

Improving Sustainability and Slow-Release Property of Pelletized Agro-Biowaste Compost Fertilizer Assisted by Biodegradable Coating

MARZIEH GHORBANI¹, MOHAMMAD HOSSEIN KIANMEHR^{1*}, EHSAN SARLAKI¹, RASOUL AHRARI¹, BEHZAD AZADEGAN²

1. Department of Agrotechnology, College of Abouraihan, University of Tehran, Tehran, Iran.

2. Department of Irrigation and Drainage Department, College of Abouraihan, University of Tehran, Tehran, Iran.

(Received: Apr. 13, 2021- Revised: May. 20, 2021- Accepted: May. 31, 2021)

ABSTRACT

Today, the use of biodegradable coatings has become an effective solution for pelletized agro-biowaste fertilizers due to the synchronizing of the nutrient release according to the plant requirements and reducing the environmental issues. In this study, three agro-biowaste compost including poultry manure (40%), cattle manure (30%), and agricultural biomass (30%) were mixed at the 40% moisture content, and then the pelletization process was carried out using the screw extruder. A factorial experiment in a completely randomized design with three replications was developed for assessing the effect of four biodegradable coating materials (humic acid, canola oil, corn starch, and nano-silica) and three coating methods (dip coating, spray coating, vacuum coating) on sustainability attributes of coated compost pellets such as pellet disintegration time, water absorption, humidity absorption, and water contact angle. The results showed that the canola oil – vacuum method applied for coated compost pellets with disintegration time (1735 min), water absorption (57.6%), humidity absorption (4.3%), and water contact angle (69°) was the best treatment. This coating method showed a 36-fold increase in disintegration time and a 3.7, 7, and 1.6-fold decrease in water absorption, humidity absorption, and water contact angle, respectively as compared with uncoated compost pellets. The nitrogen release rate of the coated compost pellets showed that the amount of total nitrogen at disintegration time was 25%. Also, 75% of nitrogen was released into the soil during 55 days, which confirmed experimental results and improved the nitrogen release rate by 45 days as compared with uncoated compost pellets. Overall, from the results of this study, it can be concluded that pelletized compost fertilizer which was coated by canola oil-vacuum method, shown a high resistance to water, enhanced sustainability and reduced nitrogen-release rate property as it could supply nutrient to the plant for a longer period.

Keywords: Sustainability, Pelletized Agro-biowaste Compost Fertilizer, Biodegradable Coating, Slow-Release Nitrogen, Vacuum Coating.

بهبود صفات پایداری و کندرهای کود پلت کمپوست پسماندهای زیستی-کشاورزی با کمک پوشش زیست تجزیه پذیر

مرضیه قربانی^۱، محمد حسین کیانمهر^{۲*}، احسان سرلکی^۱، رسول احراری^۱، بهزاد آزادگان^۲

۱. گروه مهندسی فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲. گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱/۲۴ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۲/۳۰ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۳/۱۰)

چکیده

امروزه استفاده از مواد پوششی زیست تجزیه پذیر به دلیل بهبود تطابق آزادسازی مواد مغذی با نیاز غذایی گیاه و کاهش نگرانی‌های زیست محیطی به یک راه کار مؤثر برای تولید کودهای پلت با پایه زیستی تبدیل شده است. در این پژوهش، کمپوست سه پسماند زیستی شامل کود مرغی (۴۰ درصد)، کود گاوی (۳۰ درصد) و بقایای گیاهی (۳۰ درصد) با رطوبت ۴۰ درصد وزنی مخلوط و با دستگاه اکسترودر پیچی پلت شدند. اثر چهار ماده پوشش دهنده زیست تجزیه پذیر (هیومیک اسید، روغن کانولا، نشاسته ذرت و نانوسیلیس) و سه روش پوشش دهی (غوطه‌وری، پاششی و خلأ) بر پنج صفت پایداری پلت کمپوست شامل زمان وارفتگی، جذب آب، جذب رطوبت و زاویه تماس قطره آب از طریق آزمایش چندعاملی در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار بررسی شدند. نتایج نشان داد که کود پلت کمپوست پوشش دهی شده به روش خلأ-کانولا با زمان وارفتگی (۱۷۳۵ دقیقه)، جذب آب (۵۷/۶ درصد)، جذب رطوبت (۴/۳ درصد) و زاویه تماس (۶۹ درجه) به عنوان نمونه برتر این پژوهش انتخاب شد. این روش پوشش دهی باعث افزایش ۳۶ برابری و کاهش ۳/۷، ۷ و ۱/۶ برابری به ترتیب در زمان وارفتگی، جذب آب، جذب رطوبت و زاویه تماس نسبت به نمونه بدون پوشش دهی شد. نرخ آزادسازی نیتروژن در محیط آب برای پلت کمپوست پوشش دهی شده در زمان وارفتگی ۲۵ درصد بود. همچنین، ۷۵ درصد نیتروژن به مدت ۵۵ روز در محیط خاک آزادسازی شد که نرخ آزادسازی را به مدت ۴۵ روز نسبت به نمونه بدون پوشش دهی بهبود بخشید. از نتایج این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که کود پلت کمپوست پوشش دهی شده به روش خلأ-کانولا با بهبود صفات پایداری، ماندگاری در آب و کاهش نرخ آزادسازی نیتروژن، می‌تواند عناصر غذایی را برای مدت زمان طولانی تری در اختیار گیاه قرار دهد.

واژه‌های کلیدی: پایداری، کود پلت کمپوست با پایه زیستی - کشاورزی، پوشش زیست تجزیه پذیر، نیتروژن کندر، پوشش دهی خلأ.

مقدمه

شدن خاک و آلودگی فلزات سنگین شده‌اند (Messiga *et al.*, 2020). از طرف دیگر، غلظت‌های دوره‌ای کود منجر به نوسانات شدید گیاه از بی‌اثری تا سمیت می‌شود که ممکن است بر رشد برخی از گونه‌های کشاورزی تأثیر منفی بگذارد (Fan & Singh, 2012). بر این اساس، محققان همواره به دنبال راه‌حلی برای بهبود کارایی استفاده از کودها و کاهش اثرات نامطلوب زیست محیطی آن‌ها هستند. یکی از این راه‌حل‌ها استفاده از پسماندهایی با پایه زیستی - کشاورزی شامل کودهای حیوانی، زباله‌های شهری و بقایای محصولات است که برای تولید کمپوست استفاده می‌شوند. کمپوست به عنوان یک مکمل مؤثر موجب تسهیل دسترسی گیاه به مواد مغذی خاک با تأمین مواد آلی، بهبود ساختار و حاصلخیزی خاک با تنظیم فعالیت میکروبی، افزایش ظرفیت نگهداری آب، بهبود عملکرد و کیفیت محصولات می‌شود (Sharif Paghaleh *et al.*, 2017; Duan *et al.*, 2020).

رشد جمعیت جهان و پیش‌بینی ۹/۸ میلیارد نفری جمعیت تا سال ۲۰۵۰، نیاز جهانی به غذا را افزایش داده و انتظار می‌رود سرانه غذایی تا سال ۲۰۵۰ دو برابر شود (Alexandratos and Bruinsma, 2012; Ghorbani *et al.*, 2018). متناسب با این نرخ افزایش، انتظار می‌رود که تقاضای غذا افزایش یابد. گیاهان برای رشد و بهره‌وری مطلوب به ۱۷ عنصر غذایی ضروری نیاز دارند که در این میان نیتروژن مهم‌ترین و ضروری‌ترین عنصر برای رشد گیاه شناخته شده است. کودهای شیمیایی از جمله اوره به دلیل داشتن نیتروژن زیاد (۴۶ درصد وزنی) و هزینه کم، بیشترین استفاده را دارند (Gil-Ortiz *et al.*, 2020)؛ اما به دلیل جذب پایین اوره توسط گیاهان اتلاف شده و منجر به کاهش بهره‌وری و نگرانی‌های زیست محیطی مانند آزادسازی گازهای آلاینده از جمله آمونیاک، شستشوی نترات و آلودگی آب‌های زیرزمینی، اسیدی

سلولز و غیره) باشند (Trenkel, 2010; Sarlaki et al., 2019b; Ghorbani et al., 2021a, b, c; Salimi et al., 2021). علاوه بر این، پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که از مواد آلی مانند بایوچار، کلوفن^۴ و پلی فنول نیز به عنوان پوشش‌دهنده استفاده کرده‌اند (Shi et al., 2020; Tajinia et al., 2020; Sarlaki et al., 2017, 2018, 2021d; Motamedi et al., 2019). استفاده نقش حفاظتی در جلوگیری از آزادسازی سریع مواد مغذی در خاک از طریق تشکیل یک لایه غشای نیمه‌تراوا بر عهده دارند و باید مقاومت خوبی در برابر سایش مکانیکی و نفوذ رطوبت داشته باشند (Bortoletto-Santos et al., 2016; Sarlaki et al., 2020a, b). از مزایای SRFs صرفه‌جویی در مقدار کود، کاهش تعداد دفعات مصرف، کنترل آزادسازی مواد مغذی، جلوگیری از سمیت دانه، سوزاندن برگ، سوزش پوست و مشکلات استنشاق، افزایش کیفیت خاک و سرعت جوانه‌زنی گزارش شده است. از معایب آن‌ها نیز می‌توان به گران بودن، مسائل بازاریابی، تغییرات pH خاک، امکان آزاد شدن مواد مغذی و جذب رطوبت در مراحل انتقال و انبارداری از طریق ایجاد شکاف در پلت و گرانول‌ها به دلیل فرسایش، غیر زیست‌تجزیه‌پذیری و سمی بودن برخی پوشش‌دهنده‌ها در خاک اشاره کرد (Shaviv, 2005; Davidson and Gu, 2012). روش‌های مختلفی برای پوشش‌دهی کودها وجود دارد. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش غوطه‌وری، پاششی و خلأ اشاره کرد. روش غوطه‌وری پرکاربرد و ارزان است، مواد کود در مخزنی از ماده پوششی شناور شده و از تمام جهات پوشش روی سطح انجام می‌شود. در این روش ویسکوزیته مواد در لایه پوششی مؤثر است؛ به‌طوری‌که اگر مواد با ویسکوزیته بالا پوشش داده شوند لایه پوششی همگن نشده و اگر ویسکوزیته پایین باشد امکان حل شدن ماده هسته یا ایجاد پوشش ضعیف وجود دارد. روش پاششی نیز از روش‌های مرسوم و ساده است. در این روش پوشش ذخیره شده در یک مخزن توسط لوله‌هایی به نازل پمپ شده و ماده کود به صورت ناپیوسته^۵ در مخزن اختلاط یا به صورت پیوسته در استوانه دوار روی مواد کود پاشیده می‌شود که دما، رطوبت، غلظت سیال، فشار هوای نازل و طراحی نازل در بازدهی پوشش‌دهی مؤثر است. در روش پوشش‌دهی خلأ، مواد به داخل روزنه‌های ریز کود پلت در اثر تغییر فشار از حالت خلأ به اتمسفر نفوذ می‌کنند که نفوذ بیشتر سیال پوشش‌دهی در سطوح متخلخل، پوشش‌دهی یکسان و در تمام جهات، روکش نازک و صرفه‌جویی در ماده پوشش‌دهنده را به همراه دارد (Beig et al., 2020; Lawrencina et al., 2021).

(Sarlaki et al., 2021b, c). از دیدگاه زیست‌محیطی، تخمین زده شده است که کمپوست کردن یک تن پسماند می‌تواند از تولید ۸/۴ کیلوگرم کودهای شیمیایی NPK جلوگیری کند، ضمن این که این مقدار پسماند دارای پتانسیل جذب CO₂ به میزان ۴۸ کیلوگرم است (Martínez-Blanco et al., 2009).

در کشور ایران سالانه حدود ۱۲۰ میلیون تن محصولات کشاورزی تولید می‌شود که با احتساب حداقل ۱۲ میلیون تن ضایعات (محصولاتی که کیفیت مورد انتظار را از دست داده و از حالت اولیه خارج شده‌اند) و حدود ۱۰۰ میلیون تن زائدات (مواد همراه با یک محصول کشاورزی که در جریان تولید تا مصرف از آن جدا شده و کاربرد دیگری غیر از ماده اصلی پیدا کرده‌اند)، پیش‌بینی می‌شود که حدود ۱۱۰ میلیون تن مواد اولیه برای تولید کودهای با پایه زیستی - کشاورزی در دسترس باشد که با ضریب تبدیل چهار به یک می‌توان حدود ۳۰ میلیون تن کود پلت کمپوست از آن‌ها تولید کرد (وزارت جهاد کشاورزی، ۱۳۹۸). اعمال مستقیم کودهای معدنی به گیاهان، بازده پایین (۳۰-۳۵ درصد) جذب مواد مغذی دارد (Iftime et al., 2019; Versino et al., 2019). در حالیکه پلت یا گرانول‌های کودهای کندر (SRFs^۱) باعث افزایش عملکرد محصول و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی می‌شوند (Shaviv, 2005). کودهای SRF معمولاً توسط ماکرومولکول‌های طبیعی یا نیمه‌طبیعی و سازگار با محیط‌زیست پوشانده شده و با آزادسازی کود با نرخ آهسته، نیازهای مواد مغذی برای رشد محصول را برای یک دوره طولانی‌تر در خاک فراهم می‌کنند (Lawrencina et al., 2021). یک بررسی دقیق نشان می‌دهد که تاریخچه توسعه و تکامل SRFs، ریشه در اوایل دهه ۱۹۶۰ توسط شرکتی در تنسی آمریکا (TVA^۲) دارد (Blouin, 1967). در گذشته از گوگرد و پلی‌اتیلن به عنوان مواد پوششی در تهیه SRFs استفاده می‌شد و به مرور زمان مواد پلیمری، طبیعی، فوق جاذب و کامپوزیت‌های نانو به عنوان مواد پوشش‌دهنده توسعه یافتند و بسیاری از SRFs نیز تاکنون در مقیاس تجاری تهیه شده‌اند (Azeem et al., 2014; Sarlaki et al., 2019b, c).

مواد پوشش‌دهنده به‌طور معمول به دو دسته مواد غیر آلی و پلیمرهای آلی طبقه‌بندی می‌شوند. مواد غیر آلی شامل گوگرد، بنتونیت و سنگ گچ فسفر هستند؛ در حالیکه پلیمرهای آلی می‌توانند پلیمرهای مصنوعی (پلی‌اورتان، پلی‌اتیلن، رزین‌های آکیدی و غیره) و پلیمرهای طبیعی (نشاسته، کیتوسان^۳، لیگنین،

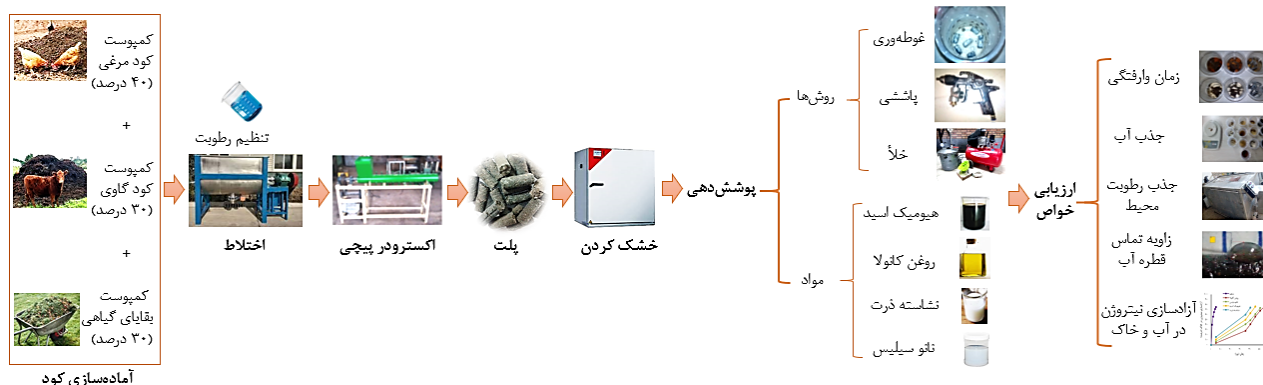
مزرعه سازمان اتکا واقع در علی‌آباد ورامین تهیه شدند و کلیه آزمایش‌ها در گروه فنی کشاورزی پردیس ابوریحان-دانشگاه تهران انجام شد. پلت‌های مورد استفاده در این تحقیق از ترکیب کمپوست سه ماده آلی زیست تجزیه‌پذیر شامل کود مرغی تخم‌گذار (۴۰ درصد)، کود گاوی (۳۰ درصد) و بقایای گیاهی فضای سبز (۳۰ درصد) تولید شدند. درصد اختلاط کمپوست سه ماده آلی بر مبنای تنظیم نسبت C/N بر اساس استاندارد در محدوده ۳۰-۲۵ تعیین شد (TMECC, 2002). مواد در میکسر با تنظیم رطوبت به ۴۰ درصد مخلوط شدند و برای تولید پلت وارد دستگاه اکسترودر پیچی شدند (Sarlaki et al., 2021e; Amiri et al., 2013). با توجه به استاندارد پلت‌های استوانه‌ای کمپوست در دستگاه‌های اکسترودر (قطر ۳۰-۲ میلی‌متر و طول حدود ۲/۵ برابر قطر)، در پژوهش حاضر با توجه به قطر سوراخ دای دستگاه اکسترودر (۶ میلی‌متر) طول ۱۴ میلی‌متر (۲/۳۳ برابر قطر) در نظر گرفته شد (Heinze, 1999; Purnomo et al., 2017; Moslehi Roodi et al., 2020). پلت‌های تولیدشده در آن ۶۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند. تمامی آزمایش‌ها در محیط آزمایشگاه با دمای ۲۰ درجه سلسیوس و رطوبت ۳۷ درصد انجام شد. از چهار ماده هیومیک اسید، روغن کانولا، نشاسته ذرت و نانو سیلیس برای پوشش‌دهی سطح پلت‌ها به سه روش غوطه‌وری، پاششی و خلأ استفاده شد. مواد پوشش‌دهنده بر اساس: (۱) زیست‌تجزیه بودن آن‌ها، (۲) استفاده از مواد مختلف با ماهیت عدم انحلال در حلال-های آبی (نانو سیلیس)، پلی‌ساکاریدی (نشاسته)، تولید شده از مواد آلی کربنی (هیومیک)، دانه‌های روغنی و عدم اختلاط با آب (روغن کانولا) و (۳) در دسترس و مقرون‌به‌صرفه بودن آن‌ها انتخاب شدند. محلول ژلاتینه نشاسته از انحلال ۸ گرم نشاسته در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب (۸ درصد وزنی/حجمی) در دمای ۷۶ درجه سلسیوس تولید شد (Perez and Francois, 2016). روغن کانولا نیز در دمای ۶۰ درجه سلسیوس حرارت داده شد تا گرانیوی آن کاهش یابد و سپس مورد پاشش قرار گرفت. هیومیک اسید مایع با خلوص ۱۵-۱۲ درصد و نانو ذرات سیلیس کلونیدی به‌صورت سوسپانسیون در آب مقطر با pH قلیایی (۱۱-۱۲) و درصد وزنی کمتر از ۲۴/۵ درصد استفاده شد. بعد از پوشش‌دهی، پلت‌ها در آن دمای ۶۰ درجه سلسیوس تا ثابت شدن وزنشان خشک شدند و در بسته‌های پلاستیکی درب‌دار در مکان مناسب تا زمان انجام آزمون‌های ارزیابی نگهداری شدند. نمونه شاهد، پلت بدون پوشش‌دهی در نظر گرفته شد. طرح کلی مراحل انجام آزمایش در شکل (۱) نشان داده شده است.

بایوچار و بایندهای معدنی (بنتونیت و سپیولیت) به‌عنوان ماده پوشش‌دهنده کود اوره استفاده کردند و نتایج میکروسکوپی، اتصال نیتروژن اوره به سطح ذرات کامپوزیت بایوچار و مواد معدنی را نشان دادند. آزمایش‌های آب‌شویی ۳۰ روزه، به‌طور قابل توجهی آزادسازی نیتروژن به‌صورت آمونیوم (۷۰ درصد) و کربن آلی محلول (۸ درصد) را نسبت به کود اوره بدون پوشش کاهش داد (Shi et al., 2020). در تحقیقی دیگر از کود کمپوست سه‌گانه (نانو سیلیس، هیومیک اسید و آلجینات سدیم) با ساختار کروی در بررسی مکانیسم کندرهشی کود استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که کود تولیدی اثر مناسبی بر کندرهشی نیتروژن داشت و هیومیک اسید به‌دلیل خصوصیات ساختاری در محیط‌های قلیایی به‌صورت طبیعی آزاد و بهبود قابل توجهی در خاک‌های شور-قلیایی با کنترل pH خاک، تخلخل کل و ظرفیت نگهداری آب نشان داد (Niu et al., 2020). در بررسی میزان آزادسازی نیتروژن کودهای گرانول NPK، پژوهشگران اثر پنج نوع نشاسته (کاساوا، ذرت، ساگو، گندم و برنج گلوتینوس^۱) و کربوکسی متیل سلولز را به‌عنوان مواد پوششی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که نوع نشاسته بر میزان آزادسازی تأثیرگذار است و NPK پوشش داده شده با نشاسته ساگو نرخ آزادسازی آهسته‌تری نسبت به سایر مواد نشان داد (Himmah et al., 2018). همچنین پژوهشگران اثبات کردند که کود اوره پوشش داده شده با پلی-یورتان بر پایه روغن کرچک آزادسازی N₂O را بدون تأثیر بر عملکرد دانه ذرت کاهش داد (Bortoletto-Santos et al., 2020). با توجه به پیشینه تحقیق که در بالا مرور شد و ضرورت پوشش-دهی کودهای پلت کمپوست، این پژوهش با هدف بررسی و مقایسه تأثیر چهار ماده پوشش‌دهی (روغن کانولا، نانو سیلیس، هیومیک اسید و نشاسته ذرت) و سه روش پوشش‌دهی (غوطه‌وری، پاششی و خلأ) روی کود پلت کمپوست با پایه زیستی - کشاورزی برای اولین بار انجام شد و تأثیر آن بر زمان وارفتگی، جذب آب، جذب رطوبت، زاویه قطره آب بر سطح پلت‌ها با نمونه بدون پوشش بررسی شد. در نهایت بهترین روش پوشش‌دهی انتخاب و کودهای پلت شده با مواد مختلف پوشش‌دهی از نظر آزادسازی نیتروژن در محیط آب و خاک با نمونه شاهد مقایسه و نمونه برتر معرفی شد.

مواد و روش‌ها

مواد اولیه و فرآیند پلت‌سازی

مواد اولیه زیستی مورد استفاده در تولید کود پلت کمپوست از



شکل ۱- چکیده تصویری آماده‌سازی کود پلت کمپوست، روش‌ها و مواد پوشش‌دهی و ارزیابی خواص آن‌ها

روش‌های پوشش‌دهی

پوشش‌دهی غوطه‌وری^۱

در این روش، پلت‌ها داخل ظروف یکبار مصرف (۲۰۰ میلی‌لیتر) با سوراخ‌هایی در قاعده و بدنه ظرف جهت نفوذ سیال پوشش دهنده قرار گرفتند. پوشش‌دهی پلت‌ها با حرکت بالا و پایین ظروف یکبار مصرف داخل ظرف حاوی سیال پوشش‌دهی (حجم سیال ۱۰۰ میلی‌لیتر) به مدت ۳ ثانیه انجام شد. در پایان اجازه داده شد که مواد پوششی اضافی در سطح پلت‌ها خارج شود (Hashemi, 2013).

پوشش‌دهی پاششی^۲

در این روش، از یک تفنگ پاششی^۳ مجهز به نازل نوع فشار پایین (مدل Navite) متصل به پمپ باد با توان ۱/۵ کیلووات (مدل Stream) استفاده شد. فشار هوای پمپ ۶ بار ثابت و انتقال سیال پوششی (حجم سیال ۱۰۰ میلی‌لیتر) توسط لوله‌هایی با قطر ۶/۳۵ میلی‌متر از پمپ به نازل انجام شد. پاشش به صورت عمودی به سطح پلت‌ها انجام و برای جلوگیری از پرتاب شدن پلت‌ها در هنگام پاشش، پلت‌ها داخل توری فلزی محصور شدند.

پوشش‌دهی خلأ^۴ با محفظه اختلاط چرخان^۵

در این فرایند، ابتدا خلأ توسط پمپ ایجاد و سیال پوششی (حجم سیال ۱۰۰ میلی‌لیتر) به مدت یک دقیقه بر سطح پلت‌ها تزریق شد. سپس فشار اتمسفر به سیستم اعمال و سیال پوششی به داخل روزنه‌های ریز پلت وارد شد. در سامانه طراحی شده برای ایجاد خلأ با محفظه چرخان، از موتور پمپ پیستونی (Stream, China) شامل الکتروموتور تک فاز ۱/۵ کیلووات و دبی ۱۲۰ لیتر بر دقیقه برای ایجاد محیط خلأ توسط مکش پمپ باد پیستونی استفاده شد. با روشن شدن پمپ، عمل مکش از طریق لوله به

محفظه‌ای از جنس آلایژ آلومینیوم اعمال شد. کنترل مکش توسط شیر متصل به پمپ تنظیم و توسط یک لوله به محفظه منتقل شد. خلأ نسبی داخل محفظه تا حدود ۰/۳ بار ایجاد شد. به وسیله یک قیف به لوله‌ای با قطر یکسان (۱۲/۷ میلی‌متر) منتقل و در نقطه اتصال به مخزن از یک شیر برای کنترل جریان مواد پوششی استفاده شد. داخل محفظه و زیر شیر، اتصالات لوله و زانو به نحوی قرار گرفت تا چرخش در تمام زوایا برای جهت‌دهی به نازل (خروجی ۱ میلی‌متر از نوع ۱۸۰ درجه‌ای پلاستیکی) میسر شود. برای چرخش محفظه اختلاط از یک الکتروموتور سنکرون جریان متناوب با گیربکس داخلی (سرعت ۵ دور در دقیقه) استفاده شد. همچنین از اتصالات فلزی جهت نصب موتور به محفظه کاسه‌ای (قطر ۲۰۰ میلی‌متر و زاویه ۴۰ درجه جهت جلوگیری از پرتاب پلت‌ها به خارج از کاسه) استفاده شد و کاسه روی یک صفحه چوبی و پایه از جنس تسمه فلزی نصب گردید (شکل ۲).

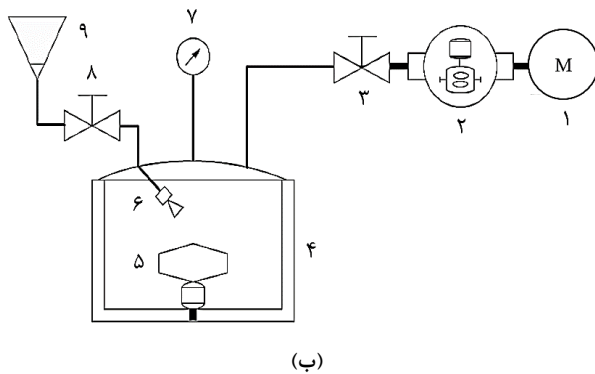
آنالیزهای ارزیابی خواص

تعیین زمان وارفتگی^۶ کود پلت کمپوست در آب

آزمون وارفتگی پلت‌ها در آب جهت تعیین میزان نفوذپذیری آب درون سطوح پوشش داده شده و میزان دوام پلت در شرایط مختلف استفاده می‌شود. این آزمون شاخصی جهت مقایسه نمونه‌ها در جذب آب، ترشوندگی و میزان چسبندگی مولکولی بافت ماده پوشش داده شده است. در این روش، نمونه‌ها در ظروف یکبار مصرف شفاف حاوی ۱۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر قرار گرفتند و در فواصل زمانی ۳۰ دقیقه نمونه‌ها بازدید و میزان وارفتگی به صورت بصری اندازه‌گیری شد (Hashemi, 2013).

4 Vacuum Coating
5 Pan Coating
6 Disintegrating

1 Dip Coating
2 Spray Coating
3 Spray Gun



(ب)

(الف)

شکل ۲- سامانه طراحی شده پوشش دهی در خلأ با محفظه اختلاط چرخان: (الف) تصویر واقعی، (ب) طرح‌واره سامانه طراحی شده.

(۱) الکتروموتور، (۲) پمپ خلأ، (۳) شیر خروج هوا، (۴) مخزن خلأ، (۵) طرف اختلاط چرخان، (۶) نازل پاششی، (۷) فشارسنج عقربه‌ای، (۸) شیر ورود ماده پوششی و (۹) کیف ورود ماده پوششی.

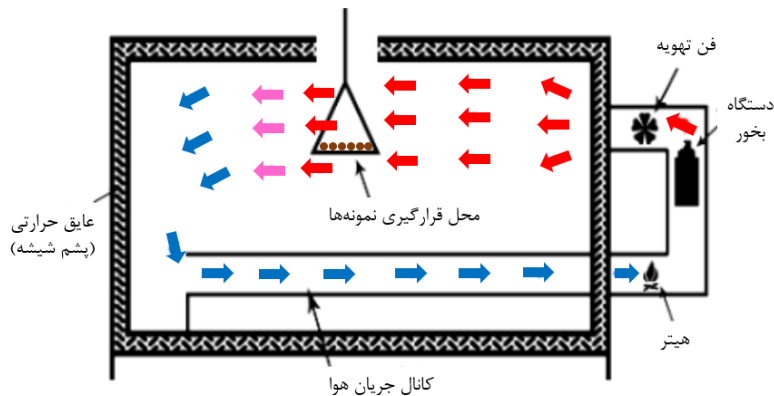
به مدت ۶ ساعت تا رسیدن سطح محتوای رطوبت جذب شده در ماده به حد اشباع با محیط ادامه یافت و در این مدت هر ۳۰ دقیقه نمونه‌ها از داخل دستگاه تولید بخار خارج و بلافاصله وزن شدند (شکل ۳). برای محاسبه رطوبت از جدول سایکومتري استفاده و با محاسبه دمای خشک و دمای تر درون محفظه محاسبات میزان رطوبت از جدول استخراج شد. اطلاعات حاصل به رایانه منتقل و داده‌های جذب رطوبت با استفاده از نرم افزار Expert Curve مطابق رابطه نمایی به دست آمده $(y = 3.8 \ln(x) - 2.9, R^2 = 0.84)$ و محتوای رطوبت لحظه‌ای مطابق رابطه ۱ محاسبه شد.

$$M = (M_i - M_f) \times e^{-kt} + M_f \quad (\text{رابطه ۱})$$

در این رابطه، M محتوای رطوبت لحظه‌ای پلت‌ها بر مبنای تر، M_i رطوبت اولیه پلت‌ها بر مبنای تر، M_f رطوبت نهایی پلت‌ها بر مبنای تر، t زمان بر حسب دقیقه و k ضریب جذب رطوبت است.

تعیین جذب رطوبت کود پلت کمپوست

برای انجام این آزمایش از دستگاه تولید بخار استفاده شد. ابتدا نمایشگرهای رطوبت و دما در مقادیر مورد نظر (دمای ۷۰ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۸۰ درصد) تنظیم شدند (Mcmullen et al., 2004). پس از رسیدن شرایط داخل محفظه به شرایط مورد نظر، پلت‌ها در ظرف‌های توری قرار گرفته و از قسمت بالایی دریچه آویزان شدند. وزن پلت‌ها به مدت ۲۴ ساعت با توجه به آزمایش‌های انجام شده (مدت زمانی که پلت‌ها به رطوبت تعادلی با محیط رسیدند)، هر ۳۰ دقیقه یکبار با ترازوی دقت بالا (۰/۰۰۱) اندازه‌گیری شد. به منظور جلوگیری از اتلاف دما و رطوبت، دریچه بالایی بعد از قرار دادن نمونه‌ها در دستگاه مسدود شد. بعد از رسیدن دما و رطوبت محفظه به میزان از پیش تعیین شده، نمایشگرها از طریق کنتاکتورها، دستور خاموش و روشن شدن فن، هیتر و دستگاه بخور را صادر کردند (شکل ۳). آزمایش



شکل ۳- طرح‌واره دستگاه تولید بخار و آزمون جذب رطوبت کود پلت کمپوست

سپس به آرامی (جهت جلوگیری از آسیب دیدن) درون ظرف حاوی آب مقطر (۱۰۰ میلی‌لیتر) قرار گرفتند. در محدوده زمانی

تعیین جذب آب کود پلت کمپوست

در این روش، پلت‌ها ابتدا با ترازوی دقت بالا (۰/۰۰۱) وزن و

زمان وارفتگی در آب با استفاده از روش کلدال اندازه‌گیری شدند. همچنین برای اندازه‌گیری میزان انتشار نیتروژن کود پلت کمپوست در خاک از روش کیسه دفن شده استفاده شد. پلت‌ها بعد از قرار گرفتن در کیسه‌های متخلخل مخصوص و بستن درب آن‌ها با دوخت حرارتی، در عمق ۱۰ سانتی‌متری خاک گلدان (لومی - سیلتی) قرار گرفتند. در روزهای مختلف (به مدت ۸ هفته) سه کیسه از خاک خارج و میزان آزادسازی نیتروژن با روش کلدال اندازه‌گیری شد. این کار تا زمانیکه ۷۵ درصد نیتروژن موجود در پلت‌ها آزاد شد، ادامه یافت (Chia et al., 2020; Sarlaki et al., 2021a, b).

طراحی آزمایش و تجزیه و تحلیل آماری

این پژوهش به صورت آزمایش چند عاملی^۳ با دو عامل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. اثر نوع ماده پوششی در چهار سطح (هیومیک اسید، روغن کانولا، نشاسته ذرت و نانو سیلیس) به عنوان عامل اول و اثر نوع پوشش‌دهی در سه سطح (غوطه‌وری، پاششی و خلأ) به عنوان عامل دوم مورد بررسی قرار گرفت. تجزیه و تحلیل داده‌ها با بکارگیری آنالیز واریانس (ANOVA) و آزمون مقایسه میانگین چند دامنه‌ای دانکن^۴ با نرم‌افزار سس (SAS, Ver 9) در سطح احتمال ۹۵ درصد انجام شد. نمودارها به کمک نرم‌افزار اکسل^۵ (۲۰۱۹) رسم گردید. مدل آماری آزمایش دو عاملی در رابطه ۴ نشان داده شده است (Ghorbani et al., 2017a, b).

$$Y_{ij} = \mu + A_i + B_j + AB_{ij} + e_{ij} \quad (\text{رابطه ۴})$$

در این رابطه، Y_{ij} مقدار عددی هر مشاهده، μ میانگین جامعه، A_i روش پوشش‌دهی (عامل اول)، B_j ماده پوشش‌دهی (عامل دوم)، AB_{ij} اثر متقابل دو عامل (A و B) و e_{ij} خطای آزمایشی است.

نتایج و بحث

بررسی آماری

نتایج حاصل از تجزیه واریانس اثر روش‌ها و مواد پوشش‌دهی کود پلت کمپوست بر صفات مورد بررسی در جدول (۱) گزارش شده است.

۳۰ دقیقه یکبار، پلت‌ها از آب خارج و بعد از جدا شدن قطرات آب از سطح پلت با ترازو وزن شدند. از رابطه ۲ برای اندازه‌گیری درصد جذب آب پلت‌ها مطابق استفاده گردید (Giroto et al., 2014).

(رابطه ۲)

$$\text{Water absorption (\%)} = \frac{(W_w - W_d)}{W_d} \times 100$$

در این رابطه، W_d وزن خشک پلت و W_w وزن مرطوب پلت است.

تعیین زاویه تماس قطره آب^۱ روی سطح کود پلت کمپوست وقتی تمایل مولکول‌های آب به خودشان کمتر از بستر آن‌ها باشد، سطح بستر کاملاً خیس می‌شود. ترشوندگی یک سطح جامد را می‌توان با اندازه‌گیری زاویه تماس قطره آب روی سطح اندازه‌گیری کرد که می‌تواند اطلاعات مفیدی از میزان آب‌دوستی و آب‌گریزی سطح در اختیار قرار دهد. در این آزمون از پلت‌های پوشش داده شده عکس‌برداری و زاویه توسط سنسور زاویه شیب و از قواعد مثلثاتی استخراج شد. سنسور زاویه قطره توسط یک دوربین ۸ مگاپیکسل با امکان فوکوس ماکرو (فاصله نزدیک) انجام شد. ابتدا هر پلت در جایگاه عکس‌برداری قرار گرفت و ۲ میکرولیتر آب مقطر دیونیزه شده با پیپت بر سطح پلت ریخته شد و تعداد زیادی عکس از لحظه افتادن تا جذب آب در سطح پلت گرفته شد. هنگامی که یک قطره مایع روی سطح جامد قرار می‌گیرد، تعادل بین تماس سه فاز مایع، جامد و گاز به وجود می‌آید. عکس لحظه چسبیدن قطره آب روی سطح پلت به عنوان عکس مرجع برای محاسبه زاویه انتخاب و محاسبه زاویه بر اساس معادله یانگ-لاپلاس^۲ مطابق رابطه ۳ انجام شد (Groenendijk, 2008; Hashemi, 2013).

$$\cos \theta_Y = \frac{(\gamma_{SV} - \gamma_{SL})}{\gamma_{VL}} \quad (\text{رابطه ۳})$$

در این رابطه، θ_Y زاویه تماس قطره با سطح، γ_{SV} ، γ_{SL} و γ_{VL} به ترتیب زوایای تماس جامد-گاز، جامد-مایع و مایع-گاز است.

تعیین آزادسازی نیتروژن کود پلت کمپوست در محیط آب و خاک

در این روش، مقدار نیتروژن کل نمونه‌های کود پلت کمپوست در

جدول ۱- تجزیه واریانس اثر روش‌ها و مواد پوشش‌دهی بر صفات پایداری کود پلت کمپوست

میانگین مربعات				درجه آزادی	منابع تغییرات
زاویه تماس قطره آب	جذب رطوبت محیط	جذب آب	زمان وارفتگی		
۸۲۸۲/۰۳**	۲۸۶/۴۳**	۱۰۲۴۱/۱۷**	۸۹۹۳۷۶/۹۲**	۴	ماده پوشش‌دهی
۴۹۵/۴۴**	۶۵/۱۷**	۷۳۰۲/۲۶**	۲۸۲۶۶۸۴/۷۵**	۲	روش پوشش‌دهی
۴۴/۷۷**	۱۳/۹۵**	۶۶۱/۸۷**	۱۸۵۸۲۷/۴۲**	۶	ماده پوشش‌دهی × روش پوشش‌دهی
۲/۶۴	۰/۲۹	۰/۵۴	۱۵/۹۲	۲۶	خطا
-	-	-	-	۳۸	کل
۱/۶۶	۴/۶۳	۰/۶۳	۰/۴۸	-	ضریب تغییرات

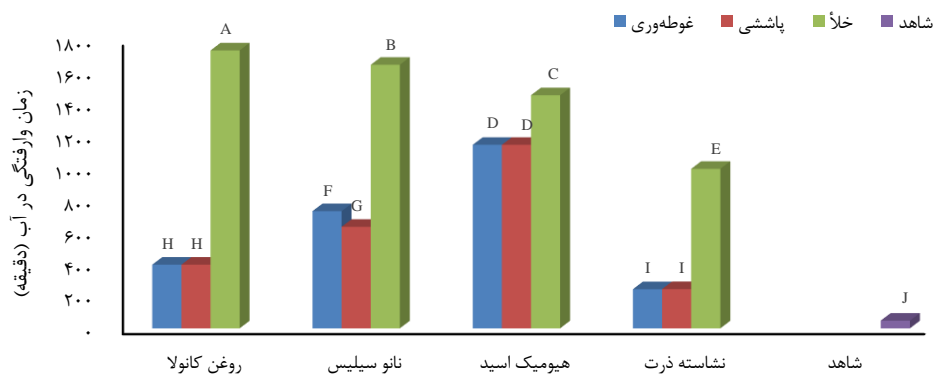
** معنی‌داری در سطح یک درصد

خلاً در بین سه روش پوشش‌دهی، بیشترین زمان وارفتگی پلت‌ها را به خود اختصاص داد و کود پلت کمپوست پوشش‌دهی شده با روغن کانولا - خلاً به‌عنوان بهترین کود پلت کمپوست پوشش‌دهی شده مقاومت بالاتری به وارفتگی نسبت به سایر پلت‌ها از خود نشان داد؛ دلیل آن را می‌توان اینگونه بیان داشت که روش خلاً با محفظه چرخان به‌دلیل نفوذ بهتر ماده پوششی داخل روزه‌های پلت و ایجاد لایه پوششی یکنواخت‌تر در پیرامون سطح پلت با روغن کانولا که دارای ماهیت آبگریز و اختلاط کم با آب است، توانست مقاومت بیشتری در برابر نفوذ آب و وارفتگی نشان دهد و با ۱۷۳۵ دقیقه مقاومت در برابر وارفتگی باعث بهبود زمان وارفتگی در آب به میزان ۳۶ برابر نسبت به نمونه شاهد (۴۸ دقیقه) شد.

بر طبق نتایج تجزیه واریانس در سطوح اثرات ساده روش و ماده پوشش‌دهی و برهمکنش آن‌ها برای هر چهار صفت مورد ارزیابی (زمان وارفتگی، جذب آب، جذب رطوبت و زاویه تماس قطره روی سطح پلت) اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد ($P < 0.01$) مشاهده شد (جدول ۱) که در ادامه اثرات برهمکنش سطوح روش و ماده پوشش‌دهی برای تمام صفات به‌طور جداگانه بررسی و بحث می‌شود.

بررسی وارفتگی کود پلت کمپوست در آب

در بررسی برهمکنش اثر روش و ماده پوشش‌دهی، تقریباً روند ثابتی بین روش‌های پوشش‌دهی مشاهده شد. در تمام پلت‌های پوشش‌دهی شده، افزایش معنی‌داری ($P < 0.01$) در زمان وارفتگی پلت‌ها نسبت به نمونه شاهد مشاهده شد (شکل ۴). روش



شکل ۴- برهمکنش اثرات نوع ماده و روش پوشش‌دهی بر زمان وارفتگی کود پلت کمپوست در آب (میانگین‌هایی با حداقل یک حرف مشترک دارای عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن)

طریق مواد پوششی شروع به نفوذ می‌کند و پس از نفوذ به قسمت مرکزی گرانول کود، آزاد شدن تدریجی مواد مغذی صورت می‌گیرد. پس از آن، به‌دلیل افزایش تدریجی فشار اسمزی در هسته کود، پوشش روی کود شروع به تورم کرده و بسته به فشار اسمزی منجر به ایجاد دو مکانیسم می‌شود: اگر مقدار فشار اسمزی ایجاد شده در هسته، مقاومت ایجاد شده توسط مواد پوششی را شکست دهد، پوشش مواد شروع به ترک خوردن کرده و کل ماده مغذی به‌سرعت از گرانول کود آزاد می‌شود که از آن به‌عنوان "مکانیسم

بسیاری از مطالعات قبلی نشان می‌دهد که مواد مورد استفاده برای پوشش باید از خواص متوسطی بین آب‌گریزی و آب‌دوستی برخوردار باشند. این خواص اجازه می‌دهد تا حدودی آب داخل سطح پوشش داده شده وارد و منجر به آزادسازی تدریجی مواد مغذی کود شود (Chen et al., 2010; Beig et al., 2020). روند آزادسازی مواد مغذی کودهای کندرهش اصولاً از مرز کود-پوشش به مرز پوشش-خاک/آب صورت می‌گیرد. هنگامی که کود پوشش داده شده داخل آب قرار می‌گیرد، آب از

ماندگاری پلت پوشش‌دهی شده با هیومیک اسید را به نامحلول بودن بخش ناخالص آن نسبت داد که به پوشش خاصیت آبگریزی می‌دهد. از طرفی در شکل (۴) مشخص است روش خلأ در تمامی مواد پوشش‌دهی از جمله نشاسته و هیومیک اسید باعث افزایش زمان وارفتگی پلت نسبت به دو روش غوطه‌وری و پاششی شده است؛ می‌توان استدلال کرد در روش خلأ به دلیل نفوذ سیال پوشش‌دهنده (تحت فشار بالا) به داخل حفرات ریز پلت، مواد پوششی تا حدودی از دسترس سطحی آب خارج شده و واکنش شیمیایی بین ماده پوشش‌دهنده و کود پلت کمپوست اتفاق افتاده باشد؛ بطوریکه نشاسته و هیومیک اسید که به‌عنوان بایندر در فرآیند پلت‌سازی نیز استفاده می‌شوند، در اینجا نیز نقش بایندر را تا حدودی ایفا و باعث افزایش زمان وارفتگی پلت در آب شدند.

بررسی جذب آب کود پلت کمپوست

بررسی برهمکنش اثر روش و ماده پوشش‌دهی بر بیشترین میزان جذب آب پلت‌ها نشان داد که تمامی نمونه‌های پوشش‌داده شده بطور معنی‌داری ($P < 0/01$) جذب آب کمتری نسبت به نمونه شاهد داشتند. مطابق شکل (۵) روند مشابهی بین روش‌های پوشش‌دهی در جذب آب مشاهده شد؛ بطوریکه در تمام مواد پوششی، کمترین و بیشترین جذب آب به ترتیب در روش خلأ و پاششی اندازه‌گیری شد؛ دلیل جذب آب بالاتر روش پاششی نسبت به دو روش دیگر را می‌توان به احتمال عدم پاشش یکسان و یکنواخت مواد پوششی پیرامون سطح پلت‌ها محصور در توری فلزی نسبت داد. همچنین در مواد پوشش‌دهی کمترین جذب آب به ترتیب در ماده روغن کانولا، نانو سیلیس، هیومیک اسید و نشاسته ذرت اندازه‌گیری شد. بیشترین جذب آب توسط پلت شاهد (۲۱۱/۷ درصد) و کمترین جذب آب در کود پلت کمپوست پوشش‌دهی شده با روغن کانولا - خلأ (۵۷/۶ درصد) مشاهده شد که منجر به کاهش ۳/۷ برابری جذب آب نسبت به نمونه شاهد گردید.

شکست^۱ یا "رهاسازی فاجعه‌بار"^۲ یاد می‌شود. با این حال، اگر مقاومت پوشش به اندازه کافی قوی باشد تا بتواند فشار اسمزی ایجاد شده را تحمل کند، با پیروی از پدیده انتشار که در آن نیرویی (غلظت، اختلاف فشار یا هر دو) که کل فرآیند را به حرکت در می‌آورد، باعث آزادسازی مواد مغذی کود به‌صورت آهسته می‌شود که این فرآیند به‌عنوان "مکانیسم انتشار"^۳ شناخته می‌شود (Liu et al., 2008).

نانوسیسیس و روغن کانولا با دارا بودن ماهیت آب‌گریزی باعث افزایش زمان وارفتگی پلت در آب شدند (Hashemi, 2013; Liu et al., 2020). افزایش زمان وارفتگی پلت با پوشش نشاسته را می‌توان به ژلاتینه شدن نشاسته با اعمال حرارت و ماهیت چسبندگی آن نسبت داد که بلافاصله بعد از پوشش‌دهی در آنون خشک و با کاهش انحلال نشاسته در آب، باعث افزایش زمان وارفتگی پلت شد (Himmah et al., 2018). از آنجایی که هیومیک اسید یک پلی‌الکترولیت ضعیف است، آن‌ها می‌توانند در آب به‌صورت مولکول‌های حل شده و به‌شکل تفکیک‌شده وجود داشته باشند. جزء نامحلول نیز با محیط از طریق سطح واکنش می‌دهد و به‌عنوان یک تبادلگر یونی با آزاد کردن یونهای H^+ در محلول عمل می‌کند؛ درحالی‌که آنیون‌ها به‌صورت نامحلول باقی می‌مانند. بنابراین، نامحلول بودن مولکول‌های هیومیک اسید در آب بیشتر از جامدهای محلول ناچیز، رایج است؛ زیرا هیومیک اسید یک ترکیب ساده نیست بلکه یک ترکیب مخلوط است که تنها قسمتی از آن در آب حل می‌شود (sarlaki et al., 2016). در واقع، هیومیک اسیدها با خلوص بالا در آب انحلال‌پذیرند و با کاهش خلوص از میزان انحلال‌پذیری آن‌ها در آب کاسته می‌شود. هیومیک اسید مورد استفاده در پژوهش حاضر دارای خلوص ۱۵-۱۲ درصد و pH قلیایی (۱۱-۱۲) است که باعث تقویت آب‌گریزی بخش ناخالص آن می‌شود. در نتیجه می‌توان افزایش زمان

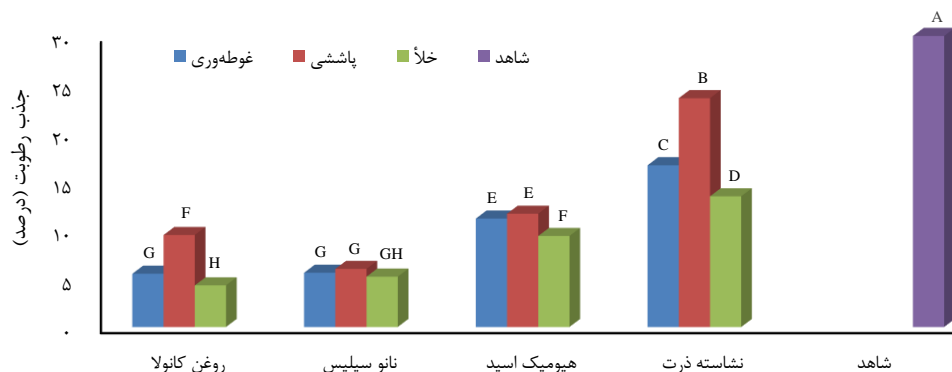


شکل ۵- برهمکنش اثرات نوع ماده و روش پوشش‌دهی بر جذب آب از کود پلت کمپوست (میانگین‌هایی با حداقل یک حرف مشترک دارای عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن)

بررسی جذب رطوبت کود پلت کمپوست

نتایج برهمکنش اثر روش و ماده پوشش‌دهی بر میزان جذب رطوبت پلت‌ها، یک روند مشابه با نتایج وارفتگی و جذب آب نشان داد (شکل ۶). در تمامی نمونه‌های مورد آزمایش جذب رطوبت کمتری نسبت به نمونه شاهد مشاهده شد. روش‌های پوشش‌دهی خلأ، غوطه‌وری و پاششی به ترتیب کمترین جذب رطوبت را در تمام مواد پوششی نشان دادند. روش خلأ به دلیل نفوذ بیشتر سیال پوشش‌دهی در سطوح متخلخل، پوشش‌دهی یکسان، یکنواخت و در تمام جهات نسبت به دو روش غوطه‌وری و پاششی برتری نشان داد. بیشترین و کمترین جذب رطوبت به ترتیب در نمونه شاهد (۳۰ درصد) و نمونه روغن کانولا - خلأ (۴/۳ درصد) مشاهده شد؛ بطوریکه کود پلت کمپوست پوشش‌دهی شده با روغن کانولا - خلأ باعث کاهش ۷ برابری جذب رطوبت نسبت به نمونه شاهد گردید (شکل ۶).

نتایج مربوط به کاهش جذب آب کود پلت کمپوست پوشش‌دهی شده با روغن کانولا - خلأ با نتایج مربوط به زمان وارفتگی در تطابق است (شکل ۴)، چندین پژوهش نشان دادند که پوشش‌دهی کودها با روغن گیاهی باعث کاهش جذب آب نسبت به نمونه بدون پوشش می‌شود (Hashemi *et al.*, 2013; Lawrenca *et al.*, 2021). از جمله محققان در مطالعه‌ای کود اوره را با پلی‌یورتان بر پایه روغن سویا پوشش‌دادند و دریافتند که شاخص ایزوسیانات استفاده شده بر ریخت‌شناسی، تراکم اتصالات عرضی، جذب آب و میزان آزادسازی مواد مغذی تأثیرگذار است؛ از طرفی شاخص ایزوسیانات بالاتر منجر به افزایش درجه اتصال متقابل و کاهش جذب آب شد که کاهش شیب غلظت و سرعت آزادسازی را به دنبال داشت (Dong Feng *et al.*, 2019).



شکل ۶- برهمکنش اثرات نوع ماده و روش پوشش‌دهی بر جذب رطوبت از کود پلت کمپوست (میانگین‌هایی با حداقل یک حرف مشترک دارای عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن)

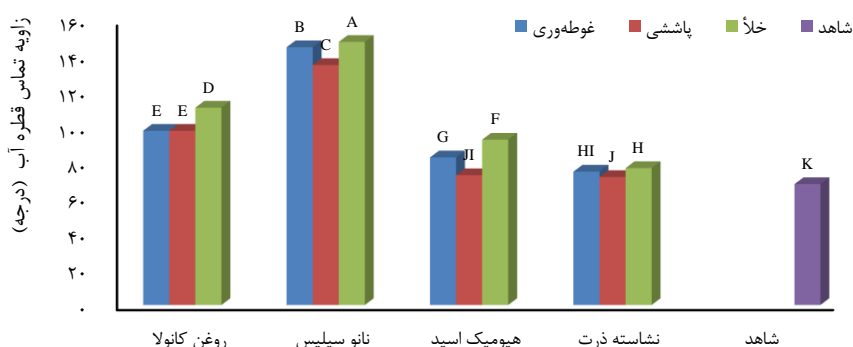
بررسی زاویه تماس قطره با سطح کود پلت کمپوست

نتایج برهمکنش اثر روش و ماده پوشش‌دهی بر زاویه تماس قطره آب بر سطح پلت‌ها نشان داد که کمترین زاویه تماس مربوط به کود پلت کمپوست پوشش‌دهی شده با نانو سیلیس - خلأ و بعد از آن در نمونه روغن کانولا - خلأ است که اختلاف معنی‌داری ($P > 0.01$) با نمونه شاهد داشتند (شکل ۷). دو عامل مهم که بر میزان خیسگی و ترشوندگی سطح تأثیر می‌گذارد، زبری و انرژی سطح است. برای آبریزی بالاتر، ایجاد زبری روی سطح بستر لازم است (Michael and Bhushan, 2007). با بزرگتر شدن زاویه تماس، سطح آبریزتر می‌شود. بدین ترتیب که سطوح با زاویه تماس بزرگتر از ۹۰ درجه باعث آبریزی و کوچکتر از ۹۰ درجه منجر به آب‌دوستی سطح می‌شوند. همچنین سطوح فوق آبریز زاویه تماس بزرگتر از ۱۵۰ درجه دارند (Roach *et al.*, 2008). بر اساس نتایج ارزنده زاویه تماس قطره آب با سطوح پلت‌های پوشش‌دهی شده در پژوهش حاضر، سطح کود پلت کمپوست

مطالعات زیادی کاهش جذب رطوبت در اثر اعمال مواد مختلف پوششی در سطح کودها را گزارش کردند (Rychter *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2020) هنگامی که آب جذب ماده می‌شود، حجم، چسبندگی و سایر خصوصیات ماده جاذب را از نظر فیزیکی تغییر می‌دهد. به عنوان مثال، جذب رطوبت از محیط مرطوب در طول دوره انبارداری پلت‌ها می‌تواند منجر به تورم، رشد کپک و پوسیدگی شود. در پژوهشی از روغن کانولا برای پوشش‌دهی پلت‌های چوبی استفاده و میزان جذب رطوبت را اندازه‌گیری کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که جذب رطوبت از ۱۶ درصد به ۷ درصد بعد پوشش‌دهی کاهش یافت (Hashemi, 2013). از نتایج تحقیق حاضر می‌توان استنباط کرد که با کاهش قابل ملاحظه ($P > 0.01$) جذب رطوبت پلت‌های پوشش‌دهی شده نسبت به نمونه بدون پوشش، می‌توان انتظار داشت که مشکلات مربوط به انبارداری و جذب رطوبت کود پلت کمپوست پوشش‌دهی شده تا حدودی زیادی مرتفع شود.

شاهد (زاویه ۶۸ درجه) آب‌دوست، سطح کود پلت کمپوست پوشش‌دهی شده با روغن کانولا-خلأ (۱۱۱ درجه) آب‌گریز و

سطح کود پلت کمپوست پوشش‌دهی شده با نانو سیلیس-خلأ (زاویه ۱۴۸ درجه) تقریباً فوق آب‌گریز شده است.



شکل ۷- برهمکنش اثرات نوع ماده و روش پوشش‌دهی بر زاویه تماس قطره آب بر سطح کود پلت کمپوست (میانگین‌هایی با حداقل یک حرف مشترک دارای عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن)

مطابق شکل (۷) ماده نانو سیلیس کمترین زاویه تماس قطره آب با سطح پلت را داشت؛ به‌طور کلی مواد پوششی نانو به‌دلیل ماهیتشان باعث کاهش زاویه تماس قطره آب با سطح پوشش داده شده (بستر) می‌شوند که دلیل آن را می‌توان مطابق نتایج محققان کاهش میزان تخلخل و اندازه منافذ بیان کرد که موجب کاهش ترشوندگی و خیزی بستر مواد پوشیده شده با نانو سیلیس است. در مطالعه‌ای از نانو گرته سیلیس (عامل ضخیم-کننده) به‌عنوان ماده پوششی کود اوره استفاده کردند و نتایج آن‌ها کاهش تخلخل و اندازه منافذ را با کاهش سرعت آزادسازی مواد مغذی نشان داد (Liu et al., 2020). در پژوهشی دیگر، از پلی‌یورتن مشتق شده از کاه گندم مایع برای پوشش‌دهی کود و ارگانوسیلیسیم و نانو سیلیس نیز برای افزایش زبری بستر در مقیاس نانو و فوق آب‌گریز کردن سطح استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که خصوصیات آزادسازی مواد مغذی کود پوشش داده شده در مقایسه با کود بدون پوشش، به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت. آن‌ها دلیل این پدیده را اینگونه بیان کردند که زبری سطح در مقیاس نانو از تماس آب با ماده پوششی جلوگیری کرده و نانو ذرات موجود در سطح، حفره‌های ریز موجود در پوشش را مسدود و با کاهش ورود آب، موجب بهبود خصوصیات کند-رهشی کود شدند (Zhang et al., 2017). نتایج پژوهش حاضر نشان داد که بعد از ماده نانو سیلیس، روغن کانولا و روغن خلأ با کمترین زاویه تماس قطره آب روی سطح، نتایج حاصل از سه آزمون قبلی (زمان وارفتگی، جذب آب و رطوبت) را تأیید کرد (شکل ۷-۴). نتایج محققان در استفاده از روغن کانولا برای پوشش‌دهی پلت‌های چوبی نیز منجر به افزایش زاویه تماس سطح از ۷۱/۹ درجه به ۸۵/۲ درجه شد که با نتایج پژوهش حاضر در تطابق است. آن‌ها دلیل افزایش آب‌گریزی را به کاهش تخلخل

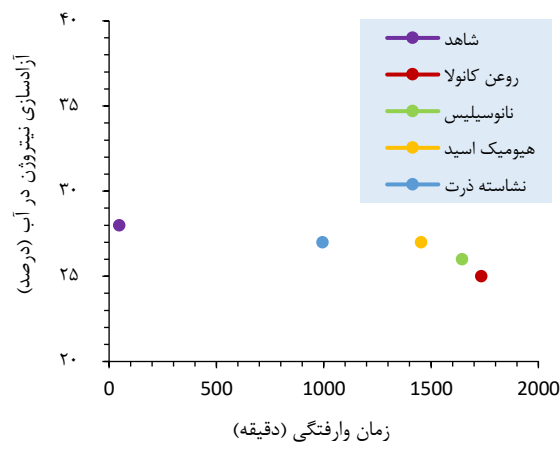
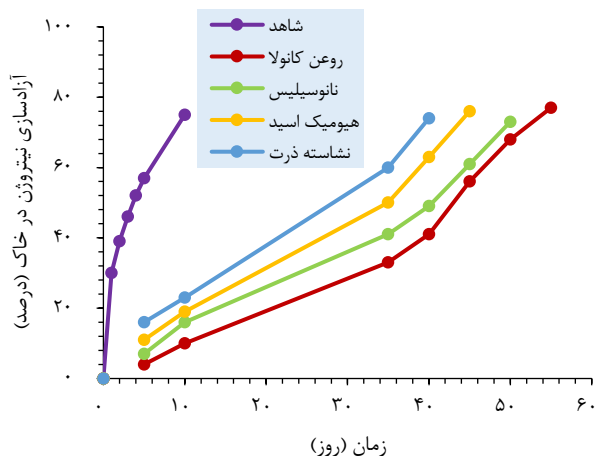
سطح از ۲۴/۵ درصد به ۹/۸ درصد به‌دلیل پوشش‌دهی با روغن کانولا نسبت دادند (Hashemi, 2013).

به‌طور کلی، مقایسه نتایج جذب آب و جذب رطوبت کود پلت کمپوست پوشش‌دهی شده نشان می‌دهد که روند تقریباً مشابهی در جذب آب و رطوبت بین سه روش پوشش‌دهی وجود دارد (شکل ۵ و ۶) و انتظار می‌رود هر چه جذب آب و رطوبت بیشتر باشد، زمان وارفتگی نیز کاهش یابد؛ اما در حقیقت عوامل دیگری نیز وجود دارد که در وارفتگی پلت‌ها تأثیرگذارند. برای مثال ممکن است میزان نفوذپذیری (جذب رطوبت و آب) به داخل پوشش زیاد باشد ولی پوشش از میزان چسبندگی مولکولی، دوام و پایداری بالایی نسبت به وارفتگی و از هم‌پاشیدگی در آب برخوردار باشد. به همین جهت با وجود مشاهده معنی‌داری در میزان جذب آب بین دو روش پاششی و غوطه‌وری، در زمان وارفتگی دو روش تقریباً اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد (شکل ۴)؛ این احتمال نیز وجود دارد که در روش پاششی مواد به‌طور یکنواخت در سرتاسر پلت پاشش نشده باشند؛ ولی در روش غوطه‌وری به‌دلیل اینکه مواد به‌طور کامل درون ظرف حاوی سیال پوششی فرو برده می‌شوند، پوشش کامل‌تر و یکنواخت‌تری در سطح پلت ایجاد شده باشد که باعث افزایش دوام و استحکام پوشش در برابر آب باشد. نتایج زاویه تماس قطره آب بر سطح پلت نیز نشان می‌دهد که بین دو روش پاششی و غوطه‌وری یا اختلاف معنی‌داری نیست و یا روش پاششی زاویه تماس کمتری نسبت به روش غوطه‌وری دارد، که با نتایج زمان وارفتگی در تطابق بیشتری است (شکل ۴ و ۷).

بررسی آزادسازی نیتروژن کود پلت کمپوست در محیط آب با توجه به نتایج حاصل از چهار اندازه‌گیری زمان وارفتگی، جذب

نظر نرخ آزادسازی نیتروژن در محیط آب و خاک بررسی و با نمونه شاهد مقایسه شد (شکل ۸).

آب، جذب رطوبت محیط و زاویه تماس قطره آب روی سطح کود پلت کمپوست پوشش‌دهی شده، روش خلأ به‌عنوان روش برتر در تمام اندازه‌گیری‌ها انتخاب شد و با مواد مختلف پوشش‌دهی از



شکل ۸- روند آزادسازی نیتروژن از کود پلت کمپوست پوشش‌دهی شده با مواد مختلف به روش خلأ: الف) محیط آب و ب) محیط خاک

نمونه برتر این آزمایش به مدت ۴۵ روز دسترسی به محتوای نیتروژن را نسبت به نمونه بدون پوشش افزایش داد که انتظار می‌رود عناصر مغذی کود به مدت طولانی‌تری در دسترس گیاه قرار گیرد (Amiri et al., 2012). چندین مقاله به مطالعه مواد پوششی پلیمری بر پایه روغن گیاهی پرداختند. از جمله در پژوهشی از پلیمر پوششی دو لایه با استفاده از پلی‌یورتن بر پایه ذرت به‌عنوان لایه داخلی و فوق جاذب کنجاله پر مرغ به‌عنوان لایه بیرونی برای کود اوره استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که هیدروژل هیچ تأثیری در آزادسازی اوره نداشت و فقط باعث بهبود نگهداری آب در خاک شد و میزان آزادسازی توسط ضخامت پوشش لایه داخلی کنترل شد. در نهایت روش پوشش-دهی آن‌ها آزادسازی ۷۵ درصد محتوای نیتروژن را در مدت ۳۵ روز نشان داد (Yang et al., 2013).

در مطالعه‌ای دیگر، اثر پوشش‌های پلی‌یورتن بر پایه روغن سویا و کرچک را با نسبت ۲/۵ درصد (۲۵ گرم رزین بر کیلوگرم اوره) روی سطح گرانول‌های کود اوره بررسی کردند و دریافتند که پوشش بر پایه روغن کرچک چسبندگی بهتری روی سطح اوره ایجاد کرد و منجر به مدت زمان طولانی‌تری رها شد؛ به‌طوری که پوشش ۷/۵ درصدی سویا و ۵ درصدی کرچک در مدت ۴۰ روز منجر به آزادسازی کامل کود اوره شد (Bortoletto-Santos et al., 2016).

مقدار آزادسازی نیتروژن کود پلت کمپوست در محیط آب نشان می‌دهد که در لحظه وارفنگی حدود ۲۵-۲۸ درصد نیتروژن کل نمونه‌های بدون پوشش و پوشش‌دهی شده با مواد مختلف به روش خلأ در محیط آب آزاد شد (شکل ۸الف). نمودار تجمعی درصد آزادسازی نیتروژن در محیط خاک نیز نشان می‌دهد که ۷۵ درصد نیتروژن نمونه شاهد تنها به مدت ۱۰ روز در محیط خاک منتشر شد؛ در حالیکه کود پلت پوشش‌دهی شده با روغن کانولا، نانوسیلیس، هیومیک اسید و نشاسته ذرت به روش خلأ توانستند در حدود ۷۵ درصد نیتروژن خود را به ترتیب در مدت ۵۵، ۵۰، ۴۵ و ۴۰ روز در محیط خاک آزاد کنند (شکل ۸ب). همچنین مقایسه نتایج ۴ صفت مورد بررسی (زمان وارفنگی، جذب آب، جذب رطوبت، زاویه تماس قطره آب) با روند آزادسازی نیتروژن در آب و خاک نشان داد که یک روند منطقی بین نتایج برقرار است و یکدیگر را تأیید می‌کنند. کمیسیون استاندارد اروپا (CEN) معیارهایی را برای کودهای کندرهش ارائه داده است؛ به گونه‌ای که: (۱) میزان آزادسازی مواد مغذی باید کندتر از کود معمولی باشد، (۲) بیش از ۱۵ درصد مواد مغذی در طول ۲۴ ساعت آزاد نشوند و (۳) حداقل ۷۵ درصد مواد مغذی در طول ۲۸ روز آزاد شوند (Trenkel, 2010). نتایج تحقیق حاضر نشان داد که روش‌های پوشش‌دهی و نرخ آزادسازی نیتروژن از استاندارد CEN پیروی کرده و کود پلت کمپوست را کندرهش کرده است. کود پلت کمپوست پوشش‌دهی شده با روغن کانولا - خلأ به‌عنوان

۴۰-۲۰ درصد آن به کود مرغی و ۷۵ درصد آن به کود دامی نسبت داده شد. همچنین گزارش کردند که فرآیند پلت‌سازی، مقدار نیتروژن معدنی کودها را به سرعت افزایش داده و غلظت یون آمونیوم بالاتری در خاک ایجاد می‌کند؛ بطوریکه میزان نیتروژن محلول کل و آمونیومی در محیط آب و نیتروژن معدنی پلت‌ها در محیط خاک نسبت به نمونه پلت نشده به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (Hadas *et al.*, 1983).

مقایسه نتایج پژوهش حاضر با مطالعات پیشین نشان می‌دهد که کود پلت کمپوست بدون پوشش در پژوهش حاضر به دلیل اینکه هیچ‌گونه بایندری (نشاسته، اوره و ...) به آن اضافه نشده است، در مدت زمان کوتاهی در آب دچار وارفتگی شد. از طرفی نرخ آزادسازی سریع نیتروژن کود پلت کمپوست بدون پوشش در آب و خاک را می‌توان با استناد به نتایج Hadas *et al.* 1983، به افزایش معدنی شدن و انحلال‌سازی نیتروژن در اثر پلت‌سازی نسبت داد؛ در حالیکه فرآیند پوشش‌دهی زیستی کود پلت کمپوست، باعث کنترل نرخ آزادسازی نیتروژن در آب و خاک در مدت زمان طولانی‌تری شد.

نتیجه‌گیری

پلت‌سازی و پوشش‌دهی کود کمپوست زیستی - کشاورزی با ایجاد ساختارهای متراکم و افزایش مقاومت و پایداری کود در برابر عوامل محیطی منجر به کاهش زمان وارفتگی، جذب آب، جذب رطوبت محیط افزایش آب‌گریزی سطح پلت‌ها می‌شوند و بدین ترتیب نقش اساسی و مهمی در الگوی آزادسازی مواد مغذی کودها از جمله نیتروژن ایفا می‌کنند. استفاده از کود کمپوست زیستی - کشاورزی و پوشش‌های زیست‌تجزیه‌پذیر راهکاری مناسب برای کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی، بهبود کارایی استفاده از کود، کاهش دفعات استفاده در خاک و افزایش عملکرد محصول با کیفیت بالاست. در این پژوهش کود پلت کمپوست (ترکیب پسماندهای جامد کود مرغی، کود گاوی و بقایای گیاهی) با دستگاه اکسترودر پیچی تولید شد و اثر چهار ماده پوشش‌دهنده (هیومیک اسید، روغن کانولا، نشاسته ذرت و نانوسیلیس) و سه روش پوشش‌دهی (غوطه‌وری، پاشش و خلأ) بر تغییرات ساختاری کود بررسی شد. نتایج نشان داد که کود پلت پوشش‌دهی شده با روغن کانولا - خلأ به‌عنوان نمونه برتر باعث بهبود قابل ملاحظه ۳۶، ۳۷/۳ و ۷/۱۶ برابری به‌ترتیب در زمان وارفتگی، جذب آب، جذب رطوبت از محیط و زاویه تماس قطره نسبت به نمونه شاهد شد. همچنین نرخ آزادسازی نیتروژن را به مدت ۴۵ روز نسبت به نمونه شاهد افزایش داد که منجر به پایداری و کندر شدن کود شد و انتظار می‌رود عناصر غذایی کود به مدت طولانی‌تری در دسترس گیاه قرار گیرد.

در پژوهشی، اثر ترکیب کمپوست باگاس نیشکر در پلت‌سازی کود اوره (نسبت ۱:۱ درصد وزنی) را بر نرخ آزادسازی نیتروژن بررسی کردند و دریافتند که پلت‌سازی و ترکیب کود اوره با کمپوست موجب بهبودی نرخ آزادسازی نیتروژن شد؛ بطوریکه ۶۱ درصد نیتروژن به مدت پنج روز در محیط آب آزاد شد؛ در حالیکه آزادسازی ۸۰ درصد نیتروژن پلت درون خاک ۹۸ روز به طول انجامید (Sarlaki *et al.*, 2021b).

محققان از مخلوط کود مرغی - اوره (نسبت ۱:۲) و خمیر نشاسته به عنوان چسب برای تولید پلت و گرانول استفاده و میزان آزادسازی نیتروژن در محیط آب را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که پلت‌ها بعد از ۱۰ روز تمام محتوای مواد مغذی خود را در محیط آب آزاد کردند؛ در حالیکه گرانول‌ها زمان آزادسازی کمتری نشان دادند. آن‌ها دلیل این پدیده را مکانیسم فشرده‌سازی کودها با دستگاه اکسترودر دانستند که قابلیت تولید کود با شکل و اندازه یکنواخت‌تر، سرعت و تراکم بیشتر پلت‌ها نسبت به گرانول‌ها را فراهم می‌کند و می‌تواند در نرخ آزادسازی مواد مغذی کود مؤثر باشد (Purnomo *et al.*, 2017). همچنین در بررسی نرخ آزادسازی نیتروژن پلت کود اوره - گاوی (نسبت ۱:۱)، پژوهشگران اثر تغییرات محتوای آب خاک لومی - سیلتی را بر روند آزادسازی نیتروژن پلت کود بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که بعد از ۱۶ هفته، به ترتیب ۵۶، ۳۶ و ۱۴ درصد نیتروژن در محتوای آب ۹۰، ۷۵ و ۶۰ درصدی خاک به‌دست آمد؛ که نشان از کاهش نرخ آزادسازی مواد مغذی با کاهش محتوای آب خاک داشت (Souri *et al.*, 2019).

پژوهشگران، از فرمولاسیون کود اوره پوشش‌دهی شده با نانوکامپوزیت پلیمری نشاسته با حضور نانو ذرات بیوچار و تأثیر آن بر نرخ آزادسازی نیتروژن در آب و خاک استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که ۷۰ درصد نیتروژن در طول ۲۱ روز در محیط آب آزاد شد. همچنین، میزان آب‌سویی نیتروژن در خاک در حدود ۹۲ درصد نسبت به نمونه شاهد (اوره خالص) کاهش یافت (Salimi *et al.*, 2020). همچنین گزارش کردند که میزان رهاسازی نیتروژن در پوشش پلیمری نشاسته با نانو ذرات بیوچار بعد ۲۱ روز در خاک با pH ۲-۱۰ به میزان ۱۳/۴۵-۵۲/۱۸ درصد بیشتر نسبت به نمونه بدن نانوذرات بیوچار بود (Salimi *et al.*, 2021).

در پژوهشی دیگر، محققان نرخ آزادسازی نیتروژن ترکیب کود مرغی (۲۵ درصد) و کود دامی (۷۵ درصد) قبل و بعد پلت‌سازی را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که بعد از یک ساعت، در حدود ۳۰ درصد نیتروژن پلت‌ها در محیط آب آزاد شد. هم‌چنین در محیط خاک نیتروژن معدنی (یون‌های آمونیوم و نیترات) در طول یک هفته به سرعت آزادسازی شد که در حدود

"هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Alexandratos, N. and Bruinsma, J. (2012). World Agriculture towards 2030/2050: The 2012 Revision. ESA Working Paper No. 12-03. FAO, Rome.
- Amiri, H., Arabhosseini, A. and Kianmehr, M.H. (2012). Determination of some rheological properties of cow manure using a shear vane. *Egyptian Academic Journal of Biological Sciences B Zoology*. 4(1), 59-68.
- Amiri, H., Kianmehr, M.H., Arabhosseini, A. and Keshvari, N. (2013). Optimum moisture content of compost for fertilizer pellets produced using an extruding device. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 13(4), 75-88. (In Farsi)
- Azeem, B., KuShaari, K., Man, Z.B., Basit, A. and Thanh, T.H. (2014). Review on materials & methods to produce controlled release coated urea fertilizer. *Journal of Controlled Release*. 181, 11-21.
- Beig, B., Niazi, M.B.K., Jahan, Z., Hussain, A., Zia, M.H. and Mehran, M.T. (2020). Coating materials for slow release of nitrogen from urea fertilizer: A review. *Journal of Plant Nutrition*. 43, 1510-1533.
- Blouin, G.M. (1967). Method of making sulfur-coated fertilizer pallet having a controlled dissolution rate, Google Patents.
- Bortoletto-Santos, R., Cavigelli, M.A., Montes, S.E., Schomberg, H.H., Le, A., Thompson, A.I., Kramer, M., Polito, W.L. and Ribeiro, C. (2020). Oil-based polyurethane-coated urea reduces nitrous oxide emissions in a corn field in a Maryland loamy sand soil. *Journal of Cleaner Production*. 249, 119329.
- Bortoletto-Santos, R., Ribeiro, C. and Polito, W.L. (2016). Controlled release of nitrogen-source fertilizers by natural-oil-based poly (urethane) coatings: The kinetic aspects of urea release. *Journal of Applied Polymer Science*. 133(33).
- Chen, F., Ye, F., Chu, G., Guo, J. and Huo, L. (2010). Synthesis of acrylate modified vinyl chloride and vinyl isobutyl ether copolymers and their properties. *Progress in Organic Coatings*. 67(1), 60-65.
- Chia, W.Y., Chew, K.W., Le, C.F., Lam, S.S., Chee, C.S.C., Ooi, M.S.L. and Show, P.L. (2020). Sustainable utilization of biowaste compost for renewable energy and soil amendments. *Environmental Pollution*, 267, 115662.
- Davidson, D. and Gu, F.X. (2012). Materials for sustained and controlled release of nutrients and molecules to support plant growth. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 60(4), 870-876.
- Dong Feng, G., Ma, Y., Zhang, M., You Jia, P., Hong Hu, L., Guo Liu, C. and Hong Zhou, Y. (2019). Polyurethane-coated urea using fully vegetable oil-based polyols: Design, nutrient release and degradation. *Progress in Organic Coatings*. 133, 267-275.
- Duan, Y., Pandey, A., Zhang, Z., Awasthi, M.K., Bhatia, S. K. and Taherzadeh, M.J. (2020). Organic solid waste biorefinery: Sustainable strategy for emerging circular bioeconomy in China. *Industrial Crops and Products*, 153, 112568.
- Fan, L.T. and Singh, S.K. (2012). Introduction. In L.T. Fan, and S.K. Singh (Eds.), *Controlled Release: A Quantitative Treatment*, Springer Science & Business Media: Berlin/Heidelberg, Germany, Vol. 13, pp. 1-8.
- Ghorbani, M., Aboonajmi, M., Ghorbani, Javid M. and Arabhosseini, A. (2017a). Effect of ultrasound extraction conditions on yield and antioxidant properties of the fennel seed (*Foeniculum vulgare*) extract. *Iranian Journal of Food Science and Technology*. 14(67), 63-73. (In Farsi)
- Ghorbani, M., Aboonajmi, M., Ghorbani Javid, M. and Arabhosseini, A. (2017b). Effect of ultrasound waves on the amount of ascorbic acid extraction from fennel seeds and potential of its extraction for improvement of antioxidant properties. *Journal of Food Research*, 27(1): 59-71. (In Farsi)
- Ghorbani, M., Aboonajmi, M., Ghorbani Javid, M. and Arabhosseini, A. (2018). Optimization of ultrasound-assisted extraction of ascorbic acid from fennel (*Foeniculum vulgare*) seeds and evaluation its extracts in free radical scavenging. *AgricEngInt: CIGR Journal*. 19(4), 209-218.
- Ghorbani, M., Kianmehr, M.H., Arabhosseini, A., Asadi Alamouti, A. and Sadeghi, R. (2021a). Elucidating the chemical, spectral and micro-structural changes of wheat straw biomass during combined ozone-alkali pretreatment. *Journal of Researches in Mechanics of Agricultural Machinery*. In Press, In Press. (In Farsi)
- Ghorbani, M., Kianmehr, M.H., Arabhosseini, A., Asadi Alamouti, A. and Sadeghi, R. (2021b). Ozonolysis Pretreatment of Wheat Straw for Enhanced Delignification: Applying RSM Technique for Modeling and Optimizing Process. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*. 52(1), 37-53. (In Farsi)
- Ghorbani, M., Kianmehr, M. H., Arabhosseini, A., Sarlaki, E., Aghashahi, A. R., & Asadi Alamouti, A. (2021c). Improving the nutritive value of wheat straw by applying the combined chemical - oxidation treatment in-vitro for use as ruminant feed. *Animal Production Research*. In Press, In Press. (In Farsi)
- Gil-Ortiz, R., Naranjo, M.Á., Ruiz-Navarro, A., Caballero-Molada, M., Atares, S., García, C. and Vicente, O. (2020). New Eco-Friendly Polymeric-Coated Urea Fertilizers Enhanced Crop Yield in Wheat. *Agronomy*. 10(3), 438.
- Giroto, A.S., de Campos, A., Pereira, E.I., Cruz, C.C.T., Marconcini, J.M. and Ribeiro, C. (2014). Study of a nanocomposite starch-clay for slow-release of herbicides: Evidence of synergistic effects

- between the biodegradable matrix and exfoliated clay on herbicide release control. *Journal of Applied Polymer Science*. 131(23), 41188.
- Groenendijk, M. (2008). Fabrication of Super Hydrophobic Surfaces by fs Laser Pulses. *Macro Material Processing*. 5(3), 44-48.
- Hadas, A., Bar-Yosef, B., Davidov, S. and Sofer, M. (1983). Effect of pelleting, temperature, and soil type on mineral nitrogen release from poultry and dairy manures. *Soil Science Society of America Journal*. 47(6), 1129.
- Hashemi, S.Z. (2013). *Studies on encapsulation of pelletized biomass*. Master of Applied Science, Chemical and Biological Engineering, Department of Agronomy, University of British Columbia, Canada.
- Heinze, G. (1999). Extrusion plate for pelleting compost. DE19925650A1 Patent, Germany.
- Himmah, N.I.F., Djajakirana, G. and Darmawan, D. (2018). Nutrient release performance of starch coated NPK fertilizers and their effects on corn growth. *Journal of Soil Science and Agroclimatology*. 15(2), 104-114.
- Iftime, M.M., Ailiesei, G.L., Ungureanu, E. and Marin, L. (2019). Designing chitosan based eco-friendly multifunctional soil conditioner systems with urea controlled release and water retention. *Carbohydrate Polymers*. 223, 115040.
- Lawrencia, D., Wong, S.K., Low, D.Y.S., Goh, B.H., Goh, J.K., Ruktanonchai, U.R., Soottitawat, A., Lee, L.H. and Tang, S.Y. (2021). Controlled Release Fertilizers: A Review on Coating Materials and Mechanism of Release. *Plants*. 10, 238.
- Liu, L., Kost, J., Fishman, M.L. and Hicks, K.B. (2008). A review: Controlled release systems for agricultural and food applications. *American Chemical Society*. 992, 265-281.
- Liu, L., Ni, Y., Zhi, Y., Zhao, W., Pudukudy, M., Jia, Q., Shan, S., Zhang, K. and Li, X. (2020). Sustainable and biodegradable copolymers from SO₂ and renewable eugenol: a novel urea fertilizer coating material with superior slow release performance. *Macromolecules*. 53, 936-945.
- Martínez-Blanco, J., Muñoz, P., Antón, A. and Rieradevall, J. (2009). Life cycle assessment of the use of compost from municipal organic waste for fertilization of tomato crops. *Resources, Conservation & Recycling*. 53(6), 340-351.
- Mcmullen, J., Fasina, O., Wood, W., Feng, Y. and Mills, G. (2004). Physical Characteristics of Pellets from Poultry Litter. Phys. Charact. Pellets from Poultry Litter, Ottawa, Canada, August 1-4.
- Messiga, A.J., Dyck, K., Ronda, K., Van Baar, K., Haak, D., Yu, S. and Dorais, M. (2020). Nutrients Leaching in Response to Long-Term Fertigation and Broadcast Nitrogen in Blueberry Production. *Plants*. 9, 1530.
- Michael, N. and Bhushan, B. (2007). Hierarchical roughness makes superhydrophobic states stable. *Microelectronic Engineering*. 84(3), 382-386.
- Motamedi, E., Motesharezedeh, B., Shirinfekr, A. and Samar, S.M. (2019). Synthesis and swelling behavior of environmentally friendly starch-based superabsorbent hydrogels reinforced with natural char nano/micro particles. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 103583.
- Moslehi Roodi, S., Abbaspour-Fard, M. H. and Aghkhani, M.H. (2020). Improvement of centrifugal spreader performance in order to spread the pellet fertilizer. *Agricultural Mechanization and Systems Research*. 20(71), 93-112.
- Niu, Y., Ke, R., Yang, T. and Song, J. (2020). pH-responsively water-retaining controlled-release fertilizer using humic acid hydrogel and nano-silica aqueous dispersion. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 20(4), 2286-2291.
- Perez, J.J. and Francois, N.J. (2016). Chitosan-starch beads prepared by ionotropic gelation as potential matrices for controlled release of fertilizers. *Carbohydrate Polymers*. 148, 134-142.
- Purnomo, C.W., Indarti, S., Wulandari, C., Hinode, H. and Nakasaki, K. (2017). Slow release fertilizer production from poultry manure. *Chemical Engineering Transactions*. 56, 1531-1536.
- Roach, P., Shirtcliffe, N.J. and Newton, M.I. (2008). Progress in superhydrophobic surface development. *Soft Matter*. 4(2), 224-240.
- Rychter, P., Kot, M., Bajer, K., Rogacz, D., Sišková, A. and Kapuśniak, J. (2016). Utilization of starch films plasticized with urea as fertilizer for improvement of plant growth. *Carbohydrate Polymers*. 137, 127-138.
- Salimi, M., Motamedi, E., Motesharezedeh, B., Davoodi, D., Alikhani, H.A. and Hosseini, H.M. (2021). Synthesis of Slow-release Urea Fertilizer Using Starch-based Polymer Nanocomposite Coating and Investigation of Its Effect on Tomato Growth. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 52(2), 301-312. (In Farsi)
- Salimi, M., Motamedi, E., Motesharezedeh, B., Hosseini, H.M. and Alikhani, H.A. (2020). Starch-g-poly (acrylic acid-co-acrylamide) composites reinforced with natural char nanoparticles toward environmentally benign slow-release urea fertilizers. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 103765.
- Sarlaki, E., Aboonajmi, M., Marzban, I. and Bakhshi, H.R. (2019a). Green technologies: An innovative and sustainable approaches in the extraction of bioactive compounds from agro-food wastes. *Green chemistry and sustainable process*. 1(1), 13-32. (In Farsi)
- Sarlaki, E., Kermani, A.M., Kianmehr, M.H., Asefpour Vakilian, K., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Ma, N.L., Aghbashlo, M., Tabatabaei, M. and Lam, S.S. (2021a). Improving sustainability and mitigating environmental impacts of agrobiowaste compost fertilizer by pelletizing-drying. *Environmental Pollution*. 285, 117412.
- Sarlaki, E., Kianmehr, M.H. and Ghorbani, M. (2021b). Analytical methods for assessing the quality of sugarcane bagasse compost and improving the

- physicomechanical properties toward densification. *Environmental Sciences*. In Press, In Press. (In Farsi)
- Sarlaki, E., Kianmehr, M.H., Ghorbani, M. and Azadegan, B. (2021c). Optimization of pelletizing process of sugarcane bagasse compost using response surface methodology and evaluation of release rate of nitrogen from pellet. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 52(4), 1117-1133. (In Farsi)
- Sarlaki, E., Kianmehr, M.H. and Mashaallah Kermani, A. (2021d). Recent advances and research trends in the eco-friendly lignin-based fertilizers: production technologies, process mechanisms and performance appraisal. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. In press, In press. (In Farsi)
- Sarlaki, E., Sharif Paghaleh, A., Kianmehr, M.H. and Asefpour Vakilian, K. (2019b). Extraction and purification of humic acids from lignite wastes using alkaline treatment and membrane ultrafiltration. *Journal of Cleaner Production*. 235, 712-723.
- Sarlaki, E., Sharif Paghaleh, A., Kianmehr, M.H. and Asefpour Vakilian, K. (2020a). Chemical, spectral and morphological characterization of humic acids extracted and membrane purified from lignite. *Chemistry and Chemical Technology*. 14(3), 353-361.
- Sarlaki, E., Sharif Paghaleh, A., Kianmehr, M.H. and Asefpour Vakilian, K. (2021e). Valorization of lignite wastes into humic acids: Process optimization, energy efficiency and structural features analysis. *Renewable Energy*. 163, 105-122.
- Sarlaki, E., Sharif Paghaleh, A., Kianmehr, M.H. and Mirsaedghazi, H. (2017). Effect of processing temperature on membrane ultrafiltration of lignite coals-derived humic alkaline extracts, membrane performance and humic acid purity. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*. 48, 475-489. (In Farsi)
- Sarlaki, E., Sharif Paghaleh, A., Kianmehr, M.H., and Shakiba, N. (2018). Study of spectral, structural and chemical characteristics of humic acids isolated from coalfield of Iran. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 48(5), 1145-1158. (In Farsi)
- Sarlaki, E., Sharif Paghaleh, A., Kianmehr, M.H., Shakiba, N., Asefpour Vakilian, K. and Mirsaedghazi, H. (2020b). Post-treatment of lignite-derived humate alkaline extracts using membrane-based technology for high-purity humic acid production. *Journal of Environmental Science and Technology*. In Press, In Press. (In Farsi)
- Sarlaki, E., Sokhandan Toomaj, M., Sharif Paghaleh, A., Kianmehr, M.H. and Nikousefat, O. (2019c). Extraction of humic acid from lignite coals using stirred tank reactors (STRs): Assessment of process parameters and final product characterization. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 50, 1111-1125. (In Farsi)
- Sharif Paghaleh, A., Sarlaki, E., Kianmehr, M.H. and Shakiba, N. (2017). Study of spectral, structural and chemical characteristics of humic acids isolated from coalfield of Iran. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 48, 1145-1158. (In Farsi)
- Sarlaki, E., Sharif Paghaleh, A. and Nikousefat, O. (2016). Humic acid: structural properties and multiple functionalities for novel technological developments. 1th National Conference on Advances in Science and Technology. Tehran, Iran.
- Shaviv, A. (2005). Controlled release fertilizers. IFA International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertilizers, Frankfurt, International Fertilizer Industry Association, Paris, France.
- Shi, W., Ju, Y., Bian, R., Li, L., Joseph, S., Mitchell, D.R., Munroe, P., Taherymoosavi, S. and Pan, G. (2020). Biochar bound urea boosts plant growth and reduces nitrogen leaching. *Science of the Total Environment*. 701, 134424.
- Souri, M.K., Naiji, M. and Kianmehr, M.H. (2019). Nitrogen release dynamics of a slow release urea pellet and its effect on growth, yield, and nutrient uptake of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). *Journal of Plant Nutrition*. 42(6), 604-614.
- Tajinia, R., Kianmehr, M.H., Sarlaki, E., Sharif Paghaleh A. and Mirsaedghazi, H. (2020). Extracting humic acids from spend mushroom compost (SMC) by alkaline treatment and membrane ultrafiltration. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*. 50, 847-861. (In Farsi)
- TMECC. (2002). *Test Methods for the Examination of Composts and Composting*. US Composting Council.
- Trenkel, M.E. (2010). Slow-and Controlled-Release and Stabilized Fertilizers: An Option for Enhancing Nutrient Use Efficiency in Agriculture. IFA, International Fertilizer Industry Association: Berlin, Germany.
- Versino, F., Urriza, M. and García, M.A. (2019). Eco-compatible cassava starch films for fertilizer controlled-release. *International Journal of Biological Macromolecules*. 134, 302-307.
- Yang, Y.C., Tong, Z.H., Geng, Y.Q., Li, Y.C. and Zhang, M. (2013). Biobased polymer composites derived from corn stover and feather meals as double-coating materials for controlled-release and water retention urea fertilizers. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 61(34), 8166-8174.
- Zhang, S., Yang, Y., Gao, B., Li, Y. C. and Liu, Z. (2017). Superhydrophobic controlled-release fertilizers coated with bio-based polymers with organosilicon and nano-silica modifications. *Journal of Materials Chemistry A*. 5(37), 19943-19953.