

## رسوب‌گذاری دانه‌ها: اثر برهمکنش دانه-زمینه

هژیر کورکی<sup>۱</sup>، محمدحسین نوید فامیلی<sup>۲\*</sup>، مهرزاد مرتضایی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری مهندسی پلیمر، دانشگاه تربیت مدرس

۲. دانشیار مهندسی پلیمر، دانشگاه تربیت مدرس (nfamili@modares.ac.ir)\*

۳. استادیار مهندسی پلیمر، دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب

### مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله :

دریافت ۱۴ بهمن ۱۳۸۸

دریافت پس از اصلاحات ۱ مرداد ۱۳۸۹

پذیرش نهایی ۱ آبان ۱۳۸۹

کلمات کلیدی :

رسوب‌گذاری

سرعت رسوب‌گذاری

برهمکنش دانه-زمینه

مدل‌سازی

توزیع اندازه ذرات

### چکیده

در یکی از مشکل‌های صنایع شیمیایی جداسازی و حذف مواد زائد از فرآیندهای شیمیایی می‌باشد لذا دانشمندان فراوانی بر این کوشش‌اند تا روش‌هایی را برای پاک‌سازی فرآیندهای صنعتی از مواد زائد پیدا کنند، یکی از این روش‌ها رسوب‌گذاری مواد زائد می‌باشد؛ در این روش محلول بودن یا زیاد بودن سطح به حجم مواد زائد سرعت رسوب‌گذاری آنها را بشدت کاهش می‌دهد؛ با وارد کردن ذرات سنگین‌تر در سامانه و جذب مواد زائد بر سطح مواد سنگین‌تر، سرعت رسوب‌گذاری آنها افزایش می‌یابد. بدین منظور باید سطح ذرات سنگین‌تر را برای جذب مواد زائد آماده کرد و با آماده سازی سطح ذرات سنگین‌تر، خواص سطحی آنها نیز تغییر می‌کند و از آنجا که سرعت رسوب‌گذاری تابع نیروهای هیدرودینامیکی، برهمکنش ذره-زمینه و برهمکنش ذرات با هم است، بالطبع با تغییر در خواص سطح مواد سنگین‌تر، سرعت رسوب‌گذاری آنها نیز تغییر می‌نماید. در این مطالعه مدل جدیدی برای بیان اثر خواص سطحی ذرات سنگین و زمینه رسوب بر سرعت رسوب‌گذاری ارائه و اثبات شده است و همچنین روشی برای اندازه‌گیری سرعت رسوب‌گذاری ارائه شده است. از روش ارائه شده برای اندازه‌گیری سرعت رسوب‌گذاری، می‌توان نمودار توزیع اندازه دانه‌ها را نیز بدست آورد و همچنین مدل ارائه شده این قابلیت را ایجاد می‌کند که از زمینه‌های متفاوتی متناسب با نوع ذره مورد آزمایش، برای آزمایش رسوب‌گذاری استفاده کرد. آنچه از این تحقیق نتیجه گرفته شده است این می‌باشد که با افزایش برهمکنش ذره و زمینه سرعت رسوب‌گذاری افزایش می‌یابد.

حقوق ناشر محفوظ است.

\* عهده دار مکاتبات

## ۱- مقدمه

زمینه و برهمکنش بین ذرات تغییر می‌کند به الطبع سرعت رسوب‌گذاری نیز تغییر می‌کند.

در غلظت‌های پایین از ذرات اثر برهم‌کنش بین ذرات کم است بنابراین می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. در این مطالعه سرعت رسوب‌گذاری تابع هیدرودینامیک ذرات و برهمکنش ذره-زمینه در نظر گرفته شده است و تاثیر هیدرودینامیک و خواص ترمودینامیکی سطح ذرات و زمینه بر سرعت رسوب‌گذاری بررسی و مدل گردیده و از مدل و ساختار ارائه شده برای اندازه‌گیری سرعت رسوب‌گذاری، نمودار توزیع اندازه ذرات نیز تخمین زده شده است.

## ۲- آزمایش‌ها

## ۲-۱- مواد

از سیلیکاژل به عنوان ذرات سنگین در این آزمایش استفاده شده است و زمینه‌های مورد استفاده در این آزمایش تولوئن، آب و اتانول می‌باشند. اندازه‌ی متوسط قطر ذرات سیلیکاژل حدود ۰.۰۲۵ سانتیمتر می‌باشد که توسط دستگاه جذب لیزر تخمین زده شده‌اند. خواص ترمودینامیکی و فیزیکی ذره و زمینه مورد استفاده در این مطالعه در جدول (۱) بیان شده اند:

جدول (۱): خواص فیزیکی و ترمودینامیکی ذره و سیالات مورد استفاده

ماده	کاربرد	دانشیه (گرم بر سانتیمتر مکعب)	گرانروی (cp)	تنش سطحی قطبی	تنش سطحی توزیعی	تنش سطحی (dyne/cm)
تولوئن	زمینه	۰/۸۶۷	۰/۵۹	۲	۲۶/۵	۲۸/۵
آب	زمینه	۰/۹۹۸	۰/۸۹	۵۱	۲۲	۷۲/۷۵
اتانول	زمینه	۰/۷۸۹	۱/۰۸	۱۰/۷	۱۱/۶	۲۲/۳
سیلیکاژل	ذره سنگین	۲/۳	----	۱۲/۴	۴۱/۲	۵۳/۶

گذاری به طول ۵۰ سانتیمتر و قطر ۲۶ میلیمتر، ترازو با دقت ۰.۰۱ گرم، یک ظرف که در انتهای ستون و میله‌ای که ظرف را به ترازو وصل می‌کند، می‌باشد. ذرات

یکی از روش‌های جداسازی مواد زائد از فرآیندهای شیمیایی، رسوب آنها می‌باشد [۱،۲] مهمترین عامل در این نوع فرآیندها، سرعت رسوب‌گذاری است و برای صرفه‌ی اقتصادی بالا باید سرعت رسوب‌گذاری تا حد ممکن افزایش داد.

عامل ایجاد کننده‌ی رسوب، نیروی گرانش [۳] می‌باشد که توسط زمین یا توسط نیروی گریز از مرکز چرخشی اعمال می‌گردد. عوامل موثر بر سرعت رسوب‌گذاری، حرکت هیدرودینامیکی ذرات [۴]، برهم‌کنش ذره-زمینه [۵] و برهم‌کنش بین ذرات [۶-۹] می‌باشند.

بعضی از مواد زائد یا در زمینه‌ی مورد نظر محلول می‌باشند یا سطح به وزن آنها زیاد است بطوری که رسوب‌گذاری آنها غیر ممکن و یا سرعت رسوب‌گذاری را بشدت کم می‌باشد بنابراین برای رسوب آنها از ذرات سنگین‌تر استفاده می‌شود که می‌توان با جذب مواد زائد بر سطح ذرات سنگین‌تر، رسوب‌گذاری آنها را ممکن نموده و یا سرعت رسوب‌گذاری آن را تا حد مطلوب افزایش داد. برای جذب مواد زائد بر سطح مواد سنگین باید سطح آنها را پذیرای مواد زائد کرد. با آماده‌سازی سطح ذرات، خواص ترمودینامیکی آن تغییر می‌کند و با تغییر در خواص ترمودینامیکی ذرات، برهم‌کنش ذره-

## ۲-۲- روش آزمایش

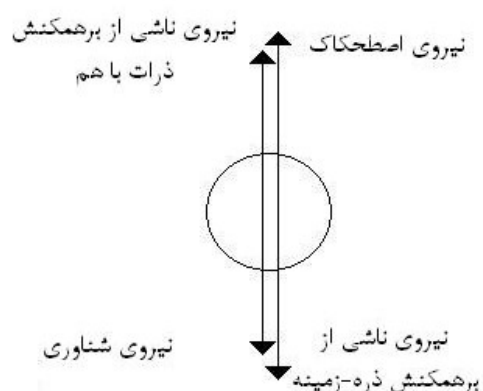
شمایل ساختار دستگاه رسوب‌گذاری در شکل (۱) نشان داده شده است این دستگاه شامل ستون رسوب-

در این معادله  $v$  سرعت رسوب گذاری،  $l$  طول ستون و  $t$  زمان متوسط رسوب گذاری هستند. این آزمایش برای هر زمینه ۳ بار تکرار شده است که متوسط سه بار تکرار را به عنوان سرعت رسوب گذاری در هر زمینه در نظر می‌گیریم [۱۰].

## ۲- بحث و نتایج

### ۲-۱- مدل سازی سرعت رسوب گذاری

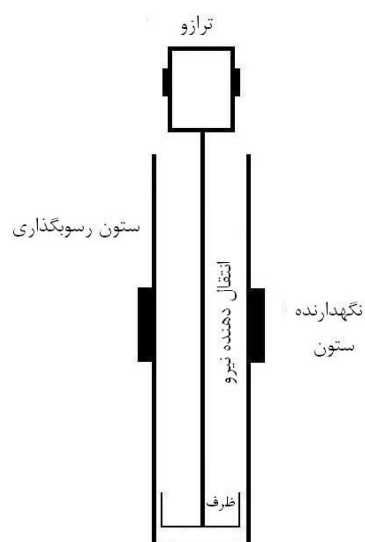
سرعت رسوب گذاری نتیجه‌ی تعادل نیروهای وارده بر ذره‌ی در حال رسوب است. نیروهای وارده بر ذره‌ی در حال رسوب شامل نیروهای شناوری<sup>۱</sup>، نیروی اصطکاک با محیط، نیروی ناشی از برهمکنش ذره با محیط و برهمکنش ذرات با هم هستند. شکل ۲ نمایانگر نیروهای وارده بر ذره در حال رسوب در محیط می‌باشد.



شکل (۲): نیروهای وارده بر ذره‌ی در حال رسوب. جهت نیروها بصورت اختیاری انتخاب شده است.

سرعت هیدرودینامیکی حاصل تعادل نیروهای شناوری و اصطکاک ذره با محیط است از طرفی سرعت‌های ناشی از برهمکنش ذره با محیط و برهمکنش ذرات با هم تابع ترمودینامیک سامانه است. پارامتر ترمودینامیکی سامانه، انرژی برهمکنش است که در ادامه از قانون دوم نیوتون برای ایجاد ارتباط بین انرژی‌های برهمکنش و سرعت ناشی از آنها استفاده شده است.

رسوب کرده در انتهای ستون داخل ظرف می‌نشینند و این ظرف در ستون شناور می‌باشد و توسط میله به ترازو وصل است و این میله نیروی گرانشی که توسط ذرات رسوب کرده به ظرف وارد می‌شود را به ترازو منتقل می‌کند و ترازو میزان ذره رسوب کرده را نشان می‌دهد.



شکل (۱): شمایل ساختار دستگاه رسوب گذاری

نحوی داده‌گیری از این دستگاه به این صورت است که ابتدا ستون رسوب گذاری را تا ارتفاع مشخصی از زمینه‌ی مورد نظر پر کرده و سپس ذرات سنگین از بالای ستون داخل آن ریخته شده و با ریختن ذرات سنگین زمان هم گرفته شده است. به علت یکنواخت نبودن توزیع اندازه‌ی ذرات، همه‌ی ذرات همزمان وارد ظرفی که در انتهای ستون قرار دارد، نمی‌شوند و در یک بازه زمانی وارد آن می‌گردند. داده‌های وزنی که با رسوب نشان می‌دهد با ورود اولین ذرات سیلیکاژل به داخل ظرف شروع به تغییر کرده و شدت این تغییر موقعی رخ می‌دهد که آن دسته از ذراتی که حداکثر فراوانی را دارند وارد ظرف شوند و در ادامه شدت تغییرات کاهش می‌یابد. زمان نشستن ذرات با حداکثر فراوانی را می‌توان به عنوان زمان متوسط رسوب گذاری ذرات در نظر گرفت و با داشتن طول ستون رسوب گذاری می‌توان سرعت متوسط رسوب گذاری را بصورت معادله ۱ تخمین زد

$$v = \frac{l}{t} \quad (1)$$

<sup>1</sup> Buoyancy

در این معادله  $\gamma$  تنش سطحی،  $\gamma_{sm}$  تنش بین سطحی یا انرژی چسبندگی،  $d$  نشانگر تنش سطحی پخشی و  $p$  نشانگر قطبی می‌باشند. رابطه‌ی بین انرژی چسبندگی و سرعت ناشی از این انرژی را نیز می‌توان از قانون دوم نیوتون بدست آورد بنابراین طبق قانون دوم نیوتون داریم:

$$\int_{sm} f_{sm} dt = \int_{sm} \frac{\partial \gamma_{sm}}{\partial l} dt = k_{sm} v_{sm} \quad (7)$$

با مشتق‌گیری از معادله‌ی ۷ و انتگرال‌گیری از انرژی چسبندگی می‌توان رابطه‌ی بین انرژی چسبندگی و سرعت ناشی از آن را بدین صورت نوشت:

$$v_{sm} = k_1 \sqrt{\gamma_{sm}} \quad (8)$$

بنابراین با جایگذاری معادله‌ی ۸ در معادله‌ی ۴ می‌توان نوشت:

$$v_t = k_h v_h + k_{sm} k_1 \sqrt{\gamma_{sm}} \quad (9)$$

از آنجا که انرژی چسبندگی انرژی در واحد سطح است با ضرب آن در سطح ذره به انرژی کل وارد بر ذره تبدیل می‌شود که در نهایت معادله ۹ بدین صورت در می‌آید:

$$v_t = k_h v_h + k_i \pi d^2 \sqrt{\gamma_{sm}} \quad (10)$$

در این معادله  $k_h$  و  $k_i$  بترتیب ثابت‌های برهمکنش ذره با محیط و هیدرودینامیک می‌باشند که مستقل از اندازه‌ی ذرات و خواص فیزیکی مواد می‌باشند و معادله نهایی را می‌توان بدین صورت نوشت:

$$v_t = \left( k_h \frac{1}{18 \mu_m} (\rho_s - \rho_m) g + \right. \quad (11)$$

$$\left. k_i \pi \sqrt{\gamma_{sm}} \right) d^2$$

بنابراین با داشتن خواص فیزیکی ذره و محیط و سرعت رسوب‌گذاری ذرات می‌توان اندازه‌ی آنها را تخمین زد.

## ۲-۲- مطالعه ثابت‌های مدل

ذرات به علت نداشتن توزیع اندازه‌ی یکنواخت،

برای بدست آوردن سرعت از نیروهای وارده بر ذره طبق قانون دوم نیوتن می‌توان نوشت:

$$f_i = k_i a_i = k_i \frac{dv_i}{dt} \quad (2)$$

که با انتگرال‌گیری از قانون دوم نیوتن، معادله (۲) را می‌توان به صورت معادله (۳) نوشت

$$\int f_i dt = k_i v_i \quad (3)$$

طبق شکل (۲)، نیروها را می‌توان به سه نیروی ناشی از حرکت هیدرودینامیکی، برهمکنش ذره با محیط و برهمکنش ذرات با هم تجزیه کرد بنابراین داریم:

$$\int_t f_t dt = \int_h f_h dt + \int_{sm} f_{sm} dt + \int_{ss} f_{ss} dt = \quad (4)$$

$$k_h v_h + k_{ss} v_{ss} + k_{sm} v_{sm} = k_t v_t$$

نیروی‌های ناشی از برهمکنش ذرات با هم برای ذرات بسیار ریز و همچنین غلظت‌های بالا از ذرات نمایان می‌شود بنابراین فرض بر این است که ذرات ما بعد کافی بزرگ (بالای ۱۰۰nm) هستند و می‌توان از برهمکنش ذرات برهم صرف نظر کرد. بنابراین در این سامانه فقط نیروهای شناوری، اصطکاک با محیط و نیروهای ناشی از برهمکنش ذره با محیط وجود دارد. سرعت هیدرودینامیک که ناشی از تعادل نیروهای شناوری و اصطکاک است، را می‌توان از معادله‌ی استوک بدست آورد.

$$v_h = \frac{d^2}{18 \mu_m} (\rho_s - \rho_m) g \quad (5)$$

که در اینجا  $d$  بیانگر قطر ذره،  $\mu$  بیانگر ویسکوزیته،  $\rho$  بیانگر چگالی،  $m$  نشانگر زمینه و  $s$  نشانگر ذره می‌باشند.

برهمکنش ذره با محیط را می‌توان به صورت انرژی چسبندگی، از معادله‌ی فوکس تخمین زد [۱۱]. بنابراین طبق معادله فوکس داریم:

$$\gamma_{sm} = \gamma_s + \gamma_m - 2\sqrt{\gamma_s^d \gamma_m^d} - 2\sqrt{\gamma_s^p \gamma_m^p} \quad (6)$$

از طرفی برهمکنش محاسبه شده بین سیلیکاژل و تولوئن کمترین مقدار می‌باشد زیرا که تولوئن زمینه‌ای غیر قطبی می‌باشد و سیلیکاژل قطبی است. اتانول نیز زمینه‌ی بینابین است قطبیت آن بیشتر از تولوئن و کمتر از آب می‌باشد بنابراین باید برهمکنش آن با سیلیکاژل نیز بینابین باشد. داده‌های محاسبه شده از معادله‌ی فوکس برای هر سه زمینه نیز همین روند را نشان می‌دهد بنابراین داده‌های معادله‌ی فوکس منطقی بنظر می‌آیند.

سرعت هیدرودینامیکی ذرات در زمینه ناشی از تعادل نیروهای شناوری و اصطکاک بین دانه و زمینه می‌باشد و نیروی محرکه برای رسوب تحت نیروهای هیدرودینامیکی نیروی گرانش و مانع برای آن نیروی اصطکاک با زمینه است. سرعت هیدرودینامیکی بدست آمده از معادله‌ی استوکس برای دانه‌های سیلیکاژل در زمینه‌های متفاوت در جدول (۴) بیان شده است.

با جایگذاری داده‌های بدست آمده برای برهمکنش دانه-زمینه و سرعت هیدرودینامیکی و سرعت رسوب-گذاری بدست آمده از آزمایش در مدل ارائه شده (معادله ۱۰) می‌توان ثابت های آن را بدست آورد. برای بدست آوردن ثابت‌های مدل باید داده‌های تخمین زده برای سرعت هیدرودینامیکی و برهمکنش ذره-زمینه و داده‌های بدست آمده برای سرعت رسوب گذاری را با مدل تناسب سازی کرد.

جدول (۲): سرعت‌های رسوب گذاری اندازه گیری شده در

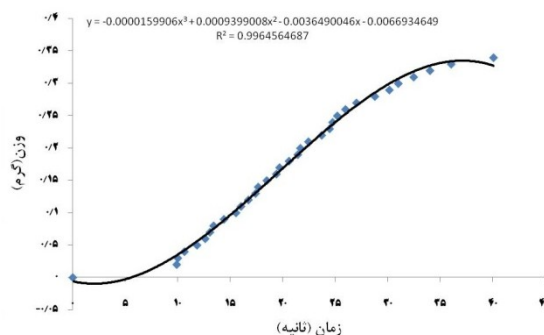
زمینه‌های مختلف

سرعت رسوب گذاری (cm/s)	زمینه
۲/۴۲۴۲	تولوئن
۱/۶۴۶۱	اتانول
۱/۵۳۸۵	آب

جدول (۳): برهمکنش محاسبه شده‌ی سیلیکاژل با زمینه

تنش بین سطحی (dyn/cm)	زمینه
۶/۰۹۱۴	تولوئن
۸/۲۵۴۸	اتانول
۱۶/۰۹۱۹	آب

همزمان به داخل ظرف که در انتهای ستون قرار دارد، نمی‌نشینند و فرآیند نشستن به داخل ظرف در یک بازه زمانی اتفاق می‌افتد. بطور مثال نمودار وزن ذرات سیلیکاژل رسوب کرده به زمان در آب بصورت شکل (۳) می‌باشد. این نمودار بدین صورت است که ابتدا تغییرات وزن با زمان کم می‌باشد و بتدریج تغییرات وزن با زمان افزایش می‌یابد و در انتها دوباره از شدت تغییرات وزن با زمان کاسته می‌شود. نقطه‌ی عطف این نمودار، زمان متوسط رسوب گذاری ذرات در محیط مورد نظر است. با تناسب سازی ۲ داده‌های اندازه گیری از وزن با نمودار درجه سه می‌توان نقطه‌ی عطف داده‌ها و زمان متوسط رسوب گذاری داده‌ها را تخمین زد.



شکل (۳): نمودار وزن ذرات رسوب کرده در انتهای ستون رسوب گذاری با زمان

جدول (۲) سرعت رسوب گذاری در زمینه های متفاوت را نشان می‌دهد. این داده‌ها به روش مذکور تخمین زده شده‌اند و هر داده متوسط بین سه بار آزمایش در هر زمینه است.

برای بدست آوردن برهمکنش دانه‌ها با زمینه از معادله‌ی فوکس استفاده می‌شود. در جدول (۳) داده‌های محاسبه شده از معادله‌ی فوکس برای تخمین برهمکنش دانه با زمینه، بیان شده است. همانطور که مشاهده می‌کنید برهمکنش سیلیکاژل با آب از سایر زمینه‌ها بیشتر است زیرا که سطح سیلیکاژل قطبی می‌باشد و آب نیز زمینه‌ی قطبی است و تنش سطحی هر دو نیز بالا می‌باشد در نتیجه برهمکنش آنها نیز بالا خواهد بود.

<sup>2</sup>Curve fitting

جدول (۴): سرعت هیدرودینامیک آن در زمینه

سرعت هیدرودینامیکی	زمینه
۸/۴۳۹۳	تولون
۴/۸۵۷۹	اتانول
۵/۰۷۹۶	آب

## ۲-۳- تخمین نمودار توزیع اندازه‌ی ذرات

نمودار توزیع اندازه‌ی ذرات نمایانگر جز وزنی به اندازه‌ی ذرات می‌باشد. رابطه‌ی بین سرعت رسوب‌گذاری و اندازه‌ی ذرات را می‌توان از معادله‌ی (۱۱) بدین صورت نوشت

$$v = kd^2 \quad (13)$$

در این معادله  $k$  ثابت می‌باشد و تابع خواص دانه و محیط رسوب‌گذاری می‌باشد. جدول (۵) مقدار عددی  $k$  را برای محیط‌های متفاوت بیان می‌کند.

برای بدست آوردن جز وزنی از نمودار متناسب‌سازی شده با داده‌های خروجی از آزمایش رسوب‌گذاری دانه‌های درشت مشتق می‌گیریم و مشتق در هر نقطه نمایانگر وزن هر جز می‌باشد بنابراین نسبت وزن هر جز به وزن کل، جز وزنی را به ما می‌دهد و با بدست آوردن اندازه‌ی ذرات از معادله (۱۱) و جز وزنی آنها می‌توان نمودار توزیع اندازه دانه‌ها را بدست آورد.

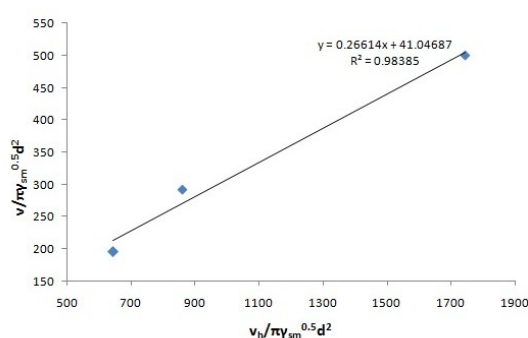
جدول (۵): مقدارهای عددی ثابت سرعت در زمینه‌های مختلف

زمینه	ثابت سرعت
تولون	۱۱۷۸۳
اتانول	۸۱۴۸
آب	۶۹۷۲

همین روند را برای سایر محیط‌ها تکرار می‌شود و نمودار توزیع اندازه‌ی ذرات از نمودار وزن با زمان آنها بدست می‌آید. همان‌طور که در این نمودار می‌بینید هر سه نمودار متوسط اندازه‌ی حدود ۰.۰۲۵ سانتیمتر را برای ذرات تخمین می‌زنند و توزیع مشابه‌ای را برای ذرات بیان می‌کنند.

مزیت‌های این روش نسبت به سایر روش‌ها، پایین بودن هزینه راه‌اندازی ساختار اندازه‌گیری و تخمین، انجام گرفتن محاسبات برای استفاده از سایر حلال‌ها، سریع بودن سرعت آزمایش و اندازه‌گیری دامنه وسیع-تری از اندازه ذرات است.

متناسب‌سازی داده‌ها با مدل ارائه شده در نمودار ۴ بیان شده است در این نمودار  $v/\pi\gamma_{sm}^{0.5}d^2$  را بر حسب  $vh/\pi\gamma_{sm}^{0.5}d^2$  رسم شده است و می‌توان از عرض آن مبدا این نمودار ثابت برهمکنش با زمینه و از شیب آن می‌توان ثابت هیدرودینامیک را بدست آورد.



شکل (۴): نمودار  $v/\pi\gamma_{sm}^{0.5}d^2$  را بر حسب  $vh/\pi\gamma_{sm}^{0.5}d^2$

با بدست آوردن ثابت‌های مدل ارائه شده از آزمایش

مذکور، این مدل بدین صورت در می‌آید

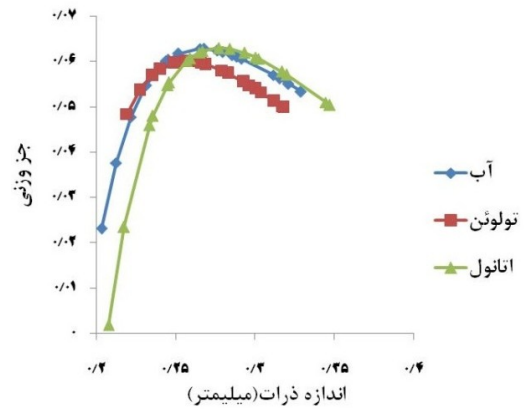
$$v = 0.27v_h + 41.05\pi d^2 \sqrt{\gamma_{sm}} \quad (12)$$

همان‌طور که در مدل بیان شده می‌بینید برهمکنش دانه-زمینه باعث افزایش سرعت رسوب‌گذاری می‌شود زیرا با افزایش برهمکنش بین دانه و زمینه زمان خیس شدن برای دانه کاهش می‌یابد بنابراین برهمکنش دانه با زمینه به رسوب‌گذاری ذرات کمک می‌کند. ثابت‌های بدست آمده در این مدل مستقل از نوع ماده می‌باشند بنابراین می‌توان با داشتن خواص فیزیکی دانه و زمینه سرعت رسوب‌گذاری آن را تخمین زد و یا با داشتن سرعت رسوب‌گذاری برای یک دانه‌ی مجهول و اندازه‌گیری خواص فیزیکی آن اندازه‌ی آن را تخمین زد.

افزایش می‌یابد.

### علائم اختصاری

dyne	نیرو	f
dyne	نیروی هیدرودینامیکی	f <sub>h</sub>
	نیروی ناشی برهمکنش بین ذره و زمینه	f <sub>sm</sub>
dyne		
dyne	نیروی ناشی برهمکنش بین ذرات	f <sub>ss</sub>
g	ثابت قانون دوم نیوتن	k
	ثابت قانون دوم نیوتن برای نیروی‌های هیدرودینامیکی	k <sub>h</sub>
g		
	ثابت قانون دوم نیوتن برای نیروهای ناشی از برهمکنش دزه و زمینه	k <sub>sm</sub>
g		
g	ثابت برهمکنش ذره با محیط	k <sub>i</sub>
	ثابت قانون دوم نیوتن برای نیروهای ناشی از برهمکنش ذرات با هم	k <sub>ss</sub>
g		
cm/s	سرعت	v
cm/s	سرعت هیدرودینامیک	v <sub>h</sub>
	سرعت ناشی از نیروهای برهمکنش ذره-زمینه	v <sub>sm</sub>
cm/s		
	سرعت ناشی از نیروهای برهمکنش ذرات با هم	v <sub>ss</sub>
cm/s		
s	زمان	t
cm	قطر ذره	d
cp	ویسکوزیته زمینه	μ <sub>m</sub>
g/cm <sup>3</sup>	دانشیته زمینه	ρ <sub>m</sub>
g/cm <sup>3</sup>	دانشیته ذره	ρ <sub>s</sub>
cm/s <sup>2</sup>	شتاب گرانش زمین	g
	انرژی سطحی ذره به ازای واحد سطح	γ <sub>s</sub>
dyne/cm		
	انرژی سطحی زمینه به ازای واحد سطح	γ <sub>m</sub>
dyne/cm		
	انرژی سطحی پخشی ذره به ازای واحد سطح	γ <sub>s</sub> <sup>d</sup>
γdyne/cm	p <sub>s</sub>	
	انرژی سطحی قطبی ذره به ازای واحد سطح	
dyne/cm		
	انرژی سطحی پخشی زمینه به ازای واحد سطح	γ <sub>m</sub> <sup>d</sup>
dyne/cm		
	انرژی سطحی قطبی زمینه به ازای واحد سطح	γ <sub>m</sub> <sup>p</sup>



شکل (۵): نمودار توزیع اندازه ذرات بدست آمده از زمینه‌های مختلف

آنچه از نمودار ارائه شده در شکل (۵) قابل مشاهده است این می‌باشد که در محیط‌های قطبی توزیع گسترده‌تری مشاهده می‌شود که دلیل آن می‌تواند برهمکنش بهتر این محیط‌ها با ذرات سیلیکاژل که قطبی می‌باشند، باشد.

### ۳- نتیجه‌گیری

آنچه قابل نتیجه‌گیری است این می‌باشد که ذرات غیر قابل رسوب را می‌توان بر سطح ذرات قابل رسوب نشانند و آنها را رسوب داد. این روش هزینه‌های فرآیندهای صنعتی را کاهش می‌دهد مهمترین عامل در این روش سرعت رسوب‌گذاری است. سرعت رسوب‌گذاری تابع هیدرودینامیک ذره و برهمکنش آن با زمینه می‌باشد.

مدل ارائه شده در این تحقیق اثر برهمکنش ذره-زمینه را بر سرعت رسوب‌گذاری را بیان می‌کند و با استفاده از این مدل می‌توان سرعت رسوب‌گذاری را از خواص مواد مورد و اندازه آن تخمین زد. از سوی دیگر با استفاده از این روش و مدل می‌توان اندازه ذرات را با داشتن خواص سطحی آن تخمین زد.

خروجی دیگر این روش و مدل تخمین نمودار توزیع اندازه ذرات است که با داشتن خواص سطحی و فیزیکی ذره و زمینه می‌توان نمودار توزیع اندازه ذرات را تخمین زد.

در نهایت آنچه از این تحقیق می‌توان نتیجه گرفته شد این است که با افزایش برهمکنش ذره و زمینه سازگاری ذره و زمینه افزایش یافته و زمان خیس‌شدن ذره توسط زمینه کاهش می‌یابد در نتیجه سرعت رسوب‌گذاری

[9] J. Vesaratchanon, A. Nikolov, et al. (2009). "Collective Particle Interactions in the Sedimentation of Charged Colloidal Suspensions." *Industrial & Engineering Chemistry Research* 48: 80–84.

[۱۰] ه. کورکی، (۱۳۸۸) "بررسی اثر برهمکنش پرکننده-پرکننده بر خواص رئولوژیکی پلیمرهای پر شده با نانو سیلیکا"، در دانشکده مهندسی شیمی، تربیت مدرس: تهران.

[۱۱] م. مرتضایی، (۱۳۸۷) "شبیه‌سازی رفتار ویسکوالاستیک پلیمرهای پر شده با درصد بحرانی از ذرات نانو"، دانشکده مهندسی شیمی، تربیت مدرس: تهران

dyne/cm

$\gamma_m^s$  انرژی برهمکنش ذره و زمینه به ازای واحد

dyne/cm سطح

## مراجع

- [1] R. Bürger, K. K. Fjelde, et al. (2001). "Central difference solutions of the kinematic model of settling of polydisperse suspensions and three-dimensional particle-scale simulations." *Journal of Engineering Mathematics* 41: 167–187.
- [2] K. Bessho and C. Degueudre (2009). "Generation and sedimentation of colloidal bentonite particles in water." *Applied Clay Science* 43: 253–259.
- [3] R. Bürger, A. García, et al. (2008). "A family of numerical schemes for kinematic flows with discontinuous flux" *Journal of Engineering Mathematics* 60: 387-425.
- [4] R. Bürger, F. Concha, et al. (2000). "Numerical simulation of the settling of polydisperse suspensions of spheres." *Powder Technology* 113: 30–54.
- [5] P. Wang and A. A. Keller (2009). "Natural and Engineered Nano and Colloidal Transport: Role of Zeta Potential in Prediction of Particle Deposition." *Langmuir* 25(12): 6856–6862.
- [6] V. r. Falk and U. D'Ortona (2002). "A polydisperse sedimentation and polydisperse packing model." *Powder Technology* 128: 229– 235.
- [7] T. phenrat, N. saleh, K. Sirk, R. Tilton and G. L owry, "Aggregation and Sedimentation of Aqueous Nanoscale Zerovalent Iron Dispersions" *Environmental Science & Technology*. 2007, 41, 284-290
- [8] A. S. Kondrat'ev and E. A. Naumova (2008). "Calculation of the Settling Velocity of Particles for the Hindered Sedimentation of Polydisperse Mixtures of Arbitrarily Shaped Solid Particles in a Newtonian Liquid." *Theoretical Foundations of Chemical Engineering* 24(1): 100–105.



## Particle sedimentation: particle-matrix interaction

Hajir Kourki<sup>1</sup>, Mohammad Hossein Navid Famili<sup>2\*</sup>, Mehrzad Mortezaei<sup>3</sup>

1. Ph.D. Student of Polymer Engineering, Tarbiat Modares University.

2. Associate Professor of Polymer Engineering, Tarbiat Modares University.

3. Assistance Professor of Polymer Engineering, Islamic Azad University, South Tehran Branch.

---

### ARTICLE INFO

#### Article history :

Received 3 February 2010

Received in revised form 23 July 2010

Accepted 23 October 2010

#### Keywords:

Sedimentation

Sedimentation Velocity

Particle-Matrix Interaction

Modeling

Particle Size Distribution

---

### ABSTRACT

A major problem in the chemical industries is the separation of waste material produced in the chemical processes. There has been a number of attempts to find a solution to this problem. One of these methods is sedimentation; however, the major drawback of this method is the low velocity of natural sedimentation. By adding particles with larger mass to this system, waste material could be absorbed on their surface and thus increasing the removing rate of the waste material. For this purpose, surface of massive material should be modified for adsorption of the waste material. However, sedimentation velocity is a function of hydrodynamic forces, particle-matrix interaction and particle-particle interaction so that change in surface properties can affect the sedimentation velocity. In this study, a model is developed to predict the effect of particle matrix interaction on sedimentation velocity. A method is also devised to measure sedimentation velocity and to obtain an estimate of particle size distribution. From this study, it is concluded that particle-matrix interaction could be used to increase sedimentation velocity.

---

All rights reserved.

This document was created with Win2PDF available at <http://www.daneprairie.com>.  
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.