

طراحی، ساخت و ارزیابی دستگاه مخلوط‌کن پدالی دو محوره مداوم کود

محمد غریبی خراجی^۱، محمدحسین کیان‌مهر^{۲*}، علی ماشاءالله کرمانی^۳، اکبر عرب حسینی^۴ و بهزاد آزادگان^۵

چکیده

یکی از راه‌های افزایش تولید و بهره‌وری محصولات کشاورزی، تغذیه مناسب گیاهان است که منجر به افزایش تولید در واحد سطح می‌گردد. کودهای شیمیایی و کمپوست به تنهایی نمی‌توانند احتیاج گیاهان را تأمین کنند. بنابراین لازم است که این دو نوع کود به نسبت مشخصی با هم مخلوط شوند. مشکل عمده جهت اختلاط کود کمپوست و کودهای شیمیایی، کنترل نسبت اختلاط آن‌ها در مخلوط کردن است. در این تحقیق دستگاه مخلوط‌کن پدالی دو محوره جهت اختلاط مناسب کود کمپوست و کود شیمیایی اوره طراحی و ساخته شده است. دستگاه ساخته شده شامل الکتروموتور با توان ۱/۵ کیلووات، شاسی، پدال و مکانیزم چرخ زنجیر است. آزمایش‌های ارزیابی عملکرد در سه سطح سرعت دورانی محورها ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دور در دقیقه، سه سطح طول مسیر اختلاط ۷۲، ۱۰۸ و ۱۴۴ سانتی‌متر، و دو سطح زاویه پدال‌های ۴۵ و ۶۰ درجه با محور دوار در سه تکرار تحت آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح بلوک کاملاً تصادفی انجام گرفت. نتایج حاصل از تجزیه واریانس اثر عوامل مستقل بر روی نسبت اوره به کمپوست نشان داد که سرعت دورانی محورها، زاویه پدال‌ها و طول اختلاط در سطح ۱ و ۵ درصد معنی‌دار بود. همچنین نتایج مقایسه میانگین اثر تیمارهای اعمال شده نشان داد زاویه پدال ۴۵ درجه، سرعت دورانی ۴۰ دور در دقیقه و طول اختلاط ۱۰۸ سانتی‌متر بهترین عملکرد را داشت.

واژه‌های کلیدی: درجه اختلاط، کود اوره، پدال، کود کمپوست، مخلوط‌کن.

ارجاع: غریبی خراجی م.، کیان‌مهر م.، ح. کرمانی ع.، عرب حسینی ا. و آزادگان ب. ۱۴۰۱. طراحی، ساخت و ارزیابی دستگاه مخلوط‌کن پدالی دو محوره مداوم کود. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۲۴: ۱۰۳-۱۱۳. <https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2022.10075.532>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران.
۲- استاد گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران.
۳- استادیار گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران.
۴- دانشیار گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران.
۵- دانشیار گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران.

* نویسنده مسئول: kianmehr@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۶

مقدمه

افزایش جمعیت جهان و به نسبت آن افزایش نیاز غذایی برای سال‌های اخیر از دغدغه‌های اصلی دولت‌مردان بوده و هست. با توجه به شرایط موجود همچون ساخت و ساز شهری و در نتیجه کم شدن سطح زیر کشت می‌توان نتیجه گرفت که در آینده تولید محصولات کشاورزی و غذایی باید با بازده بیشتری انجام شود (Keeney, 1997). نیتروژن، پتاسیم و فسفر (NPK) عناصر غذایی ضروری و اساسی برای گیاهان محسوب می‌گردند و کمیت و کیفیت متابولیت‌های ثانویه گیاه همچون تکثیر سلولی را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Sifola & Barbieri, 2006). نیتروژن با اینکه مهم‌ترین عنصر برای رشد گیاه به شمار می‌رود، ولی برای اراضی کشاورزی بیش از عناصر غذایی دیگر در معرض هدررفت قرار داشته و در نتیجه باعث آلودگی آب‌های زیرزمینی به نترات می‌شود (Ferguson et al., 1991). مطالعات بلند مدت نشان می‌دهند که استفاده مداوم از کودهای شیمیایی عملکرد گیاهان زراعی را کاهش می‌دهد. این کاهش، نتیجه اسیدی شدن خاک، کاهش فعالیت‌های بیولوژیک خاک، افت خصوصیات فیزیکی خاک و عدم وجود ریزمغذی‌هایی همچون آهن، روی، منگنز و غیره در کودهای نیتروژن، پتاسیم و فسفر است (Adediran et al., 2005). از طرفی، امروزه افزایش قیمت نهاده‌های شیمیایی و نیز افزایش نگرانی‌ها در مورد حفاظت خاک و تولید محصول سالم باعث توجه به کودهای آلی به عنوان منابع افزایش باروری خاک شده است (Chapuis-Lardy et al., 2003). امروزه تحقیقات بر روی میکروارگانیزم‌های بهبود دهنده حاصلخیزی خاک (کودهای زیستی) به دلیل هزینه بالای کودهای شیمیایی و اثرات منفی آن‌ها روی محیط در حال افزایش است (Adesemoye et al., 2009). تحقیقات نشان داده است که کودهای زیستی همچون کمپوست به تنهایی نمی‌توانند تمام احتیاج گیاهان به عناصر غذایی را تأمین کنند و باید در کنار سایر نهاده‌ها مورد استفاده قرار بگیرند (Astarai & Faridhosseni, 2012). همچنین نتایج یک تحقیق نشان داده است که مصرف کمپوست حاصل از زباله شهری غنی شده با کودهای شیمیایی در مزرعه، قابلیت دسترسی به عناصر پرمصرف را توسط گیاهان افزایش داده و موجب افزایش حاصلخیزی و قابلیت تولید خاک می‌شود (Ramadass & Palaniyandi, 2007).

مشکل بزرگی در مورد افزایش مصرف مواد شیمیایی نیتروژن به عنوان کود در خاک وجود دارد؛ زیرا برخی از اشکال نیتروژن در خاک جذب نشده و سبب افزایش آلودگی محیط و آلودگی آب و کاهش کارایی کود می‌شوند. مخلوط کردن کود شیمیایی نیتروژن با کمپوست باعث می‌شود که ترکیبات نیتروژن در خاک باقی مانده و برای مدت طولانی از ریشه‌های گیاه قابل جذب باشد و به طور چشمگیری باعث کاهش آلودگی آب شود (Zafari & Kianmehr, 2012). نسبت کربن به نیتروژن (C/N) نیز مهم‌ترین عامل غذایی است که نیاز به توجه فراوان دارد، زیرا تجربه نشان داده است که در بیشتر پسماندهای آلی، سایر عناصر غذایی در مقادیر و نسبت‌های مورد نیاز برای کمپوست‌سازی وجود دارد (Diaz and De Bertoldi, 2007). اگر نسبت C/N در توده زباله اولیه بسیار پایین باشد نیتروژن به صورت آمونیاک از توده خارج می‌شود و موجب ایجاد بوی نامطبوع می‌گردد، از طرفی اگر این نسبت بسیار بالا باشد کاهش سرعت فرایند کمپوست‌سازی را سبب می‌شود (Zhu, 2007). افزودن پسماندهای نیتروژنی (فاضلاب، کود حیوانی) و حتی کود شیمیایی اوره می‌تواند نسبت بالا و نامطلوب C/N را کاهش دهد. از طرفی افزودن پسماندهای کربنی (خاک اره، کاه، برگ خشک) می‌تواند نسبت نامطلوب و پایین C/N را افزایش دهد (Tchobanoglous & Kreith, 2002). در تحقیقی که توسط Tsai & Lin (1994) انجام گردید، مشاهده شد که جریان گرانول در یک تغذیه کن مارپیچی شبیه جریان پلاگین^۱ است. میزان درجه مخلوط شدن در تغذیه مارپیچ توسط هر یک از موارد (۱) افزایش قطر شفت، (۲) کاهش گام هلیس، (۳) افزایش قطر پره هلیس، (۴) افزایش ضخامت پره، (۵) افزایش زاویه بین تغذیه کن بالا و تغذیه کن پایین، (۶) افزایش طول تغذیه کن پایین و (۷) کاهش سرعت چرخش مارپیچ بالایی و مارپیچ پایینی‌تر، افزایش یافت. میزان مخلوط کردن با استفاده از یک مارپیچ پارویی افزایش یافت و با استفاده از یک مارپیچ شفت مخروطی، یک مارپیچ با پره برشی یا یک مارپیچ با پره پله‌ای کاهش یافت. در این مطالعه برای آزمایش‌ها از توپ‌های فولادی با چهار اندازه مش، ۱۸-۱۶، ۲۰-۱۸، ۲۰-۲۵ و ۳۰-۳۵، و همچنین توپ‌های آلومینیمی به اندازه مش ۳۰-۳۵، استفاده شد و همچنین برای جدا

نتایج مطالعات انجام گرفته، دستگاه مخلوط‌کن پدالی دو محوره مناسب تشخیص داده شد (Masuda et al., 2006). شکل ۱ تصویر کامل دستگاه طراحی شده به تفکیک اجزا را نشان می‌دهد. اجزای مختلف دستگاه عبارت‌اند از: ۱- شاسی دستگاه، ۲- الکتروموتور گیربکس‌دار، ۳- ناودانی، ۴- دیواره انتهایی، ۵- محور پدال‌ها، ۶- پدال، ۷- یاتاقان، ۸- چرخ‌زنجیر، ۹- زنجیر، ۱۰- چرخ‌دنده هرزگرد، ۱۱- ورودی مواد به شکل جدا از هم، و ۱۲- خروجی مواد مخلوط شده. در این دستگاه برای عمل اختلاط ابتدا هر دو نوع کود کمپوست و اوره به‌طور جداگانه در قسمت ورودی دستگاه ریخته می‌شود، مواد ورودی در اثر حرکت دورانی محورها و در اثر نیروهای وارده پدال‌ها ضمن انتقال به سمت جلو با یکدیگر مخلوط می‌شوند. سیستم انتقال توان دستگاه شامل الکتروموتور دارای گیربکس دور متغیر، زنجیر، چرخ‌زنجیر، چرخ هرزگرد، یاتاقان، محوره‌های دوار و پدال‌ها است. روش کار به این صورت است که توان مورد نیاز توسط الکتروموتور از طریق چرخ‌زنجیر و زنجیر به محورها انتقال می‌یابد، سپس با توجه به موقعیت قرارگیری پدال‌ها روی محورها، مواد در حین حرکت به طرف جلو با یکدیگر مخلوط می‌شوند. پدال‌ها با استفاده از اتصال پیچ و مهره به محور متصل‌ند، و مقدار زاویه آن‌ها با خط مرکز محورها قابل تنظیم است.

انتخاب منبع تأمین توان

به منظور تأمین توان مورد نیاز دستگاه، از یک الکتروموتور گیربکس‌دار استفاده شد. توان الکتروموتور باید به اندازه‌ای باشد که بتواند گشتاور لازم برای به حرکت در آوردن قسمت‌های مختلف دستگاه شامل محورها، سیستم انتقال توان و همچنین انتقال مواد و غلبه بر اصطکاک داخلی ذرات را تأمین کند. توان مورد نیاز از معادله (۱) محاسبه شد (Woodcock & Mason, 2012).

$$P_{mot} = \frac{(P_{mat} + P_{frict}) F_0}{h} \quad (1)$$

که در آن: P_{mot} توان الکتروموتور بر حسب کیلووات برای مخلوط‌کن تک محوره؛ P_{mat} توان مورد نیاز برای انتقال مواد بر حسب کیلووات؛ P_{frict} توان مورد نیاز جهت غلبه بر مقاومت اصطکاکی بین قطعات متحرک بر حسب کیلووات؛ F_0 فاکتور بیش باری (برابر با ۳)؛ η راندمان مکانیکی بین ۸۵ تا ۹۵ درصد. مقادیر P_{mat} و P_{frict} از معادله‌های (۲) و (۳) محاسبه شدند (Woodcock & Mason, 2012).

کردن توپ‌های فولادی و آلومینیمی و تعیین ترکیب دانه بندی از آهن‌ربا استفاده شد (Tsai & Lin, 1994). جهت آماده‌سازی کود گاوی برای تولید پلت، یک دستگاه هم‌زن نوع ریون^۱ با چهار پره که در جهات مختلف انحنا داشت و یک ورز دهنده پدالی، طراحی و ساخته شد. جهت آزمایشات، کود گاوی آسیاب شده در سه سطح رطوبتی برای تولید پلت کود گاوی بکار گرفته شد و این نتیجه حاصل گردید که برای فرآوری و تعیین خواص رئولوژیکی اکثر مواد زیست توده، دستگاه‌های ساخته‌شده مناسب بوده و می‌تواند موجب بهینه شدن طراحی و ساخت دستگاه‌های پلت‌کننده گردد (Amiri, 2012). در پژوهشی، با استفاده از روش المان مجزا^۲ (DEM) جهت شبیه‌سازی مخلوط کردن ذرات زیست توده و دانه‌های شیشه‌ای از مخلوط‌کن دو محوره افقی ماریپیچی با سه سرعت دورانی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دور در دقیقه استفاده کردند. در این مطالعه، افزایش طول ماریپیچ باعث کاهش عملکرد دستگاه شد، کاهش میزان تغذیه ورودی ذرات جامد باعث کاهش میزان مخلوط شدن و همچنین افزایش مقدار زیست توده نسبت به اندازه دانه‌های شیشه‌ای باعث کاهش عملکرد دستگاه شد (Qi et al., 2017).

بررسی منابع نشان می‌دهد که تاکنون تحقیقی در رابطه با طراحی و ساخت دستگاه مخلوط‌کن جهت اختلاط کود کمپوست و کود شیمیایی انجام نشده است. به این منظور جهت رسیدن به اختلاط با درصد کیفیت مطلوب و رسیدن به نسبت کربن به نیتروژن مناسب در کودهای مورد استفاده در مزرعه، دستگاه مخلوط‌کن پدالی دو محوره طراحی و ساخته شد و سپس مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

طراحی و ساخت

دستگاه مورد نظر بایستی علاوه بر تأمین اختلاط مناسب مواد، دارای ویژگی‌هایی چون اشغال حداقل فضا، حداقل زمان جهت همگن‌سازی مخلوط مواد، مصرف انرژی حداقل، صرف حداقل زمان تخلیه و بارگیری، انعطاف‌پذیری بالا و نصب آسان در فرآیند اختلاط را داشته باشد. با توجه به خواص مکانیکی مواد استفاده شده و

1- Ribbon mixer

2- Discrete element method

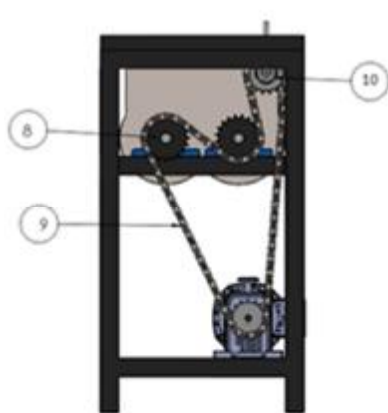
برای انتقال توان الکتروموتور گیربکس به محورها از سیستم انتقال توان چرخ زنجیر استفاده شد. با توجه به ضریب کاری برابر با $1/3$ و توان الکتروموتور مورد استفاده، زنجیر شماره ۶۰ و چرخ با ۲۸ دندانه در نظر گرفته شد. محورها می‌توانند جهت‌های چرخش متفاوتی داشته باشند، هنگامی که جهت چرخش محور به سمت راست پاد ساعت‌گرد و جهت چرخش محور به سمت چپ ساعت‌گرد باشد بهترین درجه اختلاط ایجاد می‌شود (Kingston & Heindel, 2014). به همین دلیل در ساخت دستگاه، محل قرارگیری الکتروموتورگیربکس و جهت چرخش آن و همچنین محل قرارگیری چرخ هرزگرد به گونه‌ای بود که جهت چرخش محورها به شکل گفته شده درآید (شکل ۱-ب).

$$P_{frict} = 50 D_{sc} L \quad (2)$$

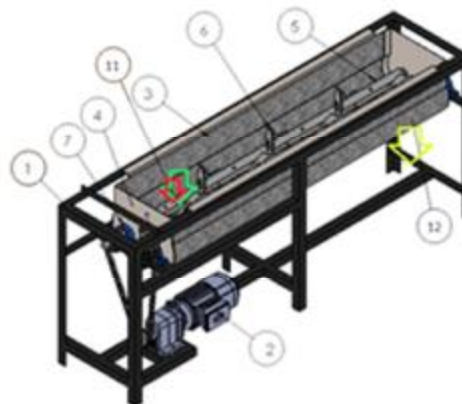
$$P_{mat} = F_s F_m r_b g V_s L \quad (3)$$

که در این معادلات: D_{sc} قطر مارپیچ بر حسب متر؛ L طول مارپیچ بر حسب متر؛ r_b چگالی توده بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب؛ V_s جریان حجمی مواد بر حسب مترمکعب بر ثانیه؛ g شتاب گرانشی متر بر مجذور ثانیه؛ F_m فاکتور مواد یا ضریب مقاومت جریان (برابر با $2/6$) و F_s با توجه به انواع هلیس مورد استفاده (برابر با ۱) هستند

لازم به ذکر است که با توجه به ابعاد مخزن مخلوطکن (قطر مارپیچ برابر با 0.25 متر و طول مارپیچ برابر با ۲ متر)، بیشینه سرعت دورانی محورها یعنی ۶۰ دور در دقیقه و با استفاده از معادله (۱) و ضرب کردن مقدار به دست آمده در عدد دو، توان مورد نیاز $1/5$ کیلووات محاسبه گردید.



ب



الف

شکل ۱- نماهایی از دستگاه مخلوطکن پدالی دو محوره، الف) نمای سه بعدی و ب) واحد انتقال توان

ماندن فاصله بین پدال و بدنه مخلوطکن از دو مهره و یک پیچ به طول ۱۰ سانتی‌متر استفاده شد. پس از ساخت تمام اجزای دستگاه، این قطعات مونتاژ شدند و دستگاه برای ارزیابی آماده شد (شکل ۲).

برای ساخت محورهای دستگاه از دو پروفیل صنعتی 50×50 میلی‌متر به ضخامت ۴ و طول ۱۹۶۰ میلی‌متر استفاده و در دو انتهای پروفیل‌ها شفتی جهت قرار گرفتن در داخل یاتاقان‌ها جوش داده شد. جنس پروفیل استفاده شده St-37 است.

پره‌ها

در این نوع مخلوطکن‌ها عامل مخلوط کننده پدال‌ها یا پره‌ها هستند به همین دلیل امروزه به شکل‌ها و طرح‌های متنوعی ساخته می‌شوند. در این تحقیق برای انتقال بهتر و هم زدن بهتر مواد و نزدیک بودن چیدمان پدال‌ها در کنار هم به شکل مارپیچ با قابلیت تغییر زاویه قرارگیری، پدال‌ها به شکل قسمتی از دایره در نظر گرفته شد. ابعاد پدال‌ها ابتدا در محیط نرم‌افزار Solidworks طراحی و سپس با استفاده از دستگاه برش لیزر برش داده شدند. جهت ایجاد زوایای مختلف پدال با محور و همچنین ثابت



شکل ۲- نمای داخلی دستگاه: الف - پره‌های ساخته شده و نصب شده، ب - دستگاه ساخته شده

تحلیل مکانیکی دستگاه

برآورد مؤلفه‌های نیروهای محوری و شعاعی

قبل از شروع به ساخت دستگاه با توجه به توان ۱/۵ کیلووات استفاده شده، ابتدا مؤلفه‌های نیرویی بر پدال‌ها محاسبه شد، در شکل ۳ تجزیه و تحلیل بارهای محوری و شعاعی وارد شده بر محور ارائه شده است (Bates, 2000). نیروی‌های محوری و شعاعی وارد به محور مخلوطکن از معادله‌های (۴) و (۵) محاسبه شدند.

$$F_a = \sum F \cos(f+q) \tag{4}$$

$$F_r = \sum F \sin(f+q) \tag{5}$$

در این معادله‌ها: θ زاویه پدال و e زاویه اصطکاک مواد روی سطح پره پدال است (Bates, 2000). نیروی محوری، منتج از نیروی برشی جهت جلو بردن مواد است. در

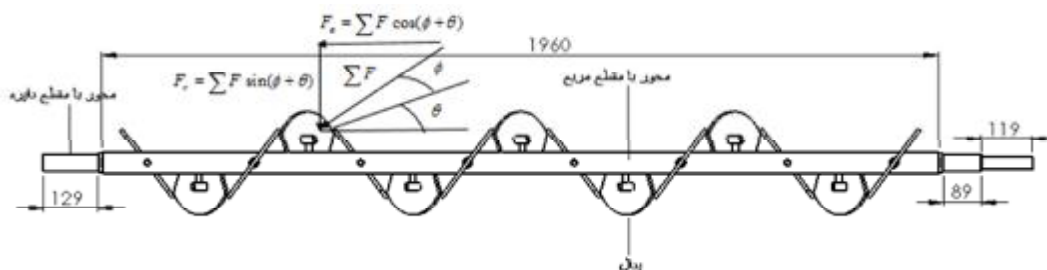
محاسبات، به دلیل بیشینه نیروی برشی در حالت ۴۵ درجه، مجموع دو زاویه θ و e برابر با ۴۵ درجه در نظر گرفته شد (Beer et al., 2018).

برای محاسبه $\sum F$ از معادلات (۶) و (۷) استفاده شد:

$$\sum F = \frac{P}{V} \tag{6}$$

$$V = \frac{N \cdot I}{60} \tag{7}$$

که در آن: P توان بر حسب وات؛ $\sum F$ مجموع نیروها بر حسب نیوتن؛ V سرعت بر حسب متر بر ثانیه؛ N سرعت دورانی محور بر حسب دور در دقیقه و I گام مارپیچ است. (Behrouzi Lar, 2012)



شکل ۳- مؤلفه‌های محوری و شعاعی نیروی وارد بر محور مخلوطکن

ارزیابی عملکرد دستگاه

به منظور بررسی تأثیر سطوح مختلف سرعت چرخش محور، زاویه پدال‌ها و طول مسیر اختلاط بر درجه اختلاط مواد، آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح بلوک کاملاً تصادفی در سه تکرار انجام شد. در آن سرعت چرخش محورها (ω)

در سه سطح ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دور در دقیقه و سطوح مختلف زاویه پدال در دو سطح ۴۵ و ۶۰ درجه با محور دستگاه به عنوان فاکتور (P) و طول مسیر اختلاط به عنوان فاکتور (L) در سه سطح ۷۲، ۱۰۸ و ۱۴۴ سانتی‌متر بر روی درجه اختلاط آزمایش شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها با

گرفته است، به طور مثال، در تحقیقات قبلی حجم پرشدگی ۶۵ درصد را جهت بهینه عملکرد دستگاه‌های صنعتی پیشنهاد و حجم پرشدگی ۱۹ تا ۹۰ درصد را آزمایش شد (Kingston & Heindel, 2014; Huo *et al.*, 2016).

پس از آماده کردن مواد مخلوط کود، دستگاه روشن گردید و پس از خارج شدن تقریباً ۱۰ درصد از مواد، دستگاه متوقف شد و در همین حالت که دستگاه خاموش بود، کار نمونه برداری در طول‌های ذکر شده انجام گرفت و هرکدام از نمونه‌ها به طور جداگانه در داخل پاکت پلاستیکی ریخته و درب آن بسته و در جایی خنک و بدور از رطوبت و نور خورشید نگهداری شد تا کود شیمیایی مخلوط شده با کمپوست، با هوا ترکیب و کم نشود. در آخر پس از اتمام نمونه برداری، کمپوست و کود شیمیایی مخلوط شده به شکل دستی از هم جدا و مقدار جرم کمپوست و اوره با دستگاه ترازو (با دقت ۰/۰۰۱ گرم) اندازه‌گیری شدند (شکل ۴).

استفاده از نرم‌افزار آماری SAS 9.3 انجام گردید. مقایسه میانگین اثرات مستقل تیمارها و همچنین اثر متقابل آن‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد انجام شد.

برای انجام هر آزمایش ابتدا مقدار ۱۵ کیلوگرم کمپوست و ۳ کیلوگرم کود شیمیایی اوره (نسبت وزنی ۵ به ۱) به صورت مجزا توزین شد. سپس سرعت دورانی محور و زاویه پدال مورد نظر انتخاب و تنظیم گردید. بعد از آن در حالی که دستگاه خاموش بود ابتدا مقدار کمپوست وزن شده در ورودی دستگاه ریخته شد و سطح آن تراز شد سپس مقدار کود شیمیایی اوره وزن شده بر روی کمپوست ریخته و سطح آن دوباره تراز شد.

در این تحقیق به دلیل محدودیت‌های موجود، حجم پرشدگی ناودانی ۲۰ درصد در نظر گرفته شد و همچنین مواد در ۲۵ سانتی‌متر ورودی دستگاه مخلوطکن ریخته شدند. لازم به ذکر است در منابع مختلف حجم پرشدگی‌های متفاوتی توصیه شده و مورد آزمایش قرار



شکل ۴- روش انجام آزمایش الف) ریختن مواد داخل دستگاه، ب) نمونه برداری، ج) جدا کردن نمونه‌ها

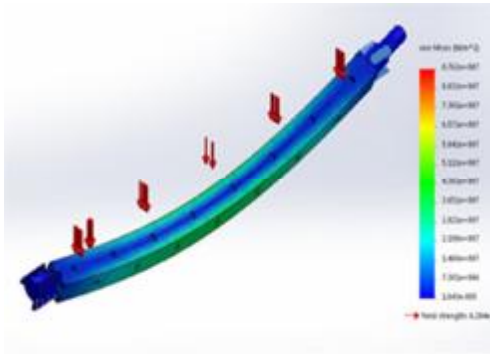
نتایج و بحث

در معادله (۷) با در نظر گرفتن N برابر با ۶۰ دور در دقیقه و l برابر با ۰/۵ متر، مقدار سرعت خطی مواد برابر با ۰/۵ متر در ثانیه به دست می‌آید. در معادله (۶)، با در نظر گرفتن P برابر با ۱۵۰۰ وات و V برابر با ۰/۵ متر در ثانیه، مقدار $\sum F$ برابر با ۳۰۰۰ نیوتن محاسبه شد. طبق معادله (۴) و معادله (۵)، مقادیر نیروی محوری و شعاعی وارد بر محورها هر دو برابر با ۲۱۲۱ نیوتن برآورد گردیدند.

برخی از خواص فیزیکی کمپوست کامل پودری و کود اوره در جدول ۱ آورده شده است (Zarkesh, 2019; Fulton & Port, 2016)

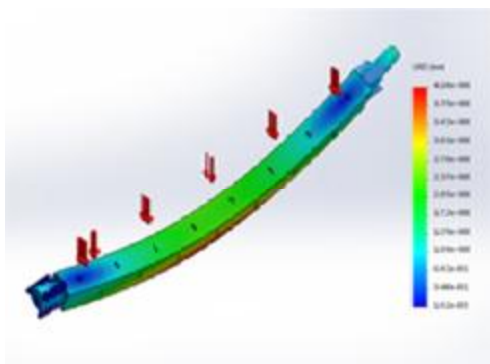
جدول ۱- خواص فیزیکی کمپوست و کود اوره

ماده	خواص فیزیکی	مقدار (کیلوگرم بر مترمکعب)
کود کمپوست	جرم حجمی ظاهری	۷۰۰
	جرم حجمی حقیقی	۱۵۵۰
کود اوره	جرم حجمی ظاهری	۸۲۰-۷۲۰
	جرم حجمی حقیقی	۱۳۰۰-۱۲۰۰



شکل ۶- تنش خمشی ایجاد شده در محور

شکل ۷ نشان دهنده مقدار خیز برابر با ۴/۱۰ میلی‌متری توسط تنش خمشی است. از این مقدار می‌توان نتیجه گرفت که میزان فاصله^۱ بین پدال و ناودانی باید بیشتر از این مقدار باشد که در ساخت این دستگاه فاصله بین پدال و ناودانی برابر با ۵/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد.



شکل ۷- تغییر شکل ایجاد شده توسط نیروی خمشی در محور

نتایج ارزیابی عملکرد دستگاه

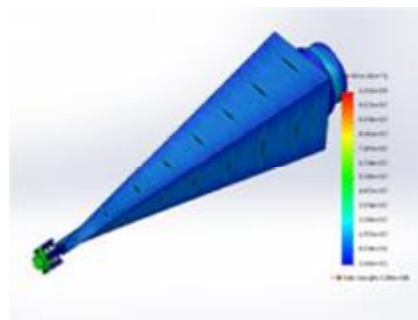
جدول ۲ نتایج تجزیه واریانس اثر عامل‌های زاویه پدال، سرعت دورانی محورها و طول اختلاط بر عملکرد دستگاه جهت اختلاط کود کمپوست و کود شیمیایی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول ۲ مشخص است، اثر متقابل دوگانه زاویه پدال با طول اختلاط و زاویه پدال با سرعت دورانی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار است، اما اثر متقابل دوگانه طول اختلاط و سرعت دورانی معنی‌دار نیست. همچنین اثر متقابل سه‌گانه زاویه پدال، سرعت دورانی و طول اختلاط نیز معنی‌دار نشد. اثر عامل‌های زاویه پدال، طول اختلاط و سرعت دورانی در سطح احتمال یک درصد و پنج درصد معنی‌دار است. همچنین از جدول می‌توان دریافت که به دلیل بیشتر بودن میانگین

تنش پیچشی وارد بر محور

به دلیل وجود نیروی شعاعی بر پدال‌ها و فاصله مرکز اثر این نیروها تا خط مرکز محور، یک گشتاور در محور ایجاد می‌شود که باعث ایجاد گشتاور پیچشی می‌شود.

$$T = r.F \quad (۸)$$

T گشتاور بر حسب نیوتن متر؛ r شعاع دوران یعنی نقطه اثر نیرو تا محور دوران بر حسب متر و نیروی F بر حسب نیوتن که باعث گشتاور می‌شود (Behrouzi Lar, 2012). با جای‌گذاری مقدار نیروی شعاعی ۱۰۶۰/۵ نیوتن به فاصله ۰/۰۹۹ متر تا خط مرکز محور در معادله (۸)، مقدار گشتاور ایجاد شده در محور برابر با ۱۰۵/۱۰ نیوتن متر محاسبه گردید. در شکل ۵ تنش پیچشی ایجاد شده توسط گشتاور در نرم افزار Solidworks تحلیل شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود برای سهولت در فرآیند بررسی، یک سر محور تکیه‌گاه ثابت و گشتاوری که در کل طول محور گسترده بود در ابتدای محور در نظر گرفته شد. این حالت بحرانی‌ترین موقعیت توسط نیروی پیچشی در محور خواهد بود. از محاسبات انجام شده توسط نرم افزار نتیجه شد که حداکثر تنش پیچشی ایجاد شده برابر با ۱۰۷/۲ مگاپاسکال و کمتر از تنش تسلیم جنس محور مورد استفاده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که جنس و ابعاد محور در نظر گرفته شده مناسب است (شکل ۵).



شکل ۵- تنش حاصل از گشتاور وارد شده به محور

تنش خمشی وارد بر محور

تحلیل تنش خمشی ایجاد شده توسط نیروی شعاعی ۱۰۶۰/۵ نیوتنی بر روی محور به شکل گسترده در شکل ۶ نشان داده شده است. در شکل حداکثر تنش خمشی ایجاد شده برابر با ۸۷/۶۲ مگاپاسکال مشاهده می‌شود که از مقدار تنش تسلیم ماده کمتر است و این نشان دهنده انتخاب درست ابعاد و جنس محور است.

تحقیق برای آن که بتوان صفت اندازه‌گیری شده تیمارها را با مقدار ۰/۲، یعنی درجه اختلاط ایده‌آل مقایسه کرد تیماری تحت عنوان شاهد به مقدار ۰/۲ در نظر گرفته شده است.

مربعیات طول اختلاط نسبت به زاویه پدال و سرعت دورانی، اثر طول اختلاط بر درجه اختلاط بیشتر است. همچنین ضریب تغییرات (C.V) بر اساس نتایج بدست آمده ۱۶/۷۷ برآورد شد که می‌توان دقت نتایج آزمون را خوب توصیف کرد. در ضمن لازم به ذکر است که در این

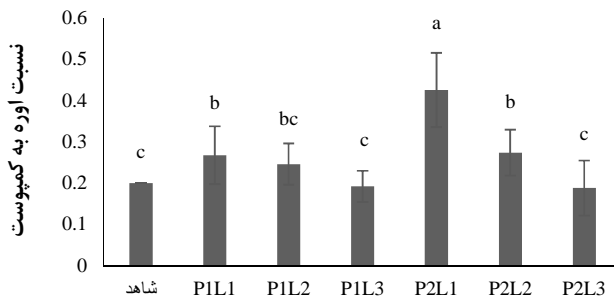
جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس تأثیر زاویه پدال، سرعت دورانی محور و طول اختلاط بر درجه اختلاط

مقدار F	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	منابع تغییرات
۰/۰۳ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۴۹۰۲	۰/۰۰۰۰۹۸۰۵	۲	تکرار
۴/۱۶۹۹ ^{**}	۰/۰۰۸۲۸۹۳۹	۰/۰۰۸۲۸۹۳۹	۱	شاهد در برابر سایر تیمارها
۲۴/۷۶ ^{**}	۰/۰۴۹۲۱۸۸۷	۰/۰۴۹۲۱۸۸۷	۱	زاویه پدال
۱۴/۰۶ ^{**}	۰/۰۲۷۹۴۶۸۴	۰/۰۵۵۸۹۳۶۷	۲	سرعت دورانی محور
۵۵/۸۴ ^{**}	۰/۱۱۱۰۰۷۰۳	۰/۲۲۲۰۱۴۰۶	۲	طول اختلاط
۶/۴۵ ^{**}	۰/۰۱۲۸۲۷۲۳	۰/۰۲۵۶۵۴۴۵	۲	زاویه پدال × سرعت دورانی
۱۶/۸۸ ^{**}	۰/۰۳۳۵۶۳۱۵	۰/۰۶۷۱۲۶۳۱	۲	زاویه پدال × طول اختلاط
۰/۴۴ ^{ns}	۰/۰۰۰۸۷۹۶۰	۰/۰۰۳۵۱۸۴۲	۴	طول اختلاط × سرعت دورانی
۰/۲۲ ^{ns}	۰/۰۰۰۴۳۸۲۶	۰/۰۰۱۷۵۳۰۴	۴	زاویه پدال × سرعت دورانی × طول اختلاط
	۰/۰۰۱۹۸۷۹۰	۰/۰۶۷۵۸۸۷۱	۳۴	خطا
	۱۶/۷۷	-	-	ضریب تغییرات (%)

ns * و ** به ترتیب عدم اختلاف معنی‌دار، معنی‌دار در سطح ۵ و ۱ درصد

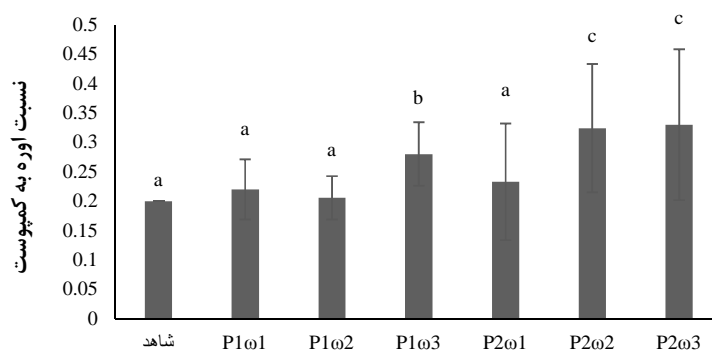
مقایسه میانگین اثر متقابل دوگانه زاویه پدال و سرعت دورانی محورها با سه تکرار طبق آزمون دانکن در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود اثر متقابل زاویه پدال ۴۵ درجه با سرعت دورانی ۲۰ دور در دقیقه، زاویه پدال ۴۵ درجه با سرعت دورانی ۴۰ دور در دقیقه و زاویه پدال ۶۰ درجه با سرعت دورانی ۲۰ دور در دقیقه تفاوت معنی‌داری با نتایج نمونه شاهد ندارند. در سرعت دورانی ۲۰ دور در دقیقه به دلیل اینکه احتمال غلتیدن مواد گرانولی کود اوره به سمت پایین و ته ترف وجود دارد، در این سرعت دستگاه عملکرد مناسبی از خود نشان نداده است. در سرعت دورانی ۶۰ دور در دقیقه نیز به دلیل زیاد بودن سرعت دورانی و کوتاه شدن بیش از حد مدت زمان ماندن مواد در داخل دستگاه، عملکرد دستگاه به شدت کاهش یافته است. بنابراین از بین سه ترکیب تیماری بیان شده هنگام استفاده از پدال با زاویه ۴۵ درجه و سرعت دورانی ۴۰ دور در دقیقه بهترین عملکرد دستگاه مشاهده شد. پارامترهای ۱، ۲ و ۳ به ترتیب سرعت دورانی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دور در دقیقه هستند.

مقایسه میانگین اثر متقابل دوگانه زاویه پدال و طول اختلاط با سه تکرار طبق آزمون دانکن در شکل ۸ نشان داده شده است. در این تحقیق با توجه به این که نسبت اوره به کمپوست ۱ به ۵ است و از تقسیم ۱ بر ۵ عدد ۰/۲ به دست می‌آید، مبنای بررسی برای این تحقیق در محور نسبت اوره به کمپوست عدد ۰/۲ در نظر گرفته شد که به عنوان شاهد است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود اثر متقابل زاویه پدال ۴۵ درجه با طول اختلاط ۱۴۴ سانتی‌متر و اثر متقابل زاویه پدال ۶۰ درجه با طول اختلاط ۱۴۴ سانتی‌متر، تفاوت معنی‌داری با شاهد ندارند و از بین دو زاویه پدال ۴۵ و ۶۰ درجه، جهت کم‌تر شدن زمان اختلاط و صرفه جویی در انرژی، زاویه پدال ۴۵ درجه مناسب‌تر به نظر می‌رسید. علت بهتر بودن عملکرد زاویه پدال ۴۵ درجه می‌تواند به خاطر این باشد که با افزایش زاویه پدال، جابجایی مواد بین دو نیم دایره چپ و راست ناودانی کم شده و درجه اختلاط را تحت تأثیر قرار می‌دهد و همچنین طولانی‌تر شدن طول اختلاط باعث می‌شود که مواد داخل مخلوط‌کن بیشتر در تماس با هم باشند و بهتر و بیشتر با یکدیگر مخلوط شوند. P1 و P2 به ترتیب زاویه پدال ۴۵ و ۶۰ درجه، L1، L2 و L3 به ترتیب طول اختلاط ۷۲، ۱۰۸ و ۱۴۴ سانتی‌متر هستند.



ترکیب تیماری زاویه پدال و طول اختلاط

شکل ۸- مقایسه میانگین اثرات دوگانه زاویه پدال و طول اختلاط با شاهد



ترکیب تیماری زاویه پدال و سرعت دورانی محورها

شکل ۹- مقایسه میانگین اثرات دوگانه زاویه پدال و سرعت دورانی محورها با شاهد

ناودانی بیشتر شده و به دلیل سرعت ۴۰ دور بر دقیقه هم باعث شده نسبت به سرعت ۶۰ دور در دقیقه فرصت مخلوط شدن بیشتر شود و طول اختلاط نیز کم‌تر شود. در کل می‌توان گفت که از نظر مقرون به صرفه بودن هم در ساخت دستگاه و هم در عملیات، بهترین حالت تیمار با کد P1ω2L2 است.

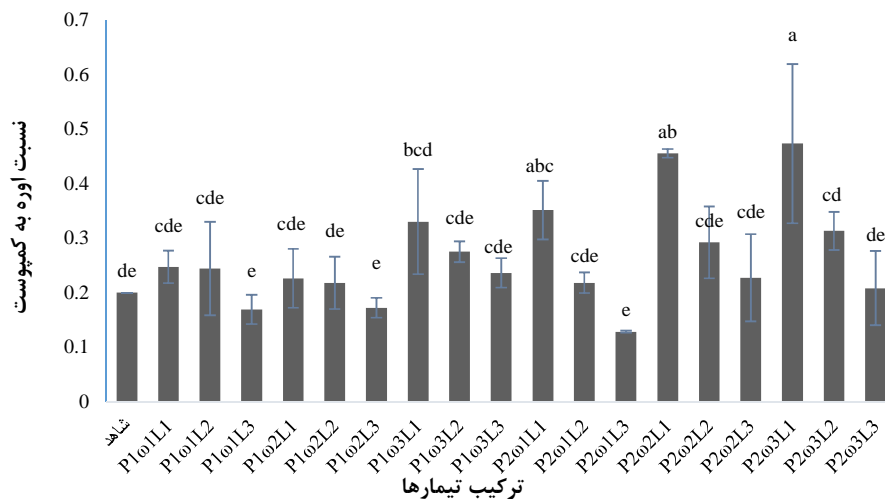
نتیجه‌گیری

در این تحقیق، دستگاه مخلوط‌کن پدالی کود کمپوست و کود اوره ساخته و ارزیابی شد. با توجه به تحلیل تنش انجام شده، ابعاد و جنس محور انتخاب شده صحیح است. از بین دو زاویه پدال ۴۵ و ۶۰ درجه بهترین عملکرد را زاویه پدال ۴۵ درجه داشت. همچنین از بین سه سرعت دورانی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دور در دقیقه بهترین عملکرد در سرعت دورانی ۴۰ دور در دقیقه صورت گرفت. از بین سه طول مختلف ۷۲، ۱۰۸ و ۱۴۴ سانتی‌متر که عمل نمونه‌برداری صورت گرفت، بهترین درجه اختلاط در طول

شکل ۱۰ نشان دهنده مقایسه میانگین اثرات سه گانه ترکیبات تیماری زاویه پدال، طول اختلاط و سرعت دورانی محورها، طبق آزمون دانکن است. ترکیب تیماری که دارای حروف de هستند نزدیک‌ترین ترکیب تیماری با شاهد هستند. در واقع تیمار با کد P1ω2L2، یعنی زاویه پدال ۴۵، سرعت دورانی ۴۰ دور در دقیقه و طول اختلاط ۱۰۸ سانتی‌متر و تیمار با کد P2ω3L3، یعنی زاویه پدال ۶۰ درجه، سرعت دورانی ۶۰ دور در دقیقه و طول اختلاط ۱۴۴ سانتی‌متر که بهترین عملکرد را بر کیفیت اختلاط داشته‌اند. تیمار با کد P2ω3L1، یعنی زاویه پدال ۶۰ درجه، سرعت دورانی ۶۰ دور در دقیقه و طول اختلاط ۷۲ سانتی‌متر بدترین نسبت اختلاط را ایجاد کرده است. طبق عمل‌کرد دو تیمار P2ω3L1 و P2ω3L3 می‌توان نتیجه گرفت که عامل طول اختلاط پارامتر بسیار مهم و مؤثری بر درجه اختلاط است. برای تیمار با کد P1ω2L2 احتمال می‌رود که در زاویه ۴۵ درجه موقعیت پدال‌ها با خط مرکز محور، مخلوط شدن مواد بین دو نیم دایره چپ و راست

سرعت زاویه ای ۴۰ دور در دقیقه و طول اختلاط ۱۰۸ سانتی متر بود.

۱۴۴ سانتی متر دستگاه اتفاق افتاد. در کل می توان گفت که از نظر مقرون به صرفه بودن هم در ساخت دستگاه و هم در عملیات بهترین حالت زاویه پدال ۴۵ درجه و



شکل ۱۰- مقایسه میانگین اثرات سه گانه ترکیبات تیماری زاویه پدال، طول اختلاط و سرعت دورانی با شاهد

different treatments of cattle slurry manure on water-extractable phosphorus. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*, 51(1-2): 91-102.

- Diaz, L. F., de Bertoldi, M., Bidlingmaier, W. and Stentiford, E. (2007). Compost Science and Technology, Chapter 2: History of composting. *Waste Management Series*. Elsevier, 8: 7-24.
- Ferguson, R. B., Shapiro, C. A., Hergert, G. W., Kranz, W. L., Klocke, N. L., & Krull, D. H. (1991). Nitrogen and irrigation management practices to minimize nitrate leaching from irrigated corn. *Journal of Production Agriculture*, 4(2): 186-192.
- Fulton, J., & Port, K. (2016). Physical properties of granular fertilizers and impact on spreading. *Ohio State University, FAFE-550.1*.
- Huo, C., Feng, P., Fan, C., Lin, W., & Song, W. (2016). Characterization of transverse mixing in a screw mixer by image analysis. *Drying Technology*, 34(2): 194-205.
- Keeney, D. (1997). What goes around comes around-The nitrogen issues cycle. *Third int. Dahlia Greidinger sym. on fertilization and the environment*, 8-20.
- Kingston, T. A., & Heindel, T. J. (2014). Granular mixing optimization and the influence of operating conditions in a double screw mixer. *Powder technology*, 266: 144-155.
- Masuda, H., Higashitani, K. and Yoshida, H. (2006). *Powder technology*:

منابع

- Adediran, J. A., Taiwo, L. B., Akande, M. O., Sobulo, R. A., & Idowu, O. J. (2005). Application of organic and inorganic fertilizer for sustainable maize and cowpea yields in Nigeria. *Journal of plant nutrition*, 27(7): 1163-1181.
- Adesemoye, A. O., Torbert, H. A., & Kloepper, J. W. (2009). Plant growth-promoting rhizobacteria allow reduced application rates of chemical fertilizers. *Microbial ecology*, 58(4): 921-929.
- Amiri, H. (2012). Design and construction of processing and shear vane devices for biomass yield stress determination. *Master's thesis, aboureihan college, University of Tehran*. (In Persian).
- Astarai, A. R., & Faridhosseini, A. R., (2012). *Biofertilizer, Technology and Usage*. Published by Nashr Mashhad (University of Ferdooosi Mashhad). 226pp (in Persian).
- Bates, L. (2000). Guide to the design, selection, and application of screw feeders. *Professional Engineering Pub*.
- Beer, F., Johnston, E., Dewolf, J. & Mazurek, D. (2018). *Mechanics of materials. Instructor*, 8th Edition. McGraw-Hill Education. 896 Pages .
- Behrouzi Lar, M. (2012). *Satellite Mechanization, Energy and Agriculture, Volume II, Agricultural Mechanization 1. Sarva, Tehran, Iran*. (In Persian).
- Chapuis-Lardy, L., Temminghoff, E. J. M., & De Goede, R. G. M. (2003). Effects of

- Fundamentals of particles, powder beds, and particle generation*, 3rd Edition, CRC press, Taylor & Francis Group. 514 Pages.
- Qi, F., Heindel, T. J., & Wright, M. M. (2017). Numerical study of particle mixing in a lab-scale screw mixer using the discrete element method. *Powder technology*, 308: 334-345.
- Ramadass, K., & Palaniyandi, S. (2007). Effect of enriched municipal solid waste compost application on soil available macronutrients in the rice field. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 53(5): 497-506.
- Sifola, M. I., & Barbieri, G. (2006). Growth, yield and essential oil content of three cultivars of basil grown under different levels of nitrogen in the field. *Scientia Horticulturae*, 108(4): 408-413.
- Tchobanoglous, G., & Kreith, F. (2002). Handbook of solid waste management. *McGraw-Hill Education*.
- Tsai, W. R., & Lin, C. I. (1994). On the mixing of granular materials in a screw feeder. *Powder Technology*, 80(2), 119-126.
- Woodcock, C. & Mason, J. (1978). Bulk solids handling: An introduction to the practice and technology. *Springer Science & Business Media*
- Zafari, A., & Kianmehr, M. H. (2012). Management and reduction of chemical nitrogen consumption in agriculture. *American Journal of Plant Sciences*. 3 (12A) Article ID: 26006, 1-8.
- Zarkesh, E. (2019). Investigating the drying of compost pellets produced by a flat die & rollers in a laboratory stationary bed dryer. *Master's thesis, aboureihan college, University of Tehran*. (In Farsi)
- Zhu, N. (2007). Effect of low initial C/N ratio on aerobic composting of swine manure with rice straw. *Bioresource Technology*, 98(1): 9-13.

