

بررسی تأثیر پارامترهای گرانول کردن کود کمپوست با استفاده از روش سطح پاسخ

یوسف قاسمی^۱ - محمد حسین کیانمهر^{۲*} - بهزاد آزادگان^۳

تاریخ دریافت: ۹۲/۳/۱۶

تاریخ پذیرش: ۹۳/۴/۷

چکیده

امروزه از کود کمپوست به‌عنوان جایگزینی برای کودهای شیمیایی که خساراتی را برای سلامتی انسان‌ها و همچنین برای زمین‌های کشاورزی به بار می‌آورد، یاد می‌شود. مشکلاتی مانند؛ حمل و نقل (حجم زیاد)، رطوبت زیاد، توزیع کود در مزرعه، گرد و غبار و انبارداری، در ارائه این کود به مزرعه وجود دارد. برای حل مشکلات مطرح شده فرآیند فشرده‌سازی مانند تولید پلت و گرانول، پیشنهاد می‌شود. در این تحقیق تأثیر پارامترهای گرانول کردن کود کمپوست بر روی درصد گرانول مفید تولید شده با استفاده از دستگاه استوانه دوار در مقیاس آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش زمان گرانول کردن، موجب کاهش مقدار مفید گرانول تولیدی می‌شود. شرایط بهینه برای تولید گرانول زمانی حاصل می‌شود که در آن سرعت چرخش استوانه ۴۰/۳۸ دور بر دقیقه، زمان گرانول کردن ۱۵ دقیقه، درصد پرشدگی ۱۰ درصد از حجم استوانه و درصد چسباننده ملاس ۴۰/۹۷ درصد، باشد که با توجه به این شرایط پاسخ مقدار گرانول‌های مفید ۸۱/۶ درصد تخمین زده شد.

واژه‌های کلیدی: روش سطح پاسخ، کود کمپوست، گرانول کردن

مقدمه

کودهای شیمیایی به شکل غیر گرانول به بازار عرضه می‌شود. در این حالت وقتی مواد انبار می‌شدند حالت سفتی به خود می‌گرفتند و گرد و غبار از خود تولید می‌کردند (Hicks et al., 1997). گرانول شدن یک اصطلاح عمومی برای اندازه بزرگ شده از یک ذره به شکل کره با قطر مطلوب است. مزایای گرانول کردن عبارت هستند از: بهبود مشکل جریان پذیری، اختلاط بهتر ماده اولیه با سایر مواد مورد نظر که از مواد مختلف تشکیل شده، کاهش گرد و خاک، رسیدن به یک شکل و اندازه مورد نظر از ذرات، آزاد سازی کنترل شده مواد مغذی مورد نیاز گیاه و همچنین امکان توزیع کودهای گرانولی توسط دستگاه‌های کودپاش و بذرکارها (Reddy et al., 1997; Moursy et al., 2002). گرانولاتور دوار یکی از متداول‌ترین ابزارهای گرانول کردن در صنعت گرانول سازی است که در آن ذرات تحت حرکت دورانی استوانه دوار، در بستر مرطوب با هم برخورد کرده و رشد می‌کنند (Sherrington et al., 1981). در تحقیقی تولید گرانول از کود (نیترژن، فسفات و پتاسیم) با استفاده از گرانولاتور دوار در مقیاس آزمایشگاهی بررسی گردید. در این بررسی تأثیر سه فاکتور میزان جامد به مایع، ویسکوزیته مایع چسباننده و سرعت چرخش استوانه دوار را بر روی گرانول تولید شده مورد بررسی قرار دادند.

با افزایش روزافزون جمعیت در دنیا، نیاز به افزایش تولیدات غذایی از جمله تولید بیشتر مواد مختلف غذایی ضرورت دارد. البته این افزایش تولید به نوبه خود تبعات منفی بر محیط زیست نیز دارد. با افزایش تولید مواد غذایی، انواع مختلف مواد فرعی و پسماندها ایجاد می‌گردد که این مواد شامل بقایای تولیدات گیاهی، مواد فرعی دامی، بیوماس و غیره می‌باشند که می‌تواند در طی فرآیندی تبدیل به کود کمپوست گردد که به‌عنوان مواد مغذی کودی برای مزارع استفاده شود (Rezaeifar, 2008). اما مشکلاتی در زمینه استفاده از کودها در مزارع وجود دارد که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از: حمل و نقل به علت حجم زیاد، رطوبت، توزیع کود در مزرعه، گرد و غبار و انبارداری. راه حلی که برای رفع این مشکلات در نظر گرفته می‌شود، استفاده از فشرده‌سازی مواد پودری همانند پلت و گرانول کردن می‌باشد (Ghasemi et al., 2013). گرانول کردن یکی از مهم‌ترین روش‌ها در صنعت کود سازی شیمیایی است. تا قبل از سال ۱۹۵۰ اکثر

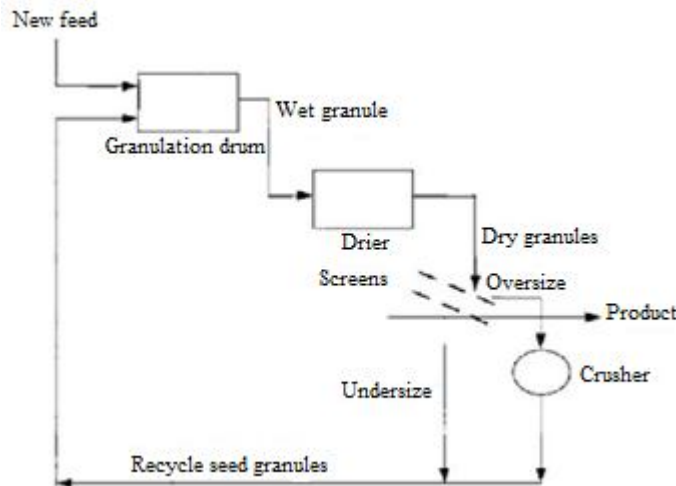
۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مکانیک ماشین‌های کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

۲- استاد گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

۳- دانشیار گروه آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

(Email: kianmehr@ut.ac.ir

*) نویسنده مسئول:



شکل ۱- نمای شماتیکی از فرآیند گرانول کردن کود (Salman *et al.*, 2007)

Fig.1. A schematic of granulation fertilizer process (Salman *et al.*, 2007).

برگردند. گرانول‌هایی که پس از تولید در ابعاد تعریف شده باشد و به سمت بسته‌بندی هدایت شود، گرانول مفید نامیده می‌شود (Salman *et al.*, 2007). جهت گرانول کردن کودهای پودری ارگانیک دو روش تر و خشک وجود دارد. در روش خشک از فشار و حرارت برای ذوب شدن مواد در همدیگر استفاده می‌شود. گرانولاسیون مرطوب شامل مرطوب نمودن مخلوطی از پودرهای خشک اولیه توسط مایع گرانولاسیون می‌باشد (Pozin, 1986).

روش سطح پاسخ (RSM)، مجموعه‌ای از روش‌های آماری و ریاضی است که برای تحلیل و مدل‌سازی پاسخ‌های یک فرآیند استفاده می‌شود که در نهایت هدف آن بهینه‌سازی فرآیند است. این روش در واقع یک روش طراحی آماری می‌باشد که فاکتورهای انتخاب شده از مراحل قبل با جزئیات بیشتری مورد بررسی قرار می‌گیرد. با فرض اینکه تابع y به سه متغیر x_1 ، x_2 و x_3 وابسته باشد. در این صورت می‌توان نوشت $y=f(x_1, x_2, x_3)$ که x_1 ، x_2 و x_3 متغیرهای مستقل و y پاسخ تابع نامیده می‌شود. سطح پاسخ عبارت است از سطحی که با رسم $y=f(x_1, x_2, x_3)$ به دست می‌آید. یکی از مزایای روش سطح پاسخ کاهش تعداد آزمایش‌هاست (Myers *et al.*, 1995). در مواردی که تعداد متغیرهای یک فرآیند زیاد هستند و امکان استفاده از طرح فاکتوریل وجود ندارد، توسط روش RSM می‌توان بیشترین اطلاعات از پاسخ‌ها را با کمترین تعداد آزمایش به دست آورد. روش‌های مرکب مرکزی^۱، باکس بنکن^۲ و دهلرت^۳ سه

نتایج نشان داد که حداکثر نسبت جامد به مایع بر روی افزایش اندازه گرانول نسبت به زمان، تأثیر دارد (Walker *et al.*, 2000). همچنین در تحقیقی دیگر اثر پارامترهای فرآیند گرانول کردن بر مقاومت به شکست گرانول‌های تولید شده مورد بررسی قرار گرفت و ارتباطی بین مقاومت به شکست گرانول و اندازه ذرات و درصد رطوبت یافت شد. داده‌های تجربی و تجزیه و تحلیل در این مطالعه نشان می‌دهد که در نرخ مایع به جامد بالا گرانول‌های گرد و منظمی تولید می‌شوند و درصد رطوبت روی تشکیل پیوندهای قوی‌تر و همچنین روی چگالی گرانول تأثیر می‌گذارد (Walker *et al.*, 2003). گرانول کردن با ترکیب اندازه ذرات متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق مشخص شد که اندازه گرانول‌ها به مقدار رطوبت و ترکیب اندازه ذرات مواد اولیه بستگی دارد (Gluba, 2003). شماتیکی از یک فرآیند گرانول کردن در شکل ۱ نشان داده شده است. در این فرآیند، گرانول گرانولاتور را ترک کرده و ابتدا خشک می‌شود و سپس برای جدا کردن گرانول با اندازه مشخص غربال می‌شود. گرانول جدا شده به سمت بسته‌بندی هدایت و اندازه‌های بزرگ‌تر آسیاب شده و خرد می‌شود و اندازه‌های کوچک‌تر باز یافت شده و دوباره به چرخه برمی‌گردد (شکل ۱). در بهره‌برداری از این فرآیند گرانول سازی دو مشکل عمده وجود دارد: اول این‌که تنها بخش کوچکی از گرانول‌هایی که استوانه دوار را ترک می‌کنند در اندازه‌های مورد نظر است و مشکل دوم میزان باز یافت که مقدار برگشتی به فرآیند نیز گفته می‌شود در برخی از فرآیندها به مقدار بالایی می‌رسد اما اغلب در مقدار کم (بین ۱۰-۱۵ درصد) باز یافت می‌شود. فرآیندهای گرانول کردن بدون بخش باز یافت امکان پذیر نیست به دلیل آن‌که همیشه یک مقدار کوچک‌تر یا بزرگ‌تر از اندازه در فرآیندهای گرانول کردن وجود دارد که باید دوباره به فرآیند

- 1- Central composite
- 2- Box behnken (BBD)
- 3- Dohlert

گرانول کردن کود و عدم تغییر در ساختار شیمیایی مواد اولیه، روش گرانول کردن با استوانه دوار انتخاب گردید که جزء گرانول کردن مرطوب می‌باشد. پارامترهای که بر درصد گرانول مفید گرانول‌های تولیدی در روش استوانه دوار تأثیر می‌گذارد؛ سرعت چرخش استوانه دوار، زمان گرانول کردن، درصد پرشدگی استوانه دوار از مواد اولیه و غلظت چسباننده می‌باشد.

مواد و روش‌ها

کود کمپوست کامل از تولیدکنندگان این کود، واقع در شهرستان کرج تهیه شد. طبق گزارش این شرکت تولیدکننده، کود حاوی عناصر غذایی؛ نیتروژن، فسفر، پتاسیم، اسیدهای هیومیک-فولیک و آمینه و ریز مغذی‌ها می‌باشد. ملاس چغندر قند به‌علت فراوانی و همچنین ارگانیک بودن و سازگاری چسباننده با محیط زیست، به‌عنوان چسباننده انتخاب شد. چسباننده‌هایی با نیروی چسبانندگی زیاد مانند ملاس بعد از خشک شدن، با چسبیدن به سطح ذرات و ایجاد باندهای قوی، پیوند پل جامد بین ذرات ایجاد می‌کند (Nalladurai *et al.*, 2010).

برای گرانول کردن کود کمپوست کامل از دستگاه استوانه دوار (شکل ۲) استفاده شد (Ghanbari, 2008). این دستگاه شامل استوانه‌هایی به قطر ۱۵۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ می‌باشد که با توجه به کارهای قبلی که در این زمینه انجام شد از استوانه با قطر خارجی ۳۰۰ میلی‌متر برای گرانول کردن استفاده گردید (Andrzej *et al.*, 2006).

مراحل تولید گرانول با استفاده از استوانه دوار در شکل ۳ نشان داده شده است. برای گرانول کردن ابتدا نسبت محلول چسباننده را در آبپاش آماده کرده و مقدار کود مورد نظر، وزن شده و در داخل استوانه قرار داده شد. سپس استوانه با دور تعریف شده تنظیم شد. سپس چسباننده از طریق سوراخی به قطر ۶ سانتی‌متر که بر روی تلق ایجاد شده بود اسپری شد (شکل ۳).

اندازه‌ای که برای گرانول مفید تعیین شده، بین ۴/۷۵ تا ۱۲/۷ میلی‌متر می‌باشد که این اندازه قابل پخش شدن توسط کودپاش و کاشت هم‌زمان با بذر در خطی کارها می‌باشد. همچنین این اندازه بسته به نوع نیاز و شرایط قابل تغییر و تعریف مجدد می‌باشد برای محاسبه مقدار گرانول مفید از رابطه (۴) استفاده شد (Mangwandi *et al.*, 2012).

$$\eta = \left(\frac{M_{\text{Target}}}{M_{\text{Total}}} \right) \times 100 \quad (4)$$

روش اصلی طراحی سطح پاسخ می‌باشند. باکس بنکن طراحی‌های تجربی برای روش سطح پاسخ می‌باشند که توسط جورج باکس و دونالد بنکن ابداع شد (Box and Behnken, 1960).

تعداد کل آزمایش‌های مورد نیاز در یک طرح باکس بنکن جهت تحلیل یک فرآیند برابر با رابطه (۱) است.

$$n = 2k(k-1) + c_0 + 1 \quad (1)$$

که در رابطه (۱)، k برابر است با تعداد متغیرهای مستقل و c_0 تعداد تکرار در نقطه مرکزی است. معمولاً در روش باکس بنکن متغیر پاسخ (y) توسط معادله (۲) مدل می‌شود.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i x_i + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^m \beta_{ii} x_i^2 \quad (2)$$

که در رابطه (۲)، $\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}$ به ترتیب بیانگر متغیرها، تعداد متغیرها، ثابت مدل، ضرایب متغیرها، ضریب پارامتر درجه دو و ضریب تقابل پارامترها است. در تحلیل یک فرآیند اغلب با یک مشخصه کیفی مواجه نیستیم و معمولاً به دنبال بهینه‌سازی چند هدف می‌باشیم. اهداف نیز غالباً با یکدیگر در تناقض هستند و رابطه عکس دارند. یکی از روش‌های حل مسائل چند هدفه تلفیق سطوح پاسخ‌ها یا همان روش گرافیکی است. محققینی روشی چند پاسخ معرفی کردند و آن را رضایت‌مندی نامیدند. این روش تابع هدفی می‌سازد که تابع رضایت‌مندی (D) (رابطه ۳) نام دارد و بیان کننده محدوده رضایت‌مندی برای هر پاسخ است (d_i). محدوده رضایت‌مندی از صفر تا یک تغییر می‌کند که عدد یک بیانگر حداکثر رضایت‌مندی است (Myers *et al.*, 1995).

$$D = (d_1 \times d_2 \times \dots \times d_n)^{\frac{1}{n}} = \left(\prod_{i=1}^n d_i \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

که n نماینده تعداد پاسخ است. اگر هر کدام از پاسخ‌ها یا متغیرهای مستقل خارج از محدوده رضایت‌مندی قرار گیرند تابع صفر می‌شود. در بهینه‌سازی براساس تابع رضایت‌مندی، برای هر متغیر و هر پاسخ می‌توان هدفی تعیین نمود. به‌طور مثال تیمارهایی مطلوب ما است که در آن پاسخ y_1 در مقدار بیشین خود و پاسخ y_2 در مقدار کمینه خود باشد با این شرط که متغیر x_1 در یک محدوده خاص، متغیر x_2 دقیقاً برابر عدد مشخص و متغیر x_3 در بیشین خود باشد (Myers *et al.*, 1995).

هدف از انجام این تحقیق بررسی تأثیر پارامترهای گرانول کردن کود کمپوست کامل بر روی درصد گرانول‌های مفید با استفاده از روش سطح پاسخ می‌باشد. با توجه به ملاک‌هایی که برای گرانول کردن مانند: ساختار ساده دستگاه گرانول ساز، هزینه پایین تولید گرانول، تولید بالا در واحد زمان، کارهای مشابه قبلی در زمینه



شکل ۲- دستگاه استوانه دوار (Ghanbari, 2008)
Fig.2. Rotating drum (Ghanbari, 2008)



شکل ۳- مراحل تولید گرانول با استفاده از استوانه دوار؛ (a) قرار دادن مقدار کود مشخص در استوانه، (b) اسپری چسباننده به داخل استوانه، (c) رشد و بزرگ شدن ذرات کود در زمان مشخص، (d) گرانول تولید شده

Fig.3. Granule production process using a rotating drum; (a) Placing the specified amount of fertilizer in the drum, (b) Spraying the binder in to the drum, (c) Growth and enlargement of fertilizer particles within the specified time, (d) Produced granule

جدول ۱- متغیرهای مستقل در فرآیند گرانول کردن

Table 1- Independent variables in granulation process

| پارامتر Parameter | نماد Symbol | سطوح کدبندی شده پارامتر Coded levels of parameter | | |
|---|----------------|--|------|----|
| | | 1 | 0 | -1 |
| سرعت استوانه Drum speed (Rev min ⁻¹) | x ₁ | 60 | 50 | 40 |
| زمان گرانول کردن Time granulation (min) | x ₂ | 20 | 17.5 | 15 |
| درصد پرشدگی استوانه Drum filling | x ₃ | 10 | 7.5 | 5 |
| غلظت چسباننده Binder concentration | x ₄ | 60 | 50 | 40 |

با استفاده از روش RMS و نرم افزار Design Expert 6.0.8 برای به دست آوردن سطوح پاسخ استفاده شد. تعداد تیمار شامل ۵ تکرار در نقطه مرکزی انجام گردید. در جدول ۱ متغیرها و سطوح کدبندی

در رابطه (۴)، η درصد گرانول مفید و M_{Target} مقدار گرانول در اندازه تعریف شده (۴/۷۵ تا ۱۲/۷ میلی‌متر) و M_{Total} مقدار کل گرانول تولیدی می‌باشد. تیمارها به روش کاملاً تصادفی باکس بنکن

دوار، زمان فرآیند گرانول کردن، درصد پرشدگی و درصد ملاس بر درصد گرانول‌های مفید در جدول ۲ نشان داده شده است. مقدار ضریب تعیین (R^2) نشان‌دهنده این است که معادله درجه اول (رابطه ۵) رفتار سیستم را پیش‌بینی می‌کند. رابطه (۵) رابطه بین توزیع اندازه گرانول و متغیرهای مستقل را نمایش می‌دهد.

$$\eta = 72/64772 + 0/083497 x_1 - 1/75122 x_2 + 2/82945 x_3 + 0/087003 x_4 \quad (5)$$

در رابطه (۵)، x_1 ، x_2 ، x_3 و x_4 به ترتیب سرعت چرخش استوانه دوار، زمان گرانول کردن، درصد پرشدگی استوانه دوار از مواد اولیه و غلظت چسباننده می‌باشند.

نتایج حاصل از تحلیل واریانس در جدول ۲ نشان می‌دهد که سه عامل زمان فرآیند گرانول کردن، درصد پرشدگی و غلظت چسباننده در سطح یک درصد تأثیر معنی‌داری بر روی مقدار گرانول‌های مفید دارد.

شکل ۴ مقادیر حقیقی درصد گرانول‌های مفید که در آزمایش‌های تجربی به دست آمده را در مقابل داده‌هایی که روش سطح پاسخ برای مقادیر گرانول‌های مفید پیش‌بینی کرده بود، نمایش می‌دهد که در شکل ۴ مدل ارائه شده با ضریب تبیین ۸۷٪ به داده‌های به دست آمده نزدیک می‌باشد.

شده آن‌ها نشان داده شده است (Zafari et al., 2013). هدف از روش سطح پاسخ یافتن مقادیر مناسب هر یک از متغیرها، به منظور رسیدن به مطلوب‌ترین پاسخ‌ها است. این مقادیر ممکن است بیشینه، کمینه یا در محدوده خاصی قرار گیرد. در این قسمت سعی بر این است که فرآیند گرانول کردن کود کمپوست کامل توسط روش سطح پاسخ بهینه‌سازی گردد. در مرحله اول اهداف مورد نظر برای هر پاسخ و همچنین برای هر متغیر مشخص شد. برای کاهش مصرف انرژی و کاهش هزینه، سرعت چرخش استوانه در مقدار کمینه، زمان گرانول کردن در مقدار کمینه و همچنین درصد پرشدگی در مقدار بیشینه، به عنوان هدف بهینه‌سازی در نظر گرفته شد. همچنین برای این که حداقل مقدار ملاس استفاده شود، مقدار ملاس در حالت کمینه در نظر گرفته شد. برای پاسخ‌ها، مقدار درصد گرانول‌های مفید در حالت بیشینه تعریف شد. پس از تعیین اهداف مطلوب، تیمارهایی که بتواند ما را به این اهداف برساند توسط روش RSM و به وسیله نرم افزار Design Expert 6.0.8 پیشنهاد شد.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از تجزیه واریانس جهت بررسی اثر سرعت استوانه

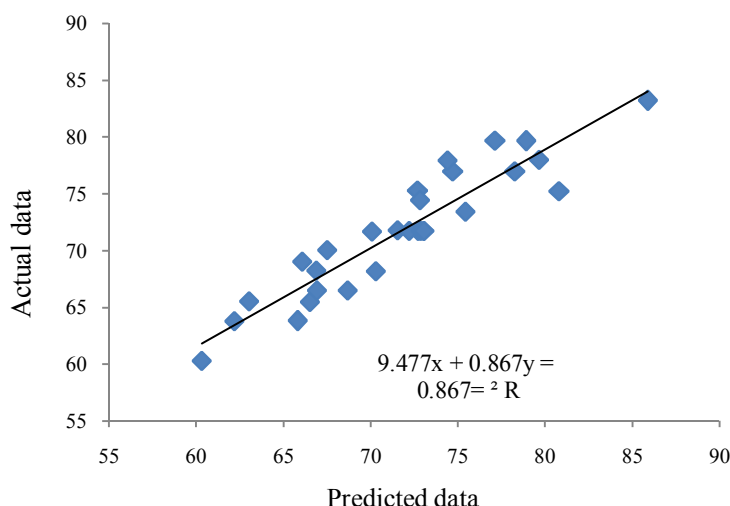
جدول ۲- نتایج تحلیل واریانس اثر چهار عامل مستقل بر گرانول‌های مفید

Table 2- Variance analysis (ANOVA) of four independent variables on useful granules

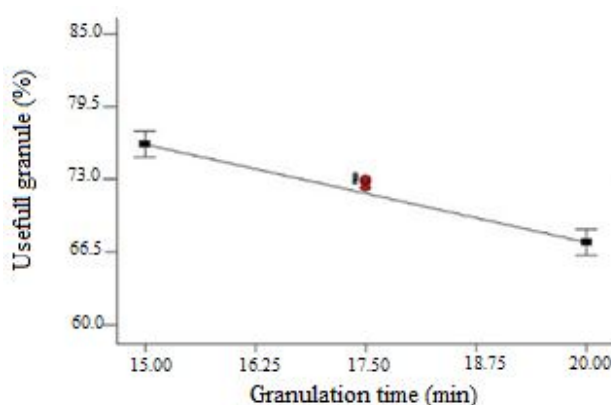
| منبع تغییر Source of variation | مجموع مربعات Sum of square | درجه آزادی df | میانگین مربعات Mean of square | مقدار F F value | Prob > F |
|---|-------------------------------|------------------|----------------------------------|--------------------|----------------------|
| مدل Model | 847.891260 | 4 | 211.9728150 | 39.4214134 | < 0.0001 |
| سرعت استوانه (x_1) Drum speed | 8.36606337 | 1 | 8.366063370 | 1.55586952 | 0.2243 ^{ns} |
| زمان (x_2) Granulation time | 230.007363 | 1 | 230.0073630 | 42.7753690 | < 0.0001** |
| درصد پرشدگی (x_3) Drum filling | 600.434425 | 1 | 600.4344250 | 111.665138 | < 0.0001** |
| غلظت چسباننده (x_4) Binder concentration | 9.08340713 | 1 | 190.08340713 | 45.68927675 | 0.006** |
| ضریب تعیین R-squared | 0.86790371 | | | | |
| ضریب تغییرات C.V. | 3.23197938 | | | | |

** معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد، ^{ns} غیرمعنی‌دار

** Significant at 1% of probability levels, ^{ns} Non. Significant



شکل ۴- رابطه مقادیر حقیقی گرانول‌های مفید و داده‌های پیش‌بینی شده
Fig.4. Relationship between actual values and predicted data of useful granule

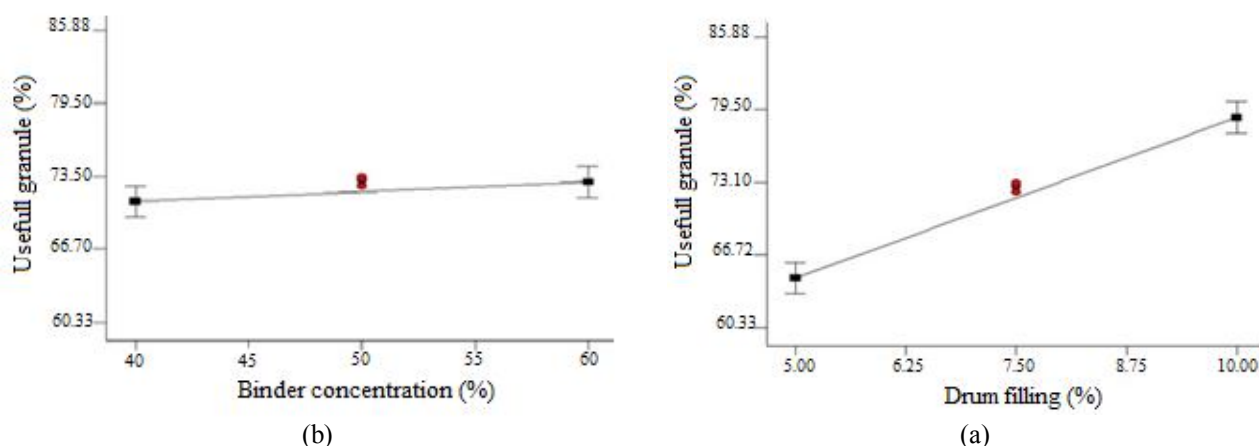


شکل ۵- اثر زمان گرانول کردن بر مقدار مفید گرانول
Fig.5. Effect of granulation time on useful granule

محللول چسباننده آب و ملاس)، مقدار مفید گرانول از ۷۰/۸ درصد به ۷۲/۶ درصد افزایش یافت که این افزایش به اندازه ۱/۸ درصد گرانول مفید برای افزایش ۲۰ درصد از درصد ملاس می‌باشد و کمترین تأثیر را بر روی درصد گرانول مفید دارا می‌باشد. با افزایش غلظت چسباننده، متوسط اندازه گرانول‌ها با توجه به چسبانندگی بیشتر چسباننده، به مقدار کمی افزایش می‌یابد و این افزایش باعث افزایش اندکی در مقدار درصد گرانول مفید می‌شود. در تحقیقی گزارش شد که افزایش درصد پرشدگی استوانه دوار موجب کاهش متوسط اندازه گرانول‌های تولیدی می‌شود (Chansataporn *et al.*, 2009). در نتیجه اکثر گرانول‌های تولیدی در محدوده تعریف شده برای گرانول مفید، قرار گرفته و باعث افزایش درصد گرانول مفید می‌شود.

شکل ۵ نشان می‌دهد با افزایش زمان گرانول کردن از ۱۵ دقیقه به ۲۰ دقیقه، مقدار مفید گرانول از ۷۶ درصد به ۶۷ درصد کاهش یافت که این کاهش به اندازه ۹ درصد گرانول مفید برای افزایش ۵ دقیقه زمان گرانول کردن، می‌باشد. با افزایش زمان گرانول شدن، متوسط اندازه گرانول‌ها بیشتر می‌شود (Heim *et al.*, 2005). در نتیجه گرانول‌های بیشتری از محدوده تعریف شده برای گرانول مفید، عبور کرده و باعث کاهش درصد گرانول مفید می‌شود.

شکل ۶ نشان می‌دهد که با افزایش درصد پرشدگی استوانه از ۵ درصد به ۱۰ درصد، مقدار مفید گرانول از ۶۴/۶ درصد به ۷۹ درصد افزایش یافت که این افزایش به اندازه ۱۴/۴ درصد گرانول مفید برای افزایش ۵ درصد پرشدگی استوانه می‌باشد. که بیشترین تأثیر را در پارامتر مقدار گرانول مفید دارا است و همچنین با افزایش غلظت چسباننده از ۴۰ درصد ملاس به ۶۰ درصد (مقدار ملاس به کل



شکل ۶- اثر درصد پرشدگی استوانه و غلظت چسباننده بر مقدار مفید گرانول

Fig.6. (a) Effect of drum filling on useful granule, (b) Effect of binder concentration on useful granule

جدول ۳- شرایط بهینه فرآیند گرانول کردن کمپوست کامل و پاسخ متناظر

Table 3- Optimum conditions for the compost fertilizer granulation and corresponding results

| شاخص رضایت مندی Desirability | درصد گرانول مفید Useful granule | غلظت چسباننده Binder concentration (%) | درصد پرشدگی Drum filling | زمان Granulation time (min) | سرعت Drum speed (rpm) | ردیف Test |
|---------------------------------|------------------------------------|---|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------|--------------|
| 0.924 | 81.609 | 40.97 | 10.00 | 15.00 | 40.38 | 1 |
| 0.924 | 81.492 | 41.05 | 9.97 | 15.00 | 40.00 | 2 |
| 0.922 | 81.543 | 40.93 | 9.99 | 15.02 | 40.43 | 3 |
| 0.916 | 81.103 | 41.04 | 9.83 | 15.00 | 40.00 | 4 |
| 0.913 | 81.134 | 40.96 | 9.93 | 15.14 | 40.00 | 5 |
| 0.903 | 81.314 | 40.40 | 9.87 | 15.06 | 42.84 | 6 |
| 0.901 | 81.832 | 44.05 | 10.00 | 15.01 | 40.00 | 7 |
| 0.751 | 80.111 | 41.53 | 9.36 | 15.42 | 52.44 | 8 |
| 0.726 | 83.449 | 51.64 | 10.00 | 15.00 | 51.30 | 9 |
| 0.596 | 75.670 | 41.38 | 7.79 | 15.59 | 55.96 | 10 |

نتیجه گیری

نتایج حاصل از تحلیل تأثیر پارامترها بر مقدار مفید گرانول نشان می‌دهد که با افزایش سرعت چرخش استوانه و درصد ملاس مقدار مفید گرانول به مقدار کمی افزایش می‌یابد. همچنین افزایش زمان گرانول کردن، موجب کاهش مقدار مفید گرانول می‌شود و با افزایش درصد پرشدگی استوانه، مقدار مفید گرانول افزایش می‌یابد. در سرعت چرخش ۴۰/۳۸ دور بر دقیقه، زمان گرانول کردن ۱۵ دقیقه، درصد پرشدگی ۱۰ درصد از حجم استوانه و درصد چسباننده ۴۰/۹۷ درصد، مناسب‌ترین پاسخ در شرایط آزمایشگاهی به دست می‌آید. با توجه به پارامترهای تعریف شده برای برنامه Design Expert 6.0.8، پاسخ‌های درصد گرانول‌های مفید ۸۱/۶ با شاخص رضایت مندی ۰/۹۲۴ به اهداف تعیین شده نزدیک می‌باشد.

در جدول ۳ فهرستی از شرایط بهینه دستگاه نمایش داده شده است. با توجه به اهداف تعیین شده، ردیف‌های ۱ و ۲ در جدول ۳ مطلوب‌ترین شرایط آزمایش با توجه به شاخص رضایت مندی می‌باشد که توسط سطح پاسخ پیشنهاد شد. همان‌طور که در جدول ۳ مشخص است در سرعت چرخش ۴۰/۳۸ دور بر دقیقه، زمان گرانول کردن ۱۵ دقیقه، درصد پرشدگی ۱۰ درصد از حجم استوانه و درصد چسباننده ۴۰/۹۷ درصد، مناسب‌ترین پاسخ و شرایط آزمایش را می‌دهد. با توجه به پارامترهای تعریف شده برای برنامه Design Expert 6.0.8، پاسخ درصد گرانول‌های مفید ۸۱/۶ با شاخص رضایت مندی ۰/۹۲۴ به اهداف تعیین شده نزدیک می‌باشد.

1. Andrzej, H., G. Tadeusz, O. Anderzej, G. Estera, and B. Michal. 2006. The effect of wetting parameters on mechanical strength of granulated material. *Physicochemical Problems of Mineral Processing* 40: 237-245.
2. Box, G. E. P., and D. W. Behnken. 1960. Some new three level designs for the study of quantitative variables. *Technometrics* 50: 455-475.
3. Chansataporn, W., and M. Nopharatana. 2009. Effects of binder content and drum filling degree on cassava pearl granulation using drum granulator. *Asian Journal of Food and Agro-Industry* 2 (4): 739-748.
4. Ghanbari, S. 2008. Investigation of influencing parameters on motion and stability angle granular materials in rotating cylinders. MSc Thesis. Aboureyhan College. University of Tehran, Tehran, Iran. (In Farsi).
5. Ghasemi, Y., M. H. Kianmehr, A. H. Mirzabe, and B. Abooli. 2013. The effect of rotational speed of the drum on physical properties of granulated compost fertilizer. *Journal of Physicochemical Problems of Mineral Processing* 49 (2): 743-755.
6. Gluba, T. 2003. The effect of wetting liquid droplet size on the growth of agglomerates during wet drum granulation. *Powder Technology* 130: 219-224.
7. Heim, A., A. Obraniak, and T. Gluba. 2005. Changes of feed bulk density during drum granulation of bentonite. *Physicochemical Problems of Mineral Processing* 39: 219-228.
8. Hicks, G. C., I. W. McCamy, and M. M. Norton. 1977. Studies of fertilizer granulation at TVA. In: *Proceedings of the second International Symposium on Agglomeration, Atlanta, USA.*
9. Mangwandi, C., A. B. Albadarin, A. H. Al-Muhtaseb, S. J. Allen, and G. M. Walker. 2013. Optimisation of high shear granulation of multicomponent fertiliser using response surface methodology. *Powder Technology* 238: 142-150.
10. Moursy, H. E. M. N. 2002. Granulation of Nitrophosphate fertilisers. PhD Thesis. Queen's University Belfast, Belfast.
11. Myers, R. H., and D. C. Montgomery. 1995. *Response Surface Methodology*. John Wiley and Sons. New York.
12. Nalladurai, K., and R. V. Morey. 2010. Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass. *Bioresource Technology* 101: 1082-1090.
13. Pozin, M. E. 1986. *Fertilizer manufacture*. Mir publishers. USSR. Moscow.
14. Reddy, B. C., D. V. S. Murthy, and C. D. P. Rao. 1997. Modeling of a rotary drum granulator for control. *Particle and Particle Systems Characterization* 14: 257-262.
15. Rezaeifar, J. 2008. Investigation parameters of pellets from cattle manure for extruder design. MSc Thesis. Aboureyhan College. University of Tehran, Tehran, Iran. (In Farsi).
16. Salman, A. D., M. J. Hounslow, and J. P. K. Seville. 2007. *Granulation*. Elsevier. Amsterdam.
17. Sherrington, P. J., and R. Oliver. 1981. Globulation processes in granulation. Heyden and Son Ltd., London, 118-140.
18. Walker, G. M., C. R. Holland, M. N. Ahmad, J. N. Fox, and A. G. Kells. 2000. Drum granulation of NPK fertilizers. *Powder Technology* 107 (3): 282-288.
19. Walker, G. M., H. E. M. N. Moursy, C. R. Holland, and M. N. Ahmad. 2003. Effect of process parameters on the crush strength of granular fertilizer. *Powder Technology* 132: 81-84.
20. Zafari, A., M. H. Kianmehr, and A. A. M. Hoseini. 2013. Optimizing expenditure energy in compost fertilizer extrusion processing using response surface methodology. *Iran Biosystem Engineering* 44 (1): 45-56. (In Farsi).