

## بهبود عملکرد کودپاش گریز از مرکز به منظور پاشی کود پلت

سیامک مصلحی رودی<sup>۱</sup>، محمدحسین عباسپور فرد<sup>۲</sup> و محمدحسین آق‌خانی<sup>۳\*</sup>

۱، ۲ و ۳- به ترتیب: دانشجوی دکتری؛ و اساتید گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران  
تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۷/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۱۲

### چکیده

در این مطالعه یک مدل نرم‌افزاری از واحد پاشنده کودپاش گریز از مرکز شبیه‌سازی و عملکرد پاشش آن با تیغه‌های مختلف طراحی شده بررسی شد تا مناسب‌ترین تیغه برای پاشش کودهای پلت انتخاب شود. تیغه‌های بررسی شده در این مطالعه شامل پنج طراحی شاهد، دوزنقه‌ای، دوزنقه‌ای زاویه‌دار، ناودانی و نبشی بودند. به منظور اعتبارسنجی نتایج نرم‌افزاری با حالت عملی، یک ماشین پاشنده آزمایشگاهی منطبق با قسمت پاشنده کودپاش گریز از مرکز تجاری ساخته شد. الگوی پاشش تیغه‌های طراحی شده به صورت عملی در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار بررسی شد. اثر نوع طراحی به عنوان متغیر مستقل بر دو متغیر الگوی پاشش عرضی ایستای کل (TTSP) و درجه غیریکنواختی پاشش (CV) به عنوان متغیرهای وابسته برای انتخاب مناسب‌ترین الگوی پاشش و رسیدن به مناسب‌ترین تیغه در حالت آزمایشی استفاده شد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد تیغه دوزنقه‌ای در میان سایر تیغه‌ها بهترین عملکرد پاشش را در عرض پاشش مؤثر دارد ( $CV=0/18$ ) و پس از آن به ترتیب تیغه‌های نبشی ( $CV=0/29$ )، ناودانی ( $CV=0/38$ )، دوزنقه‌ای زاویه‌دار ( $CV=0/57$ ) و شاهد ( $CV=0/64$ ) قرار دارند که این ترتیب هم در حالت نرم‌افزاری و هم در حالت آزمایشی صادق است. بررسی وضعیت انطباق نتایج شبیه‌سازی شده با حالت آزمایشی نشان می‌دهد برای تمام تیغه‌ها، انطباق قابل قبولی بین نتایج مدل‌سازی و آزمایشگاهی وجود دارد ( $R^2 \geq 0/90$ ).

### واژه‌های کلیدی

آباکوس، الگوی پاشش ایستا، شبیه‌سازی، طراحی تیغه، غیریکنواختی پاشش

### مقدمه

محصولات کشاورزی را بین ۳۰ تا ۵۰ درصد افزایش دهد (Stewart et al., 2005). بنابراین، استفاده از کود به تدریج در حال افزایش است و گزارش شده که میزان آن تا سال ۲۰۳۰ به ۱۹۹ میلیون تن خواهد رسید (Van Liedekerke et al., 2008). کود حیوانی یکی از کودهای ارگانیک است که به دلیل داشتن مواد مغذی و آلی بالا، یکی از منابع بسیار مهم کشاورزی محسوب می‌شود (Rees et al., 2013). در ایران میزان تولید کودهای حیوانی با توجه به تعدد منابع حیوانی و پرورش صنعتی در حال افزایش است و هر سال نزدیک به ۱۰۰ میلیون

با افزایش روزافزون جمعیت جهان، نیاز به افزایش تولید مواد غذایی ضرورت دارد. بر اساس آمارهای موجود، جمعیت جهان در سال ۲۰۵۰ میلادی به ۹/۱۵ میلیارد نفر خواهد رسید (Anon, 2012). برای تأمین نیاز غذایی این جمعیت لازم است تا سال ۲۰۵۰ میلادی، تولید مواد غذایی ۶۰ تا ۱۱۰ درصد افزایش یابد (Anon, 2013). کود از نهاده‌های گران قیمت کشاورزی است که برای بهینه‌سازی رشد و تأمین مواد غذایی گیاه به کار برده می‌شود. کاربرد درست این نهاده می‌تواند تولید

Kianmehr, 2012) و رفتار پاششی کودها در حرکت پرتابه ناشی از ضربه دیسک از آن جمله‌اند (Hofstee and Huisman, 1990; Aphale et al., 2003) در مطالعه‌ای تأثیر اندازه ذرات پلت کود گاوی و رطوبت آن بر برخی از خواص فیزیکی و مکانیکی کود نظیر چگالی توده، زاویه انباشت، ضریب اصطکاک و مقاومت برشی، بررسی و گزارش شد که اندازه ذرات و مقدار رطوبت پلت‌ها تأثیر معنی‌داری بر تمام خواص مورد بررسی و پاشش پلت دارد (Zafari & Kianmehr, 2012).

بر اساس مطالعات گذشته پارامترهای مربوط به ماشین پاشنده و تنظیمات اولیه ماشین نیز عواملی تأثیرگذار بر یکنواختی پاشش گزارش شده است. برخی از تنظیمات اولیه ماشین که بر الگوی پاشش کودها تأثیر می‌گذارد عبارت است از: نرخ تغذیه (Parish, 2002; Villette et al., 2012)، موقعیت تغذیه کود روی دیسک دوار (Parish and Chaney, 1985; Przywara, 2015)، سرعت چرخش دیسک دوار و ارتفاع آن (Van Liedekerke et al., 2009; Villette et al., 2012). با چرخش موقعیت تغذیه مواد روی دیسک دوار، می‌توان الگوی پاشش را از یک طرف به طرف دیگر متمایل و بر مشکل انحراف در پاشش غلبه کرد. با این حال، تغییر نقطه سقوط نمی‌تواند در تصحیح همه الگوهای پاشش مؤثر باشد. نتایج یک پژوهش نشان داد در بیشتر پاشنده‌ها برای رسیدن به الگوی پاشش قابل قبول، باید ماشین برای نرخ‌ها یا مواد متفاوت به‌طور جداگانه تنظیم شود (Glover & Baird, 1973). نتایج یک مطالعه در بررسی سرعت دورانی دیسک، موقعیت تغذیه کود و زاویه تیغه‌ها روی دیسک با استفاده از دو پارامتر زاویه الگوی پخش ایستا<sup>۱</sup> و میانگین شعاع پخش ایستا<sup>۲</sup> نشان دادند پارامترهای موقعیت تغذیه کود روی دیسک، زاویه تیغه‌ها و نوع کود بر الگوی پخش ایستا و همچنین سرعت چرخشی دیسک و نوع کود

تن کود حیوانی در ایران تولید می‌شود (Zafari & Kianmehr, 2012). به دلیل آگاهی از خطراتی استفاده مستقیم از پسماندهای حیوانی بر سلامتی انسان و محیط زیست، پیش از کاربرد آنها فرآوری‌هایی روی این کودها اجرا می‌شود. این کار ترکیبات کود و تجزیه نسبی فضولات را متعادل و تا حدی با کاهش غلظت ترکیبات و فعالیت‌های میکروبی، خطرهای احتمالی را حذف می‌کند (Benito et al., 2003). یکی از این فرآوری‌ها، فشرده‌سازی کودهاست. فشرده‌سازی باعث کاهش حجم و بهبود مشکلات حمل‌ونقل، انبارداری و بسته‌بندی کود می‌شود. با فشرده‌سازی، میزان رطوبت کود کنترل می‌شود و گردوخاک ناشی از پخش کود در مزرعه کاهش می‌یابد (Ghasemi et al., 2013). فشرده‌سازی باعث بهبود مشکل جریان‌پذیری، اختلاط بهتر مواد اولیه، یکنواختی نسبی شکل و اندازه ذرات، آزادسازی کنترل‌شده مواد مغذی مورد نیاز گیاه و نیز بهبود توزیع آن با ماشین‌های کودپاش می‌شود (Reddy et al., 1997; Moursy et al., 2002).

در حال حاضر برای توزیع کودهای دانه‌ای، از ماشین‌های مختلفی استفاده می‌شود که در میان آنها کودپاش‌های گریز از مرکز به دلیل سادگی در طراحی، هزینه تعمیر و نگهداری پایین، قیمت پایین و استفاده آسان از آن، متداول‌تر هستند (Aphale et al., 2003). توزیع درست و بهینه کودها در داخل خاک، می‌تواند باعث کاهش خطرهای زیست محیطی و کاهش آلودگی آب‌های زیرزمینی شود و ضمن بهینه‌سازی هزینه، باعث افزایش تولید گردد. بنابراین، لازم است کود به مقدار مناسب و با دقت کافی در زمین توزیع شود. عوامل مختلفی در توزیع یکنواخت و پخش کود تأثیر می‌گذارد. عوامل محیطی و غیرقابل کنترل، خواص فیزیکی و مکانیکی کودها (Grift et al., 2006; Zafari &

1- Stationary Spread Pattern

2- Average Radius of the Stationary Spread

پاشش بهبود یافت. این مطالعه نشان داد در سرعت دورانی ۵۴۰ دور بر دقیقه، زاویه دیسک باید کمتر از ۱۰ درجه باشد تا توزیع پاشش قابل قبولی ایجاد شود (Yildirim, 2006). نتایج مطالعه‌ای دیگر نشان داد با افزایش سرعت دیسک از ۵۴۰ تا ۸۱۰ دور بر دقیقه، عرض پاشش افزایش می‌یابد (Aphale et al., 2003). افزایش سرعت دیسک به همراه افزایش ۲ درجه‌ای در زاویه دیسک دوار، یکنواختی توزیع مواد را بهبود می‌بخشد (Carman, 1991).

ارزیابی و واسنجی پاشش کودپاش‌های گریز از مرکز، نیازمند صرف وقت و هزینه زیادی است. به همین دلیل نمی‌توان به راحتی و به صورت پیوسته با تغییر پارامترهای طراحی یا تنظیمات ماشین، خروجی نهایی در سیستم را مشاهده کرد. بنابراین باید متناسب با هر تغییر، آزمایش‌های کامل ارزیابی در سطح مزرعه دنبال شود که این کار مستلزم صرف هزینه و وقت زیاد است. در بسیاری از مطالعات اخیر، تغییر میزان کود متناسب با نیاز زمین منطبق با کشاورزی دقیق پیشنهاد شده که لازمه این امر آشنایی دقیق با نتایج تنظیمات ماشین در عملکرد پاشش ماشین است. استفاده از روش‌های شبیه‌سازی نرم‌افزاری می‌تواند در بررسی عملکرد ماشین‌های پاشنده گریز از مرکز به افزایش عملکرد، دقت بالاتر، صرفه‌جویی در وقت، و پایین آوردن هزینه کمک کند (Van Liedekerke et al., 2009; Villette et al., 2017; Yinyan et al., 2018).

در مطالعه‌ای حرکت ذرات خروجی از یک دیسک دوار با استفاده از مدل‌سازی المان گسسته (DEM)<sup>۲</sup> در دو حالت مسطح و شیب‌دار مدل‌سازی شد. مدل ارائه شده با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی اعتبارسنجی شد. برای اعتبارسنجی دو روش در پیش گرفته شد. در روش اول توزیع جرم با مکانیزمی ابتکاری اندازه‌گیری شد که متصل به لبه خروجی دیسک بود. در این مکانیزم ذرات خروجی از

بر میانگین شعاع پخش ایستا اثر معنی‌داری دارند (Przywara, 2015).

در پژوهشی، نتایج بررسی الگوی پاشش کود نشان داد برای داشتن عرض پاشش و الگوی پاشش ثابت در عملیات پاشش با نرخ متغیر، باید موقعیت دهانه و سرعت چرخشی دیسک به‌طور پیوسته تغییر کند. عملیات پاشش با نرخ متغیر (VRA)<sup>۱</sup>، نشان می‌دهد که تغییر در نرخ جریان، باعث نوسان در الگوی پاشش نهایی می‌شود که این الگو نسبت به الگوی هدف انحراف زیادی دارد. نتایج این مطالعه همچنین نشان داد با افزایش سرعت چرخشی دیسک، عرض پاشش افزایش می‌یابد و با افزایش قطر دهانه، نقطه پیک مرکزی در الگوی پاشش، افزایش می‌یابد. شکل دهانه، نیز تأثیر قابل توجهی بر الگوی پاشش نهایی دارد. اگر دهانه به صورت قطعه قطعه باشد، الگوی پاشش نزدیک به مسطح است، در حالی که بیضی شکل بودن دهانه باعث ایجاد الگوی پاشش W شکل خواهد شد (Olieslagers et al., 1996). در مطالعه‌ای دیگر اثر زاویه دیسک مخروطی و سرعت آن بر یکنواختی پاشش بررسی شد. نتایج مطالعه دیسک دوار با دو حالت مخروطی و مسطح نتایج نشان داد دیسک مخروطی، در مقایسه با دیسک مسطح، کود را در فاصله‌ای دورتر پرتاب می‌کند زیرا در حالت مخروطی علاوه بر مؤلفه افقی، نیروی وارد شده به ذرات کود یک مؤلفه عمودی نیز دارد که در محور عمودی یک مؤلفه سرعت ایجاد می‌کند. در این مطالعه، ضریب غیریکنواختی پاشش (CV) بین ۰/۰۹ تا ۰/۴۳ تغییر می‌کرد و بهترین یکنواختی پاشش در زاویه مخروط صفر درجه و سرعت دورانی ۸۱۰ rpm و قطر دهانه ۳۰ میلی‌متر گزارش شد. با افزایش زاویه مخروط از صفر به ۱۰ درجه و از ۱۰ به ۲۰ درجه، الگوی پاشش بدتر شد. از طرفی، با افزایش سرعت دورانی دیسک از ۴۰۵ تا ۸۱۰ دور بر دقیقه، در تمام قطر دهانه‌ها، توزیع

پلت با استفاده از یک مدل ماشین کودپاش گریز از مرکز تجاری، پاشش مناسبی مشاهده نشد و در نتیجه باز طراحی و تغییراتی به منظور بهبود عملکرد پاشش این ماشین ضروری به نظر می‌رسد. زاویه و شکل تیغه‌های موجود بر صفحه دوار از عوامل بسیار مهم در طراحی ماشین است که با انتقال و ضربه‌ای که به پلت‌های کود وارد می‌کند، ضمن اینکه احتمال خرد شدن آنها را به دنبال دارد، بر سرعت و جهت پاشش کود اثر می‌گذارد و عرض پاشش و یکنواختی آن را تغییر می‌دهد. این تیغه‌ها اجزای نهایی مرتبط با کود هستند و تغییر در طراحی آنها یکی از روش‌های ساده و ارزان قیمت و در عین حال بسیار مؤثر در بهبود کیفیت پاشش کودهاست. بنابراین، در این مطالعه تأثیر طراحی‌های مختلف تیغه بر کیفیت پاشش کود پلت با استفاده از کودپاش گریز از مرکز در محیط آباکوس شبیه‌سازی و نتایج آن با نتایج پاشش با یک ماشین پاشنده آزمایشگاهی منطبق با قسمت پاشنده کودپاش گریز از مرکز تجاری مقایسه شد تا ضمن بررسی صحت شبیه‌سازی، مناسب‌ترین تیغه انتخاب شود.

### مواد و روش‌ها

در این مطالعه تمام عملیات پاشش کود و طراحی تیغه روی یک نمونه کودپاش گریز از مرکز تجاری موجود در بازار به اجرا در آمد. این ماشین، یک کودپاش گریز از مرکز تراکتوری از نوع سوار (DMIG-500، دزفول ماشین) است که برای کود پاشی انواع کودهای شیمیایی دانه‌ای در مزارع به کار گرفته می‌شود. برای تنظیم موقعیت خروج کود و میزان باز بودن دریچه، روی این ماشین دو اهرم تنظیم با اتصالات مناسب تعبیه شده است. اهرم میزان باز بودن دریچه دارای ۷ تنظیم و با دبی‌های مختلف خروج کود و اهرم موقعیت تغذیه کود روی دیسک دوار دارای ۸ تنظیم است که به منظور تغییر

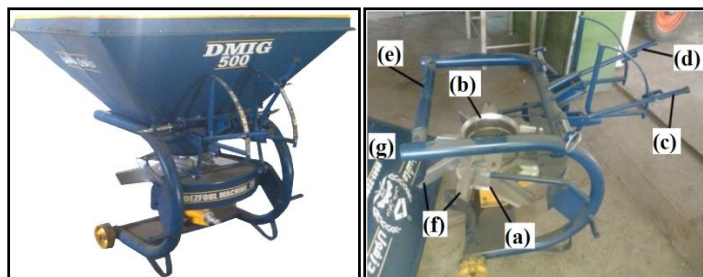
دیسک در سینی‌های سبدمانندی جمع می‌شد که دور تا دور دیسک قرار داشتند. در روش دوم، ذرات پس از پرتاب شدن از دیسک و حرکت پرتابه در هوا، با آزمون سینی جمع‌آوری شد. در این مطالعه، چندین سرعت چرخشی بین ۳۰۰ تا ۶۵۰ دور بر دقیقه برای دیسک انتخاب شد تا اثر سرعت چرخشی بر جریان ذرات بررسی گردد. نتایج این پژوهش نشان داد که تطابق خوبی از لحاظ کیفی و کمی بین نتایج مدل‌سازی با DEM و داده‌های آزمایشگاهی وجود دارد. در این مطالعه بالاترین اختلاف بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج مدل‌سازی در سرعت‌های چرخشی زیاد (۵۰۰ تا ۶۵۰ دور بر دقیقه) مشاهده شد (Van Liedekerke *et al.*, 2009).

نتایج پژوهشی دیگر در بررسی عملکرد پاشش یک کودپاش گریز از مرکز با استفاده از DEM نشان داد پارامترهای کاری ماشین بر درجه غیریکنواختی پاشش (CV) تأثیر می‌گذارند به طوری که شکل الگوی پاشش به طور غیرمنظم با تغییر زاویه قرارگیری تیغه‌ها تغییر می‌کند. و با افزایش ارتفاع دیسک دوار، CV کاهش می‌یابد. نتایج بررسی‌ها همچنین نشان داد زمانی که نرخ تغذیه به تدریج افزایش یابد، CV ابتدا دستخوش یک کاهش آنی چشم‌گیر شده و پس از آن به آرامی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش سرعت چرخشی دیسک، الگوی پاشش از شکل M به تدریج به شکل W تغییر می‌یابد (Yinyan *et al.*, 2018).

کاربرد غیر دقیق و ناهمگن کود در سطح مزرعه احتمال ایجاد خطرهای زیست محیطی، افزایش هزینه و کاهش میزان تولید محصول را در پی دارد. در این پژوهش ضمن ارزیابی کیفیت پاشش کودهای پلت با کودپاش گریز از مرکز، امکان بهبود یکنواختی پاشش کودهای پلت بررسی شد. بر اساس آزمایش‌های اولیه، به منظور بررسی پاشش کودهای

بهبود عملکرد کودپاش گریز از مرکز به منظور پاشش کود پلت

الگوی پاشش عرضی (مقارن یا آفست پاشیدن) روی ماشین تعبیه شده است. در شکل ۱، ماشین کودپاش مورد مطالعه به-همراه اجزای مختلف آن نشان داده شده است.



شکل ۱- کودپاش استفاده شده در این تحقیق و اجزای مختلف آن

(a- دیسک دوار، b- استوانه‌ی تغذیه، c- اهرم تنظیم میزان باز بودن دریچه، d- اهرم تنظیم موقعیت خروج کود روی دیسک دوار، e- شاسی ماشین، f- تیغه‌های پاشنده و g- مخزن)

Fig. 1- The fertilizer spreader used in this research and its various components

(a- rotary disk, b- feeding cylinder, c- adjustment lever for valve openness, d- adjustment lever for feed position on rotary disk, e- chassis, f- blades and g- reservoir)

نوع کود است. برخی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی کود استفاده شده در این پژوهش (شکل ۲)، اندازه‌گیری شده و مواد تشکیل‌دهنده کود مورد مطالعه، در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی و مواد تشکیل‌دهنده کود پلت استفاده شده در این پژوهش

Table 1- Some physical and mechanical properties and ingredients of used pellet fertilizer in this study

درصد (%)	اجزا Ingredient	مقدار Value	ویژگی Property
2	نیتروژن N	7	pH
1.5	پنتا اکسید فسفر P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1220±139	دانسیتته ذرات (کیلوگرم بر متر مکعب) Particle density (kg /m <sup>3</sup> )
2	اکسید پتاسیم K <sub>2</sub> O	704±48	دانسیتته توده (کیلوگرم بر متر مکعب) Bulk density (kg/m <sup>3</sup> )
56.09	مواد آلی Organic matter	42	درصد خلل و فرج Porosity (%)
26.91	کربن آلی Organic carbon	7.51±0.84	قدرت پلت Pellet strength
2.5	گوگرد S	0.3	ضریب استاتیکی اصطکاک در سطح گالوانیزه Static coefficient of friction on galvanized surface
9	Moisture (based on dry weight) رطوبت (بر پایه وزن خشک)	0.2	ضریب دینامیکی اصطکاک در سطح گالوانیزه Dynamic coefficient of friction on galvanized surface
		36.9	زاویه پاسخ (درجه) بر سطح گالوانیزه Repose angle (degree) on galvanized surface
		54±3	پایداری پلت (درصد) Pellet durability (%)
		4-21	طول پلت (میلی متر) pellet length (mm)
		6	قطر پلت (میلی متر) pellet diameter (mm)
		0.1-0.7	جرم پلت (گرم) pellet mass (g)

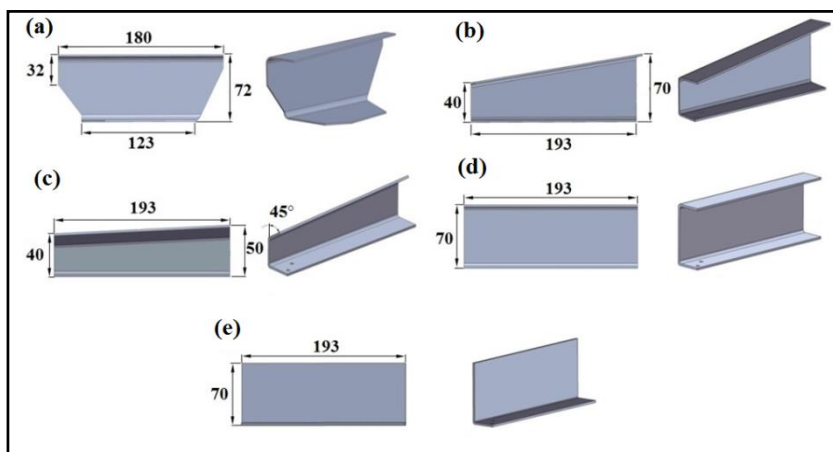


شکل ۲- کود پلت مرغی استفاده شده در این تحقیق  
Fig. 2- Used poultry pellet fertilizer of this study

### طراحی تیغه‌های پاشنده

کاری دیسک دوار نیز از جمله سرعت چرخشی دیسک، موقعیت و میزان باز بودن دریچه خروج کود نیز در تمام آزمون‌ها ثابت و به ترتیب برابر ۵۴۰ دور بر دقیقه (سرعت چرخش محور دهی تراکتور)، موقعیت ۹۰ درجه دایره مثلثاتی (نقطه توصیه شده کارخانه برای پاشش متقارن) و موقعیت ۵ اهرم تنظیم دستگاه، با دبی خروجی ۳۰۰ گرم بر ثانیه انتخاب شد که بهترین دبی برای پاشش کود با ماشین‌های گریز از مرکز گزارش شده (Yinyan *et al.*, 2018)، است. جنس تیغه‌ها گالوانیزه، زاویه انباشت ۳۶/۹ درجه و مساحت دهانه خروجی در این حالت ۰/۲۲ مترمربع است.

در این تحقیق، طراحی تیغه مورد توجه قرار گرفته است که ضمن ساده و ارزان بودن، به شکلی مؤثر کیفیت پاشش کود را بهبود می‌بخشد. این قطعه، کود منتقل شده به دیسک دوار را از محل خروج کود از دریچه، تحویل می‌گیرد و بر اثر حرکت دورانی آن را به پهنه پاشش منتقل می‌کند و سرانجام با یک حرکت پرتابه آن را روی خاک می‌فرستد. در تمامی آزمایش‌ها، سایر متغیرهای مربوط به دیسک از جمله جنس و ابعاد فنی دیسک به صورت ثابت و برابر با مقدار پیش فرض طراحی شده برای ماشین در نظر گرفته شد. تعداد تیغه‌ها روی دیسک هشت و پارامترهای



شکل ۳- طرح‌واره و ابعاد فنی تیغه‌های بررسی شده در این مطالعه (ضخامت همه تیغه‌ها ۲ میلی‌متر)  
(a- تیغه شاهد، b- تیغه ذوزنقه‌ای، c- تیغه ذوزنقه‌ای زاویه‌دار، d- تیغه ناودانی و e- تیغه نبشی)

Fig. 3- Schematic and technical dimensions of investigated blades in this study (blade thickness is 2 mm)  
(a- control blade, b- trapezoidal blade, c- angled trapezoidal blade, d- spout blade and e- angle blade)

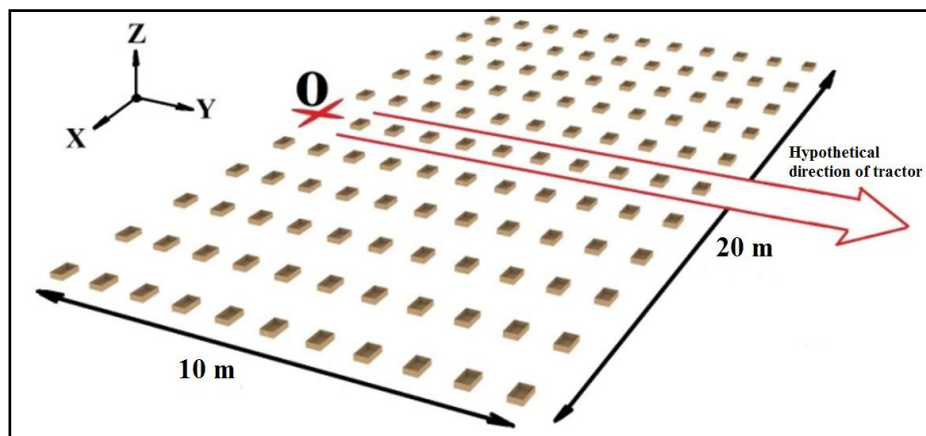
پاشش عرضی ایستا استفاده شد (Van Liedekerke *et al.*, 2009; Villette *et al.*, 2017)

#### الگوی پاشش عرضی در آزمون‌های پاشش ایستا

به‌طور کلی برای بررسی ایستایی وضعیت پاشش عرضی کودپاش‌های گریز از مرکز دو آزمون می‌تواند به کار گرفته شود. یک راه احاطه کردن اطراف دیسک دوار با استفاده از یک حایل که به‌صورت دایره دور تا دور دیسک دوار و به فاصله نزدیک از آن قرار داده می‌شود. این آزمون سریع و ارزان قیمت است اما هیچ داده‌ای از سرعت‌های ذرات هنگام جدا شدن از دیسک دوار فراهم نمی‌کند. راه دوم، اندازه‌گیری مستقیم در یک فضای بزرگ است. در این روش میزان کود بیشتری استفاده می‌شود تا درک درستی از توزیع واقعی به‌دست آید (Van Liedekerke *et al.*, 2009; Przywara, 2015). این روش در مقایسه با روش اول وقت‌گیرتر است اما اطلاعات بیشتری از الگوی پاشش و ناحیه پاشش کود ایجاد می‌کند. در این مقاله از روش دوم برای بررسی عملکرد پاشش و مقایسه الگوهای پاشش تیغه‌های مختلف استفاده شده است. اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی نرم‌افزاری با نتایج آزمون آزمایشگاهی به‌صورت عملی و با همین روش بررسی شد.

در این مطالعه عملکرد پاشش پنج نوع تیغه بررسی شده که شکل هندسی و ابعاد فنی آنها در شکل ۳ نشان داده شده است. این تیغه‌ها شامل پنج طراحی مختلف هستند که اولی شاهد و بقیه طرح‌هایی با شکل‌های هندسی منظم بود که سابقه استفاده از آنها در پاشش ذرات کود گزارش شده است. طراحی اول: تیغه شاهد که به‌صورت پیش‌فرض روی سیستم اولیه این ماشین برای پاشش کودهای دانه‌ای شیمیایی نصب شده است (شکل ۳-الف)، طراحی دوم: تیغه دوزنقه‌ای با زاویه شیب حدود ۹ درجه (شکل ۳-ب)، طراحی سوم: تیغه دوزنقه‌ای زاویه‌دار، شبیه به طراحی دوم اما با ابعادی کوچک‌تر از آن که ضلع بالایی آن با زاویه ۴۵ درجه به‌سمت بالا متمایل است (شکل ۳-ج)، طراحی چهارم: تیغه ناودانی (شکل ۳-د)، و طراحی پنجم: تیغه نبشی (شکل ۳-ه).

استفاده از آزمون‌های ایستایی که در آن کودهای خارج شده از تیغه‌ها به طریقی جمع‌آوری می‌شوند و آزمون سینی‌های استاندارد به‌صورت ایستا، راه‌هایی هستند که به‌منظور بررسی وضعیت پاشش ذرات کود و رسیدن به الگوهای پاشش مناسب می‌توان از آنها استفاده کرد. در این مطالعه برای دستیابی به الگوی پاشش عرضی از آزمون



شکل ۴- آرایش قرارگیری جعبه‌ها در آزمون ایستا، o: محل قرارگیری دیسک دوار

Fig. 4- Box arrangement in static test, o: rotary disk location

طراحی‌های مختلف تیغه بر یکنواختی پاشش کود پلت شده بررسی شد. این شبیه‌سازی بر اساس روابط فیزیکی حاکم بر حرکت ضربه‌ای با دیسک دوار و مسیر پرتابۀ کودها و با استفاده از حل‌گر دینامیکی صریح<sup>۳</sup> اجرا شد. زمانی که ذرات پلت از طریق دریچه خروجی کود وارد دیسک دوار می‌شوند، بر اساس تأثیر سینماتیک حرکت دیسک دوار، هر پلت کود تحت تأثیر تلفیقی از نیروهای کریولیس<sup>۴</sup> ( $F_{cor}$ )، نیروی گریز از مرکز<sup>۵</sup> ( $F_{ce}$ )، نیروی گرانش<sup>۶</sup> ( $F_G$ ) و نیروی بین ذرات پلت، دیسک و تیغه‌ها قرار می‌گیرد (Dintwa et al., 2004). چنانچه نمودار جسم آزاد نیروی وارد بر هر پلت روی دیسک دوار در نظر گرفته شود (شکل ۵)، نیروی برآیند وارد بر هر پلت ( $F$ ) برای هر دیسک مسطح در راستای تیغه‌ها، بر اساس رابطه ۱ خواهد بود (Dintwa et al., 2004; Yinyan et al., 2018):

$$F_{ce} \cos \beta - F_f = F \quad (1)$$

که در آن،

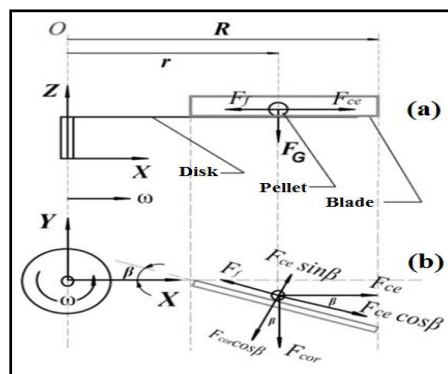
$\beta$  = زاویه قرارگیری تیغه‌ها روی دیسک دوار بر

حسب درجه و  $F_f$  = نیروی اصطکاک<sup>۷</sup>.

در آزمون پاشش ایستا به روش دوم، الگوی پاشش عرضی ایستا (TSP)<sup>۱</sup> با قرار دادن جعبه‌های تراز شده با بردار فاصله‌ای ( $X, Y, Z$ ) نسبت به مرکز دیسک دوار اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۴). در این بردار،  $X$  فاصله عرضی،  $Y$  فاصله طولی و  $Z$  ارتفاع بین دیسک دوار و جعبه‌هاست. با اندازه‌گیری TSP در فاصله‌های مختلف  $X$  (میزان تجمعی کود پاشیده شده در هر ستون) و الگوی پاشش عرضی ایستای کل (TTSP)<sup>۲</sup> به دست می‌آید (Van Liedekerke et al., 2009; Villette et al., 2017). در دفترچه راهنمای ماشین کودپاش، عرض پاشش مؤثر آن ۱۲ متر ماشین ۲۰ متر و عرض پاشش مؤثر آن ۱۲ متر بیان شده است. از این رو جعبه‌ها طوری چیده شدند که یک محدوده عرضی ۲۰ متر را پوشش دهند. ابعاد جعبه‌های استفاده شده در این آزمون  $50 \times 35 \times 21$  سانتی‌متر مکعب و فاصله مرکز به مرکز بین جعبه‌ها در راستای  $X$  و  $Y$  به ترتیب برابر ۲ و ۱ متر تنظیم شد. برای جلوگیری از پرش پلت‌های کود، داخل جعبه‌ها با توری پلاستیکی پوشانده شد.

### شبیه‌سازی آزمون ایستا به روش نرم‌افزاری

برای شبیه‌سازی نرم‌افزاری آزمون ایستا، از نرم‌افزار آباکوس ورژن ۴-۶،۱۴ استفاده و تأثیر



شکل ۵- نمودار جسم آزاد یک کود پلت روی دیسک پاشنده کودپاش گریز از مرکز، نمای روبه‌رو (a)، نمای بالا (b)

Fig. 5- Free body diagram of a pellet fertilizer on the disk of the centrifugal spreader, front view (a), top view (b)

- 1- Transverse Static Pattern
- 2- Total Transverse Spread Pattern
- 3- Explicit
- 4- Coriolis Force

- 5- Centrifugal Force
- 6- Gravity Force
- 7- Friction Force



بهبود عملکرد کودپاش گریز از مرکز به منظور پاشش کود پلت

اندازه‌گیری شده برای پلت‌ها (مترمربع).

به‌منظور شبیه‌سازی حرکت ذرات پلت، مدل طراحی شده از مجموعه پاشنده به داخل نرم‌افزار آباکوس فراخوانی و تمامی پارامترهای مؤثر بر پاشش کودهای پلت شامل مشخصات رفتاری و تعاملی کودهای پلت و سیستم پاشنده به‌عنوان اطلاعات اولیه در نرم‌افزار تعریف شد. این اطلاعات بر اساس پیش‌آزمون‌های اجرا شده برای اندازه‌گیری خواص فیزیکی و مکانیکی ذرات پلت کود به‌دست آمد. در جدول ۲، مشخصات وارد شده برای مواد به‌منظور شبیه‌سازی در نرم‌افزار آورده شده است. پارامترهای عملکردی واحد پاشنده نیز به‌صورت ثابت و بر اساس تنظیمات واقعی ماشین آورده شد. برای شبیه‌سازی محیط پاشش، صفحه‌ای مسطح با ابعاد ۱۱×۲۲ متر مربع با ضریب اصطکاک خاک تعریف شد (Yinyan *et al.*, 2018) تا پلت‌ها پس از پاشش، در نقطه فرود تقریباً بی‌حرکت باشند. کود به‌صورت جسم صلب با مقطع دایره‌ای به قطر ثابت ۶ میلی‌متر در نظر گرفته شد. طول پلت‌ها نیز بر اساس نتایج اندازه‌گیری‌های اولیه روی طول اولیه پلت‌های واقعی به پنج گروه بین ۴ تا ۲۱ میلی‌متر تقسیم‌بندی شد و طول پلت‌های شبیه‌سازی شده به‌صورت تصادفی و متناظر با درصد پراکندگی طول پلت‌های واقعی در هر گروه، بین ۴ تا ۲۱ میلی‌متر تغییر داده شد. در شکل ۶، تصویری از دیسک دوار و پاشش کودهای پلت در محیط نرم‌افزار آورده شده است.

بنابراین، کل نیروهای وارد بر هر پلت روی دیسک دوار مسطح به‌صورت مجموعه رابطه‌های ۳ خواهد بود (Dintwa *et al.*, 2004; Yinyan *et al.*, 2018):

$$\begin{cases} F_G = mg \\ F_{ce} = m\omega^2 r \\ F_f = \mu_v(F_{cor}\cos\beta - F_{ce}\sin\beta) + \mu_d F_G \\ F_{cor} = 2m\omega v = 2m\omega \frac{dr}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

که در آن،

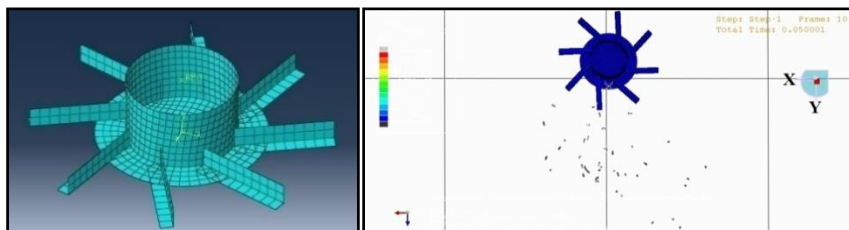
$m$  = جرم هر ذره پلت (کیلوگرم)؛  $\omega$  = سرعت دورانی دیسک (رادیان بر ثانیه)؛  $v$  = سرعت نسبی حرکت ذرات پلت (متر بر ثانیه)؛  $a$  = شتاب نسبی حرکت ذرات پلت (متر بر مجذور ثانیه)؛  $g$  = شتاب گرانش زمین (متر بر مجذور ثانیه)؛  $r$  = فاصله ذرات پلت از مرکز دیسک (متر)؛  $\mu_v$  = ضریب اصطکاک بین تیغه و ذرات پلت؛ و  $\mu_d$  = ضریب اصطکاک بین دیسک و ذرات پلت.

در این مطالعه، نیروی پसार<sup>۱</sup> با در نظر گرفتن بیشینه نیروی وارد شده در هنگام پاشش ذرات پلت، از رابطه ۳ به‌دست آمد (Batchelor, 1967):

$$F_D = 1/2 \rho_a V^2 C_D A_p \quad (3)$$

که در آن،

$F_D$  = نیروی پसार (نیوتن)؛  $\rho_a$  = چگالی هوا (کیلوگرم بر مترمکعب)؛  $V$  = سرعت ذرات پلت (متر بر ثانیه)؛  $C_D$  = ضریب پसार؛ و  $A_p$  = بزرگ‌ترین سطح



شکل ۶- تصویری از دیسک دوار (راست) و پاشش کودهای پلت با دیسک دوار (چپ) در محیط نرم‌افزار شبیه‌سازی

Fig. 6- Rotary disk (right) and spreading pellet fertilizers with rotary disk (left) in the simulation software environment

جدول ۲- مشخصات وارد شده برای مواد، در شبیه‌سازی نرم‌افزاری

Table 2- Specifications of the materials for software simulation

خواص رفتاری			
Behavioral properties			
کود پلت	دیسک و تیغه‌ها	خاک	هوا ( ۳۰ درجه سلسیوس)
Pellet fertilizer	Disk and blades	Ground	Air (30°C)
$1.22 \times 10^{-6}$	$7.80 \times 10^{-6}$	$1.25 \times 10^{-6}$	$1.16 \times 10^{-6}$
دانشیته ذره (کیلوگرم بر میلی متر مکعب) Particle density (kg/mm <sup>3</sup> )			
0.2	0.3	0.5	
ضریب پواسون Poisson's coefficient			
50	$200 \times 10^3$	15	
مدول کشسانی Modulus of elasticity (Mpa)			
نیروی پسا (نیوتن) Drag force (N)			
0.01			
خواص تعاملی			
Interactive properties			
ضریب اصطکاک استاتیک		ضریب اصطکاک دینامیک	
Static coefficient of friction		Dynamic coefficient of friction	
0.7	0.5		
پلت به پلت Pellet to pellet			
0.3	0.2		
پلت به دیسک و تیغه Pellet to disk and blades			
1.3	1.2		
پلت به خاک Pellet to ground (Yinyan <i>et al.</i> , 2018)			
پارامترهای عملکردی پاشنده Functional parameters of the spreader unit			
540	تعداد تیغه Blade No.	8	
سرعت زاویه ای (دور در دقیقه) Angular velocity (rpm)			
700	محل تغذیه Feed point	زاویه ۹۰ درجه 90° trigonometric angle	
ارتفاع از زمین (میلی متر) height from the ground (mm)			
خواص ابعادی کود پلت Geometric properties of pellet fertilizer			
	قطر (میلی متر) Diameter (mm)	6	
	فاصله طولی (میلی متر) Length interval (mm)	4-21	

## ماشین پخش کود آزمایشگاهی

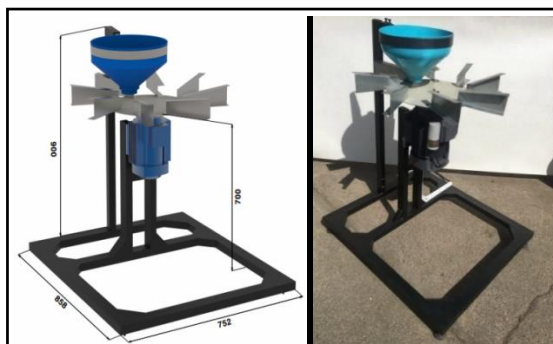
استفاده از ماشین پخش کود آزمایشگاهی، ضمن حذف ضرورت استفاده از تراکتور و ماشین کودپاش، امکان کنترل دقیق‌تر پارامترهای کاری ماشین را فراهم می‌کند و تغییر در طراحی قسمت پاشنده و تیغه‌ها با سرعت بیشتر و هزینه کمتر پیش می‌رود. ماشین ساخته شده برای پخش آزمایشگاهی کود (شکل ۷)، شامل یک دیسک تخت مدور است که تیغه‌های مختلف طراحی شده روی آن پیچ

یکنواختی میزان پاشش در نرم‌افزار با تقسیم‌بندی پهنه پاشیده شده منطبق با آزمون پاشش ایستا اندازه‌گیری شد. با اندازه‌گیری TSP در فواصل Y مختلف، الگوی پاشش عرضی ایستای کل (TTSP) به روش نرم‌افزاری به دست آمد (Van Liedekerke *et al.*, 2009; Villette *et al.*, 2017). برای اعتبارسنجی نتایج نرم‌افزاری نیز یک ماشین پخش آزمایشگاهی ساخت شد تا نتایج پخش عملی با تیغه‌های مختلف بررسی گردد.

بهبود عملکرد کودپاش گریز از مرکز به منظور پاشش کود پلت

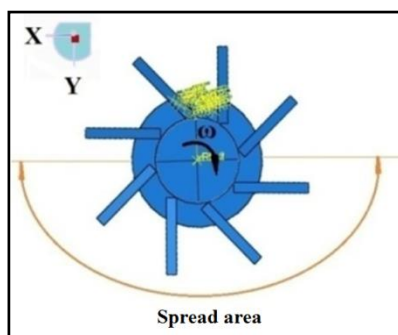
قطر دیسک دوار ۳۴۰ میلی‌متر است و ۸ تیغه دور تا دور محیط دیسک به صورت مایل با زاویه ۵۰ درجه نسبت به شعاع عبوری از محل اتصال نصب می‌شود.

می‌شود. ابعاد دیسک دوار این ماشین منطبق بر ماشین کودپاش گریز از مرکزی است که در این مطالعه بهبود آن برای پاشش کودهای پلت مدنظر است.



شکل ۷- طرح‌واره ماشین پخش کود آزمایشگاهی (راست) و شکل واقعی ماشین ساخته شده برای پاشش کود (چپ)

Fig. 7- Schematic of laboratory fertilizer spreader (right) and the actual shape of the machine made for fertilizer spreading (left)



شکل ۸- محل تغذیه کود روی دیسک دوار (زاویه ۹۰ درجه مثلثاتی) و محدوده پاشش کود

Fig. 8- Feed point on rotary disk (90° trigonometric angle) and fertilizer spread area

تغذیه و شعاع نقطه تغذیه نسبت به مرکز دیسک ساخته شد. این تنظیمات اولیه، مطابق با تنظیمات نقطه تغذیه و شعاع استوانه تغذیه کودپاش مورد مطالعه، در موقعیت ۹۰ درجه دایره مثلثاتی (شکل ۸)، فاصله ۶۰ میلی‌متر از مرکز دیسک دوار و دبی خروجی قیف ۳۰۰ گرم بر ثانیه (منطبق با موقعیت ۵ از تنظیمات اهرم میزان خروج کود ماشین) تنظیم شد. ارتفاع دیسک دوار نیز نسبت به جعبه‌ها (Z)، برای تمام آزمایش‌های برابر با ۷۰ سانتی‌متر و منطبق با ارتفاع کاری پیشنهاد شده برای ماشین مورد مطالعه انتخاب شد. آزمون‌ها در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا و از درجه

دیسک با استفاده از یک موتور الکتریکی جریان متناوب با توان اسمی ۱/۵ کیلووات و دور اسمی ۱۵۰۰ دور بر دقیقه می‌چرخد. از یک دیمر استفاده شد تا امکان تغییر دور موتور الکتریکی بین صفر تا ۱۵۰۰ دور بر دقیقه ایجاد گردد. از یک دورسنج نیز برای بررسی دور چرخشی دیسک دوار پس از تغییرات دیمر به منظور رسیدن به سرعت دورانی ۵۴۰ دور بر دقیقه (مطابق با دور محور تواندهی تراکتور) استفاده شد. پلت‌های کود در یک قیف از قسمت بالای دیسک ریخته می‌شد. به منظور کنترل نقطه تغذیه، مجموعه نگهدارنده قیف با سه درجه آزادی برای تنظیم ارتفاع قیف، زاویه مثلثاتی نقطه

### نتایج و بحث

در شکل ۹، نمونه‌ای از داده‌های خروجی از نرم‌افزار برای پاشش کودهای پلت در هر لحظه آورده شده که این داده‌ها برای هر یک از بعدهای X (عرض پاشش)، Z (ارتفاع پلت‌ها در هر لحظه) و Y (طول پاشش) برای جهت‌های مختلف ذرات پلت به صورت مجزا در دسترس هستند. با استفاده از شکل ۹، مشاهده می‌شود که مکان پلت‌های مختلف در هر لحظه در راستای Z چگونه است. تلفیق این داده‌ها در راستاهای مختلف می‌تواند مکان سه‌بعدی پلت‌های پرتاب شده را در هر لحظه مشخص کند. داده‌های مربوط به صفحه X-Y در پایان پاشش همه پلت‌ها، اطلاعات اولیه را برای بررسی الگوی پاشش عرضی ایستا مشخص می‌کنند.

غیریکنواختی پاشش مطابق با رابطه‌های ۴ تا ۶ به‌عنوان متغیر وابسته به‌منظور بررسی وضعیت یکنواختی پاشش در پنج نوع طراحی تیغه به‌عنوان متغیر مستقل استفاده شد.

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (4)$$

$$CV = \frac{SD}{\bar{X}} \quad (5)$$

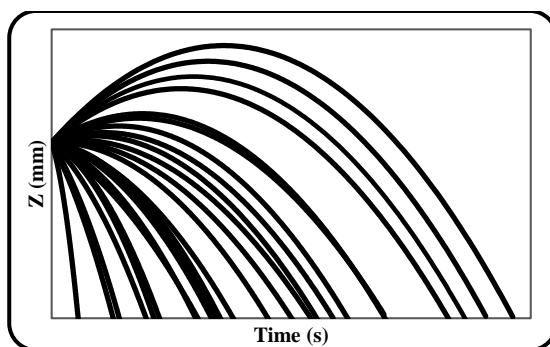
$$SD = \left\{ \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 / (n - 1) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

که در آن،

$\bar{X}$  = میانگین مقادیر جمع‌ی کود پاشیده شده (گرم)؛

$SD$  = انحراف از معیار مقادیر جمع‌ی کود پاشیده شده

(گرم)؛  $CV$  = درجه غیریکنواختی پاشش (بدون بعد).



شکل ۹- نمونه‌ای از نمودار خروجی نرم‌افزار برای پاشش کودهای پلت برای راستای Z (خطوط نمودار، مسیرهای حرکت هر یک از پلت‌ها به‌صورت مجزاست)

Fig. 9 - An example of software output graphs for spreading pellet fertilizers for Z axis (graph lines are the paths of each pallet separately)

پاشنده بسط پیدا کند، می‌توان تقریب بهتری از چگونگی پاشش عملی تیغه‌ها را در طول مزرعه به‌دست آورد. از پاشش جمع‌ی کود در هر نوار پاشش که الگوی پاشش عرضی ایستای کل از آن بهره می‌برد، در واقع با هدف رسیدن به درک درستی از وضعیت پاشش، بعد از همپوشانی پاشش‌ها در خلال حرکت تراکتور در زمین استفاده می‌شود.

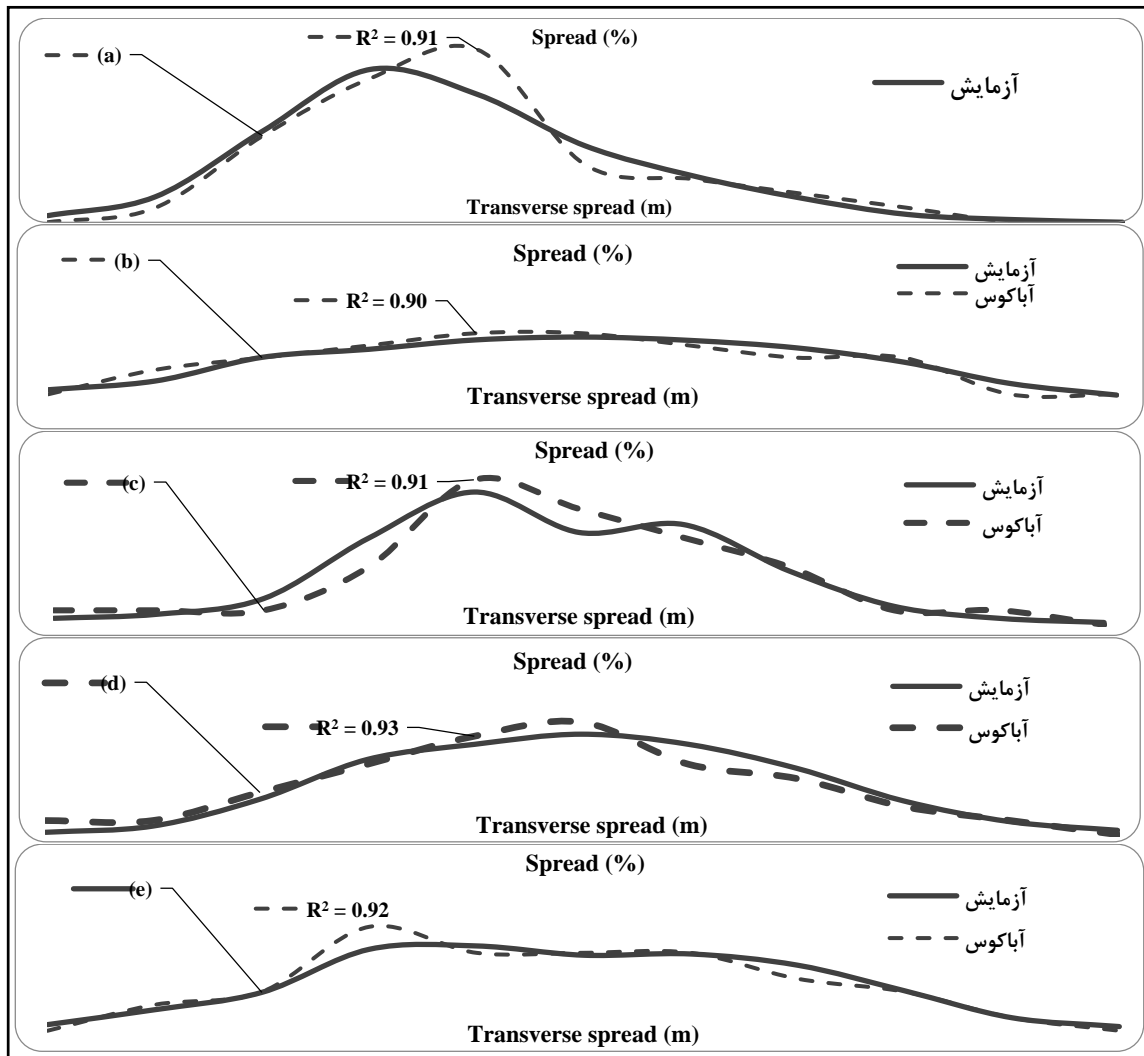
از تلفیق داده‌های بعد X و Y و استفاده از مفاهیم الگوی پاشش عرضی ایستا برای پاشش تیغه‌های مختلف، می‌توان الگوی پاشش تیغه‌ها را بررسی کرد. آزمون‌های پاشش ایستا اطلاعات کامل از چگونگی عملیات پاشش کود در مزرعه را نشان نمی‌دهد، اما بیانگر الگوی از وضعیت پاشش کود در مزرعه است که چنانچه این الگو در طول مزرعه و در جهت حرکت تراکتور از محل قرار گرفتن ماشین

مثلثاتی، اهداف متمایل پاشیدن راست یا چپ برای پاشش در مرزهای زمین زراعی محقق می‌شود. برای تیغه شاهد، با تغییر تنظیمات و قرار دادن در نقطه ۱۸۰ درجه مثلثاتی که حد بالایی تنظیم ماشین است، پاشش به سمت متقارن بودن حرکت می‌کرد. با این حال الگوی پاشش هنوز هم به صورت هرمی متمایل و غیریکنواخت بود و در مجموع با استفاده از تیغه شاهد نمی‌توان پاشش متمایل به راست را با ماشین ایجاد کرد که لزوم بازطراحی تیغه را جهت پاشش کودهای پلت تأیید می‌کند. با تغییر طراحی تیغه و استفاده از تیغه دوزنقه‌ای (شکل ۱۰-ب)، می‌توان مشاهده کرد که الگوی پاشش به صورت مسطح است و درجه غیریکنواختی پاشش در عرض پاشش کل ماشین (۲۰ متر) در حالت نرم‌افزاری و آزمایش به ترتیب برابر ۰/۵۲ و ۰/۴۸ و در عرض پاشش مؤثر (۱۲ متر) به ترتیب برابر ۰/۱۸ و ۰/۱۶ محاسبه شد. برای طراحی تیغه دوزنقه‌ای زاویه‌دار، الگوی پاشش W شکل (شکل ۱۰-ج) و درجه غیریکنواختی پاشش در عرض پاشش کل برای حالت نرم‌افزاری و آزمایش به ترتیب برابر ۰/۹۹ و ۰/۹۶ و در عرض پاشش مؤثر به ترتیب برابر ۰/۶۶ و ۰/۵۷ محاسبه شد. این طراحی شبیه به طراحی تیغه دوزنقه‌ای دارای دیواره‌ی داخلی دوزنقه‌ای شکل بود که برای کاهش نیروهای آبرودینامیکی مقاوم در حین چرخش، ابعاد دیواره کمتر از دیواره تیغه دوزنقه‌ای ساخته شد و از طرفی لبه بالایی تیغه با زاویه ۴۵ درجه به سمت بیرون متمایل داده شد تا کاهش سطح دیواره ضربه زننده را جبران کند. اما نتایج نشان می‌دهد هرچند بر اساس تنظیمات انتخاب شده با دیمر برای رسیدن به دور ۵۴۰ دور بر دقیقه، تیغه دوزنقه‌ای زاویه‌دار توان کمتری را در مقایسه با تیغه دوزنقه‌ای استفاده می‌کند، اما پاشش کود در طراحی دوزنقه‌ای مناسب‌تر از طراحی دوزنقه‌ای زاویه‌دار می‌باشد. برای طراحی تیغه

در شکل ۱۰، مقایسه‌ای بین الگوی پاشش عرضی ایستای کل (TTSP) برای تیغه‌های مختلف در دو حالت شبیه‌سازی با آباکوس و آزمایشی آورده شده است. برای مقایسه بهتر نتایج حاصل از خروجی نرم‌افزار و داده‌های آزمایشی با ماشین پاشنده آزمایشگاهی، داده‌ها به صورت درصد از کل آورده شد. نتایج حاصل از پاشش تیغه‌های مختلف نشان می‌دهد که در هر دو حالت به غیر از تیغه شاهد، در دیگر تیغه‌ها پاشش متقارن است. درصد بالایی از پاشش (بیش از ۷۵ درصد) نیز در محدوده عرض پاشش ۶- متر تا ۶+ متر پاشیده می‌شود که همان عرض پاشش مؤثر گزارش شده از طرف کارخانه سازنده است. یکی از دلایل پاشش غیریکنواخت با استفاده از تیغه شاهد، کم بودن طول تیغه در مقایسه با سایر تیغه‌های طراحی است. کوچک بودن طول تیغه باعث می‌شود ذرات پلت در حین چرخش دیسک دوار، زمان کمتری روی تیغه‌ها باشند و در نتیجه پاشش کود نامتقارن می‌شود.

درجه غیریکنواختی پاشش در تیغه شاهد برای عرض پاشش کل، در حالت نرم‌افزاری و آزمایشی به ترتیب ۱/۱۷ و ۱/۰۵ محاسبه شده (جدول ۳) که بالاترین CV در بین تیغه‌های بررسی شده است و نشان می‌دهد تیغه شاهد در مقایسه با سایر تیغه‌ها غیریکنواخت‌تر پاشیده است. از طرفی، الگوی پاشش برای این تیغه هم در حالت نرم‌افزاری و هم در حالت آزمایش به صورت هرمی متمایل است (شکل ۱۰-الف) که از الگوهای پخش نامناسب محسوب می‌شود (Anon, 2009). نتایج مطالعات گذشته و بررسی عملی تنظیم‌های اولیه ماشین نشان می‌دهد نقطه تغذیه تأثیر زیادی بر متقارن یا متمایل پاشیدن ذرات کود دارد و بنابراین در این مطالعه، نقطه تغذیه مطابق با نقطه توصیه شده از طرف کارخانه سازنده برای پاشش متقارن ماشین تنظیم شد. با تغییر این تنظیم، به سمت زاویه‌های بیشتر یا کمتر دایره

ناودانی، الگوی پاشش بیضی شکل است (شکل ۱۰-د) و درجه غیریکنواختی پاشش در عرض کل و عرض مؤثر پاشش به ترتیب ۰/۸۱ و ۰/۳۸ محاسبه شد. برای طراحی تیغه نبشی (شکل ۱۰-ه) نیز الگوی پاشش به صورت مسطح است که در مقایسه با طراحی‌های شاهد، دوزنقه‌ای زاویه‌دار و ناودانی، الگوی بهتری را نشان می‌دهد اما درجه غیریکنواختی آن در مقایسه با تیغه دوزنقه‌ای هم در عرض کل و هم در عرض مؤثر مقدار بیشتری مشاهده شد که نشان‌دهنده پاشش مناسب‌تر تیغه دوزنقه‌ای در مقایسه با تیغه نبشی است.



شکل ۱۰- مقایسه الگوی پاشش عرضی ایستا در دو حالت شبیه‌سازی شده با نرم‌افزار آباکوس و آزمایشی، برای تیغه‌های مختلف (a - شاهد، b- دوزنقه‌ای، c- دوزنقه‌ای زاویه‌دار، d- ناودانی، e- نبشی)

Fig. 10 - Comparison of static transverse spread pattern in two modes of simulated with the abaqus software and experimental study for various blades (a- control blade, b- trapezoidal blade, c- angled trapezoidal blade, d- spout blade, e- angle blade)

بررسی وضعیت انطباق نتایج شبیه‌سازی شده با نتایج آزمایشی به کمک ضریب تبیین ( $R^2$ ) نشان می‌دهد انطباق قابل قبولی بین نتایج مدل‌سازی شده و وضعیت آزمایشی وجود دارد و این ضریب از

آزمایش برای عرض پاشش کل و عرض پاشش مؤثر آورده شده است. نزدیک‌تر بودن CV به عدد صفر، نشان‌دهنده مناسب‌تر بودن پاشش است. مقایسه درجه غیریکنواختی در دو حالت نرم‌افزاری و آزمایش نشان می‌دهد برای تمام تیغه‌ها درجه غیریکنواختی تخمین زده شده در شبیه‌سازی با نرم‌افزار بیشتر از مقدار به‌دست آمده از نتایج آزمایش است. زیرا در شبیه‌سازی با نرم‌افزار، برای ساده‌سازی در اعمال روابط عددی، مقدار کود کمتری در مقایسه با آزمون آزمایشی استفاده می‌شود که این نتیجه در مطالعه‌های قبلی (Van Liedekerke *et al.*, 2009; Villette *et al.*, 2017) نیز گزارش شده است.

۰/۹۰ تا ۰/۹۳ در تیغه‌های مختلف تغییر می‌کند. از آنجا که نزدیکی  $R^2$  به عدد ۱، بهبود انطباق نتایج شبیه‌سازی و آزمایشی را نشان می‌دهد، می‌توان نتیجه گرفت تیغه ناودانی ( $R^2 = 0.93$ ) بالاترین انطباق و پس از آن تیغه‌های نبشی، دوزنقه‌ای زاویه‌دار، شاهد و دوزنقه‌ای به‌ترتیب با ضریب‌های تبیین ۰/۹۲، ۰/۹۱، ۰/۹۱ و ۰/۹۰ قرار می‌گیرند. تطبیق نتایج در حالت عملی با نتایج به‌دست آمده از نرم‌افزار نشان‌دهنده تخمین خوب شبیه‌سازی با نرم‌افزار است که می‌توان بدون صرف وقت و هزینه آزمایش‌های میدانی، بهترین تیغه را برای پاشش ذرات کود یا بذر انتخاب کرد. در جدول ۳، مقادیر درجه غیریکنواختی پاشش برای تیغه‌های مختلف در دو حالت نرم‌افزاری و

جدول ۳- درجه غیریکنواختی پاشش (CV) در طراحی‌های مختلف تیغه  
Table 3. Coefficient of variation of spread (CV) for different blade designs

Coefficient of variation of spread						نوع تیغه Blade type
ضرایب تغییر پاشش			ضرایب تغییر پاشش			
پاشش عرضی مؤثر Effective transverse spread			پاشش عرضی کل Total transverse spread			
درصد خطا Error (%)	شبیه‌سازی شده Simulation	آزمایشی Experiment	درصد خطا Error (%)	شبیه‌سازی شده Simulation	آزمایشی Experiment	
16.31	0.76	0.64 a	10.41	1.17	1.05 a	شاهد Control
13.88	0.18	0.16 d	7.55	0.52	0.48 d	دوزنقه‌ای Trapezoidal
18.11	0.69	0.57 a	4.16	0.99	0.96 a	دوزنقه‌ای زاویه‌دار Angled trapezoidal
12.73	0.43	0.38 b	2.02	0.81	0.79 b	ناودانی Spout
19.20	0.36	0.29 c	9.20	0.76	0.69 c	نبشی Angle

\* اعداد با حروف مشترک در هر ستون، از نظر آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

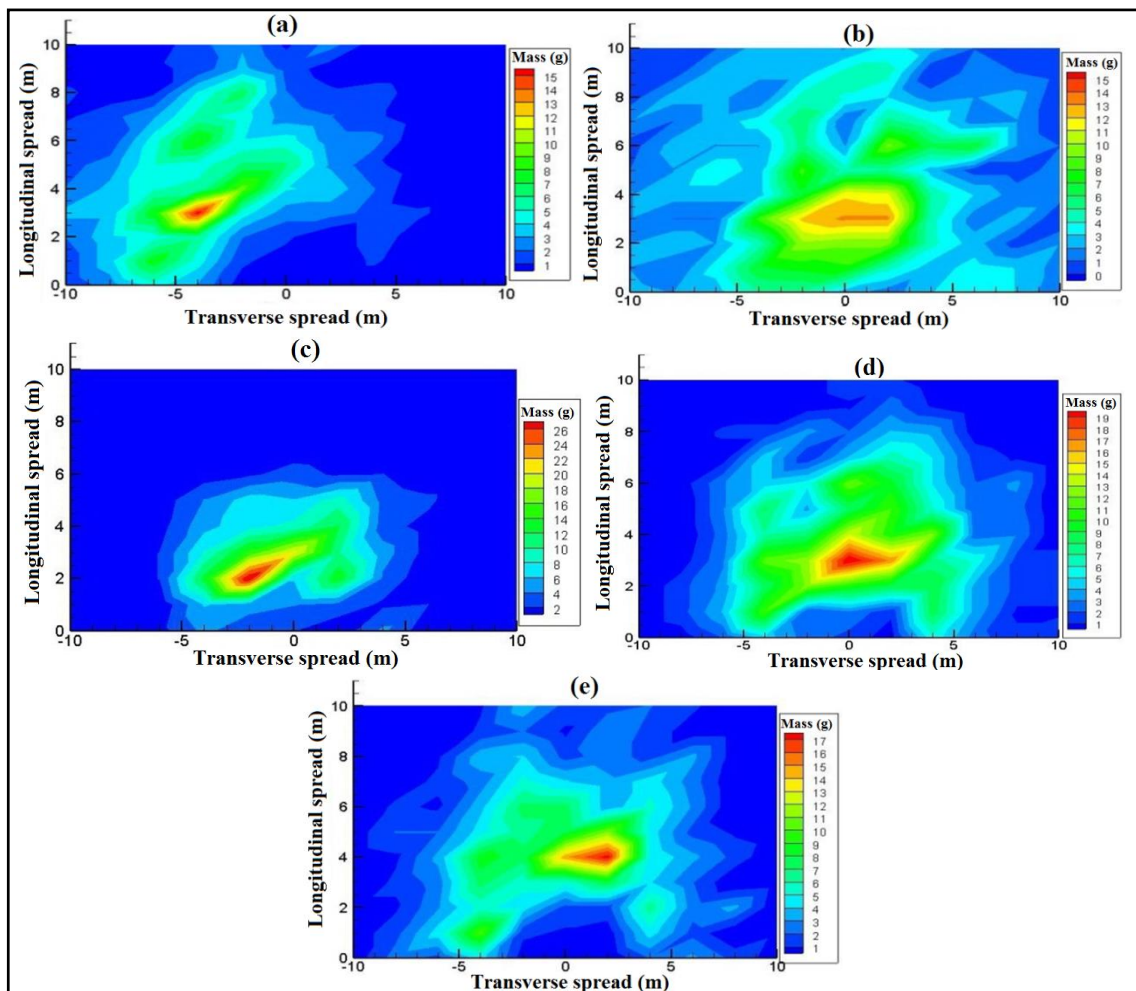
\* Common letters in each column, indicate a non-significant difference at the 5 percent probability level using the LSD method.

قرار می‌گیرند که هم در حالت نرم‌افزاری و هم در حالت آزمایشی این ترتیب صادق است. بنابراین تیغه دوزنقه‌ای به عنوان بهترین تیغه از نظر یکنواختی الگوی پاشش گزارش می‌شود. برخی از محققان گزارش داده‌اند که برای پاشش مناسب کود باید مقدار CV در عرض مؤثر کمتر از

بررسی یکنواختی پاشش به‌منظور انتخاب بهترین تیغه با استفاده از پارامتر آماری درجه غیریکنواختی پاشش (CV) نشان می‌دهد هم در حالت نرم‌افزاری و هم در حالت عملی، تیغه دوزنقه‌ای کمترین CV را دارد. و پس از آن به‌ترتیب تیغه‌های نبشی، ناودانی، دوزنقه‌ای زاویه‌دار و شاهد

پاشش تیغه‌های مختلف اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد وجود دارد و بنابراین می‌توان گفت با تغییر طراحی تیغه، یکنواختی پاشش در سطح احتمال ۵ درصد تغییر می‌کند. مقایسه میانگین‌های درجه غیریکنواختی پاشش برای تیغه‌های بررسی شده نشان می‌دهد هم در عرض پاشش کل و هم در عرض پاشش مؤثر، به‌غیر از تیغه شاهد با دوزنقه‌ای زاویه‌دار، بین سایر تیغه‌ها اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد وجود دارد (جدول ۳).

۰/۳۰ باشد (Lawrence and Yule, 2007). برخی از استانداردها این مقدار کمتر از ۰/۲۰ (Anon, 2006) و کمتر از ۰/۱۵ (Anon, 2003) توصیه شده است. در بین تیغه‌های مطالعه شده، تیغه دوزنقه‌ای از لحاظ CV مقدار قابل قبولی را ارائه کرده است و سایر تیغه‌ها عملاً از این نظر تأییدیه لازم را به‌دست نیاورده‌اند. تحلیل واریانس روی نتایج حاصل از درجه غیریکنواختی پاشش تیغه‌های مختلف به روش آزمایشی نشان می‌دهد بین درجه غیریکنواختی



شکل ۱۱- پاشش میدانی بر اساس الگوی پاشش ایستا در مزرعه (TSP) برای طراحی‌های مختلف تیغه؛ الف) تیغه شاهد، ب) تیغه دوزنقه‌ای، ج) تیغه دوزنقه‌ای زاویه‌دار، د) تیغه ناودانی و ه) تیغه نبشی

Fig. 11- Spatial spread based on static transverse spread pattern (TSP) for various blade designs: a- control blade, b- trapezoidal blade, c- angled trapezoidal blade, d- spout blade, e- angle blade



بهبود عملکرد کودپاش گریز از مرکز به منظور پاشش کود پلت

ماشین پاشنده آزمایشگاهی ساخته و الگوی پاشش تیغه‌های طراحی شده به صورت عملی بررسی شد. از دو پارامتر الگوی پاشش عرضی ایستا (TSP) و درجه غیریکنواختی پاشش (CV) به‌عنوان پارامترهای تعیین‌کننده برای انتخاب بهترین الگوی پاشش و رسیدن به بهترین تیغه استفاده شد. نتایج مطالعه نشان داد تیغه دوزنقه‌ای در میان سایر تیغه‌ها کمترین CV، ( $CV=0/16$ )، را در عرض پاشش مؤثر دارد و پس از آن به‌ترتیب تیغه‌های نبشی، ناودانی، دوزنقه‌ای زاویه‌دار و شاهد قرار دارند که هم در حالت نرم‌افزاری و هم در حالت آزمایشی این ترتیب برای آنها صادق است. پیشنهاد می‌شود برای پاشش کود پلت شده با ماشین کودپاش گریز از مرکز از تیغه‌های دوزنقه‌ای استفاده شود. بررسی وضعیت انطباق نتایج شبیه‌سازی شده با حالت آزمایشی نشان می‌دهد انطباق قابل قبولی بین نتایج مدل‌سازی شده و وضعیت آزمایشی وجود دارد و تیغه ناودانی ( $R^2=0/93$ ) بالاترین انطباق و پس از آن تیغه‌های نبشی، دوزنقه‌ای زاویه‌دار، شاهد و دوزنقه‌ای به‌ترتیب با ضریب‌های تبیین  $0/92$ ،  $0/91$ ،  $0/91$  و  $0/90$  قرار می‌گیرند. استفاده از مدل نرم‌افزاری می‌تواند روش مناسبی برای بررسی عملکرد و بهبود پاشش کودپاش‌های گریز از مرکز باشد.

در شکل ۱۱، پاشش میدانی ذرات پلت کود با استفاده از الگوی پاشش عرضی ایستا (TSP) برای طراحی‌های مختلف تیغه آورده شده است. با استفاده از تکنیک پردازش تصویر در نرم‌افزار متلب، ویرایش R2009a، محدوده پاشش سطحی تیغه‌های مختلف بررسی شد. نتایج این بررسی نشان می‌دهد تیغه دوزنقه‌ای با مساحت تقریبی ۱۷۶ متر مربع، در مقایسه با سایر تیغه‌ها، محدوده پاشش بزرگ‌تری دارد. پس از آن به‌ترتیب تیغه‌های نبشی (با مساحت تقریبی ۱۵۴ متر مربع)، ناودانی (با مساحت تقریبی ۱۳۸ متر مربع)، شاهد (با مساحت تقریبی ۱۳۴ متر مربع) و دوزنقه‌ای زاویه‌دار (با مساحت تقریبی ۱۰۲ متر مربع) قرار می‌گیرند.

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه یک مدل نرم‌افزاری از واحد پاشنده کودپاش گریز از مرکز شبیه‌سازی و عملکرد آن با تیغه‌های مختلف طراحی شده بررسی شد تا بهترین تیغه برای پاشش کودهای پلت شده انتخاب شود. در این مطالعه تیغه‌های شاهد، دوزنقه‌ای، دوزنقه‌ای زاویه‌دار با ابعادی کوچک‌تر از طراحی دوم (که ضلع بالایی آن با زاویه ۴۵ درجه به سمت بالا متمایل) ناودانی و نبشی طراحی شدند. به‌منظور اعتبارسنجی نتایج نرم‌افزاری با حالت عملی نیز یک

### قدردانی

بدین‌وسیله از همکاری گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه فردوسی مشهد در اجرای طرح پژوهشی شماره ۳، با شماره ۴۰۹۶۴ قدردانی می‌شود.

### مراجع

- Anon. (2003). EN 13739-2: Landmaschinen-Auslegerund Wurf-Mineraldüngerstreuer-Umweltschutz, Teil 2: Prüfmethoden (Veröffentlichung in Vorbereitung). European Standards.
- Anon. (2006). NY/T1003: Technical specification of quality evaluation for fertilizing machinery. China Standards. National Agricultural Technology Extension and Service Center.

- Anon. (2009). S341.4: Procedure for measuring distribution uniformity and calibrating granular broadcast spreaders. *ASAE Standards*. St. Joseph, Mich. ASABE. USA.
- Anon. (2012). *Feeding the World*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Anon. (2013). Current global food production trajectory won't meet 2050 needs. *ScienceDaily*, Available at: [www.sciencedaily.com](http://www.sciencedaily.com).
- Aphale, A., Bolander, N., Park, J., Shaw, L., Svec, J., & Wassgren, C. (2003). Granular fertilizer particle dynamics on and off a spinner spreader. *Journal of Biosystems Engineering*, 85, pp. 319-329.
- Batchelor, G. K. (1967). *An Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge University Press.
- Benito, M., Masaguer, A., Moliner, A., Arrigo, N., & Palma, R. M. (2003). Chemical and microbiological parameters for the characterisation of the stability and maturity of pruning waste compost. *Journal of Biology and Fertility of Soils*, 37, pp. 184-189.
- Carman, K. (1991). The effect of disc peripheral speed and free radius on the distribution pattern in single spinning-disc type spreader. *Selcuk University Journal of Agricultural Faculty*, 2, pp. 75-83.
- Ghasemi, Y., Kianmehr, M., Mirzabe, A. H., & Abooli, B. (2013). The effect of rotational speed of the drum on physical properties of granulated compost fertilizer. *Journal of Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 49, pp. 743-755.
- Glover, J. W., & Baird, J. V. (1973). Performance of spinner type fertilizer spreaders. *Transactions of the ASAE*, 16, pp. 48-51.
- Grift, T. E., Kweon, G., Hofstee, J. W., Piron, E., & Vilette, S. (2006). Dynamic friction coefficient measurement of granular fertilizer particles. *Journal of Biosystems Engineering*, 95, pp. 507-515.
- Hofstee, J. W., & Huisman, W. (1990). Handling and spreading of fertilizers Part 1: Physical properties of fertilizer in relation to particle motion. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 47, pp. 213-234.
- Lawrence, H. G., & Yule, I. J. (2007). Estimation of the in-field variation in fertiliser application. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 50, pp. 25-32.
- Moursy, H. E. M. N. (2002). Granulation of Nitrophosphate fertilisers (Ph. D. Thesis) Queen's University Belfast, Belfast.
- Olieslagers, R., Ramon, H., & Baerdemaeker, J. D. (1996). Calculation of fertilizer distribution patterns from spinning disc spreader by means of simulation model. *Journal of Agricultural Engineering*, 63, pp. 137-152.
- Parish, L. R. (2002). Rate setting effects on fertiliser spreader distribution patterns. *Applied Engineering in Agriculture*, 18, pp. 301-304.
- Parish, R. L., & Chaney, P. P. (1985). Evaluation of a rotary spreader with a helical cone for drop point control. *Transactions of the ASAE*, 25, pp. 1140-1444.
- Przywara, A. (2015). The impact of structural and operational parameters of the centrifugal disc spreader on the spatial distribution of fertilizer. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 7, pp. 215-222.

- Reddy, B. C., Murthy, D. V. S., & Rao, C. D. P. (1997). Modeling of a rotary drum granulator for control. *Particle & Particle Systems Characterization*, 14, pp. 257-262.
- Rees, R. M., Baddeley, J. A., Bhogal, A., Ball, B. C., Chadwick, D. R., Macleod, M., Lilly, A., Pappa, V. A., Thorman, R. E., Watson, A. C., & Williams, J. R. (2013). Nitrous oxide mitigation in UK agriculture. *Soil Science and Plant Nutrition*, 59, pp. 3-15
- Stewart, W. M., Dibb, D. W., Johnston, A. E., & Smyth, T. J. (2005). The contribution of commercial fertilizer nutrients to food production. *Journal of Agronomy*, 97, pp. 1-6.
- Van Liedekerke, P., Piron, E., Vangeyte, J., Villette, S., Ramon, H., & Tijskens, E. (2008). Recent results of experimentation and DEM modeling of centrifugal fertilizer spreading. *Journal of Granular Matter*, 10, pp. 247-255.
- Van Liedekerke, P., Tijskens, E., Dintwa, E., Rioual, F., Vangeyte, J., & Ramon, H. (2009). DEM simulations of the particle flow on a centrifugal fertilizer spreader. *Journal of Powder Technology*, 190, pp. 348-360.
- Villette, S., Piron, E., & Miclet, D. (2017). Hybrid centrifugal spreading model to study the fertiliser spatial distribution and its assessment using the transverse coefficient of variation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 137, pp. 115-129.
- Villette, S., Piron, E., Miclet, D., Martin, R., Jones, G., Paoli, J. N., & Gee, C. (2012). How mass flow and rotational speed affect fertilizer centrifugal spreading: Potential interpretation in terms of the amount of fertiliser per vane. *Journal of Biosystems Engineering*, 111, pp. 133-138.
- Yildirim, Y. (2006). Effect of vane number on distribution uniformity in single-disc rotary fertilizer spreaders. *Applied Engineering in Agriculture*, 22, 659– 663.
- Yinyan, S., Man, C., Xiaochan, W., Odhiambo, M. O., & Weimin, D. (2018). Numerical simulation of spreading performance and distribution pattern of centrifugal variable-rate fertilizer applicator based on DEM software. *Computers and Electronics in Agriculture*, 144, pp. 249-259.
- Zafari, A., & Kianmehr, M. H. (2012). Livestock manure management and pelleting. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 14, pp. 78-84.

## **Improvement of Centrifugal Spreader Performance in order to Spread the Pellet Fertilizer**

**S. Moslehi Roodi, M. Abbaspour-Fard and M. H. Aghkhani\***

\* Corresponding author: Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad. Iran. Email: aghkhani@um.ac.ir

Received: 16 October 2018, Accepted: 2 January 2019

### **Abstract**

In this study, a software model was developed for the spreader unit of a centrifugal fertilizer and its spread performance was studied with different blade designs to recommend the best suitable blade for spreading of the pellet fertilizer. The blade designs include trapezoid, angled trapezoid, channel (U shape) and angle (L shape) that were compared with the control blade. In order to validate the software's results, a laboratory spreader device was fabricated based on a commercial centrifugal fertilizer machine. The spread pattern of the designed blades was investigated experimentally in a completely randomized design with three replications. The influence of blade design as the dependent variable, on Total Transverse Spreading Pattern (TTSP) and Coefficient of Variation (CV) as the dependent variables, was investigated to achieve the best design for blade in the experimental mode. Results showed that the trapezoid blade, among other blades, had the best spread performance with in the effective swath width during pellet spreading (CV=0.18). Other blades were ranked as angle blade (CV=0.29), channel blade (CV=0.38), angled trapezoid blade (CV= 0.57) and control blade (CV= 0.64) respectively. This ranking observed for both numerical software and the experimental results. Investigation on adaptation and compatibility between the software model and experimental results showed that, for all blades designs, there were acceptable agreements between software model and experimental ( $R^2 \geq 0.90$ ).

**Keywords:** Abaqus, Blade Design, Simulate, Stationary Spread Pattern, Variation of Spread