بررسی جدایش ذرات در اختلاط جامدات

کیوان شایسته*[1]، جعفر صادق مقدس[1]
۱ـ دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند
پست الکترونیکی: K_Shayesteh2000@yahoo.com

چکیده

کیفیت نهایی یک مخلوط توسط اهمیت نسبی اختلاط و جدایش[1] تعیین می شود. برای اینکه فرآیند اختلاط بهترین نتیجه را بدهد، ضروری است که جدایش ذرات حداقل شود. در این مقاله مروری، عوامل مؤثر در ایجاد پدیده جدایش معرفی و سپس مکانیزم ایجاد آن ارایه خواهد شد. به دنبال آن مفاهیمی همچون شدت جدایش[2] و مقیاس جدایش[3] توضیح داده خواهد شد. ضمناً مروری بر روش های موجود برای اندازه‌گیری جدایش ذرات ارایه می شود. در انتها جهت داشتن مخلوطی باکیفیت خوب، روش های جلوگیری از این پدیده ارایه خواهد شد.

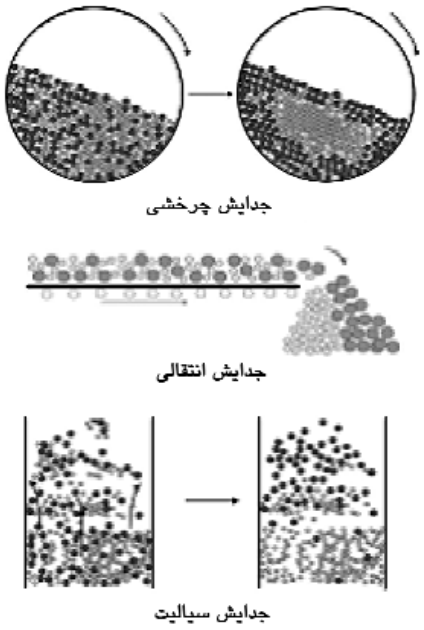
واژگان کلیدی: اختلاط جامدات، جدایش، مکانیزم‌های جدایش، شاخص‌های جدایش، روش‌های کاهش جدایش

مقدمه

در یک مخلوط وقتی یکی از اجزاء در یک مقیاس ماکروسکوپی انباشته و به‌طور موضعی متمرکز شود، جدایش اتفاق می افتدکه در واقع یک فرآیند جداسازی است [۱]. به عبارتی جدایش از به دست آمدن یک مخلوط کامل جلوگیری می‌کند[۲]. چند نمونه صنعتی از اختلاط جامد و نیز مشکلات درست مخلوط نشدن، در منابع ارایه شده است [۳]. این پدیده معمولاً در بسیاری از فرآیندهای صنعتی در حین چرخش، انتقال، شناور سازی[4] و غیره مشاهده شده و همواره همراه با اختلاط ذرات رخ می‌دهد[۵,۴]. در شکل (۱) بعنوان نمونه سه مثال صنعتی متفاوت از پدیده جدایش ذرات آورده شده است.

کیفیت نهایی مخلوط، زمانی حاصل می شودکه اختلاط و جدایش به تعادل برسند[۵,۴]، یعنی:

اختلاط ⇔ جدایش



شکل(۱): مثال‌های صنعتی از جدایش [۴]

1-Segregation
2-Intensity of Segregation
3-Scale of Segregation
4-Fluidization

کیفیت اختلاط در یک مخلوط کن به طور مستقیم به این تعادل دینامیکی بستگی داشته و به همین علت، وابستگی زیادی به ترکیبات سازنده مخلوط دارد[۲]. علل زیادی برای ایجاد پدیده جدایش وجود داردکه عبارتند از[۸,۶,۴,۲]:

- تفاوت در اندازه ذرات
- تفاوت در دانسیته
- تفاوت در شکل
- تفاوت در خاصیت ارتجاعی ذرات

هرکدام از این تفاوت‌ها می‌تواند دلیلی بر جدایش ذرات در محصول اختلاط باشد. اما همه مدارک موجود نشان می‌دهندکه تفاوت در اندازه ذرات، مهم‌تر از بقیه است [۸,۴,۲]. نقش دانسیته و اندازه ذرات روی جدایش موادگرانولی در اثر ارتعاش، در منبع [۹] ارایه شده است.

مکانیسم‌های جدایش ذرات

مکانیسم‌های اختلاط و جدایش به میزان زیادی متناسب با رفتار و خصوصیات ذرات می‌باشد. به همین دلیل برای رسیدن به یک اختلاط مناسب، آگاهی از رفتار و خصوصیات ذرات تشکیل دهنده مخلوط امری ضروری می‌باشد[۵]. به عبارتی اساس مکانیسم‌های اختلاط و جدایش یکی است [۵,۱]. در اختلاط میزان یکنواختی جزء مورد نظر در مخلوط نهایی مهم بوده اما در جدایش موقعیت‌گونه‌های جدا شده موضوع اصلی است [۵].

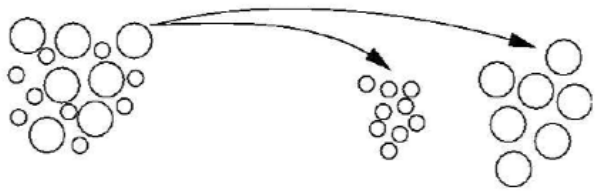
مکانیسم‌های جدایش شامل نفوذ[1]، تنش برشی و کنوکسیون می‌باشد. این پدیده را می‌توان به وسیله خصوصیات فیزیکی ذرات، ابعاد ظرف و عملکرد مخلوط کن کنترل کرد[۵,۱]. ویژگی‌های جریان پودر نیز تأثیر اساسی بر روی مکانیسم‌های اختلاط و جدایش دارند[۵]. درشکل (۲) نشان داده شده است‌که با اعمال نیروی برشی در نهایت می‌توان یک سیستم‌کاملاً تفکیک شده راکه ذرات ریز در بالا و ذرات درشت در پایین قرار دارد را معکوس‌کرد.

در تحقیقاتی‌که ویلیامز[2] در مورد جدایش ارایه داد، مکانیسم‌های جدایش را به ۳ دسته تقسیم‌بندی کرد‌که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود[۸,۴,۲,۱].

جدایش پرتابه‌ای[3]

فاصله توقف(s) یک ذره به قطر d و چگالی ρکه به طور افقی در یک سیال با ویسکوزیته μ پرتاب شود، فاصله‌ای است‌که ذره به طور افقی می‌پیماید. این فاصله برابر است با[۴,۲,۱]:

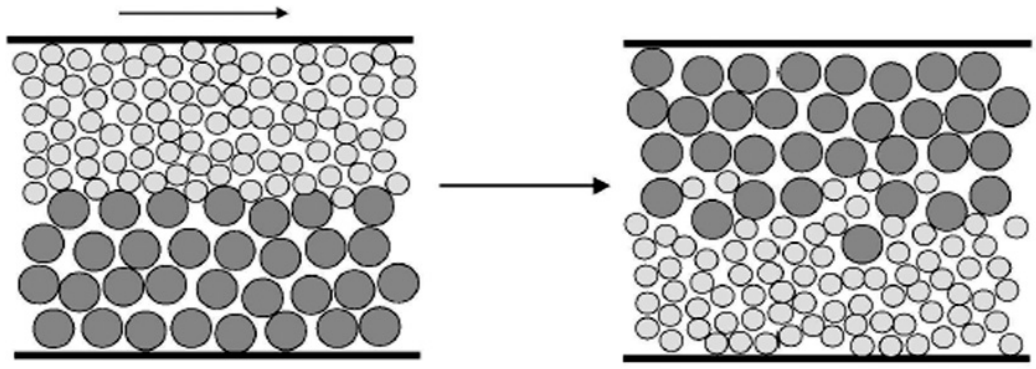
$$s = v\rho d^{2}/18\mu \qquad (1)$$



شکل(۳): شمایی از مکانیزم جدایش پرتابه‌ای [۴]

به عنوان مثال، جدایش پرتابه‌ای زمانی رخ می‌دهدکه توده‌ای از ذرات از یک انتقال دهنده تسمه‌ای جدا می‌شوند. بر اساس این معادله اگر اندازه ذره‌ای ۲ برابر ذره دیگر باشد، این ذره ۴ برابر ذره‌کوچک‌تر مسافت طی می‌کند. اما اگر ذره چگالیش ۲ برابر بزرگ‌تر باشد فقط ۲ برابر بیشتر، مسافت طی خواهدکرد[۴,۱].

این مکانیسم جدایش می‌تواند در یک مخلوط کن‌که در آن مکانیسم غالب، حرکت توده‌ای است، اتفاق افتد[۸]. در شکل (۳) این مکانیزم ارایه شده است.

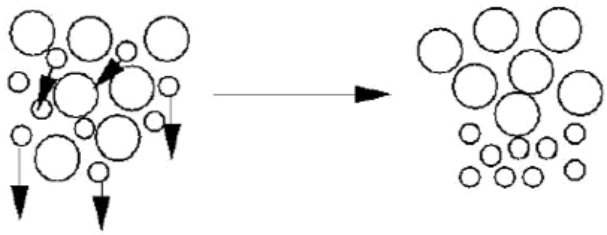


شکل(۲): نمونه‌ای از جدایش در اثر نیروی برشی [۴]

1 - Percolation
2-Williams
3 - Trajectory Segregation

جدایش در اثر نفوذ

این مکانیسم در سیستم‌های گرانولی به خاطر تفاوت در اندازه رخ می‌دهد. در سیستمی شامل ذرات با اندازه‌های متفاوت، یک ذره به وسیله بستری از ذرات احاطه می‌شود. هنگامی‌که جریانی در بستر جامد ایجاد می‌شود، در صورت توسعه‌کم بستر، اتفاق خاصی از لحاظ جدایی ذرات مشاهده نمی‌شود اما در صورت توسعه زیاد بستر ذرات بزرگ‌ترکه نقش نگهدارنده ذرات‌کوچک را به عهده داشته از همدیگر فاصله‌گرفته‌که در نتیجه آن حفراتی در بستر، جهت عبور ذرات‌کوچک‌تر ایجاد شده و باعث حرکت آن‌ها به سمت ته ظرف می‌شود. درواقع برای ذرات‌کوچک‌تر یک حرکت رو به پایین وجود دارد و بدین وسیله جدایش اتفاق می‌افتد[۸,۴,۱]. در شکل(۴) این مکانیزم نشان داده شده است.

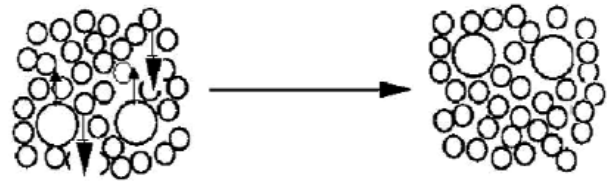


شکل (۴): شمایی از مکانیسم جدایش در اثر نفوذ [۴]

حرکت ذرات‌کوچک در میان بستری از ذرات بزرگ از بالا به پایین با کنوکسیون و حرکت برشی عجین شده است [۸,۲]. برای اینکه جدایش در اثر نفوذ رخ دهد لازم نیست تفاوت اندازه ذرات زیاد باشد، حتی یک تفاوت ناچیز در اندازه ذرات نیز می‌تواند سبب ایجاد یک جدایش قابل قبول به واسطه این مکانیزم شود.

صعود ذرات بزرگ در اثر لرزش[1]

این مکانیسم وقتی ذرات جامد در اندازه‌های مختلف به ارتعاش در می‌آیند، اتفاق می‌افتد[۲]. هنگامی‌که یک سیستم‌گرانولی با اندازه‌های متفاوت ذرات، لرزانده شود، مطابق با شکل(۵)، طبیعی است‌که ذرات بزرگ به خاطر قرارگرفتن ذرات‌کوچک‌تر در قسمت تحتانی آن نتوانند به سمت پایین حرکت‌کنند اما در اثر حرکت ذرات درشت، ذرات‌کوچک به زیر



شکل(۵): مکانیسم صعود ذرات در اثر ارتعاش [۴]

1- The rise of coarse particles on vibration

ذرات بزرگ رفته و سرانجام ذرات بزرگ به سطح رانده می‌شوند[۳,۱، ۷]. حتی اگر ذرات بزرگ‌تر، چگال‌تر از ذرات‌کوچک‌تر باشند نیز این پدیده رخ می‌دهد .در حقیقت چگالی ذرات بزرگ‌تر به صعود آسان‌تر آن‌ها کمک می‌کند[۸,۷,۲].

تأثیر متغیرهای مؤثر در جریان پودر روی جدایش

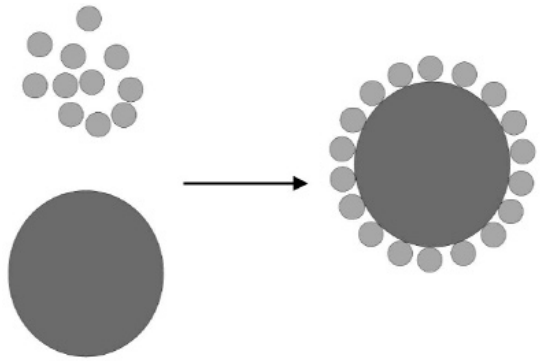
۱- اندازه ذرات یک متغیر مهم در تعیین ویژگی‌های جریان پودر است و تجربه نشان می‌دهدکه:

الف) در موادی با اندازه بزرگ‌تر از ۷۵μm، جدایش اتفاق می‌افتد.

ب) در اندازه‌کمتر از ۷۵ μm، شدت جدایش کاهش پیدا می‌کند اما تا حدود ۱۰μm، هنوز قابلیت جدا شدن اجزاء در مخلوط وجود دارد.

ج) در اندازه‌کمتر از ۱۰ μm، پدیده جدایش ملاحظه نمی‌شود.

۲- علاوه بر اندازه ذرات، خواص مخلوط نیز می‌تواند بر ویژگی‌های جریان پودر اثرگذار باشد. مثلاً افزودن‌کمی رطوبت به مخلوط می‌تواند قابلیت جدایش راکاهش دهد. اگر در مخلوطی با اجزای بزرگ یکی از اجزاء خیلی کوچک باشد ذرات ریز می‌توانند ذرات بزرگ را بپوشانند و بنابراین ذرات ریزتر، آزادی عمل خود را از دست داده و یک مخلوط با قابلیت جدایش پایین وکیفیت اختلاط بالا به دست می‌آید[۵,۲]. این امر در شکل(۶) بطورکیفی نشان داده شده است.



شکل(۶): تأثیر اختلاف زیاد اندازه ذرات در ممانعت از جدایش [۴]

جدایش در مخلوط‌های چسبنده[2]

در مخلوط‌های چسبنده، ییپ[3] و هرسی[4] دو نوع جدایش راگزارش کردند[۱۰]:

۱- جدایش در مخلوط چسبنده زمانی اتفاق می‌افتدکه بتوان توسط عمل مکانیکی، ذرات مستقل از یکدیگر[5] ایجادکرد یعنی در پودرهای چسبنده با اعمال نیروی‌کافی سبب شکستن پیوند بین دو سازنده شد. در این موارد به طور عمده جدایش توسط تفاوت‌هایی در اندازه و دانسیته ایجاد می‌شود.

۲- در صورتی‌که در پودرهای چسبنده، چسبندگی به صورت خود

2-Cohesive powders
3-Yip
4-Heresy
5- Free Flowing Powders

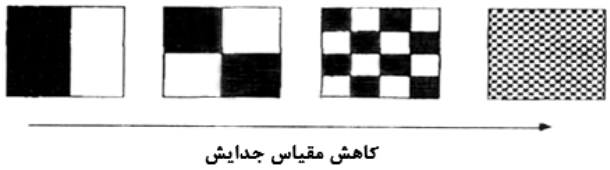
دوستی خیلی قوی باشد نیز جدایش اتفاق می‌افتد.

مفهوم شدت جدایش و مقیاس جدایش

جهت تعیین جدایش در مخلوط‌ها، شاخص‌هایی نظیر شدت جدایش و مقیاس جدایش مورد استفاده قرار می‌گیرند. شدت جدایش، انحراف ترکیب نمونه از مقدار میانگین را گویند. در واقع انحراف استاندارد میان نمونه‌ها با حالت میانگین است[۱۲,۴].

دانک ورت[1] برای یک مخلوط مقیاس جدایش را وابسته به عمل اختلاط دانسته و این‌گونه بیان کرد[۱۲,۴]:

ماکزیمم اندازه منطقه‌ای که جدایش در آن قابل مشاهده است. به عنوان مثال در بحث رنگ ورقه‌های پلیمری، چشم انسان قادر است گوناگونی رنگ در منطقه‌ای بزرگ‌تر از $1\ mm^2$ را تجزیه وتحلیل کند. در این جا $1\ mm^2$ معیاری برای مقیاس جدایش برای پخش رنگ می‌باشد. بنابراین اگر اختلاط به خوبی صورت گیرد آنگاه مقیاس جدایش کوچک‌تر خواهد شد وبالعکس. ضمناً با افزایش ترکیب نسبی خوراک، احتمال جدایش افزایش می‌یابد[۴]. مفهوم مقیاس جدایش در شکل(۷) نشان داده شده است :



شکل(۷): شماتیکی از مفهوم مقیاس جدایش [۲]

اندازه گیری شدت جدایش

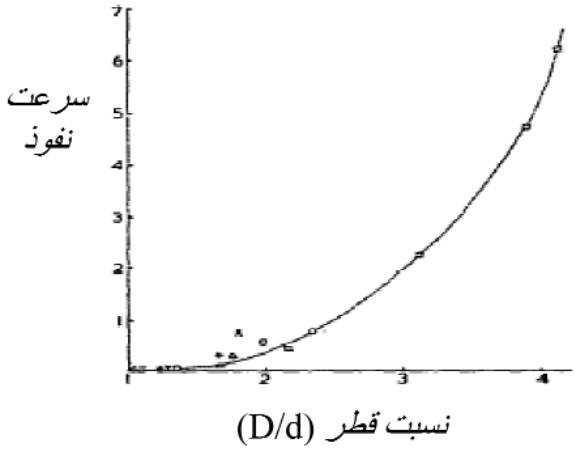
مطالعه مکانیسم‌های جدایش اولین بار توسط دونالد[2] و رزمن[3] گزارش شدکه اثر مخلوط ذرات با اندازه‌ها و دانسیته‌های مختلف را در یک استوانه افقی دوار مورد بررسی قرار گرفت. در جدایش شعاعی، ذرات ریزتر یا چگال تر در مرکز هسته و ذرات بزرگ تر یا با چگالی کمتر در اطراف آن متمرکز می‌شوند. ذرات ریزتر یا ذرات چگال تر از لایه سطحی با تنش زیاد عبورکرده و در حالت نسبتاً ساکنی در مرکز متمرکز می‌شوند[۱۳].

بور[4] و کمپبل[5]، جدایش را در استوانه افقی دوار بررسی کردند. آزمایش‌های آن‌ها در یک مخلوط دوجزئی از ذرات با نسبت قطر بالای ۱/۴ انجام گرفت. آن‌ها نشان دادندکه جدایش قابل اندازه گیری، برای اختلاف اندازه‌های خیلی کوچک هم رخ می‌دهد[۱۴]

ویلیام[6] و شیلد[7]، جدایش را هنگامی که جریانی از ذرات شامل یک مخلوط با دو اندازه که به طور پیوسته به صورت لرزان خوراک دهی می‌شدند را مورد بررسی قرار دادند. هدف اصلی آن‌ها تعیین شرایطی بود که مقدار ماکزیمم جدایش رخ می‌دهد. بزرگ‌ترین مقدار جدایش به دست آمده هنگامی که جهت ارتعاش در ۳۰ درجه محور افق بود، رخ می‌داد. بیشترین شتاب ۶ر۶ برابر شتاب جاذبه و مؤلفه عمودی این شتاب ۵ر۴ برابر شتاب جاذبه بود[۱۵].

کمپ‌بل و بریج‌واتر[8] یک سری از آزمایش‌هایی را مطرح کردند و هدف آن‌ها نشان دادن این موضوع بود که تنش برشی در جریانی از پودر به تنهایی می‌تواند سبب ایجاد جدایش شود. در ضمن آن‌ها نشان دادندکه در ذرات کروی دارای اندازه یکسان اما چگالی متفاوت، نفوذ قابل مشاهده نیست. در واقع این موضوع نشان می‌دهدکه تفاوت در دانسیته نسبت به تفاوت در اندازه تأثیر کمتری بر مقدار نفوذ دارد. این مکانیسم زمانی که الگوی تنش برشی افقی باشد بیشتر اتفاق می‌افتد[۱۶].

اسکات[9] و بریج‌واتر سرعت نفوذ ذرات کوچک را از میان بستری از ذرات تقریباً بزرگ در یک نمونه برشی ساده به طوری که به بستر تنش برشی مشابهی اعمال شود، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتندکه تفاوت در اندازه ذرات در بیشتر موارد سبب نفوذ می‌شود[۱۷]. تأثیر نسبت اندازه ذرات در شکل(۸) نشان داده شده است :



شکل(۸): تأثیر نسبت قطر ذره بر سرعت نفوذ در یک سلول برشی ساده [۱۷]

اگر تفاوت در اندازه قطر ذرات فقط در حدود ۳درصد باشد می‌توان سرعت نفوذ قابل اندازه‌گیری را مشاهده کرد.

سوگیموتو[10] و یاماموتو[11] از روشی مشابه روش کمپ‌بل و بریج‌واتر، به بستر ذرات اجازه حرکت رو به پایین در یک کانال عمودی با مقطع عبوری مستطیلی را دادند. در این آزمایش دیوارها صاف و الگوی حرکت ذرات بصورت قالبی[12] در نظرگرفته شد. آن‌ها مقداری ردیاب به خوراک ورودی اضافه کردند و سپس تأثیر اندازه و دانسیته متفاوت را با آنالیز نفوذ ردیاب مورد بررسی قرار دادند. نسبت متوسط جابه‌جایی ذرات ردیاب و ذرات بستر با استفاده از فیت کردن نتایج تجربی به صورت رابطه زیر حاصل

1-Danckwert 2-Donald 3-Reseman
4-Bouer 5-Campbell 6-William 7-shield
8-Campbell & Bridgwater 9-Scott 10-Sugimoto
11-Yamamoto 12-Plug

گردید:

$$X_T / X_B = 0.8(\rho_T / \rho_B) + 1.2(D_B / D_T)^n - 1 \qquad (۲)$$

که در آن X نشان دهنده جابه‌جایی و زیرنویس‌های T و B به ترتیب مربوط به ردیاب و بستر ذرات می‌باشند. اگر قطر ذرات ردیاب کوچک‌تر از ذرات بستر باشند n=۱ و اگر ذرات ردیاب بزرگ‌تر باشند n=۲ می‌باشد. نتایج مشاهده شده در این آزمایش با نتایجی که کمپ‌بل و بریج‌واتر به دست آوردند سازگاری خوبی دارند[۸].

هریس[1] وهیلدون[2] درجه جدایش،S، را مطابق مدل زیر تعریف کردند[۱۸]:

اگر بخش‌هایی از هر جزء در ۴ نمونه متناسب با α_1و α_2 وα_3 و α_4 باشد، به طوری‌که:

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 = 100 \qquad (۳)$$

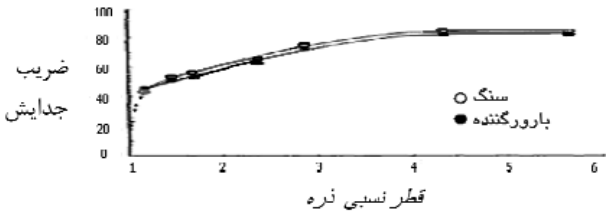
بنابراین:

$$S = \sum_{n=1}^{4} |\alpha_n - 25| \qquad (۴)$$

مقدار S از ۰ (هنگامی‌که همه نمونه‌ها دارای موقعیت یکسان باشند به عبارتی یکنواخت باشند) تا ۱۵۰ (هنگامی‌که فقط یک نمونه کاملاً خالص و بقیه فاقد جزء مورد نظر باشد) تغییر می‌کند[۱۸,۲]. ویلیام وکان[3] از تکنیک خاصی برای تعیین جدایش یک مخلوط دوجزئی استفاده کردند. این مخلوط درون یک استوانه قرار می‌گیرد و در حین چرخش، ذرات درشت به سمت سطح بالایی رفته و ذرات ریز به سمت پایین حرکت می‌کنند. مخلوط سپس به دو قسمت تقسیم می‌شود و از موقعیت دو نیمه برای محاسبه ضریب جدایش(C_S) استفاده می‌شود[۱۹].

$$C_s = ((W_{CT} - W_{CB}) / (W_{CT} + W_{CB})) * 100\% \qquad (۵)$$

که W_{CT} نسبت ذرات بزرگ در نیمه بالایی و W_{CB} نسبت ذرات بزرگ در نیمه پایینی می‌باشد. هنگامی‌که جدایش وجود ندارد C_S صفر است و وقتی همه اجزاء از هم تفکیک می‌شوند برابر با ۱۰۰ خواهد بود[۱۹,۲]. برای سیستم‌های دوتایی وقتی اندازه متوسط ذرات ثابت باشد، با افزایش نسبت قطر ذرات، ضریب جدایش افزایش می‌یابد. مطابق شکل (۹) این افزایش تا نسبت قطر ۳٫۴ ادامه داشته و بعد از آن ثابت خواهد شد[۱۹].



شکل (۹): تأثیر نسبت قطر ذره با ضریب جدایش [۱۹]

برای مخلوط‌های دو جزیی در صورتی‌که نسبت قطر ذرات ثابت باشد با افزایش قطر متوسط ذرات ضریب جدایش افزایش می‌یابد. همان‌گونه‌که در شکل(۱۰) ملاحظه می‌شود وقتی قطر متوسط ذرات از ۵۰۰ میکرون بیشتر انتخاب گردد، ضریب جدایش ثابت خواهد ماند.

بحث و نتیجه گیری

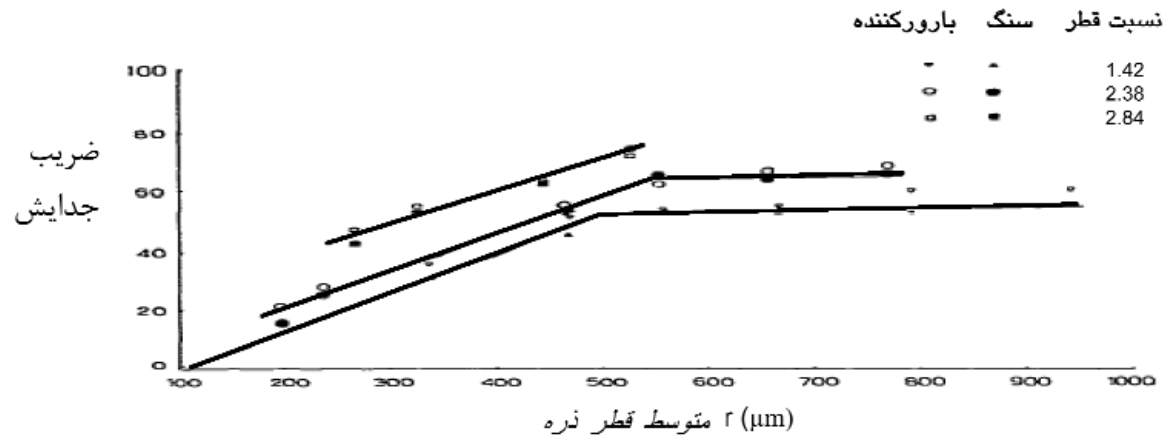
کیفیت نهایی یک مخلوط توسط اهمیت نسبی دو مکانیسم اختلاط و جدایش تعیین می‌شود. برای این‌که فرآیند اختلاط بهترین نتیجه را بدهد، ضروری است که جدایش کاهش پیدا کند[۴]. فاکتورهای مؤثر بر جدایش عبارتند از[۲]:

۱- نوع مخلوط‌کن

۲- اضافه‌کردن افزودنی‌ها

۳- خصوصیات پودر

روش‌های کاهش جدایش تا حد زیادی تجربی هستند. راه‌های کاهش



شکل(۱۰): تغییرات ضریب جدایش با قطر متوسط ذرات [۱۹]

1-Herris 2-Hildon 3-William & Khan

جدایش عبارتند از:

۱ـ زمانی که جدایش به خاطر تفاوت در اندازه رخ می‌دهد، استراتژی کاهش جدایش این است که تا حد امکان اندازه ذرات را به یکدیگر نزدیک ساخت. یکی از روش‌های مهم، گرانول سازی[1] می‌باشد. این تکنیک جهت کم کردن اختلاف اندازه ذرات از یکدیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد و به طور وسیعی در صنایع دارویی کاربرد دارد[۷,۴].

۲ ـ افزودن مقدار کمی رطوبت به سیستم باعث کاهش میزان حرکت نسبی ذرات شده و ممکن است سبب کاهش جدایش در مخلوط نهایی شود. این تکنیک هم به طور وسیعی در صنایع دارویی به‌کار می‌رود[۷,۴]. در آزمایشی جهت تحقیق در مورد تأثیر اضافه‌کردن آب بر روی جدایش در مخلوط ذرات مستقل از یکدیگر، اضافه کردن آبی معادل ۲ درصد وزن نمونه، منجر به کاهش ضریب جدایش از ۷۰ درصد به کمتر از ۱۰ درصد شده است.

از اختلاط مواد در مخلوط کن‌های گردنده[2] هم نتایج مشابه به دست آمده که با اضافه کردن آب حدود ۱ درصد وزن نمونه، انحراف استاندارد ترکیب نمونه از ۳۰ درصد به کمتر از ۵ درصد کاهش می یابد[۸].

۳ـ آزادی نسبی حرکت بین ذرات، معمولاً جهت ایجاد جدایش لازم است. بنابراین معمولاً حرکت نسبی بین ذرات باید به نفع عملکرد اختلاط هدایت شود. کاهش حرکت توده‌ای ذرات، سبب کاهش فرآیند اختلاط و نیز جدایش ذرات می‌شود بنابراین جهت بهبود اختلاط، حالت بهینه‌ای باید تعیین شود[۴].

۴ـ اگر اختلاف اندازه اجزاء خیلی متفاوت باشد، ذرات کوچک سطح ذرات بزرگ را می‌پوشانند و جدایش کاهش یافته بنابراین مخلوط می‌تواند به همگنی بیشتری برسد[۴].

همچنین اجتناب از لرزش، کوتاه کردن فاصله سقوط و گذاشتن چندین انشعاب در ورودی‌های جریان، باعث کاهش جدایش می‌شود[۱].

1-Granulation 2-Tumbler mixer

مراجع

[1] K.Gotoh, H.Masuda, K.Hingashitani, Powder Technology Handbook, 2006, Marcel Dekker Inc.

[2] M.Poux,P.Fayolle , J. Bertrand , D.Bridoux , J.Bousquet, Powder Mixing : Some Particle Rules Applied to Agitated Systems, Powder Technology, vol 68, 213-234, 1991

[۳] شایسته،کیوان و مقدس، جعفرصادق، بررسی اختلاط جامدات، مجله مهندسی شیمی ایران، ۱۳۸۶

[4] H.Li, Impact of Cohesion Forces on Particle Mixing and Segregation, Ph.D Thesis, University of Pittsburgh, 2005

[5] N.Harnby, M.F.Edwards, A.W.Nienow, Mixing in the Process Industries, Second Edition, 1997 P.P.

[6] E.Ollerenshaw,Impact Mixing of Free Flowing Solids, Ph.D thesis, Department of Chemical Engineering The University of Queensland

[7] H.J.Venables, J.I.Wells, Powder Mixing, Drug Development and Industrial Pharmacy, 27(7), 599-612, 2001

[8] J.C.Williams, The Segregation of Particulate Materials. A Review, Powder Technology, 15,245-251, 1976

[9] S.C. Yang , Density Effect on Mixing and Segregation Processes in a Vibrated Binary Granular Mixture , Powder Technology, Volume 164, Issue 2, 2006, 65-74.164(2)

[10] C.W.Yip, J.A.Hersey, Ordered Powder Mixing, Nature,262,202-203,1976

[11] N.Harnby, The Handling and Distribution of Granular FertilizerJ.Agr.Food Chem., 21, 1,78,1973

[12] P.V.Danckwerts, The Definition and Measurement of Some Characteristics of Mixtures, Appl.Sci.Res., A3,279,1952

[13] M.B.Donald, B.Roseman, Mechanisms in a Horizontal Drum Mixer, Br.Chem.Eng. 7,749-753,1962

[14] H.Campbell,W.C.Bauer, Cause and Cure of Demixing in Solid-Solid Mixers, Chem.Eng., 73,179,1966

[15] J.C.Williams, G.Shields, The Segregation of Granulation in a Vibrated Bed, Powder Technology, 1,134-142,1967

[16] A.P.Campbell,J.Bridgwater, Mixing of dry solids by percolation, Trans.Inst.Chem.Eng.,51,72,1973

[17] A.M.Scott , J.Bridgwater, Interparticle percolation-fundamental solids mixing mechanism, Ind.Eng. Chem.Fundam.,14,22,1975

[18] J.F.G.Harris, A,M,Hildon, Reducing Segregation in binary powder mixtures with particular reference to oxygenated washing powders, Ind.Eng.Chem.Process Des.Dev.,9,363,1970

[19] J.C.Williams , M.I.Khan, The mixing and Segregation of particulate solids of different particle size,Chem.Eng.London,296,19,197

[20] L.M.Popplewell, O.H.Campanella, M.Peleg, Theoretical comparison of two indices for binary powder mixtures, Powder Technology, 58, 55, 1989

[21] J. R. Too, L. T. Fan, R. M. Rubison and F. S. Lai, Applications of nonparametric statisitcs ot multicomponent solids mixing, Powder Technology, Volume 26, Issue 2, Pages 131-146,1980