

## مطالعه تئوریهای جریانهای بارسوبات غلیظ و کاربرد آن در انتقال هیدرولیکی جامدات

سید محمد رضا علوی مقدم<sup>1</sup>  
سمید رضا خداشناس<sup>2</sup>

### چکیده

طبق تقسیم بندیهای موجود جریانهای باغلظت بیش از ۸ درصد مواد جامد جزء جریانهای غلیظ به حساب می آیند که به خاطر پیچیدگی رفتارشان، تئوریهای مربوط به آنها با تئوریهای انتقال رسوب متفاوت است. در این تحقیق سعی شده است چند تئوری مطرح که از کاربرد بیشتری برخوردار می باشند مورد بررسی و تغییر قرار گرفته و نتایج تغییرات با تئوریهای موجود از طریق استفاده از داده های آزمایشگاهی مقایسه گردید.

واژه های کلیدی: انتقال هیدرولیکی، کلاب، سرعت بحرانی، گردان افت انرژی.

### مقدمه

انتقال هیدرولیکی مواد جامد دانه ریز و دانه درشت، یکی از روشهای انتقال مواد معدنی و باطله کارخانه های کانه آرایی است که چه در مسافتهای کوتاه در داخل کارخانه ها و چه در مسافتهای طولانی بین معدن و کارخانه و بین کارخانه و محل انباشت باطله بطور وسیع و روز افزون استفاده می شود. تاریخچه پیدایش خطوط لوله انتقال کلاب به اواخر قرن ۱۹ میلادی بر می گردد و متناسب با رشد و توسعه استفاده از این فناوری، قوانین فیزیکی حاکم بر این پدیده نیز از هر دو جنبه نظری و تجربی مورد بررسی و شناخت قرار گرفته است، که این روند هم اکنون نیز در حال ادامه می باشد. از دیدگاه کاربردی بعضی عمده های از تحقیقات پژوهی دو مقوله برآورد سرعت بحرانی جریان (حد آغازین سرعت برای ته نشینی مواد جامد) و گردان افت انرژی مشهور شده است.

### طبقه بندی کلاب

از دیدگاه الگوی جریان کلابها را می توان به ۳ گروه تقسیم بندی نمود (اشکل شماره ۱):

- ۱- همگن یا شبه همگن: در این نوع کلاب غلظت و اندازه ذرات بقدری پایین و با سرعت جریان بقدری بالا است که مخلوط آب و جامد رفتارهای مشابه یک فاز یا لایح یکسان را دارا می باشد. بنابراین در این نوع کلاب با سلولم بودن اثرات مخلوطا، افت انرژی را می توان مشابه مسائلات تک فاز محاسبه نمود.
- ۲- نامگن: در این نوع کلاب اندازه ذرات بگونه ای است که تمایل زیادی برای ته نشینی دارند و انتقال آنها مستلزم اختلاش کافی در جریان بوده و انرژی بیشتری را می طلبد.
- ۳- نامگن یا لایه بندی شده یا بستر انباشتی: در این نوع کلاب میزان ته نشینی قابل توجه بوده اما مواد جامد در بستر لوله بصورت لایحی در حرکت می باشند.
- ۴- نامگن یا لایه بندی شده یا بستر ثابت: در این نوع کلاب غلظت و اندازه ذرات بقدری بالا و با سرعت جریان بقدری پایین است که بعضی عمده ای از مواد جامد در بستر رسوب کرده و فاقد حرکت می باشند و یک بستر نسبتاً ثابت را تشکیل می دهند.

۱- دانشجوی دکتری هیدرولیک، دانشگاه تهران، گروه مهندسی شاور، مرس آب [alavimorghadam@yahoo.com](mailto:alavimorghadam@yahoo.com)

۲- دکتری هیدرولیک، استادیار دانشگاه تهران، گروه مهندسی شاور، مرس آب [khodashter@arctic.um.ac.ir](mailto:khodashter@arctic.um.ac.ir)

### سرعت بحرانی

بطول ریز شناسی جریان کلاب در حالت تحت فشار مطابق شکل شماره (۲) دارای بخشهای زیر است: بخش مستقیم متضمن در حد فاصل A و B گستره ای از سرعت را در بر می گیرد که در آن مواد جامد در مایع حامل کلاهما متعلق با کاهش سرعت از نقطه B به سمت کاهش مایع یکپارچه تلقی بتدریج کاهش می یابد. این نوع تناسبی ارائه می یابد تا آنکه در نقطه C بخشی از مواد جامد به شکل لایه ای غلیظ در کنار مجرای اصلی می شوند و سرانجام در نقطه D بستری از مواد جامد شکل می گیرد. نقطه C که در آن شکل گزیری بستری از مواد جامد آغاز می شود معمولاً متناظر با نقطه کینه متضمن گردان افت - سرعت می باشد. بنابراین با افزایش سرعت جریان متناظر در تریما نقطه C و در تریما عمیقتر در نقطه B باشد. پس از نقطه D تریما جریان تقریباً یکنواخت می باشد که بخشی مایع بر روی بخش جامد به نشین شده حرکت می نماید و توسط شیبات تقریباً به موازات شاقه AB ارائه می یابد.

$$V_c = F \sqrt{2gD(S_1 - 1)} \quad (1)$$

که در آن  $V_c$  (m/s) سرعت بحرانی ته نشینی،  $D$  (m) قطر لوله،  $S_1$  (-) ضریب مخصوص نسبی ذرات جامد و  $F$  (-) ضریب که تابعی از قطر و غلظت حجمی ذرات می باشد.

با تکمیل تحقیقات تاثیر عوامل مختلف دیگر در مطالعات وارد گردید که رابطه ارائه شده توسط Cave با وارد کردن تاثیر غلظت و قطر ذرات از کاملترین این روابط می باشد: [1]

$$V_c = 1.04 D^{0.11} (S_1 - 1)^{0.23} \left[ \frac{d_{50}}{16} \ln\left(\frac{60}{C_v}\right) \right]^{0.11} \quad (2)$$

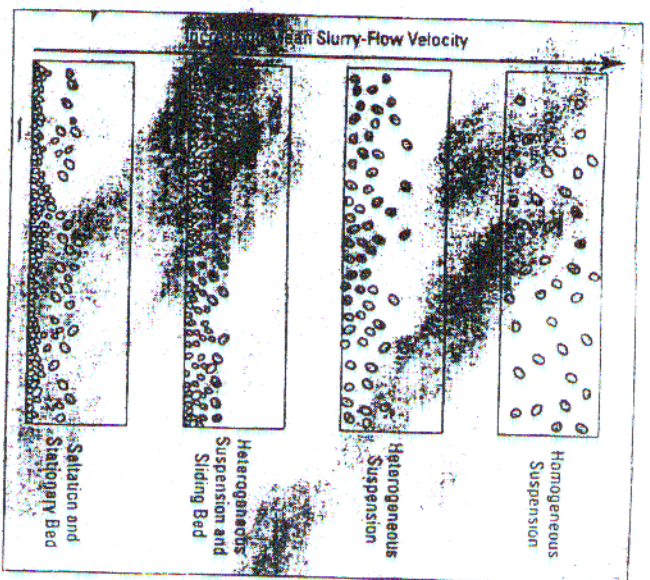
$$V_{tr} = \sqrt[3]{1800 g D W_c} \quad (3)$$

که در آن  $V_{tr}$  (m/s) سرعت و  $W_c$  (m) سرعت سقوط ذرات

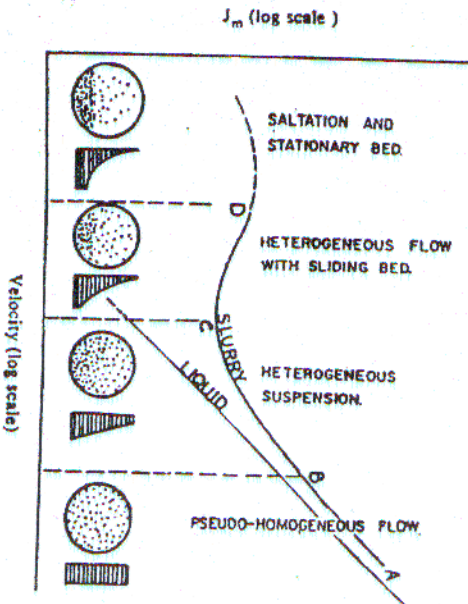
### گردان افت انرژی

مطابق گردان افت انرژی از سه نظر گاه زیر صورت می پذیرد:

- ۱- کلاهیهای کلوییدی: مطابق افت انرژی در این کلاهیها مشابه آب خالص است که در آن بجای لایه آب خالص لایه کلاب اعمال می شود.
  - ۲- کلاهیهای با ذرات ته نشین شونده: از این نوع کلاب در گروه سیالات غیر نیوتنی قرار می گیرد و در محاسبه میزان افت انرژی آنها از روابط حاکی بر سیالات غیر نیوتنی استفاده کرد که بسته به نوع مایع، رفتار انتخابی برای مجموع سیال و جامد مستقرترین این روابط به شرح زیر است: (1959) Tomia، Dodge and Metzner، (1973) Kenblowski and Kolodziejcki، and Merrill (1959).
  - ۳- کلاب با ذرات ته نشین شونده: در تعیین افت کلاب با ذرات ته نشین شونده نیز روشهای متعددی در نتیجه تحقیقات مختلف ارائه گردیده است که نحوه برخورد این روشها با مساله از روشهای ساده انگارانه ای که میزان افت را با اعمال یک ضریب افزایش دهنده به افت آب خالص محاسبه می نمایند تا روشهای پیچیده ای که کلاب را بصورت یک رژیم مخلوط در نظر گرفته و لغت بخشهای همگن و غیر همگن را جداگانه محاسبه می نمایند متفاوت می باشد.
- از مشهورترین این روشها که در مطالعه موردی حاضر بکار گرفته شده دو روش «WASP» و همکاران «Graf» می باشد که در مورد کلاهیهای با ذرات ته نشین شونده باسختی مناسبی ارائه می نمایند و همچنین در هنگام برخورد با سایر انواع کلاب نیز از همکارانی قابل قبول برخوردارند.



شکل ۱: تقسیم بندی کلاب



شکل ۲: رفتار شناسی کلاب

مقایسه روابط با اندازه گیریهای آزمایشگاهی

در تحقیق حاضر شکل سنتی روشهای فوق الذکر با وارد نمودن رابطه (۹) بجای روابط ماقبل از آن تا حدی اصلاح شد و همچنین طبقه حکم بر روش Wasp و همکاران « نظریه بخش حمل کتله دو فازی» در روش سنتی «Graf» اعمال گردید و نتایج آن با اندازه گیریهای آزمایشگاهی که توسط Lazarus and Sive گردیده بود، مقایسه شد [6]

انتقال ۳الی ۲ نتایج مقایسه را نشان می دهد. همچنین جدول ۱ مقادیر خطای هر یک از این روشها را که توسط رابطه زیر برآورد گردیده است ارائه می دهد.

$$Error = \sqrt{\frac{\sum (e_i)^2}{N}} \quad (11)$$

که Error مقدار خطا،  $m_{exp}$  مقدار اندازه گیری شده افت انرژی،  $m_{cal}$  مقدار محاسباتی افت انرژی و N مقدار آزمایشها می باشد.

جدول (۱) مقایسه درصد خطای محاسباتی و اندازه گیری شده

TEST	Wasp et al.	Graf	Graf (charged)
1	13.67	1.82	7.48
2	10.75	3.27	2.78
3	9.98	4.77	4.92
4	9.28	1.69	3.49

نتیجه گیری

در این تحقیق سه روش «Graf» در حالت معمول و پس از اعمال نظریه بخش حمل کتله دو فازی «Wasp» و همکاران «Wasp» با مقادیر اندازه گیری شده آزمایشگاهی مقایسه گردید.

هر چند با توجه به محدودیت داده های آزمایشگاهی اقسامت قطعی مقدور نمی باشد اما نتایج حاصل از این مقایسه محدودیت موند است که در محدوده غلظتها و سرعتهای این آزمایشها به ترتیب روشهای «Graf» و «Wasp» و همکاران «Wasp» باسختی ارائه می دهند.

پیش بینی می شود که با افزایش مقادیر غلظت و سرعت (حاکم شدن نظریه بخش حمل کتله دو فازی) باسختی روش Wasp و همکاران «Wasp» به مقادیر دقیق نزدیکتر گردد. همچنین نتایج موند است که روش «Graf» (تفسیر یافته) در محدوده سرعتی  $V > V_{th}$  به پاسخ دقیق همکار می شود.

منابع

[1] Cave, "Slurry Transportation and Pneumation Handling of Fine and Coars Solids", SME, 1983

[2] Brown, N.P, "Slurry Handling Design of Solid - Liquid Systems", ESP, 1994

[3] Graf, W.H, "Hydraulic of Sediment Transport", WRP, 1984

[4] Wasp, E.J, "Solid Liquid Flow Slurry Pipeline Transportation", Gulf P.C, 1979

[5] Dominguez, B, "Deposit Velocity of Slurry Flow in open channels", 13<sup>th</sup> conference on slurry Handling and Pipeline Transport, 1996

[6] Sive, A. W, and Lazarus, J.H, "A Comparison of Some Generalised Correlations for the Head Loss Gradient of Mixed Regime Slurries", 10<sup>th</sup> International Conference on the Hydraulic Transport of Solids in Pipes, 1986

روش Graf

بر اساس تحقیقات خود و جمع آوری نتایج تحقیقات دیگران یک روش نسبتاً کامل برای برآورد افت انرژی با توجه به رژیم جریان تنظیم نمود که بطور مختصر به شرح زیر است [3]

$$f_m = (1 + C_p \phi) f_{fr} \quad (1)$$

که در آن  $f_m$  گراندهای هیدرولیکی کلان،  $f_{fr}$  گراندهای هیدرولیکی آب خالص،  $C_p$  غلظت حجمی و  $\phi$  ضریبی که با توجه به نوع جریان از روابط زیر محاسبه می شود:

$$الف) \text{ جریان لایه بندی شده } (V < V_c)$$

$$\phi = 150 \left[ \frac{V^2 \sqrt{C_D}}{gD(S_s - 1)} \right]^{-3/2} \quad (2)$$

ب) جریان غیر همگن  $V_c < V < V_{th}$  در این حالت دو رابطه زیر قابل پیشنهاد می باشد:

$$\phi_D = 180 \left[ \frac{V^2}{gD} \sqrt{\frac{gd}{W^2}} \right]^{-3/2} \quad \text{Durand and Condolios (۱)}$$

$$\phi_N = 1100(S_s - 1) \frac{W \cdot gD}{V^2} \quad \text{Newitt (۷)}$$

ج) جریان همگن یا شبه همگن  $V > V_{th}$

$$\phi = K(S_s - 1) \quad (۸)$$

که در این روابط  $C_D$  ضریب رانش،  $d(m)$  قطر متوسط ذرات،  $S$  شیب کف.

روش Wasp و همکاران

در این روش که بر پایه نظریه «بخش حمل کتله دو فازی» پایه گذاری شده است، فرض می شود که غلظت و توزیع اندازه ذرات که در بخش لایه بوله وجود دارد در تمامی نقاط دیگر بوله نیز روی می دهد. بنابراین این بخش همگن یا حمل کتله از کلان است. باقیمانده ذرات جامد بدون بخش معلق غیر همگن نامیده می شود که توسط بخش حمل کتله منتقل می شود. افت اصطلاحی کلی مجموع افت بخش همگن و افت مازاد بخش غیر همگن می باشد. در این روش برای تخمین موز بین بخشهای همگن و غیر همگن از رابطه زیر استفاده می شود [4]

$$\text{Log} \left( \frac{C}{C_A} \right) = -1.8 \left( \frac{W}{\beta \times U^2} \right) \quad (۹)$$

که در آن  $\frac{W}{\beta}$  سرعت ته نشینی در کلان،  $\beta$  نسبت ضریب انتقال جرم به ضریب انتقال مستقیم،  $X$ : ثابت وزن - کاربن.

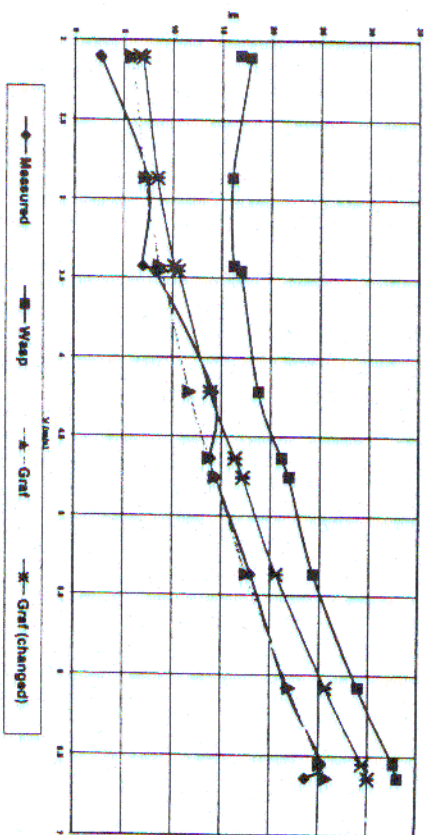
$U$  سرعت اصطلاحی

جهت محاسبه افت اصطلاحی کلی در این روش از یک روند سعی و خطا استفاده می شود و لازم است که مقدار لوجت کلان با توجه به غلظت حجمی مواد جامد یا از طریق آزمایش و با استفاده از روابط مانند رابطه زیر تعیین گردد: [5]

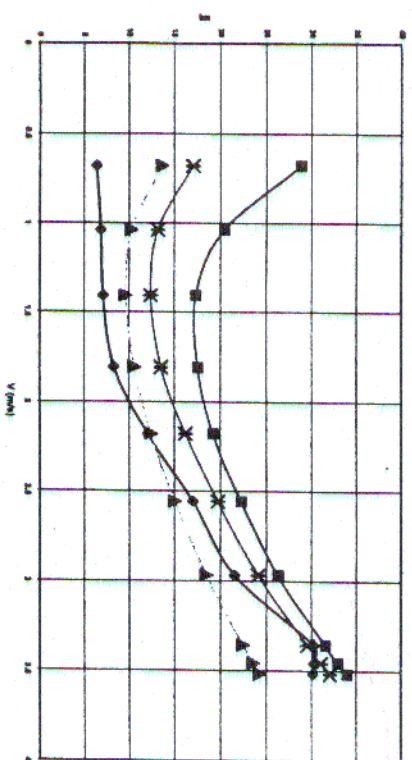
$$\mu_m = ((1 + 2SC_p + 10C_p^2 + 0.0019 \exp(20C_p)) \mu_f) \quad (۱۰)$$

که در آن:  $\mu_m$  لوجت کلان و  $\mu_f$  لوجت آب خالص

Database 3 : Fly Ash, Ser=237, D=141.7 (mm), 14.3% C<11.0 : 8.22

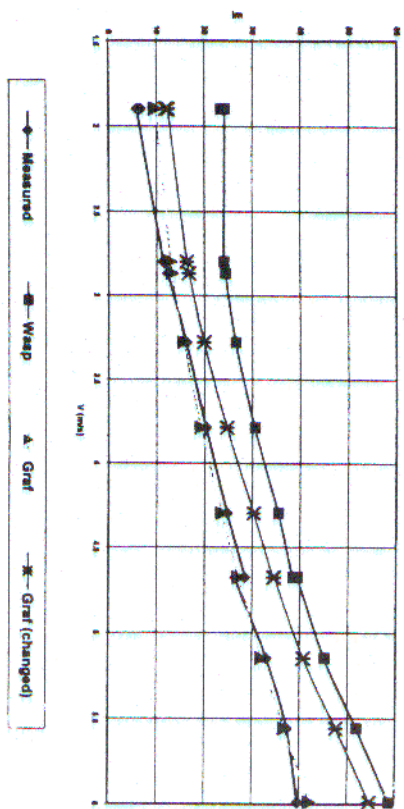


Database 4 : Slonilum Talings, Ser=246, D=87.21 (mm), 18.1% C<18.0 : 6.22

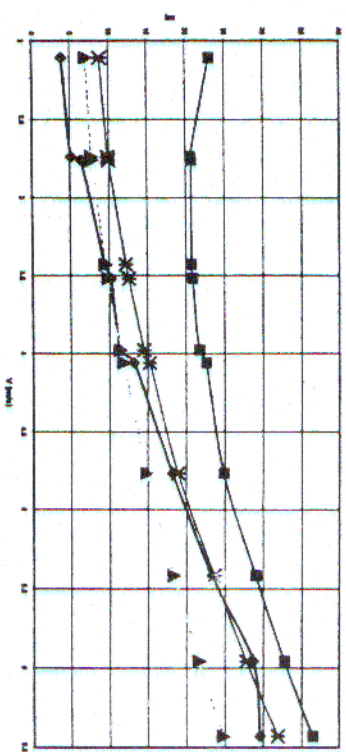


AT1

Database 5 : Fly Ash, Ser=237, D=60.88 (mm), 21.3% C<23.8 : 3.24



Database 6 : Fly Ash, Ser=237, D=117.8 (mm), 22.4% C<23.8 : 4.22



AT1