \cdot \gamma \gamma \mu_{d}^{\gamma,\gamma\gamma} Fr_{p}^{\gamma,\gamma\gamma} \gamma^{\gamma,\gamma} \frac{1}{Fr^{\gamma,\gamma\gamma}} \right)$$

برای بهدست اوردن سرعت تهنشینی یک ذره از معادلـمهـای زیر استفاده می شود [۲]:

برای بهدست آوردن سرعت تهنشینی برای یک ذره ابتدا فرض می شود که معادله (۳۱) برقرار باشد با استفاده از این فرض مقدار u<sub>s</sub> محاسبه می شود سیس بر اساس آن Re<sub>P</sub> محاسبه می شود. اگر Re<sub>P</sub> در بازه معادله (۳۱) باشد که فرض درست است وگرنه از معادله (۳۲) یا (۳۳) استفاده می شود. برای ذره پرپلیمر با اندازه متوسط ۲۵۷ میکرومتر مقدار  $u_s$  برابر  $v_{\rm VVV}$  متر بر ثانیه میباشد. از آنجایی که معادله (۳۰) برای ذرات هم اندازه ارایه شده و تأثیر توزیع اندازه ذرات بر روی افت فشار درنظر گرفته نمی شود، 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 یریلیمر، 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 بين شبيه سازى CFD و رابطه تجربى افزايش مى يابد. افزایش اختلاف به این دلیل است که در شبیهسازی CFD برهمکنش بین ذرهها در نظر گرفته نمی شود. در سرعتهای پایین گاز، شدت جریان حجمی گاز پایین است بنابراین در خط انتقال نیوماتیک غلظت جامد بالاست و بر همکنش ذرمها نقش اساسی را اعمال می کند. با افزایش سرعت گاز غلظت جامد در جریان کاهش می یابد

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

درصد	افت فشار CFD	افت فشار رابطه	سرعت
خطا	(Pa/m)	تجربی(Pa/m)	(m/s)
۵۷٫۸	۵۷	٩٠	٨
۲ <i>۱</i> /۴	۴۷	۵۷٫۱	١٠
۱۵/۹	44	۵١	١٢
۱۱٫۴	۵۱/۱	۵۷	14
۲ <sub>/</sub> ۶	۶۳/۴	۶۸٫۲	18
۵, ۱	YY/۱	٨١/١	۱۸
٣,٧	٩٢/۴	۵۹ <sub>/</sub> ۹	۲.
۱۷,۶		خطاي متوسط	

بنابراین نتیجههای به دست آمده از شبیهسازی CFD به رابطه تجربی نزدیک می شود. در کل شبیه سازی CFD دارای ۱۷/۶ درصد خطا می باشد که خطایی قابل قبول است.

#### تحليل نتيجهها

یکی از نکتههای مهم در مورد بهدست آوردن سرعت تهشینی، سرعت ذرات جامد در هنگام ورود به فضای محاسباتی می باشد. اگر سرعت ذرات در هنگام ورود به دامنه محاسباتی کم فرض شود (درحدود یک متر بر ثانیه) در ابتدای لوله بخش زیادی از انرژی سیال صرف شتابدهی به ذرهها می شود 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 می باشند). با این فرض در ابتدای لوله انرژی سیال صرف شتابدهی ذرهها نمی شود و افت فشار بهدست آمده از شبیه سازی CFD، افت فشار جریان توسعه یافته می باشد و می توان 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 می دهد همانطور که از این شکل پیداست جریان به توسعه یافتگی رسیده است. شکل ۶ تغییرهای فشار در طول لوله به ازای مقدارهای گوناگون

علمی \_ پژوهشی

٤٨



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



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



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

علمی \_ پژوهشی

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 می یابد. و این روند تغییرات فشار به طور کامل منطبق بر افت فشار بهدست آمده از رابطه ضریب اصطکاک می باشد [۶۲].

$$\Delta \mathbf{P} = \frac{\mathbf{\Psi} \mathbf{f} \mathbf{L}}{\mathbf{D}} \left( \frac{\mathbf{\rho} \, \overline{\mathbf{u}}^{\,\mathrm{v}}}{\mathbf{\Lambda}} \right) \tag{TF}$$

که در این رابطه f ضریب اصطکاک میباشد میزان افت فشار بهدست آمده با استفاده از شبیهسازی (CFD) و معادله (۳۴) خطای کمتر از ۱٫۵٪ را نـشان مـی دهـد. شـکل ۷ مقایـسه بـین تغییرهای سرعت نسبت به شعاع در فاصله ۲ متری از ورودی لوله در حالت های با جامد و بدون جامد در سرعت ظاهری گاز (m/s) را نشان می دهد همانطور که در این شکل پیداست در حالت با جامد نقطه بیشینه سرعت از مرکز لوله به سمت راست جابهجا می شود. 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 می باشد و سرعت فاز گاز کم می شود از طرفی باید معادله پیوستگی ارضاء شود از این رو سرعت در بالای لوله افزایش می یابد. در شکل ۸ تغییرهای افت فشار در واحد طول لوله به ازای مقدارهای گوناگون سرعت ظاهری گاز به دست آمده از شبیهسازی و رابطـه تجربـی /وچـی [۱۰] بـرای پـودر بـا انـدازه متوسـط 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 می باشد. با توجه به این توضیحات، مقدار سرعت تهنشینی به تقریب برابر m/s میباشد. مطابق شکل ۸ مدل CFD توانسته است مقدار سرعت تەنشىنى را با دقت خوبى مطابق با رابطە تجربى پيش بينى كنـد، اما مقدار افت فشار به ازای واحد طول بهدست آمده از شبیهسازی به ازای سرعت تهنشینی به تقریب ۱۷٫۶٪ خطا ناشان میدهد. علت این خطا نیز به خاطر لحاظ نشدن برهم کنش بین ذرهای در مدل سازی و همینطور خطاهای عددی موجود می باشد. شکل ۸ همچنین نشان می دهد که نتیجههای به دست آمده از شبیه سازی CFD با افزایش سرعت به رابطه تجربی نزدیک می شوند که این به خاطر کاهش اثر بر همکنش ذرهها بر هیدرودینامیک انتقال نیوماتیک میباشد. بنابراین میتوان از شبیه سازی CFD برای بهدست آوردن سرعت تهنشینی در توزیع انـدازه ذرات گفتـه شـده



شکل ۷\_ مقایسه بین پروفایل سرعت در فاصله ۲ متری از ورودی لوله در حالتهای با جامد و بدون جامد در سرعت ظاهری گاز ۲۰m/s.



شکل ۸ ـ نمودار افت فشار بر واحد طول خط انتقال نسبت به سرعت فاز گاز در دبی جامد (kg/s) ۰/۱۲۰ .



شکل ۹\_ تأثیر توزیع اندازه ذرات روی افت فشار بر واحد طول خط انتقال نسبت به سرعت فاز گاز در دبی جامد (kg/s) ۰٫٦٢٥ .

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 شکل۹ پیداست با اعمال توزیع اندازه ذرهها سرعت ته تشینی به ۱۴ 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 بهعبارتی 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.

#### نتيجهگيري

در این پژوهش شبیه سازی CFD خط انتقال نیوماتیک افقی یریلیمر به قطر ۰٬۰۵۰۸ متر، طول ۴ متر و شدت جریان پریلیمر ۶۲۵ kg/s با استفاده از دیدگاه اولرین \_ لاگرانژین انجام شده است. نتیجههای بهدست آمده از شبیهسازی CFD بهطور متوسط خطایی در حدود ۱۷٬۶ 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 مشكلات عملياتي اين واحدها مي باشد، 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 می دهد که با کاهش سرعت اختلاف بین شبیه سازی CFD و رابطه تجربی افزایش می یابد. این افزایش اختلاف به این دلیل است که در شبیهسازی CFD برهمکنش بین ذرهها در نظر گرفته نمی شود. در شدت جریانهای حجمی پایین گاز غلظت جامد در خط انتقال نيوماتيک بالاست و بر همکنش ذرات نقش اساسی را بازی می کند. با افزایش سرعت گاز غلظت جامد در جریان کاهش می یابد 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 تشینی افزایش می یابد. دلیل افزایش سرعت ته نشینی این است که تأثیر نیروی درگ اعمال شده بر ذرههای درشت بیشتر از ذرههای ریز میباشد یا بهعبارتی ذرههای درشت بیشتر انرژی جریان را می گیرند و باعث افزایش افت فشار می شوند. با توجه به این نتیجهها می توان گفت که توزیع اندازه ذرهها نقش مهمی در تعیین سرعت ته نشینی در فرایند انتقال داراست.

فهرست نمادها		سرعت ذره جامد	u <sub>p</sub>	
ضریب درگ	CD	$\left(\mathrm{u}-\mathrm{u}_\mathrm{p} ight)$ سرعت نسبی ذرہ جامد	u <sub>R</sub>	
قطر متوسط ذرات	$\overline{\mathbf{d}}$	سرعت تەنشىنى براى يک ذرە جامد	us	
قطر ذره جامد	d <sub>p</sub>	سرعت ذره در راستای محور z	$W_{P_1}$	
ضریب بازگشتی	e	جزء جرمی از ذرات	Y <sub>d</sub>	
نی به او می ا ضرب اصطکاک	f	دانسیته سیال	$ ho_{ m f}$	
ربی برایند نیروهای وارد بر ذره	$\mathbf{F}_{t}$	دانسیته ذره جامد	$ ho_p$	
نیروی جرم مجازی	F <sub>A</sub>	نسبت دبی جرمی جامد به دبی جرمی گاز	γ	
نیروی در گ نیروی در گ	F <sub>D</sub>	ضریب اصطکاک خط انتقال برای گاز	λ	
نیروی ناشی از جاذبه نیروی ناشی از	$F_{G}$	ويسكوزيته سيال	μ	
$u_{a}/(gD)^{\sqrt{7}}$ عدد فرود: ت	Fr	ويسكوزيته سيال در جريان درهم	$\mu_t$	
arc $\omega_{s}/(\mathrm{gd}_{n})^{\vee r}$ acc site site set as $\omega_{s}/(\mathrm{gd}_{n})$	Fr <sub>P</sub>	ضریب اصطکاک سکون		
شتاب جاذبه	g	ضریب اصطکاک دینامیک	$\mu_d$	
ن خ تملید اندې چنیشې	G	سرعت زاویهای ذره حول محور x		
س بوید (رزی جنبسی	С <sub>к</sub> Ь	سرعت زاویهای ذره حول محور z	$\omega_{P^{\nu}}^{z}$	
ادری جنبسی اسفنگی (در واحد جرم) جرم ذره جامد	к m <sub>p</sub>	افت فشار بر واحد طول خط انتقال نيوماتيك	$\frac{\Delta P}{L}$	
$Re_{p} = \frac{\rho_{f}d_{p} u_{R} }{\mu}$ acc representation of the second state of the seco	Re <sub>p</sub>		_	
جمله چشمه ذرات	$\mathbf{S}_{ui}$	تاریخ دریافت : ۱۳۸۲٬۲٫۳۱ ؛ تاریخ پذیرش : ۱۳۸۹٬۷٫۵		

#### [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).

علمی \_ پژوهشی

مراجع

- [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).