بررسی اختلاط در جامدات

کیوان شایسته[۱و۲*]، جعفر صادق مقدس[۱]

۱- دانشگاه صنعتی سهند، دانشکده مهندسی شیمی

۲- دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده فنی، گروه مهندسی شیمی

پست الکترونیکی: **K_shayesteh2000@yahoo.com**

چکیده

هدف از اختلاط، رسیدن به محصولی با کیفیت قابل قبول و یا کنترل سرعت‌های انتقال حرارت، انتقال جرم و واکنش شیمیایی می‌باشد. اولین بخش این مقاله مروری، معرفی جایگاه اختلاط جامدات در صنایع می‌باشد. در بخش دوم، مکانیزم‌های اختلاط جامدات مورد بررسی قرار گرفته و به دنبال آن پدیده جدایش ذرات[۱] که تعیین‌کننده موفقیت فرایند اختلاط جامد بوده مختصراً مورد بحث قرار می‌گیرد. مبحث بعدی، بررسی انواع مخلوط‌ها و نیز ارزیابی آنها می‌باشد. در خاتمه بطور مختصر اصول نمونه‌برداری و نحوه انتخاب مخلوط‌کن مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

کلمات کلیدی: اختلاط جامدات، جدایش ذرات، مکانیزم اختلاط، جامدات، شاخص‌های اختلاط، مخلوط‌کن‌های سیستم جامد

مقدمه

هدف از همزدن یا اختلاط بین فازها، رسیدن به یکنواختی کامل بین اجزیی است که لازم است با همدیگر مخلوط شوند[۱و۲]. فرایند اختلاط جامد در صنایع مختلف از جمله صنایع غذایی، دارویی، معدنی، ساختمانی و... کاربرد گسترده‌ای دارد[۳]. به عنوان مثالی از صنایع دارویی، می‌توان به فرایند تولید قرص اشاره نمود. معمولاً ۵ تا ۱۰ جزء، یک قرص را می‌سازد. هر جزء خاصیت منحصر بفردی ایجاد می‌نماید. حال اگر اختلاط به خوبی صورت نگیرد ممکن است یک قرص نسبت به جزء یا اجزایی، از ترکیب درصد کمتری نسبت به حد مجاز برخوردار گردد و در نتیجه نسبت جزء یا اجزای دیگر، حاوی مقداری بیش از حد مجاز شود. در صورت ناکافی بودن یک جزء، خاصیت آن جزء به بیمار منتقل نمی‌شود؛ به عبارتی ساده دارو تأثیر مطلوب را بر بیمار نخواهد داشت. در ضمن اگر جزئی بیش از حد مجاز باشد مصرف‌کننده ممکن است دچار عوارض جانبی گردد[۴].

خیلی از مواد غذایی نظیر نان، کیک و شیرینی، پودرهای آماده مواد غذایی و... نتیجه اختلاط چندین جزء می‌باشند. قطعا کیفیت نامطلوب اختلاط، روی کیفیت ماده غذایی مؤثر خواهد بود. نکته جالب توجه وجود اجزایی است که ممکن است در حد PPM در مخلوط مورد نیاز باشند. در این مواقع حساسیت فرایند اختلاط به مراتب افزایش می‌یابد[۴،۵،۶].

در بحث جیره غذایی دام و طیور که از اجزای متعددی تشکیل

1. Segregation

شده‌اند، قطعاً اختلاط ناکافی اجزاء، اثرات نامطلوبی روی منحنی رشد دام و طیور خواهد داشت. تولید دان پلت[1] به عنوان جیره غذایی طیور، جهت بالا بردن کیفیت اختلاط، روش مناسبی می‌باشد[۴،۷].

به عنوان مثالی از صنایع معدنی، اختلاط ترکیب مشخصی از سنگ آهک، سیلیس، ... منجر به تولید نمونه‌های مختلف سیمان می‌شود که این اختلاط باید در فاز جامد و قبل از کوره دوار صورت گیرد. بنابراین، نمونه‌گیری و اختلاط در این فرایند، بسیار حائز اهمیت می‌باشد. صنایع تولید شیشه، چینی، کاشی و... به نوعی با این بحث در ارتباط می‌باشند.

در این مقاله، هدف، بررسی اختلاط جامد- جامد می‌باشد. به دلیل پیشرفت‌های گسترده تئوری و عملی در خصوص اختلاط مایع، جهت روشن شدن بیشتر جایگاه بحث، تفاوت عمده اختلاط جامد- جامد با اختلاط مایع را می‌توان بصورت زیر بیان نمود [۸،۹،۳]:

- نفوذ مولکولی در سیستم جامد- جامد نسبت به مایع و گاز قابل اغماض است. به عبارتی عدم یکنواختی در سیستم سیال در یک زمان طولانی منجر به یکنواختی خواهد شد. در صورتی که در سیستم جامد-جامد بدلیل ناچیز بودن نفوذ مولکولی اگر به مخلوط جامد- جامد انرژی مکانیکی داده نشود حرکت نسبی بین ذرات بوجود نمی‌آید.
- در سیستم‌های پودری کوچکترین جزء مخلوط، ذره است که با مولکول در سیستم‌های مایع و بطور کلی سیال مقایسه می‌گردد. اگر چند مولکول متفاوت مایع با همدیگر مخلوط شوند، توزیع تصادفی[2] ملکول‌ها منجر به مخلوطی یکنواخت خواهد شد؛ در صورتی که در اختلاط جامد نتیجه توزیع تصادفی چند نوع ذره متفاوت، مخلوطی یکنواخت نمی‌باشد. دلایل متعددی جهت توجیه این تفاوت وجود دارد. اول اینکه ذره که به عنوان کوچکترین جزء پودر می‌باشد از تعداد زیادی مولکول تشکیل شده است. اینک سؤالاتی می‌توان مطرح نمود. آیا ذراتی از یک نوع پودر کاملاً مثل هم می‌باشند؟ آیا ناخالصی‌ها سبب تفاوت بین ذرات در یک پودر منفرد نخواهند شد؟ در جامدات گرانولی نیز این بحث بطور جدی‌تر مطرح می‌باشد. مشخصات فیزیکی یک گرانول معمولاً در یک محدوده بیان می‌شود، لذا دلیلی ندارد که تمام ذرات پودر منفرد مثل هم باشند. البته دلیل بسیار مهمتر، مفهوم توزیع تصادفی در اختلاط جامد می‌باشد که متفاوت با توزیع ایده‌ال است. به عبارتی نتیجه توزیع تصادفی منجر به یکنواختی کامل مخلوط پودر جامد نخواهد شد که در این مقاله بطور دقیق به آن پرداخته می‌شود. جهت روشن شدن موضوع، شش نمونه از یک مخلوط کاملاً هم خورده سیاه وسفید که غلظت جزء سیاه پنج درصد می‌باشد انتخاب و نتایج آنالیز در شکل (۱) ارائه شده است.

وجود تفاوت‌هایی نظیر اندازه، دانسیته و شکل ذرات جامد نیز باعث ایجاد پدیده جدایش ذرات از همدیگر در داخل مخلوط کن می‌شود که بنابراین، مخلوط از مخلوط ایده‌ال بیشتر دور خواهد شد.

انواع مخلوط جامد

مخلوط‌های جامد به ۲ گروه کلی تقسیم می‌شوند:

- مخلوط‌های با ذرات مستقل از یکدیگر[3]
- مخلوط های پودری چسبنده[4]

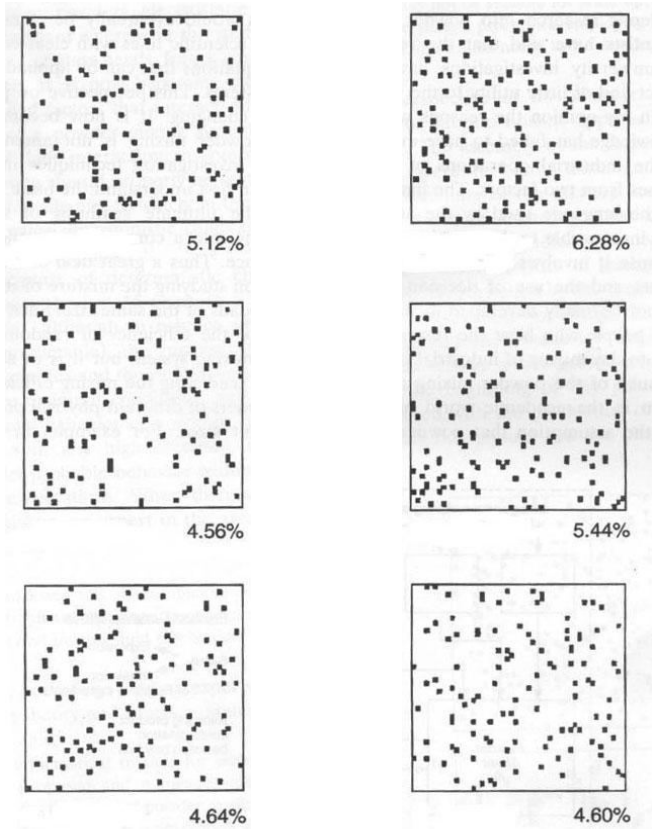
مخلوط‌هایی با ذرات مستقل از یکدیگر

مشخصه اصلی این نوع مخلوط، وجود ذرات مجزایی است که اجازه حرکت آزادانه و مستقل را دارا می‌باشند. تحلیل میزان یکنواختی این نوع مخلوط در اثر اختلاط فرایندی آماری است و قوانین احتمال برای آن بکار برده می‌شود. اگر ذرات مستقل از یکدیگر از همه لحاظ به غیر از رنگ یکسان باشند، مخلوط کاملاً تصادفی می‌تواند به دست آید[۷]. اما اگر تفاوت‌هایی در ذرات وجود داشته باشد با اعمال حرکت اجباری روی ذرات پودر، در صورت پیشرفت کامل اختلاط، جدایش اتفاق می‌افتد و مخلوط نهایی که به صورت جزئی تصادفی است، تولید خواهد شد. در نتیجه اختلاط این گونه پودرها، درجه نسبی پایینی از همگنی بدست می‌آید [۷،۹].

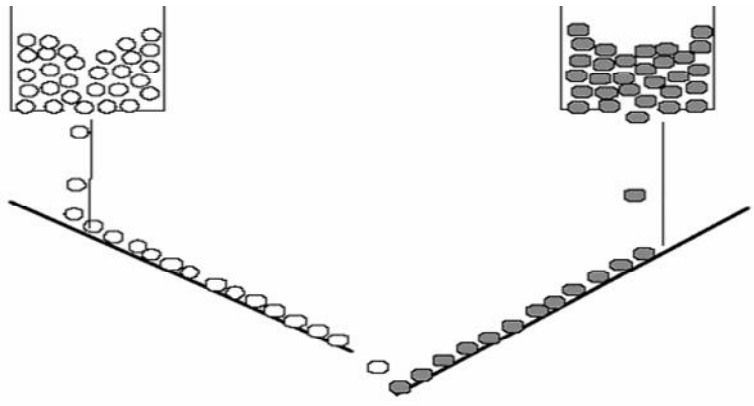
مخلوط‌های چسبنده

در این مخلوط‌ها، ذرات می‌توانند خود دوست و یا دگر دوست باشند. وجود نیروی بین ذره‌ای سبب یکپارچگی ذرات شده و نمی‌توان ذرات را آزاد و مستقل در نظر گرفت. در چنین مخلوط‌هایی، مکانیسم دایش نمی‌تواند همانند پودرهای با ذرات مستقل از یکدیگر به راحتی بحث

1. Pellet
2. Random Dispersion
3. Free Flowing Mixtures
4. Cohesive Powder Mixtures



شکل ۱ـ نمونه‌گیری از مخلوط ۵٪ وزنی[۱۰]



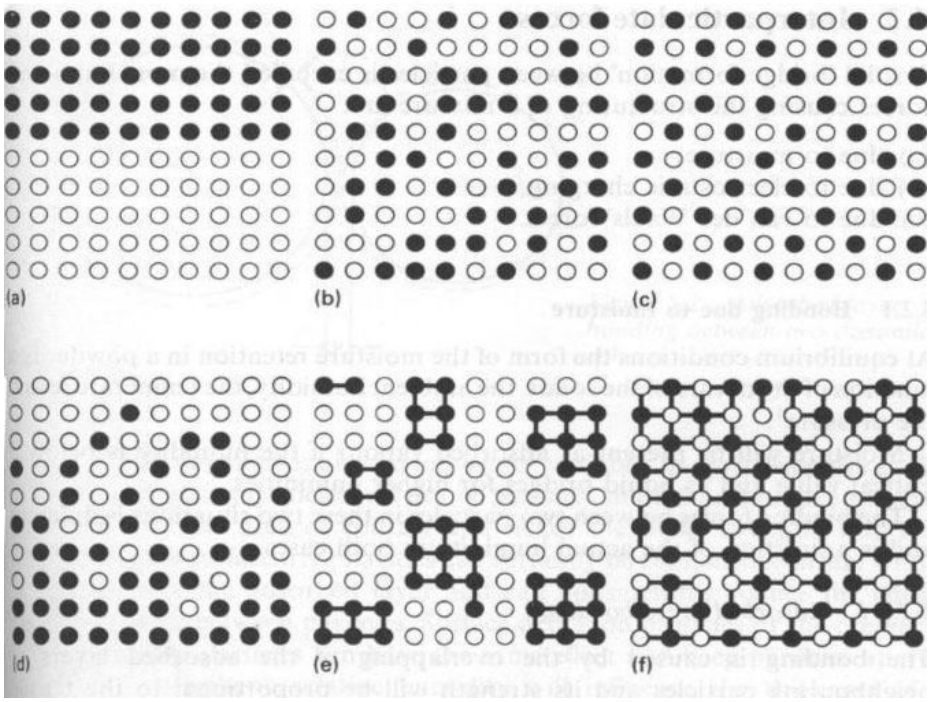
شکل ۲ـ جامدات با ذرات مستقل از یکدیگر [۸]

شود [۷،۹]. کار کردن با پودرهای چسبنده شانس ایجاد جدایش را مینیمم می‌کند. به عبارتی چسبندگی پودرها، امکان حصول مخلوطی با کیفیت بالای یکنواختی را توسعه خواهد داد[۹]. به خاطر وجود نیروهای بین ذرات، نیروی مورد نیاز جهت اختلاط مخلوط افزایش یافته اما تعادل نهایی فرایند اختلاط منجر به کیفیت بالای مخلوط خواهد شد. از پودرهای چسبنده معمولاً در صنایعی که متقاضی درجه بالایی از یکنواختی و کیفیت مخلوط هستند، استفاده می‌شود. صنایع توزیع دقیق دارو و رنگ دانه از این جمله می‌باشند. برای درک بهتر

اختلاط پودرهای چسبنده، مخلوط و ساختار آن باید در یک مقیاس کوچک به خوبی بررسی شود. برای یک پودر چسبنده، چسبندگی بر این دلالت دارد که توده پودر، ساختار بزرگ توسعه یافته‌ای دارد که مانع جریان می‌شود. هرگاه جریان برقرار شود بمنزله آن است که ساختار شکنی صورت گرفته است. به عبارتی با اعمال نیرویی بزرگتر از نیرویی که ساختار پودر چسبنده را ایجاد می‌نماید ساختار جدیدی ایجاد می‌گردد. استحکام ساختار پودرهای چسبنده به طبیعت و مقدار نیروی بین ذرات بستگی خواهد داشت. در شکل (۳) مخلوط دوجزئی با ساختارهای ذرات مستقل از هم و نیز ذرات چسبنده در مراحل مختلفی از اختلاط نشان داده شده است.

در شکل (a)، یک سیستم دو جزئی با ذرات مستقل از یکدیگر که کاملاً جدا از هم می‌باشند، مشاهده می‌شود. برای پودر با ذرات مستقل از یکدیگر به طور طبیعی هدف یک مخلوط‌کن صنعتی، اختلاط تصادفی آن است. برای پودر نشان داده شده در شکل (a)، اگر نیروی جاذبه‌ای بین ذرات سیاه و سفید یا بین یک نوع ذره وجود نداشته باشد، سرانجام مخلوط ساخته شده، دارای ساختار تصادفی خواهد شد. شکل (b) نتیجه اختلاط تعادلی این نوع پودر را نشان می‌دهد. آنچه که در بحث اختلاط بدنبال آن هستیم نزدیک شدن به مخلوط کامل یا ایده‌ال می‌باشد. در شکل (c) چنین مخلوطی نشان داده شده است.

اختلاف کیفیت مخلوط تصادفی با مخلوط ایده‌ال سبب می‌شود که بسیاری از صنایع مرتبط، کیفیت محصول حاصل از اختلاط تصادفی برایشان ناکافی باشد. البته ذرات مورد آزمایش سیاه و سفید هم اندازه بوده که در صورت اختلاف اندازه و همینطور اختلاف چگالی بین ذرات، کیفیت مخلوط تصادفی به شدت کاهش خواهد یافت. شکل (d) یک سیستم دو جزئی ذرات هم اندازه را نشان می‌دهد که عمل اختلاط کمی روی مخلوط صورت گرفته است. هرگاه اجزاء پودر خود دوست باشند، به عنوان مثال اگر ذرات سیاه با ذرات سیاه دیگر پیوند تشکیل دهند، ساختارش مانند شکل (e) می شود. این پدیده یک مسئله رایج در صنایع شیمیایی می‌باشد. یک جزء کوچک مانند رنگ دانه درون توده مخلوط به خوبی پراکنده می‌شود، اما در مقیاس کوچک تمایل زیادی برای جدایش دارد. اگر ذرات دگر دوست باشند، در اثر اختلاط، مخلوط ساختار منظمی پیدا کرده که به ساختار مخلوط ایده‌ال بسیار نزدیک خواهد شد. در شکل (f) این ساختار منظم نشان داده شده است. همانگونه که قبلا اشاره شد، سیستم چسبنده، یک ساختار طبیعی دارد که مکرراً باید از بین برود تا به همه ذرات در طول فرایند اختلاط فرصت تعیین محل مجدد و مناسب داده شود که معمولا برای حصول به این خواسته باید انرژی زیادی صرف گردد[۱۱].



شکل ۳ـ انواع مخلوط‌ها [۱۱]

چسبندگی پودرها از منابع مختلفی نتیجه می‌شود [۴،۱۱]:
نیروی وان در والس – نیروی الکترواستاتیک – نیروی ناشی از رطوبت. در ضمن نیروهای چسبندگی بین ذرات با کاهش اندازه ذرات اهمیت بیشتری می‌یابند. به دلیل محدودیت حجم مقاله، از بررسی دقیق این نیروها صرف نظر می‌شود.

مکانیزم اختلاط جامدات

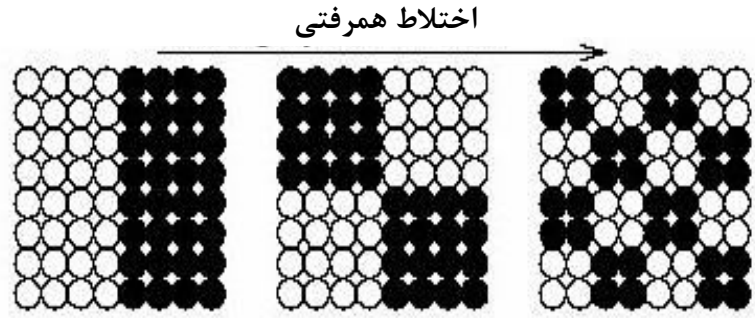
اختلاط پودرها توسط سه مکانیزم زیر انجام می‌شوند [۳،۴،۷- ۹،۱۲،۱۳] :

۱ـ اختلاط همرفتی[1]
۲ـ اختلاط برشی[2]
۳ـ اختلاط ناشی از نفوذ مولکولی[3]

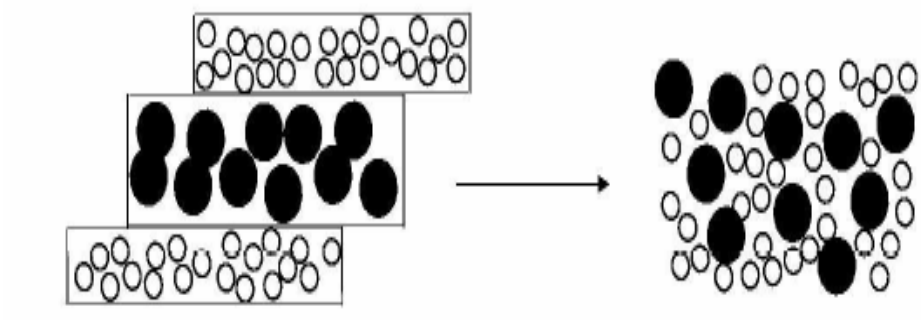
معمولاً برای هر مخلوط کن یکی از این سه مکانیزم، مکانیزم غالب بوده ولی دیگر مکانیزم‌ها نیز در مخلوط‌کن با درجه اهمیت کمتر مشاهده می‌شود.

انتقال ماکروسکوپی گروهی از ذرات، منجر به اختلاط همرفتی می‌شود. همانگونه که در شکل (۴) نشان داده شده است در اثر این جابجایی، گروهی از ذرات به طور نسبی به یک سمت حرکت می‌کنند و این حرکت نسبی میان انبوه ذرات، سبب یک اختلاط ماکروسکوپی می‌شود.

با توجه به شکل (۵)، انتقال مومنتوم بین ذرات پودر، سبب اختلاط می‌گردد که این مکانیزم را در اثر انقباض یا انبساط پودر در اطراف پره متلاطم‌کننده و دیواره‌های مخزن می‌توان مشاهده نمود.



شکل ۴ـ مکانیزم همرفتی [۱۲]



شکل ۵ـ مکانیزم برشی [۱۲]

1. Mixing by convection
2. Shear mixing
3. Mixing by diffusion

همگنی توسط حرکت ذره باعث به وجود آمدن اختلاط در یک مقیاس خوب میکروسکوپی شده که به اختلاط نفوذی معروف است. اختلاط نفوذی ذرات در پودرها قابل مقایسه با مبحث نفوذ مولکولی در سیال بوده که از قانون فیک تبعیت می‌کند[۷]. در شکل (۶) مکانیزم اختلاط نفوذی نشان داده شده است.

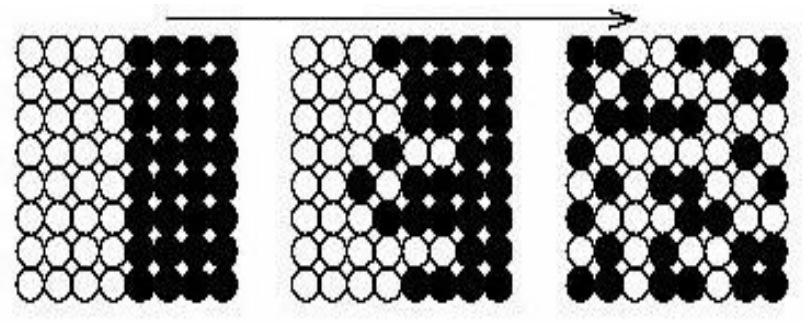
معمولاً در داخل یک مخلوط‌کن، سرعت تغییرات انحراف استاندارد با زمان بصورت خطی و نزولی است[۱۴]. در شکل (۷) تاثیر مکانیزم‌های مختلف اختلاط با زمان در داخل یک مخلوط‌کن ارائه شده است.

جدایش و عوامل ایجاد آن

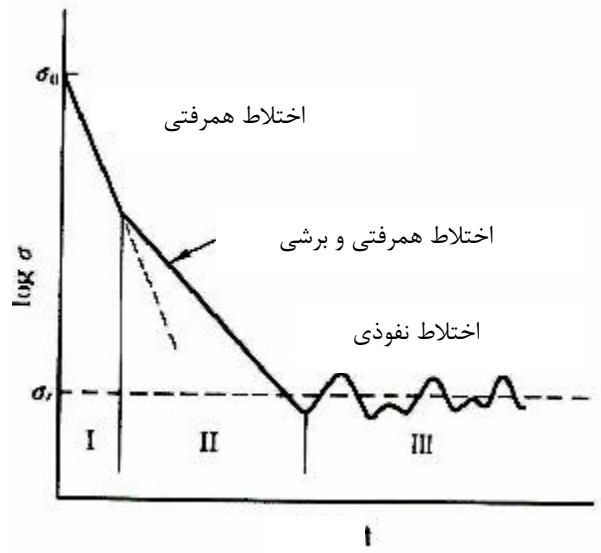
کیفیت نهایی یک مخلوط توسط اهمیت نسبی دو مکانیسم اختلاط و جدایش تعیین می‌شود. برای اینکه فرایند اختلاط بهترین نتیجه را بدهد، ضروری است که جدایش ذرات کاهش یابد. علل متعددی جهت ایجاد پدیده جدایش وجود دارد که عبارتند از [۳،۴،۱۵،۱۶]:

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

هر کدام از تفاوت‌های فوق می‌تواند دلیلی بر جدا شدن ذرات در محصول اختلاط باشد اما همه مدارک موجود نشان داده‌اند که تفاوت در اندازه ذرات به مراتب مهمتر از بقیه عوامل است [۳،۴،۱۶].



شکل ۶ـ مکانیزم نفوذی[۱۲]



شکل ۷ـ منحنی مشخصه فرایند اختلاط[۱۴]

۱- مخلوط کاملاً جدا[1]

اگر مواد به صورت کاملاً مجزا وارد مخلوط کن شوند در این حالت مخلوط را کاملاً جدا از هم گویند؛ به عبارتی در ابتدای اختلاط می‌توان با اینگونه مخلوط‌ها مواجه شد [۸].

۲- مخلوط تصادفی[2]

بهترین حالت مخلوط برای جامدات با ذرات مستقل از یکدیگراست که ذرات در آن آرایش منظم را نداشته و دارای یک آرایش تصادفی از ذرات هستند؛ به عبارتی در هر نقطه شانس یکسانی برای قرار گرفتن یک ذره وجود دارد [۹]. همانگونه که قبلاً اشاره گردید مخلوط تصادفی برای ذره‌های شبیه به هم که تنها در رنگ متفاوتند قابل بیان است و اگر ذرات یکسان نباشند، مخلوط نهایی با جدایش همراه خواهد بود [۸،۱۸].

۳- مخلوط منظم[3]

هدف از اختلاط، رسیدن به یک همگنی کامل است. یعنی مواد و اجزائی که لازم است با یکدیگر مخلوط شوند، باید به طور کامل آمیخته شده و هیچگونه جدایشی بین آنها صورت نگیرد؛ به طوری که ترکیب اجزاء در تمام نقاط یکسان باشد. به چنین مخلوط‌هایی، مخلوط منظم اطلاق می‌شود که ایده‌ال اختلاط در پودرهای چسبنده است [۳،۹،۱۷].

۴- مخلوط جزئی منظم[4]

همانگونه که در بالا اشاره شد پودرها یا بصورت چسبنده و یا بصورت ذراتی مستقل از یکدیگر تقسیم‌بندی می‌شوند. اما بنظر می‌رسد تلفیقی از آنها واقعی‌تر باشد [۷،۱۸].

انحراف استاندارد، شاخصی مهم جهت تعیین کیفیت مخلوط می‌باشد. هرچه مقدارش کمتر باشد به این معنی است که نمونه‌های انتخاب شده از مخلوط هم خورده به هم شبیه‌ترند. بطور خلاصه بیان دیگری از شکل (۳) در جدول (۱) ارائه شده است [۸].

بیان ریاضی مفاهیم بالا برای مخلوط دو جزئی P و Q که کسر وزنی جزء P،p و کسر وزنی جزء Q، q و تعداد ذرات موجود در نمونه N باشد به اختصار در زیر ارائه شده است [۱۸]:

$$\sigma_0^2 = p(1-p) \quad (۱)$$

$$\sigma_R^2 = p(1-p)/N \quad (۱) \quad (۲)$$

$$\sigma_{POR}^2 = (p+Fq)(q-Fq)/n \quad (۳)$$

جدول ۱ـ بیان انواع مخلوط بر اساس نظر Boss [۸]

مخلوط کاملاً جدا از هم	$\sigma = \sigma_0$
مخلوطی که بطور کامل هم نخورده	$\sigma_0 > \sigma > \sigma_R$
مخلوط تصادفی	$\sigma = \sigma_R$
مخلوط منظم	$\sigma_R > \sigma > 0$
مخلوط ایده‌آل	$\sigma = 0$

σ_{POR}^2 واریانس مخلوط جزئی منظم می‌باشد که در آن F کسر وزنی ذرات Q است که به ذرات P چسبیده است. اگر F به سمت صفر میل کند، مخلوط به سمت مخلوط تصادفی میل می‌کند ($\sigma_{POR} \to \sigma_R = \sqrt{pq/n}$) و اگر F به سمت عدد یک میل کند آنگاه مخلوط به سمت مخلوط ایده‌آل میل خواهد کرد($\sigma_{POR} \to 0$).

شاخص‌های اختلاط

برای نزدیک شدن به مفهوم همگنی مخلوط جامد، معمولاً از شاخصی از مخلوط برای اندازه‌گیری درجه یکنواختی استفاده می‌شود. یک شاخص مفید و جامع باید به طور دقیق وابسته به مخلوط نهایی باشد. همچنین باید مستقل از فرآیندهای اختلاط بوده و به راحتی معین گردد[۳].

باس[5]، سی و هفت شاخص آماری متفاوت را برای مخلوط بررسی

1. Un mixed or total segregation
2. Random mixture
3. Ordered mixture
4. Partially ordered random mixture
5. Boss

کرد[۱۹]. او هر شاخص را بر طبق یک سری معیار، آنالیز و مقایسه نمود. وی نتیجه گرفت که معادله‌ای که توسط رُز[1] ارائه گردیده است، بهترین شاخص جهت تعیین کیفیت هر نوع مخلوط می‌باشد[۲۰].

$$M = 1 - \sigma / \sigma_0 \qquad (۴)$$

که در این معادله M، شاخص اختلاط، هنگامی کارائی دارد که مقدار آن جهت داشتن مخلوط خوب و یا بد بصورت کمی مشخص باشد. مطابق جدول (۲)، کیفیت مخلوط بصورت کمی توسط باس پیشنهاد شده است.

جدول ۲ـ مقایسه کمی کیفیت مخلوط بر اساس پیشنهاد باس [۸]

کیفیت مخلوط	مقادیرمرزی درجه اختلاط
بد:	۰,۷۰
غیررضایت بخش	۰,۷۰ -۰,۸۰
نسبتاً خوب	۰,۸۰ -۰,۹۰
خوب	۰,۹۰ -۰,۹۴
خیلی خوب	۰,۹۴ -۰,۹۶
عالی:	
- برای مواد دانه دانه	>۰,۹۶
- برای سیال	>۰,۹۸

بریج واتر[2] نیز شاخص دیگری برای توصیف ساختار پودرها ارائه نمود[۲۱]. این شاخص در رابطه (۵) ارائه شده است:

$$M = 1 - \sigma^2 / \sigma_0^{\,2} \qquad (۵)$$

تجربه نشان می‌دهد که شاخص فوق به میزان زیادی به اندازه ذرات نمونه وابسته است[۸]. غالباً استفاده از شاخص‌هایی برای مخلوط دوجزئی براساس آنالیز آماری و خصوصاً بر اساس تعاریفی از σ و σ_0 و σ_R متداول بوده که در جدول (۳) ارائه گردیده است. البته شاخص هایی برای مخلوط‌های دوجزئی بر پایه آنالیز آماری علاوه بر تعاریف σ و σ_0 و σ_R و یا بر پایه کارهای آزمایشگاهی نیز ارائه گردیده است. برای سیستم چندجزئی و یا با کسر وزنی متفاوت می‌توان به شاخص‌های ارائه‌شده در منابع [۳، ۹، ۷، ۱۹، ۱۸، ۲۴-۲۲] مراجعه نمود.

نمونه‌برداری

نمونه‌برداری پودر، عملکرد مهمی است که کیفیت مخلوط را تعیین می‌کند، اما گران و پرهزینه است[۳، ۱۵]. نمونه می‌بایست کیفیت مخلوط پودر را ارائه دهد. روش نمونه‌گیری، مکان‌یابی، اندازه و تعداد نمونه‌ها و روش آنالیز باید بدرستی تعیین گردد[۳، ۳۵]. در نمونه‌گیری هر ذره باید شانس یکسانی برای انتخاب در آزمایش وجود داشته باشد و این باعث می‌شود که اختلال در نمونه‌گیری به مینیمم برسد [۱۵، ۳۵]. قوانین مهم نمونه‌گیری عبارتند از:

۱ـ از پودرها باید در هنگام جریان داشتن نمونه‌گیری کرد.

۲ـ نمونه‌برداری باید در فواصل زمانی یکسان و کوتاه انجام گیرد[۱۴، ۱۵].

اولین قانون بیان می‌کند که نمونه‌گیری باید در حالت حرکت پودرها اتفاق بیفتد، مثلاً در زمان خالی کردن یک تسمه نقاله یا هنگام تخلیه جریان خوراک از یک تانک ذخیره به تانک دیگر نمونه‌گیری انجام گیرد. البته در اینجا نیز جدایش از نوع اندازه ممکن است اتفاق افتد. بنابراین از جریان پودر در حال حرکت به طور متناوب و در فاصله زمانی کوتاه نمونه برداری انجام می‌گیرد. جهت شناسایی یکنواختی نمونه‌های پودری تهیه شده از محصول اختلاط، می‌توان از روش‌های ارائه شده مطابق جدول (۴) استفاده نمود.

انتخاب مخلوط‌کن

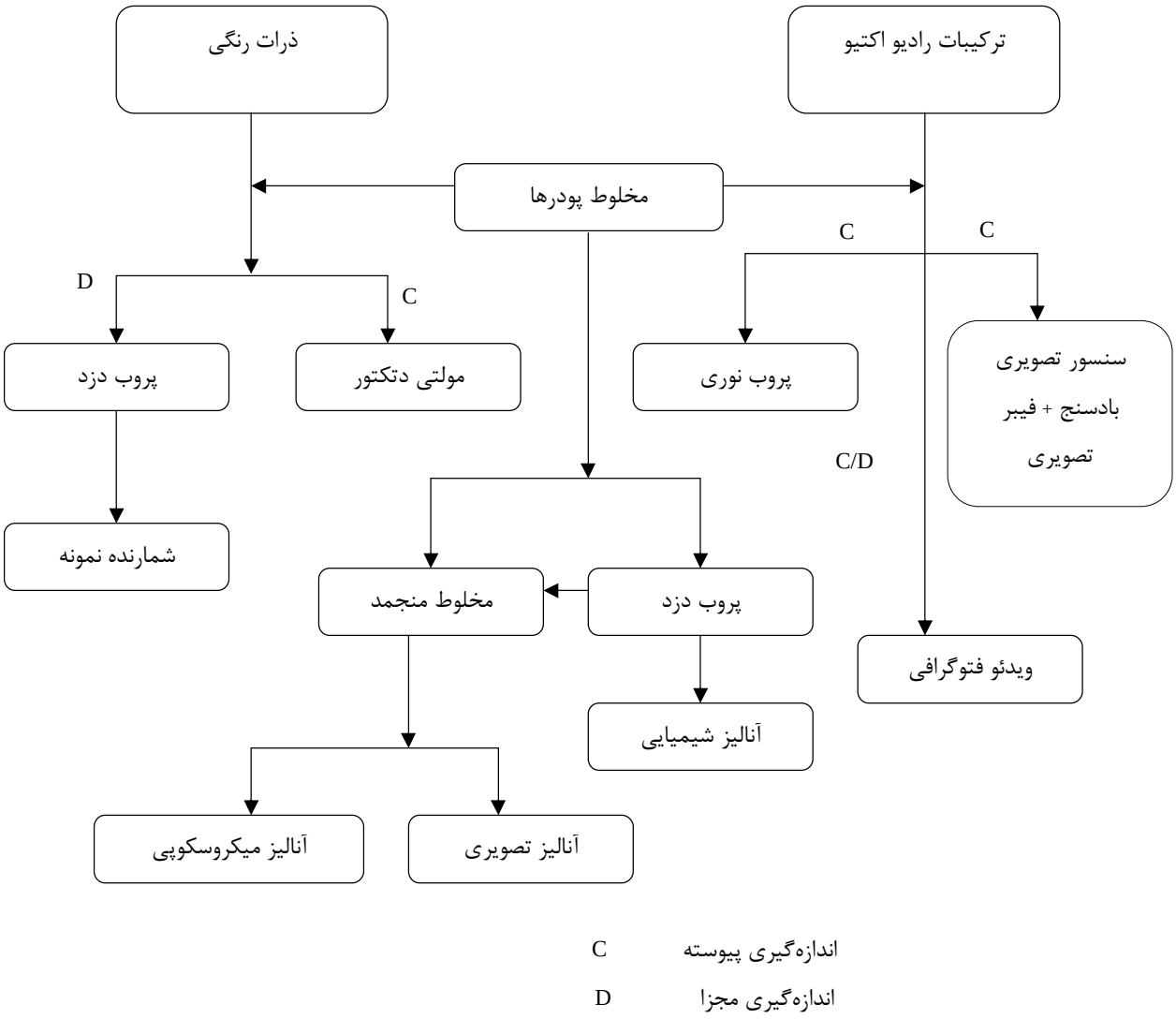
نقش مخلوط‌کن کاهش غیر یکنواختی در اجزاء مخلوط می‌باشد. مخلوط‌کن استفاده شده برای هر ترکیب بایستی قادر باشد به طور مکرر هر ساختار و تراکم را شکسته و تا حد امکان بتواند به اندازه ذرات منفرد برساند [۳۷،۹،۱۰،۳۶]. حرکت ذرات در مخلوط‌کن به صورت تصادفی بوده و باید از ایجاد نواحی مرده در مخلوط‌کن اجتناب شود [۹، ۱۵].

1. Rose
2. Bridgewater

جدول ۳ـ شاخص‌هایی برای مخلوط دو جزیی بر اساس آنالیز آماری و مفاهیم σ و σ_0 و σ_R [۳]

نویسنده	شاخص	$\sigma = \sigma_0$	$\sigma = \sigma_0$
وسماکوت و لینهان[۱] [۲۵]	$M = \frac{\sigma}{\sigma_0}$	1	$\frac{\sigma_R}{\sigma_0} \leqslant 1$
ویدنبوم و بونیلا[۲] [۲۶]	$M = \frac{\sigma_R}{\sigma}$	$\frac{\sigma_R}{\sigma_0} \leqslant 1$	1
پول و همکاران[۳] [۲۷]	$M = \frac{\sigma}{\sigma_R}$	$\frac{\sigma_0}{\sigma_R} \geqslant 1$	1
رامف و سومر[۴] [۲۸]	$M = \sqrt{\frac{N(\sigma^2 - \sigma_R^2)}{N-1}}$	$\sqrt{N}\sigma_0$	0
کرامرز[۵] [۲۹]	$M = \frac{\sigma_0 - \sigma}{\sigma_0 - \sigma_R}$	0	1
لاسی[۶] [۲۹]	$M = \frac{\sigma_0^2 - \sigma^2}{\sigma_0^2 - \sigma_R^2}$	0	1
آشتون و ولنتاین[۶] [۳۰]	$M = \sqrt{\frac{log\sigma_0^2 - log\sigma^2}{log\sigma_0^2 - log\sigma_R^2}}$	0	1
ولنتاین[۷] [۳۱]	$M = \frac{log\sigma_0 - log\sigma}{log\sigma_0 - log\sigma_R}$	0	1
مایلز[۸] [۳۲]	$M = 1 - \frac{\sigma^2}{\sigma_0^2}$	0	$1 - \frac{\sigma_R^2}{\sigma_0^2} \leqslant 1$
رز و رابینسون[۹] [۳۳]	$M = 1 - \frac{\sigma}{\sigma_0}$	0	$1 - \frac{\sigma_R}{\sigma_0} \leqslant 1$
اسمیت[۱۰] [۳۴]	$M = \frac{\sigma_0}{\sigma}$	1	$\frac{\sigma_0}{\sigma} \geqslant 1$

1- Wesmacott and Linehan
2- Weidenbaum and Bonilla
3- Poole et al
4- Rumpf and Sommer
5- Kramers
6- Lacey
7- Ashton and Valentine
8- Miles
9- Rose & Robinson
10- Smith



جدول ۴-روش‌هایی جهت اندازه‌گیری همگنی مخلوط پودری[۳]

با استفاده از کیفیت مخلوط استاندارد می‌توانیم چگونگی عملکرد مخلوط‌کن‌ها را با هم مقایسه کنیم. تنها روش معقول برای مقایسه مخلوط‌کن‌ها، توجه به کیفیت مخلوط تعادلی است. زمان صرف شده برای رسیدن به شرایط تعادلی از یک مخلوط کن به مخلوط کن دیگر تغییر می‌کند[۹،۳].

هزینه‌های عملیاتی می‌بایست برای انتخاب فرآیند اختلاط مورد محاسبه قرار گیرند. وقتی چندین مخلوط‌کن بتوانند هم مراحل و هم نیازهای مربوط به کیفیت اختلاط را پوشش دهند، انتخاب نهایی بر پایه هزینه‌ها شکل خواهد گرفت. به طور کلی هزینه اختلاط پودر فقط درصد کمی از هزینه‌های تولید محصول نهایی را شامل خواهد شد[۹].

یکی از روش‌های مرسوم جهت تقسیم‌بندی مخلوط‌کن‌ها، بر اساس مکانیسم اختلاط می‌باشد. همانگونه که اشاره گردید، اختلاط در مخلوط‌کن بر اساس مکانیزم‌های همرفتی یا برشی و یا نفوذی انجام می‌گیرد [۷،۹].

مخلوط‌کن‌های نفوذی[1]

این مخلوط‌کن، جزء ساده‌ترین و رایج‌ترین نوع مخلوط‌کن‌های جامد

1. Diffusive mixers

می‌باشد. مخزن، حول یک محور افقی دوران می‌کند و باعث می‌شود که ذرات داخل مخلوط‌کن روی سطح همدیگر در داخل مخلوط‌کن بلغزند. به این نوع مخلوط‌کن، مخلوط‌کن‌های چرخنده[1] نیز اطلاق می‌شود. مکانیزم غالب در این نوع مخلوط‌کن، مکانیزم نفوذی می‌باشد. از انواع مرسوم آن می‌توان به مخلوط‌کن‌های مکعبی[2]، مخلوط‌کن‌های دو مخروطی[3]، و مخلوط‌کن‌های V و Y اشاره نمود [۹،۷].

مخلوط‌کن‌های همرفتی[4]

در انتخاب این نوع مخلوط‌کن تنوع زیادی وجود دارد. در یکی از مهم‌ترین طراحی‌های مخلوط‌کن همرفتی، یک تیغه در داخل بدنه ساکن عمل می‌کند و گروهی از ذرات را از یک بخش به بخش دیگری از مخلوط‌کن حرکت می‌دهد[۷].

از انواع مخلوط‌کن‌های همرفتی متداول می‌توان به نوع روبانی[5]، پره‌ای[6] و ناتا[7] اشاره نمود [۷،۹].

در بسترهای سیال شده[8] نیز مکانیزم همرفتی جهت یکنواختی مخلوط اهمیت دارد [۹].

مخلوط‌کن‌های برشی[9]

این مخلوط‌کن‌ها همانند هاون و دسته هاون مکانیزه شده‌اند که با شکستن و جابه جا کردن پودر باعث اختلاط می‌شوند. مخلوط‌کن‌های پر قدرت برشی[10]، یک فشار بالا و منطقه‌ای روی پودر اعمال می‌کنند و برای شکستن توده پودر به تراکم کوچک، در یک توده چسبنده مفید هستند [۹].

در جدول (۵)، مشخصات تعدادی مخلوط‌کن بر اساس مکانیزم غالب ارائه گردیده است:

جدول ۵ـ مشخصات مخلوط‌کن‌ها [۷،۹]

نوع همزن	پیوسته یا ناپیوسته	مکانیسم اصلی اختلاط	جدایش	اختلاط محوری	سهولت تخلیه	تمایل به جدایش در تخلیه	سهولت تمیزکاری
درام افقی	ناپیوسته	نفوذ	بد	بد	بد	بد	خوب
مخلوط‌کن لودیک	ناپیوسته	کنوسیون	خوب	خوب	خوب	خوب	بد
درام تقریبا مایل	پیوسته	نفوذ	متوسط	بد	خوب	خوب	خوب
درام مایل تند	ناپیوسته	نفوذ	بد	خوب	بد	بد	خوب
سیلندر عمودی همزن‌دار	ناپیوسته	برشی	بد	خوب	خوب	بد	خوب
مخلوط‌کن V	ناپیوسته	نفوذ	بد	بد	خوب	بد	خوب
مخلوط‌کن Y	ناپیوسته	نفوذ	بد	بد	خوب	بد	خوب
دو مخروطی	ناپیوسته	نفوذ	بد	بد	خوب	بد	خوب
مکعب	ناپیوسته	نفوذ	ضعیف	خوب	خوب	بد	متوسط
مخلوط‌کن تسمه‌ای	ناپیوسته	کنوسیون	خوب	آرام	خوب	متوسط	متوسط
مخلوط‌کن تسمه‌ای	پیوسته	کنوسیون	خوب	متوسط	خوب	خوب	متوسط
جت میکسر هوا	ناپیوسته	کنوسیون	متوسط	خوب	خوب	خوب	متوسط
مخلوط‌کن مارپیچی	ناپیوسته	کنوسیون	خوب	خوب	خوب	خوب	بد

1. Tumbler mixers
2. Cube mixers
3. Double Cone mixers
4. Convective Mixers
5. Ribbon
6. Paddle
7. Nauta
8. Fluidized beds
9. Shear Mixers
10. High shear mixers

بحث و نتیجه‌گیری

براساس اصول ارائه شده در زمینه اختلاط پودرها، این مبحث یک فرایند پیچیده‌ای بوده که نمی‌توان با ارائه یک لیست قوانین ساده و نیز اجرای آن به یک مخلوط کامل رسید. در این مورد تحقیقات بسیار گسترده‌ای در دنیا انجام شده و نیز در حال انجام می‌باشد. یکی از دانشمندان بزرگ که عمر زیادی در این عرصه صرف نموده، جی. سی. ویلیامز[1] می‌باشد. ایشان در مقدمه کتاب خود[۳۸] اینگونه آورده است: تلاش‌های زیادی در دانشگاه‌های دنیا صرف مطالعه فرایند اختلاط پودرها انجام گرفته، اما نتایج این تلاش‌ها بطور عملی در صنایع کاربرد ناچیزی داشته است.

در این بحث بدنبال راهکارهایی بوده که در فرایند اختلاط، جدایش ذراتی که لازم است با هم مخلوط شوند را کاهش داده و به حد مینیمم رساند. در انتخاب مخلوط‌کن در صورتی که ذرات جامد تمایل به جدایش داشته باشند آنگاه مخلوط‌کن انتخابی باید غیر قابل جدایش باشد.

بطور کلی جهت داشتن یک مخلوط با کیفیت مناسب، بهتر است با انجام آزمایشات متعدد در مقیاس آزمایشگاهی و سپس بردن به مقیاس صنعتی عمل نمود.

مراجع

[1] E.E. Ludwig, Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Pants, (1995).
[2] S.M.Walas, Chemical Process Equipment: Selection and Design, (1988).
[3] 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).
[4] H. Li, Impact of Cohesion Forces on Particle Mixing and Segregation, PhD Thesis, University of Pittsburgh, (2005).
[5] L. Bryan,Y. Rungvej, P.J. Stewart, Mixing and Demixing of Microdose Quantities of Sodium Salicylate in a Direct Compression Vehicle , Powder Technology, 22,147-151, (1979).
[6] R.L. Earle, M.D. Earle, Unit Operation in Food Processing, (1983).
[7] L.T. Fun, Y.M. Chen, Recent Developments in Solids Mixing Powder Technology, 61, 255-287, (1990).
[8] E. Ollerenshaw, Impact Mixing of Free Flowing Solids, Ph. D. thesis, Department of Chemical Engineering The University of Queensland.
[9] N. Harnby, M.F. Edwards, A.W. Nienow, Mixing in the Process Industries, Second Edition, (1997).
[10] E. Fayed, L. Otten, Handbook of Powder Science & Technology, Second Edition, (1997).
[11] N. Harnby, M.F. Edwards, A.W. Nienow, Mixing in the Process Industries, Chapter 5, Second Edition, (1997).
[12] L.S. Lu, Study of Granular Mixing in Vibrated Beds and Sheared Flows, Ph. D. thesis, California, (1999).
[13] J. Bridgwater, Fundamental Powder Mixing Mechanisms, Powder Technology, 15,215-236, (1976).
[14] K. Gotoh, H. Masuda, K. Hingashitani, Powder Technology Handbook, (2006).
[15] H.J. Venables, J.I. Wells, Powder Mixing, Drug Development and Industrial Pharmacy, 27(7), 599-612, (2001).
[16] J.C. Williams, The Segregation of Particulate Materials. A Review, Powder Technology, 15,245-251, (1976).
[17] C.W. Yip, J.A. Hersey, Ordered Powder Mixing,262,202-203, (1976).
[18] J.A. Hersey, W.J. Thiel, C.C. Yeung, Partially Ordered Randomized Powder Mixtures, Powder Technology, 24,251-256, (1979).
[19] J. Boss, Evaluation of the Homogeneity Degree of a Mixture, Bulk Solids Handling, 6, 6, 1207-1215, (1986).
[20] H.E. Rose, A SUGGESTED EQUATION RELATING TO THE MIXING OF POWDERS AND ITS APPLICATION TO THE STUDY OF THE PERFORMANCE OF CERTAIN TYPES OF MACHINE, Chem. Eng. Research and Design, 37,47-64, (1959).
[21] J. Bridgwater, Mixing in Powder Technology and Pharmaceutical Processes, Elsevier Book, Chapter 10, 347-357, (1994).
[22] N. Harnby, The Handling and Distribution of Granular Fertilizer, J.Agr.Food Chem., 21, 1,78, (1973).
[23] C. Schofield, The Definition and Assessment of Mixture Quality in Mixtures of Particulate Solids, Powder Technology, 15,160-180, (1976).
[24] J.A. Hersey, Powder mixing: Theory and Practice in Pharmacy, Powder Technology, 15,149-153, (1976).
[25] M.H. Wesmacott, P.A. Linehan, Proc. Int. Seed Test. Assoc., 25, 151, (1960).
[26] S. S. Weidenbaum, C. F. Bonilla, Chem. Eng. Prog., 51, 27 −36, (1955).
[27] K.R. Poole, R.F. Taylor, G.P. Wall, Trans. Inst. Chem. Eng., 42, T305, (1964).
[28] M. Rumpf, K. Sommer, Chem. Ind. Tech., 46, 257, (1974).
[29] P.M.C. Lacey, Developments in the theory of particles mixing, J. Appl. Chem. 4,257, (1954).
[30] M.D. Ashton, F.H.H. Valentin, Truns. Inst. Chem. Eng., 44, T166, (1966).
[31] F.H.H. Valentin, Chem. Eng.(London), 208, CE99, (1967).
[32] S.R. Miles, Proc. Int. Seed Test. Assoc., 27, 407, (1962).
[33] H.E. Rose, D.J. Robinson, Am. Inst. Eng., 10, 61, (1965).
[34] J.C. Smith, Ind. Eng. Chem., 47, 2240, (1955).
[35] A.A.Hassanipak, Mining Sampling, (1992).
[36] J.C. Williams, Continuous Mixing Of Solids. A Review, Powder Technology, 15,237-243, (1976).
[37] B. Chaudhuri, A. Mehrotra, F.J. Muzzio, M.S. Tomassone, Cohesive Effects in Powder Mixing in a Tumbling Blender, Powder Technology , 165, 105-114, (2006).
[38] J.C. Williams, Mixing of particulate solids, Mixing: Theory and Practice vol. 3, 265-305, Academic Press Inc., London, (1986).

1. J.C.Williams